



MAZDA TECHNICAL REVIEW

マツダ技報 2019 No.36



マツダ技報

Mazda Technical Review

2019 No. **36**

マツダ技報 第36号 (2019)

目次

巻頭言	中井英二	1
特集：新型MAZDA3		
1. 新型MAZDA3の紹介	別府耕太, 柴田恵一郎, 木下勝之 岩本信也, 宮本健作	3
2. 新型MAZDA3のデザイン	土田康剛	11
3. 新世代ガソリンエンジンSKYACTIV-Xの紹介	磯部利太郎, 遠藤孝次, 末岡賢也	16
4. SKYACTIV-Xを実現する燃焼技術	漆原友則, 松本浩太, 末岡賢也 井上 淳, 丸山慶士, 山口直宏 森本博貴, 松尾佳朋	24
5. SKYACTIV-X用熱マネージメント技術	幸徳正信, 早川元雄, 宮本晃一 石原太郎, 岡村和美, 菅崎健二 引谷晋一, 高旗達也	32
6. SKYACTIV-X NVH技術	神田靖典, 藤川智士, 升岡大智 須藤康博, 新田雅俊, 山本高弘 松本真典	38
7. SKYACTIV-Xに適用する燃焼予測技術	河野通治, 本田雄哉, 和田好隆 上村 匠, 植木義治, 横畑英明	44
8. 新型2L直列4気筒「SKYACTIV-X」のエンジン技術	西田良太郎, 中原康志, 西田正美 山谷光隆, 加藤二郎, 高旗達也 岡澤寿史, 福馬真生	51
9. SKYACTIV-Xの制御システム	津村雄一郎, 楠 友邦, 竹本和洋 木下真幸, 寺元 亮, 伊藤剛豊	59
10. 新型MAZDA3 M Hybrid技術	森本昌介, 大塚雄太, 枝廣育実 内藤 潤, 岡田久伸, 白石啓光 清水正寛, 栗原 健	66
11. 新型MAZDA3 M Hybrid デバイス開発	吉田勝正, 田村和寛, 中上信宏 西田史彦, 坂上 翔, 仲間彰子 楊 殿宇, 中村浩之	71
12. 新型MAZDA3の軽量・高剛性ボディー開発	佐藤健一, 川野晃寛, 中内 繁 後藤英貴, 亀井丈広, 田中潤一	78
13. 新型MAZDA3サイドドアの静粛性開発	高谷洋隆, 高橋信之, 雪田恭兵 黒木大史, 松並裕美子	83
14. 新型MAZDA3のビークルダイナミクス技術	塚根芳将, 富家 進, 元吉菜緒子 吉村匡史	90

15. 新型MAZDA3の静粛性開発について	伊藤 肇, 富士田拓也, 黒川 将 大森和也, 石塚 勝, 上田高裕	96
16. 新型MAZDA3の熱流体エネルギーマネジメント技術	久我秀功, 太田健太郎, 伊川雄希 坂下泰靖, 西田周平, 溝兼通矢 岡本 哲	102
17. 新型MAZDA3のブレーキフィールの開発	池見 清, 加村孝信, 開原真一 丹羽正浩	107
18. 新型MAZDA3の衝突安全性能	竹村征樹, 木戸啓人, 石川 靖 川本篤史, 井上伸生, 田口征吾 鬼頭応時, 丸山 勉	113
19. 新型MAZDA3 サウンドシステムの開発	六浦 潔, 若松功二, 山中尋詞 平尾幸樹, 西嶋孝祥, 手島由裕	119
20. 新世代リアガラスアンテナシステムの開発	志村俊幸, 重田一生, 長嶺晋路 森 大輝, 田中真帆, 島谷信行 沼元正樹, 三宅弘一	125
21. カメラを用いたドライバー・モニタリングの開発	後藤誠二, 峯岸由佳, 山本直樹 森谷貴行, 中村 創, 片山翔太	130
22. 新マツダコネクトの開発	日原圭祐, 平嶋秀一, 藤丸翔太 古屋勝俊, 伊藤裕規, 節家 淳 中尾堅志, 赤坂佳紀, 岡野英紀	136
23. 新世代ワイパーシステムの開発	近藤啓介, 畠中 威, 山内 一平 青木 茂, 井上俊一, 伊藤孝治	144
24. 新型MAZDA3の車両電子制御システム	薬師寺英明	149

特集：新世代商品群の生産技術

25. マス・クラフツマンシップへの変革	安達範久	154
26. 「魂動デザイン」の深化に向けたこだわりのモノ造り ～金型加工精度を向上させる空調空間の造り込み～	中山教憲, 名越 慶, 森下 喬 井川史朗, 木谷英治	159
27. 「魂動デザイン」を支える技能者の育成	久保祐貴, 須賀 実, 大谷卓史 加藤康裕, 江草秀幸, 大田敦史	165
28. 「魂動デザイン」の深化を実現する樹脂成形技術の開発	埜 慎一, 田中宣隆, 田中慶和 影本真也	171
29. 「人馬一体」を実現する動的ホイールアライメントの 造り込み	福永 明, 井上大河, 土井洋子 高本尚志, 金 壯憲, 鈴村竜司	177
30. リヤホイールアーチヘムの高精度シーリングと 品質保証システム	服部博晃, 石崎 剛, 福田靖英 辻 雅一	185
31. 1310MPa級高張力鋼板冷間プレス部品の開発	酒井 明, 松本 茂, 矢野峰治 田丸真司, 新井直樹, 吉崎真吾 庄司庸平, 末長昭大	192
32. 「魂動デザイン」を実現する 高精度ドア自動組付技術の開発	中野直樹, 中林裕介, 庄司光宏	199

33. アルミ切削加工のための低コスト高能率加工技術開発	榎本智章, 林 一哉, 増田雅彦 森本博幸, 藤原秀行	207
34. 走る喜びを実現するAPMC鑄造のモデルベース開発	國松大知, 菅谷 智, 橋本修一 村瀬宏治, 小杉一浩, 丸尾幸治	212
論文・解説		
35. NA ロードスター レストアサービスの紹介	山本修弘, 西田芳伸, 伏見 亮 國本拓也, 野村裕之, 中矢健次	219
36. バイオエンブラ新意匠2層成形技術の開発	一原洋平	225
37. 車両を運転する人間の姿勢変化の観察に基づく考察	徳光文広, 鐵本雄一	229
38. G-Vectoring Control Plus の開発	梅津大輔, 高原康典, 砂原 修 加藤史律, 津村和典	235
39. 新開発SKYACTIV-D 1.8 の紹介	丸岡規之, 平林千典, 福馬真生 森永真一, 牛谷真樹, 三村勇樹	241
40. 「人馬一体」を実現する駆動力制御システム開発	山崎篤史, 名越匡宏, 津田 顕 石山雄貴, 多田 努, 渡部雅晃	247
41. システムからハーネス設計まで一気通貫した エレキシステム開発	竹本 明, 安原潤紀, 高田純司 戸手孝則, 戸井隆史	253
42. 人間特性に基づく情報伝達音の開発	大杉郁代, 井野寿信, 大池太郎 浜田 康, 手島由裕	259
43. 高温高圧雰囲気における水添加が 自着火・燃焼反応におよぼす影響	葛 晰遥, 原田雄司, 清末 涼 山下洋幸, 山本寿英	265
44. 自動車車体構造の設計支援技術の開発	鋸持寛正, 小平剛央	272
45. 放射光を活用した自動車用材料分析の取り組み	三根生晋, 國府田由紀, 百崎賢二郎 中西美恵, 住田弘祐	277
46. 構造接着を用いた車体振動減衰技術の開発	山本研一, 中川興也, 氷室雄也 渡邊重昭, 小橋正信, 吉田智也 三好雄二, 伊藤 司, 鍵元皇樹 八巻 悟, 片岡伸介	283
社外への発表論文一覧表		289

Mazda Technical Review No.36

CONTENTS

Foreword

<i>(E. Nakai)</i>	1
-------------------------	---

Special Edition for All-New Mazda3

1. Introduction of All-New Mazda3 <i>(K. Beppu, K. Shibata, K. Kinoshita, S. Iwamoto, K. Miyamoto)</i>	3
2. Design for All-New Mazda3 <i>(Y. Tsuchida)</i>	11
3. New-Generation Gasoline Engine "SKYACTIV-X" <i>(R. Isobe, K. Endo, M. Sueoka)</i>	16
4. The Combustion Technology Enabling the SKYACTIV-X Performance <i>(T. Urushihara, K. Matsumoto, M. Sueoka, A. Inoue, K. Maruyama, N. Yamaguchi, H. Morimoto, Y. Matsuo)</i>	24
5. Thermal management technology for SKYACTIV-X <i>(M. Koutoku, M. Hayakawa, K. Miyamoto, T. Ishihara, K. Okamura, K. Sugasaki, S. Hikitani, T. Takahata)</i>	32
6. Innovative NVH Technology for SKYACTIV-X <i>(Y. Kanda, S. Fujikawa, T. Masuoka, Y. Sudo, M. Nitta, T. Yamamoto, M. Matsumoto)</i>	38
7. Combustion Simulation Technology Applied to SKYACTIV-X <i>(M. Kawano, Y. Honda, Y. Wada, T. Uemura, Y. Ueki, H. Yokohata)</i>	44
8. Newly Developed In-line Four-cylinder Engine "SKYACTIV-X" <i>(R. Nishida, Y. Nakahara, M. Nishida, M. Yamaya, J. Kato, T. Takahata, H. Okazawa, M. Fukuma)</i>	51
9. Control System of SKYACTIV-X <i>(Y. Tsumura, T. Kusunoki, K. Takemoto, M. Kinoshita, R. Teramoto, T. Ito)</i>	59
10. M Hybrid Technology for All-New Mazda3 <i>(S. Morimoto, Y. Otsuka, I. Eda, H. Naito, H. Okada, H. Shiraishi, M. Shimizu, T. Kurihara)</i>	66
11. Development of All-New Mazda3 M Hybrid Device <i>(K. Yoshida, K. Tamura, N. Nakagami, F. Nishida, S. Sakagami, A. Nakama, T. Yan, H. Nakamura)</i>	71
12. Development of Light Weight and High-Rigidity Body Structure for All-New Mazda3 <i>(K. Sato, A. Kawano, S. Nakauchi, H. Goto, T. Kamei, J. Tanaka)</i>	78
13. Quietness Technology for All-New MAZDA3 Side-Door <i>(H. Takaya, N. Takahashi, K. Yukita, D. Kuroki, Y. Matsunami)</i>	83
14. Vehicle Dynamics Technology for All-New Mazda3 <i>(Y. Tsukane, S. Tomiie, N. Motoyoshi, T. Yoshimura)</i>	90
15. Quietness Development for All-New Mazda3 <i>(H. Ito, T. Fujita, S. Kurokawa, K. Omori, M. Ishizuka, T. Ueda)</i>	96
16. Technology of Thermal Fluid Energy Management for All-New Mazda3 <i>(Y. Kuga, K. Ota, Y. Ikawa, H. Sakashita, S. Nishida, M. Mizokane, S. Okamoto)</i>	102
17. Development of All-New Mazda3 Brake Feeling <i>(K. Ikemi, T. Kamura, S. Kaihara, M. Niwa)</i>	107

18. Passive Safety of All-New Mazda3 (<i>M. Takemura, H. Kido, Y. Ishikawa, A. Kawamoto, N. Inoue, S. Taguchi, M. Kito, T. Maruyama</i>)	113
19. Development of Sound for All-New Mazda3 (<i>K. Mutsura, K. Wakamatsu, H. Yamanaka, K. Hirao, T. Nishijima, Y. Teshima</i>)	119
20. Development of New Generation Rear Glass Antenna System (<i>T. Shimura, K. Shigeta, S. Nagamine, D. Mori, M. Tanaka, N. Shimatani, M. Numoto, K. Miyake</i>)	125
21. Development of Driver Monitoring Using Camera (<i>S. Goto, Y. Minegishi, N. Yamamoto, T. Moritani, H. Nakamura, S. Katayama</i>)	130
22. Development of New Mazda Connect (<i>K. Hihara, H. Hirashima, S. Fujimaru, K. Furuya, Y. Ito, A. Setsuie, S. Nakao, Y. Akasaka, H. Okano</i>)	136
23. Development of Wiper System for New Generation Vehicles (<i>K. Kondo, T. Hatakenaka, I. Yamauchi, S. Aoki, S. Inoue, K. Ito</i>)	144
24. New Vehicle Control System for All-New Mazda3 (<i>H. Yakushiji</i>)	149

Special Edition for Production Engineering of New Generation Models

25. Development of Mass Craftsmanship Production System (<i>N. Adachi</i>)	154
26. Special Manufacturing toward "KODO" Design Deepening -Craftsmanship for Air Condition Space to Improve Die Machining Accuracy- (<i>T. Nakayama, K. Nagoshi, T. Morishita, S. Ikawa, E. Kitani</i>)	159
27. Nurturing of Craftsmen to Support "KODO Design" (<i>Y. Kubo, M. Suga, T. Ohtani, Y. Kato, H. Egusa, A. Ohta</i>)	165
28. Development of Plastic Molding which Realizes Deepening of "Kodo design" (<i>S. Tao, N. Tanaka, Y. Tanaka, S. Kagemoto</i>)	171
29. Building Quality of Dynamic Wheel Alignment to Realize "Jinba Ittai" (<i>A. Fukunaga, T. Inoue, Y. Doi, T. Takamoto, C. Kim, R. Suzumura</i>)	177
30. The High Accuracy Sealing and All Number Guarantees of the Rear Wheel Arch Hem (<i>H. Hattori, G. Ishizaki, Y. Fukuda, M. Tsuji</i>)	185
31. Development of 1310MPa Class High Tension Steel Sheet Cold Stamping Parts (<i>A. Sakai, S. Matsumoto, M. Yano, S. Tamaru, N. Arai, S. Yoshizaki, Y. Shoji, A. Suenaga</i>)	192
32. Development of Door Automatic Assembly Technology with High Accuracy to Realize "Kodo Design" (<i>N. Nakano, Y. Nakabayashi, M. Shoji</i>)	199
33. Low Cost High Efficiency Machining Technology for Aluminum Cutting (<i>T. Enomoto, K. Hayashi, M. Masuda, H. Morimoto, H. Fujiwara</i>)	207
34. Model-Based-Development of Advanced Precision Mazda Casting to Realize Celebrate Driving (<i>D. Kunimatsu, S. Sugaya, S. Hashimoto, K. Murase, K. Kosugi, K. Maruo</i>)	212

Technical Reports

35. Introduction of NA Roadster Restore Service (<i>N. Yamamoto, Y. Nishida, A. Fushimi, T. Kunimoto, H. Nomura, K. Nakaya</i>)	219
36. Development of New-design Two-layer Molding Technology using Bio-based Engineering Plastic (<i>Y. Ichihara</i>)	225

37. Consideration Based on Observation of Human Posture Change to Drive Vehicle (<i>F. Tokumitsu, Y. Tetsumoto</i>)	229
38. Development of G-Vectoring Control Plus (<i>D. Umetsu, Y. Takahara, O. Sunahara, F. Kato, K. Tsumura</i>)	235
39. Introduction of newly developed SKYACTIV-D 1.8 (<i>N. Maruoka, K. Hirabayashi, M. Fukuma, S. Morinaga, M. Ushitani, Y. Mimura</i>)	241
40. Development of Driving Force Control System to Realize “Jinba Ittai” (<i>A. Yamasaki, M. Nagoshi, A. Tsuda, Y. Ishiyama, T. Tada, M. Watanabe</i>)	247
41. Seamless Electric System Development from System Design to Harness Design (<i>A. Takemoto, J. Yasuhara, J. Takata, T. Tode, T. Toi</i>)	253
42. Information Transmission Sounds Development Grounded on Human Characteristics (<i>I. Ohsugi, H. Ino, T. Oike, Y. Hamada, Y. Teshima</i>)	259
43. The Effect of Water Addition on Auto-Ignition and Combustion under High Temperature and Pressure Condition (<i>Ge Xiyao, Y. Harada, R. Kiyosue, H. Yamashita, T. Yamamoto</i>)	265
44. Development of Computer Aided Designing Technology for Car Body Structure Design (<i>H. Kemmotsu, T. Kohira</i>)	272
45. Synchrotron X-ray Analysis for Automobile Materials (<i>S. Mineoi, Y. Koda, K. Momosaki, M. Nakanishi, H. Sumida</i>)	277
46. Development of Damping Technology for Car Body Using Structural Adhesive Bonding (<i>K. Yamamoto, K. Nakagawa, K. Himuro, S. Watanabe, M. Kobashi, T. Yoshida, Y. Miyoshi, T. Ito, K. Kagimoto, S. Yamaki, S. Kataoka</i>)	283
List of Reports Published in 2018	289

巻頭言

日常を豊かにする技術とモデルベース開発

Technologies and Model-Based Development that Improve the Quality of Human Life



執行役員

中井 英二
Eiji Nakai

マツダ技報は2019年で第36回の発行となる。2012年にSKYACTIV技術を全て採用した車両が商品化されて以来、究極の姿を描きそれに向けてたどってきた技術進化の道程が、マツダ技報へ刻まれてきた。そして今回は、大きなステップアップを図る新世代商品群の第1弾「新型MAZDA3」と「新世代商品群の生産技術」を中心に、商品、技術、生産に関してマツダならではの取り組みを特集した。

2017年の8月8日に技術開発の長期ビジョン「サステナブル“Zoom-Zoom”宣言2030」を公表し、私たちマツダは美しい地球と心豊かな人・社会の実現を使命と捉え、クルマの持つ価値により、人の心を元気にすることを追究し続けていくことを宣言した。地球環境保全の観点からは、真に温室効果ガスの削減を図るため、クルマのライフサイクル全体でのCO₂削減に取り組む必要がある。具体的な目標は、Well to Wheelの企業平均CO₂を2050年には2010年比90%削減を睨み、その中間目標として2030年時点で50%の削減を目指すことを宣言している。2030~35年でも乗用車の80%以上は何らかの形で内燃機関が関わり、そしてその絶対数も増加する予測である。自動車の動力源の主流は将来にわたっても内燃機関であり、内燃機関の効率改善こそが地球規模での環境保全に大きく貢献できることを謳っている。

マツダの内燃機関は、2011年のSKYACTIV元年に30km/Lを実現したSKYACTIV-G1.3の発表を皮切りに、理想の内燃機関及び究極の燃焼の姿を目指して、ガソリンエンジンとディーゼルエンジンの両面から実現を図ると宣言し邁進している。内燃機関の7つの制御因子を定め、それらを最終的には理想状態とすることで、燃料によらず究極の内燃機関を目指す。ロスを最小にしてタイヤへの駆動力をねらいどおりに伝達するためのドライブレインの開発、そして、ブレーキなどで捨てているエネルギーを回生するシステムから始めて、Well to Wheelの観点で真にCO₂低減に貢献する地域や、法規で必要な地域を中心とした活用を図る電気自動車まで、合理的な順序で電動化開発も進めている。

理想をかざして、それを実現するというのは、なかなか難しい。一步踏み出したとたんに、あちらを立てればこちらが立たずという多くの技術課題にすぐにぶつかる。そこには先人たちが構築した理論や常識の制約が存在する。まずはこの理屈を理解した上で、よく疑い、考えてみることから始める。一足飛びには行かないことは容易に想像できる。ではSTEPに分ければどうだろう。実現できるような気

がしてくるから不思議だ。

SKYACTIV-X は、ガソリンエンジンの第2STEP のエンジンである。詳しい技術内容については本篇に譲るが、ガソリンエンジンの理論熱効率率は圧縮比（どれだけの仕事をとりだせるか）と比熱比（投入した熱量をどれだけ仕事に変えられるか）が高いほど、高まることが知られている。第1STEP は、圧縮比を高めることに着目し、第2STEP は、比熱比を高めることに着目した。その際、ディーゼルエンジンの第1STEP で実現した予混合圧縮着火をガソリンエンジンに適用しており、技術をクロスオーバーさせている。

構成部品については、年々技術レベルの向上が図られており他社や自社のガソリンやディーゼルエンジンで活用している要素技術の採用がほとんどであり、新しいハードウェアとしては筒内圧力を監視するセンサーと、ガソリンエンジンとしては高圧の燃料噴射装置であろう。それでもガソリンの圧縮着火によるリーン燃焼という夢の扉を開けることができたのは、モデルベース開発を愚直に実行してきたからに他ならない。複雑な空気流動と、その中での燃料噴霧のふるまい、そして火炎伝播と圧縮着火と形態の異なる燃焼の化学反応をモデル化し、それらをリーン燃焼に必要なより多くの制御パラメータの組み合わせにより最適化させるための膨大な燃焼解析計算をおこなった。連携しあうそれぞれの領域で等しく高精度なモデル化が実現でき、そのからくりを理解した高度な制御技術、そして生産技術をはじめとする独自のものづくり力がなければ、ここまでたどり着かなかっただろう。モデルベース開発は私達技術者の文化になっており、全員がその有用性を得心し、そのことによってイノベーションを起こすことができることを理解する土壌ができつつあることが何よりもうれしい。今後もモデルを使ってより広く大きな世界で連携し適用を図っていくことが、さらなる技術進化へとつながると確信している。

ガソリンエンジンは第2STEP 技術の展開と Final STEP へと向かう。最も効率の良い火力発電の電気で走る EV よりも Well to Wheel で CO₂ 排出量の少ない内燃機関中心の車の早期実現を目指す。

2012 年当時、世の中はハイブリッド、電気自動車というシナリオが主流であり、それに対し内燃機関は効率改善の余地が沢山残されていることを主張した SKYACTIV 技術は、再び内燃機関の価値に目を向けるという大きな影響を業界に与えることができたと思っている。しかし、2019 年の今は CASE という形で、内燃機関だけでなく、自動車業界がさらなる厳しさを増している。いまこそ踏ん張って、ここで紹介する新世代商品群を世に問い、正しい方向とは何かを考える機会を再び提供したい。

技術は、人間の生活を豊かにするために使われるべきである。究極の姿を実現することは、それを実現することによって、人々の生活が心身共に豊かになるから意味があるのである。

無駄をなくすこと、効率を高めることは技術の一側面であり、それが与える人への影響を考えないで数字だけ追い求めることは、人間中心の技術とはいえないであろう。燃料をあまり使わなくても沢山の仕事が広い範囲で取り出せてきれいに燃やせて音が気にならない方向へ、応答の良さはクルマを身体が拡張したかのように扱える方向へコントロールし、コストがかからない工夫とともに、心豊かな人・社会の実現を目指す技術へと進みたい。それゆえ、技術は人間中心の哲学の下、その経済性、弊害、をしっかりと確認し対応しながら、技術に対して謙虚な姿勢を忘れずにゆっくり急いで進化していくことが大事だと考える。

今後とも、マツダ技報において、理想の姿に真っ先に近づくためにモデルベース開発を駆使し、独自性あふれる正しく理にかなった技術の紹介が続いていくことを期待し、巻頭言とする。

特集：新型MAZDA3

1

新型MAZDA3の紹介

Introduction of All-New Mazda3

別府 耕太*1 柴田 恵一郎*2 木下 勝之*3
Kota Beppu Keiichiro Shibata Katsuyuki Kinoshita
岩本 信也*4 宮本 健作*5
Shinya Iwamoto Kensaku Miyamoto

要 約

MAZDA3は長きにわたりお客様との絆を深めてきた、マツダブランドの顔ともいえる特別なモデルである。近年の自動車産業にとって構造改革が迫られるほどの変化が起きている中で、世界中の全てのお客様に再び驚きと喜びを与えるために、マツダはこの特別なモデルであるMAZDA3を新世代商品群の幕開けを飾るモデルとして世に送り出した。

新型MAZDA3が目指したのは、「誰もが羨望するクルマ」になることである。奇をてらうことなく、走り・静粛性・クラフトマンシップ・環境性能・デザインなどクルマとして当たり前のことを、徹底的な人間研究に基づき感動のレベルまで高めることに挑戦した。

まるで歩いているかのような自然な運転感覚。人間の耳が感じる音の変化や届き方までコントロールした静粛性。あらゆる音域をクリアに好みに合わせて楽しむことができるオーディオシステム。ハッチバック（ファストバック）とセダン、それぞれのボディタイプで強い個性を持たせたエクステリアデザイン。

これらの魅力に溢れた新型MAZDA3がお客様の日常をより色鮮やかに輝かせる存在になると確信している。

Summary

Mazda3 is a special model that represents Mazda brand and it has deepened the bond with customers for a long time. While having various changes in the recent automotive industry that requires structural reforms, we have introduced this special model, Mazda3 to provide surprise and pleasure to all customers around the world as a model that marks a start of new generation products.

Goal of the new Mazda3 is to become “A car which is the envy of all the people”. Instead of doing something special, we took on a challenge to raise the normal points as a car such as driving performance, quietness, craftsmanship, environmental performance, and design to the level that provides customers with deep emotion based on the intensive human study.

Natural driving sensation just like walking. Quietness created by controlling sound change that human ears detect and the way of the sound to be delivered. Audio system that allows people to fully enjoy every sound range clearly according to their taste. Exterior design that draws out strong individuality of each body type in hatchback and sedan.

We feel assured that the new Mazda3 filled with these attractive elements will be acknowledged as the car that makes everyday life of customers more colorful.

Key words : Vehicle development, Vehicle dynamics, Design, Exterior/Interior, Heat engine, Quietness, Ride comfort, Audio, Craftsmanship

1. はじめに

MAZDA3はマツダのクルマ造りそのものと言っても過

言ではないと感じている。ファミリーから脈々と受け継いできたチャレンジの歴史、そしてこのモデルを愛して下さる数多くのファンを有している。また先代モデル

*1～3 商品本部
Product Div.

*4～5 商品企画部
Product Planning Dept.

では世界カーオブザイヤーのファイナリストに選ばれるなど世界各国で高い評価を得てきた。そんな特別なモデルであるMAZDA3を新世代商品群の幕開けを飾るモデルとして世に送り出した。

しかしその道のりは険しかった。SUVブーム・電動化・自動運転・カーシェアリングなど自動車産業にとって構造変革を迫られるほどの新しい波が来ているなかでの船出である。この荒波のなかで、新型MAZDA3がふたたび世界中の全てのお客様に驚きと喜びを与える商品になるためには、いったい何が必要なのか？

その答えが「誰もが羨望するクルマ」になることであった。奇をてらうことなく、クルマとして当たり前を感動のレベルにまで仕上げていく。デザイン・走り・静粛性・クラフトマンシップ・環境性能など全ての性能を飛躍的に高め、これまで誰も体験したことのない価値を創ることに挑戦した。それが新型MAZDA3である。

2. ターゲット顧客と商品コンセプト

2.1 ターゲット顧客

新型MAZDA3はマツダブランドの顔であり、幅広いお客様に乗っていただくモデルである。よって年齢や性別ではなく、ライフスタイルでターゲット顧客を規定した。新型MAZDA3のターゲット顧客は、「自身のパーソナルライフを充実させるために、時間・労力・お金を費やそうと考えている人」である。彼らは知識と向上心を持ち合わせており、彼らを魅了するには、単純な性能の善し悪しだけでなく、彼らの心が揺さぶられる感情的な魅力が必要となる。

2.2 商品コンセプト

MAZDA3はあくまでもターゲット顧客の日々の生活を支えるクルマであると考えている。よってコンセプトを立てる上で大事にしたことは、非日常的なサプライズを求めるのではなく、ターゲット顧客の日常を輝かせることである。また知識と向上心を持ち合わせている彼らを魅了するために、商品価値を機能的価値、情緒的価値、自己表現価値の3階層として設計し、一瞬で心を奪う分かりやすさと使っていく中で離れられなくなる奥深さの両立を図った。

機能的価値としては、まるで自分の足で歩いているかのような自然な感覚で運転できること。情緒的価値としては心が落ち着き感性を研ぎ澄ますことによって、ピュアな自分と向き合えること。自己表現価値としては、心の中に抱くあこがれの自分になれることを設定した。

これらの価値を具備することによって「誰もが羨望するクルマ」となることを目指した。

3. 商品特徴

3.1 歩いているかのような自然な運転感覚

初心者であっても、熟練ドライバーであっても、誰もが安心して思いどおりに運転できる。またドライバーだけでなくこのクルマに乗る全ての人が“走る喜び”を享受できるようになることがこの機能的価値のねらいである。

(1) 人間の持つバランス保持能力

人は歩いたり、走ったりしても酔うことはない。足・骨盤・脊柱を絶妙にコントロールし、わずかな筋力で頭の揺れを抑えているからである。この能力があるからこそ、方向転換や段差を越えながらもスムーズに進んでいくことができる。しかも人はこの複雑な動きのコントロールを全くの無意識で行っている。これが「人間の持つバランス保持能力」である。

(2) SKYACTIV-VEHICLE ARCHITECTURE

人間のバランス保持能力をクルマに乗っているときに最大限に発揮できることを目指したのが新世代車両構造技術「SKYACTIV-VEHICLE ARCHITECTURE」である。SKYACTIV-VEHICLE ARCHITECTUREは個々のシステムよりも「クルマ全体のコーディネイト」を重視し、人が座るシートからボディ・サスペンション・タイヤまでの全ての部品が、時間軸で有機的に連携して動くことをねらって開発した。

① 骨盤を立てて脊柱の自然なS字カーブを保つシート

新型MAZDA3のシートは、骨盤下部・骨盤上部・大腿部を支えることで骨盤を立てせ、胸郭重心を支えて背骨のS字カーブを維持し、歩行時と同じように骨盤や脊柱を動かし、バランスを取ることができるようにした(Fig. 1)。

その結果、乗員は路面からの入力や衝撃に対し、少ない力で頭部を安定させることができ、長時間のドライブでも疲れにくい。



Fig. 1 Seat

② エネルギーを受け止め、振動を減衰するボディー
基本骨格のストレート化と環状構造を基本とするマツダ独自のボディーを更に進化。これまでの上下左右方向

に加えて前後方向にも骨格を連続させることによって対角剛性を高め、バネ下から入力を遅れなく伝達し、より自然で違和感のない挙動を実現した (Fig. 2)。

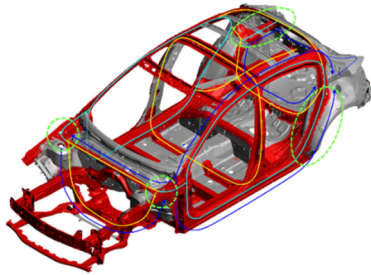


Fig. 2 New Ring Structure Body

また新開発の「減衰接着剤」及び「減衰節構造」を採用。これは骨格を接着する接着剤に緩衝材としてエネルギーを吸収させる機能を持たせたもので、振動エネルギーを熱エネルギーに変換することによってボディに伝わるエネルギー減衰し、質量を増やすことなく静粛性の向上を実現した (Fig. 3)。

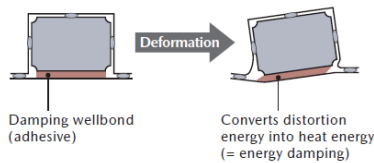


Fig. 3 Damping Wellbond

③ 路面からの入力を正しくリニアに伝えるサスペンション

新型MAZDA3は、フロントにマクファーソンストラット式、リアにトーションビーム式のサスペンションシステムを採用。ばね上に伝える力を時間軸で滑らかにするという考え方の下にこれまでも追求してきた「意のままのコントロール性」をより自然に楽しめることを目指した。

フロントサスペンションは、入力に対してバネ下が正しい方向に動くようブッシュの内部構造を従来の単純な円筒形から球面形に変更。またロアアーム前側のブッシュとロアアームのボールジョイントの前後方向の距離を縮め、横方向の入力に対する前後方向の剛性をアップ。これにより横入力に対する前後方向の動きを抑え、遅れない素早い伝達を実現した。更にサスペンションジオメトリーを新設計して、サスペンションストロークに対するステア方向の変化を低減したことで、コーナリング中のリニアな動きを実現。またリアのトーションビームには、中央と外側でビーム径を変えた新構造を採用。操作に対する応答性向上に効果的なタイヤ取り付け部の剛性

を効率よく高め、より自然な意図どおりの車両挙動を実現した (Fig. 4)。

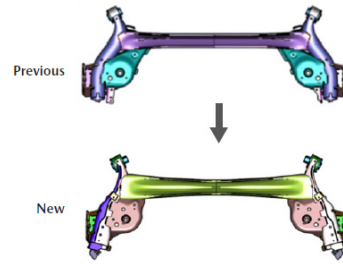


Fig. 4 Comparison of Torsion Beam Structures

④ 意のままに止まれるブレーキ

人間の持つバランス保持能力を最大限発揮させるため、ブレーキを踏んだ瞬間から素早くなおかつ穏やかに制動力が立ち上がり、一定の強さを保ち、そして緩やかなペダルの戻しとともに滑らかに制動力が収まっていくブレーキ性能を目指した。その実現のため新型MAZDA3では、ブレーキの効き始めの分かりやすさ、ペダルの踏み戻しによる減速度の調整のしやすさ、強いブレーキを踏んでもブレを感じさせない剛性の高さに注力。ブレーキキャリパーの構造を見直し、パッドを押し出すピストンのシールの動きを最適化。ブレーキの強弱を問わず、常にブレーキパッドとローターのクリアランスを一定に保てるようにし、転がり抵抗を抑えつつコントロール性を大きく向上させた。

⑤ 人間の身体特性に基づいたペダル

新型MAZDA3は、ペダルを踏むときに動かす筋肉の使い方に着目。どの筋肉がどの操作に適しているか、という観点からアクセルペダル・ブレーキペダルともに綿密に造り込みを行った。アクセルペダルは、先代モデルから採用されているオルガン式ペダルを更に進化。アクセル操作に理想的な筋肉として、ふくらはぎの「ヒラメ筋」に注目。この筋肉は細かな動きと持久力の高さが特徴で、ヒラメ筋を主体に操作できるようにペダル支点をドライバーのかかと位置に近づける構造を新規開発。操作のスムーズ感と安定感、そしてコントロール性を高めた (Fig. 5)。

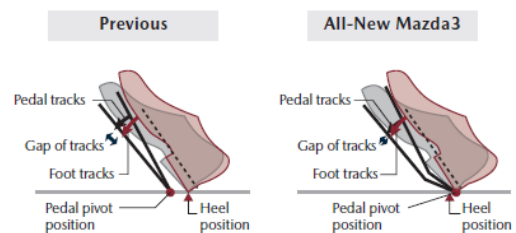


Fig. 5 Pedal Structures

(3) パワートレイン

新型MAZDA3は、世界各国のニーズに応えるため幅広いPTラインナップを設定。進化した「SKYACTIV-G/D」に加え、革新的な燃焼方式の「SKYACTIV-X」を世界で初めて量産車に搭載する。またi-ACTIV AWDも進化。どんなシーンでもスムーズで安定した走り、2WDに迫る実用燃費を実現した。

① SKYACTIV-G/D

SKYACTIV-Gは、最適化した吸気ポートやピストン形状、燃料の分割噴射、冷却水制御バルブなどの技術を取り入れ、走り・燃費・環境性能を高めた。新型MAZDA3では1.5L、2.0L、2.5Lの3つのバリエーションを設定。SKYACTIV-Dは、排気量を1.8Lとし、超高応答マルチホールピエゾインジェクターによって高圧かつ緻密な多段噴射を実現。低燃費・静粛性・排出ガスの全てをより高次元にバランスさせた。

② SKYACTIV-X

SKYACTIV-Xは、理想の内燃機関を追求するマツダが生み出した独自の燃焼方式「火花点火制御圧縮着火 (Spark Controlled Compression Ignition : SPCCI)」を採用し、ガソリンエンジンで圧縮着火を制御する技術の世界で初めて実用化。伸び感に優れるガソリンエンジンと、初期レスポンスや燃費性能に優れるディーゼルエンジンの良さを併せ持つエンジンである。SKYACTIV-G 2.0と「トルク」の性能を比較した場合、SKYACTIV-Xは全域で約10%、最大で30%以上もの性能アップを達成。「燃費率」で見ると、低車速時でも最大30%ほどの改善を果たし、ディーゼルエンジン同等の性能を実現。更には全域でその優れた燃焼効率を発揮できるため、街中から高速道路まで、あらゆるシーンで力強く、そして低燃費な走りが楽しめる。

③ M Hybrid

SKYACTIV-X搭載車とSKYACTIV-G搭載車の一部に、マツダの新たな電気デバイス技術としてマイルドハイブリッドを採用。減速エネルギーを回生し、電装品に使う電力として活用するとともに、エンジンの効率が下がる発進加速時にはモーターで駆動をアシストすることで、燃費性能を向上。M Hybridは、減速する際にブレーキで熱エネルギーに変換して捨てていた運動エネルギーをベルトドリブン・インテグレートッド・スターター・ジェネレーター (ベルト式ISG) で電力に変換し、リチウムイオンバッテリーに蓄電することで電気エネルギーとして貯蔵。DC-DCコンバーターで適正な電圧に変換して各電装品に供給。またベルト式ISGの採用により、駆動力アシストやアイドルストップからのより静かなエンジン始動も可能となった (Fig. 6)。

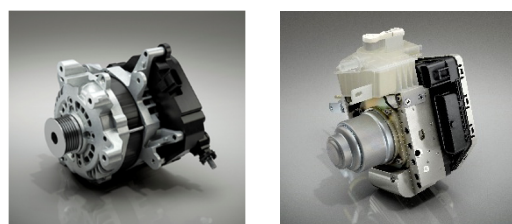


Fig. 6 Belt-driven ISG (Left), Regenerative Cooperative Braking (Right)

④ トランスミッション

「コントロール性」に更に磨きをかけ、すっきりとした上質な加速感を実現するため、新型MAZDA3では、ドライブシャフトの剛性を最適化して応答性を高めるとともに、ドライブシャフトの状態をモニターし、状況に応じて最も振動が少なくなるようにトルクの入力をコントロールする制御を採用した。

⑤ i-ACTIV AWD

新型MAZDA3のi-ACTIV AWDでは、これまでに追求してきた「安心安全」の性能を受け継ぎながら、「走る喜び」と「実用燃費」が更に進化。従来のシステムでは、タイヤの動きや路面状況などをリアルタイムにモニターし、スリップ予兆を検知すると即座に前後輪に適切にトルクを配分していた。新型MAZDA3ではそこから更に一歩進め、4輪のタイヤに「常に余裕を持つ」ことを追求。雨や雪などの滑りやすい路面ではもちろん、ドライ路面での加速・減速・旋回シーンにおいても常にタイヤのグリップ力に余裕を確保し、AWDらしいスムーズで安定した走りができるよう、前後輪のタイヤグリップのバランスをコントロール。そのためにG-ベクタリングコントロール (GVC) と協調しながら、ドライバーのステアリングとアクセル操作の情報とタイヤの接地状態に合わせて前後輪へのトルク配分を制御することで、どんなシーンでも余裕を持った「意のままの走り」を実現。

実用燃費の向上では、機械損失を極限まで低減することを目指した。今回、新たにパワーテイクオフ内にラバーダンパーを新採用することで、実用燃費向上の妨げとなっていた後輪駆動ユニットへの入力トルク変動を大幅に低減。またリアデフユニット内部には、CX-5から採用しているボールベアリングや低粘度オイルに加え、上部にオイルを溜めて必要なところに必要な分だけ供給する新構造を採用することで機械損失を今まで以上に低減。更に、パワーテイクオフとリアディファレンシャルに微小な減速比差を設定することで、トルク配分の反応速度はそのままに、AWD制御の緻密化と合わせて総合的なエネルギー損失の大幅な低減を実現した。

3.2 ピュアな自分と向き合える室内空間

クルマに乗り込んだ瞬間から、静かで包まれた居心地の良い空間に日々の雑念が洗い流され、ピュアな自分と向き合えるようになることが、この情緒的価値のねらいである。

(1) インテリアデザイン

人とクルマとの一体感をより高めることに注力。メーターやルーバーなどは、全てドライバーを中心に完全左右対称にレイアウト。同時にそれらがドライバーに正対する造形としたことで、前後方向の軸感をより高めている (Fig. 7)。その上で深化した魂動デザインのキーとなる「引き算の美学」を、インテリアでも体現。コクピット以外の要素をシンプルに研ぎ澄ましていくことでコクピットの存在感を強調し、まるでクルマと対話しているかのように運転に集中できる、心地よい空間を実現した (Fig. 8)。



Fig. 7 Cockpit



Fig. 8 Interior Design

(2) コクピット

新型MAZDA3は、初めて乗るときから誰もが自然に運転に集中できるコクピットを目指した。その実現のため、ぴったりと自然に座れること、さまざまな情報が自然に目や耳に入り色々なスイッチも迷うことなく自然に操作できること、そしてメーターやディスプレイの表示、スイッチを押したときの感触に統一されたルールを感じられることを各機能に折り込んだ。

① ドライビングポジション

シート構造やペダル・シフト操作系を進化させることで誰もが正しいドライビングポジションをとることができる。

a. シート構造

リフターの軌跡を、ペダルを中心とした円弧に近づけ

ることにより、素早くスムーズにシート位置を決めることを可能にした (Fig. 9)。

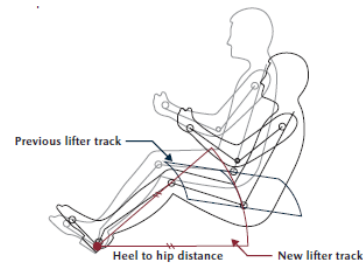


Fig. 9 Comparison of Lifter Tracks

b. 操作系の最適化

無駄な力を入れずに済む人体の快適関節リンク角実現と、操作時の筋負担量の最小化に向け、次の進化を全車で採用。

- ・前後10mmずつ拡大したステアリングテレスコピック調整幅。
- ・太ももをサポートする前チルト調整機構
- ・シフターセンタの10mmアップと10mm外側配置
- ・軌跡ずれをMinとする新型アクセルパダル

c. 視界・視認性

新型MAZDA3の視界性能開発で取り入れたのは、「人間は、左右どちらかの目で見えていればそれを頭で合成し、対象を認知できる」という人間特性と「人間は、瞬間を記憶し、それをつなげて連続した動きとして認識できる」という、いわゆるパラパラ漫画が映像のように見える能力。つまり、左右どちらかの目で常に対象を見続けられる状態をつくり出せば、「いつでも見える状況」を実現できるということ。この考え方をAピラーの造形に反映し、正しい運転姿勢のまま、自然な動きの中で「いつでも見える状況」を実現した (Fig. 10)。

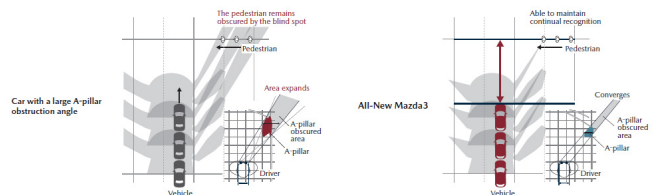


Fig. 10 Comparison of A-pillar Obstruction Angle and Blind Spot Area

② ヒューマン・マシン・インターフェイス

運転中の注意散漫につながる要因のひとつ「意識のわき見」。これは表示された情報の意味や操作の方法などを迷ってしまい、前方の道路からドライバーの「心」が離れてしまう危険な状態である。新型MAZDA3では、この「意識のわき見」をこれまで以上に減らすために、無意識・直観的に行動できるHMIづくりに取り組んだ。ま

た表示される文字のフォントを統一し、心地よい一体感を表現した。

a. 7インチTFT液晶メーター

新型MAZDA3のメーターは、7インチのTFTカラー液晶を採用し、中央部分にさまざまな情報をシンプルかつ集中的に表示することで、瞬間的に情報を読み取ることが可能となった。刻一刻と変化する走行安全に関わる情報を瞬間的に認知できるよう、ドライバーの視野の中心上方に情報を表示。更に警告系のインジケーターやテキストも中央に表示できるため、いち早い異常の認知と、スムーズな安全行動への移行をサポートできる (Fig. 11)。

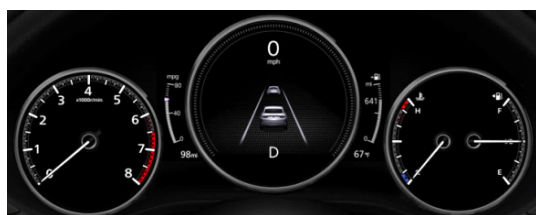


Fig. 11 Center Meter with LCD Display

b. 8.8インチセンターDisplay

新型MAZDA3では、センターディスプレイに8.8インチの横長タイプを採用し、ドライバーに対面するように配置することで視認性を高めた (Fig. 12)。また全ての操作をコマンダーコントロールに集約。従来のタッチパネルかコマンダーコントロールという2パターンの操作方法を1本化して、操作体系をシンプル化した。その上で、ディスプレイ表示にコマンダーコントロールの見た目と動きを感じさせる表現を取り入れることで、直感的な操作を可能にした。



Fig. 12 Center Display

(3) NVH

新型MAZDA3は人間が音を聴くメカニズムに着目し、静粛性を飛躍的に進化させた。人は「音の大きさ」だけでなく「音の時間的な変化」「音の到来方向」も聞き分けている。音の大きさに加え、音の変化や届き方によって感じる不快感をなくすため、入ってきた音をコントロールすることに取り組んだ。

① ロードノイズ

新型MAZDA3のロードノイズ対策では、さまざまな工夫による騒音・振動の低減によって、「路面が変化した

際の違和感のなさ」に注力。音や振動を限りなく小さくするとともに、その変化をリニアにすることで、乗員を急な騒音で驚かせたりすることなく、安心して快適に過ごせるようにした。荒れた路面からきれいな路面に変わると、走行音は人間の耳に残りやすい高周波になる。路面が変化してノイズの音量が減った分、余計に不快に感じやすくなるため、吸音機能を持たせたフロアマットとトップシーリングでその高周波をしっかりと吸い取ることで、室内に音を響かせることなく、素早く収束させる。逆にきれいな路面から荒れた路面に変わると、今度は急に大きな音となる。この音がダイレクトに伝わらないよう、まずは縦バネのやわらかさを最適化したタイヤで振動を吸収。その上で、タイヤからサスペンションやボディへ衝撃が伝わる入り口を見極め、その剛性をしっかりと高めることで、振動の多くを門前払いしている。この構造が侵入する振動そのものを小さくしているため、乗員が感じるノイズや振動も限りなく小さなものとなっている。

② 風騒音

新型MAZDA3では、パーティングライン内部にまでしっかりと対策を施すことで、ハッチバックのリフトゲート・セダンのトランク周りの風騒音を大幅に低減。高速走行時に後席乗員が感じる静かさを大きく高めた。

後席周りの風騒音は、ルーフパネルとリフトゲートの間 (ハッチバック) またはリアガラスとトランクの間 (セダン) のパーティングライン内部に風が流れ込み、渦となることで発生する。パーティングライン自体は機能として必要なため、内部にシールを採用することで余計な隙間を塞ぎ、渦の発生を抑制している (Fig.13)。

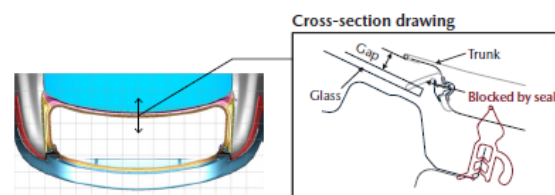


Fig. 13 Seal Added Inside Parting Line Blocks Gaps (Sedan)

③ 遮音

フロアマットの面積に対して1%の穴があると、遮音性能が30%も失われることが検証でわかった。そこでマットにある穴ひとつひとつの用途を検証し、不要なものを削除。残った穴も、最終的に部品が組み合わさることで塞がるような設計とした。更にフロア面の遮音性能を高めるために、ボディパネルとマットの間にスペースを設けた「2重壁」構造を採用。フロアマットの裏面の繊維材の量を場所ごとに調整し、フロア全面のどこでも最適な密度となるように造り込んでいる。またドアパネルに

は、これまでスピーカーを内蔵しているための大きな穴が開いており、スピーカー自体も質量の軽いコーン紙という素材を使っていたため、遮音効率を高めることは困難であった。そこで新型MAZDA3ではスピーカーをドアパネルから独立させるなど、弱点となる穴と隙間を徹底的に削減。同時にインナーパネルとドアトリムで「2重壁」を構築することで、質量増を最小限にしながら、ドアそのものの遮音性能を大幅に高めた (Fig. 14)。

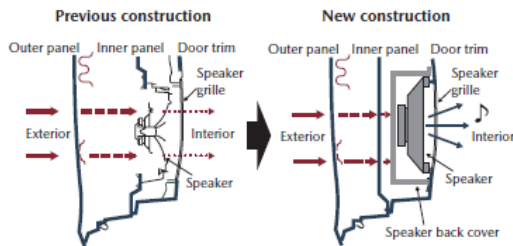


Fig. 14 Two-wall Construction and Blocked Holes for Door Speakers

(4) オーディオシステム

新型MAZDA3では「どんなジャンルの音楽でも、音量の大小にかかわらず、いつでも高音質なサウンドをお届けること」を目指した。そのため人間が聴き取ることができる最も小さな音から、再生時に音質が下がりやすい大きな音まで、つねにクリアなサウンドとして聴けるように造り込みを行った。クルマの車室内で音がどのように伝わっていくのかを改めて検証し、低音域に関しては音が共鳴して増幅される (=音が出やすい) 場所と、かき消される (=音が出にくい) 場所があることが判明。そこで特に音が増幅される室内の角部分に低域用スピーカーを配置。中高音域に関しては、場所によってはスピーカーから出た音と反射音が混ざり合うことで音色が変化することがわかったため、反射音の影響を受けにくい位置や角度にスピーカーを配置。このレイアウトによりダイナミックレンジの拡大を実現した。また高音域においては「人間は高い音ほどどこで鳴っているのかを把握しやすい」という特性に着目。高音域スピーカーをドアトリム上部に配置して乗員の耳の高さ近づけることで、より自然な音の到来を実現できるスピーカー配置とし、音の広がりや立体感、明瞭度をより感じやすくした (Fig. 15)。



Fig. 15 Speaker Layout

標準装備となるシステム構成は、カウルサイドの3Lウーファー、前後ドア上部の8cmスクーカー、セールガーニッシュの2.5cmツイーターの3ウェイ。またプレミアムシステムとして、ベースシステムに8cmセンタースピーカーとサテライトスピーカー、サブウーファーを加えたBose®サウンドシステムを設定している。

3.3 あこがれの自分になれるエクステリアデザイン

新型MAZDA3は、「お客様が想い描く理想の自分になってほしい」という思いから、多くの人が心の中で抱いているであろう憧れの姿をエクステリアデザインで表現することに挑戦した。エモーショナルなハッチバックとエレガントなセダン、それぞれのボディタイプで強い個性を持たせた。

(1) ハッチバック (ファストバック)

ハッチバックで表現した憧れの姿は「感じるままに生きる自由人」。世間の慣習や常識にとらわれず、信じる道を歩んでいく姿をハッチバックに重ねた。その実現のため設定したデザインコンセプトは「色気のある塊」。世界のどのハッチバックよりも力強く、色気のあるクルマとするため、あえてキャラクターラインを使わず、美しく湾曲させたパネルのみでボディを構成するというこれまでにないデザイン手法を採用。パネル面に映るリフレクションによる光の動きで生命感を見せる挑戦的なボディーサイドを造った。その上でスピード感のあるルーフと力強いCピラーによるキャビンとボディがまるでひとつの塊となっているかのような力強さを造った。この新たなデザインによりいつまでも見飽きることのない色気と魅力を表現した (Fig. 16)。



Fig. 16 Hatchback (Fastback)

(2) セダン

セダンで表現した憧れの姿は「品格と個性を兼ね備えた紳士・淑女」。伝統に裏打ちされた様式に則りつつも、はっとするような美しさを秘めている姿をセダンに重ねた。その実現のため設定したデザインコンセプトは「凛とした伸びやかさ」。通常このクラスのセダンは、車両サイズなどの制約から腰高なプロポーションとなりがち

だが、そのような制約を取り払い、クラスを超えて最も美しいセダンを創ることに挑戦した。そのため全長を延長し、フロントからリアへのワンモーションの動きによって1本の強い軸を感じさせながら、伸びやかで優雅なプロポーションを描いた。またフロントとリアは、ワイド&ローのイメージを引き立てるよう、全ての要素を水平基調にデザイン。落ち着きと品格を兼ね備えた大人に相応しい、洗練された存在感を表現した (Fig. 17)。



Fig. 17 Sedan

4. おわりに

新型MAZDA3の開発をスタートさせるとき、お客様が恋に落ちてしまうようなクルマにしたいと心に決めた。このクルマを手にする人の心をとくめかすにはどうすればいいか？ そればかりを考えてきた。乗るたびに感性が目覚める運転感覚、どんな時でも心を癒してくれる室内空間、そして一目で心を奪われるデザイン。全社一丸で我武者羅になって取り組んだ結果、見事に想定を超える素晴らしいクルマに仕上がった。

このクルマならきっと、このクルマを手に入れたみんなの毎日をきっと色鮮やかに輝かせることができるだろうと信じている。

■ 著 者 ■



別府 耕太



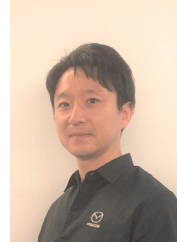
柴田 恵一郎



木下 勝之



岩本 信也



宮本 健作

特集：新型MAZDA3

2

新型MAZDA3のデザイン Design for All-New Mazda3

土田 康剛*1
Yasutake Tsuchida

要約

2010年に掲げたマツダのデザインテーマ「魂動（こどう）-SOUL of MOTION」で統一した商品群が一巡し、新型MAZDA3から魂動デザイン第2章の幕開けとなる。新世代への深化として日本の美意識に基づいた「引き算の美学」の体現を目指した。その上で、これまでよりデザイン表現の幅を広げていく戦略を取る。

セダンは「凜」とした品格を備えた大人のセダン、ファストバックを「艶」っぽくスポーティなデザインとし、新世代の幕開けを飾るに相応しい二つの個性豊かなデザインを与えた。

エクステリアでは引き算の美学の考え方の下、従来の自動車デザインに用いられてきたシャープなキャラクターラインを廃し、リフレクションによる面造形で新世代の生命感表現に挑戦した。

インテリアでは人とクルマの一体感を作る心地よい空間を表現した。

Summary

Mazda's design philosophy "KODO -Soul of Motion" introduced in 2010 has been manifested on all previous generation models, and now it opens a new chapter starting from the All-New Mazda3. For the next generation, "minimalism (less is more)", a Japan's unique aesthetic, is pursued. Based on the concept, extensive design expressions are applied as a next generation strategy. Mazda defines the characteristic of self-restrained dignity in Japanese as RIN for sedans, while alluring sensuality as EN and sportiness for fastbacks, representing the beginning of the new generation.

For the exterior, the conventional sharp character-lines are eliminated in line with the minimalism concept. Instead, a delicately modulated use of light that glides over the body makes the car look alive.

For the interior, comfortable space is created, which delivers a sense of oneness between a car and a driver.

Key words : Vehicle Development, Design, Exterior/Interior, Color

1. はじめに

MAZDA3（アクセラ）は世界130国以上で販売され、累計販売台数600万台以上を記録したマツダの最量販車種であり、マツダの成長を支えてきたモデルである。デザインでは先代MAZDA3が2014年ワールドデザインカーオブジイヤーTOP3に入賞するなど市場評価も高い。

グローバルでは4代目となる新型MAZDA3は新世代商品群の幕開けを飾る重要な車種である。また魂動デザインで統一した商品群が一巡し、デザインの深化を見せる格好のタイミングである。深化した魂動デザインの布石

として発表した2015年RX-VISIONと2017年VISION COUPEはこれまでのラインによる躍動の生命感から、光と影の移ろいが作りだすリフレクションによる生命感へと深化。これは古来より日本文化が大切にしてきた引き算の美学で、複雑な要素を徹底的に研ぎ澄ませることで、控えめながらも豊かな美しさを表現している。加えてふたつのビジョンモデルは新世代デザイン表現の幅を「艶と凜」に広げるマツダデザインの意志でもある。新型MAZDA3はこれらビジョンモデルの高い志を量産車で結実した最初の商品である。本稿ではそれを実現するため、これまでの既成概念に捉われない発想と挑戦により

*1 デザイン本部
Design Div.

具現化した、新型MAZDA3のデザインについて紹介する。

2. エクステリアデザイン

2.1 既成概念の打破

新世代商品群のトップバッターである新型MAZDA3デザインの使命は、これまでに以上にマツダとお客様の絆を強め、マツダブランドを更なる高みに導くこと。それを実現するためにこれまでのやり方や考え方に縛られることなく、ゼロベースの発想で取り組んだ。

その一例がセダンとファストバック、個性の特化 (Fig. 1) である。「セダンとハッチバックは同じボディで作らなければならない」、「ハッチバックにトランクを付ける＝セダン」といった既成概念に捉われることなく、それぞれ理想のデザインを追求した。その結果、それぞれのお客様が求める姿 (セダンは品格とエレガンス、ファストバックはパーソナルでスポーティ) をデザインで素直に実現出来たと考える。

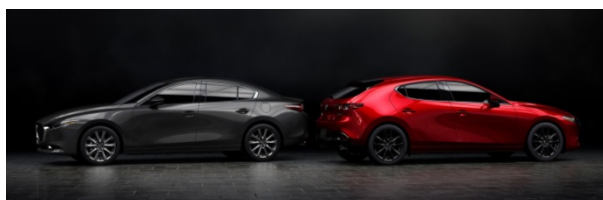


Fig. 1 Characters

2.2 デザインコンセプトとプロポーション

セダンのデザインコンセプトを「凛とした伸びやかさ」とし、このクラスのセダンでは達成が困難とされてきた、伸びやかなプロポーションと様式美を追求した。

一方ファストバックは「色気のある塊」をデザインコンセプトに掲げ、全ての要素を内側へと向けることで得られる圧倒的な塊の強さと凝縮感を実現。

その結果、MAZDA3という共通のネームプレートを持ちながらも大きく異なるプロポーションを実現。これまでにないセダンとハッチバックそれぞれの個性が際立つデザインを達成した (Fig. 2)。



Fig. 2 Proportions

2.3 異なるフォルム「凛と艶」

セダンの造形テーマは「光のスピード」。フロントからリアに向けて一本の伸びやかなスピード感を表しセダンらしい「凛」とした伸びやかさを強調。ボディーサイドには上品で控えめなりフレクション＝光と影の移ろいを表現した (Fig. 3)。

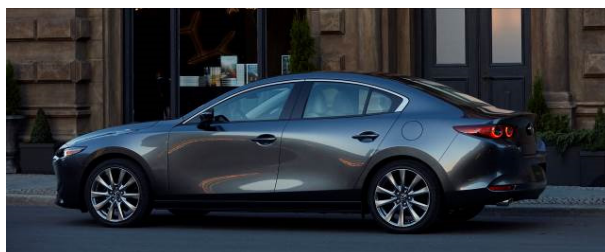


Fig. 3 Speed of Light

ファストバックではコンセプトに掲げた「色気」を表現するため、従来の自動車デザインに見られたキャラクターラインを廃し、大胆かつドラマチックなりフレクションが見せる味わい深い生命感「艶」を表現した (Fig. 4)。

更に従来の自動車デザインではタイヤを強調するためのショルダー (肩) を用いるが、ファストバックではそのショルダーを引き算することでキャビンとボディをひとつの塊としてとらえることで、他に類を見ないユニークな存在感を実現した (Fig. 5)。



Fig. 4 Drama of Light



Fig. 5 Cabin and Body as One

2.4 面のアーティスト活動

デザイン本部だけでは美しいデザインは描けてもお客

様に届く商品とはならない。これらの魅力的なボディーサイドはマツダデザイン本部が目指した「引き算の美学」に深く共感し、自分ごととして創意工夫したエンジニアと生産工場メンバー全員のチームプレーの成果である。これは研究開発部門と製造部門の関係が近い、スモールプレイヤーであるマツダならではのユニークな取り組み、「共創活動」によって初めて実現した。この共創活動は深化した魂動デザインの実現のため、製造部門自らが発意し「面のアーティスト活動」として、部門を超えた共創活動を実施。現在も改良しながら進化し続けている (Fig. 6)。



Fig. 6 Co-Creation Scene

2.5 エレメントデザイン

マツダとして共通のファミリーフェイスを活かしながら、それぞれの「表情作り」に注力。具体的にはセダンは水平方向の要素を用いて落ち着きと品格を持たせ、ファストバックには強靱なスタンスが作るスポーティ表現として「ハの字」を強調した。マツダファミリーフェイスの特徴である、シグネチャウイング形状は同じとし、セダンにはクロームメッキで品格を与え、ファストバックにはダークメタル調塗装を採用しスポーティさを強化、個性の最大化を図った (Fig. 7)。

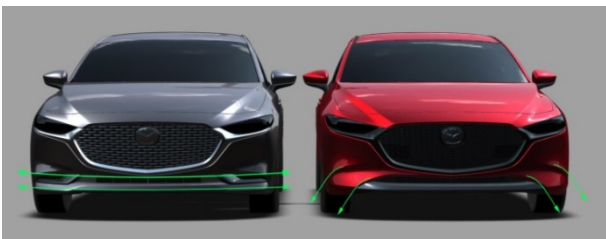


Fig. 7 Front Fascia

また、引き算の考えの下「ジャストオブティクス」をコンセプトに光りそのものを美しく機能的にデザイン。

マツダがこれまで抱えてきた「丸」モチーフを深さ方向に進化させ、ボディー造形と相まってシンプルながらも深みのある表情づくりに貢献している。また、リアランプでは丸4灯とし、夜間でも一目で新型MAZDA3と認識できる存在感を際立たせた (Fig. 8)。



Fig. 8 Lamp Design

3. インテリアデザイン

3.1 人とクルマの一体感

インテリアデザインでは人とクルマの一体感を作る人馬一体空間を目指した。そのためにステアリング・メーター・ルーバーをドライバー中心に完全左右対称に配置し、それらをドライバーに正対させた。その上で、深化した魂動デザインのキーとなる「引き算」を表現。コクピット以外の無駄なノイズを徹底的に研ぎ澄ませることで、まるでクルマと対話しているかのような運転に集中できる心地よいインテリア空間を実現した (Fig. 9)。



Fig. 9 Cockpit Symmetry

3.2 水平軸

助手席に向けて水平軸を通し、視線が自然と誘導される空間構成とした。通常コックピットを強調すると助手席が蔑ろにされることが多い。新型MAZDA3ではこの水平軸を構成することで前席同士、横のコミュニケーション誘発を狙った (Fig. 10)。

更に後席のドアトリム構成は素材・デザインともに前席と同じとすることで、乗員全てに同様の上質かつ平等の快適な室内空間を提供した。



Fig. 10 Horizontal Axis

3.3 作り込み

乗員が一番触れやすい高さにダブルステッチのソフト素材のミドルパッドを採用し、それをカラーキードすることでこれまでにないインテリアデザインテーマを特徴づけた。

「素材がカタチを作る」をキーワードにインテリアの作り込みを徹底。柔らかい革を固く細い金属で締めることでそれぞれの素材が作り出すカタチを最大限表現。また、パーツ同士の分割ラインは陰に収める工夫をすることで、視覚的なノイズを減らし、飛躍的なクオリティの向上を図った (Fig. 11)。



Fig. 11 Craftsmanship

4. ユーザーインターフェース

4.1 表示と操作の統一

新型MAZDA3からマツダコネクトを始めとする全てのグラフィックスを刷新。視覚的な文字やサイズ、色を合わせるだけに留まることなく、操作の触覚やフィードバックをも統一することで、インテリア空間全体の調和を図った (Fig. 12)。

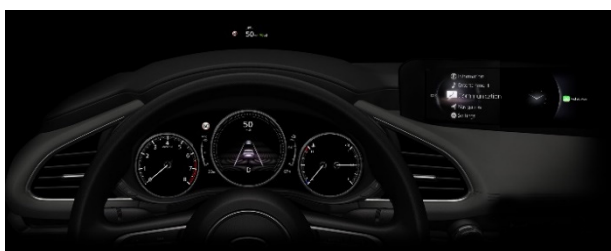


Fig. 12 Interface Design

更に、表示と操作の統一も新たに取り組んだ。具体的には操作するコマンドの動き (回す・押す) と表示されるグラフィックパターンを同期させることで、乗員が迷うことなく、直感的に操作できることを目指した (Fig. 13)。



Fig. 13 Graphics & Operations

5. カラーデザイン

5.1 エクステリアカラー

ブランドカラーであるソウルレッドクリスタル、マシニンググレーを中心に、ファストバック専用色としてポリメタルグレーメタリックを追加した全9色を用意した。新規開発したポリメタルグレーメタリックは樹脂がもつ独特のヌメリ感と硬質な金属の融合をイメージした新色で、ファストバックデザインの特徴である光と影の移ろいを一層際立たせてくれる新しい質感表現。「カラーも造形の一部」を目指すマツダデザインならではの考えにより実現した (Fig. 14)。



Fig. 14 Polymetal Gray Metallic

5.2 インテリアカラー

上級グレードにはブラック・ピュアホワイト・バーガンディの革内装を用意。ブラック革内装にはステッチとマイクロパーフォレーションの裏地にチャコール色をアクセントとすることで、黒の中にも温かみを感じるコーディネートとした (Fig. 15)。

更に、エモーショナルなエクステリアに呼応する赤い内装色をファストバック専用として設定。バーガンディと名付けた赤い内装は成熟された大人が似合う赤を目指した (Fig. 16)。特にポリメタルグレーメタリックとの組み合わせは、ファッションに強いこだわりをもち、高い審美眼を持った新規層を魅了すると期待している。

また、黒布内装でも温かみと深みを感じていただく

め、チャコール色のステッチとメイン材を用いることで、エントリーグレード＝黒く・暗く・安っぽい、といったこれまでのイメージからの脱却を狙った (Fig. 15)。



Fig. 15 Black Leather & Black Fabric



Fig. 16 Burgundy

5.3 2層パネル

シフトパネルには、深い透明感を持ちながら光を受けると奥底から精緻な柄が浮かび上がる、新しい2層成型のバイオエンブラを採用。レーザー加工で柄を刻み込んだ1層目の黒いパネルと2層目のクリアパネルで構成。光が当たると1層目のパネルが乱反射し、メカニカルな表情が浮かび上がる工夫をした。光の移ろいで表情を変化させていく、エクステリアのボディ造形のような豊かな表情を実現した (Fig. 17)。



Fig. 17 Shift Panel

6. おわりに

現在、自動車を取り巻く環境は、CASE (C:コネクテッド, A:自動運転, S:シェアリング, E:EV) がもては

やされている。遠くない将来、クルマは個人の所有物ではなくなり、これまで以上に人とクルマの関係が希薄になっていくかも知れない。そんな時代だからこそ、クルマが本来もっていた「所有する喜び、走る喜び」を最大限デザインで表現したい、これが新型MAZDA3へ込めた想いである。そのため、デザイン開発では、素直にお客様の心に響く・刺さるデザインを追求した。魅惑的な色気を追求したファストバックはずっと見ても決して飽きることがなく、エレガンスと品格を突き詰めたセダンは、上質で落ち着きに満ちた大人を思わせる風格をもたせた。

新型MAZDA3のデザインは見る人の心を揺り動かし、人とクルマをより感情的に繋げることで、このMAZDA3がある生活がお客様の人生をほんの少しだけでも輝かきに満ちたものになれば幸いである。

■ 著 者 ■



土田 康剛

特集：新型MAZDA3

3

新世代ガソリンエンジンSKYACTIV-Xの紹介 New-Generation Gasoline Engine “SKYACTIV-X”

磯部 利太郎*1 遠藤 孝次*2 末岡 賢也*3
Ritaro Isobe Koji Endo Masanari Sueoka

要 約

SKYACTIV-Xは、SKYACTIV-Gから始めた理想の内燃機関追求のゴールに向けた第2弾である。2nd Stepでは熱効率向上として比熱比の改善を取り上げた。具体的にはリーン燃焼に取り組み、その実現のために圧縮着火を取り入れた。圧縮着火をさまざまな環境条件で成立させるためには多くの課題に対してのブレークスルーが必要であった。

主要課題は、圧縮着火燃焼範囲を拡大しつつ、燃焼の切り替えを完全に制御することであり、この課題をブレークスルーしたのが燃焼方式SPCCI（「火花点火制御圧縮着火」の略）で、圧縮着火燃焼を火花点火で制御した燃焼である。商品化にあたってはSPCCI燃焼技術を日常の使われ方の中で、いかに多くの場面で使えるようにするかが重要であり、燃焼制御、熱マネージメント技術やNV対応技術に関しても多くの新しい技術を取り入れた結果、SKYACTIV-G比、全域で約10%以上のトルク改善を図りつつ、NEDCモード燃費で前モデルに対し約30%の燃費改善を図った。

Summary

Skyactiv-X is a gasoline engine developed in the second step of Mazda's quest for the ideal internal combustion engine which started with Skyactiv-G. The focus of the second step was to improve specific heat ratio to achieve higher thermal efficiency. In particular, Mazda delved into lean combustion and adopted compression ignition (CI) to realize it. In our efforts to make the CI feasible under various environmental conditions, we had a number of challenges to overcome.

One of the major challenges was to expand the CI operating range while fully controlling switchover between CI and spark ignition. The enabler for this complete control of CI and spark ignition is SPCCI (Spark Controlled Compression Ignition). In its commercialization process, SPCCI combustion technology had to be made usable in as many situations as possible in everyday usage, and therefore a number of new technologies were adopted for combustion control, thermal management and NV reduction. As a result, Skyactiv-X has increased torque by more than 10% compared to the current Skyactiv-G gasoline engine in the entire operating range, and the vehicle equipped with Skyactiv-X has improved fuel economy in NEDC by around 30% compared to the previous model.

Key words : Heat Engine, New Combustion Model, New Combustion Model Engine, Performance, Fuel Economy, Efficiency, New-Generation Gasoline Engine “SKYACTIV-X”

1. はじめに

新技術開発長期ビジョン「サステナイブル “Zoom-Zoom” 宣言2030」の発表と同時に、内燃機関の次なる革新であるSKYACTIV-Xを発表した。

SKYACTIV-Xは、SKYACTIV-Gから始めた理想の内燃機関追求のゴールに向けた2nd Stepとなる、新しい燃焼技術を導入したエンジンである。

Fig. 1のロードマップに示すように、1st Stepで取り組ん

だ高圧縮比化に加え、2nd Stepでは比熱比向上、具体的にはリーン燃焼に取り組み、その実現のために圧縮着火を取り入れた。圧縮着火には数々の課題があるが、それらの課題をマツダ独自の技術でブレークスルーし、量産ガソリンエンジンとしては世界で初めて市場導入することになる。

本稿では、SKYACTIV-Xの開発で取り組んだ燃焼技術を主に、日常の使われ方の中で多くの場面で使えるよう同時に開発した燃焼制御、熱マネージメント技術やNV対応技術等について、技術コンセプトを中心に紹介する。

*1~3 エンジン性能開発部
Engine Performance Development Dept.

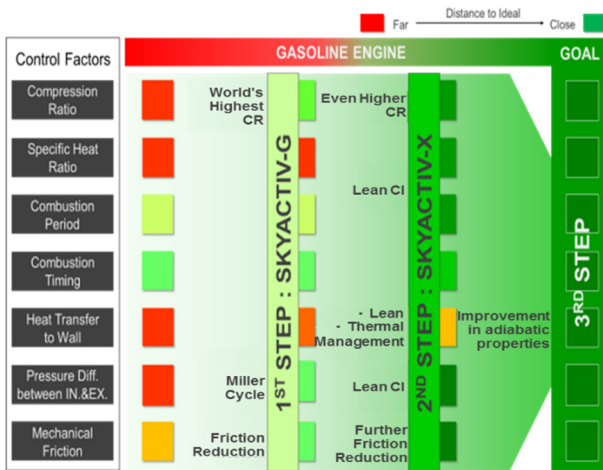


Fig. 1 Roadmap to Goal of ICE

2. SKYACTIV-Xのねらい

2.1 比熱比改善のためのリーン燃焼について

オットーサイクルの理論式であらわされるように、熱効率向上の視点は圧縮比と比熱比である (Fig. 2)。右のグラフは圧縮比・比熱の変化と熱効率の関係を表すが、比熱比を高くすることで熱効率が大きく改善することが分かる。

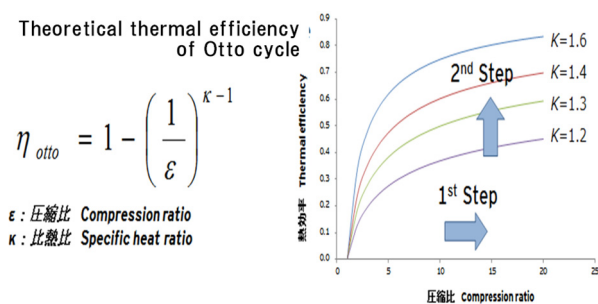


Fig. 2 Further Thermal Efficiency Improvement

比熱比向上は同じ燃料に対して空気量を増やすリーン燃焼によって実現できる。リーン燃焼によって何故熱効率が上がるのか、メカニズムを簡単に説明する。

Fig. 3に示す左が従来の燃焼で、右がリーン燃焼を表している。従来の燃焼は燃料と空気中の酸素が反応して、火炎が伝ばしながら燃え広がる燃焼方式で、燃えながら広がるので燃焼のエネルギーは、熱とピストンを押し下げる仕事に変わる。それに対してリーン燃焼は、同じ量の燃料に空気を多く押し込むため、N₂やO₂といった動きやすい2原子分子が、従来よりも相対的に多く使われるようになるために、燃焼エネルギーの圧力への変換率が増す。その結果、同じ量の燃料を燃やした際の圧力上昇率が高くなり、取り出せる仕事量が増えることで熱効率が高くなる。

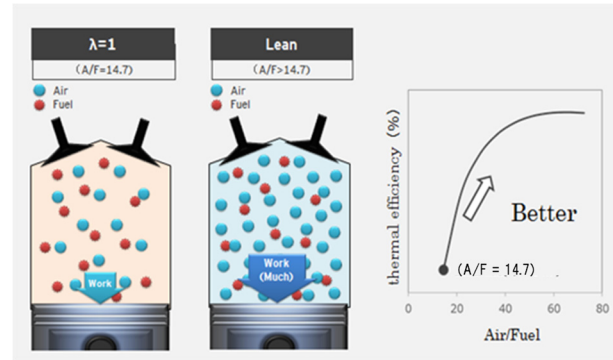


Fig. 3 Concept of Lean Combustion

また、Fig. 4に示すように、燃焼温度が低いほうが、比熱比は上がる。温度が高いと分子が移動したり、分子が分解するのにエネルギーを取られるため、温度を低くした方が比熱比は上がるのである。燃料に対したくさんの空気やガスを入れて燃焼させると、結果的に温度が下がるため比熱比が上がることになる。

わずかなリーン燃焼では燃焼温度が高くなり、NO_xの発生も多くなるが、通常の火炎伝ば燃焼ではまともに燃えないぐらい大幅なリーン燃焼を行えば燃焼温度は下がり、NO_xの発生は抑えられると同時に熱効率は大きく改善する。

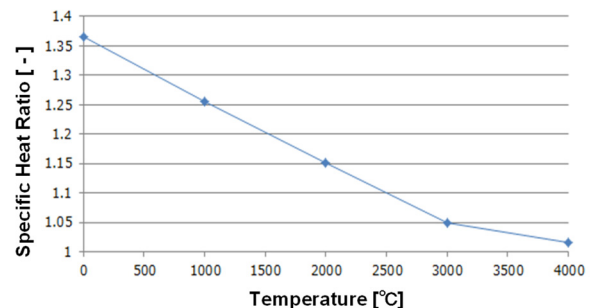


Fig.4 Relation between Temperature and Specific Heat Ratio

リーン燃焼の効能をまとめると以下のようなになる。

- ① 燃料に対する空気の比率を高めて燃やすリーン燃焼にすると比熱比は高まり、同時に燃焼温度低下でも比熱比は高まる。
- ② 更に燃焼温度が低下すると、ガス温と壁温の差が小さくなることによって熱移動量が小さくなり冷却損失が低減する。
- ③ リーン燃焼ではλ=1運転に比べて、同一トルク点での吸入空気量が大きいいため、スロットルによる絞り損失(ポンプ損失)が低減する。

このように相乗効果で熱効率が飛躍的に向上する。

2.2 リーン燃焼の課題

火花点火を用いるリーンバーンエンジンも過去商品化されたが、理論空燃比の1.5倍程度でしかなかったため、燃費改善効果はそれほど大きくはなかった。Fig. 5に示すように、NOxの発生を抑えつつ比熱比を大きく設定できるのは、理論空燃比の2倍以上、空燃比で30以上の設定が必要である。

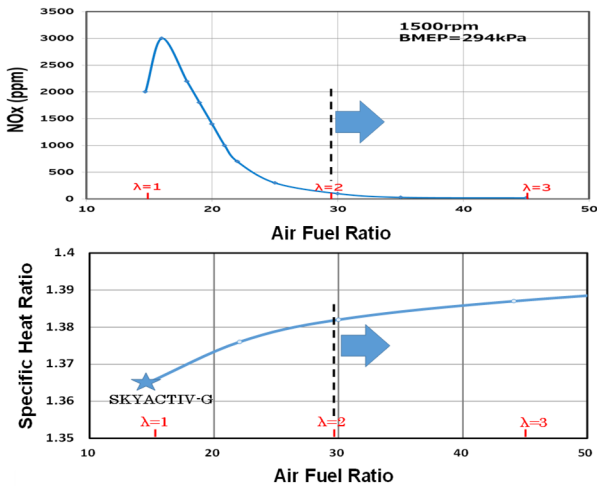


Fig. 5 Relation between Air Fuel Ratio and Specific Heat Ratio

しかし、このレベルの空燃比となると火炎伝ば燃焼では燃焼速度低下によって燃焼安定性を悪化させる。

燃費と燃焼安定性のトレードオフの関係をブレークスルーするためには、燃えにくい薄い空燃比でも安定して短時間に燃焼を完結させる手段が必要となり、そのための有効な手段が、火炎伝ばに依らず温度と圧力で燃焼反応を起こす圧縮着火である。圧縮着火でなら飛躍的な熱効率向上が図れるだけのリーン燃焼が可能となっているところをFig. 6に示す。火花点火（以下SI）燃焼ではNOxがほぼ発生しない理論空燃比の2倍近い空燃比では火炎が燃え広がらないが、圧縮着火（以下CI）では燃焼できることが分かる。

CI（圧縮着火）はディーゼルエンジンで採用される燃焼方式であるが、これをガソリンに適用したものがいわゆるHCCI（予混合（燃料）圧縮着火）と呼ばれている燃焼方式である。

この燃焼は、ガソリンと空気を完全に混ぜて、圧縮により上昇した温度と圧力で着火させるという方式であり、火花点火では燃えないような薄い混合気、つまりリーンな状態でも、綺麗にすばやく燃焼することで熱効率の向上とNOx発生量が少なくなるという利点を持っている。

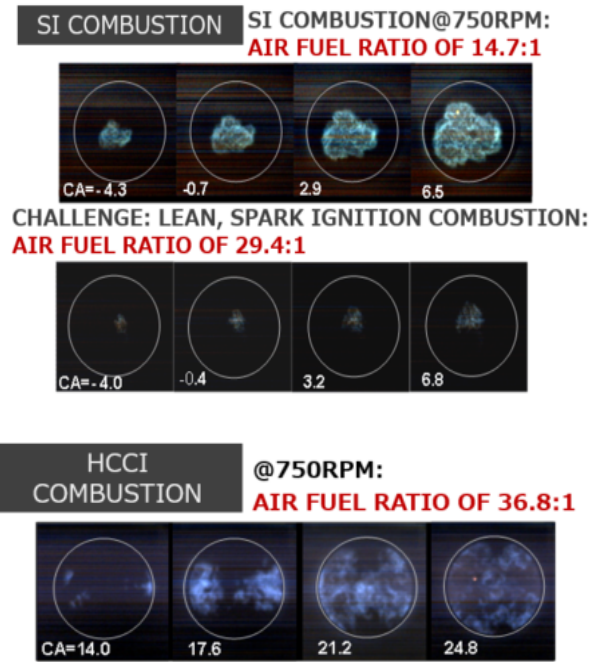


Fig. 6 Comparison between SI and CI Combustion

一方、HCCI燃焼には大きな課題がある。

(1) まず成立範囲（回転・負荷）が狭いことである。

Fig. 7はエンジン筒内の温度を変化させた時の熱発生位置を調べたものである。熱発生位置が早すぎると燃焼騒音が悪化し、遅すぎると燃焼安定性が悪化する。燃焼安定性と燃焼騒音を満足できる温度の範囲が非常に狭いことが分かる。温度と圧力を高めることで圧縮着火は可能となるが、燃焼安定性と燃焼騒音を満足させる要求温度範囲の3°C以内に制御することは非常に難しい。

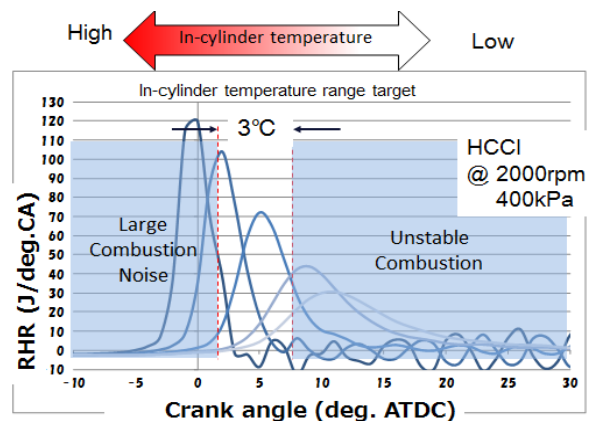


Fig. 7 Relation between Cylinder Temperature and Change in Combustion

(2) HCCIは成立範囲が狭いがゆえに、Fig. 8に示すような従来のSI燃焼との併用が必要となるが、HCCIの可燃範囲は外気温度、気圧など大気状態の変化や燃料オクタン価

の変化で拡大縮小する。また時々刻々と環境条件が変化する自動車に適用するには、過渡時やさまざまな環境下において、安定してSI燃焼⇔HCCI燃焼の切り替えが必要となるが、これらの制御が非常に難しいため、いまだに実用化に至っていないと考えられる。

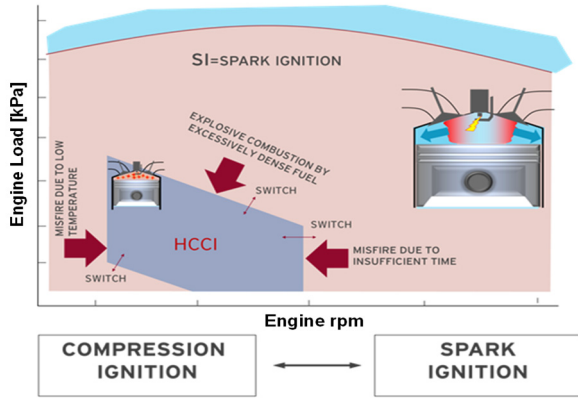


Fig. 8 Technical Problem of HCCI

また、圧縮着火の制御因子である温度圧力を直接制御するのはほぼ不可能である。圧縮比で制御しようとする、Fig. 9に示すように広い運転領域で圧縮着火させるには、圧縮比15-30という大幅な圧縮比の変化が瞬時に必要となるが、実現できる機構は現時点では存在しない。

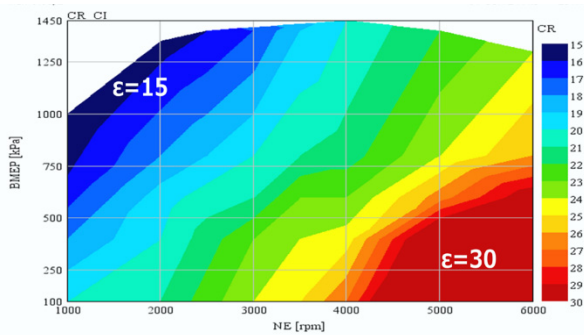


Fig. 9 Compression Ratio Required for Autoignition

3. SPCCI燃焼の紹介

HCCIの課題は、圧縮着火燃焼範囲を拡大しつつ、CIとSIの燃焼の切り替えをスムーズに行うことである。

つまりCIを制御（コントロール）する技術「CCI=Controlled Compression Ignition」、この制御技術がブレークスルーであり、マツダが保有する独自技術のポイントになる。

全域で安定した燃焼を実現するためには、どうしてもSIとCI領域の切り替えが必要であることから、HCCIエンジンとはいえ、スパークプラグをもつ構造とすることを選択した。「スパークプラグを圧縮着火の制御因子、コントロール手段として活用する」という考えにより、一部の冷

間時をのぞくほぼ全域で、圧縮着火CI燃焼の実現を可能とした。以下このブレークスルー技術コンセプトを説明する。

SKYACTIV-XではFig. 10に示すようにハードウェアによるベース圧縮比16.3に対し、スパークプラグの点火による膨張火炎球が、第二のピストン（エアピストン）のように、燃焼室内の混合気を追加圧縮し、瞬時にCIに最適な温度圧力を形成する、いわば「可変圧縮比機能」を実現している。

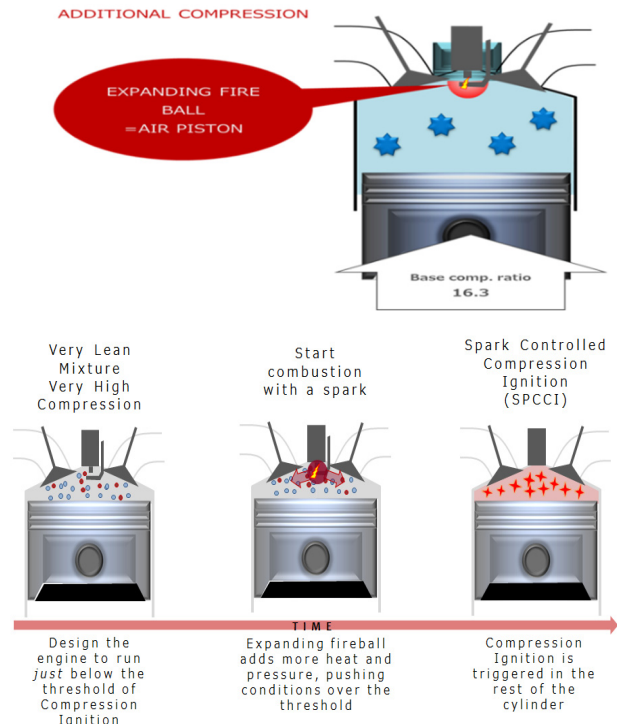


Fig. 10 Breakthrough Solution for CCI

Fig. 11にSPCCIの熱発生率を示す。適度に高圧縮比化しておけば途中でCIが起きる、つまり初期火炎伝ばに十分な空燃比を選べばSIを使ってCIをコントロールすることが可能になる。更にFig. 12に示すように、SI燃焼、CI燃焼の比率をコントロールすることで、エンジンの運転状態に応じて制御されたSPCCI燃焼を実現している。

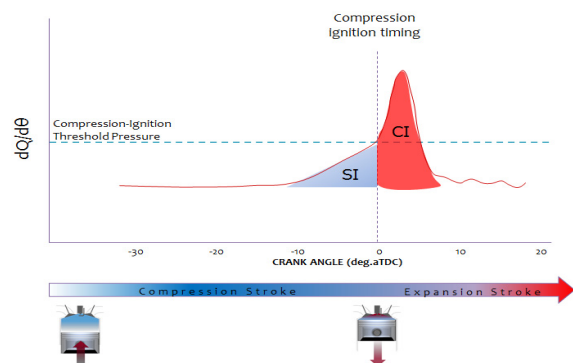


Fig. 11 SPCCI Concept

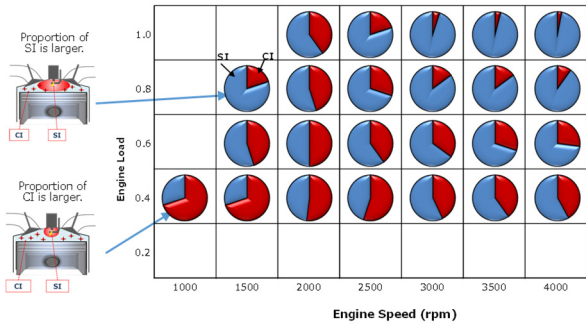


Fig. 12 Controlled Compression Ignition Combustion over Wide Range of Operating Conditions

スパークプラグを制御因子とした圧縮着火を行うにあたって、以下の課題のブレークスルーが必要となった。

(1) 常に安定した火種を作る

常に安定した火種を作るためには点火時期での混合気の分布の制御が必要であった。CCIに必要な膨張火炎球生成に要求される、点火時の混合気濃度分布をFig. 13にしめす。

全体はCI燃焼のためのリーンな混合気を分布させた上で、プラグ周辺にのみ火花点火可能で、しかもNOxが激しく発生しない程度の濃度の混合気を燃料噴射の工夫と流動の組合せで実現した。点火時期と噴射時期の同期制御を可能にした結果、安定した火花点火～安定燃焼を実現できた。

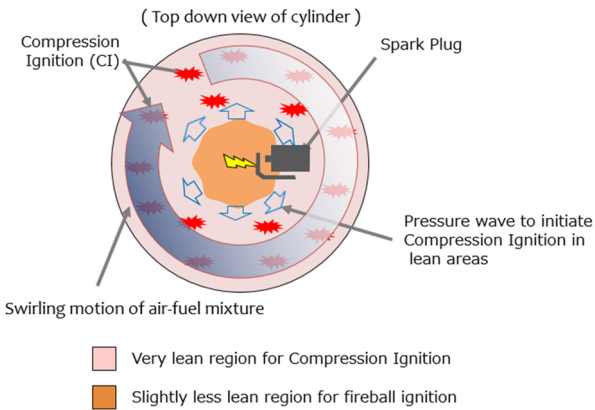


Fig. 13 Concept of Air-Fuel Mixture Control

(2) プリイグ・異常燃焼制御

従来高圧縮比エンジンでは負荷を上げるために空気量を増やすと圧縮端圧力が高くなり自着火しやすくなるためにプリイグという現象が発生しやすくなる。この現象は、高圧縮比でかつ予混合がゆえに生じていた課題である。この課題に対しては、Fig. 14に示すように圧縮行程での燃料噴射で着火遅れ時間を制御することで対応した。具体的には分割噴射を採用し、負荷増大に合わせて圧縮行程噴射の割合を増やし、未燃混合気が圧縮される時間を最小化することでプリイグを回避させた。更に圧縮行程で噴射するとプリイグは回避できるが、燃料と空気が混ざる時間が少な

くなるので煤が出やすくなるという新たな問題が出る。この課題の解決のために、超高燃圧の燃料噴射システムと燃焼室中心に配置された小径多噴孔をもつ燃料噴射弁を開発した。超高圧噴射は、微粒化を促し、気化霧化を促進することに加えて、エンドゾーンまで活用した燃料配置の最適化を実現した。また、SPCCIでは火炎伝ばによる圧縮効果を利用することで、筒内温度・圧力制御のための圧縮比依存度を下げ、圧縮比を適正化できたことも異常燃焼の抑制に有効に作用している。

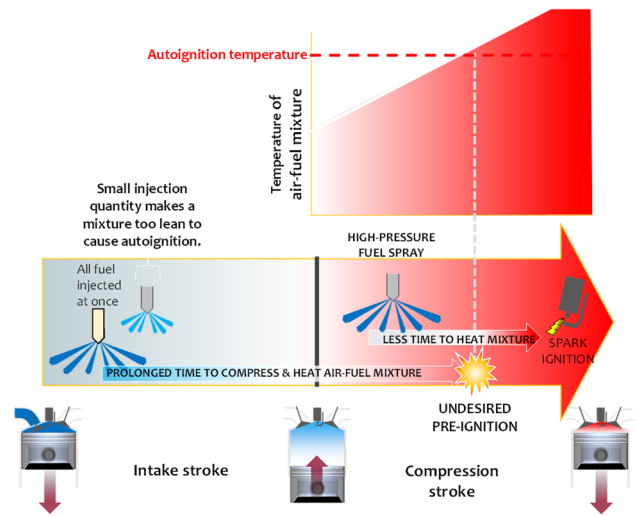


Fig. 14 Higher Pressure and Split Fuel Injection Strategy

(3) 燃焼状態監視制御

前述した異常燃焼の回避技術に加え、それら制御が正しい燃焼を導いていることを常に答え合せをする、つまり意図と結果のずれをリアルタイムに補正し、常にありたい燃焼とするために、筒内圧センサーによる監視制御を実行している。吸気温度の変化に対し、点火時期を制御することにより目標の燃焼状態に制御可能であることをFig. 15に示す。

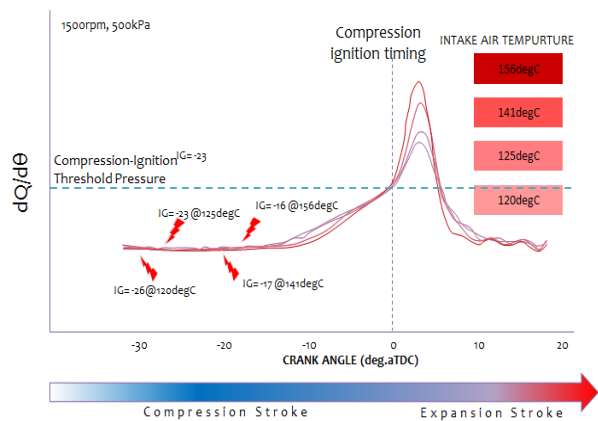


Fig. 15 Concept of Combustion Monitoring Control

以上のような取り組みにより、圧縮着火領域を全負荷領域まで拡大できた。

SPCCIとは、単に火花点火で圧縮着火をアシストするだけではなく、筒内温度／圧力、更には燃料噴射による混合気分布濃度／EGRの制御を含む、総合的な燃焼制御技術である。この完全に制御された圧縮着火、火花点火を実現したのがマツダ独自の燃焼方式SPCCIで、圧縮着火燃焼を火花点火で制御した燃焼である。

4. SPCCIの制御

SKYACTIV-Xでは3つの基本となる燃焼モード (Layer) を設定している。

- ① Layer 1 : SI燃焼。極冷間や高地の条件で使うほか、システムに異常が起こった時に、安定した運転ができるモードとして使用する。
- ② Layer 2 : 大量のEGRを導入したG/FリーンSPCCI燃焼。外部、内部EGRを用いて低燃費を実現。冷間時、及び中負荷領域に適用。
- ③ Layer 3 : EGRの少ない、A/F30を超えるA/FリーンSPCCI燃焼。軽負荷領域を大A/Fで低燃費を実現。

各燃焼モードは成立条件がそれぞれ異なるために、実際の使い方においてはエンジン回転、負荷、さまざまな環境条件 (温度、気圧、etc) に対して燃焼モードを切り替えるように制御している。

Fig. 16にエンジン回転、負荷に対する各燃焼モードの領域を、またFig. 17に吸気温度や燃焼室壁面温度の変化に対しての各燃焼モードの制御を示す。

A/FリーンSPCCI燃焼モードを運転中に成立条件から外れると、G/FリーンSPCCI燃焼モード、SI燃焼モードに切り替える制御を行う。

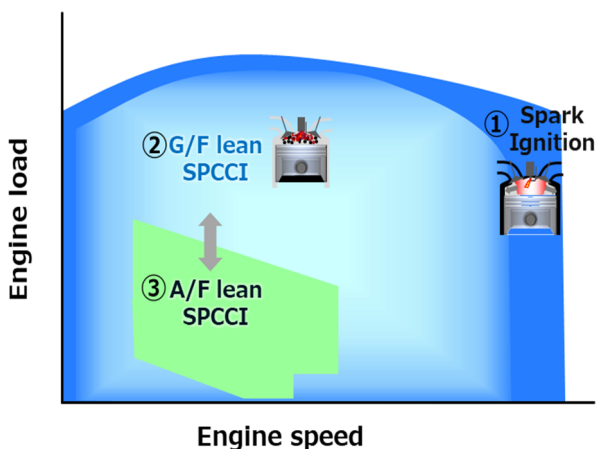


Fig. 16 Control for Combustion Modes (Engine Speed and Engine Load)

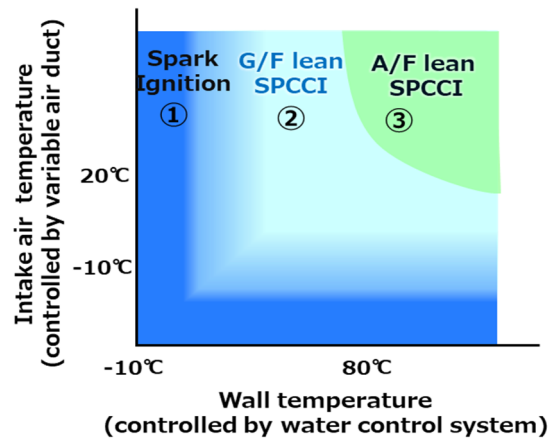


Fig. 17 Control for Combustion Modes (Intake air and combustion chamber wall temperatures)

5. SPCCI燃焼の活用拡大

5.1 SPCCI燃焼へ移行するための早期暖気の概要⁽¹⁾

SKYACTIV-Xの熱マネジメントは、従来よりも少なく限られた熱エネルギーをいかに有効に活用するかをコンセプトに開発した。

(1) 水流制御

SPCCI燃焼は、筒内の温度を一定値以上に高めなければならない。一晚駐車した後の走行時等は、局所的に温度を高め、エンジン全体の構造体や冷却水及び潤滑油に熱が拡散しないようにしている。具体的には、燃焼時の発熱量が冷却水を介して循環され、各部へ拡散していく為、始動後の発熱量と構造体の熱容量を元に、燃焼室周りの壁温を予測し、信頼性や快適性 (暖房性) から許容できる数分間は冷却水の流れを止め、筒内の暖機を向上させている。また、冷却水を流し始めても、発熱量と放熱量のバランスを確認しながら、SPCCI燃焼が実現できる状態を維持すべく冷却水の流量を、流調弁を用いて制御し、燃焼室の入口と出口の水温をモニターし筒内を適温に保っている。燃焼室周りの水温の上昇を大幅に早め、燃焼効率の高い状態へ早期に移行できる様に水流を制御している。

(2) エンジンカプセル化

エンジン燃焼室温度を適温に保ち、かつ燃焼音に寛容なエンジン環境を整えることで、SPCCI燃焼頻度を上げる技術としてエンジンカプセル化を採用している。

エンジンカプセルは、Fig. 18に示すようにカプセルカバー、エンジン直貼り、アクティブエアシャッター、アンダーカバー、スプラッシュシールドで構成され、エンジン周りにホットゾーン空間を形成し、エンジンの熱を逃がさず、温かい空気を溜め、かつエンジンから放射される音を吸音する機能を適正機能配分で実現している。

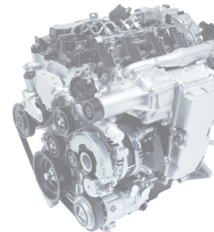
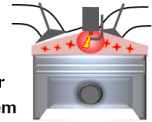
6. エンジン諸元とユニット性能

エンジンの主要諸元と主要なコントロールシステムを Fig. 20に示す。

SKYACTIV-X

Hardware specifications

- SPCCI
 - ・Cylinder pressure sensor
 - ・High pressure fuel system
 - ・Air supply (supercharger)
 - ・S-VT system
 - ・SCV



■ Base engine

- Displacement : 1997cm³
- Bore x Stroke : 83.5 x 91.2
- Compression Ratio : 16.3
- Low pressure EGR system

Control System

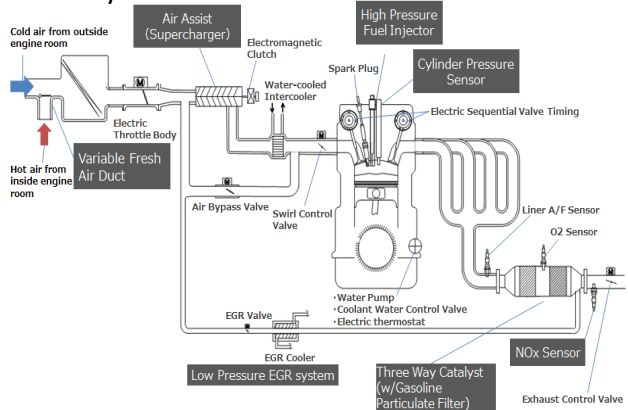


Fig. 20 SKYACTIV-X Hardware Specifications

6.1 出力性能とレスポンス

SKYACTIV-XのトルクカーブをFig. 21に示す。

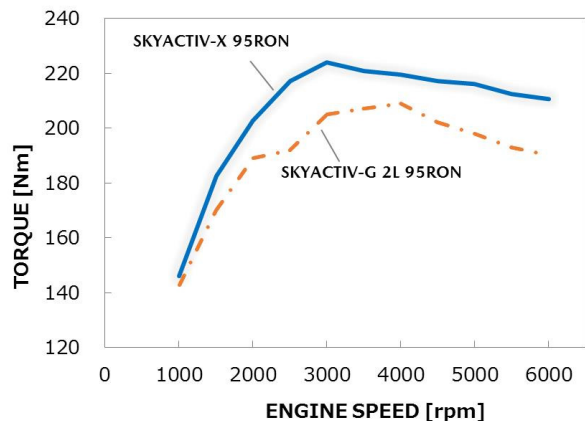


Fig. 21 Torque

SPCCI燃焼とエアサプライの組み合わせにより、SKYACTIV-G に対し全域で約10%以上の大幅なトルク向上を実現した。

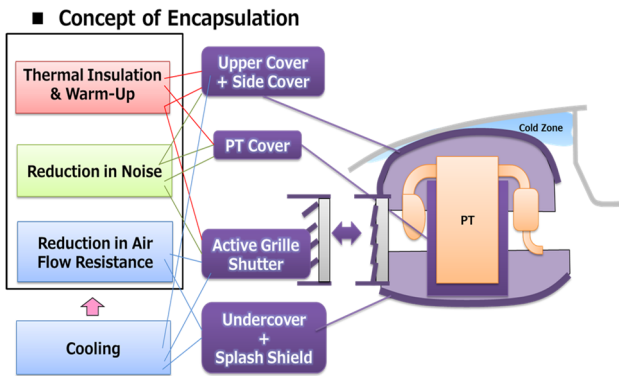


Fig. 18 Concept of Encapsulation

5.2 SPCCI燃焼を実現するNV対応技術の概要⁽²⁾

SPCCI燃焼はこれまでのSI燃焼と比較すると、Fig. 19に示すように熱発生率の勾配が大きくなるために高周波の燃焼起振力が増加し、エンジンからの放射音が大きくなる。

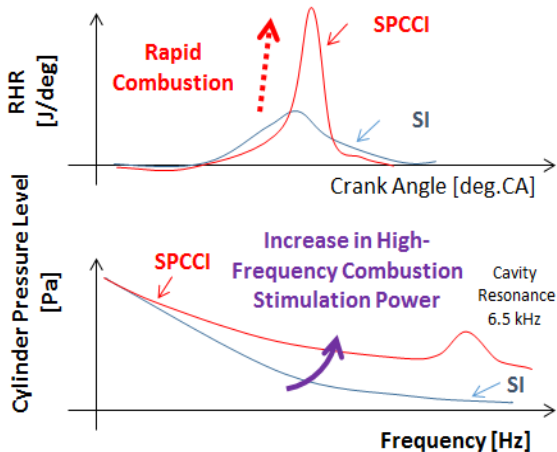


Fig. 19 Characteristic of Cylinder Pressure Level

この課題に対してもSPCCI燃焼の頻度を高めるために、燃焼制御、遮音、伝達しにくくする等の機能配分を行い、車内音は普通の車両と変わらないように対応した。

(1) 燃焼制御

筒内圧センサーによる燃焼制御で燃焼圧のコントロールを行う。常時、燃焼状態は監視しているので燃焼音からの限界値内で熱発生が起きるように点火時期を制御し、燃焼のフィードバック制御を行っている。

(2) 遮音

前述したエンジンカプセルで遮音機能を併用している。

(3) 伝達しにくくするための手段

ピストン、コンロッドの共振を防ぐ手段として、ディーゼルエンジンでも採用しているナチュラルサウンドスーマーで4kHzあたりの低減を図った。

SKYACTIV-Xの提供価値にレスポンスの良さがある。圧縮着火をするために、空気を押し込んでいる状態であることから吸気の遅れが少なく、また熱効率が良いため、同じ空気に対して大きなトルクを出せることがレスポンスの良い理由である。お客様が一定の速度で走っている状態から、アクセルペダルを踏み込む状況において、同じ圧縮着火のディーゼルエンジンと同じような良好な初期レスポンスを感じられる。また、ガソリンエンジンの良さである高回転時の伸びやかさは、ディーゼルエンジンに対して優位性を持っており、この点においても、走る喜びを提供することができると考えている (Fig. 22)。

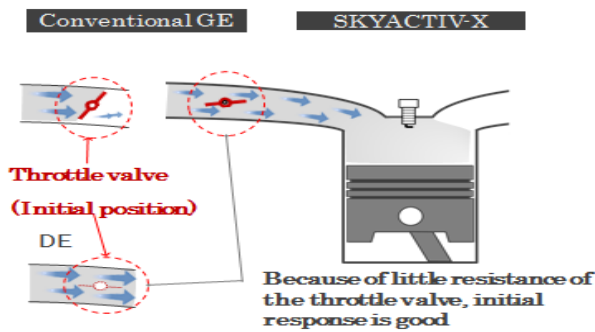


Fig. 22 Advantage of SPCCI

6.2 燃費性能

燃費に関しては2つの進化をさせた。まず第一に、燃費率の大幅な改善である。エンジンの燃料消費率については、現行エンジンのSKYACTIV-G比で平均して10%改善、更に低車速での使用頻度の高い領域ではスーパーリーン燃焼の活用により最大で約20%以上改善し、最新のディーゼルエンジンSKYACTIV-Dと同等以上の燃費率を実現している (Fig. 23)。

また、NEDCモード車両燃費では、車両の走行抵抗低減を行い、M Hybridも活用しながら前モデルに対し約30%の燃費改善を図った。

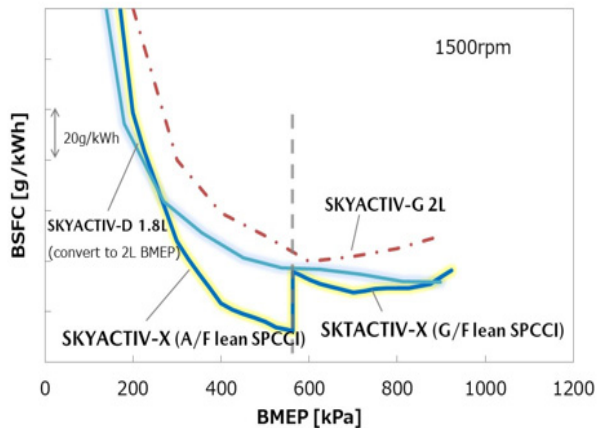


Fig. 23 Fuel Consumption(BSFC)

次にフラットな燃料消費率特性の実現である。Fig. 24にSKYACTIV-XとSKYACTIV-Gの燃費率マップの比較を示す。リーンSPCCI燃焼により、これまであまり燃費が良くなかった特に軽負荷域の燃費が大幅に改善したため、実用走行において低燃費の領域を広く使うことが可能となり、実用燃費の大幅な改善が図れた。特に軽負荷域の燃費改善率が大きいので、“大排気量=燃費が悪い”という既成概念を完全にブレークスルーしている。

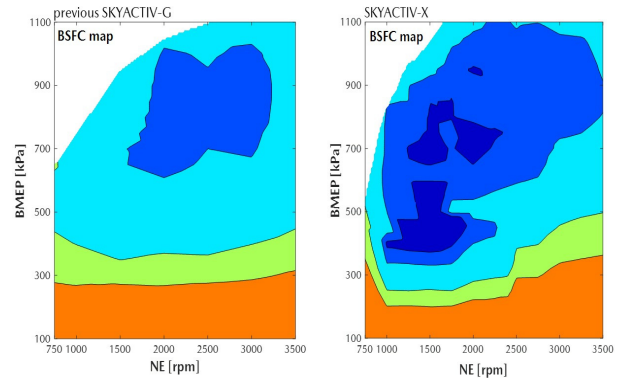


Fig. 24 Fuel Consumption Map

7. おわりに

「SKYACTIV-X」は、ガソリンエンジンとディーゼルエンジンの特徴を融合した新しいマツダ独自の内燃機関であり、優れた環境性能と出力・動力性能を妥協なく両立するとともに、マツダが目指す人馬一体の走りをつるサポートする、地球と人に寄り添うエンジンである。今後は、2.0Lの優れた特性を他の排気量に効率的に転写し、主要市場に導入することで、人・地球・社会の課題を走る喜びで解決するというサステナブル“Zoom-Zoom”宣言 2030のコンセプトに貢献していきたい。

参考文献

- (1) 幸徳ほか：SKYACTIV-X用熱マネージメント技術、マツダ技報, No.36, pp.32-37 (2019)
- (2) 神田ほか：SKYACTIV-X NVH技術、マツダ技報, No.36, pp.38-43 (2019)

■ 著 者 ■



磯部 利太郎



遠藤 孝次



末岡 賢也

特集：新型MAZDA3

4

SKYACTIV-Xを実現する燃焼技術

The Combustion Technology

Enabling the SKYACTIV-X Performance

漆原 友則*¹ 松本 浩太*² 末岡 賢也*³ 井上 淳*⁴
 Tomonori Urushihara Kota Matsumoto Masanari Sueoka Atsushi Inoue
 丸山 慶士*⁵ 山口 直宏*⁶ 森本 博貴*⁷ 松尾 佳朋*⁸
 Keiji Maruyama Naohiro Ymaguchi Hiroki Morimoto Yoshitomo Matsuo

要 約

SKYACTIV-Xではこれまでに例を見ない高圧縮比を採用した。これにより、部分負荷運転時に圧縮自己着火燃焼を発現させることによって、高希釈／希薄燃焼を可能とし、実用運転時の燃費を改善することができた。他方、高負荷条件においては高圧縮比化に伴い、伝ば燃焼に引き続き発生する自己着火燃焼が大きく生じる傾向となる。SKYACTIV-Xでは全負荷の自己着火燃焼を穏やかにかつ安定的に発生させることにより、高圧縮比下でも十分な軸トルクを発生させることができた。

部分負荷並びに全負荷で実施したこの火炎伝ばと自己着火の併用燃焼をSPCCI (Spark Controlled Compression Ignition) と呼び、本報ではSPCCI燃焼をどのように実現したかを報告する。

Summary

The Skyactiv-X has made extra-high compression ratio possible compared with conventional gasoline fueled engines. Under a part-load condition, highly diluted/lean mixture combustion was realized with the assistance of compression ignition combustion, resulting in a great improvement in vehicle fuel economy. In the meantime, under a full-load condition, strong auto-ignition tends to occur with the employment of a higher compression ratio. The Skyactiv-X attained sufficient output torque, even with a high compression ratio, with the help of mild and stable auto-ignition combustion under a full-load condition.

The compression ignition combustion triggered by flame propagation, which occurred under both part-load and full-load conditions, has been named SPCCI (Spark Controlled Compression Ignition). In this article, we describe in detail how the SPCCI combustion has been realized.

Key words : Spark Ignition Engine, Homogeneous Charge Compression Ignition, New Combustion Model /New Combustion Model Engine, Performance/Fuel Economy/Efficiency, Mixture Formation/Gas Flow, SPCCI

1. はじめに

HCCI (homogeneous charge compression ignition) 燃焼に代表される圧縮自己着火燃焼は伝ば燃焼限界空燃比を超える希薄／希釈混合気を燃焼させることができるため、次世代の高熱効率燃焼として期待されてきた。一方、圧縮自己着火燃焼を引き起こすためには高い圧縮開始温度や高い圧縮比が必要である。圧縮自己着火燃焼のために高い圧縮比を採用する場合には、全負荷時にノッキングに代表さ

れる異常燃焼を回避する何等かの方策が必要である。圧縮開始温度を高める方策を採用する場合には、HCCI燃焼の燃焼開始時期が圧縮開始時点の温度圧力等の混合気条件で決定されるため、高度な可変動弁系で内部EGR量を連続可変とする等、圧縮開始温度の緻密な制御が必要であった。

今回開発したSKYACTIV-Xでは火花点火伝ば燃焼によって圧縮自己着火を制御する新しい燃焼方式SPCCI (Fig. 1)を採用することによって、部分負荷ではHCCI燃焼に必要な圧縮比より低い圧縮比で自己着火燃焼の利点を活用する

*1~8 エンジン性能開発部
 Engine Performance Development Dept.

一方、高圧縮比を採用した際に問題となる全負荷での異常燃焼を抑制することができた。合わせて、部分負荷での自己着火時期制御の課題をシンプルな構成で克服することが可能となった。

本報では部分負荷並びに全負荷で採用した、SPCCI燃焼をどのように実現させたかを詳述するとともに、SPCCI燃焼で得られた性能諸特性を報告する。

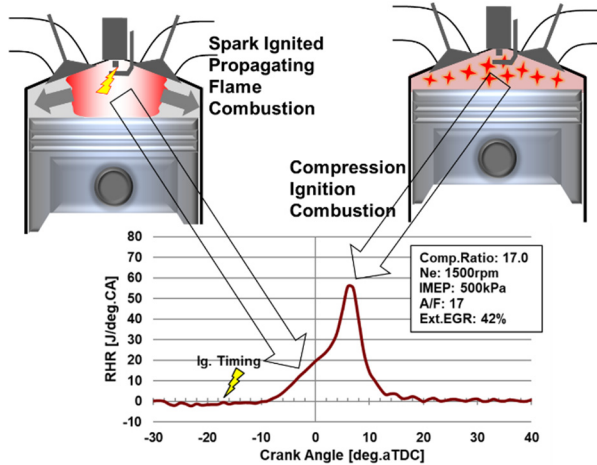


Fig. 1 Schematic of the SPCCI Combustion Concept and the Typical Heat Release Curve

2. SKYACTIV-Xにおける燃焼課題

2.1 部分負荷での要求圧縮比

火花点火伝ば燃焼に頼らないHCCI (Homogenous Charge Compression Ignition) 燃焼では圧縮上死点付近において自己着火に至らしめるために、内部EGRを使用しない場合、高い圧縮比を要求することが知られている⁽¹⁾。

Fig. 2は圧縮上死点にて自己着火を発生させるために必要な有効圧縮比を計算で求めたものである。例えば機関速度2000rpm部分負荷BMEP200kPaにおいては20程度の圧縮比が必要であることがわかる。圧縮比をこのような高い値から下げようとする場合には、圧縮開始温度を上げるために内部EGRを利用する必要があり、任意量の内部EGRを導入するための高度な連続可変動弁系が必要となる。SKYACTIV-Xでは複雑な可変動弁系を採用せず、圧縮比を高める方策を採用することとした。

2.2 全負荷での要求圧縮比

他方、Fig. 2から、機関速度2000rpm 全負荷BMEP1300kPaにおいては、圧縮比約15にて点火せず圧縮自己着火することがわかる。このことはノック等の異常燃焼なく全負荷を運転できる圧縮比と、部分負荷で圧縮自己着火燃焼を活用できる圧縮比との間に大きな乖離があることを示している。

近年部分負荷での高い熱効率要求から、ガソリンエンジンの圧縮比は上昇傾向にある。マツダでは複数のノッキング抑制技術⁽²⁾を投入することによって、自然吸気ガソリン

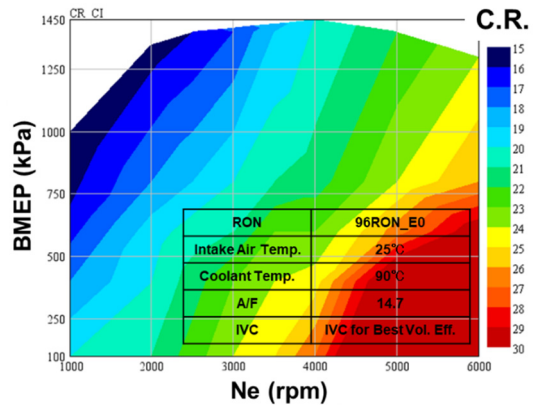


Fig. 2 Required Compression Ratio for the Auto-ignition at Compression TDC

エンジンSKYACTIV-Gにて既に圧縮比14を実用化している (Fig. 3)。しかしながら、部分負荷での圧縮自己着火燃焼で必要とされる高い圧縮比を採用するためには、これまでに開発したノック抑制技術に加えて、さらなる新しい方策を導入することが必要であった。

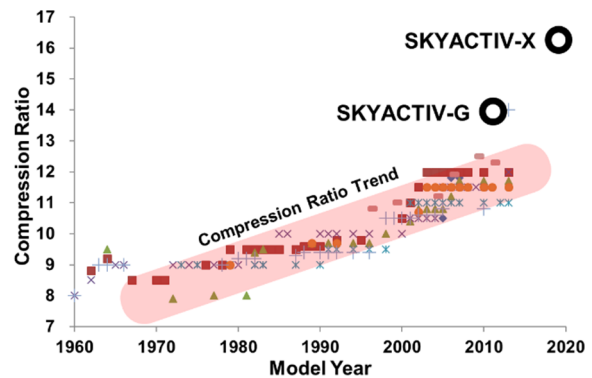


Fig. 3 The History of Compression Ratio Improvement

2.3 燃焼課題のまとめ

部分負荷からの圧縮比要求と全負荷からの圧縮比要求は相反する。圧縮自己着火を応用する部分負荷性能と全負荷性能を両立させることが最大の燃焼課題である (Fig.4)。

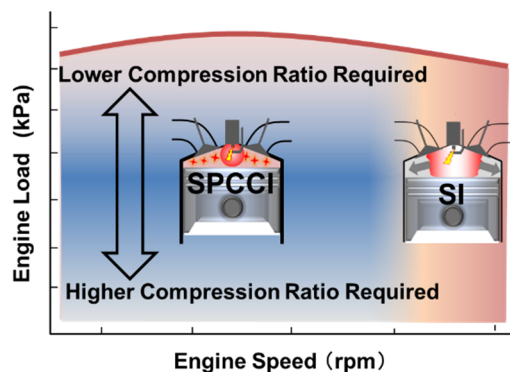


Fig. 4 Conflict in Compression Ratio Requirements

3. 機関諸元

SKYACTIV-Xでは部分負荷性能と全負荷性能の両立性をかんがみ、ガソリンエンジンとしてこれまでに例のない高圧縮比16.3を採用した。

SKYACTIV-Xの諸元を燃焼開発のために使用した単気筒エンジンの諸元と合わせてTable 1に示す。燃焼室形状をFig. 5に示す。

以下の各章において、部分負荷並びに全負荷の燃焼について詳述してゆく。

Table 1 Specification of the tested Engines

Engine Type	Single Cylinder	Inline 4cylinder
Displacement (cc)	500	2000
Bore*Stroke (mm)	83.5 * 91.2	83.5 * 91.2
Compression Ratio	17	16.3
Valve Mechanism	Fully Variable Hydraulic Valve Actuation	Sequential Valve Timing on Intake and Exhaust
Fuel Injection System	Multi hole Central Direct Injection	Multi hole Central Direct Injection
Maximum Injection Pressure (MPa)	100	70
Fuel Octane Number	RON95	RON95
Air Supply System	External Supercharger	Roots Supercharger

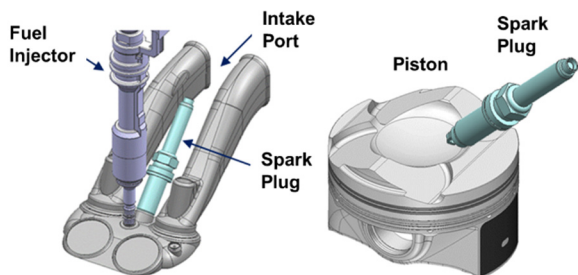


Fig. 5 Combustion Chamber Geometry

4. SPCCI燃焼の部分負荷への適用

4.1 HCCI燃焼の特性と課題

良く知られているように、HCCI燃焼の燃焼位相は吸気弁閉時期の温度、圧力及び混合気組成で決定される。このため吸気温度に対する燃焼位相の変化は大きい。Fig. 6は吸気温度を変化させたときのHCCI燃焼の位相変化を示したものである。吸気温度を低下させると燃焼位相が大きく遅角することがわかる。

4.2 SPCCI燃焼の特性

Fig. 7は火花点火伝ば燃焼を先行させて自着火燃焼を発生させるSPCCI燃焼において、同じく吸気温度を低下させた場合の熱発生率の変化を示す。図から明らかなように、SPCCI燃焼では吸気温度による燃焼位相への影響が緩和

されていることがわかる。

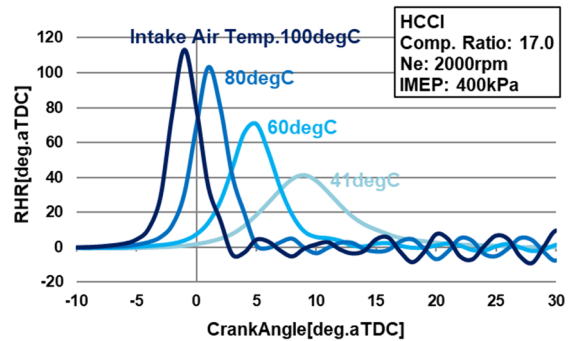


Fig. 6 Effect of Intake Air Temperature on HCCI Combustion

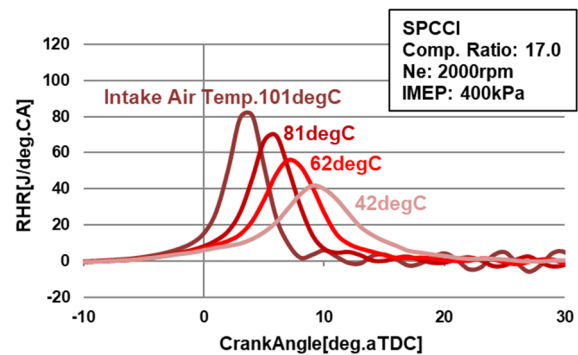


Fig. 7 Effect of Intake Air Temperature on SPCCI Combustion

Fig. 8は以上の結果を吸気温度を横軸に取り、燃焼位相に対する影響を示したものである。吸気温度に代表される外乱に対するロバスト性が改善されていることがわかる。

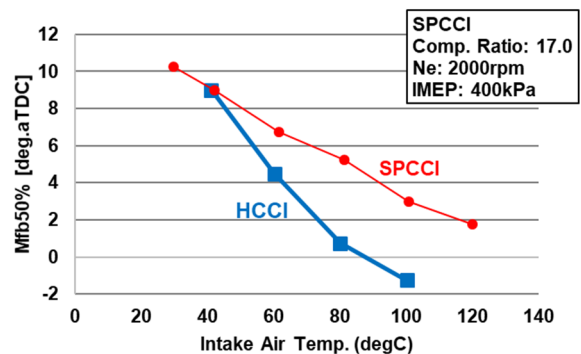


Fig. 8 Comparison among Intake Air Temperature Sensitivities of HCCI and SPCCI

SPCCI燃焼のもう一つの利点は点火時期によって自己着火燃焼の位相を制御できることである。Fig. 9は吸気温度が変化したときの燃焼位相の変化を示す。同条件にて、吸気温度ごとに点火時期を変化させて燃焼位相をMBTに制御

することが可能である。Fig. 10はこの結果を示したものである。

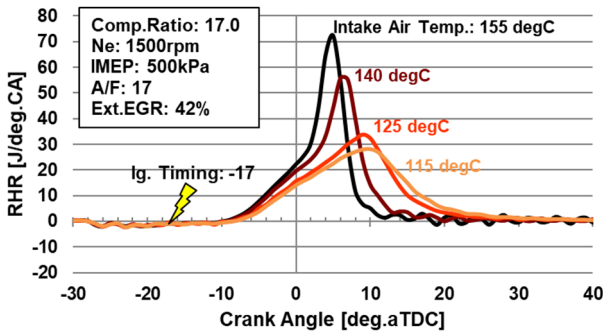


Fig. 9 Effect of Intake Air Temperature on SPCCI Combustion Phasing under Fixed Spark Ignition Timing

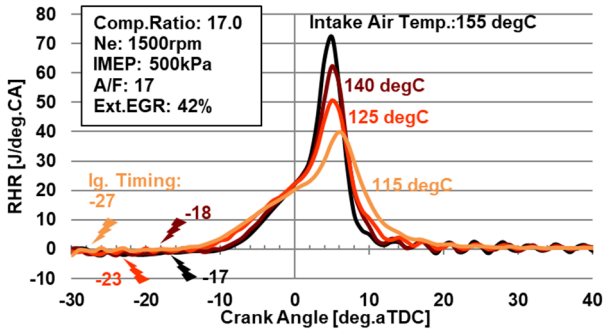


Fig. 10 Temperature Compensation by Spark Ignition Timing

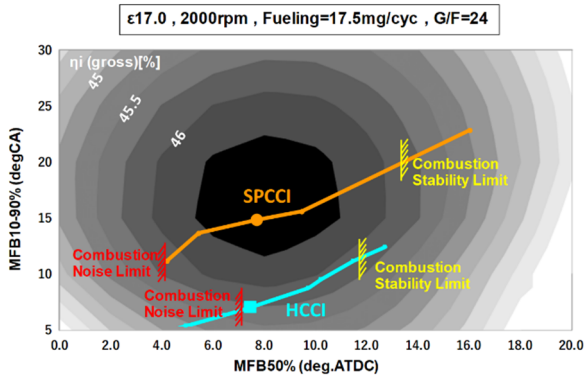


Fig. 11 Comparison between HCCI and SPCCI Operating Region on the Combustion Phasing - Combustion Duration Plane

Fig. 11は燃焼位相—燃焼期間 平面上において、HCCIとSPCCIの比較を行ったものである。背景の等高線は0次元計算で求めた図示熱効率である。図中HCCIのカーブは、わずかにA/Fを変化させることによって生じた燃焼位相、燃焼期間の変化を示す。SPCCIのカーブは点火時期を変化させることによって生じた同変化を示す。SPCCI燃焼においてはHCCI燃焼と比較し、燃焼騒音と燃焼安定度に

挟まれる運転可能領域が広いことがわかる。また、燃焼期間が長いことによって熱効率においても有利であることがわかる。

次にSPCCI燃焼による要求圧縮比の緩和作用について示す。Fig. 12は火花点火伝ば燃焼の開始時期を横軸に、圧縮比を縦軸に取り、自己着火燃焼割合がどのような割合になるかをShell modelを用いて計算したものである。伝ば燃焼開始時期を遅らせた状態 (-10degATDC) では圧縮比17でも自己着火燃焼は発生しないが、伝ば燃焼開始時期を-30degATDCまで進角すると圧縮比16程度で自己着火燃焼の割合が50%に達することがわかる。

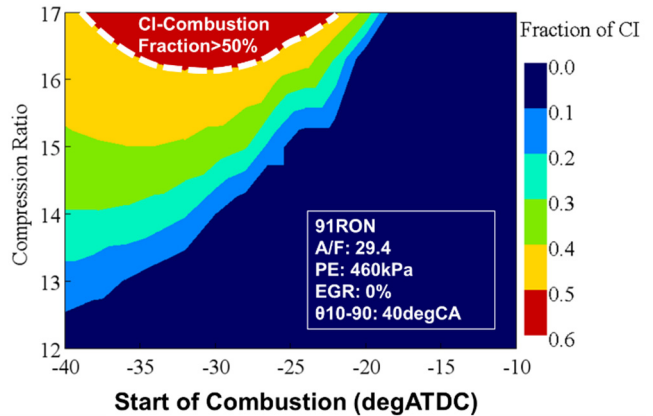


Fig. 12 Auto-Ignition Combustion Fraction as a Function of Compression Ratio and the Propagating Combustion Phasing

以上をまとめるとSPCCI燃焼の特長として以下の3点を挙げる事ができる。

- ① 吸気温度等の外乱による燃焼位相への影響が小さい。
- ② 吸気温度等の外乱による燃焼位相への影響を点火時期で打ち消すことができる。
- ③ 低い圧縮比で自己着火燃焼を発生させることができ、希薄燃焼限界とEGR限界を高くすることができる。

4.3 A/FリーンスPCCIの燃焼特性

SPCCI燃焼では自己着火燃焼を発生させるため伝ば燃焼を利用する。伝ば燃焼はHCCI燃焼に比べて濃い混合比を要求するため、排出NO_x濃度が高くなる事が懸念される。また、NO_xを下げるために点火点近傍の空年比を薄くすると伝ば燃焼速度のサイクル変動が大きくなり、後続する自己着火燃焼の発生タイミングが変動する原因となる。伝ば燃焼速度のサイクル変動を抑制することがSPCCI燃焼を成立させるために重要な要素となる。

Fig. 13は図中に示した運転条件においてSPCCI燃焼を行った際のNO_x-BSFCトレードオフ線を示したものである。A/F30で燃焼安定度を確保するためには、圧縮行程で燃料を噴射することによって混合気を成層化する方法がある。

この場合、図中◆で示す高い排出NO_x濃度が発生する結果となった。

伝ば燃焼の安定度を高めるためにスワールコントロールバルブを閉じて乱流を形成させると、混合気の成層化に依存する必要性が小さくなり、NO_x-BSFCトレードオフ線は大きく改善することができる(図中■)。

更に、燃料噴射を2回に分割し、混合気の最適配置を図ることでNO_x-BSFCトレードオフは更に改善する(図中▲)。

Fig. 14は、DOE (Design of Experiment, 実験計画法)を使用して最終的なキャリブレーションを導いた過程を示す。Fig. 14中の白破線はFig. 13中の▲のトレードオフ曲線に相当し、最終的に白丸で示す燃料噴射時期並びに分割比を採用した。

Fig. 15は同じくDOEを使用して導いた、希薄燃焼域高負荷での噴射キャリブレーションに対応する燃焼室内混合気分布(CFD計算結果)を示す。希薄燃焼域高負荷では複数の噴射を組み合わせることによりおおむね均質の混合気を形成している。また、点火プラグ周辺には燃焼安定化のため、やや濃い混合気が準備されていることがわかる。

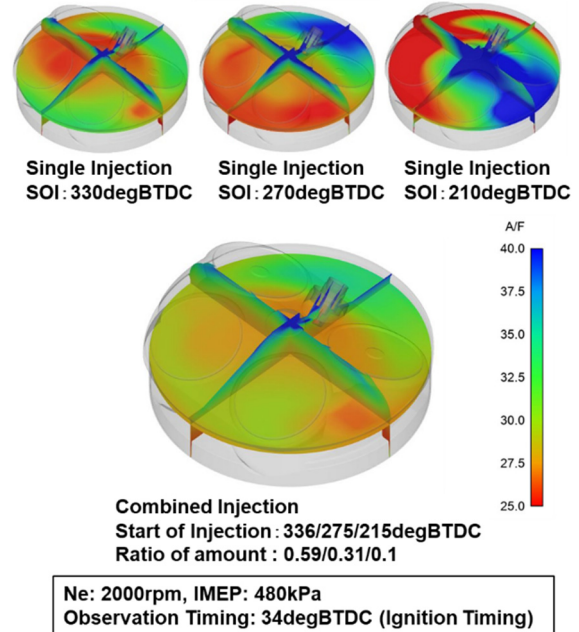


Fig. 15 An Example of the Attained Mixture Distribution through DOE Approach

5. SPCCI燃焼の全負荷への適用

5.1 全負荷でのSPCCI燃焼課題

部分負荷SPCCI燃焼では自己着火燃焼を誘発するために火花点火伝ば燃焼を利用した。逆に、全負荷では自己着火燃焼の抑制と緩慢化が必要となる。火花点火伝ば燃焼速度のサイクル変動は自己着火燃焼の位相変動を引き起こし、自己着火燃焼割合の変動や自己着火燃焼に伴うCPL (Cylinder Pressure Level) の悪化を招いてしまう。このため、伝ば燃焼の安定が重要である点は部分負荷SPCCIと同様である。

まとめると、全負荷SPCCI燃焼においては

- ① 自己着火燃焼の緩慢化
- ② 自己着火燃焼の安定化 (伝ば燃焼の安定化)
- ③ 自己着火燃焼の抑制

の3つが重要な課題となる。

5.2 SPCCI燃焼の特性

Fig. 16(a)は、図示の運転条件にてEGR無でプレイグニッション限界の充填効率で運転したときの熱発生率を10サイクル分重ねて示したものである。伝ば燃焼が早く急激な自己着火燃焼を伴うサイクルと伝ば燃焼が遅く熱発生率が緩慢すぎるサイクルとが混在していることがわかる。点火進角は、伝ば燃焼が早く急激な自己着火燃焼を伴うサイクルで発生する高いCPL (Cylinder Pressure Level) によって実質的に制限される。

自己着火燃焼の抑制と緩慢化のためには外部EGRが有効である。Fig. 16(b)は、9%の外部EGRを加えたときの熱発生波形の重ね書きを示す。なお、充填効率と同じくプレイ

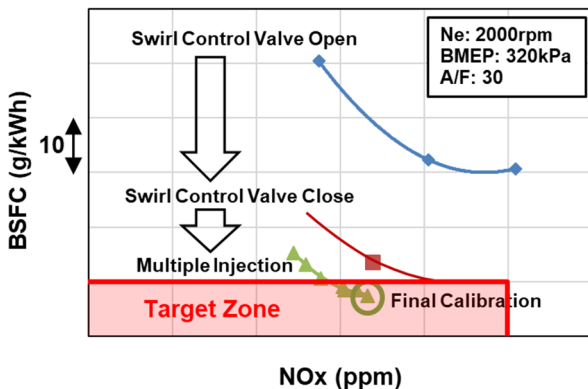


Fig. 13 NO_x-BSFC Tradeoff in SPCCI Combustion and Its Improvement

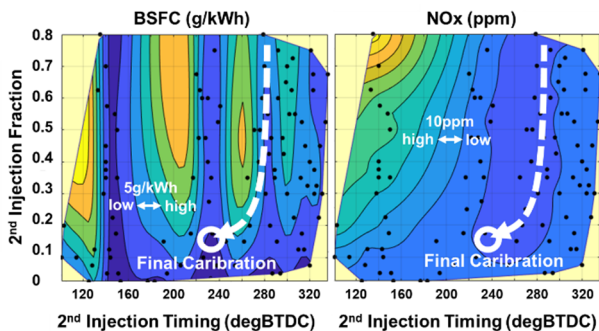
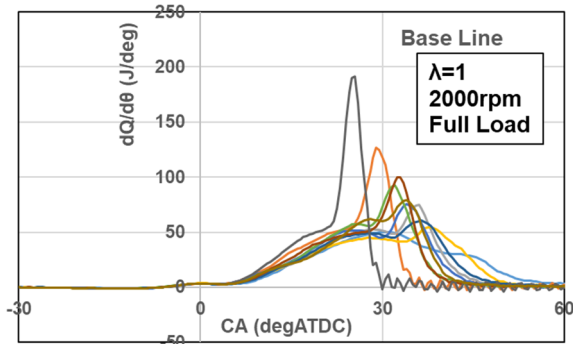


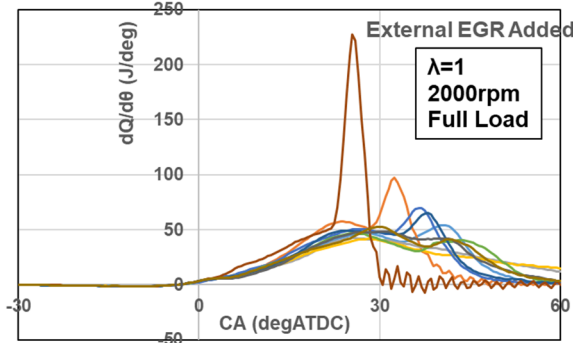
Fig. 14 NO_x-BSFC Tradeoff Improvement by DOE Approach

グニッション限界にセットしている。Fig. 17は外部EGRを加える等の改善策を施したときのプレイグニッション限界充填効率を示す。外部EGRを加えることによって充填効率を10%改善することができている。しかしながら、外部EGRを加えることによって自己着火が抑制され充填効率を向上させることができたものの、熱発生量のばらつきは一層悪化していることがわかる。

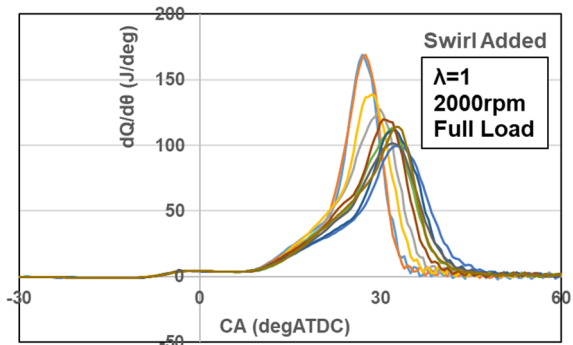
Fig. 16(c)は、外部EGRを付与した上で、スワールコントロールバルブを閉じることによってスワールを付与した場合の熱発生率を示す。伝ば燃焼のサイクル変動が低減され、それにもなつて自己着火燃焼の時期・量ともに安定する。急激な熱発生が抑制されると同時に燃焼が緩慢すぎるサイクルを削減することができていることがわかる。



(a) Baseline Heat Release



(b) Moderation of Auto-ignition Combustion by EGR Addition



(c) Stability Improvement by Swirl Addition

Fig. 16 Heat Release Curve of SPCCI Full-Load Combustion

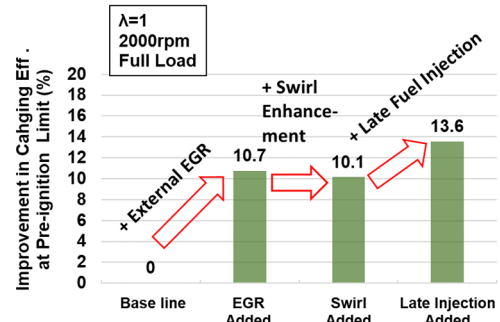


Fig. 17 Maximum Charging Efficiency Limited by Pre-ignition

次に一層の自己着火抑制のための圧縮行程燃料噴射の効果について説明する。自己着火の抑制のためにはエンドガスの冷却が有効である。エンドガスを冷却するための手段として濃い燃料を燃焼室周辺部に配置し、燃料の気化潜熱によって局所の混合気温度を下げる手段が考えられる。

SKYACTIV-Xでは燃焼室中心に配置された直接式燃料噴射弁とスワール流動、そして圧縮行程の適切な時期の燃料噴射との組み合わせによって、燃焼室周辺部に円環状の濃い混合気を配置することが可能である。

Fig. 18はTable 2 に示す計算条件にて、筒内混合気の当量比分布を計算したものである。燃料噴射時期を適切に選択することによって、燃焼室周辺のエンドガス部に濃い混合気を配置できていることがわかる。

Table 2 Calculation Condition

Engine Speed	2000 rpm
Charging Eff.	114%
Ext. EGR	9 %
Swirl Control Valve Position	15 %
Overall A/F	12.8
Fuel Pressure	30 MPa
Start of Injection	270 / 90 degBTDC
Injection Amount	9:1

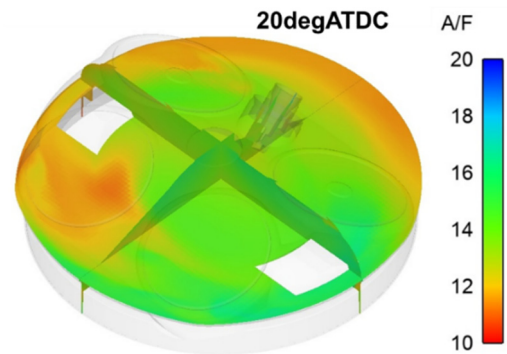


Fig. 18 Mixture Equivalence Ratio Distribution in Combustion Chamber Aimed for End Gas Cooling

Fig. 19 はこれまでに述べた、外部EGR, スワール流動の付与, 圧縮行程噴射によって達成できた機関性能, すなわち, プレイグニッション限界充填効率とその時の図示平均有効圧力の変動の推移を示す。圧縮行程噴射を組み合わせることによって, 一層の充填効率の向上と燃焼安定度の改善が図れていることがわかる。

以上示したように, 全負荷においてもSPCCI燃焼を使用することによって目標性能を達成することができた。

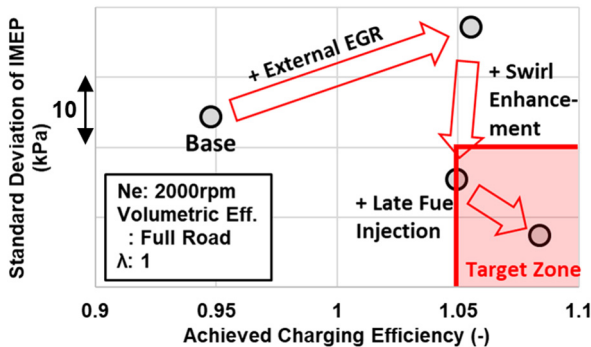


Fig. 19 Achieved Charging Efficiency and Combustion Stability at Full Load

6. SPCCI燃焼の適用結果

Fig. 20 は機関速度2000rpmにおいて低負荷から高負荷に至る各負荷の熱発生率の変化を示したものである。充填効率70%までのおおむねMBTを維持しながら希薄燃焼を実現し, 充填効率70%以上ではCPL (Cylinder Pressure Level) を許容値に抑えるために燃焼位相をリタードしながら, 安定した自己着火燃焼を伴って運転できていることがわかる。

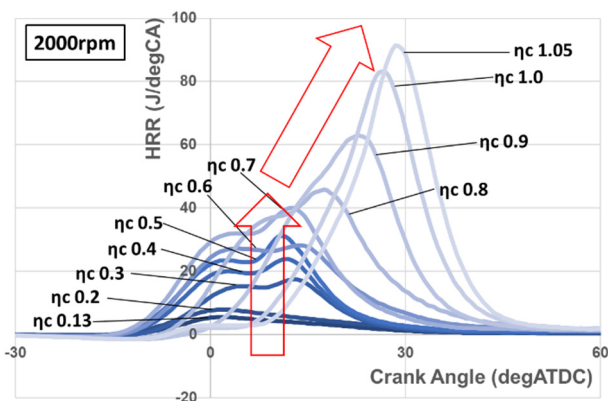


Fig. 20 SPCCI Heat Release Development with the Engine Load Increase

Fig. 21 は最終的に達成された燃費率を示す。これまでのエンジンに対して大幅な燃費率改善を行うことができた。

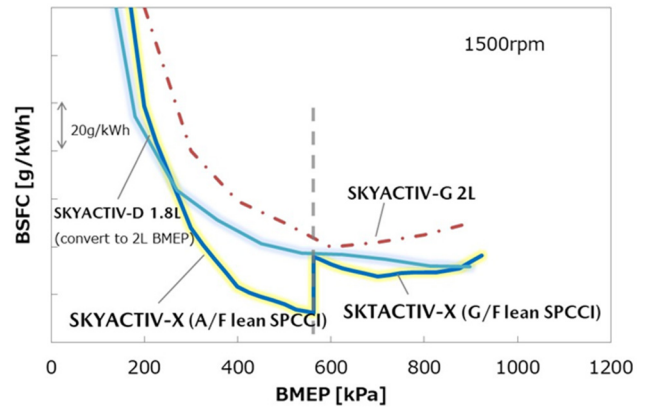


Fig. 21 Achieved Specific Fuel Consumption at 1500 rpm

7. まとめ

SKYACTIV-Xではガソリンエンジンとしてこれまでに例のない高圧縮比16.3を採用した。

火花点火伝ば燃焼後に, 圧縮自己着火燃焼を発生させること (SPCCI) によって, 部分負荷運転時に高希釈/希薄燃焼を可能とした。更に, 火花点火伝ば燃焼を併用することの効果により, 温度圧力等に対するロバスト性を改善することが可能となった。

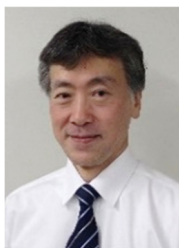
高負荷条件においては, 自己着火燃焼を緩慢にかつ安定的に発生させることが可能となり, 高圧縮比でも十分な軸トルクを発生させることができた。

以上のように, SKYACTIV-Xでは内燃機関の理想に向けた歩みを更に進めることができた。今後は「優れた環境性能」と「走る歓び」のために高圧縮比技術と希薄燃焼技術の開発を一層前進させることによって, 豊かな社会の実現に貢献していく。

参考文献

- (1) Koji Hiraya et al. : A Study on Gasoline Fueled-Compression Ignition Engine ~ A Trial of Operation Region Expansion, SAE Paper 2002-01-0416 (2002)
- (2) Masahisa Yamakawa et.al: Combustion Technology Development for a High Compression Ratio SI Engine, SAE Paper 2011-01-1871

■ 著 者 ■



漆原 友則



松本 浩太



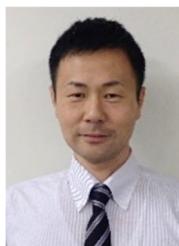
末岡 賢也



井上 淳



丸山 慶士



山口 直宏



森本 博貴



松尾 佳朋

特集：新型MAZDA3

5

SKYACTIV-X用熱マネジメント技術 Thermal Management Technology for SKYACTIV-X

幸徳 正信*1 Masanobu Koutoku	早川 元雄*2 Motoo Hayakawa	宮本 晃一*3 Kouichi Miyamoto	石原 太郎*4 Tarou Ishihara
岡村 和美*5 Kazumi Okamura	菅崎 健二*6 Kenji Sugasaki	引谷 晋一*7 Shinichi Hikitani	高籾 達也*8 Tatsuya Takahata

要約

新型MAZDA3に搭載されたSKYACTIV-Xは、火花点火制御圧縮着火（以下SPCCI）燃焼の実現に向けた熱マネジメント技術（以下熱マネ技術）に、車両全体で取り組んでいる。この熱マネ技術によって、お客様が使われるさまざまな環境条件でも、新しく導入したSPCCI燃焼が実現できることをねらいとしている。エンジン自体の燃焼効率が大幅に改善されたことで、従来のエンジンよりも昇温に活用できる熱エネルギーが減少しており、限られた熱エネルギーを有効に活用し、SPCCI燃焼に必要なエンジンの筒内状態量を実現させる技術に取り組んでいる。

上記技術の確立に向け、机上解析と基礎実験による熱エネルギーのメカニズム解明を行い、燃費性能と同時にNVH性能や空力性能及び室内の快適性改善にも同時に貢献できる熱マネ技術を実現することができた。

Summary

We have been working on the thermal management technologies in the entire vehicle to realize the SPCCI (Spark Controlled Compression Ignition) combustion in Skyactiv-X mounted on the new Mazda3. With these thermal management technologies, we aim to realize the newly developed SPCCI combustion under any environmental conditions in which customers encounter. Drastic improvements in combustion efficiency of the engine itself decrease the thermal energy that can be used for warming up compared to the conventional engine. For this reason, we try to develop the technology to achieve the cylinder state quantity of the engine which is required for SPCCI combustion by using limited thermal energy efficiently.

We clarified the mechanism of thermal energy by conducting the analysis on a desk and the basic experiment to establish the above mentioned technology. As a result, we managed to realize the thermal management technologies which also contribute to improvements in NVH performance, aerodynamic performance and comfortableness in the cabin. This technology has increased frequency of SPCCI combustion under practical conditions and improved actual fuel efficiency.

Key words : Heat Engine, Heat/Fluid, Environment/Energy/Resources, New Combustion Model/New Combustion Model Engine, Fuel Economy/Thermal Efficiency, Engine Component or Element, Engine Cooling, Temperature Control/Environmental Control, Coolant Flow Control, Encapsulation, Oil Viscosity

1. はじめに

新型MAZDA3に搭載されたSKYACTIV-Xは、G/FリーンスPCCI燃焼とA/FリーンスPCCI燃焼という燃焼状態を実現し、燃焼効率を従来のエンジンよりも高めている。この

二つの燃焼状態の中でも、A/FリーンスPCCI燃焼は、筒内の温度環境（壁温や吸気温等）をSPCCI燃焼可能な状態にすることで実現でき、大幅な燃焼効率改善を図っている。このため、いかに早く筒内状態量を、A/FリーンスPCCI燃焼に移行できるようにするかが、SKYACTIV-X用熱マネ

*1 MBD革新部

MBD Innovation Dept.

*2~3 エンジン性能開発部

Engine Performance Development Dept.

*4 走行環境性能開発部

Driveability & Environmental Performance Development Dept.

*5~8 エンジン設計部

Engine Design Engineering Dept.

技術には求められている。加えて、G/FリーンSPCCI燃焼も、従来のエンジンに比べると燃焼効率が良くなっており、暖機に使える熱エネルギーが少なく、限られた熱エネルギーをいかに有効に活用するかが、重要なポイントとなる。この章では、安定してA/FリーンSPCCI燃焼を実現させるために、限られた熱エネルギーをマネジメントする技術について、詳しく説明していく。取り組み技術としては、Fig. 1に示すとおり、①暖機後に燃費のよくなる適温を下げ、②その適温までのエンジン各部の温度や油水温を短時間で上昇させ、③エンジン停止後の温度低下(放熱)を抑制させ、④駐車後の再始動時のエンジン各部の温度を従来よりも高い状態から運転できるようにすることを目指している。具体的な取り組み方針は、Table 1に示すように、必要エネルギーの最小化や熱エネルギーの分配の適正化及び熱エネルギーの保存という視点で、開発している。具体的な内容は、後述していくが、①の対応として低粘度オイル、②の対応として水流制御や可変吸気システム及び空調協調制御、③&④の対応としてカプセル化を織り込んでいる。

この熱マネ技術によって、新型MAZDA3に搭載されたSKYACTIV-Xの実力を最大限に発揮させ、いかなる環境下で、お客様が思いどおりに運転いただいても、実際の燃費性能は大幅に改善されていることを体験していただける状態を実現させている。

2. 適温までに短時間で上昇（暖機の早期化）

2.1 水流制御

SKYACTIV-Xから採用されているSPCCI燃焼は、筒内の温度を一定値以上に高めなければならない。このため、一晚駐車した後等、エンジンが冷えた状態で走行する場合は、早期に筒内温度を高めることが重要となる。ここでは、暖機時局所的に温度を高め、エンジン全体の構造体や水温及び油温に熱が拡散しないための水流制御について説明する。具体的には、Fig. 2のイメージ図のように、エンジン始動後に燃焼時の発熱量は、冷却水等を介して循環され、各部へ拡散していくため、始動後の発熱量と構造体の熱容量を元に、燃焼室周りの壁温を予測し、信頼性や快適性（暖房性）から許容できる止水許容時間を試算しながら、冷却水の流れを止めて、筒内の暖機を優先させている。また、冷却水を流し始めても、発熱量と放熱量のバランスを確認しながら、SPCCI燃焼が実現できる状態を維持すべく、Fig. 3に示す各デバイス（冷却水切替バルブ（CSV）や電子制御サーモスタットやアクティブエアシャッター（以下AAS）等）のシステムをエンジンの出入り口水温を計測し、筒内の壁温を予測しながら制御することで、冷却水の流量をコントロールし、筒内の温度を適温に保っている。

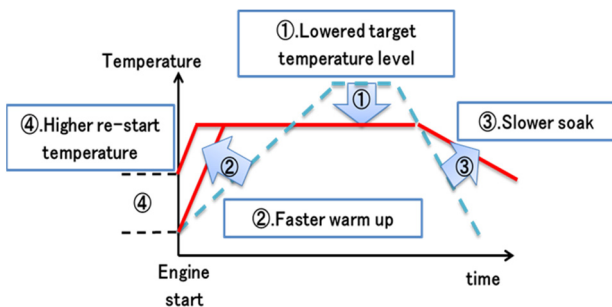


Fig. 1 Concept of Thermal Management

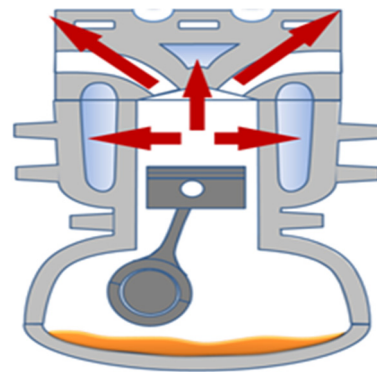


Fig. 2 Image of Reduction of the Heat Conduction

Table 1 Function to Improve and Action

	Objective			Measure
	Minimizing energy requirement	Optimizing energy partition	Conserving and producing energy	
① Lowered target temperature level	●			Low oil viscosity
② Faster warm-up	●	●		Coolant flow control and variable intake air system
③ Slower soak	●		●	Engine encapsulation
④ Higher restart temperature	●		●	

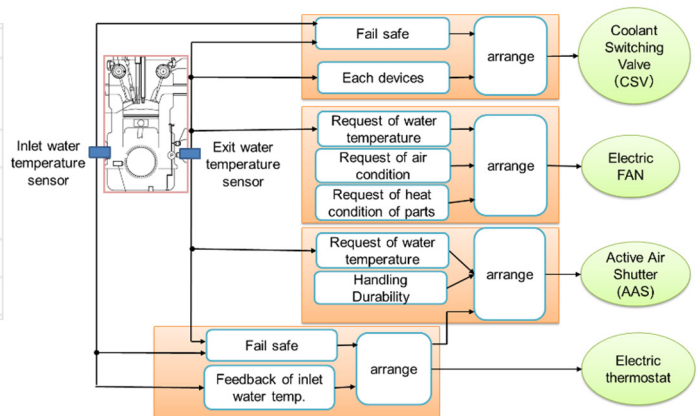


Fig. 3 Function of Temp. for Engine

この効果は、Fig. 4に示すように、燃焼室周りの水温の上昇を大幅に早め、燃焼効率の高い状態へ早期に移行できるようにになっている。

今回の水流制御は、止水中の発熱量と各部の熱容量の関係を踏まえて、燃焼室周りの壁温や水温を予測しながら、トランスミッションの暖機や暖房用の空調要求も満足できるように、通水タイミングや通水量もコントロールしている。

2.2 適温を下げる (オイルの低粘度対応)

エンジンやトランスミッションの抵抗は、油温が低い状態では、Fig. 5に示すように、暖機後に比べてかなり大きくなるため、燃費性能への影響が大きい。このため、エンジンオイルもトランスミッションオイルも、低油水温時のオイル粘度を下げ、SKYACTIV-Xでは低油水温時の抵抗低減を図っている。この適温の低温化技術を採用することで、先に述べた水流制御との相乗効果で、SPCCI燃焼の早期実現とパワートレイン全体の抵抗低減で、燃費性能改善にも貢献できている。また、従来の車両から採用しているトランスミッションの油温を昇温させるためのATFウォーマー機能と低粘度化を併用することで、低外気時の走行中もロックアップ作動が可能となり、実用燃費も改善されている。

2.3 可変吸気システム

SPCCI燃焼が要求する筒内状態量にするためには、筒内の壁温と同じように、吸入空気温度も重要な因子となっている。従来の吸気システムは、吸気導入口をラジエーターグリル近傍に設けることで、外気を導入しやすい構造としており、高外気温度下においても、吸入空気温度を低く保つことをねらっていた。その反面、吸入空気温度は外気温度に依存することから、低外気温度下においては、吸入空気温度が低くなる。

SPCCI燃焼を低外気温度下でも実現するためには、外気温度に依存せず、適温にすることが求められる。

そこでSKYACTIV-Xでは、燃焼状態の要求に応えるべく、吸入空気温度制御構造を採用している。

従来の構造同様にラジエーターグリル近傍の吸気口に加え、後述するエンジンルーム内のカプセル化の中にも吸気導入口を設け、Fig. 6に示すように、ラジエーター後方の排熱を利用することで、低外気温度下においても、SPCCI燃焼に必要な状態量にすることが可能となっている。

この2つの吸気口をFig. 7に示すように、電動アクチュエータで切り替えることで、各燃焼方式に適した吸入空気温度を実現させている。

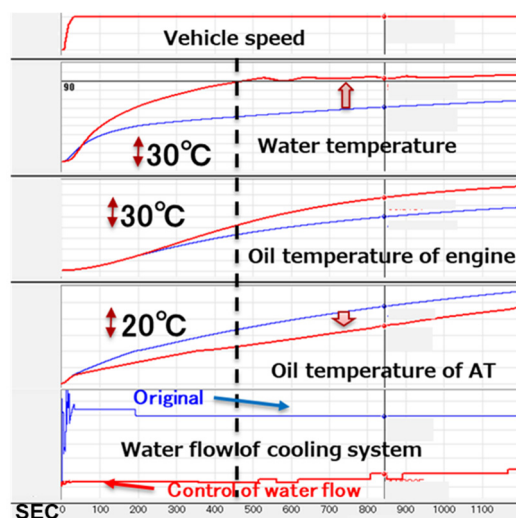


Fig. 4 Effect of Water Flow Control

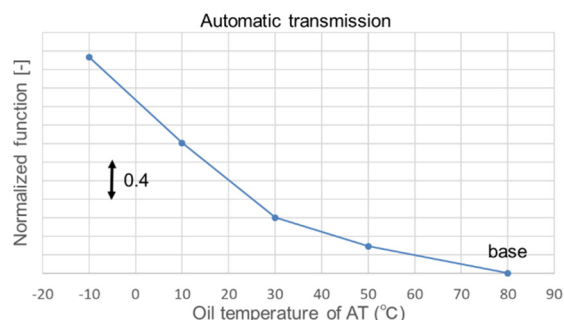
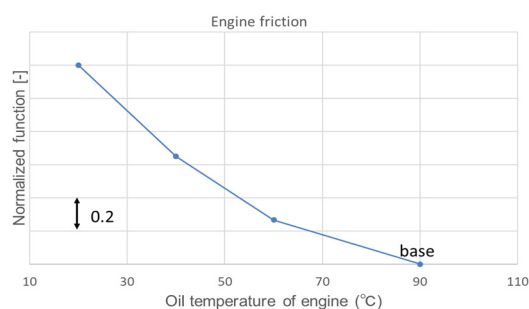


Fig. 5 Friction ratio by Oil Temperature

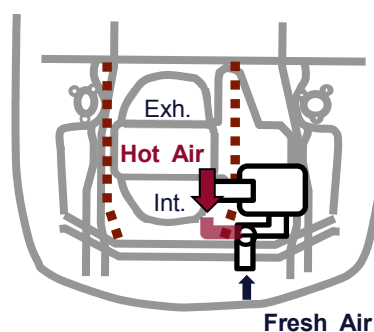


Fig. 6 Image of Air Duct Position

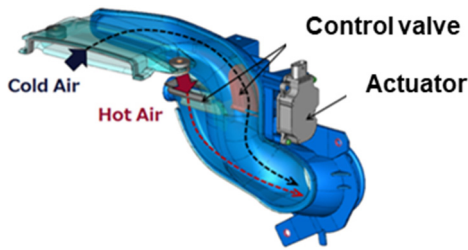


Fig. 7 Part of Fresh Air Duct

2.4 空調性能との協調対応

お客様が快適に運転していただくためには、車室内の快適性は重要である。快適性を最少のエネルギーで実現し、早期暖機にエネルギーを使えるようにすることにも、取り組んでいる。まず、冬場の運転時は、暖房性能が必要となるため、エンジンの発熱量をエバポレータという熱交換器を通して、室内に熱を供給している。これは、冬場の早期暖機にとっては大きな外乱である。このため、暖房使用時の必要熱量を減らすことで、エンジンの暖機性は改善される。今回、冬場に車室内に乗り込んだお客様が、暖房の効きを人として感じるまでの時間とヒーター回路に通水するタイミングを合わせることで、暖房要求があっても、エンジン内の水温がお客様に温かさを感じてもらえるまで上昇してからヒーター回路に通水を始めて、エンジンの暖機と快適性を両立させている。これには、前述したヒーター回路への通水量コントロールだけでなく、前モデルのハーフタイプから今回のフルタイプに変更したAASも活用している。フルタイプのAASは、ラジエーター前に設置された可動式のフラッパー構造となっており、全閉にすることで冬場の走行中の冷たい走行風が、エンジンルーム内へ流入するのを抑え、エンジン構造体や配管等からの放熱を抑制させることにつなげている。更に加えて、後述のカプセル化技術による再始動時のエンジン水温を高くすることでの上昇の早期化と合わせ、車両全体での熱を無駄にしない取り組みが空調性能との両立に貢献している。

3. 停止後の温度下降ゲインを減らす（保温）

3.1 エンジンカプセル化

エンジンの筒内温度を適温に保ち、かつ燃焼刺激音に寛容なエンジン環境を整えることで、SPCCI燃焼頻度を上げる技術としてエンジンルーム内のカプセル化を採用している。この技術は、NVH性能の改善にも貢献しているが、詳細は本誌、神田らの「SKYACTIV-X NVH技術」の稿で述べているので、ここでは、熱マネ領域でのカプセル化技術のねらいを説明する。効果が得られるシーンとしては、車をお客様が走行した後に、エンジンを停めて、駐車中における構造体や油水温の外気温相当まで低下する時間を、従来よりも長くすることである。イメージしやすい事例で説明すると、浴槽に溜めたお湯を冷めにくくするために、浴槽

に蓋をすると蓋なしよりも、お湯が冷めにくくなることと同じ原理である。

カプセル化は、カプセルカバー、エンジン直貼り、AAS、アンダーカバー、スプラッシュシールドで構成され、エンジン周りにホットゾーン空間を形成し、エンジンの熱を逃がさず、温かい空気を溜め、かつエンジンから放射される音も吸音する機能を適正機能配分で実現させている。

2018年版のマツダ技報内の山本らの「高熱効率燃焼の開発に適用する筒内壁温予測技術、マツダ技報、No.35, p.2 (2018)」でも紹介されているFig. 8のようなソーク中のエンジンルーム内の自然対流を考慮したエンジン本体内の伝熱解析モデルを活用し、Fig. 9やFig. 10に示すように、各部品に保温機能を配分させて対応している。

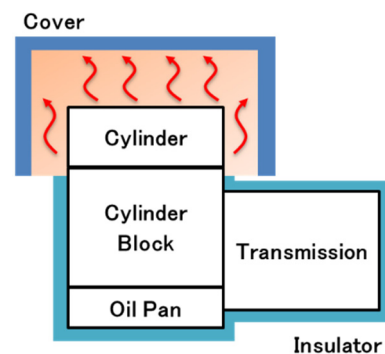


Fig. 8 Image of Heat Convective Model

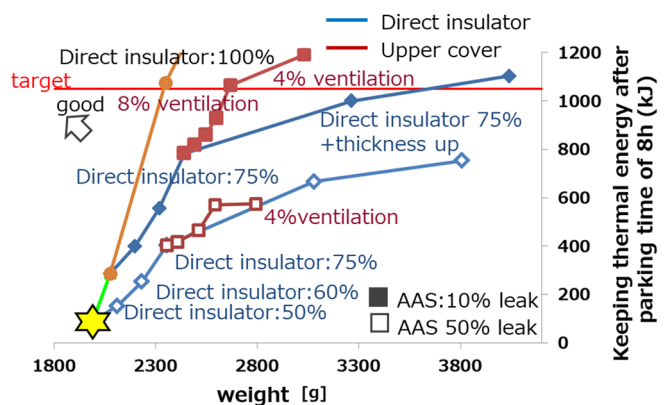


Fig. 9 Function Distribution for Encapsulation

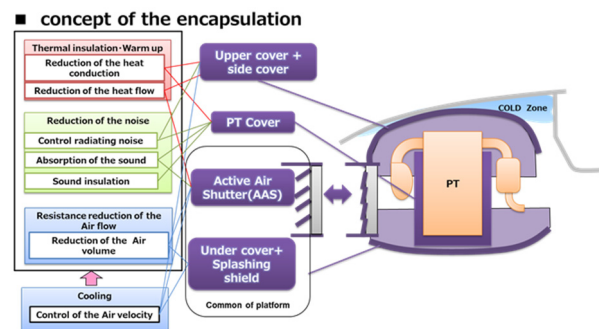
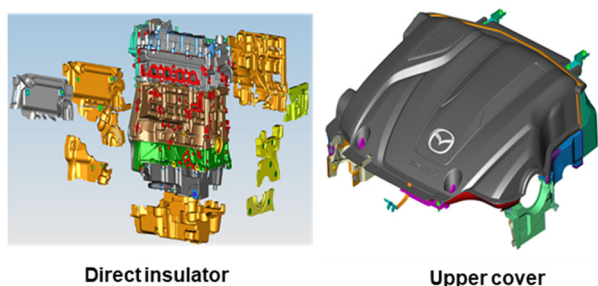


Fig. 10 Concept of the Encapsulation

具体的には、Fig. 11に示すようにカプセルカバーは、超極細繊維を1100g/m²の目付量で構成した高性能グラスウール、不織布製の表皮、PA6-GF30の基板、及びシールラバーから成り、エンジンを囲ったカプセル空間の換気率（カプセル内外の空気循環率）は4%以下を達成している。

また、エンジン直貼りは、ウレタン材を採用し、エンジンを覆う直貼りカバー率は60%以上となっている。



Direct insulator Upper cover
Fig. 11 Image of Encapsulation

カプセル化技術による保温効果は、Fig. 12に示すように外気：-10℃の環境下で駐車時間に応じて、水温等が低下していくスピードが大幅に緩やかになっている。これにより、Fig. 13に示すように、市場での遭遇頻度多い、駐車時間が9時間以下では、従来よりも駐車後の再始動時の油水温が高くなり、5%以上の実用燃費効果が得られている。

このカプセル化については、CO₂削減の先進技術として、欧州市場では、エコイノベーション技術のCO₂クレジットの認可も、新型MAZDA3で、獲得できている。

3.2 適温維持に向けた風流れコントロール

エンジンルーム内をカプセル化することで、走行中のエンジン回りの各部品等への走行風の導入にも工夫している。概要はFig. 15のイメージ図のとおり、カプセル化の構造を利用し、エンジンのヒートポイント周辺にエンジンルーム内の風の流れを作り、従来よりも通過風速を20%増やしている。また、走行状態によっては適温維持に必要な風量も少なくできる領域も発生するため、フルタイプに変更したAAS開度をコントロールしている。これにより、Fig. 16のようにヒートポイントの温度下げ、エンジンルーム内に導入する風量低減によって、空力改善にも貢献している。

4. おわりに

新しい燃焼状態を常に実現すべく、限られた熱源を有効利用する技術に取り組んできた。今回の適温を下げ、その適温までの各部の温度や油水温を短時間で上昇させ、エンジン停止後の温度低下（放熱）を抑制させることは、熱マネジメントの基本と考えている。今後、更なる内燃機関の燃効率改善に向けて、廃棄する熱エネルギーを更に減らし続ける技術に取り組んでいきたい。

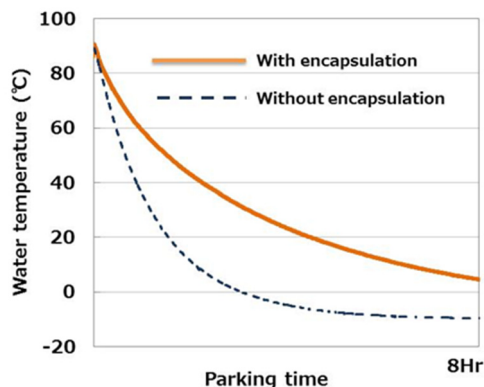


Fig. 12 Effect of Water Temperature within Parking Time

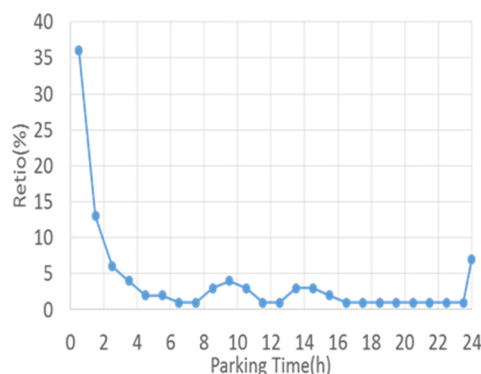


Fig. 13 Ratio of Parking Time in Europe

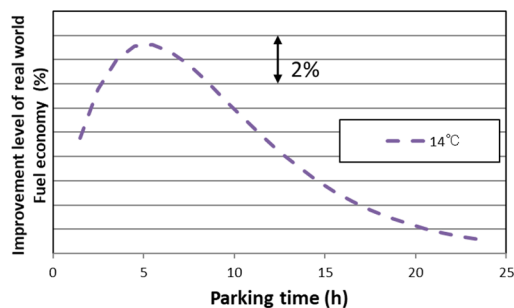


Fig. 14 Improvement of Fuel Economy by Parking Time

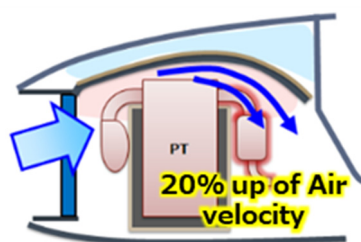


Fig. 15 Image of Wind Flow

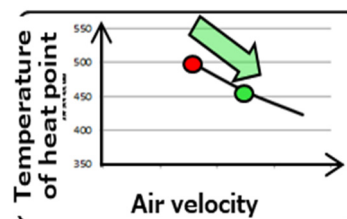


Fig. 16 Control of the Air Velocity

参考文献

- (1) 山本ほか：高熱効率燃焼の開発に適用する筒内壁温予測技術, [マツダ技報, No.35, pp.9-14 \(2018\)](#)
- (2) 欧州エコイノベーション規制ガイドライン情報
欧州市場における駐車時間頻度

■ 著 者 ■



幸徳 正信



早川 元雄



宮本 晃一



菅崎 健二



高旗 達也



石原 太郎



引谷 晋一



岡村 和美

特集：新型MAZDA3

6

SKYACTIV-X NVH技術

Innovative NVH Technology for SKYACTIV-X

神田 靖典*1 藤川 智士*2 升岡 大智*3 須藤 康博*4
 Yasunori Kanda Satoshi Fujikawa Taichi Masuoka Yasuhiro Sudo
 新田 雅俊*5 山本 高弘*6 松本 貢典*7
 Masatoshi Nitta Takahiro Yamamoto Mitsunori Matsumoto

要約

CO₂排出量の削減に最も寄与する内燃機関の理想追求に向け、リーン圧縮着火による熱効率向上を実現する新世代ガソリンエンジンSKYACTIV-Xを開発した。

圧縮着火による燃焼騒音増大に対し、燃焼騒音のメカニズムに基づき、『起振力である燃焼刺激力の制御』、『ピストン～エンジン表面の振動伝達特性』、『エンジン表面で生じた空気振動の吸遮音減衰特性』に最適機能配分することで、従来の火炎伝ば燃焼のSKYACTIV-Gと同等の車室内騒音レベルを達成した。

Summary

In pursuit of an ideal internal combustion engine capable of significant reduction in CO₂ emission, Mazda developed the next generation gasoline engine, Skyactiv-X with improved thermal efficiency, thanks to the lean compression ignition.

To reduce combustion noise caused by the compression ignition, "combustion force", "piston-to-engine surface vibration transmission characteristics", "acoustic absorption and insulation characteristic of air vibration at the engine surface" were controlled optimally based on our understanding of the combustion noise mechanism and reduced the noise in the engine room to Skyactiv-G level, the flame propagation combustion engine with low heat release rate.

Key words : Heat Engine, Vibration, Noise and Ride Comfort, Compression Ignition Engine, Homogeneous Charge Compression Ignition, Acceleration Noise, Vibration/Noise, Modal Analysis/Transfer Path Analysis

1. はじめに

マツダは、理想の内燃機関追求のロードマップとして、Fig. 1に示すように熱効率向上のため、高圧縮比と比熱比改善を目指し、この実現手段として、リーン圧縮自己着火燃焼（Compression Ignition 以下CI）に取り組んだ。

しかし、CI燃焼は成立する筒内温度条件が大変狭く、可能な運転シーンも限定的となる。SKYACTIV-Xは、幅広い運転シーンでもCI燃焼を実現させるために、ブレークスルー技術を折り込んだ。それは、SKYACTIV-Dで培ってきたPre-噴射による筒内温度制御の機能を火花点火で実現し、火炎伝ばで正確なCI燃焼タイミング実現させる（Spark Controlled Compression Ignition 以下SPCCI）ことである。これにより、従来の火炎伝ば燃焼（Spark Ignition Combustion 以下SI燃焼）に対して、10%トルク

改善しつつ、20%燃費改善している。

本稿では、SKYACTIV-XのSPCCIに伴う燃焼騒音に対するNVH技術について紹介する。

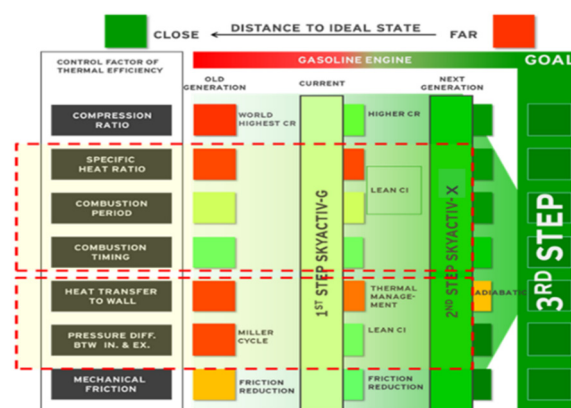


Fig. 1 Road Map of Petroleum Engine

*1,3~7 エンジン性能開発部

Engine Performance Development Dept.

*2 パワートレイン開発本部

Powertrain Development Div.

2. SPCCIの燃焼騒音の開発

2.1 SPCCI燃焼の特徴

従来のSI燃焼とSPCCI燃焼による熱発生率の比較をFig. 2に示す。SPCCI燃焼の特徴は燃焼期間が短く、熱発生率の傾きが急峻なことである。一般的にこのような燃焼は、ピストンにインパルス的な打撃を与え、断続的な燃焼騒音を発生させる⁽¹⁾。

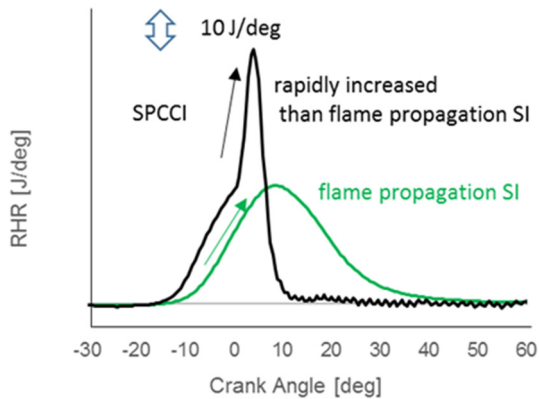


Fig. 2 Comparison of Release Heat Ratio between SI and SPCCI

Fig. 3に示すように、熱発生率が急峻になるほど燃料消費率は改善するが、ある領域から燃焼温度も急激に増え、冷却損失も無視できなくなるため、燃料消費率は横ばいとなる。一方で、それを補うNVH対策もブロックの板厚アップなどを伴うが、Fig. 4に示すように重量効率は落ちる。従って、重量やコストに無駄が生じないように、必要最小限の熱発生率を達成させるNVH技術開発を行った (Fig. 3 ☆の部分)。

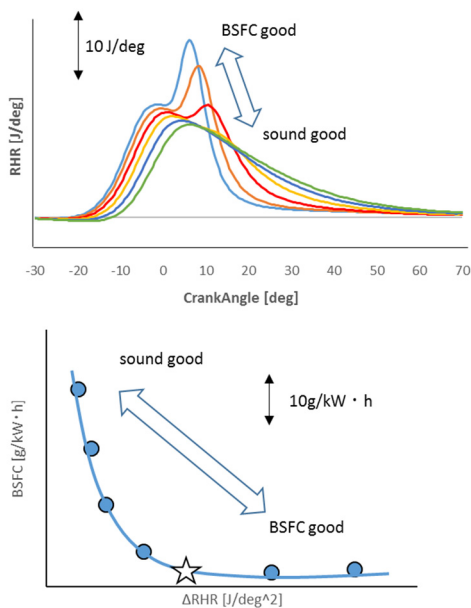


Fig. 3 Relationship between Release Heat Ratio and Combustion Noise

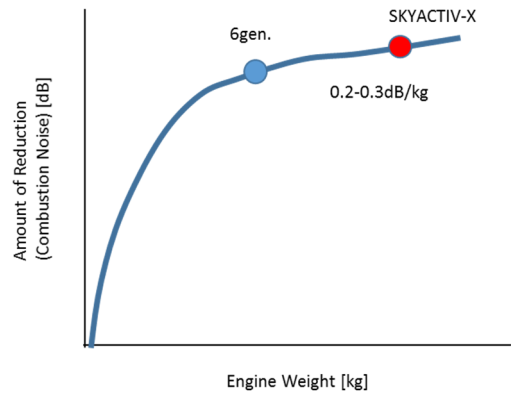


Fig. 4 Relationship between Engine Weight and Combustion Noise

2.2 車内燃焼騒音メカニズムと開発構想

車内燃焼騒音のメカニズムをFig. 5に示す。

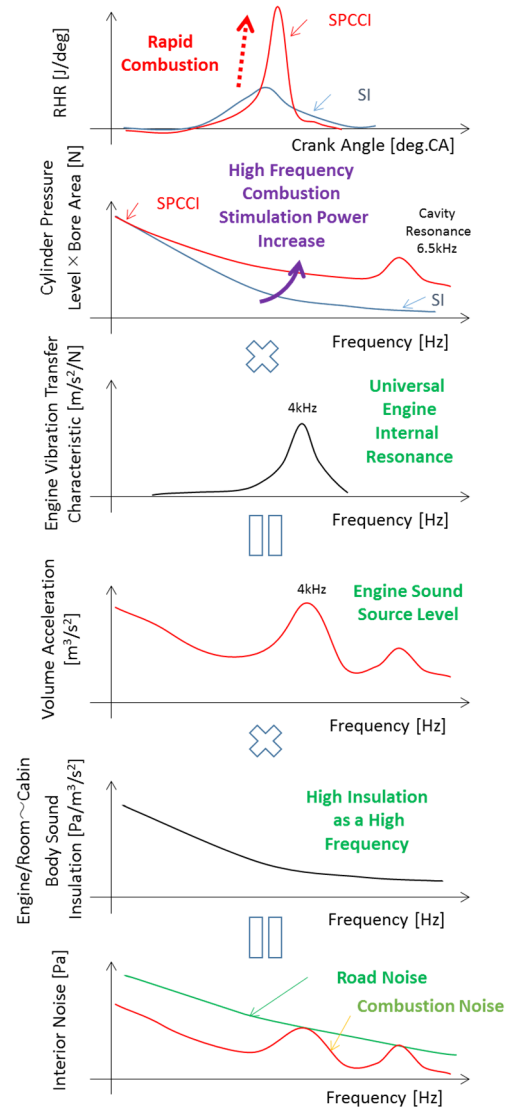


Fig. 5 Mechanism of Interior Combustion Noise

SPCCI燃焼のように熱発生率が急峻になると、筒内の燃焼刺激力 (Cylinder Pressure Level :以下CPL) は燃焼室の空洞共鳴 (6000~7000Hz) までも大きく励起し、エンジン放射面までの伝達経路で特定周波数の振動が大きくなり、放射される。放射された空気の振動はエンジンルームから車内に伝ばし、走行騒音よりも大きい場合に車内燃焼騒音として認知される。

従って、車内燃焼騒音の開発方針を以下とした。

- ①エンジン伝達特性で生じる特定周波数の大きな共振を抑制することで、突出した騒音レベルを低減させる。
- ②吸遮音機能で全周波数域を一気に低減する。特に、高周波で吸遮音効果が発揮できることから、燃焼室の空洞共鳴を大幅に低減させる。
- ③CPLを車速によって変化する走行騒音レベルに応じて制御する。

2.2.1 エンジン伝達特性の開発

Fig. 6に、SKYACTIV-XのCPLとエンジン振動の周波数領域の実測結果を示す。CPLは目立ったピークを持たないが、エンジン伝達特性には3500~4500Hzに突出したピークをもつ。このピークは、往復動機関では普遍的な現象であり、燃焼騒音増加の主因となっている^②。

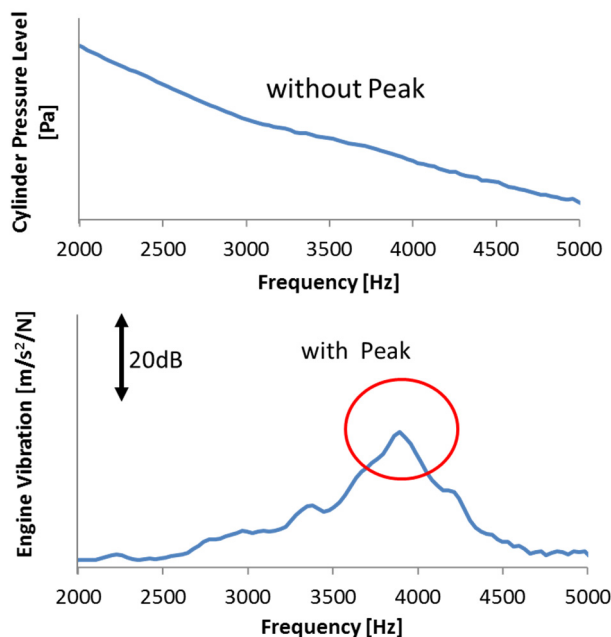


Fig. 6 Frequency Characteristics of CPL and Engine Vibration

この伝達特性でピークが発生するメカニズムは、ピストンを質量、コンロッドをバネとする共振現象である。対策コンセプトは、共振により激しく振れるピストンとは逆位相で動吸振器を動かす、ピストン振動をキャンセルさせることである。Fig. 7にメカニズムと動吸振器の概念図を示す。

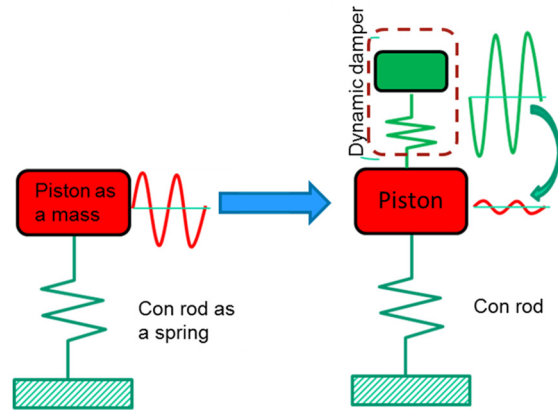


Fig. 7 Principle of Controlling Engine Vibration

この共振に対し、SKYACTIV-Dで採用している動吸振器 (Natural Sound Smoother 以下NSS) をSKYACTIV-Xにも適用する。Fig. 8にSKYACTIV-XのNSS外観図を示す。

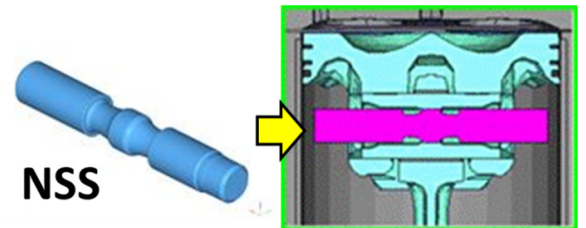


Fig. 8 Structure of Piston with NSS

Fig. 9にNSSのCAE検証効果を示す。ねらいどおり、NSSで普遍的な共振現象である4kHzのピストン振動レベルを6dB低減することができた^③。

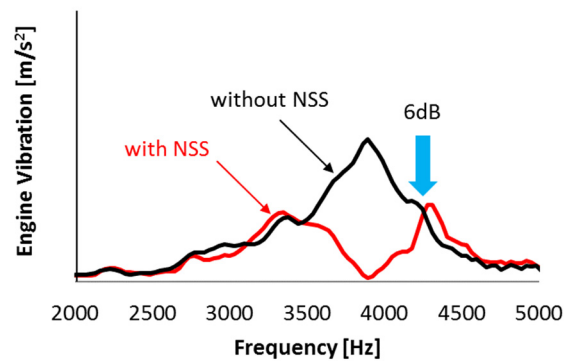


Fig. 9 Result of the NSS Influence

2.2.2 吸遮音材によるカプセル化技術

吸遮音機能の理想は、放射源を完全に覆い、外に漏らさないことである。しかし、実際のエンジンは熱害などから完全に覆うことは困難であり、透過する音が存在する。SKYACTIV-Xでは、Fig. 10に示すように、効率的に遮音効果を高めるため、音源であるエンジンに直接遮音材を付加することで、可能な限り音がエンジンルームに拡散しな

いこととした。更に、エンジンルームという囲まれた空間を利用し、反復吸音することをコンセプトとしたカプセル技術を開発した。

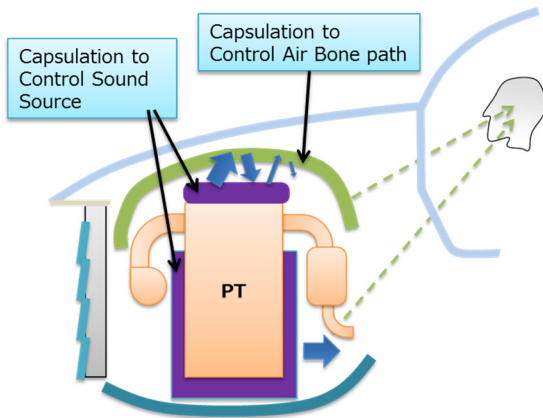


Fig. 10 Capsulation Concept

一方、SKYACTIV-Xの燃焼刺激力はSKYACTIV-G比、14倍大きく、SKYACTIV-Dと比較しても2倍近く大きい。異なるエンジンを搭載する車の遮音効果をSKYACTIV-Xに合わせてしまうと、それ以外のエンジンに対しては品質やコストともに過剰となる。このため、SKYACTIV-Xのみをカプセル技術（ユニーク構造）で適用させつつ、共通となる車体遮音でSKYACTIV-G/D/Xを成立させるよう、全体最適を図った。

上記コンセプトをより効率的&効果的に成立させるため、SKYACTIV-Xではエンジン放射源からエンジンルーム及び車室内までの複雑な伝ば径路の寄与分析（Transfer Path Analysis 以下TPA）を活用し以下を開発方針とした⁴⁾。

- ① 車室内音を構成する部分音圧のうち、突出しているものをまず抑え込む。音源と車室内経路の2つに分解することで、効率的な吸遮音設計方法を選ぶ。
- ② ①の状態から、カプセルでSKYACTIV-Gと同等なエンジンルーム内音になるよう高周波の空洞共鳴領域を含め、一気に全体レベルを下げる。

TPA概念図とSKYACTIV-Xに適用した結果をFig. 11に示す。

図上段の部分音圧から分かるように、まず抑え込むべき突出した音圧は⑥である。図中段及び下段から⑥は、音源の影響が強いことがわかる。音源の影響が強い場合は、遮音機能で抑制し、音を拡散させないようにした。次いで、車室内に対して寄与の高い部分音圧は⑤⑩⑬であることがわかる。同様に、⑤は音源起因なので遮音機能を強化し、⑩⑬は跳ね返りなど複雑なエンジンルーム空間の影響が強いことから、遮音ではなく吸音機能を強化することで、全体レベルをコントロールさせた。強化した遮音部品をFig. 12に示す。

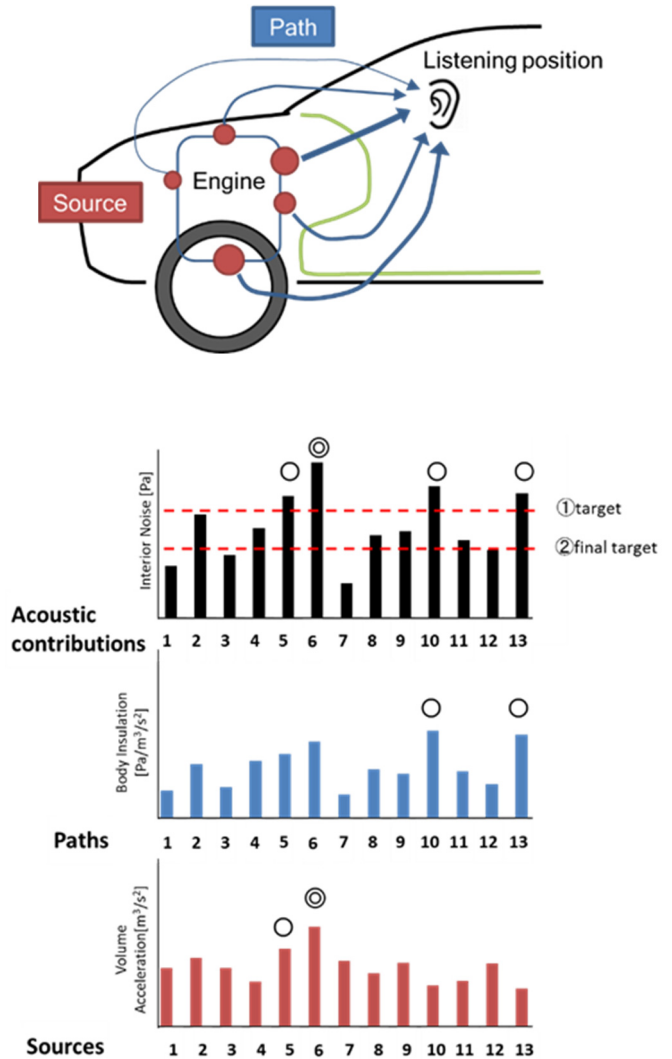


Fig. 11 Result of TPA

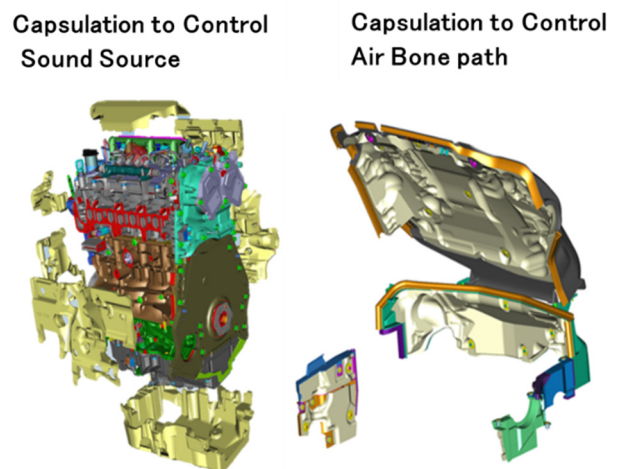


Fig. 12 Capsulation Structure

以上のコンセプトに基づいたエンジンルーム内音の効果

検証結果をFig. 13に示す。吸遮音のカプセル技術で、エンジンルームの燃焼騒音をSKYACTIV-Gと同程度まで抑制することができた。

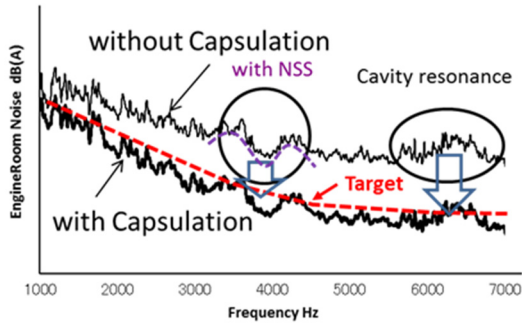


Fig. 13 Result of Capsulation Influence

Fig. 14に示すように、車室内までの複雑な径路においても、ねらいどおりのフラットな特性となり、カプセル技術の最適設計を実現した。

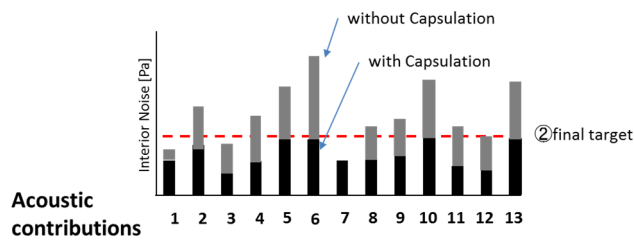


Fig. 14 Result of Acoustic Contribution with Capsulation

また、カプセル技術の適用により、エンジンルーム内の保温機能も高め、実用燃費改善に貢献した(5,6)。

2.2.3 車速対応CPL制御

これらを折り込んで、走行騒音が低い低車速では聞こえるレベルになる。そのため、走行頻度が低い低車速域は燃費への影響も小さいことから、CPLを抑制した。

Fig. 15に示すように、目標CPLは運転状況に応じ、ギア段位、エンジン回転速度、平均有効圧から逐次算出している。筒内圧センサでリアルタイムに検出したCPLと目標CPLが合致するよう、点火タイミングとEGR量などで燃焼重心をねらいの位置にすることで、熱発生速度の傾き(=CPL)をコントロールするロジックを構築し、車に実装した(7)。

2.3 機能検証

以上の3つの開発構想に基づいて織り込んだNVH革新技術を車両全体で機能検証した。一般的な加速試験を行った時の筒内圧センサでのフィードバックと車内音結果をFig. 16に示す。ねらいどおりCPLを制御でき、その結果、車内音は走行騒音以下に抑制できていることを確認した。

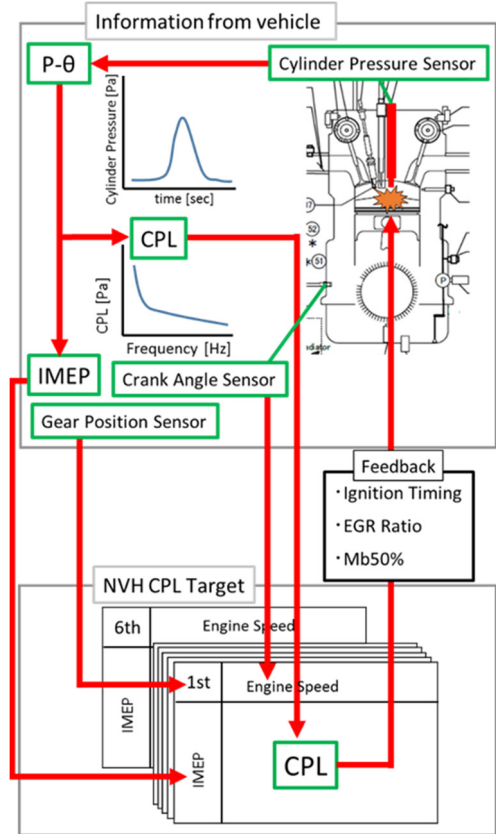


Fig. 15 Logic of Cylinder Pressure Level Control

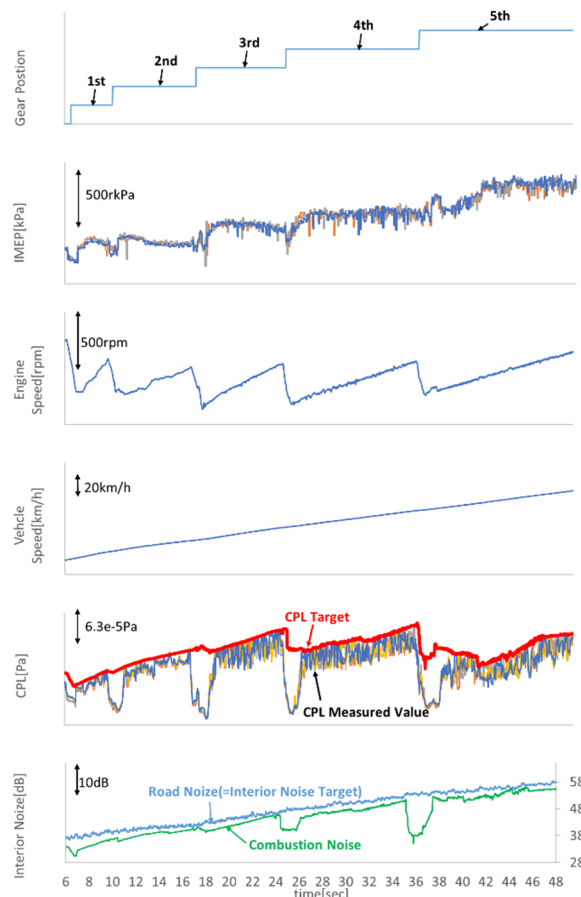


Fig. 16 Result of Vehicle Test

3. おわりに

SKYACTIV-Dで培った振動伝達制御とSKYACTIV-Xで新規開発した新規技術の導入によって、高効率で静粛性に優れた内燃機関を実現することができた。

今後の新世代商品群に対しても、NVH技術を革新していくことで、お客様提供価値の向上に貢献していく。

参考文献

- (1) Gen Shibata et al.: Optimization of Heat Release Shape and the Connecting Rod Crank Radius Ratio for Low Engine Noise and High Thermal Efficiency of Premixed Diesel Engine Combustion, SAE Paper 2015-01-0825
- (2) Otsuka. How to minimize diesel combustion noise by improving engine structure, JSAE 20055143.
- (3) Yasunori Kanda et.al: Technology to Reduce Diesel Knock Noise, SAE Paper 2016-07
- (4) Yasunori Kanda et.al: Experimental Transfer Path Analysis of Gear Whine, SAE Paper 2005-01
- (5) 磯部ほか：新世代ガソリンエンジンSKYACTIV-Xの紹介, [マツダ技報, No.36, pp.16-23 \(2019\)](#)
- (6) 幸徳ほか：SKYACTIV-X用熱マネジメント技術, [マツダ技報, No.36, pp.32-37 \(2019\)](#)
- (7) 津村ほか：SKYACTIV-Xの制御システム, [マツダ技報, No.36, pp.59-65 \(2019\)](#)

■ 著 者 ■



神田 靖典



藤川 智士



升岡 大智



須藤 康博



新田 雅俊



山本 高弘



松本 貢典

特集：新型MAZDA3

7

SKYACTIV-Xに適用する燃焼予測技術 Combustion Simulation Technology Applied to SKYACTIV-X

河野 通治* ¹ Michiharu Kawano	本田 雄哉* ² Yuya Honda	和田 好隆* ³ Yoshitaka Wada
上村 匠* ⁴ Takumi Uemura	植木 義治* ⁵ Yoshiharu Ueki	横畑 英明* ⁶ Hideaki Yokohata

要 約

CO₂排出量の削減に最も寄与する内燃機関の理想追求に向け、リーン圧縮着火による熱効率向上を実現する次世代ガソリンエンジンSKYACTIV-Xを開発した。SKYACTIV-Xでは、圧縮着火・ノッキングのように、混合気の化学反応によっておこる自着火現象を完全に制御する必要があり、その実現のために予測技術を用いたモデルベース開発は重要な役割を担う。そこで、基礎研究による現象解明を通じて、これまで開発してきた流動・噴霧予測技術を高精度化し、新たに素反応を考慮した燃焼予測技術を構築した。加えて、本予測技術を用いて、高速高負荷域で発生するノッキング現象を分析し、その抑制の方向性を確認した。

Summary

In pursuit of an ideal internal combustion engine capable of significantly reducing CO₂ emission, Mazda developed the next gasoline engine Skyactiv-X with lean compression ignition that improves thermal efficiency. Skyactiv-X needs to fully control auto ignition phenomena caused by chemical reactions of air-fuel mixture such as compression ignitions and knocking, and to realize the control, model-based developments using simulation technology is essential. Accordingly, Mazda improved the precision of the Mazda-developed-flow and spray simulation technology through phenomena elucidations by fundamental researches, and established a new combustion simulation technology considering elementary reactions. This simulation technology was also used to analyze knocking phenomena occurred at high loads and speeds to confirm the direction of the phenomena control.

Key words : Heat Engine, Homogeneous Charge Compression Ignition, Numerical Calculation

1. はじめに

マツダは、将来においても地球・社会・人とクルマが共存する世界を思い描き、クルマの実用環境下でのCO₂排出量の削減効果を最大化することを目指している。発電形態・環境規制から、内燃機関以外が適した市場には、電動化技術を投入できるよう研究開発を進めているが、2035年においても、世界的に大多数を占めると予測されているのは内燃機関を主要動力源とするものであり⁽¹⁾、内燃機関の理想追求がCO₂排出量の削減に最も寄与すると考える。そのためマツダは、リーン圧縮着火による熱効率向上を実現する次世代ガソリンエンジンSKYACTIV-Xを開発した。

SKYACTIV-Xでは、圧縮着火・ノッキングのように、混合気の化学反応によっておこる自着火現象を完全に制御する必要があり、その実現のために予測技術を用いたモデルベース開発は重要な役割を担う。

本稿では、SKYACTIV-Xに適用する燃焼予測技術の開発とその適用効果について紹介する。

2. SKYACTIV-Xの特徴

2.1 開発構想

現行ガソリンエンジンSKYACTIV-Gの熱効率を高めるには、比熱比の増加、壁面熱伝達の抑制が効果的である (Fig. 1)。これらの実現手段として、燃料に対する空

*1~6 MBD革新部
MBD Innovation Dept.

気・排気再循環ガスの比率を高めるリーンバーンが挙げられるが、スパークプラグによる火花点火 (Spark Ignition, 以下SI) では、火炎が伝ばしにくくなり、失火する確率が高くなる。そこで、高圧縮比化によって燃焼室内を高圧・高温にして、ディーゼルエンジンのように圧縮着火させるリーン圧縮着火が有効である。リーン圧縮着火の研究開発を進めると、高温時には急峻な燃焼となり燃焼音が増大すること、また低温時には緩慢な燃焼となり燃焼変動が増幅することから、着火時の混合気温度を3℃幅で制御しなければならないことが分かった。そのため、圧縮着火は限られた運転範囲でしか完全に制御することができず、SIとの切り替えが避けられない。熱効率向上には、圧縮着火の運転範囲を拡大しつつ、SIとの切り替えを完全に制御できる Controlled Compression Ignition (CCI) がブレークスルーの鍵になる。

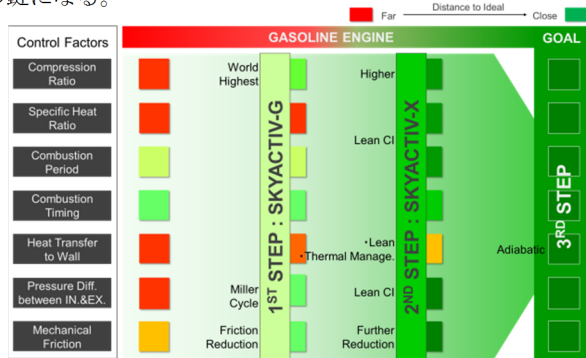


Fig. 1 Roadmap to the Ideal Combustion

2.2 ブレークスルー

全運転範囲で圧縮着火が実現できない場合、SIと圧縮着火の切り替えが必須であることから、スパークプラグをもつ構造は避けられない。そこで、スパークプラグによる点火を圧縮着火の制御技術として活用する新燃焼SPark Controlled Compression Ignition (以下、SPCCI) で、実用運転範囲では一部の冷間時を除くほぼ全てで圧縮着火を実現する。

SPCCIでは、圧縮比を圧縮着火開始直前まで高め、点火による膨張火炎球でその外側に存在する未燃混合気をもう一押しする (Fig. 2)。膨張火炎球の要求されるタイミング・大きさは運転条件によって異なるが、それは点火タイミングで制御できる。この膨張火炎球が未燃混合気を追加圧縮することで、圧縮着火に必要な圧力・温度を加えることができる。

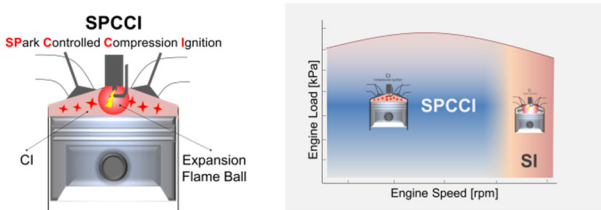


Fig. 2 SPCCI Combustion

3. 燃焼予測技術の開発

3.1 開発の方向性

前述したように、SKYACTIV-Xでは、SPCCIとSIを切り替えながら運転する。まずSPCCIでは、燃料を希薄にした条件、排気再循環ガスで希釈した条件で圧縮着火を行う。この圧縮着火を誘因する膨張火炎球は、スパークプラグの点火で生成される。その生成を安定化するには、スパークプラグ近傍において、燃料濃度を高めて着火しやすい状態、流動・乱流強度を強めて火炎伝ばしやすい状態を形成する必要がある。加えて、未燃混合気を圧縮着火させるために、その化学反応の進行度も制御する必要がある。次にSIでは、タンブル流で生成する乱流で急速燃焼させる一方、高圧縮比化でノッキングが重大な問題となる。その抑制のためには、伝ば火炎の形状、未燃混合気の自着火、自着火後の圧力振動形成について理解し、適切な対策を創出する必要がある。

いずれの燃焼も、未燃混合気の自着火を燃焼室内の局所的状態で完全に制御しなければならない。この局所的状態は、吸気流動制御の多様化・燃料噴射制御の高度化で形成する。吸気流動は、燃焼室内を縦旋回するタンブル流だけでなく横旋回するスワール流も使い、燃焼室ボア径方向の状態制御に利用する。燃料噴射は、高圧噴射・圧縮行程噴射・多段噴射を用い、燃料配置制御に利用する。そのため、これまで独自に開発してきた流動・噴霧予測技術⁽²⁾⁽³⁾をあらゆる条件にも対応できるように高精度化する必要がある。加えて、未燃混合気の自着火を予測するために、新たに素反応を考慮した燃焼予測技術を開発する必要がある。これらSKYACTIV-Xに適用する流動・噴霧・燃焼予測技術の開発を、汎用熱流体解析プログラムCONVERGEを用いて実施した。

3.2 流動予測技術

これまでの流動予測技術は、SIで利用するタンブル流を予測するために開発してきた⁽⁴⁾が、SPCCIで利用するスワール流は、高速で歳差運動を伴う複雑な流動であるため、予測が困難になる (Fig. 4(c), 4(d))。そこで、燃焼室内流動を構成する噴流・衝突流・旋回流など、あらゆる基礎流動に対応できる予測技術を構築するために、現象を単純化した基礎実験を通じて、現象解明・予測技術開発に取り組んだ。ここでは、衝突流に対する取り組みを示す。

衝突流は、1辺30mmの矩形管に最大流量15m³/minの遠心型高圧送風機で常温空気を送り込み、噴流部から50mm離れた平板に噴流を衝突させて形成する。噴流部に設けた可動式オリフィス板で、噴流速度・衝突角を変えることができる。噴流部高さ10mm, 20mm, 30mm, 流入速度10m/s, 20m/s, 各噴流部高さでの最大流速 (25m/s-100m/s) それぞれについて、Particle Image Velocimetry

(以下、PIV)による可視化計測を行った。噴流部高さ30mm、流入速度20m/sの場合、衝突部によみ領域が形成される (Fig. 3(a)) が、この領域は流入速度の増加に伴い扁平になる。衝突角を変えると、よみ領域の様子が変わる (Fig. 3(b))。これらの現象に比較的よい一致を見せる乱流モデルk-e RNG・Smagorinskyそれぞれについて、最適格子サイズを導き、高精度化した。k-e RNGは計算効率が求められる詳細設計開発に、Smagorinskyはノッキング・サイクル変動のような複雑現象を解明する場合に用いる。ここでは、Smagorinskyの計算結果を、Fig. 3(c), 3(d)に示す。

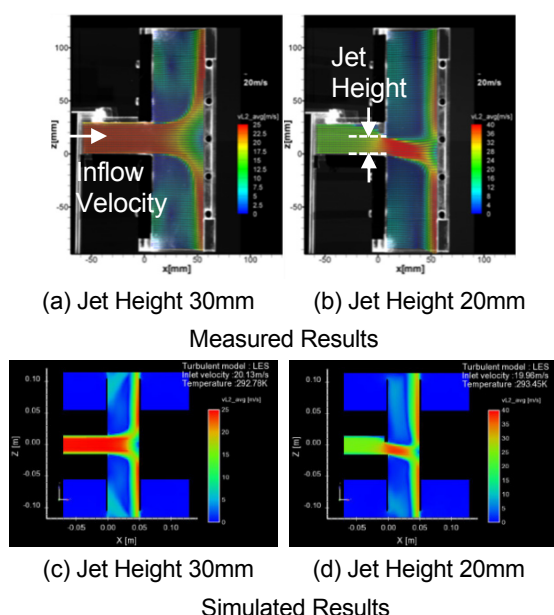


Fig. 3 Comparison of Impinging Flow between Measured Results and Simulated Results

実際の燃焼室内では、複雑形状・非定常流れをあわせもつため、定常流れが形成されることはない。そのため、前述の基礎流動には現れない現象が存在すると考える。そこで、単気筒可視化エンジンを用いてエンジン特有の現象を理解し、予測技術の検証・改善に取り組んだ。

回転速度2000rpm、スロットル全開で、吸気バルブを片弁駆動させることでスワール流を形成し、PIVによる可視化計測を行った。可視化結果では、吸気行程で流速70m/sを超える主流が形成される (Fig. 4(a)) が、吸気バルブが閉まり、空気の流入が止まる圧縮行程においてもその一部が残存する (Fig. 4(b))。一方、計算結果では、圧縮行程において主流が流速40m/sまで減衰する (Fig. 4(c), 4(d))。これは、乱流モデルで導かれる渦粘性が高いためと考えられる。前述の基礎流動は渦運動の影響が小さいが、燃焼室内流動は複雑形状や吸気流動の影響で渦運動の影響が大きいため、この問題が現れたと考える。そこで、乱流モデルの渦粘性係数を調整することで、スワール流の流速・渦中

心位置を改善させることができた (Fig. 4(e), 4(f))。

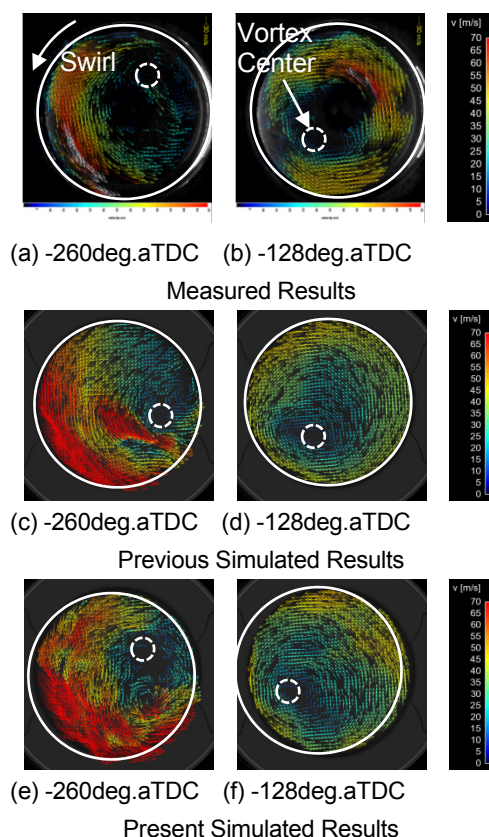


Fig. 4 Comparison of Incylinder Flow between Measured Results and Simulated Results

3.3 噴霧予測技術

燃焼室内で混合気を形成する際、最も重要になるのは燃料液滴の微粒化過程である。この過程には、Kelvin-Helmholtz and Rayleigh-Taylor (KH-RT) モデルを用い、自由噴霧写真やノズルから数十mm下流における平均液滴径からモデル係数を導き、SKYACTIV-Gの開発に適用してきた⁽²⁾⁽³⁾。しかしSKYACTIV-Xでは、圧縮行程後半の燃料噴射で燃焼を制御するため、ノズルからピストンまでの距離が短くなり、ノズル近傍の噴霧挙動を考慮してモデル係数を導く必要がある。そこで、産業技術総合研究所との共同研究で、ノズル近傍の微粒化特性・ダイナミクスについて研究している⁽⁴⁾。

本研究では、大型放射光施設SPring-8の高輝度X線を噴霧に照射し (Fig. 5)、噴射圧力20MPa、40MPa、60MPa、霧囲気密度2kg/m³、10kg/m³、18kg/m³それぞれについて、ノズル近傍の液滴速度・径を計測した。霧囲気密度2kg/m³の計測結果をFig. 6に示す。噴射圧力に依らず、ノズル近傍のSauter Mean Diameter (以下、SMD) はノズル径およそ100μmよりも小さくなっており、ノズル近傍でも微粒化が進行していることが分かった。加えて、噴霧軸上の液滴速度をノズル位置の液滴速度で正規化した相対

速度が0.72に達した時点で、SMDはほぼ一定になることから、これが微粒化終了位置と考えられる⁽⁵⁾。これらの現象に基づき、一次分裂長さや分裂後の液滴径を決めるモデル係数を噴射圧力・雰囲気密度の変化に対応できるように関数化することで、ノズル近傍の微粒化過程を高精度化した。噴射圧力40MPa、雰囲気密度10kg/m³の自由噴霧挙動を、Fig. 7に示す。

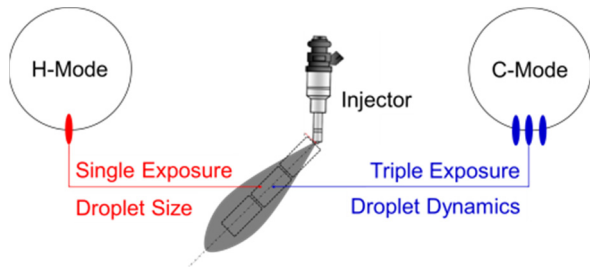
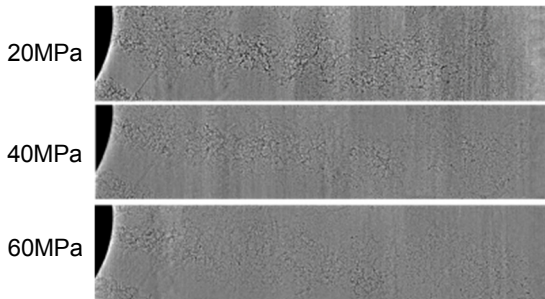
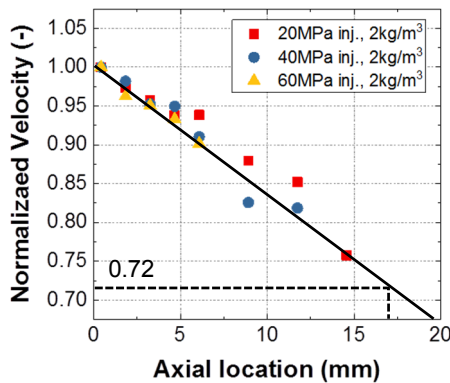


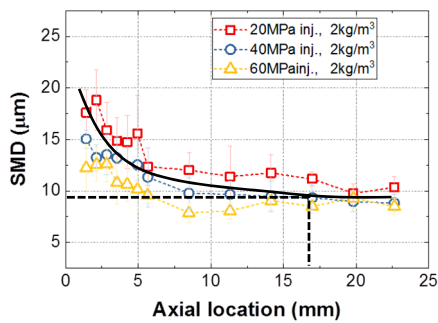
Fig. 5 X-ray Measurement Method



(a) Raw Image



(b) Droplet Velocity



(c) SMD

Fig. 6 Measured Results

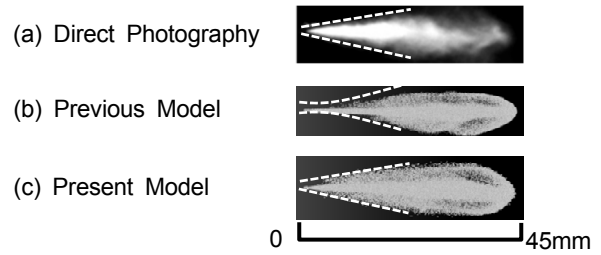


Fig. 7 Comparison of Free Spray between Measured Results and Simulated Results

燃焼室内に直接噴射された燃料は、微粒化しながら燃焼室壁面に衝突するため、その衝突挙動も重要になる。この挙動予測には千田モデルを用いているが、圧縮行程噴射のように、ノズルからピストンまでの距離が短い条件で検証した事例はない。そこで、広島大学との共同研究で、衝突噴霧の挙動について研究している⁽⁶⁾。

本研究では、単噴孔ノズルから噴射圧力10MPaで噴射した噴霧を、大気圧条件下で22mm離れた平板に45°で衝突させ、衝突前後の液滴速度・径をPIV・Particle Image Analyzer (PIA) で計測した。計算結果では壁面衝突後に微小液滴が巻き上がる (Fig. 8(b)) が、計測結果ではその現象は見られない (Fig. 8(a))。この差に基づき、壁面衝突後の液滴速度・径・反射角に影響するモデル係数を修正することで、壁面衝突挙動を高精度化した (Fig. 8(c))。

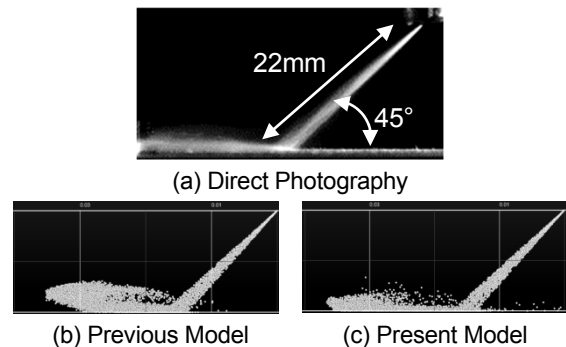


Fig. 8 Comparison of Impinging Spray between Measured Results and Simulated Results

3.4 燃焼予測技術

SPCCIの圧縮着火やSIのノッキングのような未燃混合気の自着火は、流体と化学反応の相互干渉でおこるため、変動的かつ局所的現象である。その予測には、前述の流動・噴霧予測技術と素反応を考慮した燃焼予測技術を連成して用いる必要がある。そこで、広島大学・北海道大学との共同研究で、定容容器内のノッキングを対象に、現象解明・予測技術について研究している⁽⁷⁾⁽⁸⁾⁽⁹⁾。

本研究では、内径20mm、長さ80mmの定容容器に空気・ノルマルヘプタン混合気を充填し、中央で点火するこ

とで伝ば火炎を生成する (Fig. 9)。圧力0.5MPa, 温度500K, 当量比1.0, 壁温500Kを初期条件として点火した場合, 火炎が35mm伝ばした時点で火炎前面より自着火がおこる (Fig. 10)。火炎による圧縮効果は, 未燃混合気全体に一樣に寄与するため, 火炎前面でおこるといふ局所的現象には不明点が残る。

この現象を解明するために, 素反応を考慮した2次元燃焼予測技術を構築した。反応モデルはLiu (48化学種, 152反応式), 格子サイズは20 μ m, Courant Friedrichs Lewy (以下, CFL) 数は0.8とし, 対称境界を用いて計算負荷を低減した。その結果をFig. 11に示す。未燃混合気が火炎に圧縮される際, その温度は壁温よりも高くなるため, 壁面近傍の未燃混合気の温度は相対的に低くなる。一方, 火炎前面の未燃混合気は, 火炎の圧縮効果に加え, 火炎からの熱伝導で温度がわずかに高くなる。これにより, 中間活性種ホルムアルデヒド (CH₂O) が生成されることで冷炎の発現時期が早まり, 火炎前面で自着火するという局所的現象を引き起こすと考えられる。

実際の燃焼室では, 混合気の温度・濃度の空間分布が存在する。そのため, 3次元燃焼予測技術が必要だが, 格子数増加で計算負荷が高くなる。そこで, 複数の計算機を用いて並列計算する際の負荷を平準化し, 30%超の高速化を行った上で, 3.2で決定した格子サイズを適用した。乱流モデルはSmagorinsky, 反応モデルは広島大学との共同研究を通じて開発した簡略化反応機構 (133化学種, 558反応式), 燃料は5種サロゲート (オクタン価95), CFL数は0.8とし, エンジンノッキングの自着火現象について検証した。

エンジンにはSKYACTIV-G 2.0を使用し, 回転速度3000rpm, 充填効率75%で, 点火タイミングの進角でノッキングを誘発し, VisioKnockを用いて未燃混合気の自着火位置・頻度・時期を計測した。計測結果では, 排気側で10deg.aTDCから15deg.aTDCに自着火がおこる (Fig. 12) が, 計算結果でも同様の現象を示すことを確認した (Fig. 13)。計算結果からこの現象を考察する。SKYACTIV-Gでは, 吸気行程で形成される強いタンブル流が燃焼開始時点でも残存し, 3000rpmでは排気側から吸気側への強い流れが存在する。この状態で点火すると, 吸気側への火炎伝ばが速く, 逆に排気側が遅くなる。これにより, 未燃混合気が排気側に多く残存するため, 火炎面が到達する前に自着火がおこりやすくなる。加えて, 圧縮上死点前で点火タイミングを進角すると, 圧縮上死点での燃焼割合が増加するため, 火炎による圧縮効果が上がる。これにより, 未燃混合気の温度は1000K超まで上昇し (Fig. 13(a)), ホルムアルデヒドが生成された後 (Fig. 13(b)), 自着火に至ることを確認した。

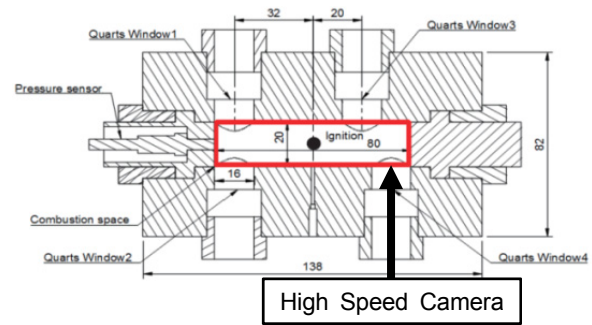


Fig. 9 Schematic of Combustion Vessel

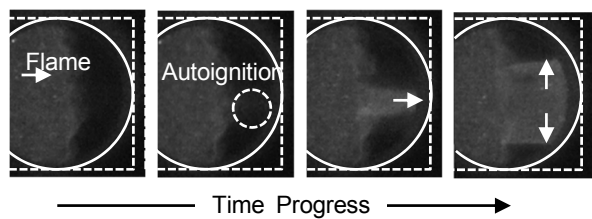
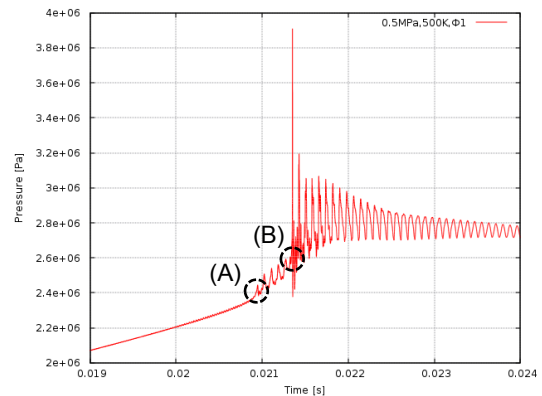
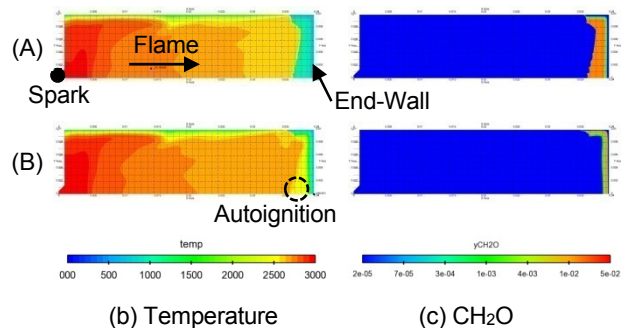


Fig. 10 Direct Photography Results



(a) Pressure History at End-Wall



(b) Temperature (c) CH₂O

Fig. 11 Simulated Results

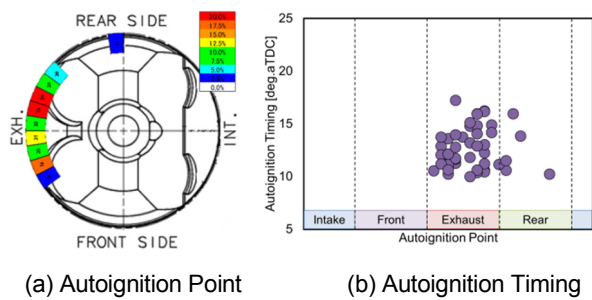


Fig. 12 Measured Results

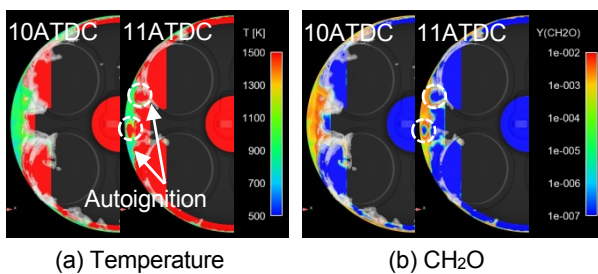
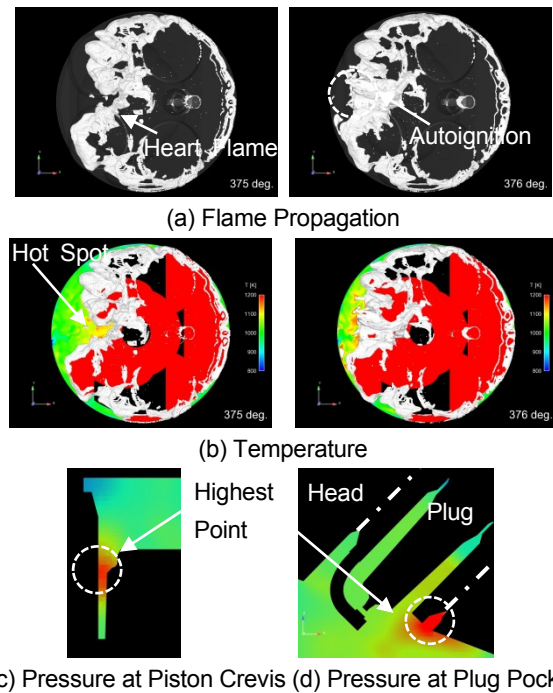


Fig. 13 Simulated Results at Exhaust Area

4. 燃焼予測技術の適用効果

SPCCIにより実用運転範囲の熱効率向上を実現するSKYACTIV-Xでは、SIで運転する高速高負荷域のノッキング抑制が主要課題となる。本章では、前述の予測技術を用いてノッキング現象を分析し、抑制の方向性を確認した事例を紹介する。

開発段階の試作エンジンでは、回転速度5000rpmの全負荷で、1000サイクル中に数回強いノッキングが観察された。強いノッキングがおこるサイクルは、共通して熱発生時期が過進角状態であったため、計算では点火タイミングを進角させて現象を再現した。強いタンブル流を利用する高速高負荷域では、燃焼開始時点でもタンブル流が残存するため、点火後にハート型火炎が形成される (Fig. 14(a))。火炎に挟まれた未燃混合気部は高温になり (Fig. 14(b))、この温度上昇が自着火を引き起こす。この局所的自着火で発生した圧力波は、ピストンクレビス (Fig. 14(c))・プラグポケット (Fig. 14(d)) のような狭い空間で増幅されるため、溶損・破損の原因となる。これらの結果から、圧縮上死点で残存するタンブル流を崩壊させ球状火炎を形成する、未燃混合気部が形成される排気側の混合気分布を制御して自着火しにくい状態にする、自着火で発生する圧力波が狭い空間に伝ばしにくい形状にする、ことをノッキング抑制の方向性と定めた。この指針に基づき開発を進めることで、ガソリンエンジンがもつ気持ちのよい高回転の伸びを実現した。本予測技術はSPCCIの開発にも適用し、SKYACTIV-Xは高い動力性能と優れた環境性能を実現した。



(c) Pressure at Piston Crevis (d) Pressure at Plug Pocket

Fig. 14 Simulated Results

5. おわりに

基礎研究による現象解明を通じて、SKYACTIV-Xのモデルベース開発を主導する燃焼予測技術を構築した。流動・噴霧予測技術では物理モデルの修正・格子サイズの最適化で適用範囲を拡大し、燃焼予測技術では素反応を考慮することで自着火予測を可能にした。今後も産学連携を強化し、内燃機関の理想追求に向けモデル主導での飽くなき挑戦を続けていく。

参考文献

- (1) IEA/ETP Energy Technology Perspectives 2015, pp. 45, Fig. 16
- (2) 佐藤ほか：SKYACTIV-GにおけるCAEの活用、[マツダ技報, No. 29, pp. 47-52 \(2011\)](#)
- (3) 横畑ほか：SKYACTIVエンジンの性能開発に活用したMBD、[マツダ技報, No. 31, pp. 54-59 \(2013\)](#)
- (4) S. Moon et al. : Governing parameters and dynamics of turbulent spray atomization from modern GDI injectors, *Energy*, Vol. 127, pp. 89-100 (2017)
- (5) R. Payri et al. : Diesel nozzle geometry influence on spray liquid-phase fuel penetration in evaporative conditions, *Fuel*, Vol. 87, pp. 1165-1176 (2008)
- (6) H. Luo et al. : Microscopic behavior of spray droplets under flat-wall impinging condition, *Fuel*, Vol. 219, pp. 467-476 (2018)
- (7) H. Terashima et al. : Mechanisms of strong pressure wave generation in end-gas autoignition during

knocking combustion, Combustion and Flame, Vol. 162, pp. 1944-1956 (2015)

- (8) 佐藤ほか：ノッキング振動を伴わない末端ガス自着火燃焼モード，第55回燃焼シンポジウム講演論文集，No. B313 (2017)
- (9) 伊藤ほか：定容容器を用いた高温高圧条件におけるエンドガス局所自着火現象の解析，第55回燃焼シンポジウム講演論文集，No. B324 (2017)

■ 著 者 ■



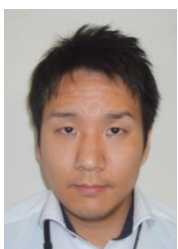
河野 通治



本田 雄哉



和田 好隆



上村 匠



植木 義治



横畑 英明

特集：新型MAZDA3

8

新型2L直列4気筒「SKYACTIV-X」のエンジン技術 Newly Developed In-line Four-cylinder Engine “SKYACTIV-X”

西田 良太郎*¹ 中原 康志*² 西田 正美*³ 山谷 光隆*⁴
Ryotaro Nishida Yasushi Nakahara Masami Nishida Mitsutaka Yamaya
加藤 二郎*⁵ 高簾 達也*⁶ 岡澤 寿史*⁷ 福馬 真生*⁸
Jiro Kato Tatsuya Takahata Hisashi Okazawa Masaki Fukuma

要 約

マツダは2030年を見据えた技術開発の長期ビジョン「サステイナブル“Zoom-Zoom”宣言2030」を発表し、「走る歓び」によって、「地球」「社会」「人」それぞれの課題解決を目指す新しいチャレンジに取り組んでいる。この中でマツダは「Well-to-Wheel」での企業平均CO₂排出量を 2050年までに2010年比90%削減することを視野に、2030年までに50%削減するという具体的目標を定めている。このビジョンの実現に向けて、ガソリンエンジンにおける圧縮着火を世界で初めて実用化した次世代エンジン「SKYACTIV-X」を開発した。このエンジンは「SKYACTIV-G」から始めた理想の内燃機関を追求する2nd Stepにあたり、更なる高圧縮比化やリーンバーンによる比熱比改善、それらを達成させるSPCCI（火花点火制御圧縮着火）を実現させた。結果、SKYACTIV-Gに対して 全域で10%以上のトルク改善を図りつつも、量産ガソリンエンジンとしては世界最高レベルの燃費率を達成した。本稿では主にエンジンのハード構成を紹介する。

Summary

Mazda announced its long-term vision for technology development “Sustainable Zoom-Zoom 2030” and launched a new initiative in helping solve a variety of issues facing the earth, society and people through driving pleasure. Under the vision, Mazda aims to reduce corporate average “well-to-wheel” carbon dioxide emissions to 50 percent of 2010 levels by 2030, and achieve a 90-percent reduction by 2050. To fulfill the vision, Mazda has developed a next generation engine “SKYACTIV-X”, the world’s first commercial gasoline engine to employ compression ignition. This engine, which was developed in the second step of Mazda’s quest for the ideal internal combustion engine which started with SKYACTIV-G, has further increased compression ratio, improved specific heat ratio by means of lean burn, and realized spark controlled compression ignition (SPCCI). As a result, the SKYACTIV-X engine has increased the torque up to 10% overall and reduced fuel consumption over the current SKYACTIV-G, achieving the world’s high-level fuel economy rate as the gasoline engine. This article introduces the engine’s hardware aspects and others.

Key words : Heat Engine, New Combustion Model Engine, Engine Component or Element, Performance/
Fuel Economy/Efficiency

1. はじめに

マツダは2030年を見据えた技術開発の長期ビジョン「サステイナブル“Zoom-Zoom”宣言2030」⁽¹⁾を発表した。地球を守るために自動車の実用環境下での燃費改善とエミッションのクリーン化の効果を最大化することを方針とする。内燃機関搭載車は将来においても世界的に大多数を占めると予想され、CO₂削減効果の大きい内燃機関の理想を徹底的に追求しつつ、効率的な電動化技術と組み合

わせる。この考えの下、マツダは次世代ガソリンエンジン「SKYACTIV-X」(Fig. 1)を開発した。

SKYACTIV-Gに対して 全域で10%以上のトルク改善を図りつつも、量産ガソリンエンジンとして世界最高レベルの燃費率を達成した。本稿ではエンジンハード面での技術紹介を中心に説明を行う。

*1~8 エンジン設計部
Engine Design Engineering Dept.



Fig. 1 SKYACTIV-X

2. エンジン開発コンセプト

マツダは究極の内燃機関を目指し、Fig. 2で示した7つの制御因子を理想状態に近づける取り組みを進めている。新型2L直列4気筒ガソリンエンジン「SKYACTIV-X」ではこのロードマップに従い、異常燃焼回避機能を向上させSKYACTIV-G^(2,3)よりも更に圧縮比を高めつつ、従来よりも多量の空気やEGRを導入して燃焼させるリーンバーン化による比熱比改善を行った。リーンバーン化は比熱比向上による燃費改善効果だけでなく、ポンピング損失低減や冷却損失低減による燃費改善効果がある。また大幅なリーン条件下ではNO_x 排出量低減などのエミッション改善効果も期待できる。ただし通常の火炎伝ばによる燃焼 (SI燃焼) では 安定的な運転は困難である。今回、スーパーリーン条件下での安定的な燃焼を実現するブレークスルー技術としてSPCCI燃焼技術を開発した。

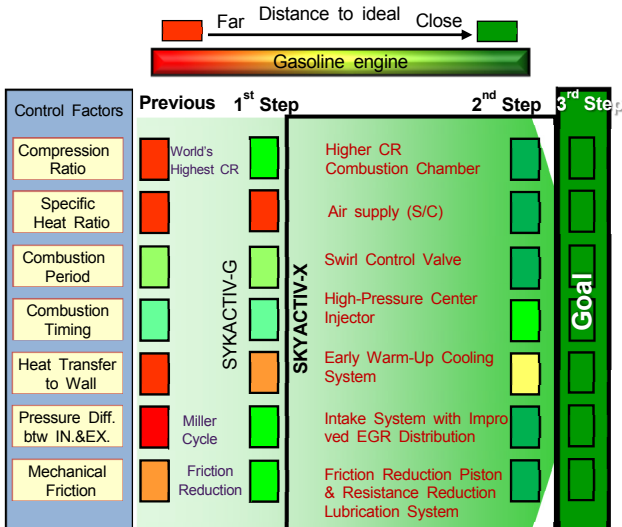


Fig. 2 Vision for Evolution of Internal Combustion Engine

3. エンジン諸元とシステム

SKYACTIV-XではSPCCI燃焼実現のために、筒内温度や混合気状態、流動形成などねらいとする筒内状態量の実現が必要となり、燃焼室形状や高圧噴射系、エアサプライなどのシステム選定を行った。Fig. 3にシステム図、Table 1

に主要諸元を示す。

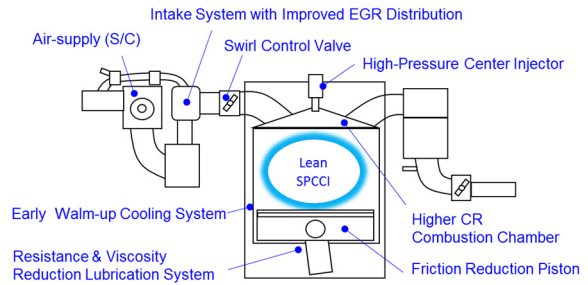


Fig. 3 System Diagram for Lean SPCCI at SKYACTIV-X

Table 1 Dimension and Specification

Engine	SKYACTIV-G 2.0 Previous	SKYACTIV-X
Engine Type	In-line4	←
Displacement	1997cm ³	←
Bore x Stroke	83.5 mm x 91.2 mm	←
Compression ratio	14.0	16.3
Fuel Injection	DI (20 MPa)	DI (70 MPa)
Air-supply system	—	Roots-Type Supercharger
Max Power	121kw / 6000rpm	132kw / 6000rpm
Max Torque	210Nm / 4000rpm	224Nm / 3000rpm

4. パフォーマンス

4.1 出力性能

SKYACTIV-Xでは、SPCCIとエアサプライの利用により、高応答でのトルク改善を達成し、走る喜びの提供に努めている。特に発生トルクはSKYACTIV-Gに対して 全域で10%以上の改善を実現した (Fig. 4)。

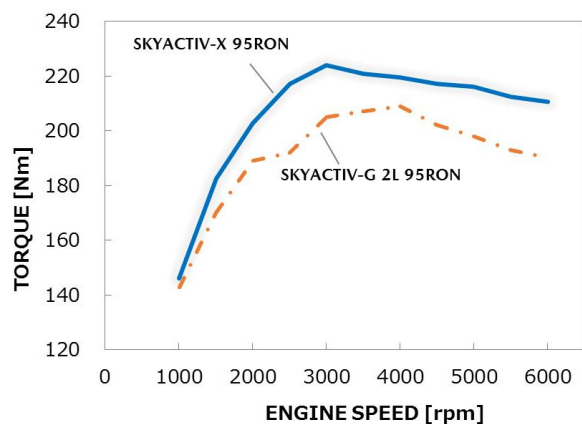


Fig. 4 Engine Performance

4.2 燃費性能

SKYACTIV-Xでは、前回取り組んだ高圧縮比に磨きをかけつつ、リーン燃焼による比熱比改善を行い、SKYACTIV-G比大幅な燃費改善を実現した (Fig. 5)。結果、量産ガソリンエンジンとしては世界最高レベルの燃費率を達成した。

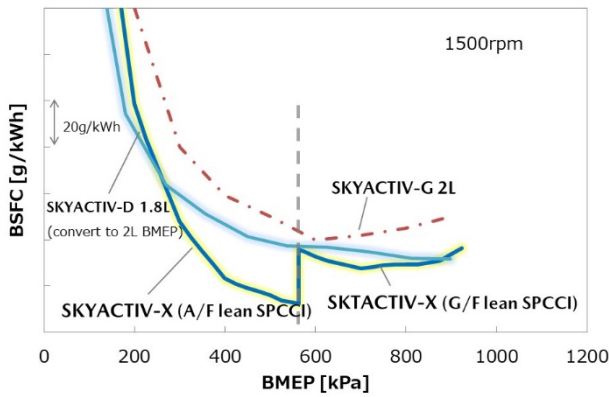


Fig. 5 Fuel Consumption Characteristic

5. 燃焼実現のためのKey技術

5.1 超高圧縮比 燃焼室形状

SPCCI燃焼のコンセプトは、SI燃焼での火種を急峻に伝ばさせてCI燃焼へ導くものである。そこで、筒内の燃料分布の高分散化が必要となるため、燃焼室中央へインジェクターを配置した。SPCCI燃焼領域は、スワール流をコントロールして火種を急峻に伝ばさせるため、吸気ポートへSCV (Swirl Control Valve) を採用している。

また、点火プラグを通過するスワール流起因の流動を活用する目的で点火プラグを吸気ポート間へ配置した (Fig. 6)。

SI燃焼領域は SKYACTIV-Gと同様に高タンブル吸気ポートを採用して点火プラグへの流動を強化している。

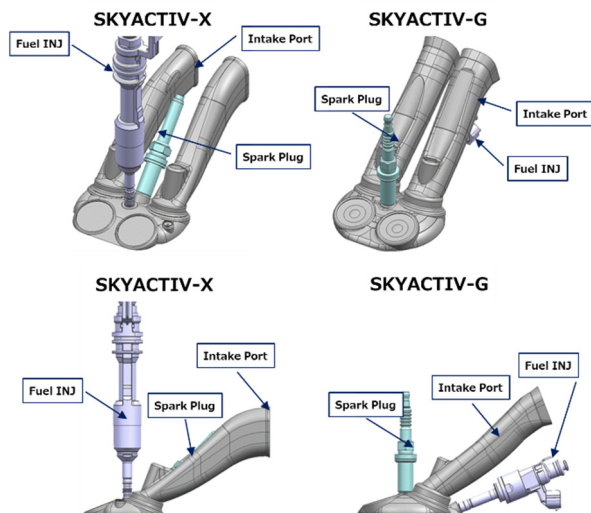


Fig. 6 Layout over Combustion Chamber

SKYACTIV-Xは、超高圧縮比を採用している。超高圧縮比を高次元で管理するため現行SKYACTIV-Gでは燃焼室容積をねらいの値に近づける調整加工を採用しているが

更なる燃焼室容積公差の縮小が必要となる。

そこで、SKYACTIV-Xでは燃焼室形状を全て加工で形成させる「Full加工」Typeを採用した (Fig. 7)。Full加工燃焼室に関しては、加工による形状制約があるが、SKYACTIV-Gで得られた知見を活用して3種類の刃具で加工できる形状とし、吸入時の抵抗や排気時の掃気性は従来性能と同等とした。

SPCCI燃焼及びSI燃焼を理想の熱発生パターンへコントロールする目的で、初期燃焼速度と燃焼期間に感度の高いスワール及びタンブルと言った流動因子による高い乱流速度を生ずるピストンキャビティ形状を新たに設計した (Fig. 8, 9)。スワール流による燃料を点火プラグへ導き、かつ圧縮行程中のタンブル流を維持させるために浅皿で大径キャビティ形状とした (Fig. 10)。また、超高圧縮比、広いバルブオーバーラップを確保した上で理想の燃焼を実現させるため、燃焼解析を多数実施して最適なキャビティ形状を具現化した。

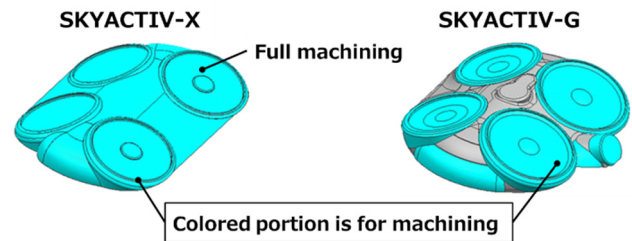


Fig. 7 Combustion Chamber

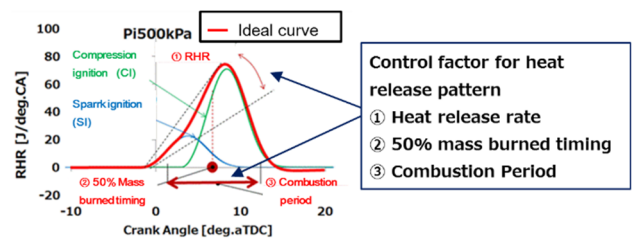


Fig. 8 Control Factor for Heat Generation Parameter

< 2000 rpm, P/L, SCV closed >

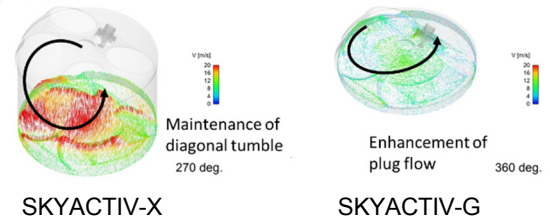


Fig. 9 Maintenance of Tumble and Enhancement of Plug Flow with Piston Cavity

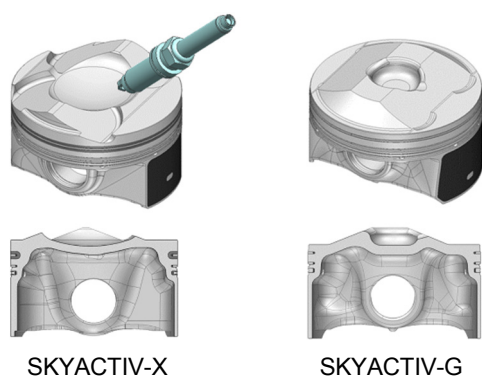


Fig. 10 Piston Cavity Design

5.2 往復回転系

SPCCI燃焼では圧縮自着火によって従来燃焼に比べて急激な筒内圧力上昇が発生するため、往復回転系部品はより高いレベルの強度確保と振動騒音対策が必要となる。これに対してSKYACTIV-Xでは、以下の技術を織り込むことで対応し、重量増加を最小限にとどめ、更に機械抵抗低減を実現することができた (Fig. 11)。

1. 強度確保：コンロッド小端のテーパ形状によりピンボス間距離を短縮して発生モーメントを低減しつつ、燃焼室裏を大きく除肉することで軽量化に結び付けた。
2. 振動騒音対策：SKYACTIV-Dで採用したNatural Sound Smoother を水平展開した。
3. 機械抵抗低減：筒内圧力増加による境界潤滑割合増加に抑制するため、非対称バレル形状のオイルリング、TopリングへのDLC追加、各部摺動面の粗さ低減、高さ方向で楕円量を最適変化させたスカートプロファイルを採用して機械抵抗低減を実現した。

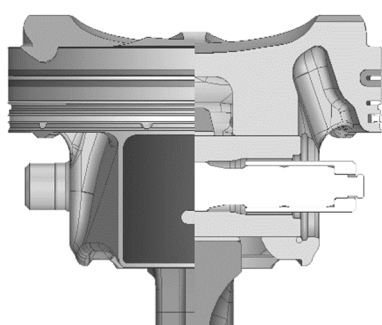


Fig. 11 SKYACTIV-X Piston

5.3 燃料噴射系

(1) 燃料噴射系の開発のねらい

リーン混合気の均質性の向上や、圧縮工程噴射による低温酸化反応の抑制、成層化による着火性とリーン化の両立のため、以下をねらいとした超高燃圧、センター噴射、流量調整弁内蔵インジェクターを特徴とする燃料噴射系を開発した。

1. 燃料の気化時間短縮
2. 燃料の高分散性
3. 高精度微小量、多段噴射

(2) 超高燃圧噴射系

従来の直噴ガソリンエンジン燃料系の燃圧は30MPa程度であるが、倍以上の70MPaの燃圧を実現した。インジェクターの高燃圧化でまず課題になるのは開弁力の増大手段である。インジェクター開弁時には、燃圧が芯弁を閉じる方向にかかるため開弁するにはこれに打ち勝つ開弁力が必要となるので、燃圧の70MPa化に伴い開弁力を増加しなければならない。開弁力は通常はコイルを大型化すれば電磁力は強くなるが、電磁力の増加、減少の応答時間が長くなり極短時間での開閉が困難になるため、上記の多段噴射の要求を満たせなくなる。それを解決するために、世界初の2段ソレノイドのインジェクターを開発し、開弁力と作動速度の両立を図った (Fig. 12)。

また高燃圧化のために、全ての燃料系部品を新規開発している。燃料ポンプは高燃圧化に伴いポンプ駆動荷重が増大する。これに対応するために、ポンプ駆動カムはクランク等速化によりカムを2山とし、ポンプタペットは従来のニードル軸受から滑り軸受に変更することで、それぞれ面圧を低減した (Fig. 13)。

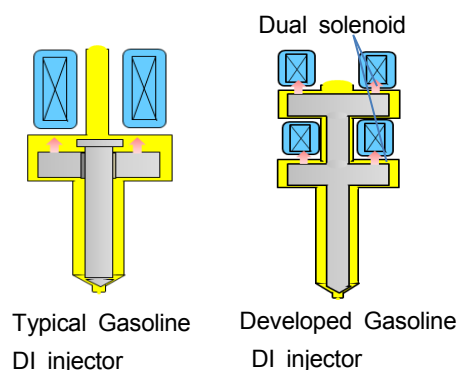


Fig. 12 Injector Mechanism

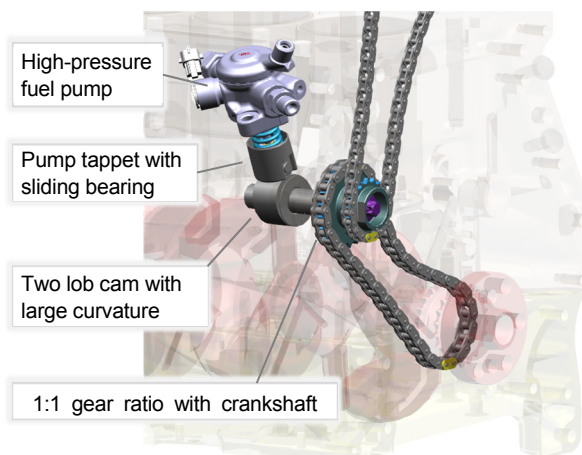
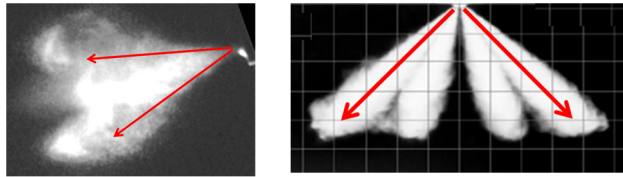


Fig. 13 Fuel Pump Drive System

(3) センター噴射

短時間に多くの空気と接触させて気化を促進しエンドガス冷却効果を得るために、ガソリン用直噴インジェクターでは世界最多の10噴口を採用した。一般的なサイド噴射ではピストン等の制約から噴霧角は左右70° 上下40° 程度しか取れず、噴霧どうしの干渉による微粒化悪化のため多噴口化は難しい。センター噴射化により90° もの広い噴霧角を実現し、10本の噴霧を十分空気と接触させることで、気化を促進した (Fig. 14)。



Side Injectio Center Injection

Fig.14 Spray Angle

(4) 流量調整弁内蔵インジェクター

さまざまな運転条件で圧縮工程噴射でのエンドガス冷却効果を得るためには、微小流量から高流量まで連続的に使える噴射量制御性が必要がある。

一般的にガソリン直噴インジェクターの噴射量特性は Fig. 15 のように、芯弁リフトの動作の違いにより、放物線を描く微小リフト域、ニードルが上部ストッパに当たって跳ね返るバウンス域、フルリフト域の3つの領域に分けられる。しかし一般的なインジェクターでは微小リフト域、バウンス域の芯弁の動きは外乱に対し敏感で不安定なので、その領域は限定的にしか使えない。SPCCI燃焼を実現するため、その制限を排除し微小リフト域から全領域高い噴射量制御性をもつ流量調整弁を内蔵したインジェクターを開発した (Fig. 16)。流量調整弁により芯弁にかかる電磁力と燃圧による油圧力はバランスし安定して作動する。これにより微小流量域の作動速度のばらつきを抑制するとともに、バウンス現象を排除した。その結果、従来システムの約1/5の微小流量から全負荷領域までの広い噴射量ダイナミックレンジを実現した。この油圧制御弁による作動安定性は、ソレノイド駆動インジェクターとして世界最多クラスの5段噴射を可能とした重要な技術要素のひとつと考える。

5.4 エアサプライシステム

SKYACTIV-Xでは、SPCCI燃焼が要求する状態量の吸気ガス (新気+EGR) を高効率で供給するためのエアサプライシステムを採用している。エアサプライシステムの選定にあたっては、以下の機能が求められる。

- ・ 燃費面から、比熱比改善のためにEGR導入によるリーン燃焼 (G/Fリーン燃焼) を広範囲でサポートができること (Fig. 17)。

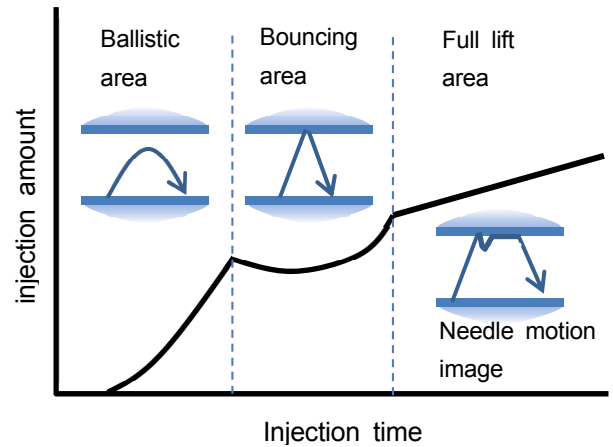
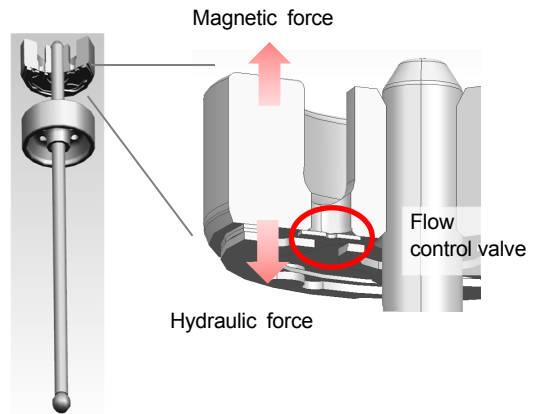


Fig. 15 Schematic Illustration of Injection Amount



Needle assembly

Fig. 16 Structure of Flow Control Valve

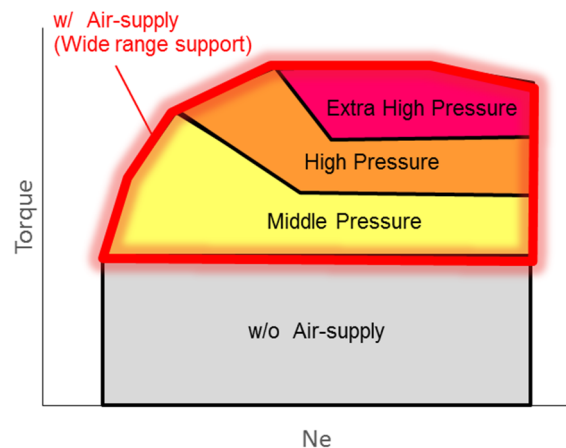


Fig. 17 Boost Pressure with Air-supply

- ・ ガス量コントロールのため、定常連続過給ができ、過渡応答性がよいこと。
 - ・ 排気ガス浄化の観点から、排気ガス温度の低下を避けるため、触媒前の熱容量が小さいこと。
- これらの要求を満たすシステムとして、ルーツブロー式

スーパーチャージャー（以下S/C）を選定した（Fig. 18）。

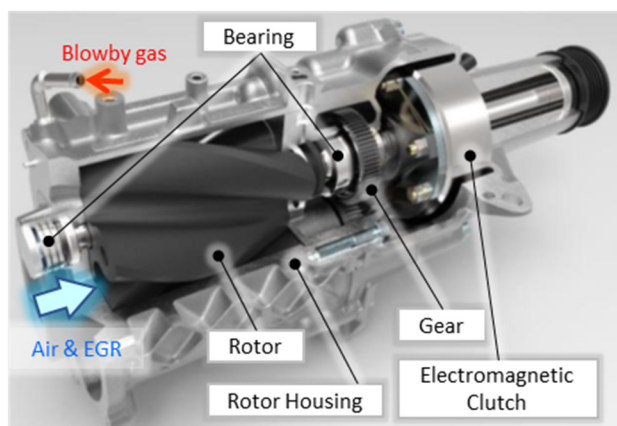


Fig. 18 Air-supply system (Supercharger)

また、S/Cには、以下の技術を取り入れた。

- (a) 機械抵抗抑制：NA領域でのS/Cの引きずり抵抗を避けるために電磁式クラッチを採用し、エアサプライが必要な領域だけ駆動させる。
- (b) 断熱効率改善：ロータープロファイル最適化やロータークリアランス縮小により高効率化を実現した。
- (c) NV抑制：吐出前にハウジング内部を昇圧する構造のチューニングにより、高効率と吐出音・振動低減を両立させた。
- (d) Heavy-EGR対策：Heavy-EGRによる凝縮水やデブリットの悪影響を避けるため、ベアリングやギアケース内に侵入するEGRガスの排出や、ブローバイガスによる潤滑を促すための経路を設けた。

これらの対応により、高い環境性能と走りの両立をサポートする最適なエアサプライシステムを提供できた。

6. 熱効率改善に向けた機能強化

6.1 吸気系によるEGR分配改善

SKYACTIV-XではSPCCI燃焼における燃焼制御のためにEGRを活用している。軽負荷域ではSPCCI燃焼の自己着火性確保のために高温の内部EGRを導入する。また、高負荷域になると筒内温度が高温化するため、ブレイグニッション抑制のために低温の外部EGRを導入する。多量のEGR導入はSPCCI領域を広げるとともに、ポンピングロス低減という観点からも燃費改善に貢献する。

このように燃費改善から多量のEGR導入要求がある一方で、EGR過多になると燃焼は不安定となる。EGR率の気筒間差が大きいとEGR過多の気筒に制約され十分にEGRが導入できない。SKYACTIV-Xでは吸気系構造の工夫により内部・外部EGR率の気筒間差低減を行い、燃費改善と燃焼安定性を両立した（Fig. 19, 20）。

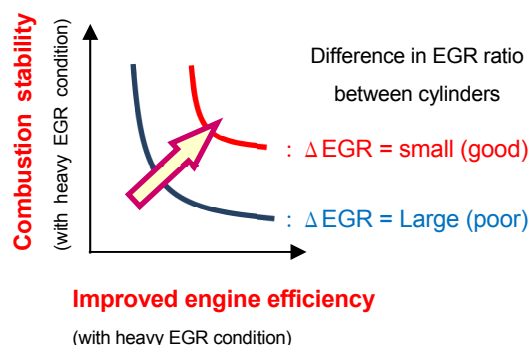


Fig. 19 Relationship Between Fuel Economy Improvement and Stable Combustion in Relation to Increased EGR

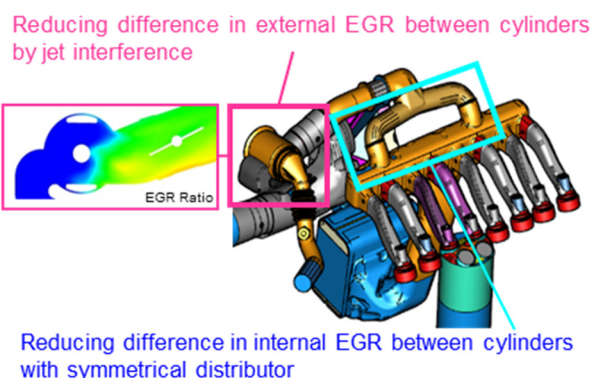


Fig. 20 Intake System Passage and Technology for Improved EGR Distribution

(1) 内部EGR分配改善

SKYACTIV-Xでは、バルブオーバーラップ中に吸気側に既燃ガスを吹き戻し、再吸入するPositive Valve Overlap (PVO) 方式による内部EGR導入を行っている。また排気シャッターバルブでA/Fリーン領域での内部EGR導入量拡大を図っている。これら技術により多量の内部EGR導入が可能となった一方で、出力・パッケージ面から吸気ランナー長は短縮化しており、多量の内部EGR導入時にはサージタンク内まで内部EGRが吹き戻る。この結果、サージタンク内にEGR濃度ムラが生ずると、導入EGR率の気筒間差につながる。通常のセンターエントリー方式のマニホールドでは空気吸入口付近の空気濃度が高まり、端部にいくほど内部EGR濃度が高まる傾向をもつが、SKYACTIV-Xではトーナメント方式の吸気経路を利用することで、この問題を解決した。上方にある2箇所の吸気口を気筒間に配置することで、サージタンク内の内部EGRの偏りを抑制することができ、内部EGRの気筒間差を低減できた（Fig. 21）。

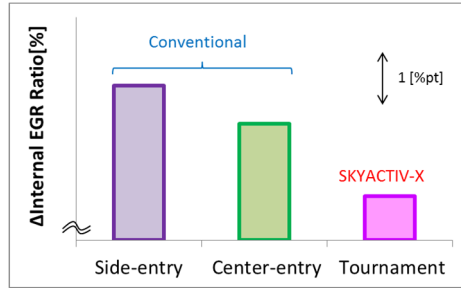


Fig. 21 Relationship Between Internal EGR Ratio and Intake System Specification

(2) 外部EGR分配改善

外部EGRについては十分に空気との混合を進めた状態でサージタンクに導入し、各気筒へ分配することを考えた。外部EGRの混合面からは長い距離をかけて混合を進めることも有効だが、レスポンスの悪化につながる。SKYACTIV-Xでは短い距離で十分な混合を行うためにEGRバルブからのEGR噴流と吸気経路からの空気を互いに衝突させることでミキシングを行っている。結果、EGR導入率の高いNA領域にて高レスポンスを維持しつつ、燃焼安定性と燃費改善の両立を行うことができた。

6.2 サーマルマネージメント

早期にSPCCI燃焼へ移行するため暖機性能の向上を図った。経路ごとにバルブを設けることで、各補機の適正温度を確保しつつ、温めたいシリンダーヘッドの放熱を抑制させ暖機性能を高めた。また、暖機後は、電子制御サーモスタットで水温を制御し、冷却水切替バルブ (CSV) によるパルス制御で流量調整できる構成とした。これにより、軽負荷時にSPCCI燃焼を可能とする壁温にするため、電子制御サーモスタットの設定温度を高めて制御し、CSVでエンジン循環流量を絞ることで水温100℃レベルまで高めた。一方、高負荷では、電子制御サーモスタットの設定温度を低めに制御し、更にCSVの開度を全開にしてエンジン循環流量を高めることでエンジン信頼性を確保させた (Fig. 22, 23)。


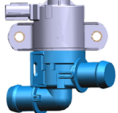

New model		
Thermostat	Coolant switching valve	Electronic control thermostat
- ATF warmer flow control	- Engine flow control - EGR cooler flow control - Heater flow control	- Radiator flow control
		

Fig. 22 Technology Utilizing Cooling System

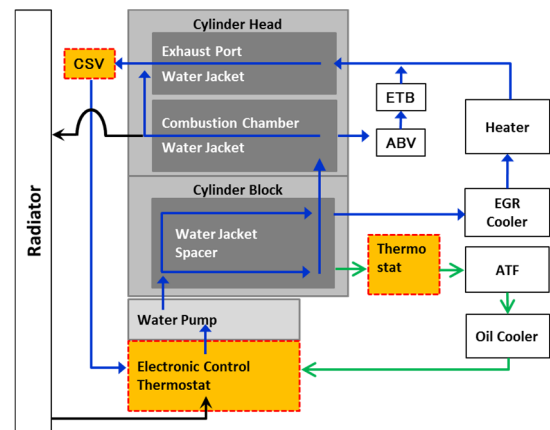


Fig. 23 Cooling Circuit of SKYACTIV-X

6.3 潤滑システム

幅広い領域でSPCCI燃焼を成立させるためのピストンクレーンジェットコントロールと、オイル圧送仕事の低減を実現するためには、きめ細かな油圧コントロールが必要となる。そのため、SKYACTIV-Xでは、Oil Control Valve (OCV) を内蔵した可変容量オイルポンプを新開発し、運転状態に応じて吐出量をコントロールすることで各種要求性能を実現した。またオイルポンプの吐出性能や各軸受のクリアランス、オイルの粘性等の油圧性能に影響を及ぼす因子について、初期バラツキや劣化状態をモデルで再現することで、信頼性を担保しながら必要最低限のポンプサイズを決定した。以下に本エンジンで特に実用燃費低減につながった2つの技術について紹介する。

(1) 低油圧化

本エンジンの潤滑油路をFig. 24に示す。SKYACTIV-Gから、①排気S-VTの油圧タイプから電動タイプへの変更、②タイミングチェーンテンショナーの圧損低減を行うことで、油圧デバイスの要求で決まっていた目標油圧を飛躍的に下げることが出来た。またOCVをオイルポンプに内蔵し (Fig. 25)，吐出直後の高い油圧を可変機構の作動圧に利用することで、油圧の制御範囲を低圧側へ拡大した (Fig. 26)。以上により常用域における目標油圧を従来比30%以上低減している。

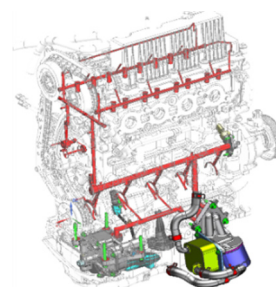


Fig. 24 Lubrication Passage

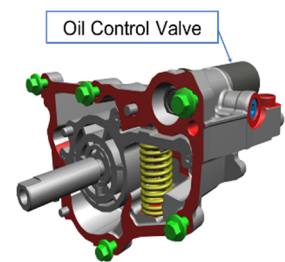


Fig. 25 Oil Pump

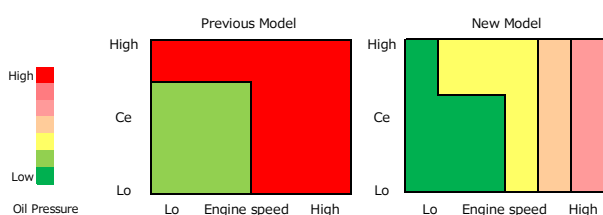


Fig. 26 Oil Pressure MAP (90°C)

(2) 低粘度化

実用燃費の低減とSPCCI燃焼の効果を最大化する為に、新しいエンジンオイルを開発した。本エンジンでは始動後にSPCCI燃焼への早期移行を目的に、積極的に燃焼室へ熱を輸送する為、オイルへの入熱は従来比少なく粘度が高い状態が増える。一方で、高油温においては超高圧縮比燃焼を支えるために従来並みの油膜が必要となる。そこで高粘度指数化を行い、高温時の油膜厚さを確保しつつ、低温時の粘度を従来比約7°C分低減した (Fig. 27)。またプリイグニッション性能への影響が有ると言われているCa系清浄剤を減量し、他の清浄剤とリバランスすることで、従来同等以上のオイル寿命を確保した。

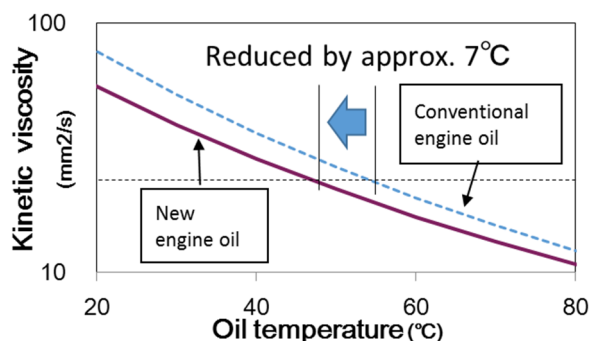


Fig. 27 Viscosity Characteristic

7. おわりに

SKYACTIV-Xでは理想に向けた内燃機関開発の2nd Stepとして、圧縮着火技術を用いて更なる高圧縮比化とリーン燃焼実現に取り組み、「優れた環境性能」と「走る歓び」の両立を達成した。

今後も基本・着実に内燃機関の理想を徹底的に追求することで、「Well-to-Wheel」の考えに基づいた本質的なCO₂削減及び心と体を活性化させる「人馬一体」感の進化により、美しい地球や心豊かな人・社会の実現に貢献していく。

参考文献

- (1) 本橋ほか：サステイナブル“Zoom-Zoom”宣言2030, [マツダ技報, No.35, pp.3-8 \(2018\)](#)
- (2) 長谷川ほか：CX-5 SKYACTIV-Gのエンジン技術,

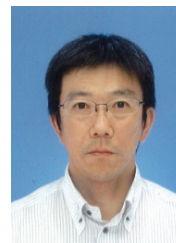
[マツダ技報, No.30, pp.3-8 \(2012\)](#)

- (3) 室谷ほか：新型ガソリンターボエンジンSKYACTIV-G 2.5Tの開発, [マツダ技報, No.33, pp.16-22 \(2016\)](#)

■ 著 者 ■



西田 良太郎



中原 康志



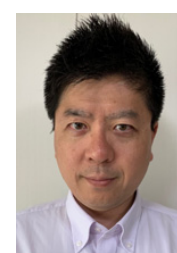
西田 正美



山谷 光隆



加藤 二郎



高旗 達也



岡澤 寿史



福馬 真生

特集：新型MAZDA3

9

SKYACTIV-Xの制御システム Control System of SKYACTIV-X

津村 雄一郎*1 楠 友邦*2 竹本 和洋*3
 Yuichiro Tsumura Tomokuni Kusunoki Kazuhiro Takemoto
 木下 真幸*4 寺元 亮*5 伊藤 剛豊*6
 Masayuki Kinoshita Ryo Teramoto Takeatsu Ito

要 約

SKYACTIV-Xでは、SPCCI（火花点火圧縮着火）燃焼を実現するため、従来のガソリンエンジンには搭載されていないさまざまな新規デバイスを含む新たな制御システムを開発した。燃焼を制御する機能を実現するソフトウェア的な構造を示したのち、制御ハードウェアシステムの概略及び主要な制御機能について、量産部品として世界初の筒内圧力センサーを含む燃焼検出システムとその活用も含め、新規要素を中心に紹介する。

Summary

The SPCCI (Spark Controlled Compression Ignition) of Skyactiv-X poses a new challenge to the control system of the engine. To use the SPCCI combustion in the real world environment, we have developed a new control strategy and various devices. Here we introduce a basic control scheme of the SPCCI, hardware system and main control functions including the world's first mass-produced cylinder pressure sensor for automobiles and the application of the control.

Key words : Electronics and Control, Engine Control, Hardware and Software, Auto-Ignition Control

1. はじめに

SPCCI燃焼によって、さまざまな環境条件、筒内ガス状態の下でも、可変圧縮比等の複雑、高コストになりがちなハードウェア機構をもちいることなく、適切な火花点火によってねらいの着火燃焼を安定して実現できるようになった⁽¹⁾。しかし、環境条件などに応じて適切なタイミングで火花点火を行うためには、筒内状態の精確な推定、制御と、それに応じた燃料噴射、点火時期決定を行うことができる制御システムが必要である。

本稿では、まずSPCCI燃焼制御の概念を示したのち、

その実現のために新たに開発したセンサー・アクチュエーターを備えた制御ハードウェアシステムの全体像と各制御機能を紹介する。

2. SPCCI 燃焼の制御

2.1 基本構造

ドライバーの操作に応じてエンジンが出力すべきトルクが決定され、それに応じて適切な燃焼形態を選択し、そのための空気量・EGR（Exhaust Gas Recirculation）率・温度を備えた筒内状態を整え、筒内状態に合わせて燃料を噴射し、火花点火を行う（Fig. 1）。

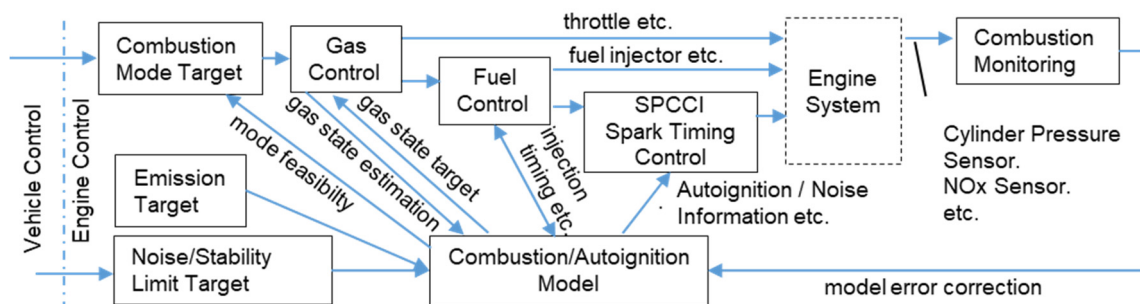


Fig. 1 Schematic Control Block Diagram

*1~6 PT制御システム開発部

Powertrain Control System Development Dept.

SPCCIの燃焼形態としては2つあり、低・中負荷かつ自着火に適した環境下において用いるA/FリーンSPCCI燃焼と、負荷全域において幅広い環境条件で利用できる、理論空燃比のG/FリーンSPCCI燃焼とがある。どちらの場合も基本的な制御の構造は同じである。

本節では、SPCCIの名前の由来でもある点火時期を手段とする自着火制御について説明する。

筒内の温度や燃料量など燃焼前のガスの状態が与えられると、点火時期に応じて、自着火燃焼の開始位置（自着火時期）及び燃焼位相が決まってくる。もし点火とそれによる自着火時期が早すぎれば(1)急速な自着火燃焼による圧力上昇で燃焼騒音などの問題を生じ、遅すぎれば(2)自着火が不安定となりトルク変動や排出ガスの悪化の問題を生じる。また、(1)と(2)の間でエンジンの効率が最良となる燃焼位相が存在する(3)。

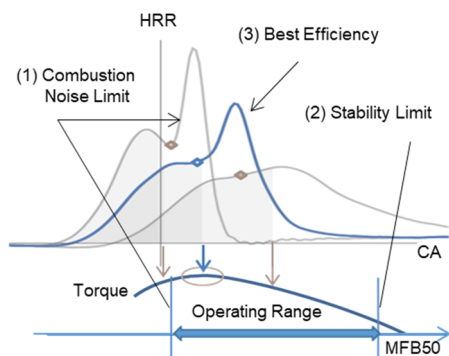


Fig. 2 Heat Release Rate (HRR) and Torque

同一負荷で点火時期を変化させたときの燃焼による熱発生率を例示するとFig. 2の上段のようになる。燃焼重心(MFB50, Mass Fraction Burned 50%)までの熱発生をグレーハッチング、自着火時期を菱形のマークで示した。下段には横軸をMFB50としたトルク及び(1),(2)の限界との関係例を示した。

自着火時期を(1),(2)とならない範囲内に維持しつつ、エンジン効率を決めるMFB50を可能な限り(3)の最適点に近づけるため、推定した筒内状態から燃焼モデル、自着火モデルによりそれらを予測して点火時期を決定している。自着火時期、燃焼重心等については後述する。

SPCCIの制御でポイントとなるのは、自着火がいつ起きるかは、点火時期が同じでも、点火前の筒内ガスの温度やEGR率、燃料分布などの状態によって大きく変わってくるという事実を考慮することである。

したがって、まず、点火前の筒内ガス状態を精度よく制御、推定するための吸排気制御(4章)、精度よく燃料を噴射する燃料制御(5章)に改善が必要であった。

更に、吸排気制御などを改善した場合でも、従来ガソリンエンジンから採用しているような吸気温度センサーなどには精度の限界があるため、これらの情報で筒内を推定するモデルを使うだけでは、十分な精度を達成できない。

そこで、自着火時期を含めた自着火燃焼の状態を見てモデルを補正するフィードバックが重要になる。SKYACTIV-Xでは、直接筒内圧を計測する燃焼検出システム(7章)を開発してこれを実現した。

なお、従来ガソリンエンジンでは、開発時のテスト結果に基づき各種温度センサーなどの値を入力とするエンジントルクモデルを作り、点火時期を決めていた。ノックセンサーでエンジンブロックの振動を見るなど、燃焼の結果に応じたフィードバックは行っていたが、エンジンの工業製品としての個体差や環境条件の差を考慮・吸収して熱効率最大の状態で運転するという理想には不十分な点もあった。

SKYACTIV-Xでは、全気筒、全サイクル、筒内圧力センサーにより実際の燃焼状態を見てモデルを補正する制御を導入することで、理想状態に大きく近づいた。

(1) 自着火モデル

SPCCIは点火時期によって制御するのではあるが、点火前の筒内ガス状態と点火時期の両因子から自着火時期への対応関係を直接一つのモデル式として扱うのではなく、点火からの火炎伝ば速度を表現するSI (Spark Ignition) 燃焼モデルと、それによる未燃部圧力上昇及び点火前の筒内ガス状態を入力として自着火特性を表現する自着火モデルの二つに分割してモデル式を構成した。

SPCCIのメカニズムに基づいた分割でもあるが、制御上の分割の必要性は、自着火時期そのものが毎サイクル変動してしまうことにある。

例えば、市場ガソリンの化学組成は販売場所・季節などでさまざまであり、自着火特性に影響を与えるため、自着火モデルのパラメータに補正を加える必要がある。

しかし、SI燃焼の速度は、例えばディーゼルエンジンの燃焼とは異なり、条件によるが、毎サイクル大きく変動する。その結果として、SPCCIの自着火時期は変動する。

そこでモデルの補正は、各サイクルの燃焼後に、筒内圧力データから、自着火時期に加えて火炎伝ばによるアシスト量を把握して、火炎伝ばの変動を差し引いて行っている。

火炎伝ばの変動が大きい状態で自着火モデルを検証したのがFig. 3である。左図のように筒内圧力や自着火時期そのものは大きく変化しているが、右図のように計測値とアシスト量を入力した毎サイクルのモデル予測値はよく一致しており、自着火モデルのパラメータを不要に変化させることはない。

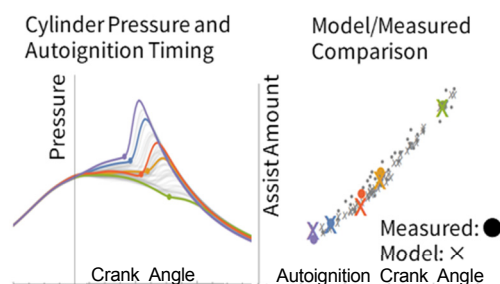


Fig. 3 Autoignition Model for SPCCI

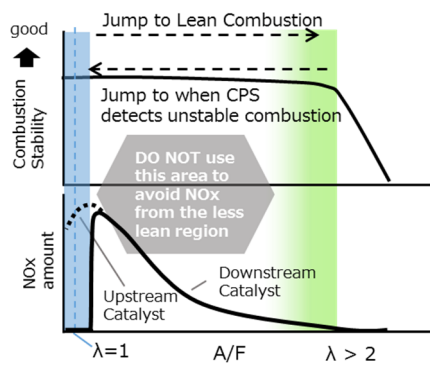


Fig. 4 A/F Lean SPCCI Control

2.2 A/FリーンスPCCI燃焼の制御

A/Fリーン混合気の排出ガスは三元触媒で浄化できないためNOxの排出が課題となるが、SKYACTIV-Xでは、尿素の補充が必要なSCR (Selective Catalytic Reduction) などの後処理装置を用いず、SKYACTIV-Dと同様、燃焼そのものの制御によりクリーンな排出ガスを実現している。

燃焼によるNOxの生成量を決める主要因子は空燃比と燃焼温度である。空燃比をリーンにすれば燃焼温度の低下を通じ生成量を下げられるが、度を過ぎると燃焼の不安定化をとまなう。エンジンの個体差や環境条件があるなかで、NOxが少なく、燃焼も安定しているFig. 4の緑のゾーンに制御するため、NOxセンサーを採用し、筒内圧センサーと合わせてそれぞれモニタしフィードバックを行っている。

なお、空燃比が決まった後でも、燃焼温度や安定性が燃焼位相により変化するため、前述の自着火制御はA/Fリーンス空燃比下においても実行されている。

三元触媒の機能する青のゾーンと、浄化の必要がない緑のゾーンのいずれかを運転条件により切り替え、中間を用いないことで、後処理の不要なリーンス燃焼を実現している。

3. 制御システム

SKYACTIV-Xの制御システムの主要なハードウェアコンポーネントについて本稿で触れたものを中心にFig. 5に示した。

4. 吸排気制御—筒内状態の推定と制御

ドライバーの加減速要求の変化に素早く追従する必要があるため、特に過渡運転で吸気量やEGR率の変化を精度良く推定できることが重要である。

吸気システムはFig. 5のように、スロットル下流に、エアサプライのためのスーパーチャージャー (以下SC) を備える過給経路と、エアバイパスバルブを備えるバイパス経路の二つの経路をもつ。EGRはバイパス経路中に導入されている。

このような吸気系の構造は、インタークーラー下部への

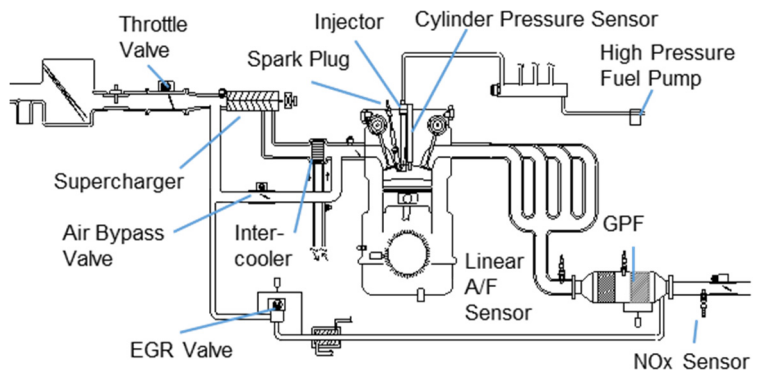


Fig. 5 Control System Components

凝縮水堆積抑制やエンジン搭載レイアウト要件を満たすために採用しているが、過給有無や加減速時にEGR率が複雑な挙動を示すため、推定技術の改良を行った。例として、過給開始時の挙動を説明する。

自然吸気状態でEGRを導入すると、バイパス経路はEGRあり、SC停止のためガスがほぼ流れない過給経路はEGRなしの状態となる。この状態からSCクラッチをONすると、スロットル、EGRバルブの開度は一定であっても、SC回転開始とともに過給経路のガスが吸気ポートへ導入されるため、筒内に吸入されるEGR率は急激に低下する。この際、EGR率の低下に対応した点火時期の調整が行われないと、ノックを伴う異常燃焼が発生する。その後、SC回転数上昇によりバイパス経路の流れ方向が逆転すると、吸気ガスは循環しながら徐々に定常のEGR率に収束する (Fig. 6)。

このような過渡の複雑なEGR挙動を表現するために、インマニモデルを5つの領域に分割し、各領域のEGR率や領域間のガス流量を計算するようにした。これにより過渡のEGR挙動を精度よく推定できるようになった。結果例をFig. 7に示す。図中のCPLF (7.2節) はノッキングの指標である。検証には光学式の高応答ガスモニタを用いた。

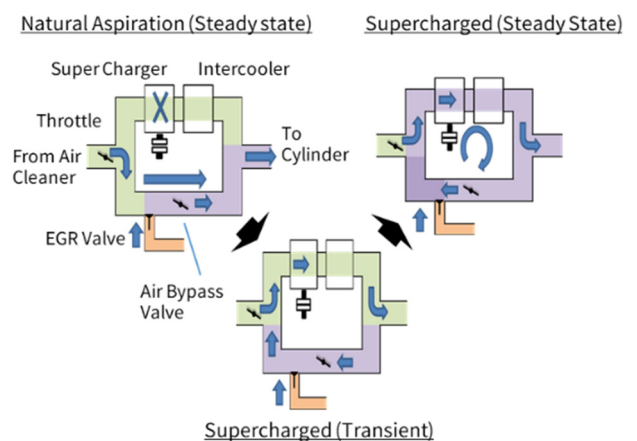


Fig. 6 Schematic Illustration of Transient EGR

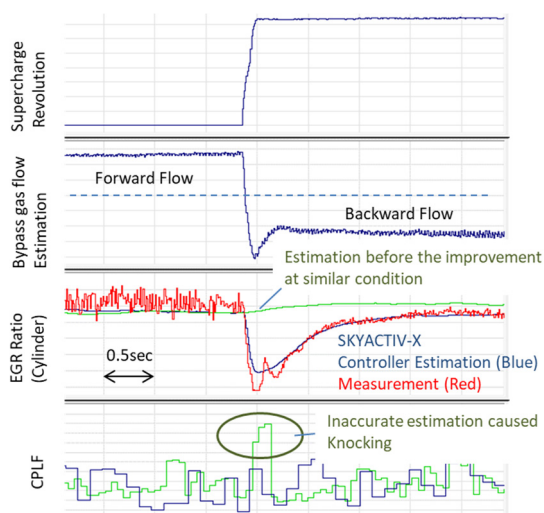


Fig. 7 Transient EGR Ratio Behavior

5. 燃料制御—高燃圧インジェクタの精密制御

SKYACTIV-Xの燃焼が求める燃料分布、均質性を得るには、従来ガソリンエンジンを超えた高燃圧を用いて微小・近接多段を含むさまざまな噴射を高精度で実現する必要があります。

高燃圧・微小噴射量の要求はディーゼルエンジン向け燃料システムの領域にまで踏み込んだ厳しいもの (Fig. 8) であるが、低コストで実現するためガソリンシステムベースのソレノイドインジェクタを用いて目標達成に挑戦した。

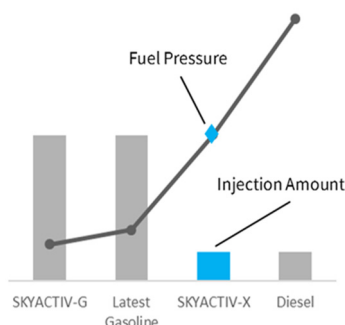


Fig. 8 Requirement Approaching Diesel System

5.1 パーシャル～フルリフト域シームレス制御

高燃圧で微小な燃料量を噴射するためには、噴射弁を引き上げるソレノイドに通電する時間 (噴射パルス幅) を短くする必要があります。一定以上短くなると、噴射弁はストッパーに突き当たって静止 (フルリフト) せず、放物線を描くようにリフトして (パーシャルリフト) 閉じる。従来のインジェクタでは、パーシャルとフルの中間領域で噴射弁のストッパーへの衝突に伴うバウンスと噴射特性逆転現象があるため、一定以上の噴射パルス幅しか使用できなかった (Fig. 9 左)。しかし、新型は高精度微小噴射の実現のため、衝突速度を低下させるハードウェア設計とともに、

各種外乱の影響を受けないよう、制御面での工夫を行うことで、最小パルス幅の限界を取り除いた。

5.2 制御面での対応

燃料を精度よく噴射するためには、燃料温度・脈動、コイル温度、各種劣化・バラつき、デポジット等多くの外乱に対応する必要があります。従来制御技術を基本にしつつも、従来知見が通用しない領域について多くの制御上の工夫を施している。その実現のためには、インジェクタ部品サプライヤと共同開発した制御オブジェクトとマツダ内製制御・エンジン制御ユニットのプラットフォーム制御・駆動回路の連携が重要であった。

5.3 制御の一例 (閉弁時期学習制御)

インジェクタ閉弁時の電流・電圧波形変化を元に閉弁時期を予測、バラつきを補正する一般技術に加え、初期学習の多点化・劣化への対応として運転中も通常制御に影響せず更新する制御を構築した。インジェクタ特性学習の効果をFig. 9に示した。

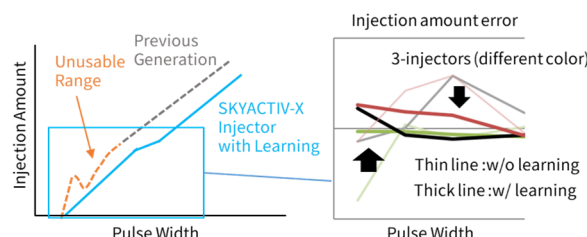


Fig. 9 Small Injection Amount

6. 点火制御—リーン混合気と高圧縮比

6.1 点火コイル・プラグ

高圧縮・高流動の筒内環境下でも初期火炎核を安定して形成できる高エネルギー型 (SKYACTIV-G比約2倍) イグニッションコイルと超高電圧での放電に耐えうる高耐カスパークプラグを新開発した。

A/F リーンSPCCI燃焼での着火性向上のため最適な位置にプラグを突出し、流動に対する側方電極の向きを組付け時に規制している。また吸気工程で放電することであらかじめ燃料を活性化させる新たな手法も採用した。

これらの最適解を筒内ガス解析モデル、放電・燃焼の可視化、及びプラグ電極消耗予測モデルにより導き出し理想の燃焼を実現している。

7. 燃焼検出

量産車として世界初の筒内圧センサーを用いた燃焼検出システムについて紹介する。

7.1 筒内圧センサー

計測装置としての筒内圧センサー (Cylinder Pressure

Sensor, CPS) は、燃焼状態を把握するための最も重要なセンサーとして、エンジン開発一般に使用されてきた。HCCI燃焼などの制御コントローラについても筒内圧センサーを用いた研究が数多くある。しかし、非常に高価であり、車載部品としての搭載性、耐久性などの要件も満たしていなかった。SPCCIの制御にはリアルタイムで燃焼状態を検知する必要があるため、車一台一台に統制できる部品としての要件を満たすセンサー (Fig. 10) の開発を行った。

(1) 構造

①フロント部で圧力を電気信号に変換する。高周波の圧力まで精度よくとらえるため、フロント部先端のダイヤフラムは燃焼室に表出させており、燃焼ガスから直接受圧する。受けた圧力は軸方向の荷重に変換され、内部にある圧電素子で電気信号に変換する。

②リア部ではフロントから受けた電荷をアンプで増幅しセンサーの最終的な出力に変換する。出荷時にアンプ特性の調整を行いハード上の個体差を吸収している。

③接続部はエンジンレイアウトの自由度を上げるためリード線タイプを採用。ノイズ影響を検証しシールド等の電雑保護は行わず生産性とコストを向上させた。

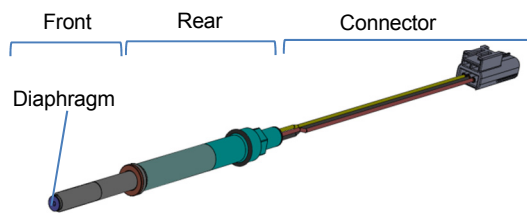


Fig. 10 Cylinder Pressure Sensor

(2) 主要課題への対応

車載する上での主要な課題である出力・信頼性・ノイズに対し、以下の対応を行って量産化を実現した。

① 信頼性と出力精度の両立

フロント部は燃焼ガスから非常に強いストレスを受ける。単に部品強度を上げると応答性や精度が悪化するため、フロント部に対して品質工学を適用して最適となるパラメータ設計を行った。また、燃焼による瞬時の温度変化に対しては高応答熱流束センサーを用いてダイヤフラムへの熱流束変化を確認しCAEによる放熱設計に組み込むことで信頼性基準を確保できるようネジ部からの放熱設計を行った。耐久寿命に関してはSPCCI燃焼時に発生する高周波の圧力変動を考慮し、通常の鉄鋼材料の耐久評価よりも厳しいギガサイクル (10^9 回) 疲労評価による検証を実施した。

② デポジットによる出力影響

ダイヤフラムを燃焼室から奥に引き込むほどセンサーへのストレス環境は緩和されるが燃焼によるデポジットが堆積しやすくなり使用過程で出力影響が発生する。出力精度を求めるため極力燃焼室側に寄せることにこだわった

(Fig. 11)。その上で、ヘッドの曲面によりダイヤフラムの一部にデポジットが堆積するのは避けられないため、堆積物のヤング率、厚み、付着面積に対する出力の影響をモデル化することで限界値を設定するとともに、運転状態によってデポジット堆積特性が変化するカラクリを明らかにし使用過程で出力限界に達しないことを検証した。

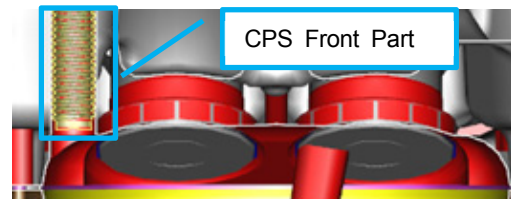


Fig. 11 CPS Placement

③ ノイズ耐性

耐ノイズ性向上のため、エンジンに接する外筒と内部部品を絶縁分離した二重構造としシールド機能を持たせている。シールド性を保証するため製造上のコンタミ管理には徹底した配慮を行なっている。

7.2 燃焼指標の検出

(1) 概要

エンジン制御ユニット (ECU) に筒内圧センサーの信号を取りこみ、信号処理を行い、燃焼状態を特徴づける指標を求めている。

筒内圧センサー本体同様、計測装置であれば信号処理にパーソナルコンピュータ (PC) と同等の高性能なCPUを用いることができるが、限られた容積、電力、さまざまな温度環境で長期間動作しなければならないエンジン制御ユニット (ECU) では、PCの数十分の一の計算能力しか持たないエンジン制御用のマイクロコンピュータ (MCU) で処理を行う必要がある。更に、前述したさまざまな制御の精度向上にも、従来以上の計算処理が求められた。

そこで、SKYACTIV-XのECUはMCUを2個搭載して相互通信を行うことで、計算能力を倍増させるとともに、燃焼指標の計算においては、搭載されたMCUのデジタルフィルタ機能を用いる、必要なクランクアングル区間のみ高周波で信号を取り込む、などの計算負荷低減を行っている。

以下では、燃焼制御のために算出している指標について説明する。

(2) 主要指標

① 燃焼重心 (MFB50)

燃焼重心とは、燃焼による熱発生が全体 (終了時) の半分まで進んだ時点のクランク角度のことである。毎クランクアングル、熱力学の方程式に従ってその時の体積とCPSで計測した筒内圧力から熱発生量を求めることができるので、燃焼終了後には燃焼重心を求められる。燃焼重心が圧縮トップ後数度にある状態が熱効率最大であることが

知られており、それを保つように制御を行っている。

② 自着火時期

自着火の発生は、自着火燃焼が火炎伝ば燃焼よりも急速に進むことから、熱発生率の急激な立ち上がり（変曲点）によって特徴づけられる。これは、筒内圧力に現れるが、燃焼変動によりさまざまな熱発生が生じる中、どの変曲点が自着火時期か特定することはそれほど容易ではない。

ECU内では、筒内圧力にデジタルフィルタをかけて候補となる変曲点の位置を算出し、更にその他の圧力情報から機械学習の手法である決定木を用いて自着火の位置を絞り込んで特定している（Fig. 12）。

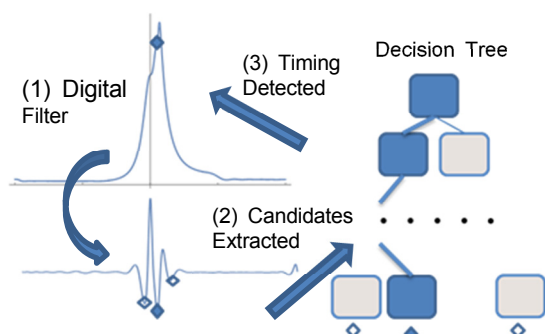


Fig. 12 Autoignition Timing Detection

③ CPLF(Cylinder Pressure Level, Filtered)

燃焼圧力でシリンダは内部から加振され、振動はエンジンブロックを伝わってエンジン外に音として放射される。筒内圧力をフーリエ変換し、周波数ごとの減衰（Filtered）を考慮して燃焼騒音を推定する指標がCPLFである。

従来のガソリンエンジンのノック音も、ディーゼルノック音も、周波数帯域は違うが、CPLFの値によって表現することができる⁽²⁾。

SPCCIの制御では、CPLFと燃焼重心、自着火時期との関係のモデルを用い、2章の制御を通じて、燃焼騒音を適切なレベルに保つよう制御している。

エンジンブロックの伝達特性は大きく変化しないものの環境条件によって燃焼が変化すると、前記のモデルは誤差をもつことがある。そこで、SKYACTIV-Xでは、実際のCPLFを筒内圧センサーの値から毎サイクル演算して、モデルの補正を行っている。

8. 排気ガスの制御

8.1 ガソリンパーティキュレートフィルター

EGR・過給経路へのデポジット堆積を防止するため、燃焼排気ガス中の粒子状物質（Particulate Matter, PM）を吸着・燃焼して浄化するガソリンパーティキュレートフィルター（GPF）をマツダのガソリンエンジンとして初めて採用した。SKYACTIV-Dのディーゼルパーティキュレートフィルターとは異なり、排気温度が高いことなどから車両

減速時の燃料噴射停止中に自己再生（吸着し堆積したPMを燃焼）させられるため、燃費等の悪化原因となる再生モード運転は一般的な運転では動作しない。Fig. 13は通常の走行では堆積しないため、別途実験的に作り出した堆積状態からWLTCモードの走行により自然と自己再生される様子を検証したデータである。

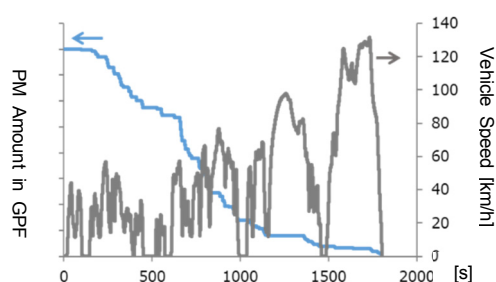


Fig. 13 GPF Self Regeneration in WLTC mod

8.2 NOxセンサー

ディーゼルエンジンのSCRシステムでは採用済みであるが、今回初めてガソリンエンジンで採用し、2.2節のA/FリーンSPCCI燃焼の制御に用いている。センサープローブの検出素子を自身のヒータで約800℃に加温するため、排気中の水蒸気成分・水滴の多いガソリンエンジンでは、凝縮水被水による熱衝撃割れ発生が課題となる。凝縮水発生時間の実機評価結果と排気管壁温の予測モデルを組み合わせたヒータ通電ロジックを完成させ、信頼性を確保した。

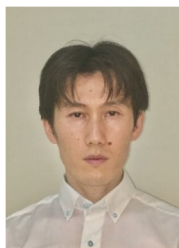
9. おわりに

SKYACTIV-Xに求められる精緻な燃焼制御を実現するシステムを作り上げる中で、世界初を含む新規デバイスを開発し、制御ソフトウェアにもさまざまな技術を導入した。今後も、これまでの限界を突破した燃焼を実現するべく制御技術を開発し、内燃機関の理想の燃焼に近づいていきたい。

参考文献

- (1) 漆原ほか：SKYACTIV-Xを実現する燃焼技術、[マツダ技報, No.36, pp.24-31 \(2019\)](#)
- (2) 神田ほか：SKYACTIV-X NVH技術、[マツダ技報, No. 36, pp.38-43 \(2019\)](#)

■ 著 者 ■



津村 雄一郎



楠 友邦



竹本 和洋



木下 真幸



寺元 亮



伊藤 剛豊

特集：新型MAZDA3

10

新型MAZDA3 M Hybrid技術 M Hybrid Technology for All-New Mazda3

森本 昌介*1 Shosuke Morimoto	大塚 雄太*2 Yuta Otsuka	枝廣 育実*3 Ikumi Edahiro	内藤 潤*4 Jun Naito
岡田 久伸*5 Hisanobu Okada	白石 啓光*6 Hiromitsu Shiraiishi	清水 正寛*7 Masahiro Shimizu	栗原 健*8 Takeshi Kurihara

要 約

マツダは、技術開発の長期ビジョンである「サステイナブル“Zoom-Zoom”宣言 2030」に基づき、「ビルディングブロック戦略」を推進している。車の基本となる内燃機関の効率改善、車両の軽量化などを実施し、効率的な電動化技術を組み合わせることで、CO₂の総排出量を削減していく。i-stop、i-ELOOP に続く電動化技術として、新たに回生協調ブレーキと M Hybrid battery を採用し、減速エネルギーの回生機能を向上させた M Hybrid を導入する。更に、ベルト伝達、Integrated Starter-Generator（以下、ISG）を採用することで、燃費とドライバビリティーを改善することを可能とした。新型 MAZDA3 に M Hybrid 技術を導入したので紹介する。

Summary

Based on its long-term vision for technology development “Sustainable Zoom-Zoom 2030”, Mazda has been promoting the “Building-Block Strategy”. With the aim of cutting gross CO₂ emissions, we are working on a comprehensive improvement of base technologies, in a phased manner, to enhance powertrain efficiency and reduce vehicle weight in combination with the use of efficient electric technologies. As the electric technologies following Mazda’s “i-stop” and “i-ELOOP”, we adopted the regenerative braking system and M Hybrid battery anew to develop a new regenerative braking system “M Hybrid” with enhanced regenerative capability. We also adopted a belt-driven, Integrated Starter-Generator (hereinafter referred to as ISG), resulting in reducing fuel consumption and enhancing drivability. This article introduces the “M Hybrid” technology which has been introduced to the All-New Mazda3.

Key words : EV and HV Systems, Energy Control System, Energy Regeneration, Drivability

1. はじめに

マツダは、クルマのライフサイクル全体を視野に入れて、「Well-to-Wheel（燃料採掘から車両走行まで）」の考え方に基づき、CO₂削減に向けた取り組みを行っている。

その中で、車のCO₂排出量削減の目標達成に向け「ビルディングブロック戦略」を推進している。今後も、内燃機関は世界的に自動車の主要な動力技術であり続けると予測しており、車の基本となる内燃機関の効率改善、車両の軽量化などを実施し、効率的な電動化技術を組み合わせることで、CO₂の総排出量を削減していく。

2. M Hybrid のねらい

「ビルディングブロック戦略」に基づき、2009年から停車時にエンジンを停止させ、燃料消費量を削減するアイドリングストップ技術（以下、i-stop）を導入し、2012年には減速時の運動エネルギー（以下、減速エネルギー）を回生し、車の使用電力として利用する減速エネルギー回生システム（以下、i-ELOOP）を導入した。今回、i-stop、i-ELOOPに続く電動化技術として、M Hybridを導入する。M Hybridでは、回生量の向上、及び、エンジン停止領域の拡大により燃費を改善し、エンジン再始動性能の向上、及び、変速時のショック抑制によりドライバビリティーを向上させた。

*1, 2, 4 PT制御システム開発部
PT Control System Development Dept.

*5 走行・環境性能開発部
Driveability & Environmental Performance Development Dept.

*7 ドライブトレイン開発部
Drivetrain Development Dept.

*3 電駆・PT制御部品開発部
Electric Drive & PT Control Parts Development Dept.

*6 NVH性能開発部
NVH Performance Development Dept.

*8 (株)マツダE&T
Mazda Engineering & Technology Co.,Ltd.

本稿では、M Hybridの燃費、ドライバビリティーの改善に対する取り組みについて紹介する。

2.1 燃費

(1) 回生量の向上

M Hybridはi-ELOOPから回生能力を向上させ、より多くの減速エネルギーを回生することを目指した。減速エネルギーは大きく分けて摩擦ブレーキ損失、Powertrain抵抗（以下、PT抵抗）損失、走行抵抗損失として失われる。このうち走行抵抗損失以外の摩擦ブレーキ損失、PT抵抗損失分のエネルギーが減速回生システムで回生可能な損失である。M Hybridでは、摩擦ブレーキ損失分を回生できる回生協調ブレーキを採用し、回生能力を強化した。高電圧化すれば回生量は増加するが、システム物理量と回生量とのバランスから、摩擦ブレーキ損失分を8割近く回生できる24V電圧で実現することが最適と考えた（Fig. 1）。

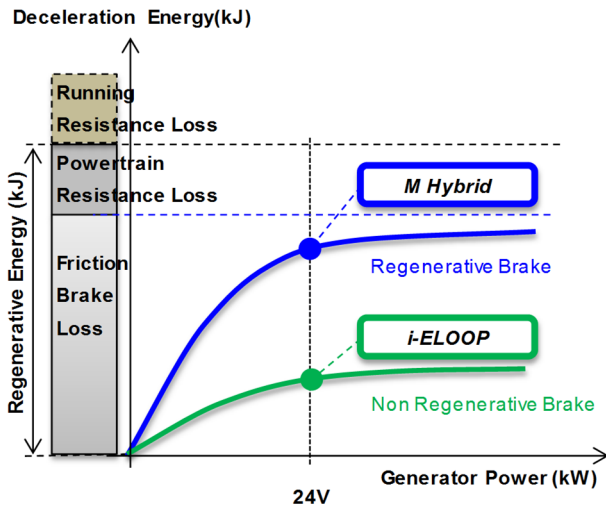


Fig. 1 Relation between Regenerative Energy and System Voltage

さまざまな走行シーンを想定し、1回の減速シーン（減速時間30sec）で200Aを蓄電できるように大容量（0.216kWh）のM Hybrid batteryを採用した。M Hybrid batteryでは、リチウムイオンバッテリー（以下、LiB）を採用している。以上により、M Hybridは、i-ELOOPの約2.5倍（WLTCモード比較）の減速エネルギーを回生、蓄電することを可能とした。

(2) エンジン停止領域の拡大

従来の停車時のi-stopに加え、車が停車するよりも前の減速中から停車までのアイドリング領域でエンジンを停止することで燃料消費量を削減し、WLTCモードで約0.5%（i-stop比）の燃費を改善した。このエンジン停止領域の拡大は、ベルト伝達式のISGを用いたエンジン再始動に

よって可能とした。従来のi-stop、すなわちスターターを用いたエンジン再始動方式では実現できなかったエンジン停止過程中の再始動を可能とし、車が減速しエンジン停止（エンジン回転数下降中も含む）から加速に転ずる際の再加速応答性を実現した（Fig. 2）。

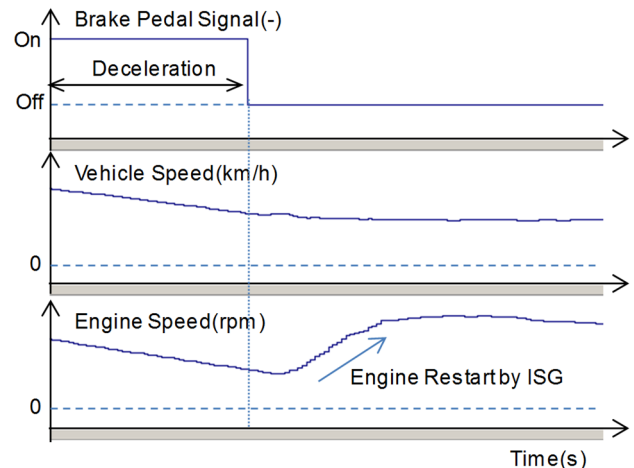


Fig. 2 Engine Restart During Deceleration

2.2 ドライバビリティー

ISGと燃焼のトルクを適切に配分することで、ドライバーの感覚に合う走行性能を実現する。M Hybridでは、ISGの駆動・発電トルクを活用することで、(1)ドライバーの要求加速度に対して速やかに応答し、かつ静粛なエンジン再始動と、(2)ドライバーが意識しなくても、リズムよくスムーズにクラッチをつなげられる変速操作を目指した（Fig. 3）。そのために、迅速・低振動なエンジン再始動制御と、変速時ショックを抑制するエンジン回転数制御を開発した。

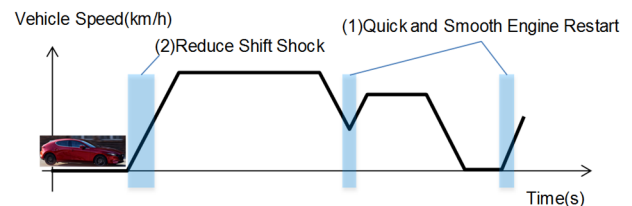


Fig. 3 Drivability Improvement Functions

3. システム構成

M Hybridは、従来のエンジン、トランスミッション構造を維持し、モーターと燃焼のトルクを適切に配分することで、上述2.1、2.2の機能を実現する。モーターには、オルタネーターに駆動機能を統合させたISGを採用し、ISGとエンジン間のトルク伝達をベルトで行う。摩擦ブレーキ損失分を回生するため、Brake By Wire Unitを採用し、回生協調ブレーキ機能を実現する。ISGによる回生エネルギーは24V電圧でLiBに蓄電し、LiBに蓄電したエネル

ギアを用いてISGのモーターアシストを実現する。また、電装品の電源電圧を24V化し、12V電源側から24V電源側に設置することで、DC/DCコンバーターの出力を適正化できる。M Hybridでは、シートヒーターを24V電源化し、DC/DCコンバーターで全12V電装品へ電力を供給する (Fig. 4)。

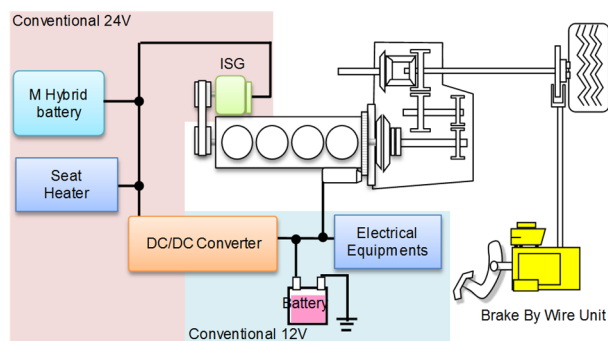


Fig. 4 Schematic View of M Hybrid

4. M Hybrid 制御技術

4.1 回生協調ブレーキ制御

摩擦ブレーキ損失分を回生エネルギーとして回生するため、回生協調ブレーキ制御を開発した。

回生協調ブレーキ制御では、ブレーキペダルの操作量からドライバー要求減速度を判定し、回生発電と摩擦ブレーキによる減速度にそれぞれ配分、実現する。ブレーキ踏み始めは、要求減速度内で回生発電した減速度に対して、不足分を摩擦ブレーキで制動する (Fig. 5中(a))。ブレーキ協調制御中に発生するトルクの変動に対しては、ブレーキ液圧の量を制御することで、ドライバー要求減速度を実現する。しかし、トランスミッションの回転数変動に伴うイナーシャと変速油圧切り替えや、ドライブシャフトの捻じれにより、実際にホイール軸に伝わる回生発電トルクが要求どおりに伝わらないため、減速度が変動する。これに対して、トランスミッションのトルク伝導率を推定し、その変動に合わせてブレーキ液圧を制御することで、減速度変動を抑制し、回生発電トルクを最大化することを可能とした (Fig. 5中(b))。また、車が停車する前のギア締結を維持できない領域に到達する前に、回生発電トルクを速やかに落とし、ブレーキ液圧を増圧、摩擦ブレーキで制動する (Fig. 5中(c))。以上により、ドライバーへ違和感を与えることなく、発電能力を最大限利用した減速エネルギー回生を実現した。

4.2 迅速・低振動な再始動制御

ISGのモーターアシストとエンジン燃焼制御を協調することで、迅速・低振動なエンジン再始動を実現した。

エンジン再始動時の振動は、再始動時の起動トルクによりPT剛体共振が励起されることで発生する。従来のスター

ター方式によるエンジン再始動では、クランキングでPT剛体共振帯域を抜けられず、燃焼による加振力の影響が大きい機能配分となっていた。M Hybridでは、ISGのモーターアシストを採用することにより、(1)再始動開始時に素早くエンジン回転を上昇させ、(2)燃焼による加振力を抑制することが可能となる。このため、再始動時にPT剛体共振帯域を一気に、かつより小さな加振力で通過できる。結果、従来のスターター方式の車に比べて、(1)迅速に再始動させ、(2)低振動なエンジン再始動挙動を実現した (Fig. 6)。

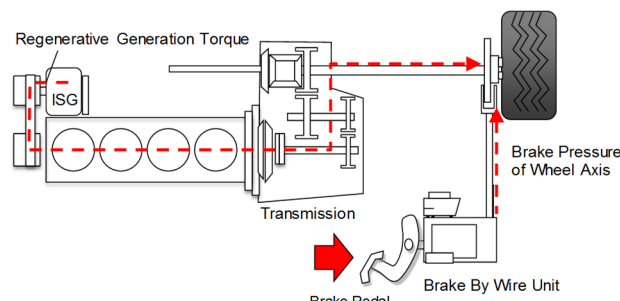
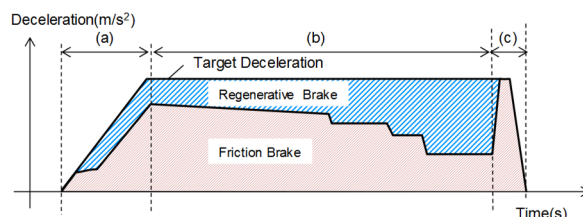


Fig. 5 Regenerative Brake Control

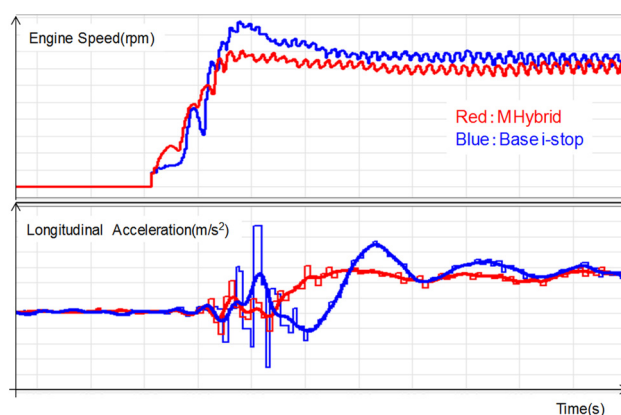


Fig. 6 Quick Engine Restart and Improve Vibration

一方で、ISGのモーターアシストを適切に制御しなければ、再始動時のエンジン回転数が目標回転数をオーバーシュートする。車両への入力が大きくなり、エンジンマウントの前後変位が大きくなることで、ショックが発生する。これに対して、再始動時の理想的な総トルクを定義し、その内訳をISGトルクと各気筒の燃焼トルクに配分することで、再始動時のエンジン回転数のオーバーシュートを抑制し、ショックを低減させた (Fig. 7)。

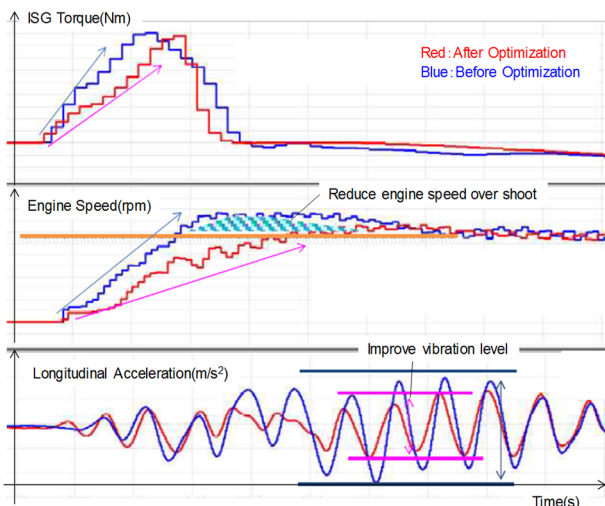


Fig. 7 Improve Vibration Level at Engine Restart

4.3 変速時ショックを抑制するエンジン回転数制御

シフトアップ時、スムーズな車両加速度のつながりを実現した。

シフトアップ時の車両前後加速度の切れ目を意識させないリズムのよい変速を実現するためには、リズムよい操作（操作感）と滑らかな加速度のつながり（反応感）の両立が重要である。しかし、スムーズなクラッチ操作の阻害要因としてクラッチミート時のショックがあり、これはエンジン側と車輪側の差回転が大きい状態でクラッチを繋ぐことで発生する。スムーズなペダル操作とクラッチミート時のショックは背反しており、ショックの抑制はドライバーのクラッチペダル操作に依存している。これに対して、シフトアップ中のエンジン回転落ち速度を高めることでドライバーの操作に依存することなく、ショックを抑制することを可能とした。シフトアップ時の回転落ち速度をISG発電トルクにより適切に制御することで、クラッチミート時のショックを抑制し、リズムよい変速操作を実現した（Fig. 8）。

5. おわりに

新たに採用した回生協調ブレーキ、ISG、LiBの機能を最大限活かし、多くの減速エネルギーを回生することを可能とした。更に、ベルト伝達のISGによりi-stop機能を高め、燃料消費量を多く削減することを可能とした。その結果、新型MAZDA3のM HybridではWLTCモードで約4%（i-stop比）の燃費を改善した。また、ISGによるエンジン再始動性能の向上と変速時のショック抑制によって、ドライバーの感覚に合う走りを実現した。

今後もビルディングブロック戦略に基づき、減速エネルギーを回生する技術、及び、回生したエネルギーを利用する技術を発展させ、マツダ車のさらなる進化に貢献してゆく。

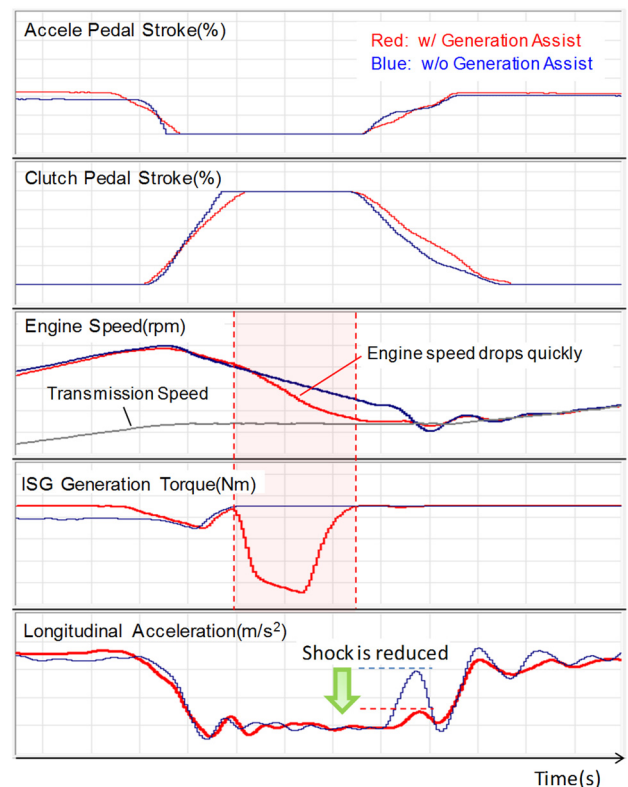


Fig. 8 Reduce Shift Shock

参考文献

- (1) 高橋ほか：減速エネルギー回生システム“i-ELOOP”の開発、[マツダ技報, No.30, pp.37-42 \(2012\)](#)
- (2) 小谷ほか：i-ELOOP制御技術の開発、[マツダ技報, No. 30, pp.51-55 \(2012\)](#)
- (3) A. Kume, et al.: The electric energy management of low-voltage regenerative energy system, EVTeC and APE Japan 2016, SS6 20169042 (2016).

■ 著 者 ■



森本 昌介



大塚 雄太



枝廣 育実



内藤 潤



岡田 久伸



白石 啓光



清水 正寛



栗原 健

特集：新型MAZDA3

11

新型MAZDA3 M Hybrid デバイス開発 Development of All-New Mazda3 M Hybrid Device

吉田 勝正*1 田村 和寛*2 中上 信宏*3 西田 史彦*4
 Katsumasa Yoshida Kazuhiro Tamura Nobuhiro Nakagami Fumihiko Nishida
 坂上 翔*5 仲間 彰子*6 楊 殿宇*7 中村 浩之*8
 Sho Sakagami Akiko Nakama Tenyu Yan Hiroyuki Nakamura

要 約

マツダでは、CO₂排出削減・燃費向上の目標達成に向け「ビルディングブロック戦略」を推進している。今後も、内燃機関はグローバル市場における自動車の主要な動力技術であり続けるとの予測に基づき、内燃機関の理想を追求し続けつつ、最適な制御技術や効率的な電動化技術を組み合わせてゆく戦略である。

今回、お客様へ優れた環境性能を提供し、かつ人間中心を考慮した電動化技術を目指して、新型MAZDA3では新たにM Hybridを開発した。減速エネルギーの回生、モータアシストにより燃費を向上、更に迅速再始動や変速アシストによりドライバビリティを改善した。また、居住空間を犠牲にせず重量等配分・低重心にも貢献するパッケージングを実現している。本稿では、中核デバイスとなるM Hybrid battery, Integrated Starter-Generator (以下、ISG), DC/DCコンバーターについて紹介する。

Summary

Mazda is driving its “Building-Block Strategy” to reduce CO₂ emissions and to enhance fuel economy. Based on the prediction that the internal combustion engine will remain the key power technology in the global car market, we will propel the strategy to balance optimal control technologies and efficient electrification technologies, as pursuing the ideal internal combustion engine.

In order to realize a human-centered electric technology while offering excellent environmental performance to all customers, All-New Mazda3 has introduced the newly developed “M Hybrid” technology. Regeneration of deceleration energy and motor assist contribute to elevate fuel efficiency. Quick restart and shift assist improve drivability as well. Furthermore, we have achieved the packaging contributing ideal weight distribution and low gravity center without sacrificing roominess. In this article, we introduce the core technology “M Hybrid”; M Hybrid battery, Integrated Starter-Generator (hereafter abbr. ISG), and DC/DC converter.

Key words : EV and HV systems, Motor, Inverter/Converter, Power Storage System, Energy Regeneration

1. はじめに

マツダでは、CO₂排出削減・燃費向上の目標達成に向け「ビルディングブロック戦略」を推進している。内燃機関の理想を追求し続けつつ、最適な制御技術や効率的な電動化技術を組み合わせてゆく戦略である。

新型MAZDA3では、新たに開発したマイルドハイブリッドシステムであるM Hybridを搭載した (Fig. 1)。本稿ではその中核デバイスとなるM Hybrid battery,

ISG, DC/DCコンバーターについて紹介する。



Fig. 1 ALL-NEW MAZDA3

*1~3, 5, 6, 8 電駆・PT制御部品開発部

Electric Drive & PT Control System Component Development Dept.

*4 パワートレイン企画部

Powertrain Planning Dept.

*7 技術研究所

Technical Research Center.

2. 開発コンセプト

新型MAZDA3にて新たに開発したM Hybridでは、お客様へ優れた環境性能を提供しつつ、人間中心を考慮した電動化技術を目指して以下のコンセプトとした。

＜スモール商品群への一括企画＞

- ・スモール商品群に展開可能な小型/軽量システム
- ・人間中心のパッケージ/理想の重量配分

＜効率的な電気駆動＞

- ・減速エネルギーの回生による燃費向上
- ・ISGによるドライバビリティの改善
- ・ISGとのハーネス距離の最小化
- ・DC/DCコンバーターの高容量化

＜安定した電源供給と安全性＞

- ・衝突安全性 (M Hybrid battery)
- ・確実なエンジン再始動
- ・バッテリー寿命 (M Hybrid battery) の確保

3. パッケージング

乗員の優れた快適性を備え、居住空間を犠牲にしないパッケージングを実現することを目指した。

電動化デバイスを接続するハーネスが長いと電氣的損失が増加し効率的に駆動することが難しくなる。したがって、接続するハーネスの距離を最小化するために、電動化デバイスは集約してレイアウトする必要がある。

ISGは従来のオルタネータを置換し内燃機関横にレイアウトするため、ISGを中心に電動化デバイスをエンジンルーム近くへ搭載した。M Hybrid batteryをフロア下車室外、DC/DCコンバーターはヘッドライト裏としパッケージングを最適化した (Fig. 2)。

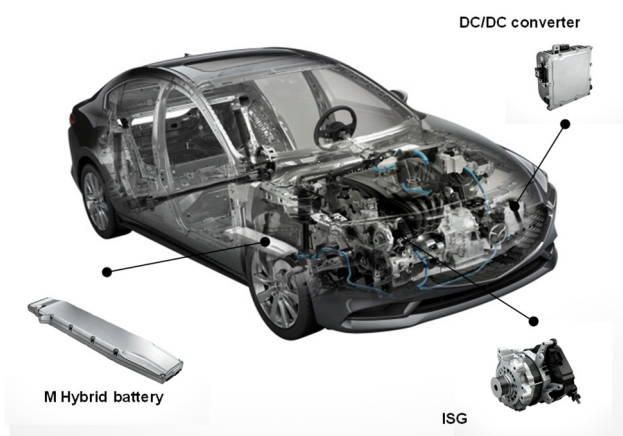


Fig. 2 Packaging for M Hybrid

これらの効果により、電氣的損失の低減とキャビン内の乗員スペース/荷室容量の確保を高いレベルで両立するとともに、ホイールベース間にバッテリーを配置し重量等配分・低重心なパッケージングを実現している。

4. デバイス概要

4.1 M Hybrid battery

新型MAZDA3 M Hybridに搭載するM Hybrid batteryにはリチウムイオンバッテリー (以下、LiB) を採用しており、負極にチタン酸リチウム (以下、LTO)を用いる東芝製のSCiB™から構成されている。

M Hybrid batteryの主要SPECはTable 1のとおり。

Table 1 LiB Specification

	Specification
Size(L x W x H) mm	800x177x55
Weight	9.5kg
Nominal Voltage	21.6V
Nominal Capacity	0.216kWh
Charge Power (25°C, SOC50%,10s)	10kW
Discharge Power (25°C, SOC50%,10s)	12kW
Thermal Management	Passive



(LiB appearance)

M Hybrid batteryではSCiB™の特徴を活かし、減速エネルギーの回生による燃費向上、衝突時の安全性及びバッテリー寿命の確保を実現している。

(1) SCiB™の特徴

LTOの優れた特徴として、高い安全性/長寿命/優れた低温性能/高入出力/広い実効SOC (State Of Charge: 充電率) レンジがある。外部からの圧力などによって内部短絡が発生しても、LTOが高抵抗に相変化する電流が流れにくくなることで熱暴走に至らない為、発煙・発火の可能性が極めて少ない。低温環境下でもLTO負極上に金属リチウムが析出しないため、低温環境下における充放電によっても劣化が少なく幅広い温度環境にて燃費へ貢献できる。大電流での充放電が可能のため、減速時に大き

な再生電力を蓄電し、エンジンの始動に必要な大電流を供給することが可能である。LTO電極で構成されるセルは、カーボン負極のLiBより公称電圧が低いためエネルギー密度は低い。しかし、充放電に伴う体積変化が十分小さく、信頼性を保証するための拘束部材を最小限に抑えることができる。また、セルの内部抵抗を低くし発熱量を抑えるとともに、筐体に放熱性の高いアルミダイキャストを採用している。これにより、補機による冷却が不要となるため、バッテリーパックの高密度化及び静粛性、電力効率が向上した。

(2) 減速エネルギーの回生による燃費向上

減速エネルギーのうちブレーキの熱として大気に捨てているエネルギーを最大限回収するために必要な容量を決定している。WLTCモードにて必要な電力収支をカバーするには200kJは必要であり(Fig. 3)、更に実用的な消費電力も考慮して十分な容量を確保している。

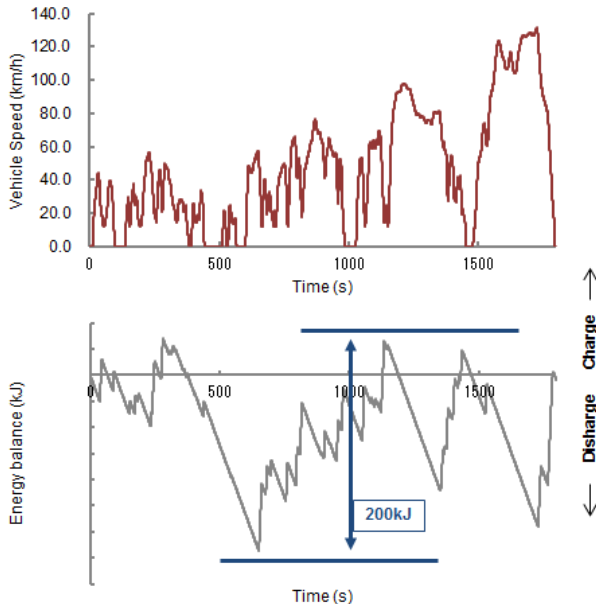


Fig. 3 WLTC Power Profile

(3) 衝突安全性

LiBの電解液に可燃性液体を用いることが一般的だが、内部短絡や圧壊時に発煙・発火の可能性がある。一方、フロントシート下車室外では側突や床下干渉から保護するために高い安全性が求められる。

安全性のコンセプトとして3つの施策を実施している。まず、車両前面・側面・後面いずれの方位からの衝突に対しても最も有利な車両の中心（前後輪軸間及びフロアフレーム間）にバッテリーパックを配置している (Fig. 4)。次に、バッテリーパックの筐体にアルミダイキャストを用いることで強度を保ちつつ軽量化を図っている。最後に、バッテリーパック内に高い安全性を持ったSCiB™を採用した。

これらによりバッテリーパックではECE-R100認証を取得し、高い安全性をもつことを立証した。

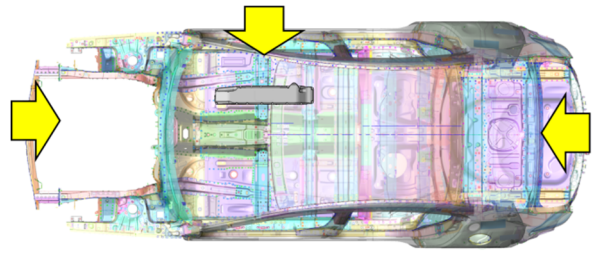


Fig. 4 Crush Safety Concept for LiB

(4) バッテリー寿命

LiBが劣化すると燃費性能やアイドリングストップ頻度に影響するため、お客様の使い方を考慮しながら劣化を抑制することが商品性を高めることにつながる。そのため、バッテリー寿命を予測するモデルを構築し効率的に開発を行った。

『充放電電圧』『走行中のバッテリー温度』『SOC』は制御因子、『放置中の温度』は外乱として考え、走行中のサイクル劣化及び放置中の経年劣化をモデル化した。バッテリー劣化を表す指標として『容量』『内部抵抗』があり、所定の温度・充放電パターン・SOC範囲を設定し、バッテリーパックの実機での内部抵抗上昇率とモデルによるシミュレーション結果を検証した。その結果、Fig. 5に示すとおり高精度にバッテリー寿命を予測可能なモデルを構築した。

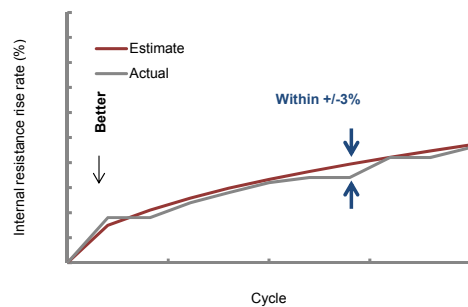


Fig. 5 Battery Lifecycle Model

次に構築したモデルを用いて、制御因子と外乱を振り、実車走行を想定したサイクルモードと駐車時を想定した保存モードとの組み合わせによる劣化を予測した。その結果、バッテリー温度・SOC・充放電電圧を制御することで経年時にも目標の性能を維持できることを確認した。

(5) サーマルマネジメント

バッテリー寿命を確保するために走行中のバッテリー温度を所定範囲内に制御する必要がある。バッテリー温度が変動する主要因は、充放電による自己発熱、バッテ

リーパックからの放熱、バッテリーパック周辺環境からの受熱である。

M HybridではLiBに入出力する電流が大きくなるため、内部抵抗が大きく低減したセルを採用している。バッテリーパックからの放熱量を向上させるために、セルの表面積が最も大きい面を車両下側にレイアウトするとともに、熱伝導性の高いアルミ製のケースに放熱している。

また、車両アンダーカバーのエアインテーク形状を工夫し走行風をアルミケースの下面に効率的に導入しており、空力性能を犠牲にせずLiBの冷却効率を向上させた (Fig. 6)。バッテリーパック周辺環境からの熱流入は、CFDにより経路を特定し遮熱を行うことで影響を最小限に抑えている。また一般に、アルミダイキャストへの泥付着による腐食が課題となるが、酸洗いにより酸化皮膜除去・アロジンによる化成処理・カチオン塗装を実施し十分な腐食抑制期間を確保している。

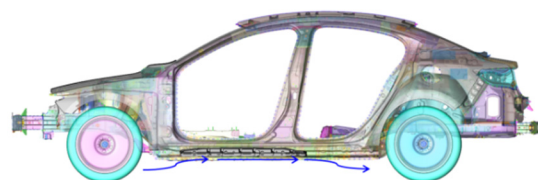


Fig. 6 Wind Flow Model

所定の外気温・車速・充放電パターンにて実機でのバッテリー温度を検証した。その結果、Fig. 7に示すとおり、SCiB™の劣化特性・制御により強制空冷や水冷/油冷のような冷却機能を用いなくとも、目標性能を満足することができた。

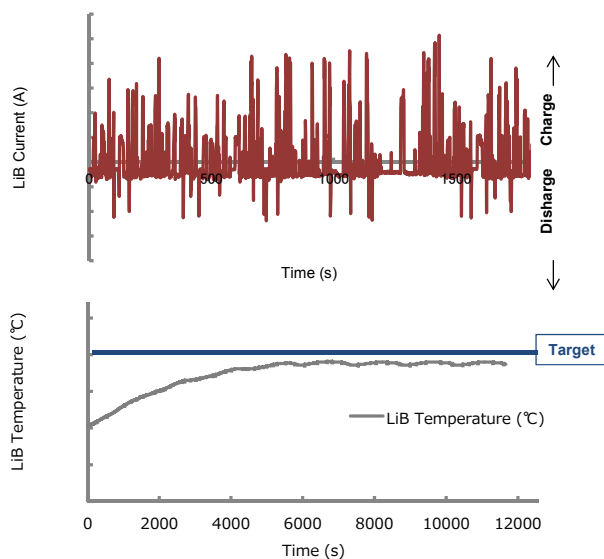


Fig. 7 Battery Thermal Model

(6) 状態検出

SCiB™は通常のLiBと異なり比較的SOCの高い領域で

劣化が抑制される傾向にあり、SOCが低いほど入力性能が高く回生による燃費効果が高くなる。また、安全性の確保と劣化の抑制のために充放電時の上下限電圧を制御する必要があり、エンジン再始動を確実にを行うためにはLiB温度、SOC、SOH (State Of Health: 劣化状態) を高精度に推定する技術が重要となる。

セルの最大温度、最小温度を計測可能な位置にサーミスタを取り付け、バッテリー温度をモニタしながら充放電を制御している。

起動時には開放電圧からSOC推定を行う。走行中のSOCはパラメータを逐次学習する電池モデルから導出した起電力を用いて推定したSOCと電流積分によって推定したSOCに対して、カルマンフィルタを適用することで推定している。これにより長時間走行時でも電流積分によるSOC推定誤差を抑制し高精度化を実現した (Fig. 8)。

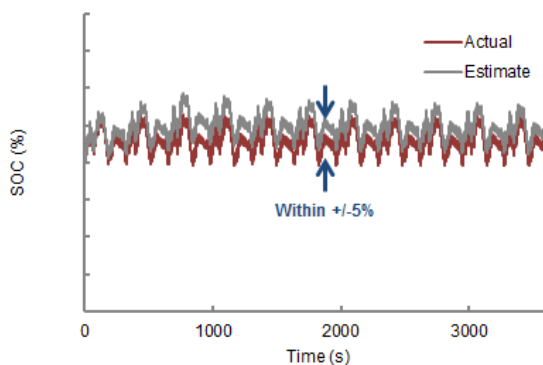


Fig. 8 SOC Model

SCiB™の特徴として容量低下は微小であることから、SOHは内部抵抗の推定技術の構築に重点をおいて開発を進めた。所定の周期にて充放電の切り替わりを検出し、電圧差 ΔV 及び電流差 ΔI を用いて逐次最小二乗法を実行、バッテリー温度・SOCにより補正を行い推定している。その結果、目標の精度以内に内部抵抗を推定することが可能であることを検証した (Fig. 9)。

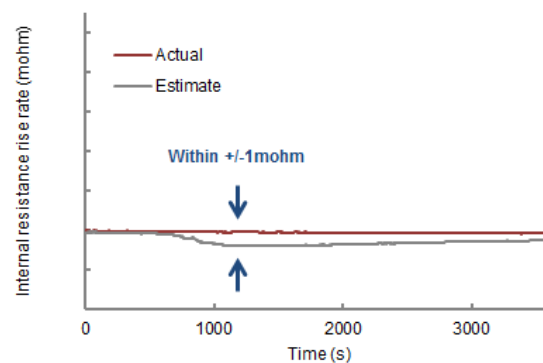


Fig. 9 SOH Model

4.2 ISG

新型MAZDA3 M Hybridではベルトを用いてエンジンにトルクを伝達するISGを採用している。従来のオルタネータの構造をベースとして、電流制御回路部をインバータに変更することで、発電機能に加えて駆動機能を実現している。ISGの主要SPECは下記のとおり。(Table 2)

Table 2 ISG Specification

	Specification
Max. output power (Motoring) @21.6V	5.1kw
Max. output torque (Motoring) @21.6V	48.5Nm
Nominal output current (Generating) @24.0V	130A
Motor Diameter	φ158
ISG total length	182
Cooling method	Air cooling



(ISG appearance)

ISGはこれらの機能を活用して車両の燃費、ドライブビリティの向上に貢献している。

(1) 燃費への貢献

下記三つの機能を実現することで車両の燃費向上に貢献している。

①CoM (Change of Mind : 燃料停止～エンジン停止までの間のエンジン再始動) の実現

ベルト伝達方式を採用することにより、車が停車するよりも前の減速中からエンジンを停止することで、燃料消費量を低減する機能を実現している。また、正弦波PWM制御を採用することで駆動時の消費電流を低減し、電流精度を向上させることで、

CoM及びCoM時の電源保証を実現している。

②高効率発電の実現

MOS-FEを用いた同期整流発電の採用により、発電効率向上を実現している。

③モータアシスト

加速時のモータアシスト等のさまざまなISGの駆動機能を織り込み、エンジン・トランスミッションと協調することで最適なエネルギー効率を実現している。

(2) ドライブビリティへの貢献

24V電源の活用と正弦波PWM制御の採用により、トルク実行精度向上と高トルク化を実現している。その結果、従来のスタータと比較して短時間でのエンジン再始動や、シフトアップ時のショック低減制御を実現し、スムーズな車両発進、変速を実現している。また、ベルト伝達を用いてISGの再始動トルクをエンジンに伝達することで、従来スタータがトルクを出せなかった高回転までトルクを出し、エンジン再始動時のエンジン振動を低減している。加えて、スタータを用いたエンジン再始動の場合に発生する歯車の嵌合音が無くなり、20dB以上のノイズ低減を実現している (Fig. 10)。

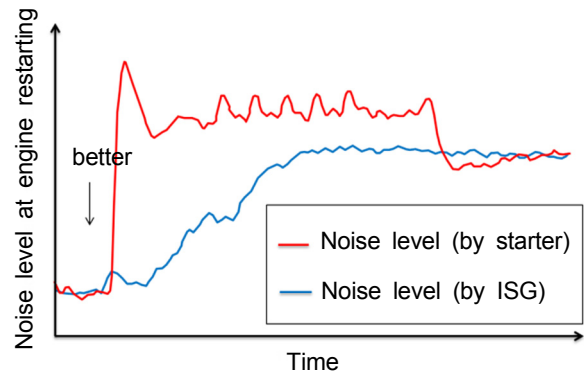


Fig. 10 Noise Level at Engine Restarting

(3) 信頼性の確保

ISGが温度上昇した場合には、部品保護のためにISG機能に制約をかける必要があり、上述のモータアシスト等の機能を実現できなくなる。ISG機能をより安定的に、より広範囲で実現するために、ISGのサーマルマネジメントが非常に重要である。そのために、下記2項目の対応を実施している。

①エンジン吸気側、車両前側にISGを搭載することでエンジンからの熱を受けにくくしている。エンジン排気側への搭載に比べて雰囲気温度を10℃以上低減している。

②正弦波PWM制御の採用により駆動トルク精度・電流精度を向上させることで、電流によるジュール熱の発生を抑制し、ISG内部の温度上昇を抑制した。

4.3 DC/DCコンバーター

新型MAZDA3 M Hybridでは、LiBに蓄えた回生電力を12V系電装品に適した電圧に変換する24V DC/DCコンバーターを採用している。主要仕様をTable 3に示す。高温に対する耐久性を必要とし、更にスペースが限られるエンジンルームに搭載するため、車両の充放電収支からDC/DCコンバーター容量を最適化し、小型化を図っている。またDC/DCコンバーターは強制ファンや水で冷却するのが一般的だが、車両の冷却機構を簡素化するため、走行風やラジエータ冷却用の電動ファンによる風流れを有効に利用し、自然空冷による冷却を実現している。

Table 3 DC/DC Converter Specification

	Specification
Max Continuous Output Power @Tair≤70°C	1.7kw (120A@13.5V)
Size(L x W x H)	94 x 174 x 180mm
Cooling method	Air cooling



(DC/DC Converter appearance)

(1) DC/DCコンバーターの出力容量の最適化

DC/DCコンバーターの発熱量は出力電流に依存する。また放熱のための冷却構造はサイズに影響する。よってDC/DCコンバーターの小型化を実現するためには、DC/DCコンバーターの出力容量の適正化が必要である。以下により、出力容量の最適化を実現している。

- ①各季節、走行シーンにより異なる車両消費電力を算出し、最適なDC/DCコンバーターの出力容量を決定している。
- ②消費電力の大きいヒーター系部品を通常の12V鉛バッテリー側から、24V電源側に接続している。これによりDC/DCコンバーターが供給する12V鉛バッテリー側の消費電力を12%低減し、DC/DCコンバーターの出力容量を最適化している。

(2) 自然空冷による冷却（サーマルマネージメント）

車両冷却システムの簡素化を図るために、自然空冷での冷却方式を採用している。車両の熱流体解析により、DC/DCコンバーターの放熱フィンに最も効果的に当たる流入風 (Fig.11 (A)) 及び放熱した空気を排気する流出風 (Fig.11 (B)) を特定している。その結果、車両後方側にフィンを設置し、車両の風流れを最大限活用することで、放熱に必要な冷却風量を確保している。これにより、エンジンルームでの自然空冷を実現している。

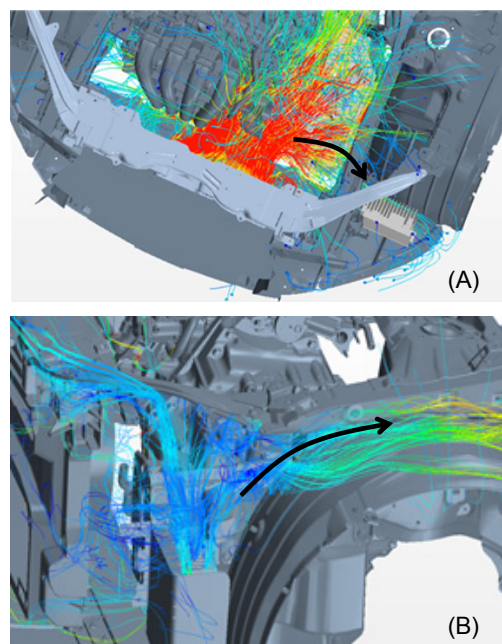


Fig. 11 Thermal & Fluid Analysis

5. おわりに

スモール商品群に一括で展開可能なマイルドハイブリッドを目指し、高効率かつコンパクトなM Hybridを実現することができた。減速エネルギーの回生、モータアシスト、CoM、高効率発電による燃費向上とともに、ISGによる迅速再始動や変速アシストによりドライバビリティの改善にも貢献することができたと考えている。また、乗員の優れた快適性を備えつつ、居住空間を犠牲にせず重量等配分・低重心にも貢献するパッケージングを実現することができた。

今後も人間中心を考慮した電動化技術の開発を継続してゆく。

参考文献

- (1) 高橋ほか：減速エネルギー回生システム“i-ELOOP”の開発、[マツダ技報, No.30, pp.37-42 \(2012\)](#)
- (2) 高橋ほか：減速エネルギー回生システム“i-ELOOP”のデバイス開発、[マツダ技報, No.30, pp.43-50 \(2012\)](#)

■ 著 者 ■



吉田 勝正



田村 和寛



中上 信宏



西田 史彦



坂上 翔



仲間 彰子



楊 殿宇



中村 浩之

特集：新型MAZDA3

12

新型MAZDA3の軽量・高剛性ボディー開発

Development of Light Weight and High-Rigidity Body Structure for All-New Mazda3

佐藤 健一*1	川野 晃寛*2	中内 繁*3
Kenichi Sato	Akihiro Kawano	Shigeru Nakauchi
後藤 英貴*4	亀井 丈広*5	田中 潤一*6
Hidetaka Goto	Takehiro Kamei	Junichi Tanaka

要 約

新型MAZDA3は人間中心を突き詰めて生み出した次世代車両構造技術SKYACTIV-VEHICLE ARCHITECTUREを初めて採用したモデルである。先代モデルで採用した基本骨格の「ストレート化」, 「連続化」, 「マルチロードパス」のコンセプトを進化させ, 更なる高剛性化と, 振動エネルギーを集めて減衰させるという新しいアイデアを取り入れたボディーを新規開発した。本稿では, 人間中心の考え方を突き詰め, 高い操縦安定性, 乗り心地性能及び静粛性を達成するための軽量・高剛性ボディー開発について紹介する。

Summary

The All-New Mazda3 is Mazda's first production model to adopt next-generation structural technology called Skyactiv-Vehicle Architecture produced by pursuing Mazda's human-centered design philosophy. Advancing concepts of the basic structures such as 1) "Straight structure", 2) "Continuous structure", and 3) "multi load path" which had been adopted in previous models, Mazda developed a new body structure by introducing higher rigidity, and a new perspective on damping, which is to accumulate vibration energy.

This article introduces development activities for a light-weight and high-rigidity body structure, to achieve good handling and stability, ride comfort, and quietness based on human-centered design philosophy.

Key words : Vehicle Development, Platform, Body Structure/Body Design

1. はじめに

初代CX-5に始まるSKYACTIV-BODYは今日まで進化を続け, 高性能と軽量化を両立させることに成功した。

新たに次世代車両構造技術SKYACTIV-VEHICLE ARCHITECTUREを採用する新型MAZDA3は「走る歓び」を突き詰め, 飛躍的な性能向上を実現するべく開発に着手した。ボディーはシートやシャシー及びその他部品を支える骨格であり, 車両のダイナミクス性能を決定する重要な役割を担っている。

新型MAZDA3の開発にあたり, 従来の部品ユニットやシステムの概念を超えて, クルマ全体で最適化や理想の考えを進化させ, 今後の派生車種展開を睨んだ高いポテ

ンシャルと, 全ての車種においてマツダが追求する「走る歓び」を同じように体感できる同体質の特性をもつ新世代ボディーの開発をスタートした。

2. 開発のねらい

2.1 開発アプローチ

新型MAZDA3を始めとする新世代商品群の開発において, 特にダイナミクス性能と衝突安全性能を大幅に進化させるため, シャシーやシートを含めた車両全体で構造を最適化すべく, ボディー基本骨格の検討に着手した。

従来から採用しているSKYACTIV-BODYのコンセプトである骨格の「ストレート化」「連続化」「マルチロードパス」を更に進化させ, より効率的に入力を受け止め

*1~5 ボデー開発部
Body Development Dept.

*6 (株)マツダE&T
Mazda Engineering & Technology CO.,LTD.

られる骨格を追求した。初めに車体が担うべき機能の進化とそれを支える技術進化を一から構築しなおした上で、車両走行時や衝突時における骨格への入力及びエネルギーの流れ方をトポロジー最適化によって分析した (Fig. 1)。

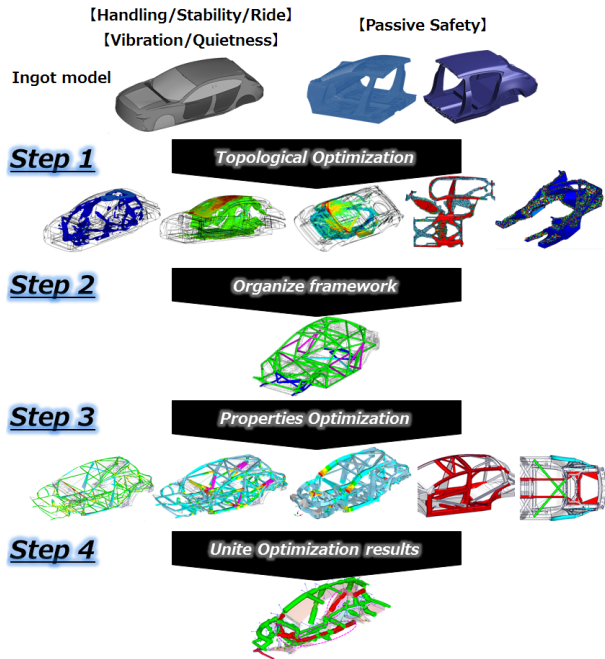


Fig. 1 Process of Structural Optimization

2.2 全体最適視点での機能配分量適正化

上記の結果から、新しいボディーの基本構造を決定した。基本構造の開発にあたり、車体だけでなくシャシーやシートを含めて一つの部品に多くの機能をもたせることで、物理量のミニマム化にも注力した (Table 1)。

Table 1 Multifunctional Table of Front Floor

Function	The way to achieve purpose	Category						
		Body Shell	Trim	Body Shell	Attachment	Trim	Seat	Suspension
A	✓	-	✓	-	-	✓	✓
B	-	✓	-	-	-	-	✓
C	✓	-	✓	-	-	-	✓
D	-	-	✓	-	-	✓	✓
E	✓	-	✓	-	-	-	✓
F	✓	✓	✓	-	✓	✓	-
G	✓	✓	✓	✓	✓	-	-

2.3 スチールの性質を活かした構造最適化

自動車のボディーに採用する材料はスチール以外にアルミニウム合金を含む軽合金や繊維強化プラスチック等

樹脂材料が一般的であるが、新世代ボディーにおいては加工性に優れ、比較的容易にグローバル調達が可能であることから、スチールで開発を進めた。

前述の基本骨格の検討と機能配分量適正化によって各骨格部材が担うべき機能目標、例えば操縦安定性能や衝突安全性能目標を達成するために、各骨格部材がどのような役割を果たすべきかを明らかにした。

この目標を達成するため、走行時における骨格への入力の大きさや方向だけでなく、衝突時の変形を考慮してエネルギー吸収効率を最大限高めるため、材質、断面形状、他の骨格部材との繋ぎ構造を工夫した (Fig. 2)。

これにより質量増を伴わずに骨格部材の曲げ/ねじり剛性/強度を向上させた。

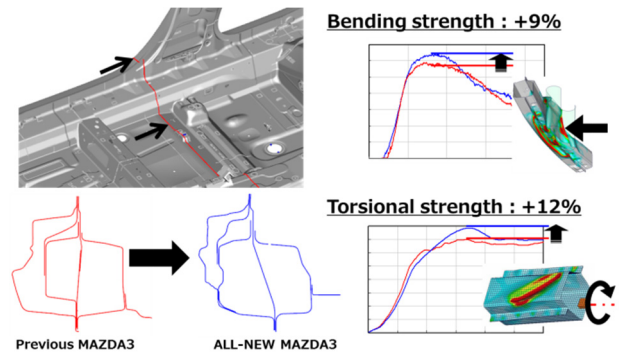


Fig. 2 Example of Optimized Section Shape (Rocker)

2.4 新世代ボディーの位置づけ

新型MAZDA3で採用した新しいボディーはCセグメント以下クラスのラインナップ展開を想定し、幅広い質量レンジに対応可能なものとした。ボディーの根幹となる基本骨格を固定要素とし、車格や商品コンセプトに合わせて対応すべき部品は変動要素とした (Fig. 3)。

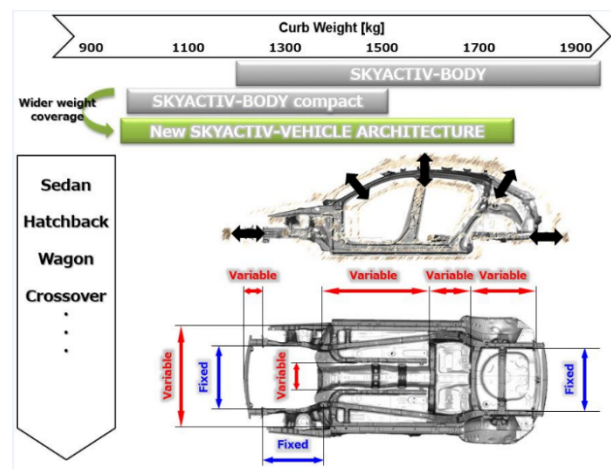


Fig. 3 Concept of New Body Structure

3. ボディーの進化

新型MAZDA3は自分の足で歩いているときのように、バランス保持能力をクルマに乗っている状態でも発揮できるように、路面からの入力があるように乗員に伝わるかを考え、シート、ボディー、シャシーの全てを包括して機能を最適化した。

例えば、人の歩行時のように頭の動きが安定する乗り心地を実現させるには、路面からの入力をサスペンションで滑らかな入力に変換し、そしてボディーは滑らかな入力を遅れなく、ドライバーに伝えなければならない。

また意のままの操縦安定性を実現させるには、ドライバーの操作に対して車両が遅れなく応答する必要があり、そのためには4輪サスペンション間でエネルギーを遅れなく伝達しなければならない。

これに対してボディーは、入力の伝達ロスが減らし、骨格全体で入力を受け止め、更に路面から入ってくる振動エネルギーを減衰し、快適な室内空間を確保することを目指した。新しいアイデアを取り入れ、高剛性でありながら振動エネルギーを減衰する機能をもつボディーを実現した。

3.1 操縦安定性・乗り心地

車両が運動する時、力を出すのは唯一路面と接しているタイヤである。タイヤ力は路面との接地荷重や角度で変動し、それをコントロールするのがサスペンションの役割である。そしてタイヤ力を、サスペンションを通して受け止め、人間の骨盤に滑らかに伝えるのがボディーの役割である。そのために、サスペンション支持部の強化や、ボディーの骨格を上下左右だけでなく前後方向にもつないで、多方向に環状構造を配置した (Fig. 4)。

これにより、ねじり剛性では先代比11% (5HB) の剛性向上を実現した。

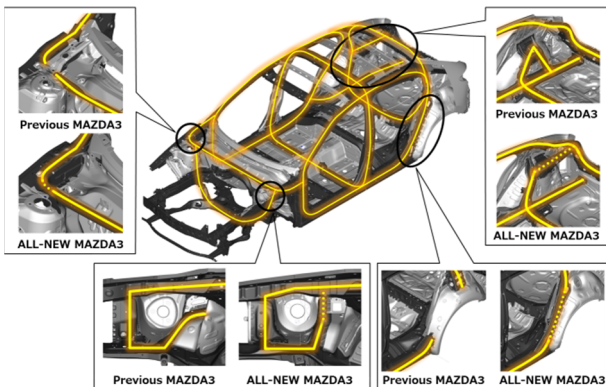


Fig. 4 Comparison of New and Previous Ring Structures

また、路面入力に起因する振動はタイヤからサスペンションをとおして車体の骨格を伝達し、周辺の骨格やパネルを振動させる。サスペンション支持部の強化によって骨格に伝わる振動を抑制するだけでなく、サスペンションからの入力がある周辺の骨格やパネルに伝達し、乗り心地や静粛性に関連する振動モードを励起させないように、部分的に剛性をコントロールし、振動を伝達させない考え方を取り入れた。剛性値のみを追求するのではなく、骨格の“剛”と“柔”をバランスよく配置することで剛性感と減衰感を向上させた。

更に、従来から剛性感向上を目的として採用していた構造用接着剤に振動減衰の機能を付与した新開発の『減衰接着剤』を採用した。従来は振動抑制に対して質量と剛性をコントロールすることが一般的な手段であったが、新開発の構造減衰技術の採用により、質量に頼らず振動エネルギーを減衰することを可能にした。

この『減衰接着剤』による振動減衰効果を発揮するため、前述の“柔”に該当する箇所に振動によって生じた歪エネルギーを集中させ、この部位に対して『減衰接着剤』を積極的に採用することで、振動を効率的に減衰させるとともに質量増加を抑制した (Fig. 5)。

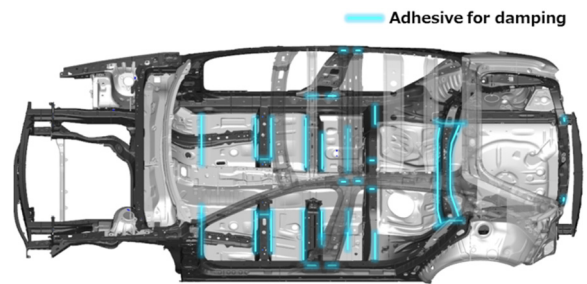


Fig. 5 Adaptation of Adhesive for Damping

これら新技術採用による効果の一例を下図に示す。路面入力に対する乗員付近の振動レベル低減や静粛性向上を実現した (Fig. 6)。

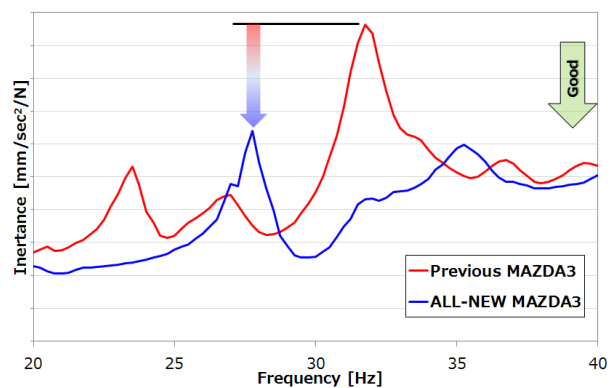


Fig. 6 Body Damping Feeling

3.2 衝突安全性能 (安心・安全)

新型MAZDA3では、980MPa以上の超高張力鋼板の使用比率を先代モデルの約9%から約30%へと飛躍的にアップさせ衝突安全性能の向上と軽量化を両立した。

例えば、1310MPa級の超高張力鋼板は車体構造用冷間プレス部品として世界初採用であり、この材料を適用した箇所において前モデル比で15.7%の軽量化を実現した (Fig. 7)。

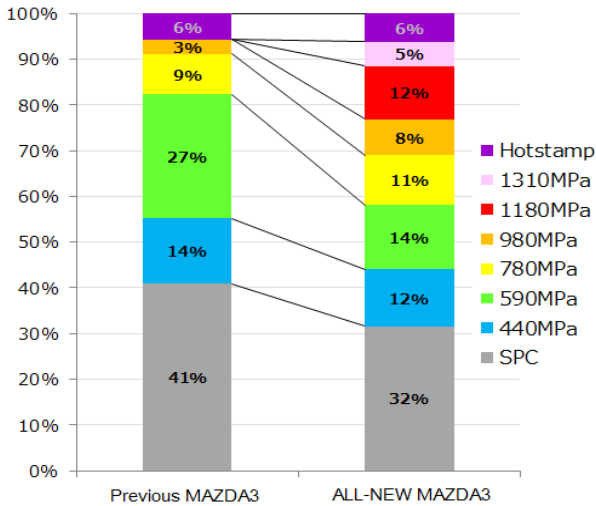


Fig. 7 Material Strength of Sheet Metal

1) 前面衝突性能

前述の超高張力鋼板の積極的採用に加え、高エネルギー吸収フレーム構造を採用することで、前面衝突時のエネルギー吸収効率を上げ、エネルギー吸収に必要なスペースを低減することを可能にした。これにより従来と同じスペースでより大きな衝突エネルギーを吸収でき、衝突安全性能を向上させた (Fig. 8)。

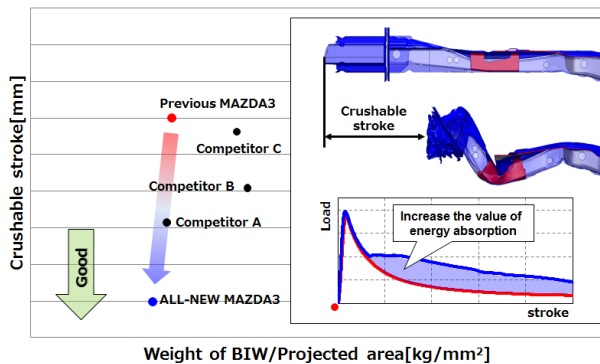


Fig. 8 Effect of High Energy Absorption Concept

2) 側面衝突性能

前モデルより更にリアルワールドに近づけ、かつ物理量ミニマム化を実現するために、エネルギー吸収量分担、すなわちマルチロードパスを進化させることで、より強固なキャビンを実現した。従来の考え方では側面衝突性能を追求するとルーフへの機能配分量を高める必要があるが、車両前後方向への荷重伝達比率を高め、AピラーとCピラーに荷重を分散する考えを新たに採用した。側面からの衝突荷重を効率的に分散させることで、衝突時における乗員生存空間を確保した (Fig. 9)。

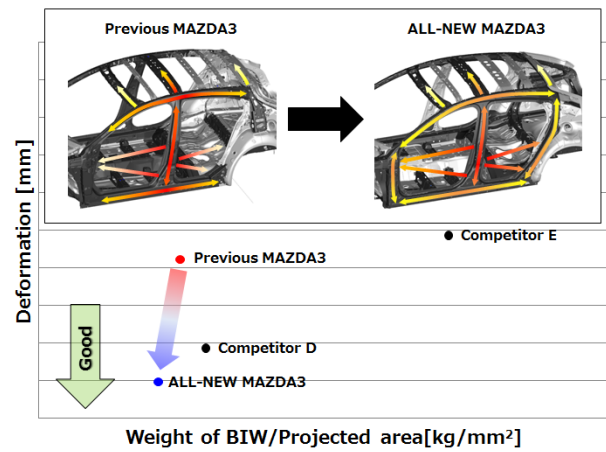


Fig. 9 Load Path for Side Crash

3) 後面衝突性能

前述のマルチロードパスの進化、具体的にはリアドア開口部に骨格を配置し、衝突時における乗員生存空間を確保した。

またキャビン以外の荷室空間でエネルギー吸収を向上させるために、衝突時のリアフレーム変形挙動を曲げから蛇腹変形による軸圧縮にすることで効率的かつ持続的なエネルギー吸収を実現した。

この蛇腹変形を実現するため、周辺部品のレイアウトを工夫し、効率よく荷重を受け止められるフレーム断面の高さ・幅及び形状を決定し、断面を真っ直ぐ通すとともに、フレームの変形挙動を分析し、変形周期に逆らわないようにフレームの側面・下面に変形の起点となるビードを配置した。

これによりフレームを安定して潰すことを可能にし、従来構造と比較してエネルギー吸収効率を約2倍に向上させた (Fig. 10)。

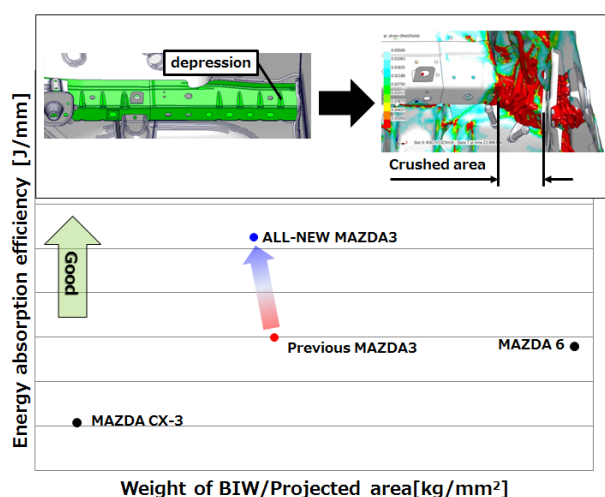


Fig. 10 Rear Frame Structure

3.3 軽量化

新型MAZDA3のボディーは、ダイナミクス性能や衝突安全性能を大幅に向上させながら、さきに述べた構造適正化や減衰機能をもたせた接着剤の採用、また超高張力鋼板の使用比率アップによって、先代モデルと質量同等で大きな機能進化を実現した。

4. おわりに

新型MAZDA3はこれまでのSKYACTIV-BODYの技術進化を取り入れながら機能進化を実現し、先代モデルから商品力を飛躍的に進化させることに成功した。この成果は企画やデザインをはじめ、関連部門と高い志を共有し、六位一体（開発・生産・購買・品質・物流・サプライヤー）で活動しモノ造り革新を進めた結果である。今後もお客様の期待を上回り、喜んで頂けるようSKYACTIV-VEHICLE ARCHITECTUREを更に進化させ、魅力ある商品開発に尽力していく所存である。

参考文献

- (1) 木村隆之ほか：SKYACTIV-ボディ，[マツダ技報](#)，[No.29, pp.61-67 \(2011\)](#)

■ 著 者 ■



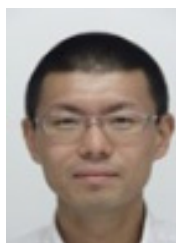
佐藤 健一



川野 晃寛



中内 繁



後藤 英貴



亀井 丈広



田中 潤一

特集：新型MAZDA3

13

新型MAZDA3サイドドアの静粛性開発 Quietness Technology for All-New Mazda3 Side-Door

高谷 洋隆*1 高橋 信之*2 雪田 恭兵*3
Hiroataka Takaya Nobuyuki Takahashi Kyouhei Yukita
黒木 大史*4 松並 裕美子*5
Daishi Kuroki Yumiko Matsunami

要 約

新型MAZDA3の開発にあたり、ドア開発チームは、「静粛性」をドアシステムの中心性能と位置づけ、開発を行った。狙いとする性能は、以下3つの技術コンセプト「① 面の連続化+通気経路のゼロ化による空力騒音の低減」、「② 質量則使い切り+多重壁化による透過・伝ば音の低減」、「③ ガラスの膜振動最小化によるドアガラスからの透過音低減」を適用し、具体化した。空力騒音の低減に対しては、キャビン周りで発生する空気渦を抑制するため、サッシュやピラーガーニッシュの段差や形状を適正化した。更に、通気をなくした新構造のアウトターハンドルを採用した。透過・伝ば音の低減に対しては、シールの連続性とベルトライン下インナーパネルエリアの穴隙ゼロ化を追求した。インナーパネルエリアに関しては、「直通の穴」と「透過損失の穴」を無くす取り組みを行った結果、透過損失のロスを従来の半分以下とし、総質量を殆ど増加させずに遮音性能を向上させた。車両全体での徹底した穴隙ゼロ化の取り組みにより、背反性能であるドア閉まり性ととの両立が問題となったが、この問題に対しては、「ドア開閉連動の空調制御」と「閉まり性を向上させたドアチェッカー」の適用により、静粛性を一切犠牲にせず、滑らかで心地のよいドア開閉操作性とを両立させた。

Summary

For the development of the All-New Mazda3's door system, we regarded "Quietness" as central performance and developed it. We realized the performance of the aim by three technical concept. We improved a step and the shape of a sash and the pillar garnish to control an air vortex to occur around a cabin. Furthermore, we developed outer handle of the new structure to zero air leak. We reduced a sound to come in from around door by losing a hole and the gap of the inner panel and sealpart. In the inner panel area, efforts to eliminate the "direct hole" and "transmission loss hole" have reduced transmission loss to less than half of the conventional level and improved sound insulation performance without increasing the total mass. Due to thorough efforts to eliminate the entire vehicle gap, compatibility with contradictory door closing performance is becoming a problem. By applying a door checker with improved performance, the door can be opened and closed smoothly and comfortably without sacrificing quietness.

Key words : Vehicle Development, Vibration, Noise, and Ride Comfort, Quietness, Side Door

1. はじめに

「走る歓び」を乗車している方全てに体感していただくためには、「クリアに会話できる車内の静粛性」は非常に重要な要素である。新型MAZDA3の開発にあたり、サイドドア（以下ドア）開発チームは、「静粛性」をドアシステムの中心性能と位置づけ、開発を行った。本報では、開発のねらいと導入技術について、紹介する。

2. 開発構想と導入技術

2.1 めざす姿と性能目標

静粛性開発を進めるにあたり、開発メンバー全体でありたい姿を共有化した。第一に「ドアを閉めた瞬間に感じる静粛感の高さ」、第二に「走行時は、外乱による音の変化が少なく、どんな車速でもクリアに会話ができる」である。前者は、ドアを閉めたときに感じる静粛感に加え、「クルマ

*1~5 ボデー開発部
Body Development Dept.

によって、護られているという心理的な安心感」、後者は静粛な空間によって感じる「快適性・居心地の良さ」をお客様への提供価値としている。続いて、具体的な車両の性能目標を設定した。快適性を測る指標として、CX-9の開発から適用している「会話明瞭度」を縦軸に、「荒れた路面での音圧」を横軸にとった指標を適用し、新型MAZDA3では静粛ゾーン内に性能目標を設定した (Fig. 1)。

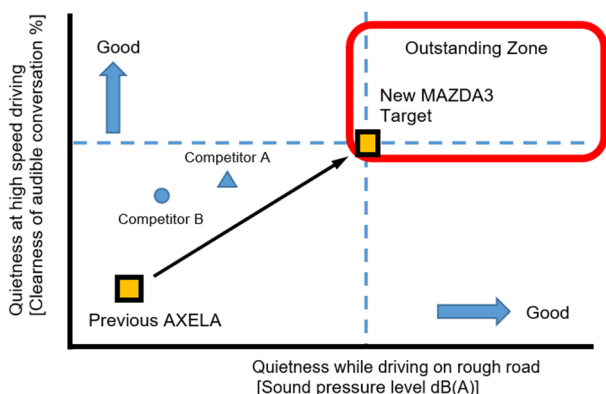


Fig. 1 Quietness Chart

続いて、車両を構成する各システムに対し、必要遮音量の配分及び目標設定を行った (Fig. 2)。

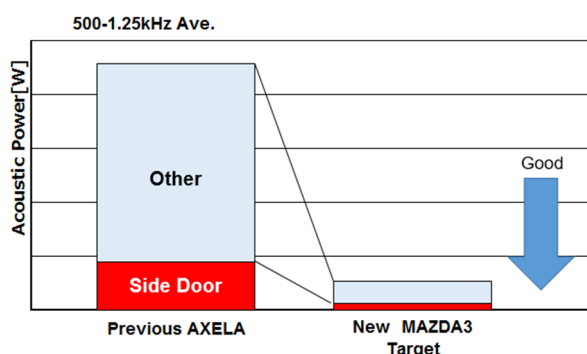


Fig. 2 Sound Insulation Target

この目標性能を実現するにあたり、2つの取り組みを行った。第一に、音源の低減である。車両の音源は、「エンジン音」「タイヤ音」「空力騒音」に大別できるが、ドアは「空力騒音」への影響が大きい。第二に、車内に透過・伝ばしてくる音の低減である。音は「空気伝播音」と「固体伝播音」に分類できるが、ドアは「空気伝播音」に対する影響が大きく、「タイヤ音」と「空力騒音」が車内に進入する割合のおよそ半分をドアが占めることが分かっている。次節ではその性能をどのように達成したのかを述べる。

2.2 達成シナリオ

ねらいとする性能の達成手段を具体化するにあたり、マツダが大切にしている2つの考え、第一に「人間特性から目標設定する」、第二に「物理現象を理論から制御因子を

突き止める」を基に、3つの技術コンセプトを決定した (Fig. 3)。

第一に、音源となる空力騒音に対し、「面の連続化+通気経路のゼロ化」、第二に、室内へ透過・伝ばする音に対し、「質量則使い切り+多重壁化」、第三に、乗員の側面にあるドアガラス部分からの透過音に対する、「ガラスの膜振動最小化」である。これら技術コンセプトから構造化までの取り組みを次項で述べる。

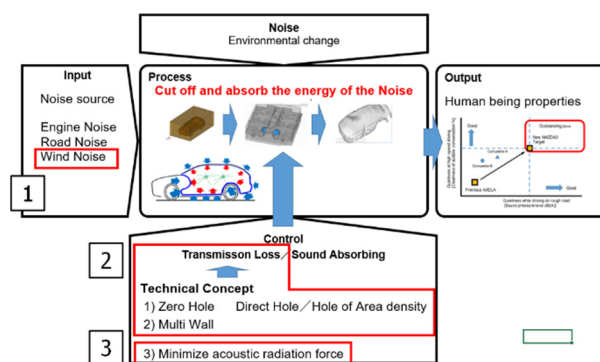


Fig. 3 Technical Concept of Side Door

2.3 空力騒音の低減

走行中に発生する空力騒音は、ドアの形状や構造との関わりが深い。キャビン周りで発生するエネルギー損失量は空気抵抗になるだけでなく、一部が空力騒音となって車体を伝ばし、乗員に騒音として伝わる事が分かっており、車室内の快適性向上のためには、発生する渦を抑制し、空力騒音を低減する必要がある⁽¹⁾。渦の発生を抑制するためには、車両周りを流れる空気の流れを速度を変化させないことが重要だが、その重要な因子が車両外郭の形状である。また、車両にある小さな穴や隙から、流速の早い室外へ空気が吸い出される際に発生する通気音に対しては、先代アクセラでは、ドアのアウトターハンドル周りが音源になることが評価により分かっている。これらに対する、新型MAZDA3の取り組み内容を以下に示す。

(1) ドアサッシュ周り

サッシュ周りの形状や構造は、外観デザインをはじめ、静粛性や居住性など、多岐にわたる機能を考えながら決定している。新型MAZDA3の開発では、特に空力騒音とシールによる遮音の機能に対し、各々の理想の姿と崖を明確にし、構造化を進めた。

まず、空力騒音に関しては、ピラー/サッシュ/ガラス面のフラッシュサーフェスを理想状態と位置づけ、キャビンとサッシュの段差、サッシュとガラス面の段差のミニマム化を追求した。サッシュ周りの形状は、形状決定に関わる因子と因子ごとの渦の大きさに対する寄与度、及びそれらの数値の崖を検証し、具体的なガラス面からBピラー/ガーニッシュまでの段差高さや、ガーニッシュ前側の勾配角度に反映した (Fig. 4)。また、過去の知見⁽²⁾より、Aピ

ラーとフロントドアサッシュの隙間と段差部に起因する騒音の対策として、パーティング隙を塞ぐパーティングシールが有効であることが判っている。この知見に基づき、キャビン周りの各パーティング隙部へ、パーティングシールを設定した。

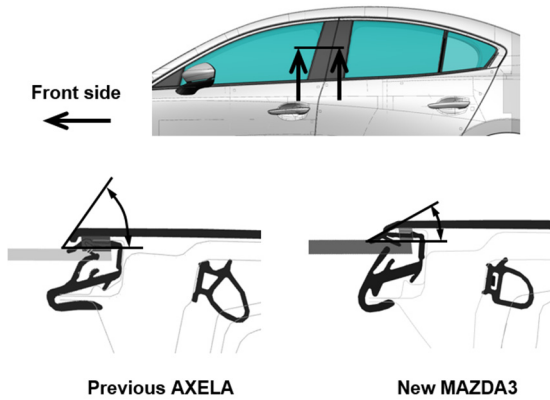
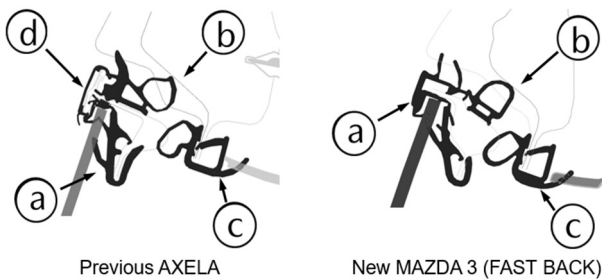


Fig. 4 Section of B-pillar Garnish

これらの機能を最小の寸法と物理量で実現するため、新型MAZDA3では、マツダ初の「熱可塑性エラストマー (TPE) 製ガラスランチャネルによるヒドダウンサッシュ構造」を開発・採用した。先代アクセラのサッシュ構造との大きな違いは、部品に対する機能配分である。従来構造は、ドアガラス保持はガラスランチャネル、シール機能はウェザーストリップ、外観意匠はサッシュモールというように、部品ごとに担う機能を設定していたが、新構造ではガラスランチャネルへ従来から有するドアガラス保持機能に加え、サッシュモールの持つ外観意匠とウェザーストリップが担っていたパーティングシール機能を集約、ウェザーストリップはプライマリーシール機能のみに特化し構造を簡素化、サッシュモールは廃止した。本構造により、ドアガラスとサッシュの段差縮小や、窓枠の幅を先代アクセラ比で20%細くし、意匠性も向上させた (Fig. 5)。



Function	Previous AXELA				New MAZDA3			
	(a) Glass-Run Chunnel	(b) Weather strip	(c) Welt seaming	(d) Molding sash	(a) Glass-Run Chunnel	(b) Weather strip	(c) Welt seaming	(d) Molding sash
Primary seal		●				●		
Secondary - seal			●				●	
Parting Seal		●			●			
Window Seal	●				●			None
Guide Side Glass	●				●			
Styling				●	●			

Fig. 5 Relationship between Functions and Door Parts

(2) アウターハンドル

「通気経路ゼロ化」の技術コンセプトに基づき、通気による車外騒音発生を抑制した、新構造のアウターハンドルを開発した。空力騒音に関しては、先述の通り、「渦に起因するもの」と「通気に起因するもの」に大別できるが、先代アクセラのアウターハンドルに関しては、後者が支配的であった。これは、グリップ部分の可動に必要な隙をキャップとの間に設けていることで、走行時にその隙間から空気が吸い出される現象が発生していたことが要因である (Fig. 6)。

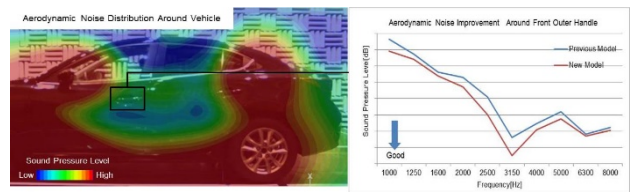


Fig. 6 Wind noise around Outer Handle

今回開発したアウターハンドルは、グリップ部分をキーシリンダー部分まで一体化にするとともに、グリップとドアパネルとのタッチ面をハンドルシートでシールする構造とすることで、通気音の発生を無くした。また、キーの挿入部を意匠面に出さない構造や、アドバンストキーレスエントリー操作ロック/アンロックスイッチのタッチセンサ化によって、マツダデザインが掲げる「引き算の美学」との両立を図った (Fig. 7)。

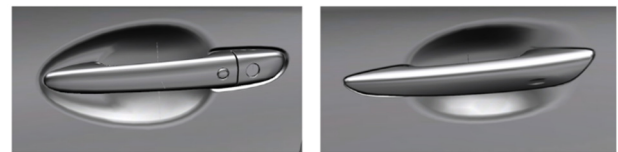


Fig. 7 Outer Handle Appearance

2.4 室内へ透過・伝ばする音の低減

この節では、技術コンセプトである「壁の穴隙ゼロ化」と「多重壁化」によって、音の伝ば・透過を抑制する考え方と構造を説明する。まず「壁の穴隙ゼロ化」に関しては、隣接する部品同士の合わせ部やシール部分に至る全ての領域で徹底的な構造対策を織り込みした。その中で特に注力した「シールの連続性」と「インナーパネルエリアの穴隙ゼロ化」について、詳しく説明する。

(1) シールの連続性追求

技術コンセプトである「壁の穴隙ゼロ化」はシールの理想状態である、「必要なシール圧とシール幅を保ち、連続シールする」にも通じる考え方であり、シールに対しても同コンセプトを適用し、開発した。

理想のシール状態を実現するには、シール部品側だけでなく、シールする相手側部品との関係が重要である。サイドドアにおいては、プライマリーシールとして、ドアウェザーストリップ、セカンダリーシールとして、シーミングウェルトを設定している。ウェザーストリップに関しては、先述のヒドゥンサッシュ構造化により、担う機能をプライマリーシールに特化したことで、サッシュ部分での断面切り替えを不要とし、一断面でドア全周をシールするようにした (Fig. 8)。

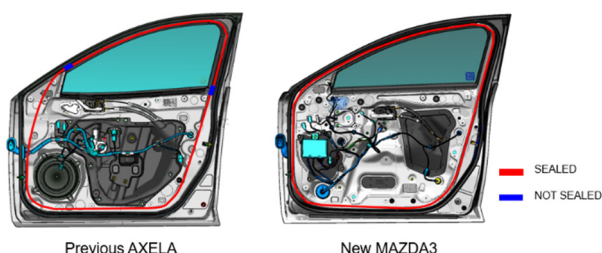


Fig. 8 Secondary Seal Layout

シーミングウェルトに関しては、先代アクセラは、ベルトラインから上側はサッシュ、下側はドアトリムとシールする構造としていたが、サッシュからドアトリムへシールを切り替える部位において、シーミングウェルト/ドアパネル/ドアトリム間に僅かな隙が生じ、音の侵入経路となっていた。新型MAZDA3では、ベルトラインの下側もインナーパネルに対しシールする構造へ変更し、シールコンディションが全域で変化しない理想的なシールとすることで、静粛性を向上させた。本構造の実現にあたっては、基本断面の変更だけに留まらず、ドアハーネスの配策経路もドア前側のフロントパネルを貫通する構造へ変更した。

(2) インナーパネルエリアの穴隙ゼロ化

物体の持つ遮音性能 (透過損失) の優劣は物体の持つ質量に依存する、いわゆる質量則が知られているが、その透過損失に関して、「面積比で僅か 1%の穴や隙 (以下、穴隙) を有しているだけで、本来有する透過損失を大きく損失する」ことを過去技報で報告している^②。ここで述べている穴隙は、遮音の観点から、以下の2つに定義することができる。第一に、内外を隔てる物質的な壁が存在しない「直通の穴」、第二に、物質的な壁は形成しているものの、壁の中で単位面積当たりの密度 (以下、面密度) が低くなっている箇所、「質量則の穴」である。見た目には音の通り道が無い状態であっても、質量則の穴があれば、そこから音が透過し、遮音機能は著しく低下し、本来壁の有する質量で得られるはずの透過損失が得られない状態となる。新型MAZDA3の開発では、従来から取り組んでいる「直通の穴」の潰し込みに加え、持っている機能を無駄なく使いきるために、「質量則の穴」に着目した。また、開発に先駆

け、ドアの遮音実力と弱点を明確にするため、先代アクセラ同様構造 (以下、先代構造) のドアを用い、残響無響室にて遮音量の計測および音の弱点の可視化を行った (Fig. 9)。

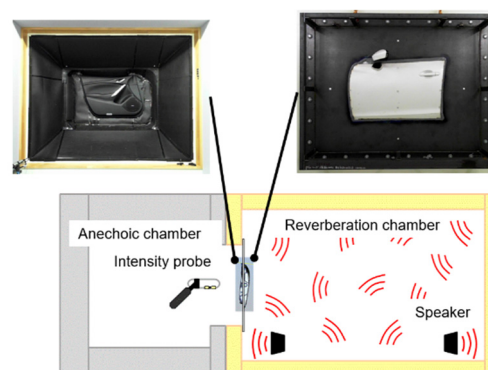


Fig. 9 Reverberation Anechoic Chamber

残響無響室での測定結果の一例をFig. 9に示す。この図は赤色や黄色の部位が音の透過量が多い部位、また赤色は、より強い音圧レベルであることを示している。Fig. 10で示す通り、先代構造はドアスピーカー部とベルトライン周辺部からの透過量が多い。新型MAZDA3では、この2か所を特に重要な部位と位置づけ、取り組んだ。

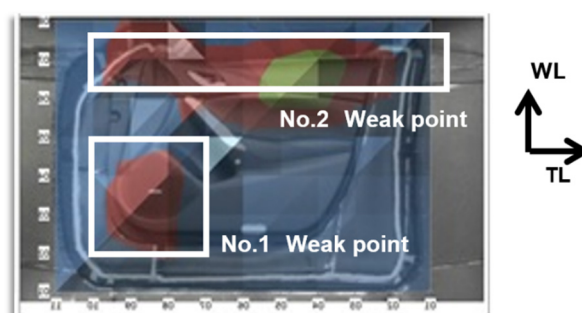


Fig. 10 Weak Point of Front Door

①インナーパネルエリアの遮音性能向上

先代構造のドアにおいて、車外音の出口として最も寄与が高いのがスピーカー部である。スピーカーは直通する穴隙は皆無だが、壁となっているコーン紙は面密度が低く、「質量則の穴」となっていることが要因である。具体的な影響を机上計算にて算出した結果、インナーパネル部が本来質量則で得られる透過損失に対し、およそ半分をロスしていることが判った。新型MAZDA3の開発では、開発初期段階からNVH実研担当や、オーディオ開発担当らとの共創活動を行い、音響性能とドアの遮音性を解決するための根源的な問題がスピーカー配置であることを認識し、スピーカー搭載位置をドアからカウルサイドへ変更するという、大規模な構造変更を行い、問題を解決した。

また、ドアへ部品を組付する際に必要なサービスホール

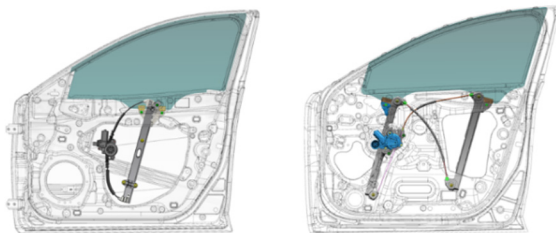
は作業性を犠牲にしない最小限の大きさとし、樹脂製カバーを設定することで、透過損失の穴が生じないよう配慮した。これら取り組みの結果、質量則理論値に対する透過損失のロス先代アクセラに対し、50%低減した（いずれも机上計算値）。

②ベルトライン周辺の遮音性能向上

残響無響室での計測結果の分析により、外で発生した音はベルトライン部ウェザーストリップインナーのリップを透過してくることを突き止めた。これはガラスへの接触面積が少なく、経路上の面密度が低いこと、またリップ形状の薄肉部がいわゆる「質量則の穴」となっていたことが原因であった。対策としてリップの面密度を改善した新しいリップ形状や断面形状を設定した。

2.5 ドアガラスから室内へ透過する音の低減

壁を保持する剛性が低いと、壁自身が振動することで、音響放射によって音が伝達する現象が生じる。これと同様の現象が走行中の車両のドアガラスでも発生している。ドアガラスの振動抑制のため、ガラスを閉じきった状態で、高い保持剛性を得られるように、ベルトラインモールの反力特性やリップ形状の工夫を行った。また、ドアガラスの安定した昇降挙動を保つには、摺動抵抗の変化に対してもガラスの姿勢変化が発生しない、ロバストなシステムが必要である。新型MAZDA3では、ガラスの水平姿勢を安定して保つため、フロントドアにWガイドレール式のレギュレータシステムを開発・採用した (Fig. 11)。ちなみに、挟み込み検知もマツダ初となるセンサレス制御方式を開発・採用している。



Previous AXELA New MAZDA3
Fig. 11 Window Regulator System

3. 相反性能に対する取り組み

3.1 ドア閉まり性

新型MAZDA3では、車両全体で徹底した「穴隙ゼロ化」に取り組んだが、そうすることで影響が無視できないのが、「ドア閉まり性」である。この節では、その取り組みを説明する。

ドアを閉める際のメカニズムをFig. 12に示す。アウトプットである「ドア閉まりの完了」は、「ドアラッチとストライカーが噛み合うこと」であるが、そこに至るまでに、シールの反発力・チェッカーやヒンジの摩擦など、ドア閉

まりを妨げる因子が存在する。中でも最も影響するのが、車室内にある空気がばねとなって、閉まりを阻害する現象、いわゆるエアタイトである。

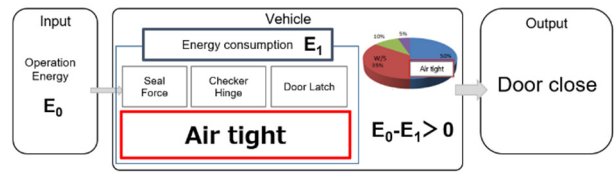


Fig. 12 Mechanism Door Closing

車両のリアバンパー裏には、エキストラクターグリルという空気を抜くための弁を設けており、ドア開閉の都度、車室内の空気を外へ逃がす働きをしている。新型MAZDA3の開発中には、徹底した穴隙ゼロ化により、遮音性向上を果たしたものの、その結果空気抜けが悪化し、エアタイトが増大する問題に直面した。従来手法では、エアタイトを低減するには、空気抜け量を増加させる、すなわち、エキストラクターグリル開口面積の拡大もしくは弁を解放しやすくする対策を行っていた。しかし、エキストラクターグリルは車外音の進入口になっていることが明確になっており^③、走行時の静粛性が悪化するという背反が生じる。新型MAZDA3では、このような背反する因子の特性を変動させて折衷案を探るのでなく、相互干渉しない新たな制御因子を見出し、機能を両立する取り組みを行った。ドア閉まり性の事例においては、ドア閉めを行う際の時間軸に着目し、静粛性と背反しない制御因子をコントロールすることで、ドア閉まり性を向上させた。詳細を以下に示す。

(1) ドア開閉連動の空調制御技術

ドア閉まり性能を向上させるため、ドアを閉める際に、ブローユニットの通気経路を制御し、車室内の圧力上昇を抑える、マツダ初の空調制御技術を導入した。ドアラッチに内蔵したアジャースイッチによって、ドアが開いたことを検出すると、ブローユニット内にある内外気切り替えシャッターを通気抵抗が最も少ない位置まで作動させ、室内の空気が抜けやすい状態にし、ドア閉めが完了すると、シャッターを元の位置に戻す。この技術により、ドア閉めに要するエネルギーをおよそ10%低減した (Fig. 13)。

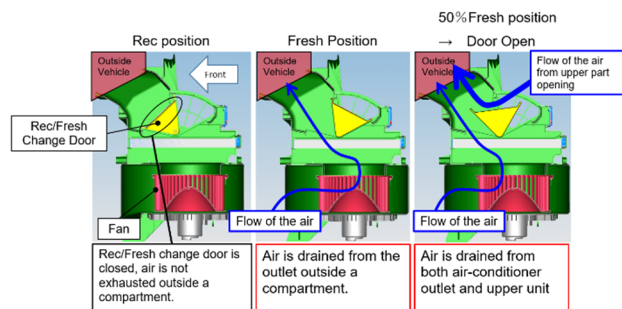


Fig. 13 Operation Explanation of Blower Unit.

(2) 閉まり性向上ドアチェッカー

ドアの閉まり性と開閉操作フィーリングの向上をねらい、スプリング摺動式ドアチェッカーを採用した。先代アクセラでは、小型・軽量が利点である、ラバーの弾性力を利用したラバー摺動式を採用していたが、上記メリットが得られる反面、ラバーの特性上、伸縮で発生するヒステリシスによってエネルギーロスが生じていた。今回開発したドアチェッカーは、内部構成部品の寸法とスプリングの諸元を適正化することで、本体サイズを従来車で使用していたスプリング摺動式チェッカー比でおよそ10%小型化しつつ、スプリングのエネルギー蓄積量をおよそ40%増加させ、開き時に蓄積したエネルギーを閉め時に解放することで、閉まり性を向上させた。また、ドア開き操作時の操作力遷移をアウターハンドル操作との連続性を持たせた特性とすることで、チェッカーの引き込み特性を強くしたドアで発生する、ドアを開ける操作がし難くなる問題も解消し、滑らかなドア開閉フィーリングを実現した (Fig. 14)。

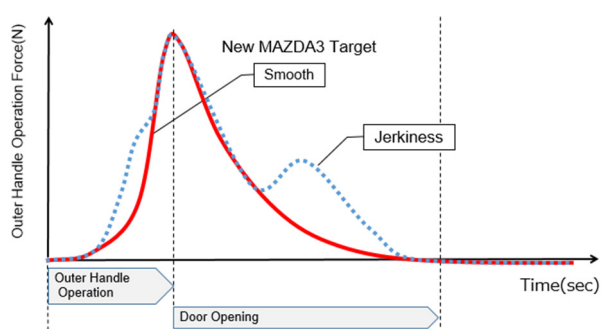


Fig. 14 Ideal Characteristics of Door Opening

4. 達成性能

前述の取り組みにより、車両全体でねらいとする静粛性目標を達成した⁽⁴⁾。ドア周りに関しては、各ピラー周りの空力騒音を先代アクセラモデルに対し、1~4dB低減 (Fig. 15)、遮音に関しては、インナーパネルエリアでは質量を殆ど増加させずに遮音性を向上させた (Fig. 16)。

また、ドアを閉めた際の静寂感に関しては、新型MAZDA3のアピールポイントの一つとすることができた。

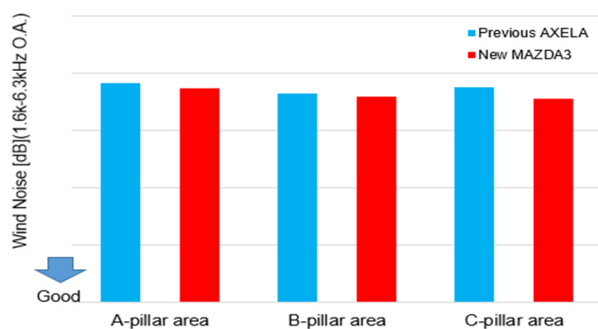


Fig. 15 Wind Noise Level

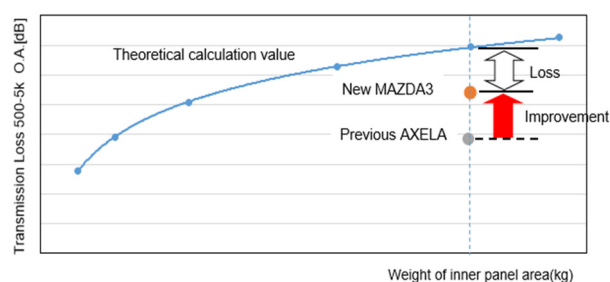


Fig. 16 Comparison with Theoretical Values

背反するドア閉まり性に関しても、閉まりに必要なエネルギーを40%低減した。その他、新造形のアウターハンドルやヒドゥンサッシュ構造の採用による意匠性向上や、スピーカー搭載位置の変更による音響性能向上を実現した。

5. おわりに

新型MAZDA3のドア開発にあたり、最も大切にする機能を端的に示すキーワードとして「遮る」を掲げた。従来、ドアは「開ける・閉める」に軸足を置いて開発してきたが、「遮る」を中心に考えることで、開発チームの意識や視点が変わり、よりクルマ全体へ、また、動的性能を考えられるようになったことが大きな成長であった。

多くの新しい試みにより、さまざまな領域で本当に多くの困難に直面したが、それらを購買・物流・工場・品証・取引先様に至る全ての関係者の共創によって乗り越えることができた。その努力の結晶が本当に素晴らしい商品となったことは非常に感慨深い。今後も「飽くなき挑戦」の志を忘れず、「走る歓び」を体現したクルマ造りに取り組んでいく所存である。

参考文献

- (1) 岡本 哲ほか：次世代商品群の空力・空力騒音性能開発、マツダ技報, No.35, pp.21-25 (2018)
- (2) 清水 勝矢ほか：新型CX-9の静粛性開発について、マツダ技報, No.33, pp.33-38 (2016)
- (3) 永本 光一ほか：新型CX-5の静粛性開発について、マツダ技報, No.34, pp.20-24 (2017)
- (4) 伊藤 肇ほか：新型MAZDA3の静粛性開発について、マツダ技報, No.36, pp.96-101 (2019)

■ 著 者 ■



高谷 洋隆



高橋 信之



雪田 恭兵



黒木 大史



松並 裕美子

特集：新型MAZDA3

14

新型MAZDA3のビークルダイナミクス技術 Vehicle Dynamics Technology for All-New Mazda3

塚根 芳将*1 富家 進*2 元吉 菜緒子*3
Yoshimasa Tsukane Susumu Tomiie Naoko Motoyoshi
吉村 匡史*4
Tadashi Yoshimura

要 約

新型MAZDA3では人馬一体の走る喜びを更に進化させるために人の行動原理を分析、人が普段から歩行する際に使っているバランス保持能力に着目した。そして運転中でもバランス保持能力を発揮できることが、車と人を一体に感じさせる車のあり方であると考え、シート、車体、サスペンション、タイヤの機能を根本から見直し、新たな車両構造技術（SKYACTIV-VEHICLE ARCHITECTURE）を開発した。その結果、新型MAZDA3では、まるで自分の手足のように違和感なく運転でき、長時間運転しても疲れを感じない運動性能を実現させ、人馬一体の向上と走りの質を高めることができた。

Summary

In the process of developing the All-New Mazda3, we analyzed human behavioral principle to further enhance Jinba-Ittai driving pleasure (the sense that a driver and a vehicle become one just as the horse becomes a natural extension of the rider) and focused on human ability to maintain balance while walking in a normal way. We considered being able to maintain body balance while driving to be the way a vehicle was supposed to be if we were to provide a sense of oneness between the driver and the vehicle. With an eye toward replicating the body balance in walking, we fundamentally reviewed functions of tire, suspension, car body and seat, and eventually developed a new technology for vehicle structure called Skyactiv-Vehicle Architecture. As a result, the All-New Mazda3 has achieved a driving dynamics which allows a driver to handle the vehicle without having a feeling of discomfort and also drive long hours without a feeling of fatigue, thereby leading to enhanced Jinba-Ittai driving performance and quality.

Key words : vehicle dynamics, vehicle development, suspension system, seat

1. はじめに

マツダは理想の乗り心地性能と操縦安定性能を目指し、人間中心の哲学に基づき車を開発している。それは理想性能の実現には人がもつ優れた能力を乗車した状態でも最大限に発揮できることが必要不可欠と考えるからである。運転中でも歩行時と同じように体のバランスをとることができれば、頭部が安定した快適な乗心地が実現できる。またドライバーのハンドル操作に対して人の行動原理に沿う形で車が応答すれば、手足のような感覚で車をコントロールすることができ、人馬一体の操縦安定性能が実現できると考える。

それを実現させるため、新世代のシャシープラットフォーム

フォームでは人間中心の考えに基づき、骨盤を正しい位置・角度に着座させることを最も重要な制御因子として、シートから車体、シャシー、タイヤまでのそれぞれのエネルギー伝達を時間軸でコントロールし、各ユニットが有機的な連携をもつよう、全ての部品を根本から見直した。そして新たな車両構造技術=SKYACTIV-VEHICLE ARCHITECTUREを開発し、新型MAZDA3に採用することで、車との一体感、意のままのハンドリング、快適性と安心感を向上させた。

本稿では、はじめに人の歩行動作を例に、人のバランス保持能力と普遍的な動作について説明する。そして車を運転している時でもバランス保持能力を発揮できる車両運動の考え方と、新型MAZDA3での達成手段、及び

*1 操安性能開発部
Chassis Dynamics Development Dept.

*2~3 装備開発部
Interior & Exterior Components Development Dept.

*4 シャシー開発部
Chassis Development Dept.

達成結果について紹介する。

2. 人の普遍的な動作

人は規則性のある滑らかな動きを心地よく感じ、不規則で不連続な動きを不快と感じる。普段何気なく行っている歩行動作を例にとると、三半規管がある頭部の上下の動きは僅か5cmほどに抑えられ、滑らかで連続したサインカーブで動いている (Fig. 1)。

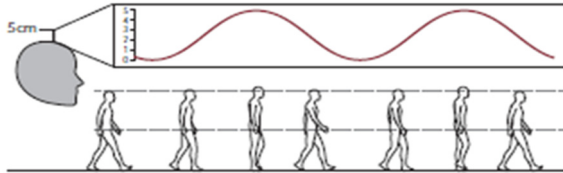


Fig. 1 Vertical Displacement of Head while Walking

人の体は骨盤と上半身から構成されるパッセンジャーユニットと、骨盤と下半身から構成されるロコモーターユニットに分けることができる⁽¹⁾ (Fig. 2)。歩行中はこの2つのユニットが骨盤を介して連携しながら機能することで、どんな路面であっても目線を安定させて歩行することができる。この究極のサスペンションともいえるパッセンジャー/ロコモーターユニットの機能とメカニズムを新世代のシャシープラットフォーム開発に取り入れた。

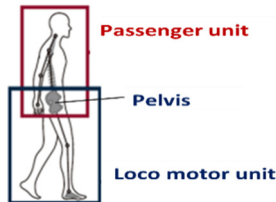


Fig. 2 Passenger & Locomotor Unit

3. 頭部を安定させる

3.1 パッセンジャーユニットの機能

パッセンジャーユニットは骨盤に入る入力に対して自らの姿勢を安定させる機能をもつ⁽¹⁾。この機能を発揮させるために最も重要となるのが骨盤の姿勢である。骨盤が立った状態 (ニュートラルポジション) であれば脊柱は自然と Fig. 3 のような S 字カーブを描いた形状となり、骨盤から伝わる振動に対して脊柱を柔軟に撓ませて頭部を安定させることができる。

また歩行動作を後方から観察すると左右の足の動きに合わせて骨盤を左右に傾けながら歩行している。この際、Fig. 3 のように脊柱を撓ませ、上体を骨盤の動きと逆相に傾けることで体のバランスをとり、頭部の動きを安定

させている。

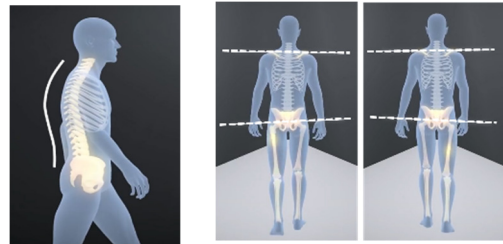


Fig. 3 Spine Curves (Side & Backside)

3.2 バランス保持能力を発揮できるシート

理想の乗り心地を実現させるため、ドライバーが車のシートに座った状態でもパッセンジャーユニットの「頭を安定させる」機能を発揮できるようにする。そのためにシートに着座した状態でも骨盤を立てて、脊柱を自然な S 字カーブに保持できるシートを目指した。

3.3 シート構造

骨盤を立てて脊柱の S 字カーブを保持させるためには、次のようなシート特性が必要であると考えた (Fig. 4)。

- (1) 骨盤全体を包み込むように支えることで、骨盤を自立させる。
- (2) 臀部が前ずれして骨盤が後転しないよう大腿部の支持力を高める。
- (3) 腰椎部を支え、骨盤が後転しないよう骨盤上部の支持力を高める。
- (4) 脊柱の S 字カーブを維持できるように、S 字カーブ上部にあたる胸郭重心位置を包み込むように支える。

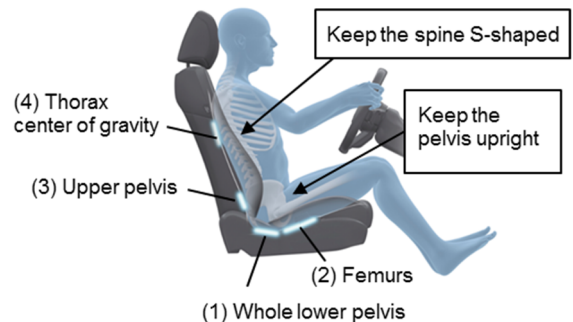


Fig. 4 Ideal Seating Posture

これらのシート特性を実現させるため、シート形状やたわみ特性、構造を最適化した。

(1) については、骨盤が自立するように、骨盤直下のクッション形状をフラットな面とし、面全体がたわむ特性とすることで、骨盤の安定度を増した。

(2) については、大腿部の支持力を高めるために、クッション形状の変曲点位置を従来から変更し、変曲点前後の座面角度の変化量も最適化することで、臀部の前ずれ

を防止した。更に大腿部を支持するクッション座面角度を変更できるように、前チルト調整機構を採用した。これにより、小柄から大柄な体格までの乗員を適切に支持することができた。

(3)、(4)についてはシートバックの支持構造を変更した。シートバックの各部位での支持力を変化できるように、独立したコイルバネを採用した。またそれらを人体の骨格を考慮して配置することで、骨盤上部・胸郭部それぞれに必要な支持力・支持範囲 (Kt, Kl, Kp) を実現した。

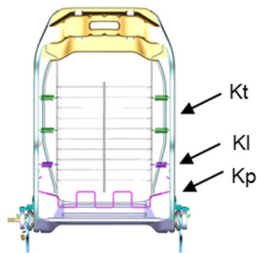


Fig. 5 Backrest Structure

3.4 シート着座姿勢

(1) 骨盤を立てた着座姿勢

骨盤の①上前腸骨棘と②大転子を結んだ線と、水平線の成す角度を骨盤角度と定義し (Fig. 6), 触診により上記2点にマーキングを付け、側面からカメラ撮影し骨盤角度を算出した。標準体格のパネラーにおける立位状態からシート着座状態の骨盤角度の変化量をFig.6に示す。変化量が小さいほど骨盤が立っていることを示しており、新型MAZDA3は骨盤を立てて着座できていることが確認できた。

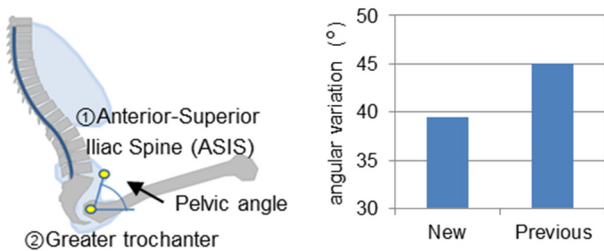


Fig. 6 Measurement Method of Pelvic Angle & Pelvic Angle Variation

(2) 脊柱のS字カーブ保持性

標準体格のパネラーで計測したシートバックの体圧分布をFig. 7に示す。縦軸にシートバックの高さ位置を、横軸に座面部の各高さ位置における荷重和の割合を示す。新型MAZDA3は、シートバックは骨盤上部の支持圧が高く、骨盤が倒れないように支持している。また、骨盤上部から胸郭部までを脊柱に沿うように連続的に支持しており、脊柱のS字カーブを保持しやすい特性であることが確認できた。

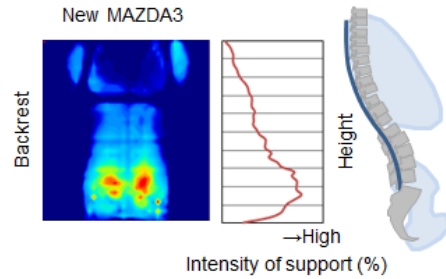


Fig. 7 Pressure Distribution of Backrest

4. 入力を滑らかにする

4.1 ロコモーターユニットの機能

ロコモーターユニットは前に進む機能と路面からの入力を滑らかに整える機能をもつ。人が歩行する際の下肢の動きを側面から観察すると、Fig. 8のように踵位置の軌跡は前後・上下に複雑で不連続な動きをしているが、下肢の関節や筋肉が連携して機能することで、骨盤の動きは小さく抑えられ、周期的で滑らかな動きとなっている。

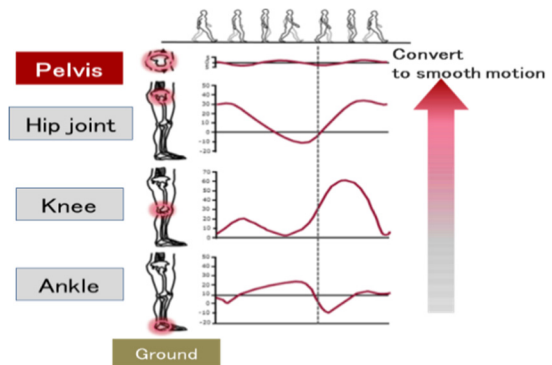


Fig. 8 Vertical Position of Foot Joints

4.2 ロコモーターユニットとしての車の機能

車のシートに座った状態ではロコモーターユニットの機能を発揮することができない。そのためFig. 9のように車のタイヤ、シャシー、車体、シートがその役割を担うことになる。具体的にはタイヤとサスペンションによって路面から入る不連続な入力をXYZ軸の位相が揃った滑らかな入力に変換し、そして遅れなく車体に伝える。車体とシートはサスペンションから入る入力をドライバーの骨盤に遅れなく伝達させることを目指した。

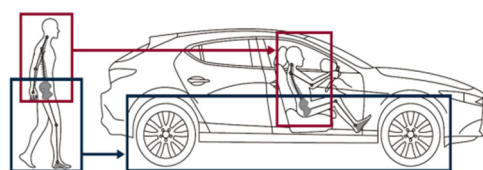


Fig. 9 Transfer Function of Body to Car

4.3 路面入力を滑らかにするシャシー

路面からの入力を、位相を揃えて滑らかにして、車体に遅れなく伝えるために、タイヤ、サスペンション部品のエネルギー伝達を時間軸で連携させるというコンセプトの下開発を行った。Fig. 10はスロープ路面を乗り上げた際のエネルギー伝達のコンセプトを図示したものである。以下にその時間軸でのつながりを説明する。

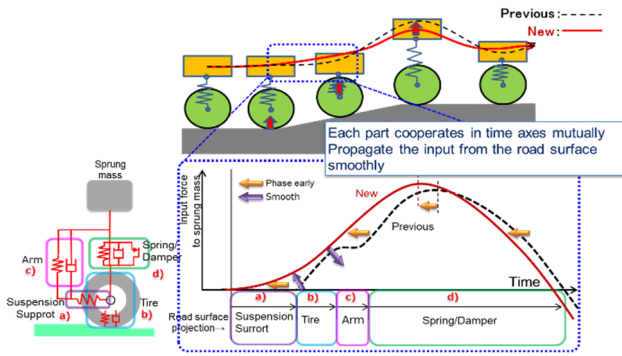


Fig. 10 Concept of Suspension Part Cooperates

(a) タイヤの位置決め

サスペンションの支持剛性を高めて、路面からの入力を素早くタイヤで受け止める。

(b) タイヤのエネルギー減衰

タイヤを早期にたわませて、路面からのエネルギーを減衰させ、残りをアーム・ばね・ダンパーへ伝える。

(c) 入力の位相を揃える

ロアアームの動きでタイヤから伝わる入力の向きを揃えて、素早く、ばね・ダンパーに伝える。

(d) ばね・ダンパーで入力を滑らかにする

ばね・ダンパーを滑らかにストロークさせることで、入力を減衰させながら滑らかにし、残りを車体に伝える。

以下に、(a)から(d)それぞれについて具体的施策を述べる。

4.4 タイヤの位置決め (a)

車体に入る入力を滑らかにするには、路面からの入力を早期にタイヤで受け止める必要があり、サスペンションの位置決め機能が重要となる。前モデルのフロントロアアームの前側ブッシュは、車両前後方向のばね定数が低く、ストッパー部とのクリアランスがあるため、支持剛性が低い構造であった。新型MAZDA3では、前側ブッシュを、ストッパークリアランスを持たない構造に変更し、ブッシュの前後方向の剛性を高めた。これによりタイヤに前後方向の入力が入った際のホイールセンターの前後変位を、前モデルに対して約25%小さくすることができた。

4.5 タイヤのエネルギー減衰 (b)

新型MAZDA3ではタイヤを含めた車両全体で機能を再配分し、相互支援しながら全ての性能を同時に高めていく考えに基づきタイヤ開発を行った。具体的にはタイヤの上下方向のばね定数を前モデルのタイヤに対して約10%柔らかくすることで、路面からの入力をタイヤのたわみによって滑らかにするとともに、惰行時はエネルギーロス少なく転がり、荷重がかかった時は接地面が広がり、タイヤ横力を遅れなく発生する特性とした。

4.6 入力の位相を揃える (c)

サスペンションに入るさまざまな方向からの入力に対して、ロアアームの作動軸を定め、ホイールセンターを動かしたい方向に動かすことで、入力の位相を揃えることを目指した。そのためにタイヤからの入力の方向を単純化して考えた。Fig. 11にその考え方を示す。前後方向の入力に対しては、ロアアーム後ろ側ブッシュを左右に動かし、前側ブッシュをピボットとしてロアアームが回転する挙動とした。上下方向の入力に対しては、前後ブッシュを軸とし揺動させる。そうすることで複合入力に対しては、入力の大きさによらずホイールセンターの動く向きが揃い、連続的な動きを作ることができる。ねらいの動きを実現させるために、ブッシュの並進方向、回転方向の特性を見直し、新構造のブッシュを開発した。前側ブッシュは前後方向のばね定数を高め、こじり方向のばね定数を低減させた。後ろ側ブッシュは前後方向のばね定数を高め、左右方向に動きやすいばね定数とした。Fig. 12にその一例として、新型MAZDA3と前モデルのロアアーム前側ブッシュの特性比較を示す。

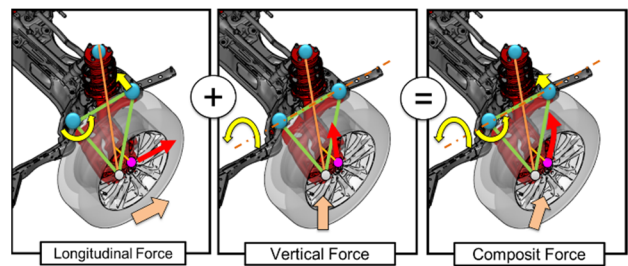


Fig. 11 Input Force to Front Suspension

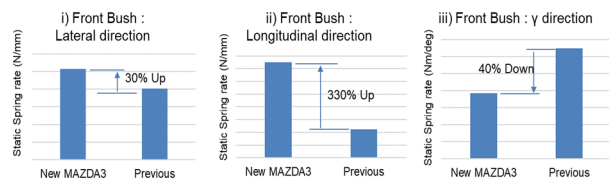


Fig. 12 Comparison LCA Bushing spring rate of Previous and New MAZDA3

上述のブッシュに加えてサスペンションジオメトリー

にも新たな考えを織り込んだ。ロアアーム角を常に下向きとすることで、タイヤからの入力を、アームを介して早期に車体側に伝えるようにした (Fig. 13にロアアーム角度部位を示す)。

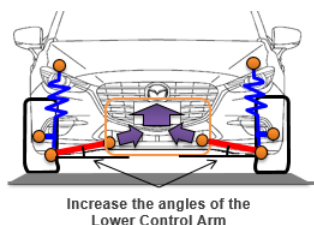


Fig. 13 Lower Control Arm Angle

タイヤから入る入力の位相を揃えて、素早くばね・ダンパーに伝える施策について、実車で確認結果を述べる。Fig. 14 は高さ30mmの段差に設置されたスロープを時速10km/hで乗り上げた際の車両側面から見たホイールセンターの軌跡を示す。新型MAZDA3は、入力的大小によらずホイールセンターが常に上向きに動き、初期からばねとダンパーに入力を伝達させていることが確認できた。

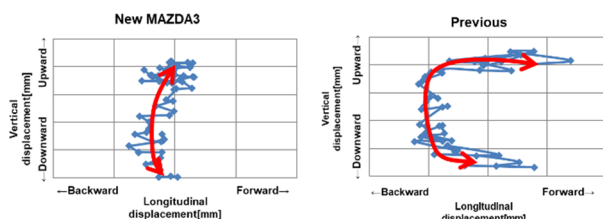


Fig. 14 Wheel Center Displacement

4.6 ばね・ダンパーで入力を滑らかにする (d)

車体に入る入力を滑らかにするために、サスペンションをスムーズにストロークさせ、入力が入る早期からダンパーによる減衰を活用する。そのため新型MAZDA3ではフロントストラット式サスペンションのばねの配置と位相を左右それぞれで最適な方向に定め、ばね反力によってダンパーに加わる横力を低減させた。その結果、サスペンションがストロークする際のダンパートップに入る横力を前モデルに対して半分以上に低減することができた。

またサスペンションのスムーズなストロークを目指し、フロントストラットマウントはダンパーロッド軸のこじり方向のばね定数を下げるとともに、タイヤの位置決め機能が高めるためにダンパー軸直方向のばね定数が高い新構造のマウントを開発した。Fig. 15に新型MAZDA3と前モデルのストラットマウントラバーの特性差を示す。左右方向、前後方向のばね定数を上げ、位置決め機能を高めながら、こじり (γ) 方向の特性を大きく低減した。

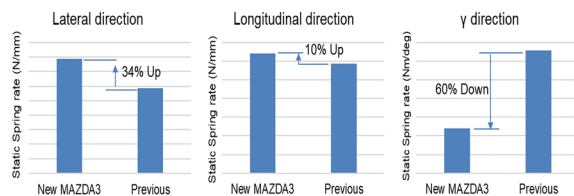


Fig. 15 Comparison Strut Mounting Rubber Spring Rate of Previous and New MAZDA3

Fig. 16は先述のスロープ路面を乗り上げた際のシート取り付け部における車体の前後方向 (Ax), 上下方向 (Az) の加速度を示す。新型MAZDA3は、前後方向と上下方向の加速度の位相が一致し、加速度変化が滑らかになっていることが確認できた。

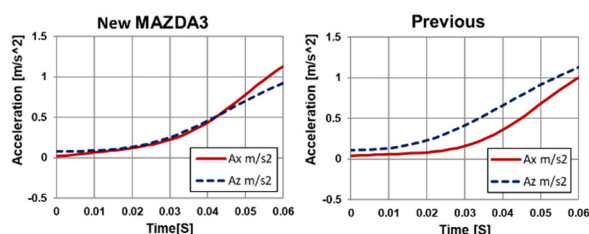


Fig. 16 Floor Acceleration

5. 達成状況

5.1 コーナリング中の骨盤と上体の挙動

新型MAZDA3では、運転中も歩行時と同じく、骨盤と上体を逆相に動かすことで身体のバランスを取り、頭部の動きを安定させることを目指した。

操縦安定性を評価する社内のテストコースで、緩やかなコーナーを走行中の人体挙動について慣性式モーションキャプチャーを用いて測定し、各関節角度を算出した。Fig. 17は、第二/第三胸椎関節 (T2-T3), 第二/第三腰椎関節 (L2-L3) のロール角とヨー角の時系列変化を示す。新型MAZDA3は、胸椎部と腰椎部の関節角度がロール、ヨーともに逆方向の動きを示した。

このように、運転中も歩行時と同じく、骨盤と上体が逆相に動いていることが確認できた。

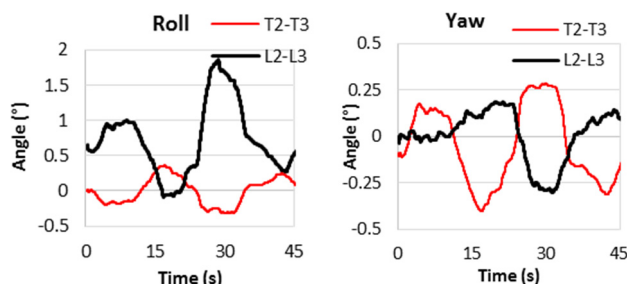


Fig. 17 Roll & Yaw Angle of Articular

5.2 コーナリング中の頭部の挙動

緩やかなコーナーに進入した際の頭部の動きを、慣性式モーションキャプチャーを用いて計測した。Fig. 18は横軸に横加速度、縦軸に頭部の左右方向の変位量を示す。新型MAZDA3では操舵初期から頭部が滑らかに動いており、乗員がバランス保持能力を発揮できるシート、及び車両運動になっていることが確認できた。

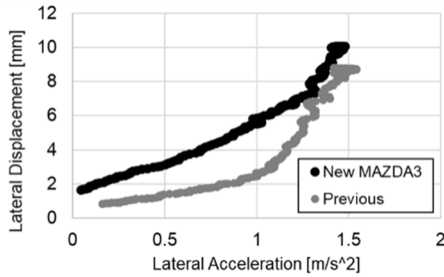


Fig. 18 Lateral Displacement of Head

5.3 スロープ乗り越し時の頭部の挙動

先述のスロープを時速10km/hで通過した際の頭部の動きを撮影し、画像処理からFig. 19に示す頭部①②③のポイントについて変位量を算出した。①は上部頸椎、②はこめかみ、③は目の位置にあたる。

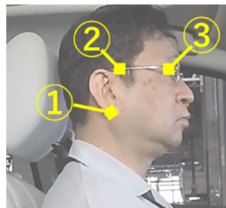


Fig. 19 Measurement Point

Fig. 20に頭部の前後移動量として①のポイントの前後変位を示す。またドライバーの視線方向として②と③のポイントを結んだ線と水平線の成す角度を示す。新型MAZDA3はドライバーが上半身のバランスをとることで、頭部の前後移動量が前モデルよりも減少し、安定していることが確認できた。また頭部のピッチの大きさとピッチの速さが抑えられており、目線を安定させやすくなっていることが確認できた。

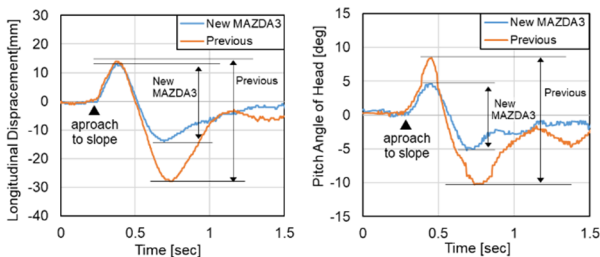


Fig. 20 Longitudinal Displacement and Pitch Angle of Head

6. おわりに

人の能力を発揮させることができる車両運動の考え方とそれを実現させるための新しい車両構造SKYACTIV-VEHICLE ARCHITECTUREについて紹介した。従来の自動車の機械特性を高めることに加え、人の特性に合わせた運動性能を実現させることで、これまでにないドライビングフィールと走る歓びを市場に送り出せることを嬉しく思う。今後も人の特性を研究し、人間中心の哲学に基づいた理想の車両運動の実現に向け取り組みを続けていく。

参考文献

- (1) Kirsten Götzt - Neumann(著), 月城ほか(訳), 観察による歩行分析, 東京都, 医学書院, (2005年)

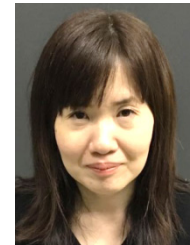
■ 著 者 ■



塚根 芳将



富家 進



元吉 菜緒子



吉村 匡史

特集：新型MAZDA3

15

新型MAZDA3の静粛性開発について

Quietness Development for All-New Mazda3

伊藤 肇*1 Hajime Ito	富士田 拓也*2 Takuya Fujita	黒川 将*3 Sho Kurokawa
大森 和也*4 Kazuya Omori	石塚 勝*5 Masaru Ishizuka	上田 高裕*6 Takahiro Ueda

要 約

静かな空間の中にも、乗員が車外の状況が分かることで、安心して充実したドライブを楽しんでいただきたい。新型MAZDA3では、人が音を感じるメカニズムを探求し、単に「静かな」だけではなく「質の高い静粛性」を追求し、次世代にふさわしいNV性能を実現した。

人は、音の大きさだけでなく、音の到来方向や音が減衰する時間にも大事な要素であるとの考えの基、これまでの音の大きさや到来方向に加えて、時間変化に関わる新たな指標を作成した。目標実現のため、音源の低減、振動伝達特性や空気伝ば音の改善に関して、それぞれをコントロールするための考え方を決め、新たな構造や材料を駆使し、関係部門と共創することで「質の高い静粛性」を実現した。

Summary

We would like occupants to enjoy relieved and fulfilling drive with recognition of exterior noise even when they are in a quite space. In the new Mazda3, we explored the mechanism how human beings sense sound, and realized the NV performance that is appropriate to the next generation vehicles by pursuing not only just “quietness”, but also “high-quality quietness”.

Based on the concept that sound direction and settlement as well as loudness are important elements for sound recognition, we set a new development index and target regarding temporal alteration in addition to the current loudness and sound direction. We established concepts of sound source, vibration transmission and air transmission to control them and using of New Construction and material to achieve the target, and realized “high-quality quietness” in cooperation with the related departments.

Key words : Vibration, Noise, and Ride Comfort, Quietness, Sound, Quality Evaluation/Ride Comfort Evaluation, Optimization Technique

1. はじめに

静かな車室内空間であっても、運転に必要な情報、例えば路面が変化した時や緊急車両が接近した等といった、車の外の状況が分かることで、安心して充実したドライブを楽しんでいただきたい。本稿では、人が音を感じるメカニズムを探求し、それを具現化するための考え方とその実現手段について報告する。

2. 質の高い静粛性の指標化

新型MAZDA3では、CX-5以降で実現した音圧レベルや音の到来方向以外にも、人が感じる音の時間変化に着

目し、それを見るための指標作成を行い、開発指標を決めた。

2.1 走行時の路面変化の指標化

これまでの静粛性は、「高速走行時の静粛性」と「荒れた路面での静粛性」の指標を用いて2軸で表し、開発を行ってきた。この静粛性指標は、「定常現象」を対象としている。しかし、一般的な走行環境下では、路面が時間とともに変化する「過渡現象」が起こっており、従来の指標ではその変化が表せていない。新型MAZDA3の静粛性開発では、路面変化により乗員が予測しているとおりに車室内の音を変化させることで心地よい静粛性を実

*1~3 NVH性能開発部
NVH Performance Development Dept.

*4 車両実研部
Vehicle Testing & Research Dept.

*5~6 マツダE&T 操安・NVH性能開発部
Chassis Dynamics & NVH Performance
Development Dept.

現できると考えた。

そのためには、路面が変わった時、路面からの入力エネルギーと、車室内の音の変化量の一致性を見ることで表すことができると考えた。具体的には、一般的な走行における路面変化には大きく2種類ある。それは、①スムーズな路面から荒い路面への変化。②荒い路面からスムーズな路面に変化した時があり、これらについて新たな指標化に取り組んだ。①は、タイヤからの振動エネルギーと車室内の音の変化量の一致性 (Fig. 1)。②は、タイヤからの放射音エネルギーと、車室内の音の変化量の一致性 (Fig. 2) で表し、これらを開発指標とすることに決定した。

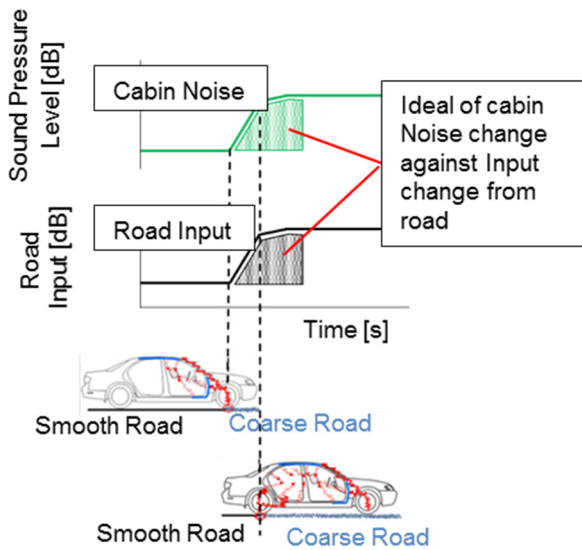


Fig. 1 Road Surface Change from Smooth Road to Coarse Road

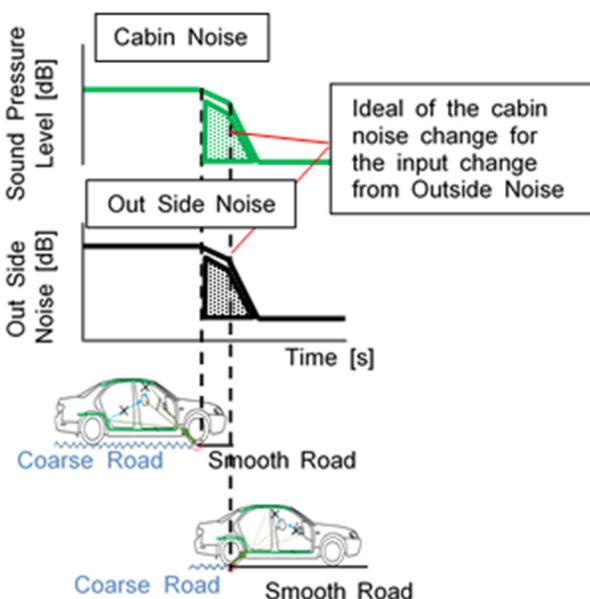


Fig. 2 Road Surface Change from Coarse Road to Smooth Road

2.2 風変動感の指標化

新型MAZDA3では、高速クルージング時においても上質な車室内空間をお客様に提供することを目標として開発した。従来の開発では、会話明瞭度を開発指標として、乗員耳位置での音圧レベルの低減や局所的な音を抑えることで静粛性を向上させてきた。しかし、市場での走行シーンでは、時々刻々と変化する風を受け、バサバサという耳障りな音（風変動感）を感じており、従来の指標では、その音の変化を表現できていない。新型MAZDA3の風騒音開発においては、人が感じる音の時間変化に着目し、新たな指標化に取り組んだ。

まず、走行時乗員耳位置での音の時系列データを計測し、同時にエキスパートによる聴感評価を実施した。

その結果、音圧レベルが時間的に大きく上昇する場合に変動感を感じるようになった (Fig. 3)。次に、走行時の音圧レベルの変化量と、聴感評価点数に相関性があることが分かり、走行状態での変化量の閾値を決めた (Fig. 4)。

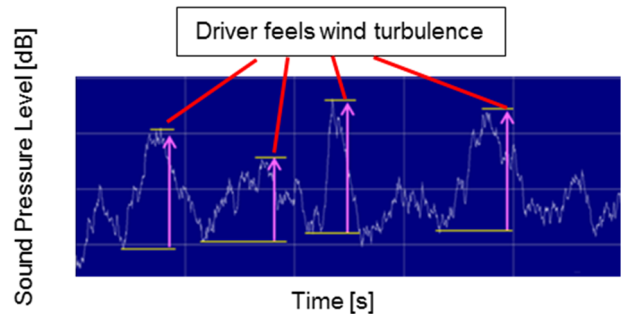


Fig. 3 Temporal Variation of Sound Pressure Level

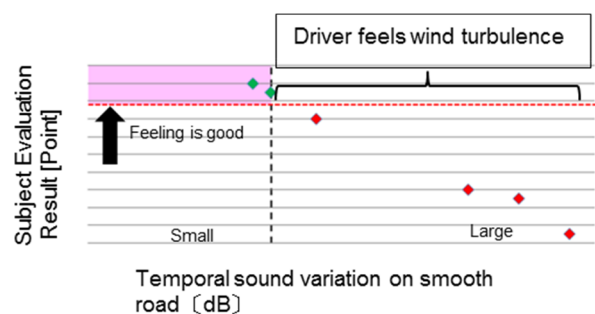


Fig. 4 Index of Wind Turbulence on Smooth Road

続いて、時々刻々と風が変化する環境では開発が困難なため、安定した送風条件下で評価可能な風洞で指標化を行った。走行時の音圧レベル変化量と相関性のある風洞の特性を検討した結果、正対風と横風時の音圧レベル変化量の相関が高く、これを開発指標とすることに決めた (Fig. 5)。

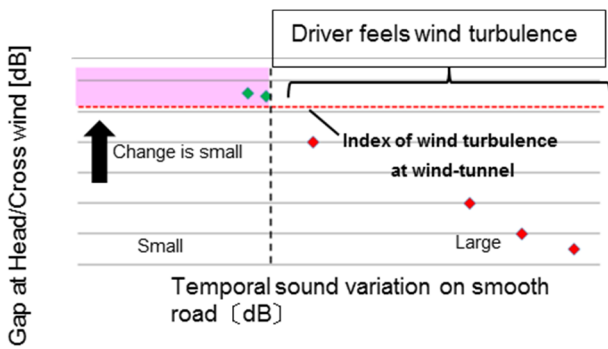


Fig. 5 Wind Turbulence Threshold at Wind-Tunnel

3. 実現手段と達成性能

3.1 路面変化の低減

(1) スムーズな路面から、荒れた路面に変化した時
 走行中にスムーズな路面から、荒れて路面に変化した時のロードノイズは、タイヤが受けた路面からの入力エネルギーが、サスペンションや車体骨格を伝達し、車室内に面するパネルから音となって放射されて乗員耳位置まで届く現象である。新型MAZDA3では、サスペンションから車体への入力と、車体に入力を与えた時の音の成り易さを表す車体音響感度に対して、ロードノイズ低減の考え方を決めて、質量効率を高めた構造にした。

①サスペンションからの入力低減方法

フロントストラット形式のサスペンション主要モードにおいて、サスペンションの車体側取り付け部が節となるように部品形状をコントロールしている。具体的にはモードの主要ばね要素であるフロントナックル首部において、断面2次モーメントをコントロールしてモードにおける変曲点(a)を設けることで、フロントナックルからロアアームへの入力(b)を最小化させた。これにより、サスペンションから車体へ入る入力を低減した (Fig. 6)。

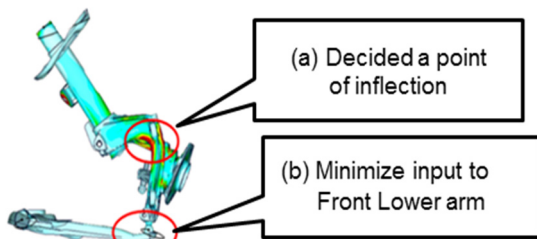


Fig. 6 Nodal Mount

②車体音響感度の低減方法

車体音響感度を低減させるためには、各パネルの振動レベルを低減させる必要がある。新型MAZDA3の開発においては、効率的に各パネルの振動レベルを低減させるために、サスペンションの車体取り付け部の剛性を向上させることで、車体に伝わる振動を低減させた。また、車体の骨格からパネルへと伝達する振動エネルギーを熱

エネルギーに変換させることで振動を低減させた。

a.サスペンション取り付け部の剛性を向上

リアサスペンションからの主要入力点であるトーションビームアクスル取り付け部の剛性を、従来の同形式のサスペンション車に対して向上させた。具体的にはリアフレームの共振モードを元に、フレーム内の最適な場所を抽出し、節形状を適正化した (Fig. 7, 8)。

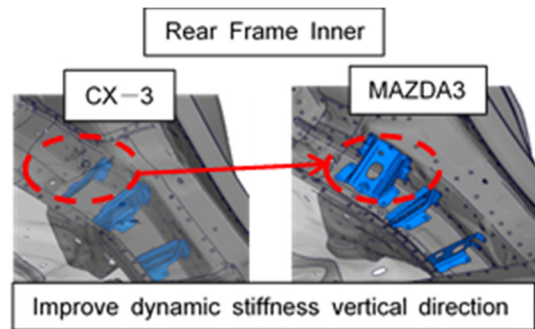


Fig. 7 Optimization of the Reinforce Structure



Fig. 8 Body Stiffness of TBA Attachment

b.減衰活用による振動エネルギーの低減

サスペンションから振動エネルギーが入った時の車体の歪エネルギーを分析し、高歪エネルギー部位への減衰材の追加による振動低減を行った。具体的には、フロアなどの接合部における高歪エネルギー部位には減衰接着剤を適用し、フレームの断面変形が大きい所には減衰節を設定した (Fig. 9, 10)。

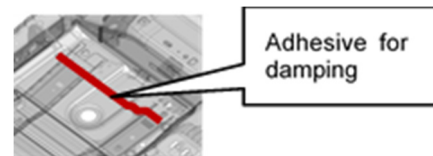


Fig. 9 Adhesive for Damping

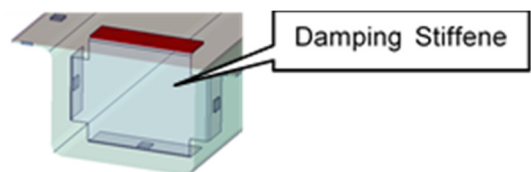


Fig. 10 Damping Stiffener

(2) 荒れた路面からスムーズな路面に変化した時
 荒れた路面からスムーズな路面に変化した時に、車室内に入った音の収まりを良くするために、従来は吸音機能をトップシーリングのみに付加してきたが、新型MAZDA3では更にフロアマットの吸音機能を向上させた。マットの吸音機能を上げるためには、カーペット表皮の密度を上げる手段があるが、質量や運転操作性の相反特性から厚みを抑制しなければならない。新型MAZDA3のフロアマットは、
 (a) カーペット表皮は現状と同じ密度
 (b) ベース層の目付を低減し通気を拡大
 (c) 基材部では厚みを確保し密度の低減を行うことでマットの吸音機能を上げた (Fig. 11)。

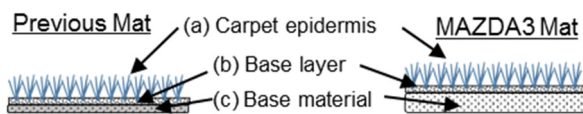


Fig. 11 Composition of Mat

(3) スムーズな路面を走行した時
 スムーズな路面における車室内の音については、空気伝ば音を車室内へ伝えることが重要であり、透過損失（音の反射）をコントロールした。透過損失は、部品単体でいくら高めても、組みつけや他の部品とのスペースの兼ね合いで穴隙が発生してしまうと、10%の場合には7割も透過損失が悪化する (Fig. 12)。新型MAZDA3では、「穴隙ゼロ」という考え方の基、それを2つに定義分けし開発した。

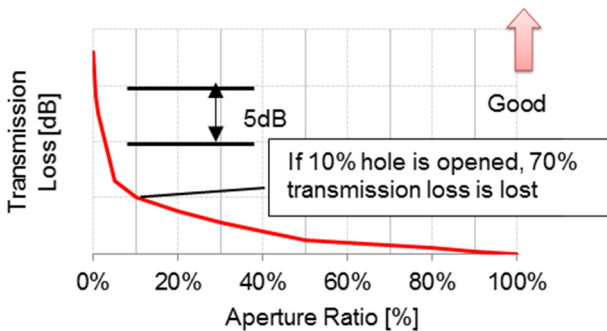


Fig. 12 Relationship Between the Performance of Sound Insulation and Aperture Ratio

①機能上必要な穴

車両には車外と車室内が直通しているが、機能上必要な穴が存在する。代表例として、車両後方にはエキストラクターと呼ばれる車外と車内が直通する穴が存在する。このエキストラクターは、空調で車室内へ入った空気を車外へ出し、ドアを閉める際に室内へ押し込まれた空気を車外へ出す役割を担っており、車の機能上必要な穴ではあるが、音の侵入経路にもなってしまう。従って、こ

れらの相反する機能を満足することができる構造が必要である。新型MAZDA3では、エキストラクターからの経路を管状に囲うように吸音材を配置する、新たな音低減構造を開発した。音を効率よく低減させるためには経路が狭く複雑な構造が良く、一方で空気は経路が広く直線的な構造の方がとおりやすい。そこで、音が低減しやすいように経路の断面積を小さくし、かつ空気の流れを妨げにくい直管形状とすることで、空気を十分に通しつつ侵入音を低減させる構造を実現した (Fig. 13)。

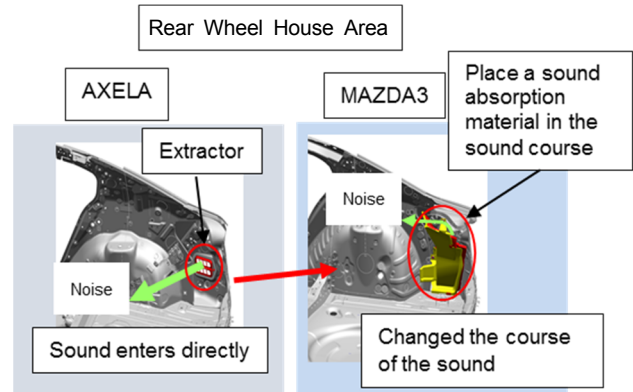


Fig. 13 Structure of Extractor Aeration Part

②音響的な穴

部品の兼ね合いやスペースの都合で、ボディパネルを内装材で覆えていなかった場合、その分の透過損失が低くなってしまいます。それを音響的な穴と定義した。特にフロアパネルエリアの中央部に覆えていない部分が多く、透過損失が低くなっていた。そこで、新型MAZDA3では設計や生産部門と協力し部品の組付け方法の見直しを行うことで、ボディパネルに対して内装材で覆えていない面積を、AXELAに対してフロアパネルエリア全体で13%から6%に低減した (Fig. 14)。

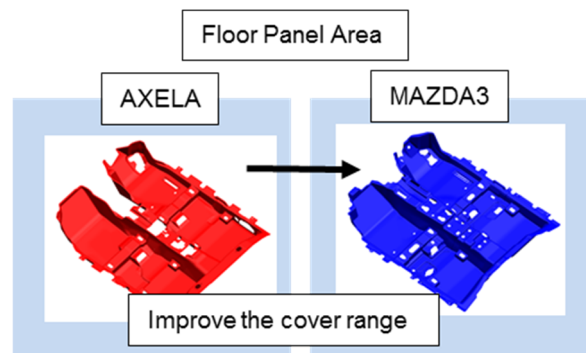


Fig. 14 Floor Panel Area Comparison

3.2 風変動感の低減技術

風変動感の発生メカニズムは、車両廻りの気流の乱れ（渦）で生じる音源（空力騒音）が時間的に変化し、この音源が車室内に伝搬するためである。音源を低減するには、

発生する渦を抑制する必要がある。渦の発生そのものを抑制することで時間的な変化代も低減する。そのため、流れ制御の考え方に基づいて車両の各部位の適正化を実施した。今回、車室内の音に対して寄与が高い(1) Aピラー、(2) ドアミラー、(3) カウルの音源低減事例を以下に示す。

(1) Aピラー：圧力勾配の上昇抑制

下流に向かって圧力が増加する過程で流れがAピラーより剥離し渦が発生する。この圧力変化、すなわち圧力勾配が急になるほど剥離しやすくなるため圧力勾配を緩やかになるようにAピラー形状のRや段差を適正化し、流れを制御することで、渦の発生を抑制し音源を低減した (Fig. 15)。

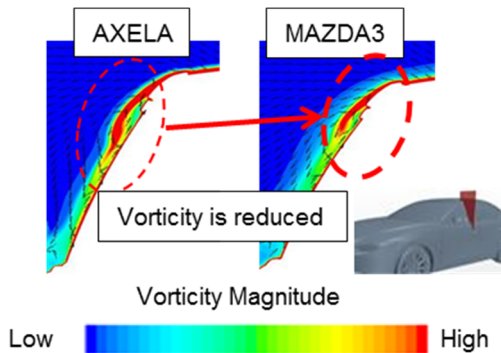


Fig. 15 Vorticity Distribution Around A-pillar

(2) ドアミラー：剥離領域の等速化

ドアミラーの後方で発生する渦は後端のせん断や巻き込みによって発生する。この流れのせん断や巻き込みを制御するために、ミラー後端の速度差を減らすようにミラー外周部の形状を適正化し、流れを制御し音源を低減した (Fig. 16)。

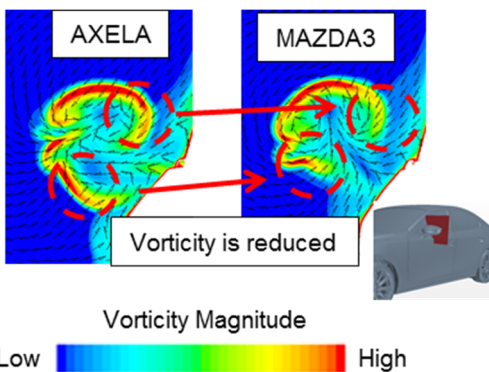


Fig. 16 Vorticity Distribution behind Door Mirror

(3) カウル：剥離領域の流量低減

ボンネット後端での剥離によりカウル内で渦(a)が発生し、更に流れがワイパーに衝突することにより渦(b)が発生する。このため、ボンネット後端位置、ワイパーレイアウトの適正化により、カウル部へ流入する流量を制御することで渦の発生を抑制した (Fig. 17)。

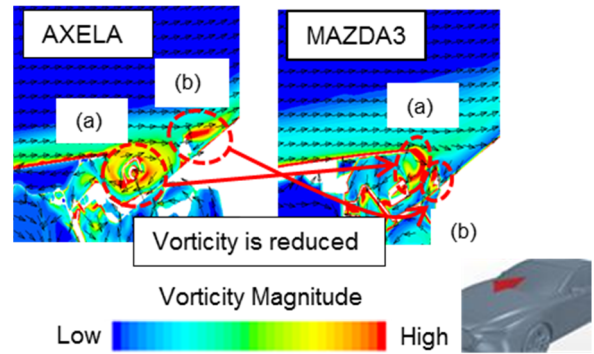


Fig. 17 Vorticity Distribution in Cowl and Wiper Section

各部の流れを制御するための形状因子を簡易モデルのCFD (Computational Fluid Dynamics) を用いて検討した。これで得られた各部因子をデザインに適用して、渦の発生を低減する流れ制御を実現した。これにより、音源のエネルギーをAXELAから約30%低減することができた (Fig. 18)。

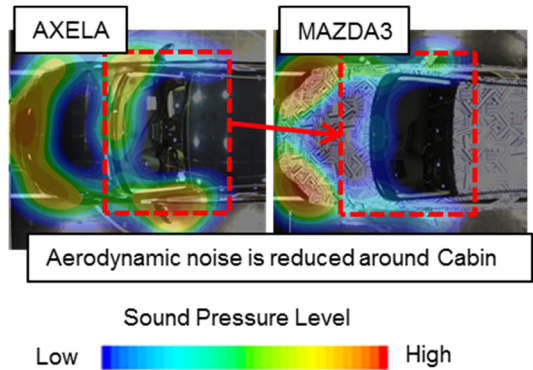


Fig. 18 Aerodynamic Noise Distribution around Vehicle

3.3 新型MAZDA3の達成状況

それぞれの横軸に、従来の開発指標、縦軸には新たに決めた各開発指標での達成状況を示す。

(1) スムーズな路面から荒れた路面への変化

横軸に、荒れた路面を走行した時の車室内の音圧レベル。縦軸に、スムーズ路面から荒れた路面に変化した時の一致性を示す。新型MAZDA3はAXELAに比べ両軸の指標とも向上させた (Fig. 19)。

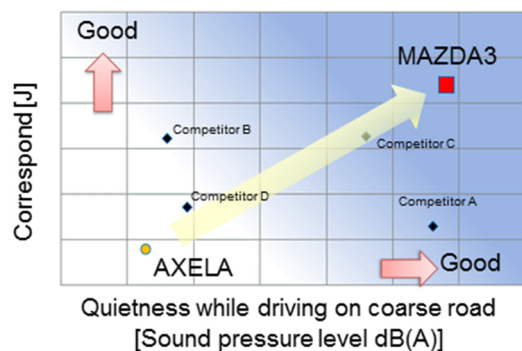


Fig. 19 Noise Change from Smooth to Coarse Road

(2) 荒れた路面からスムーズな路面への変化

横軸に、スムーズな路面を走行した時の車室内の会話明瞭度。縦軸に、荒れた路面からスムーズな路面に変化した時の一致性を示す。

新型MAZDA3はAXELAに比べ両軸の指標とも向上させた (Fig. 20)。

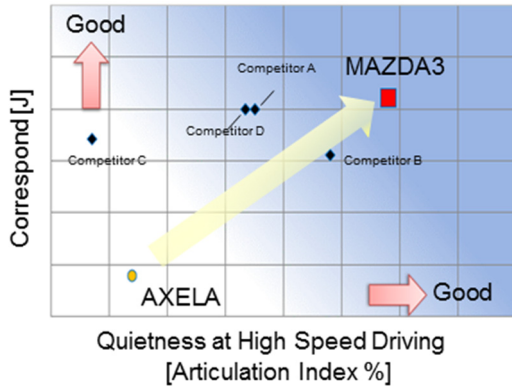


Fig. 20 Noise Change from Coarse to Smooth Road

(3) スムーズな路面を走行した時の風変動

横軸に、スムーズな路面を走行した時の車室内の会話明瞭度。縦軸に、風が変動した時の音圧レベルを示す。新型MAZDA3はAXELAに比べ両軸の指標とも向上させた (Fig. 21)。

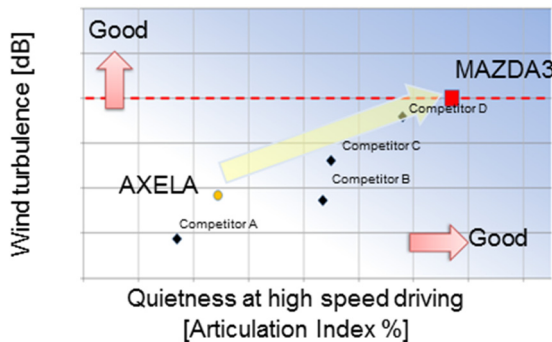


Fig. 21 Wind Noise

従来の音圧レベルの開発に加えて、路面や風などの変化に対する開発をすることで、運転に必要な情報を適切伝えることで、会話がしやすく、人が心地よく感じられる「質の高い静粛性」を実現した。

4. おわりに

以上、新型MAZDA3の静粛性開発について紹介した。今後とも、お客様にマツダ車を選び続けていただくためには、人間中心の考えの基、「質の高い静粛性」を追求し続けることが必要である。その実現に向けた、NV性能

開発技術の更なる向上に取り組んでいく。

参考文献

- (1) 永本ほか：新型CX-5の静粛性開発についての紹介，マツダ技報，No.34，p.20-24 (2017)

■ 著 者 ■



特集：新型MAZDA3

16

新型MAZDA3の熱流体エネルギーマネジメント技術 Technology of Thermal Fluid Energy Management for All-New Mazda3

久我 秀功*1 太田 健太郎*2 伊川 雄希*3 坂下 泰靖*4
Yoshiatsu Kuga Kentaro Ota Yuki Ikawa Hironobu Sakashita
西田 周平*5 溝兼 通矢*6 岡本 哲*7
Shuhei Nishida Michiya Mizokane Satoshi Okamoto

要 約

新型MAZDA3の開発では、CO₂排出量低減技術の一環として、実際の市場環境に近い走行状態で車両全体の風流れの運動エネルギーマネジメントを行い、空気抵抗の低減とサーマルマネジメント効率化の両立を目指した。この実現にむけ、フロントグリルを通過する風を用いてラジエーターを効率的に冷却するための導風構造を設定し、無駄な風を極限まで減らした。そして、アクティブエアシャッターをラジエーターの全面に配置し、シャッター開度を6段階で制御することで、走行シーン毎にエンジンルーム内の部品温度をコントロールするとともに、排出する際に生じる風流れの運動エネルギー損失が最少となる風量にコントロールした。更に、冷却に用いた風を排出する際、車両周りの風流れの運動エネルギー損失量が最少となるように構造を作り込むことで、クラストップレベルの空気抵抗係数とCO₂排出量の低減に貢献した。

Summary

Development of the All-New Mazda3 was carried out aiming at performing air flow energy management for the vehicle as a whole in a state close to the actual driving environment and achieving both Aerodynamic drag reduction and thermal management at efficiency, as part of the technologies for cutting CO₂ emissions. To achieve this, an air guiding structure was set up to cool the radiator efficiently using the wind passing through the front grill, which eventually reduced the amount of leaking wind to the utmost limit. Then, an Active Air Shutter was placed over the entire surface of the radiator, and the shutter opening degree was controlled in six steps so as to control temperatures of the parts in the engine room as well as the loss of air flow energy, with a minimum amount of air flow for each driving scene. In addition, an elaborately crafted structure designed to discharge the wind used for cooling with the least amount of energy loss was applied, which contributed to reducing the air resistance coefficient and CO₂ emissions at the class top level.

Key words : Heat・Fluid, Aerodynamic Performance, Radiator, Computational Fluid Dynamics, Engine Cooling, Temperature Control, Thermal Management

1. はじめに

自動車業界においては地球温暖化緩和策としてCO₂排出規制の強化が進められており、マツダでは実際の市場環境に合わせたCO₂の排出量削減に取り組んでいる。

特にエンジンのポテンシャルを最大限に引き出すためには走行時に発生する抵抗値を下げ、燃焼効率の高い領域を日常一般的な実用領域で拡大させる必要がある。

走行抵抗は主に空気抵抗と転動抵抗とに分けられる。時

速100kmで走行する場合、およそ8割を空気抵抗が占めるため、走行抵抗を決定する大きな要素になっている (Fig.1)。この空気抵抗はCd値で代表され、空気による運動エネルギーの損失として取り扱っている。この値が低い程、空力性能が優れていることを示す。

この空気抵抗は風流れの運動エネルギーの損失と関係性があることをマツダ技報 No.35(2018)で報告した⁽¹⁾。風流れの運動エネルギーの損失は、エクステリアデザインやアンダーフロアの構造物などの造形のほか、エンジン・トラ

*1~7 車両実研部
Vehicle Testing & Research Dept.

ンスミッション・バッテリー・エギーズト・プロペラシヤフトなど、各々の機能を最大限に発揮させるサーマルマネジメントにより決定される。

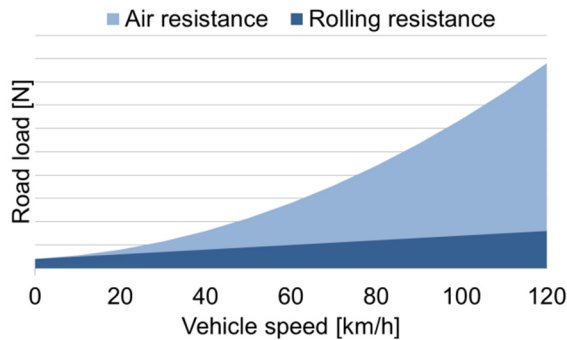


Fig. 1 Comparison of Resistance

次章では、新世代商品群の第一弾である新型MAZDA3における熱流体エネルギーマネジメント技術による、風流れの運動エネルギーの損失量低減とサーマルマネジメントの高次元での両立について述べる。

2. 空気抵抗とサーマルマネジメントの関係

本章では空気抵抗と関係性のある風流れの運動エネルギーの損失量低減と、サーマルマネジメントを高次元で両立させるための考え方について述べる。

2.1 風流れの運動エネルギーの損失低減への課題

デザイン性、およびサーマルマネジメントの要求を満足しながら、風流れの運動エネルギー損失量の低減を実現するには、車両で発生する「剥離渦」・「混合渦」・「後流渦」を抑制する必要がある。理想状態は、各渦がゼロ、すなわち、風流れの運動エネルギー損失量0である。

ノーズ先端やバンパーコーナー、取り付け部品周囲の段差などでは、風流れの剥離が生じやすい。「剥離渦」は、圧力の上昇によって物体表面から風流れが剥離する際に生じる渦を指す (Fig. 2)。

マツダは、低く伸びやかなノーズ先端や、丸みを帯びたリア周りの特徴としたデザイン (Fig. 3) を採用している。このデザイン固有の造形や、アンダーフロア部に位置する排気管や燃料タンク、サスペンションなどの部品による凹凸を克服し、風流れの運動エネルギーの損失量を改善することが課題である。

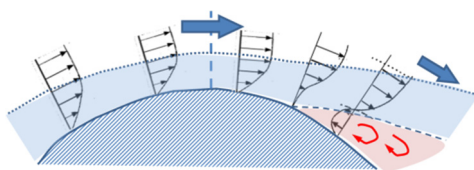


Fig. 2 Image of Separation Flow



Fig. 3 KODO-Design (All-New Mazda3)

「混合渦」はエンジンルーム内の受熱する部品の冷却に使用された風流れと、車両周りに流れている運動エネルギーの高い風とが混ざり合い発生する渦を指す。例えばラジエーターグリルを介してエンジンルームに導入された冷却風は、タイヤハウス及びトンネルなどから排出される。その際、車両周りの風流れとの間に混合渦 (Fig. 4) が発生し、風流れの運動エネルギーの損失が生じる。熱交換の為に部品近傍へ風を与えると、風流れの運動エネルギーが失われるため、少ない風で効率的に部品を冷却し、排出する風の向きと車両周りの風の向きを合わせる事が課題である。

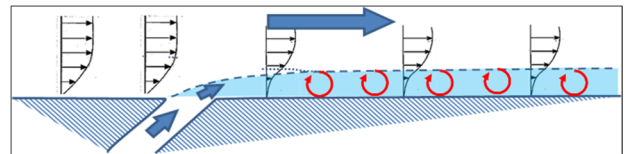


Fig. 4 Image of Confluence Flow

「後流渦」は前述の剥離渦や混合渦によって車両後端の風流れが乱れ、車両後方で上下左右の風が混ざり合うことで発生する大きな後曳き渦を指す (Fig. 5)。

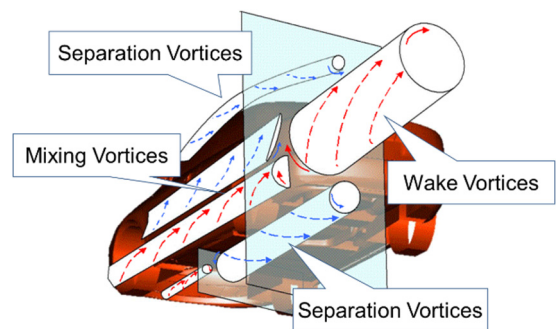


Fig. 5 Image of Wake

よって剥離渦と混合渦の抑制が風流れの運動エネルギー損失の低減のための重要課題である。

2.2 市場環境における最適な風量配分について

2.1で示したこれらの渦を低減させ、風流れの運動エネルギーの損失量をより低減させるために、市場環境を考慮し、エネルギー損失の低減の可能性を検討した。

例えば、エンジンルーム内へ導かれる冷却風量は、エンジンや排気管、トランスミッションなどの要求放熱量によって変化する。例えば、高外気温下での走行、ポートトレーラーやキャンピングトレーラーの牽引などの高負荷走行時においては、要求放熱量が高く、エンジンルームへ積極的に風を引き込んでいる。

一方で、日常一般的な市街地や郊外走行時の要求放熱量は少なく、冷間始動時においてはエンジンのパフォーマンスを最大限に引き出せるよう暖機に熱エネルギーを使い、放熱要求は限りなくゼロに近づく。その要求に合わせた風の活用事例として、前モデルから採用しているアクティブエアシャッター（以下、AAS）の利用が挙げられる。AASを開閉制御し、エンジンなど発熱部品の温度に合わせ、適切な冷却風量を調整している。これにより、常にエンジンや部品類の冷却に必要な取り込み風量へ抑えることができ、冷却風の排出部で生じる風流れの運動エネルギーの損失を抑えている。

しかし、前モデルでは、以下の課題があった。

(1) フロントグリルからラジエーターまでの間で、ラジエーターを通過せず、有効に使えていない不要な風が存在する。この不要な風を低減することができれば、運動エネルギーの損失を低減させるだけでなく、ラジエーターへ取り込む風量を増加させ、ラジエーターの冷却効率を上げることができる。

(2) 前モデルで採用しているAASは、ラジエーター下側半分に設定され、開閉の制御を全開と全閉の2段階制御としている。その結果、グリルから取り込む風量を低減し、AASを採用していないモデルと比較し、Cd値を約3%改善した。さらに、日常一般的な常用域において、グリルから取り込む風量を細かく制御することができれば、エンジンルーム内の部品を適温管理しながら、過剰な取り込み風量により失われるエネルギー損失を低減することができる。

上記課題に対し、風流れの運動エネルギーの損失量低減に向け車両周りの剥離渦抑制とともに、混合渦を抑制するために（Ⅰ）不要な風をエンジンルームへ入れずシーンごとに必要最少となる風量へ制御し、（Ⅱ）ラジエーターで冷却に使用した風を利用してエンジンルーム内の部品を効率よく冷却する、といった流量配分コンセプトを掲げCFDを用いて開発した技術を次章で述べる。

3. 風流れの運動エネルギー損失量低減技術

3.1 剥離渦の抑制技術

アンダーフロア周りで発生する剥離渦を抑制し、風流れの運動エネルギーの損失量を低減した実例を以下に示す。

まず、フロアアンダーカバーでフロア表面段差を減らし、フロア面の平滑度を上げることで剥離渦を低減した（Fig. 6）。

その上で、①リアサスペンションカバー、②サイレンサーカバー、③リアバンパーカバー（Fig. 7）を設定し、流れ方

向の圧力勾配を低減させて風流れの剥離を抑え、アンダーフロア周りの剥離渦による風流れの運動エネルギーの損失量を低減させた。

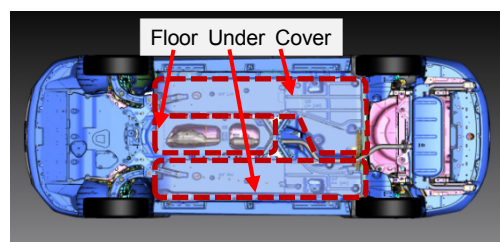


Fig. 6 Aerodynamics Optimization around Floor

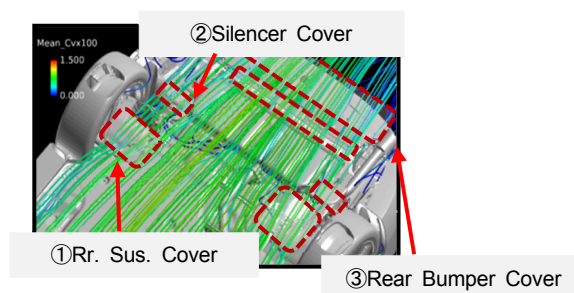


Fig. 7 Flow Stream Line around Floor

3.2 混合渦抑制技術

エンジンルーム内へ導かれる冷却風量は、主にエンジン・トランスミッション・バッテリー・エキゾースト・プロペラシャフトなどの部品からの要求放熱量に応じて決定する。しかし、部品レイアウトを考慮せず単に風量を確保するだけでは、過剰な風量による混合渦の増大により、風流れの運動エネルギーを無駄に損失させてしまう。例えば、熱源から遠くにレイアウトされているウォッシュータンクなどは冷却の必要がないが、そこへ冷却風を使用すると無駄に流れの運動エネルギーを使用してしまうことになる。よって、数ある部品の中から冷却したい部品を抽出し、集中的に冷やすことで無駄な風流れの運動エネルギーを発生させない手法を考え、流路の通風抵抗を制御することで通風経路を最適化した。

ラジエーターの場合、通風抵抗が高いことからバンパーに流入した風は、ラジエーター手前から冷却系路外に漏れ、ラジエーターを通過する風量が減り、冷却不足に陥る。そこでラジエーター周囲に、導風ダクトを設けてサイドの通風抵抗を高めることなので、で風がラジエーターへ集中するように風量配分を制御した（Fig. 8）。

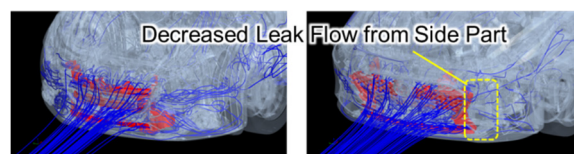


Fig. 8 Flow Streamlines around Front Grille

排気管周囲も同様に、エンジン上部に設定する見栄えカバーを拡大し、通風抵抗を下げ、直接に風を排気管へ送る。更にスプラッシュシールドカバーを設定することで、エンジンルーム内の圧力分布を変え、冷却風が排出される場所をトンネル部へ集中させ、熱源である排気管や周辺部品を効率的に冷却できるようにした。

このように、少ない風量で効率的に冷却することで、エンジンルーム内での風流れの運動エネルギーの損失量を低減した。更に、冷却風を排出する際に発生する混合渦による、風流れの運動エネルギーの損失量を低減させるために、トンネル部にアンダーカバーを設定し、冷却風の排出方向をアンダーフロアの流れと合わせることで、冷却風とアンダーフロア流れにより生じる、風流れの運動エネルギー損失量を低減させた (Fig. 9)。

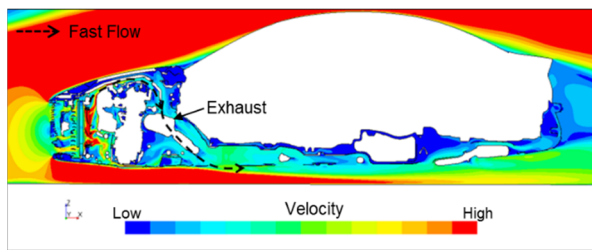


Fig. 9 Flow of Engine Room

3.3 流入空気量制御技術

新型MAZDA3では、ラジエーター全面にAASを設定した。ハーフタイプからフルタイプのAASにすることで、エンジンルームへの導入風量を40%まで低減を可能とした。これにより、冷間時の暖機中に冷却水が回っていない段階で、不要な取り込み風量を低減し、暖気中の風流れの運動エネルギーの損失量を大幅に低減させた。更に、開度条件を6段階まで細かく制御することで、緻密にエンジンルームへ取り込む風量を調整し、常にエンジンからの必要最少風量に制御することを可能とした (Fig. 10)。

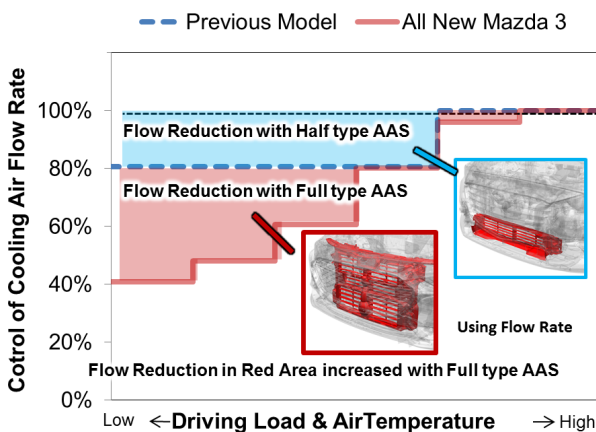


Fig. 10 Control Air Flow with AAS

4. 新型MAZDA3のCd低減効果

前章までに述べた制御技術及びマツダ技報No.35 (2018) で述べた技術を新型MAZDA3へ適用することにより、ボディーサイド・アンダーフロアの風流れの運動エネルギーの損失量を低減させた (Fig. 11, 12)。

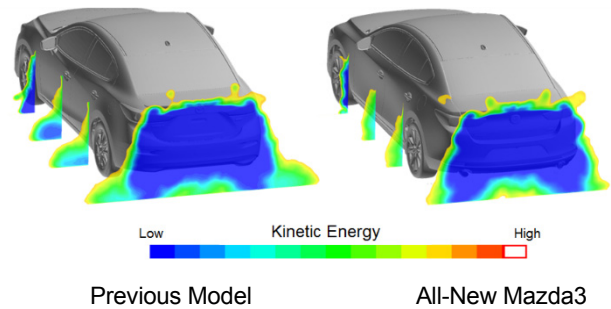


Fig. 11 Visualization of Kinetic Energy Loss

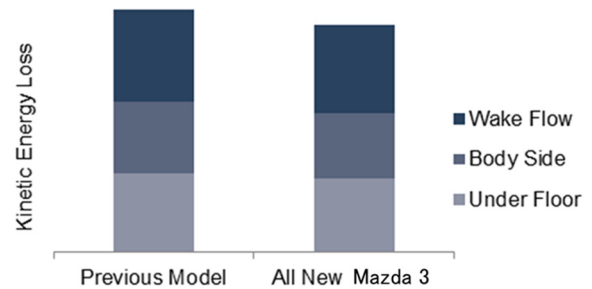


Fig. 12 Comparison of Kinetic Energy Loss between Previous Model and All-New Mazda3

これにより、後流渦の低減が実現でき、上記ボディーサイド・アンダーフロアを合わせた車両全体の風流れの運動エネルギーの損失量を旧型アクセラと比較しハッチバックで7%、セダンで11%低減させることができた。その結果、空気抵抗係数 (Cd値) はクラストップレベルを実現することができた (Fig. 13, 14)。

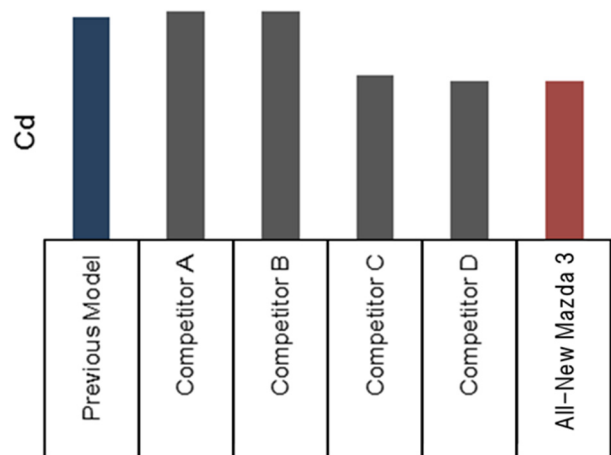


Fig. 13 Aerodynamic Drag Coefficient of All-New Mazda3 and Competitors (Hatchback)

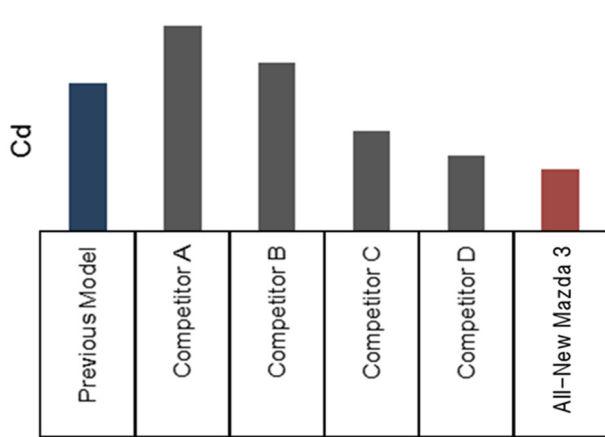


Fig. 14 Aerodynamic Drag Coefficient of All-New Mazda3 and Competitors (Sedan)

5. おわりに

新型MAZDA3では、風流れの運動エネルギー損失による評価手法を用いて剥離渦、混合渦の抑制を行った。特に混合渦領域に対しては、エンジンルーム内流れの流量配分技術を構築し、必要最少の冷却風量に抑え、冷却風排出ベクトルを車両周りの流れと合わせる構造とすることで、風流れの運動エネルギー損失量を低減した。その結果、「魂動デザイン」を実現しつつ、クラストップレベルとなるCd値を達成し、日常一般的な実用領域におけるCO₂排出量の低減が可能となった。これにより風流れ制御技術による開発コンセプトおよび流量配分技術の量産適用の効果を検証することができた。今後の開発においても同技術を駆使し、お客様に選ばれるクルマ造りに貢献するとともに、更なる熱流体エネルギーマネジメント技術の進化に努める所存である。

参考文献

- (1) 岡本哲ほか：次世代商品群の空力・空力騒音性能開発，[マツダ技報, No.35, pp.21-25 \(2018\)](#)

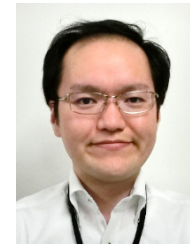
■ 著 者 ■



久我 秀功



太田 健太郎



伊川 雄希



坂下 泰靖



西田 周平



溝兼 通矢



岡本 哲

特集：新型MAZDA3

17

新型MAZDA3のブレーキフィールの開発 Development of All-New Mazda3 Brake Feeling

池見 清*1 加村 孝信*2 開原 真一*3
Kiyoshi Ikemi Takanobu Kamura Shinichi Kaihara
丹羽 正浩*4
Masahiro Niwa

要 約

マツダは新世代商品群の第一弾として、新型MAZDA3を発表した。新世代商品群ではカーライフを通じて人生の輝きを人々に提供すべく、人間の身体特性を考慮してビークルダイナミクスを再検討し、人馬一体の実現と環境性能の両立を図った。ブレーキ性能においても、クルマをコントロールするために必要な減速度やペダル踏力の物理量について、人間の感覚量と一致させる性能目標を定めた。次に、その性能目標を達成するための部品特性を再検討した。新型MAZDA3のブレーキは、シーンに応じて必要な減速度までスムーズに立ち上げ、かつ緩めることが直観的にでき、渋滞の中や駐車場でも扱いやすく、同乗者にも優しいブレーキフィールリングを達成した。また、M Hybrid搭載モデルに採用した回生協調ブレーキシステムにおいても同等のブレーキフィールを達成し、かつ回生ブレーキ量の増減に応じて自動的に摩擦ブレーキ量を協調させることで、違和感の少ないブレーキフィールリングを実現した。

Summary

Mazda released New Mazda3 as a first one of the new generation products. Mazda intends to brighten people's lives through car ownership. In order to do this, Mazda has planned Jimba-Ittai and coexistence with the environmental performance by reconsidering a vehicle dynamics based on human function. In the brake system, the performance target had been established so that physical value are conformed to human feeling like a deceleration or a pedal force. And then, parts properties were reexamined to achieve the performance target. The brake system of New Mazda3 had been realized that it makes easy to apply and/or release to desired deceleration smoothly in every situations, easy to control in traffic jam or at a parking lot, and gentle to passengers. The Regenerative-Friction Brake Coordination System has been adopted to M Hybrid model in order to achieve the same performance and natural feeling as normal model.

Key words : Vehicle dynamics, Human engineering, Regenerative-friction brake coordination, brake system, Driver model, Brake feel, Jimba-ittai

1. はじめに

自動車業界は今、環境性能（CO₂、燃費低減）の更なる向上に加えて自動運転化技術の実現やライドシエアなど、大きな変革期を迎えている。そのような中、マツダはカーライフを通じて人生の輝きを人々に提供するため、ビークルダイナミクスについて、人間の身体能力を考慮して再検討し、人馬一体を実現しようとしている。ここではビークルダイナミクスの3大要素である、走る、曲がる、止まるの「止まる」について、人馬一体と環境性能を高次元でバ

ランスさせた新型MAZDA3のブレーキを紹介する。

2. 新世代商品群で目指すブレーキ性能

2.1 基本の考え方

人間は身体に加わる躍度（加速度の変化）に対して、本能的に頭の位置を保つようにバランスを取ろうとする。クルマが減速している時も同じで、意図しない急な減速や減速度の変動により頭のバランスが取れないと、不安感や不快感、クルマ酔いなどにつながる（Fig. 1）。昨今のクルマでは軽い踏力でも高い減速度が発生するものがあり、ド

*1~4 操安性能開発部
Chassis Dynamics Development Dept.

ライバーに良く効くという印象を与える半面、微小な調節には神経を使う状態になっている。特に、駐車場や渋滞した交通流での车速調整や停止時に、思いがけず強いブレーキがかかってしまったり、思ったところに停止できなかったりするため、ドライバーがこのような緻密な操作をしようとすれば心理的にも身体的にもストレスを感じる。新世代商品群では、この点を改善するために、人間がペダル操作力や減速度をどのように感じているかを研究し、ドライバーの操作に対して意図したとおりの減速度変化を発生し、また身体が自然にバランスをとれるような減速度を発生させるブレーキとすることを基本とした。

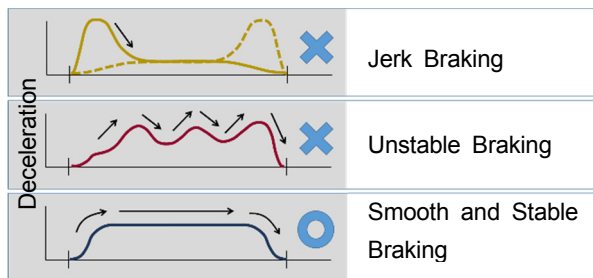


Fig. 1 Image of Braking Pattern

2.2 人間中心で導いた踏力-減速度特性

ドライバーはクルマを減速させるとき、知覚情報から目標物(停止線や前走車、障害物など)との距離の変化をコントロールしようと、ブレーキペダルを操作する。この時、ドライバーの制動初期のペダルの操作量は、経験からの予測で決まり、過不足があれば操作量を調整する。この過不足をできる限り小さくするために、以下のステップでブレーキの特性を定めた。

(1) 人間にとってリニアな入力と出力の関係

まず、実際の減速度Gtと人が感じる減速度Gpの関係を、マグニチュード推定法^(※1)で調べた。助手席に乗せた被験者に基準となる減速度を体験させた後、基準とは異なる複数の減速度を体感させ、それぞれの減速度を基準の何%に感じたかを答えさせた。これを人間が感じる減速度Gpとし、同時に計測した実際の減速度をGtとして、GpとGtの関係を得た。例としてFig. 2に一人の被験者の結果を示す。

次に、実際のペダル踏力Ftと人間が感じるペダル踏力Fpの関係を調べるため、運転席に座った状態でのペダル操作感覚を再現できるペダルシミュレーターを制作し、被験者実験を行った。ある基準となる踏力でペダルを踏ませ、その後基準に対して0.5から2倍の範囲で指定した踏力でペダルを踏むように指示し、同時に実際の踏力を計測しFpとFtの関係を得た。例としてFig. 3に一人の被験者の結果を示す。

※1 マグニチュード推定法

被験者に基準となる刺激を与え、これとの比較で比較対象となる刺激の感覚的な大きさを数値で推定させる方法

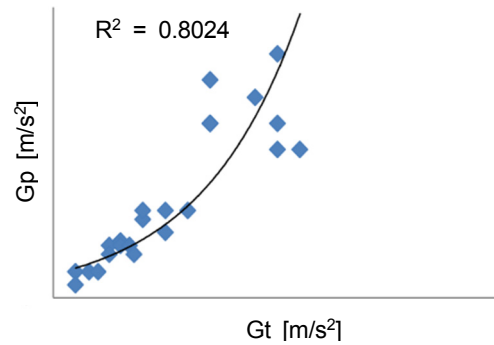


Fig. 2 Relation between Gt and Gp

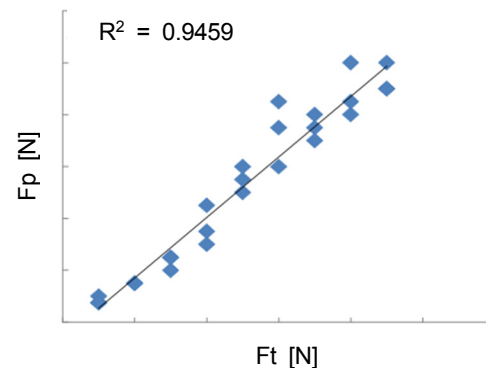


Fig. 3 Relation between Ft and Fp

これらの結果から、人間は加速度を物理的な加速度に対して指数関数的に感じ、一方でペダル踏力については物理量と感覚量は直線的な関係になっていることが分かった。よって、人間が感覚的にリニアと感じるペダル踏力Ftと減速度Gtの関係は以下の式で表される。

$$Gt = A * \log(Ft) + B$$

なお、本研究で行った全ての被験者実験は、試験開始前にインフォームドコンセントを得て行っている。

(2) 適切な踏力と減速度の勾配

踏み始めのペダル踏力と減速度の勾配の適正値を検討するために、人間特性を組み込んだシンプルなドライバー-車両モデル(Fig. 4)を構築し、ドライバーがコントロールしやすい減速度の立ち上がり勾配を調査した。

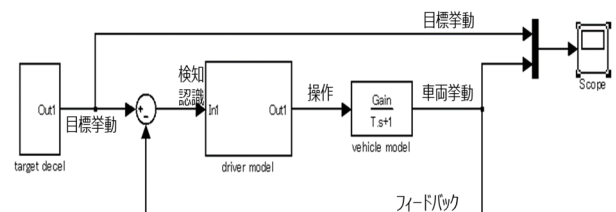


Fig. 4 Driver-Vehicle Model

ドライバーモデルは、制御因子として減速度弁別値、踏力弁別値及び反応時間を持ち、車両モデルは踏力-減速度特性と応答遅れを制御因子としてもつ。ドライバーモデルに与えるタスクは、一般的な走行シーンとして信号停止を想定した0.5秒で目標減速度1.4~2.6m/s²を発生させることとし、ドライバー誤差因子として減速度弁別値に±50%、踏力弁別値に±30%、反応時間に±15%、車両誤差因子として応答遅れに±30%の誤差を与えた。この条件にて目標減速度に対するドライバー制御減速度の誤差を調べた結果、踏力の増加に対して減速度の増加が小さいと目標減速度への到達が遅れ (Fig. 5a)、適度であると誤差は小さくなり (Fig. 5b)、大きすぎるとドライバー制御がハンチングする (Fig. 5c) 結果を得た。

■ Target Deceleration
■ Driver Controlled Deceleration

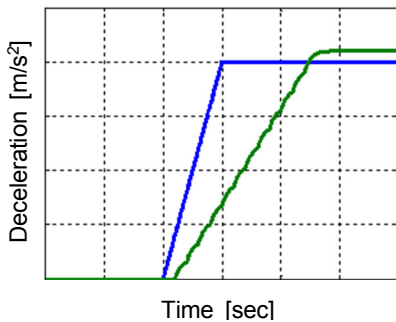


Fig. 5a Driver-Vehicle Model Simulation 1

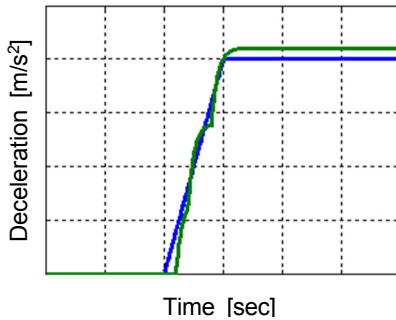


Fig. 5b Driver-Vehicle Model Simulation 2

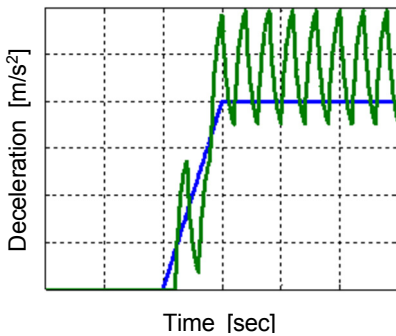


Fig. 5c Driver-Vehicle Model Simulation 3

これらの結果は、実際のドライバーの操作では、大きく応答が遅れた場合には、「思ったよりも減速度が出てこない場合には踏み増す」状況になり、ハンチングした場合には「思ったよりも減速度が出てしまう」という状況になると解釈できる。よってこの検討結果から踏み始めの踏力-減速度特性のおおよその適値を設定した (Fig. 6)。

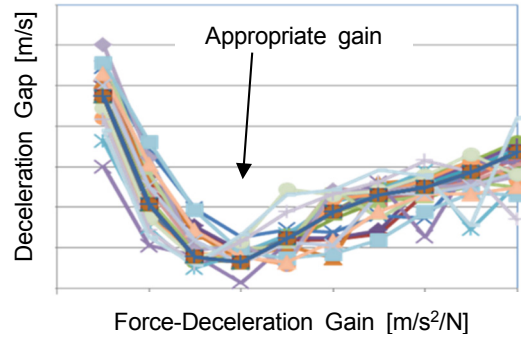


Fig. 6 Gap of Driver Control

以上の検討で求めた踏力と減速度の勾配と2.2 (1)での検討結果から、人間の感覚に合う踏力-減速度特性を決定した (Fig. 7)。

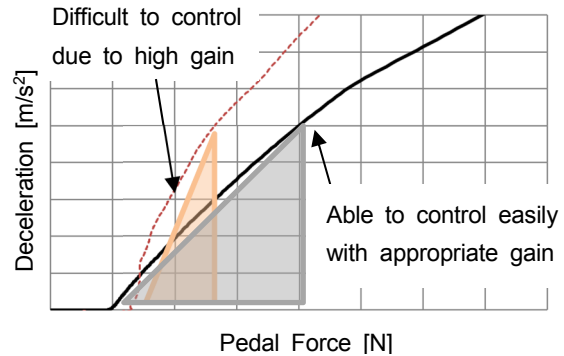


Fig. 7 Pedal Force - Deceleration

(3) コントロールしやすい踏み応え (剛性感) 特性

ブレーキペダルに踏力を加えるとペダルがストロークする。この踏力とストロークの比率 (以下、ペダル剛性) 及びこの時に発生する減速度との関係もブレーキのフィールに影響を及ぼす特性である。Fig. 8は減速度とペダル剛性の関係を表している。踏み応えを感じ始めるポイントである下に凸となる剛性カーブの頂点を、できるだけ低い減速度に位置させることでブレーキの効き始めと一致させ、そこから減速度が高まるにつれてペダル剛性がリニアに上がっていくように設定した。これにより、ドライバーはブレーキが効き始めるポイントをペダル剛性の明確な変化から感じ取ることが可能となり、かつ剛性の増加に伴い減速度が増加していくため、緻密なコントロールが容易となる。

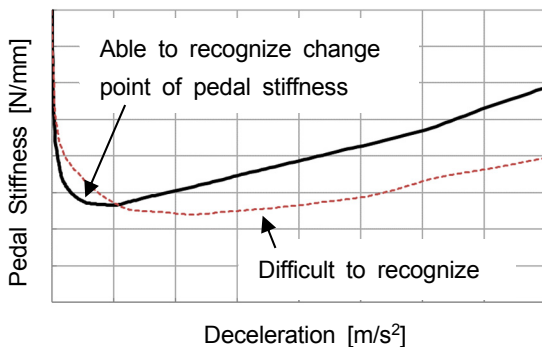


Fig. 8 Pedal Stiffness

3. 新型MAZDA3での実現

3.1 機械特性を実現する部品の具体化

ブレーキフィールの設計要素として最も寄与が高く、かつその自由度も高いのが、バキュームブースター (Vacuum Booster 以下、VB) のパワーアシスト特性である。新型MAZDA3用に設計したパワーアシスト特性のイメージをFig. 9に示す。

まず、Fig. 8で示したペダル剛性の明確な変化点を作り、かつ減速度が出始めるポイントと一致させるために、ジャンプアップ量をブレーキシステムの遊びを詰めるのに必要な最小限の値に設定した。次に、Fig. 7で示した踏力-減速度の特性を実現するために、ジャンプアップ領域とアシスト領域をつなぐ曲率とアシスト倍率を決定した。

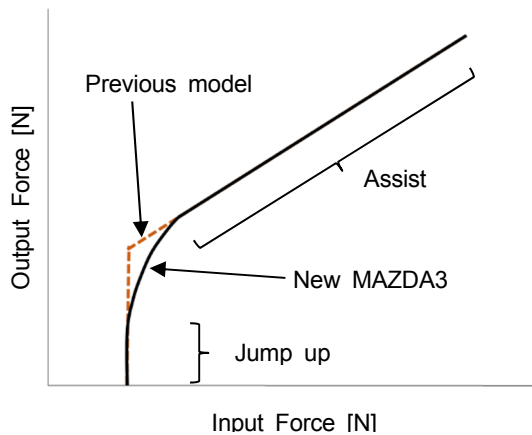


Fig. 9 Image of Vacuum Booster Assist Characteristic

これらを具体化する手段をFig. 10に示す。この図は、VB非作動時 (非制動時) の状態を示している。ゴム部品であるリアクションディスクとプランジャーには隙間 (Clearance) が設けてあり、この大きさがジャンプアップ量を決定する。ドライバーがペダルを操作するとプランジャーが図の左方に移動し、リアクションディスクに接触するとアシスト領域に入る。ジャンプアップとアシストを

スムーズな曲率でつなげるために、プランジャーの形状を先端の中心部分の平坦部分を小さくし、そこから外周に向かって緩やかなカーブを描いて丸みを持たせる形状とした。アシスト倍率は、リアクションディスクの面積と、プランジャーとリアクションディスクが接触する面積との比で決定されるため、この接触面積をペダルの踏み込みとともに徐々に拡大させることで、ジャンプアップ領域とアシスト領域を曲線で結ぶことができる。これにより、スムーズかつ違和感のないペダル踏力及びペダル剛性と減速度の関係を実現した。

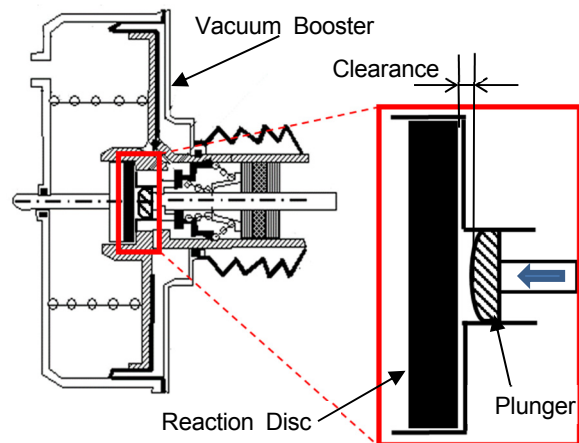


Fig. 10 Plunger Shape (Image)

3.2 環境技術との両立

(1) 回生協調ブレーキの採用

エネルギー回生機能をもつM Hybrid搭載機種では、Fig. 11に示すように、制動時に摩擦ブレーキによって発生するブレーキトルクに加えて、エネルギー回生によるブレーキトルクが発生する。しかし、この回生ブレーキトルクはドライバーの意図に関係なく増減するため、その強弱によって減速度が変動する。これは、ドライバーが意図した減速度からの外れにつながるため、ブレーキ調整のしにくさを生じさせる。

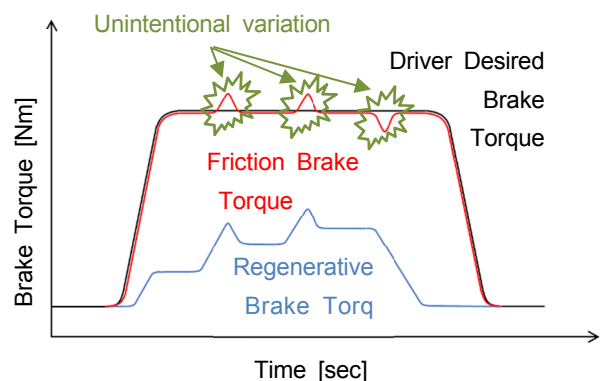


Fig. 11 Influence of Regenerative Brake Torque

この問題を解決するためには、回生ブレーキトルクの変動量に応じて摩擦ブレーキのトルクを自動的に増減し、ドライバーが意図する制動トルクとトータル制動トルクを一致させる必要がある。しかし、従来の液圧制御システムでは液圧を変化させるとブレーキペダルの踏み応えに違和感が発生してしまう。このため、新型MAZDA3ではM Hybrid搭載機種専用の回生協調ブレーキシステムを新たに開発した。そのシステム模式図をFig. 12に示す。

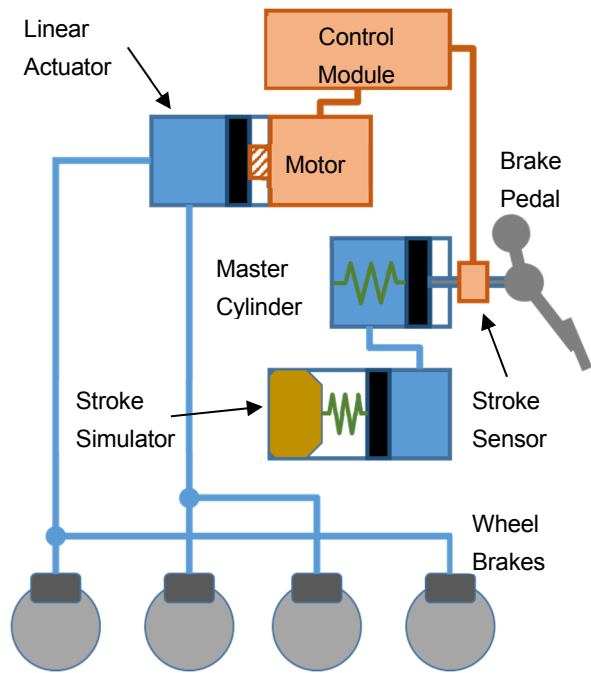


Fig. 12 System Scheme

このシステムでは、マスターシリンダー及びストロークシミュレーターでブレーキペダルの剛性感を形成し、ストロークセンサーにて検出したブレーキペダルのストロークに応じた液圧をリニアアクチュエーターで発生させ、ホイールブレーキに発生する摩擦ブレーキトルクをコントロールしている。つまり、ドライバーが操作するブレーキペダルと液圧発生源とが機械的に独立しているため、制動中にコントロールモジュールが液圧を変化させてもブレーキペダルのストロークが変化せず、ドライバーが感じている踏み応えは全く変化しない。

(2) 回生協調ブレーキのブレーキフィール

回生協調ブレーキにおいても、実現するブレーキフィールはVBシステムと同一であることを目指した。その手段として、まずストロークシミュレーターの静的なペダル踏力とペダルストロークの関係 (F・S) をバキュームブースター仕様のF・Sと等価に設計し、次にFig. 7, 8に示した減速度特性に沿うように、ペダルストロークと液圧の関係をプログラムした。

(3) 走行抵抗低減

ブレーキによる走行抵抗の低減は環境性能との両立を達成する上で大きな課題の一つである。一般に、ディスクブレーキでは非制動時にもブレーキパッドとブレーキディスクがわずかに接触しているため、ごく微小な制動力が発生し走行抵抗となっている。また、強めのブレーキをかけた後はブレーキパッドとブレーキディスクのクリアランスが小さくなるため、走行抵抗が増大する。一方で、このクリアランスが大きくなると、ブレーキの遊びストロークが増大し、ブレーキ踏み始めのフィーリング悪化を招く。このクリアランスを常に適値に保つため、キャリパーのピストンシールとピストンシールが収まるシール溝 (Seal Groove) の形状をキャリパーサプライヤ様と共同で開発した。具体的には、ピストンとピストンシールの摩擦係数が安定するようピストンシールの表面粗さを決定した。また、シール溝の形状を、Fig. 13のA部に示すようにラウンドさせることでピストンシールの変形量を低液圧から高液圧までコントロールし、ピストンクリアランスを安定させた。

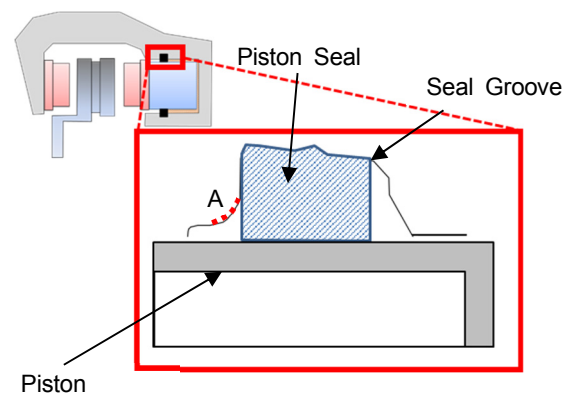


Fig. 13 Piston Seal Groove (Image)

その結果、ブレーキ踏み始めのブレーキフィールを損なうことなくFig. 14に示すように走行抵抗低減を実現し、燃費改善、排出CO₂の低減に貢献した。

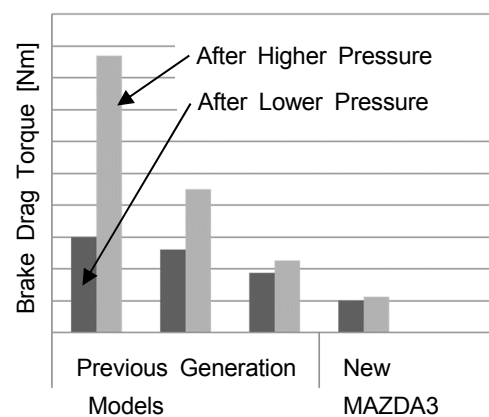


Fig. 14 Improvement of Brake Drag Torque

4. 新型MAZDA3のブレーキフィール

(1) 通常ブレーキ時のブレーキフィール

前章までに述べてきた目指すブレーキフィールを実車レベルで実現していることを、定量計測を行い確認した。その結果をFig. 15, 16に示す。

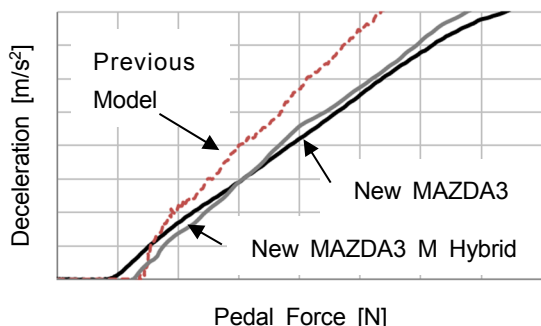


Fig. 15 Characteristic of Pedal Force and Deceleration

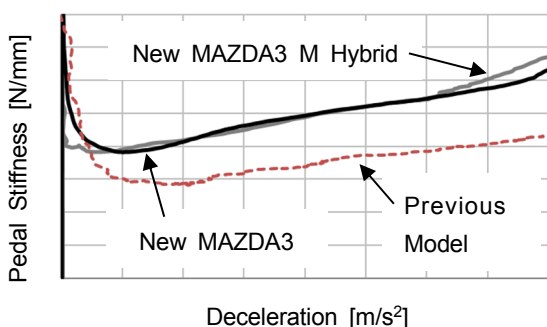


Fig. 16 Characteristic of Deceleration and Pedal Stiffness

Fig. 15の踏力-減速度特性に示すように、前モデルが低減速度域で急峻に上昇しているのに比べ、新型MAZDA3では低踏力領域から緩やかにカーブを描いて減速度が上昇する特性になっている。また、回生協調ブレーキシステムを採用するM HybridモデルとVBを採用するモデルでの特性差も最小限となっている。

Fig. 16に示すペダル剛性のカーブでは、VB仕様、回生協調ブレーキ仕様のどちらも極小点がより低い減速度に位置しており、ブレーキの踏み応え変化点とブレーキが効き始めるポイントがほぼ一致していることを確認した。更に、ペダル剛性のカーブは、その後直線状にねらいどおりの傾きをもって上昇している。これにより、ペダルの踏み応えの増減が、減速度の増減に対して感覚として1:1となっていることを確認した。

また、実車でのフィーリング評価結果を以下に列挙する。

- ・意図した減速度を意識せずに発生できる
- ・減速度をスムーズに立ち上げ、緩めることができる
- ・停止線などに容易にびたりと止めることができる
- ・駐車場や渋滞の中でも、扱いやすい
- ・同乗者にもやさしい（頭を揺らさない）運転ができる

以上より、2章で設定したねらいのブレーキフィールを実車レベルで実現していることを確認した。

(2) 回生協調時のブレーキフィール

詳細の評価結果は割愛するが、トランスミッションの変速や回生量の変動、及びエンジン本体によるさまざまな減速トルクの変化を、パワートレイン、回生協調ブレーキシステムそれぞれで細やかな制御を実施することで、不快に感じる頭の揺れを人間が感じ取りにくいレベルまで抑制することができた。

5. おわりに

新世代商品群で共通して目指すブレーキフィールは、その第一弾である新型MAZDA3で実現させることができた。

しかし、今後もさらなる環境性能向上に向けた走行抵抗低減を実現しつつ、ブレーキ性能も進化を続ける必要がある。今回達成した性能は、今後続く新世代商品にも進化させながら継承し、世界のベンチマークとなるブレーキフィールの実現を目指す。

■ 著 者 ■



池見 清



加村 孝信



開原 真一



丹羽 正浩

特集：新型MAZDA3

18

新型MAZDA3の衝突安全性能 Passive Safety of All-New Mazda3

竹村 征樹*1 Masaki Takemura	木戸 啓人*2 Hiroto Kido	石川 靖*3 Yasushi Ishikawa	川本 篤史*4 Atsushi Kawamoto
井上 伸生*5 Nobuo Inoue	田口 征吾*6 Seigo Taguchi	鬼頭 応時*7 Masatoki Kito	丸山 勉*8 Tsutomu Maruyama

要約

マツダでは「走る歓び」と「優れた環境・安全性能」を目標に、安全・安心なクルマと社会の実現を目指した商品開発を実施している。その中で、衝突安全性能開発は、安全性能と軽量化という背反する課題を両立させるために、MBD (Model Based Development) を駆使して車両構造を開発している。SKYACTIV-VEHICLE ARCHITECTUREに代表される車体開発では、高精度CAE 技術を用いて、衝突荷重を効率的に分散させるマルチロードパスを進化させた新しい構造を作り上げた。

新型MAZDA3では、各国の衝突安全法規制をクリアするだけでなく、更に高いレベルの衝突安全性能を目指し、衝突安全アセスメント (New Car Assessment Program : NCAP) で世界トップレベルの性能評価を得ることに加え、市場におけるさまざまな事故・傷害形態の分析と人間研究を軸として、万一の事故の際に乗員や歩行者をしっかりと保護することを目標として開発した。

Summary

Aiming at safe and secure cars and society, Mazda is striving to realize “excellent environmental and safety vehicle performance” and “driving pleasure”. For crash safety, Mazda uses MBD (Model Based Development) in vehicle structure development to achieve the two conflicting properties that are light weight and safety performance at a high level. In vehicle body development featured by Skyactiv-Vehicle Architecture, a new body structure was developed by using high-accuracy CAE Technology, which is an evolution of a multi-load path structure that efficiently disperses collision loads.

All-New Mazda3 aims to achieve higher level crash safety performance while meeting each market's safety regulations. The car aims to get the world-top rating in the New Car Assessment Program (NCAP) and securely protect vehicle occupants and pedestrians at an accident based on human studies and analyses on various accidents/injuries occurred in the markets.

Key words : Safety, Passive Safety, Energy-Absorbance, Injury Mechanism, Vehicle Development, Platform, Body Structure, Weight Reduction, CAE

1. はじめに

交通事故による死者数は、日本では減少傾向にあるが世界的にも依然として大きな社会問題であり、更なる衝突安全性能の向上が求められている。そのため、新世代商品群では、万一の事故の際に乗員や歩行者をしっかりと保護するため、市場におけるさまざまな事故・傷害形態の分析と人体における傷害発生メカニズム (人間研究)

を軸として開発した。

また、深化した魂動デザイン、意のままに操る楽しさを実現するために、最少の潰れストロークを、最軽量で達成するための進化に取り組んだ。進化のポイントは、理想の車体潰れパルス (減速度) と内装パルスを実現するために、MBD (Model Based Development) モデルによって、荷重と変位をマルチロードパスで自在にコントロールする技術にも取り組んだ。

*1~8 衝突性能開発部
Crash Safety Development Dept.

新型MAZDA3では、車体モデルは元より、ダミー（人体を模擬した計測用人形）モデル、内装・乗員保護装置（エアバッグやシートベルトなど）モデルを組み合わせ、車体変形挙動から乗員傷害値まで予測可能なCAE技術によって、世界トップレベルの衝突安全性能の実現を目指した。そのために、強固な超高張力鋼板を採用しつつエネルギー吸収効率を高めたボディー構造や、傷害を減らすために人間の特性に基づいて開発した乗員保護及び歩行者保護構造などを取り入れ、衝突安全性能を大きく進化させた新世代車両構造技術SKYACTIV-VEHICLE ARCHITECTUREを採用した。

本稿では、衝突安全性能と軽量化を高次元で両立させたSKYACTIV-VEHICLE ARCHITECTUREと高い乗員保護性能及び歩行者保護性能を備えた安全装備を、代表的な衝突形態である前面衝突、側面衝突、後面衝突、歩行者保護衝突について紹介する。

2. 前面衝突性能開発

2.1 前面衝突時の車体骨格構造

新型 MAZDA3 では、前面衝突への対応として、車体は、Fig. 1 に示すエリアで、(1) 高効率エネルギー吸収構造と(2) 高強度キャビンを実現した。さまざまな衝突形態に対応するため、先代モデルでも採用していたマルチロードパス構造を更に進化させた。

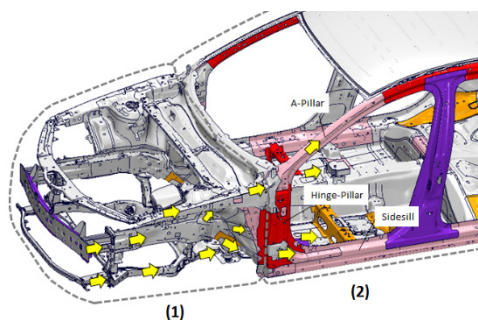


Fig. 1 Multi-Load-Path Structure for Frontal Crash

(1) 高効率エネルギー吸収構造

Fig. 2 に示す左右端を延長したバンパービームとペリメータービームで、相手車の骨格部品とのすれ違う事故での衝撃の軽減を目指した。そのために、ペリメーターメンバーの左右端には、オフセットした相手車のような衝突物とのラップ量の少ない衝突時に、ロードパスを効率的に導くエクステンション構造を採用した。また、衝撃をしっかりと受け止めてからゆるやかに減速させるフロントフレームのエネルギー吸収レイフォースメント構造¹⁾により、高いエネルギー吸収効率を実現した (Fig. 3)。

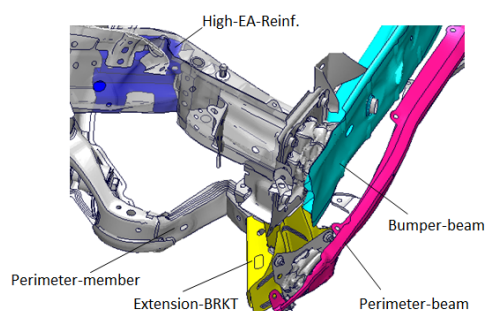


Fig. 2 Energy Absorption Structure of Frontal Crash

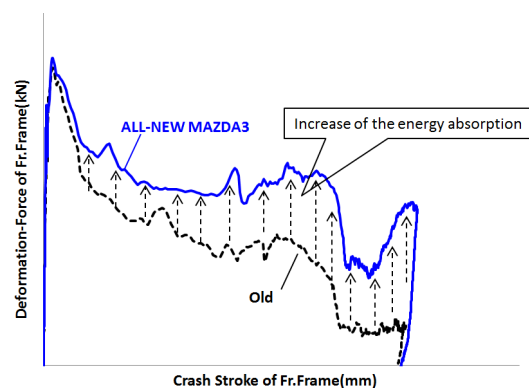


Fig. 3 Performance of High-Energy Absorbing Frame

(2) 高強度キャビン

Fig. 4 に示すように高強度キャビンは、フロントフレームとヒンジピラー、ヒンジピラーとサイドシル、エプロンリアとヒンジピラーのロードパスを新たに設定して強化し、ボルト結合や SW 点数の最適化によって、接合も強化した。また、超高張力鋼板の採用比率を高め、980MPa 以上の超高張力鋼板の使用比率は、先代モデルの約 9%から約 30%へとアップさせた。中でも、A ピラーやヒンジピラーには、1,310MPa 級の超高張力鋼板は車体構造用冷間プレス部品として世界で初めて採用し、サイドシルなどの 1,180MPa 級と合わせて、軽量かつ高強度なボディーを造り上げた。これらを実現するために、新たに開発した超高強度鋼板の特性や SW、ボルト部の破断リスクを高精度で評価できる CAE 技術を確立した。

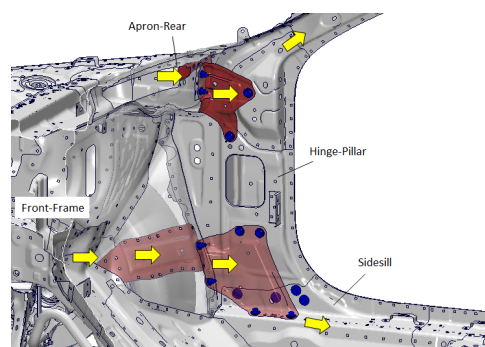


Fig. 4 Cabin Structure for Frontal Crash

2.2 前面衝突時の乗員保護装置

(1) SRSエアバッグシステム、シートベルト

新型MAZDA3では、運転席&助手席エアバッグ、カーテン&フロントサイドエアバッグを標準装備した上で、膝前周りに展開する運転席ニーエアバッグをマツダで初めて採用した (Fig. 5)。ニーエアバッグにより、衝突時に乗員の前方移動を抑えることで腰ベルトにかかる力を低減し、胸部や腹部の傷害軽減を実現し、同時に脚部の傷害も軽減した。

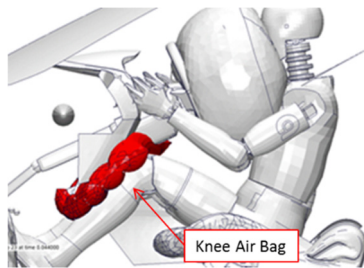


Fig. 5 Driver Knee Air Bag

(2) ラップアンカー付き新型サブマリン抑制シート

新型MAZDA3では、前席シートベルトのラップアンカー部をシートに取り付ける構造とした。これにより、シートを前後に動かしたどの位置の乗員に対しても、腰に掛かるベルト角度を最適にできるため (Fig. 6)、ベルトのたるみが最少となり、衝突時のより素早い乗員保護を可能とした。また、人間研究^②を元に骨盤を前傾させ、自然なS字アライメントを作り出せるシート構造を、シートクッションとシートバック形状の工夫で実現した (Fig. 7)。これら2つにより、シートベルトが自然に骨盤にかかり易くなり、サブマリン抑制の効果を向上させるとともに、正しい姿勢で着座でき、より「人馬一体」を感じられるシートを実現できた。

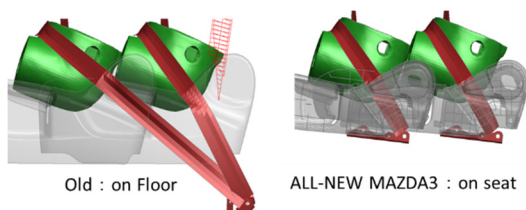


Fig. 6 Seatbelt Lap Anchor



Fig. 7 New Seat Structure & S-Shaped Alignment of Spine

3. 側面衝突性能開発

3.1 側面衝突時の車体骨格構造

マルチロードパスを進化させ、側面衝突のさまざまな方向や位置からの衝突エネルギーをしっかりと受け止めながら、キャビンの変形を最小限に抑える車体構造を軽量化と両立させた。従来の考え方で側面衝突時の車体変形の抑制を追求すると、Bピラーやルーフ、サイドシルの強化の必要があり、軽量化にも限界があった。そこで新型MAZDA3では、車両前後方向への荷重伝達比率を高め、従来は側面衝突時に大きく機能していなかったAピラーとCピラーに荷重を分散する考えを新たに採用し (Fig. 8)、側面衝突の安全性能向上と軽量化の両立を実現した。

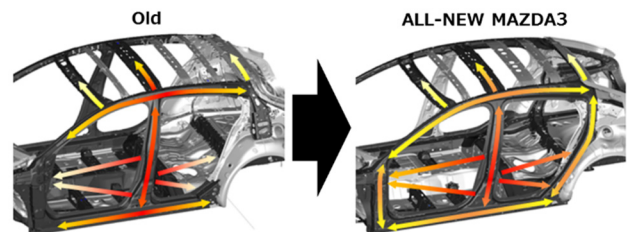


Fig. 8 Load-Path for Side Crash

Fig. 9に示すドアからボディー前方側への荷重伝達に重要なドアインパクトバーの締結部は、従来の1面接合から2面接合構造とし、更に、ドアヒンジも高張力鋼板に変更して強固にした。また、Cピラー部のリアボディー内部には、ボディー後方側へ伝達させた荷重をしっかりと受け止め、ルーフやサイドシルへ荷重伝達させるために、レインフォースメントを設定した。

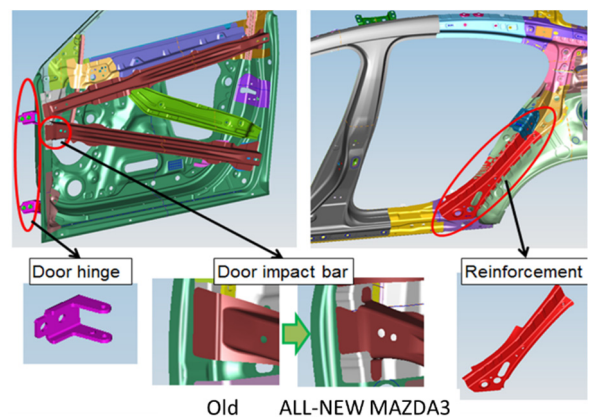


Fig. 9 Front Door and Rear Body Structures

また、Bピラーやルーフ、サイドシルの断面は、座屈変形しやすい部分に稜線を設定し (Fig. 10)、追加の補強部品なしで、素材そのものの強さを最大限引き出す断面形状の工夫により、強度と軽量化を両立した。

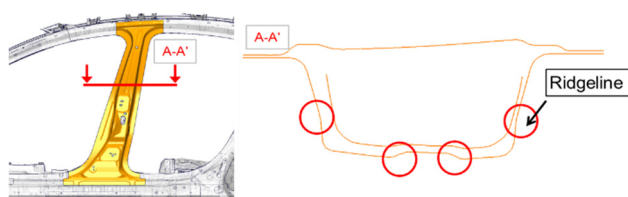


Fig. 10 Structure Concept

3.2 側面衝突時の乗員保護装置

新型MAZDA3では、高齢者の人体特性の研究を基に、特に骨折傷害を受けやすい肋骨部を保護するために、サイドエアバッグの内圧の最適化をはかった。バッグ前部は内圧を低くして硬度を下げ、バッグ後部は内圧を高めにして硬度を上げることにより、肋骨への負荷を減らしつつ、比較的耐性の高い背骨を主体にしっかりと体を保護できる構造とした (Fig. 11)。

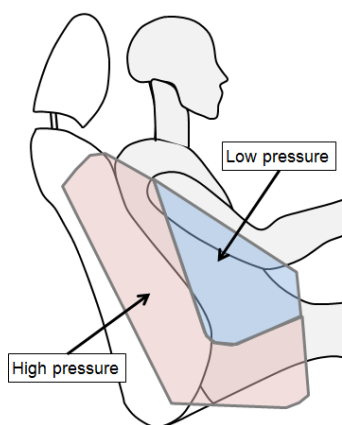


Fig. 11 Side Air Bag Concept

4. 後面衝突性能開発

4.1 後面衝突時の車体骨格構造

新型MAZDA3では、時速80km/hで車両の70%に可動バリアが追突する衝突モードでも、衝突後に後席のドアが開扉できるようにキャビンは強固な骨格で構成し、荷室空間は高効率に衝突エネルギーを吸収できるフレーム構造を新たに採用した。

衝突後のキャビンの確保のために、ドア開口部を中心に連続化されたフレームワークと超高張力鋼板の多用化により、従来よりも客室の強度を向上しつつ質量増加を抑制した。

一方で、荷室空間を高効率にエネルギー吸収させるために新型MAZDA3では、衝突時のリアフレームを従来の曲げ変形から蛇腹変形にコントロールした (Fig. 12)。

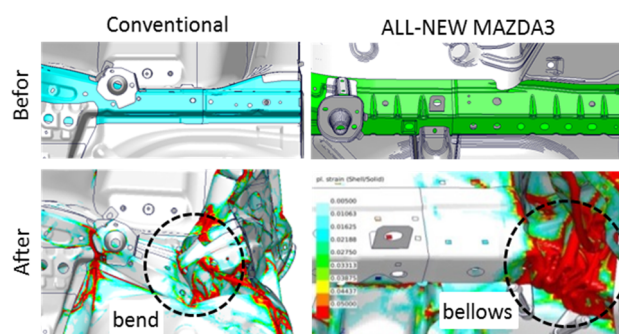


Fig. 12 Rear Frame Deformation

この蛇腹変形を実現するため、長いリアフレーム断面の長辺と短辺、板厚から蛇腹変形させる周期を計算し、それに逆らわない様に、フレームの側面と下面に起点となるビードや穴を配置すると同時に、フレームに締結される周辺部品のレイアウトや締結位置を見直した。更に、ねらひの蛇腹変形実現のため、リアフレームの部品成型過程で生じる板厚変化や加工効果を考慮した高精度CAE技術で最適なフレーム形状を決定した。これにより、車体変形の単位長さ当たりの吸収エネルギー効率率は、約2倍を実現している (Fig. 13)。

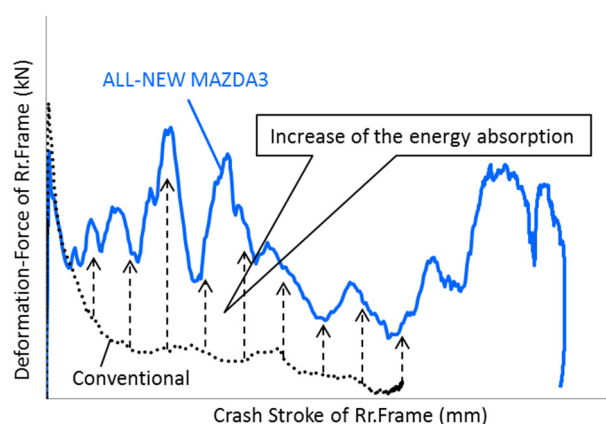


Fig. 13 Performance of Rear Frame-Energy Absorbing

4.2 低速時の後突頸部傷害緩和フロントシート

新型MAZDA3では、頸部傷害を抑制するために、フロントシートを進化させた。後突された際には、シートバックの後傾によるヘッドレストの後退量を抑制し、ヘッドレストによる頭部の保護性能を高めるとともに、シートバックが後傾してから元に戻る反発時の頭部の振られ挙動を抑えることが重要である。

そのため、シートバックの後傾特性をFig. 14に示すように、前半はより強度を高め、後半は反発量を抑制した。ヘッドレストの後退量抑制は、スライダの支持構造やリフターブラケットの支持位置変更などで全体剛性を高めるとともに、シートスライダー内の部品間隙を最

小化し、反発抑制は、クッションサイドフレームの変形をコントロールするビードを設定するなどで実現した。

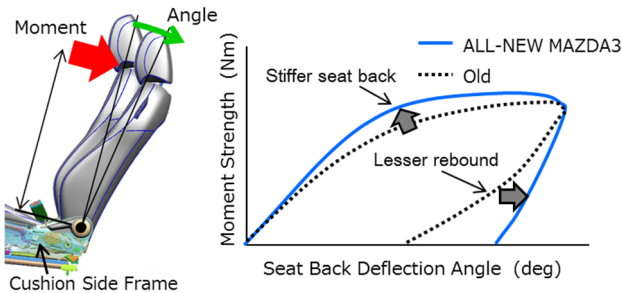


Fig. 14 Seat Back Moment Strength

5. 歩行者保護性能開発

5.1 頭部保護

歩行者の頭部の傷害を低減するには、フードからエンジンなどの硬い部品までの空間を確保する必要がある。新型MAZDA3では低フードデザインを実現するため、フードインナーのフレームワークを一から見直し、頭部保護に必要な空間を最小にした。

具体的には、Fig. 15に示すフードインナー形状とすることで、走行時のフードの浮き振れや張り剛性などの基本剛性は確保しつつ、頭部がフードに衝突する初期のエネルギー吸収を高め、衝突後半では頭部を柔らかく均一に受け止める構造を実現した。

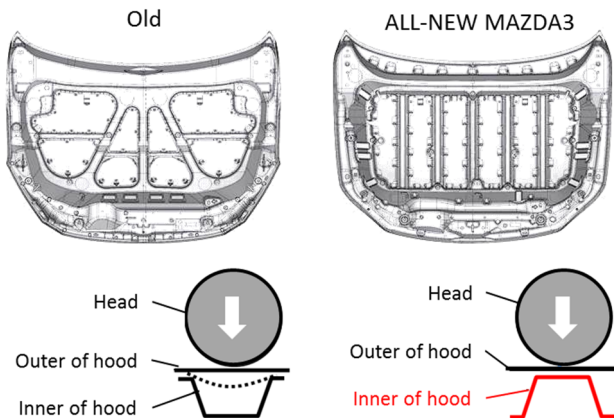


Fig. 15 Hood Structure

5.2 脚部保護

歩行者脚部の傷害を低減するためには、フロントバンパーからバンパービームまでの間にエネルギー吸収する空間を確保する必要があるが、新型MAZDA3ではショートオーバーハングのデザインを実現するため、バンパーの上部と下部のロードパスを軽衝突との整合を含めて見直した。

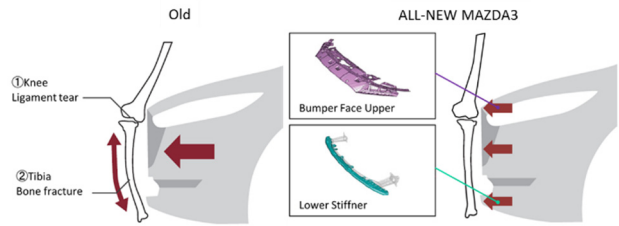


Fig. 16 Lower Leg Concept

具体的には、Fig. 16に示すように、脚部の膝を中心に上脚と下脚が「弓なり」になると、膝じん帯に大きな傷害を与えてしまうため、上脚はフェイスアッパー、下脚はロアスティフナーで受け止めることで脚部が弓なりになることを防ぐとともに、初期のエネルギー吸収効率を高めることによって、脚部保護に必要な空間を最小で、歩行者保護性能向上を実現した。

6. おわりに

本稿では、新型MAZDA3の衝突安全性能の開発概略について紹介した。デザインや環境性能など車に求められるニーズが更に多様化する中、市場におけるさまざまな事故・傷害形態の分析と人間研究を軸として、新型MAZDA3の成果を基に、より高い衝突安全性能開発を進めていき、今後もお客様により良い商品を提供できるように努力する所存である。

参考文献

- (1) 河村ほか：曲げ変形における高エネルギー吸収フレームの開発, [マツダ技報, No.33, pp.118-123 \(2016\)](#)
- (2) Izumiyama, T. et al., The Analysis of an Individual Difference in Human Skeletal Alignment in Seated Posture and Occupant Behavior Using HBM, IRCOBI conference, 2018

■ 著 者 ■



竹村 征樹



木戸 啓人



石川 靖



川本 篤史



井上 伸生



田口 征吾



鬼頭 応時



丸山 勉

特集：新型MAZDA3

19

新型MAZDA3 サウンドシステムの開発 Development of Sound for All-New Mazda3

六浦 潔*1 若松 功二*2 山中 尋詞*3
Kiyoshi Mutsura Koji Wakamatsu Hiroshi Yamanaka
平尾 幸樹*4 西嶋 孝祥*5 手島 由裕*6
Kouki Hirao Takayoshi Nishijima Yoshihiro Teshima

要 約

新型MAZDA3では、マツダが考える音響性能の理想を定義し、量産性を見据え機能配分しスピーカーユニット、レイアウトを一新した。理想の音響性能を追求するため、CAE技術による車室内の音場特性の可視化を行いスピーカーユニットの最適な配置場所を見出した。容量3リットルのバスレフ型ウーファーのカウルサイド配置と、スクーカーとツイーターのドア上部への配置をベースとするシステムで、新型MAZDA3のサウンドは新世代商品群のリードとなる車種にふさわしい音響性能を実現した。本稿では、その内容について紹介する。

Summary

With a definition of an ideal acoustic performance for Mazda, the speaker unit and its layout are redesigned for the All-New Mazda3 by allocating functions with a consideration on productivity. We visualized the sound field characteristics in the car by CAE technology and found the optimal placement of the speaker units to pursue the ideal acoustic performance. The All-New Mazda3 has achieves the appropriate sound as the leading model of new generation products with the sound system based on the placement of a 3 liters bass reflex type woofer in the cowl side and the placement of squawker and tweeter on the top of the door. This paper introduces the main features of the All-New Mazda3's sound system and its technology.

Key words : Information, Communication, and Control, Audio, Sound System, Acoustic Performance, Speaker Layout

1. はじめに

新世代商品群のサウンドシステム開発では、多くのお客様があらゆる走行シーンで良い音と感じられる音響空間を造ることを目指した。そのために、車室内の理想音響を新たに定め、音場をコントロールすることに主眼を置いて開発した。更に、スピーカーの最適配置をねらい開発初期段階から車両構造へ反映することも行った。

新型MAZDA3では前世代商品群を凌駕する音響性能をもつシステムを開発することができたので、その概要を紹介する。

2. 車室内の理想音響

お客様の好みの音は多岐にわたることから、一つの音を理想として定めることはお客様のニーズにそぐわない。そこでマツダは、お客様の好みの音を聴くための土台となる次の2項目を理想に近づけることが重要であると考えた。

- ・音源に入っている情報を正しく伝える
- ・ダイナミックレンジの拡大

2.1 音源に入っている情報を正しく伝える

音楽は芸術作品でありアーティストやレコーディングエンジニアが聴かせたい音が録音されている。マツダは、その意図した音を細部にわたり精巧に再生させることが“音

*1, 4~5 情報制御モデル開発部

Infotainment and Control Model Development Dept.

*2~3, 6 電子性能開発部

Electrical & Electronics Performance Development Dept.

源に入っている情報を正しく伝える” ということにつながると考えている。精巧に再生された音は楽器や歌声の臨場感や深みを感じることができる。マツダは、その音を再現できる試聴室 (Fig. 1) を所有しており、試聴室で聴く音を“音源に入っている情報を正しく伝える”音として定義した。また、録音された音源はスピーカーから再生された音を直接聴くことを前提で造られており、試聴室もその状態で聴くことができる構造になっている。理想の音を造るには、直接音重視で視聴できる構造が重要になる。



Fig. 1 Sound Testing Room

2.2 ダイナミックレンジの拡大

人間の聴覚は 20Hz~20kHz の周波数帯域で最少可聴閾値の 0dB SPL から最大可聴閾値の約 120dB SPL (周波数により異なる) まで聴く事ができ⁽¹⁾、この範囲で人は音楽を聴いている (Fig. 2)。あらゆる走行シーンにおいて、お客様が常に良い音を聴くことができる状態にするには、ダイナミックレンジを広げ、可聴帯域の全範囲で S/N の良い音を聴くことができる車両を開発することが必要である。

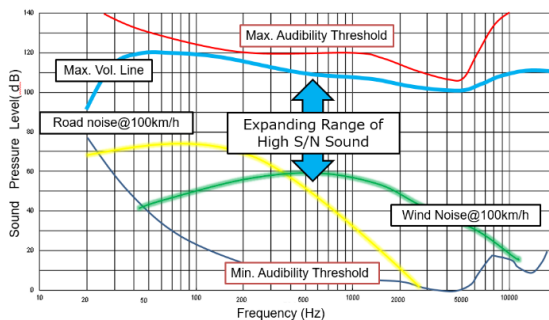


Fig. 2 Audibility Range

そのためには、①走行ノイズの低減、②最大可聴閾値付近まで低歪で再生できるスピーカーとレイアウト、③再生音により異音を誘発させない車両構造の 3 つを実現しなければならない。

3. 理想音響を創る考え方

人の可聴帯域は 20~20kHz と幅が広く、周波数により聴こえ方、音の伝搬が異なる。したがって、周波数による振る舞いの違いを把握し、最適な位置にスピーカーを配置することが重要になる。そこで、音の帯域を 20Hz~200Hz の低域と 200Hz~20kHz の中、高域に分け、音の聴こえ方、

音の伝搬、スピーカー構造の観点からそれぞれの理想構造を考えた。

3.1 低域再生

人間の聴覚は、周波数が低くなるにつれ音の到来方向を認知しにくくなる。車室内での音の到来方向について実験的に調べると、左右前後の方向が認知できるのは 70Hz 以上、上下については 200Hz 以上であった。したがって、ステレオ再生するには左右のスピーカーから 70Hz 以上の音を再生する必要がある。また、200Hz 以下の音のみを再生するスピーカーであれば、低い位置に配置しても定位感を損なわれることはない。

音の伝搬では、閉空間で発生する定在波が大きく影響する。定在波には腹と節がある。節は逆位相の音波が重なりあい振幅しない場所であるが、この節の位置にスピーカーを配置するとスピーカーの再生音が位相反転した反射音と干渉し音圧が低下してしまう。特に波長の長い低域は、定在波の節と腹の間隔が広がるためスピーカーの位置による音圧への影響が大きくなる。この定在波の影響を可視化するため CAE 解析を行った。従来スピーカーを配置していたドア付近は 100Hz~200Hz 辺りで節となり再生効率が悪く、車室内の隅は腹となり再生効率が良くなることが判明した (Fig. 3)。

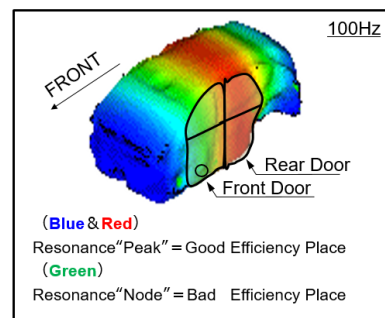


Fig. 3 Resonance of Cabin @100Hz

更に、CAE 解析を裏付けるため小口径のボックススピーカーをドアと車室内隅に配置し音圧レベルを比較すると、CAE の予測どおり車両隅で音圧レベルが上昇した (Fig. 4)。これらの結果より、低域再生用スピーカーは、車両隅であるカウルサイド下に配置することが理想と考えた。

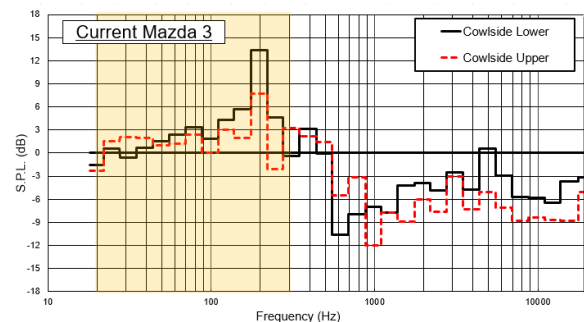


Fig. 4 Difference S.P.L. of Cowl-Side Layout

カウルサイドは周波数に対する形状の変化が少ない、いわゆる、動剛性がよい場所でもある (Fig. 5)。加えて、ドアにあるハンドルやウインドウレギュレーターのような可動物もなくスピーカー振動による異音の誘発を起こさない理想的な場所でもある。

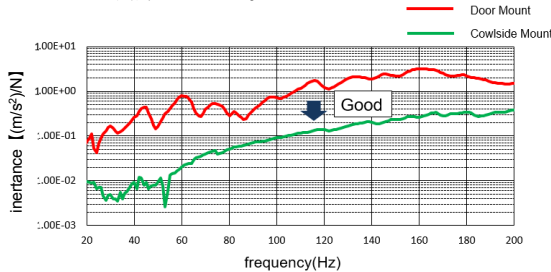


Fig. 5 Stiffness of Door vs Cowl-Side

カウルサイドへのスピーカー配置は遮音性能も向上させる。遮音性能は、ボディの穴や隙をなくし多重壁にすることで向上する。ドアからカウルサイドにスピーカーを移動することで、ドアスピーカーの取付け穴を廃止できる。これにより、ドアのアウトパネルとインナーパネルで多重壁を構築することができ、遮音性能が向上する。

次に、カウルサイドで低域再生するのに最適なスピーカー構造を考える。スピーカーの再生帯域は振動板の重さで決まり、重くなるほど低い音を再生できる。音圧は振動板半径の 2 乗と振動板の振動速度に比例する⁽¹⁾。つまり、低域については口径が大きい方が効率良く再生できる。それから、低域の音は回折しやすいためスピーカー前後に干渉を防止する遮蔽板が必要となる。一般的にはボックスにより前後の音を遮蔽するが⁽²⁾、低域再生用スピーカーでは空気パネの影響を小さくするため大容量のボックスが必要となる。前世代商品群では、大口径スピーカーとドアシェルを活用した大型ボックス構造で低音再生を機能させていたが、カウルサイドには大型ボックス構造を造る空間はなく、小型ボックスで効率よく低域再生できる構造が必要となる。そこでパスレフ型 (ヘルムホルツ共鳴を利用したポートで低音を増幅させる構造) と呼ばれる構造⁽²⁾で低域再生能力の検証をした。Fig. 6 はパスレフ型において、スピーカー口径とボックス容量の変化により再生できる最大音圧レベルの変化を示したグラフである。

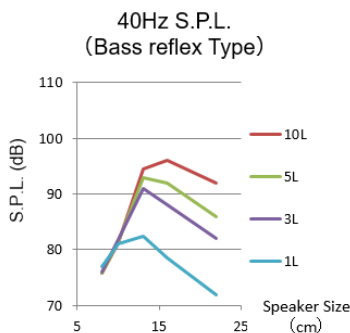


Fig. 6 Relation of S.P.L. @ 40Hz

20Hz までの重低音を聴くためには 40Hz で 95dB 以上の音圧が必要となるが、そのためには、口径 10cm~13cm のスピーカーと内容積 10 リットルのバスレフ型のボックスが必要となる。これらの結果から、10 リットル以上バスレフ型ウーファーをカウルサイドに配置することが理想であると考えた。

3.2 中域・高域再生

人は左右の耳に入る音の時間差と位相差で到来方向を判別している。そのため、波長が短い中、高域の音は、到来方向を認知しやすくなる。そして、マツダの試聴室を含む一般的なホームオーディオでは、スピーカーを耳位置程度の高さで左右対称に配置し受聴者の方向に向け、スピーカーから再生される直接音を主体に聴きこくことで音源に入っている情報を正しく認知できる。一方で前世代商品群は、インストゥルメントパネル上面に中高域再生用のスピーカーを配置していた。この配置では、スピーカーの再生音は必ずフロントガラスに反射する。ガラスとスピーカーの距離も近いため、直接音と反射音が干渉し合った音を聴くことになる。直接音と、時間的遅れのある反射音とが合成された干渉音は、受聴点において、音源の音に対し①歪を生じる、②周波数特性が乱れる等、明瞭度を劣化させる原因となる。これはCAE解析でも可視化ができた。Fig. 7はスピーカーをインストゥルメントパネルとドアそれぞれに配置し、4kHzの音を出力した状態のCAE解析結果である。インストゥルメントパネル配置は受聴点での干渉縞が深くなっているが、ドア配置は比較的浅い。これは、ドア配置のような直接音重視の配置では、干渉波の影響が少なく周波数特性をフラットにでき、再生された音を正確に聴くことが可能となることを示している。

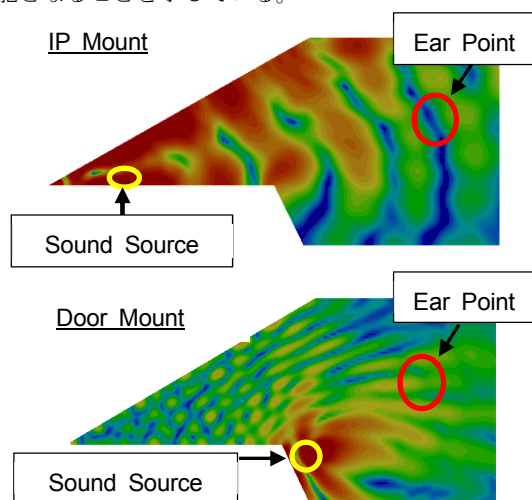


Fig. 7 CAE Result of IP Mount vs Door Mount

更に、直接音を主体に聴くためには、スピーカーを小型化しレイアウト自由度を上げることが重要になる。小型化は、スピーカー自身で生じる歪の抑制にも効果的である。

スピーカーは分割共振やエッジの逆共振により音源に含まれる音とは異なる音を発生させる。これはスピーカーの振幅速度が速くなる中、高音域で発生しやすい^①。この音を抑制するには、振動板を小口径にして軽量化を行い、高速で振動板を動かすことが効果的となる。しかし、振動板を軽量化すると共振周波数が上昇し再生帯域が狭まるため、200Hz～8kHz程度までを再生させる中域再生用スピーカー（スコーカー）と、8kHz程度以上を再生させる高域再生用スピーカー（ツイーター）の構成とし、搭載位置は、直接音が主体となる場所で、より小型なツイーターは耳の高さに合わせることで理想と考えた。

一方で、車室内の音響は座席の位置関係により必ず左右のスピーカー配置が乗員に対し非対称になるため、理想を実現することが難しい。ステレオ音源では受聴者に対してスピーカーを左右対称に配置することで定位感や広がり感を正しく再現できるのだが、非対称に配置すると正しく再現できなくなる。この現象は、人の聴覚の特徴である先行音効果が働き発生する^②。先行音効果とは、複数の同一音が再生された場合、先に届いた音の方向に定位してしまう現象である。車室内では、この現象により耳に近い方のスピーカーに音の定位感がシフトし、広がり感が狭くなる。これに対してはDigital signal processor (DSP) による時間と位相の制御で疑似的に左右の距離差を均等にする技術により、理想を実現できると考えた。

4. 新型MAZDA3での実現手段

車室内の理想音響実現するために必要な要素は①10リットル以上の容量を持つバスレフ型ウーファーのカウルサイド配置と②中高域再生用スピーカーの直接音重視の配置である。新型MAZDA3では、これらの必要な要素を車両に搭載可能な構造にしてサウンドシステムを構築した。Fig. 8にその新型MAZDA3のサウンドシステムを示す。

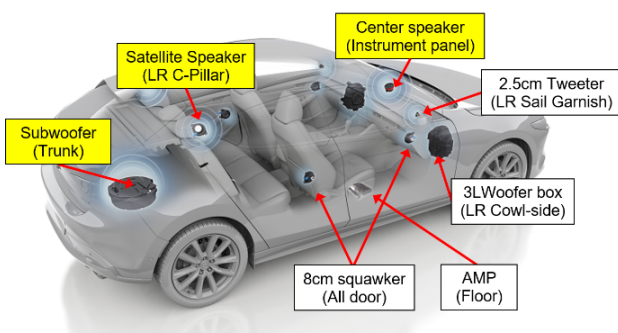


Fig. 8 All-New Mazda3 Sound System

新型MAZDA3のサウンドシステムでは“車室内の理想音響の考え方”に沿って、低域、中域、高域それぞれの帯域に再生用スピーカーを割り当てた。ツイーターは2.5cmで8kHz以上、スコーカーは8cmで200～8kHz付近までを再生

可能とするユニットを開発した。ウーファーは、60～200Hz付近まで再生可能となる内容量3リットルのバスレフ型ボックスウーファーを開発した。これらのスピーカーで構築したサウンドシステムは音楽を聴くには十分な帯域60Hz～20kHzを再生可能とし、MAZDA Harmonic Acousticsと名付けた。更に、上級グレードのシステムにはサブウーファー、センタースピーカー、サテライトスピーカーを追加した。インストゥルメントパネル中央の8cmのセンタースピーカーは助手席や後席の定位感の向上を可能にし、トランクのサブウーファーは重低音領域の再生を可能にすることで、理想の音響性能へ近づけた。この新型MAZDA3のサウンドシステムにおいて軸となる次の2項目について詳しく述べる。

- ・3リットルウーファーのカウルサイド配置
- ・中高域再生用スピーカーの配置

4.1 3リットルウーファーのカウルサイド配置

カウルサイド下部に10リットル以上の容量を持つバスレフ型ウーファーを配置し、20Hzまでの重低音を再生できるようにすることが音響的には理想である。しかし、車両のカウルサイドは、①アクセル操作を行うスペース②電装品、ハーネス、HVAC、インシュレーター等の部品スペース③インストゥルメントパネル搭載用治具のスペースなどの制約条件があり、大型のバスレフ型ウーファーを配置する物理的空間を確保することは非常に難しい。加えて、音響的に理想であるカウルサイド下部は、アクセル操作スペースとボディーパネルに挟まれており、スピーカーユニットを配置する空間確保が困難な部位である。そこで新型MAZDA3では、まず、限られたスペースを効果的に活用するため、カウルサイド上部にウーファーを配置し、その周囲にハーネスを配策した。従来カウルサイド上部に配置していた補器類はカウルサイド下部に配置した (Fig. 9)。

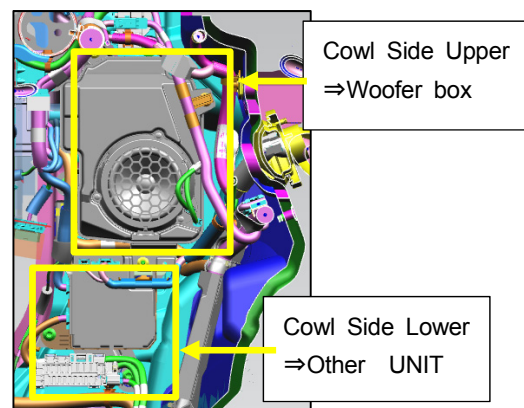


Fig. 9 Cowl-Side Aria Layout

次に、カウルサイド上部で最大限容量を確保するため、次の施策を開発初期から織り込んだ。①ヒンジピラーイン

ナーの車室外側移動, ②HVACの小型化, ③ハーネス経路変更, ④インストゥルメントパネル搭載治具の小型化。そして, ヒンジピラーからドアへハーネスを貫通させるための開口穴も利用し, ヒンジピラー内部にボックスを拡張した。これらの施策により, カウルサイド上部に3リットルバスレフ型ウーファーを配置できる空間を確保した (Fig. 10)。

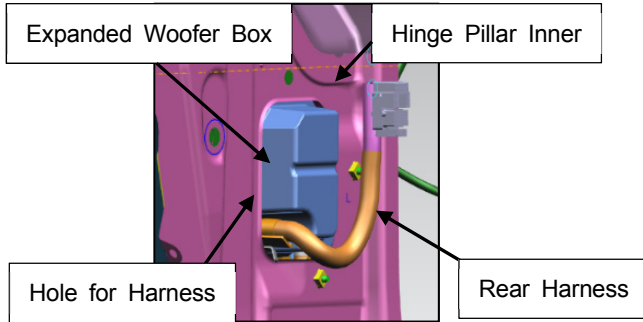


Fig. 10 Expanded Woofer Box by Cowl-Side Structure

この3リットルのバスレフ型ウーファーで可能な低域再生能力を検証した。可聴限界である20Hzから再生させることが理想ではあるが, 3リットルでは現実的ではない。そこで, 低域の量感を感じやすい帯域である60Hz~200Hzに焦点を当て, 低域再生することにした。それから, ボックス容量の影響を受けやすい60Hz~100Hzの音圧レベルを予測して低域再生能力を見極めることにした。

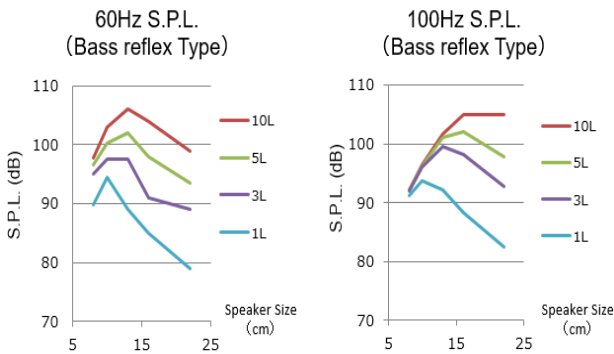


Fig. 11 Relation of S.P.L @ 60Hz and 100Hz

Fig.11は60Hzと100Hzでの音圧レベルを予測したグラフである。3リットルでは10リットルのバスレフ型ウーファーとは10dB SPLの差はあるものの, マツダが必要としている音圧レベルである95dBは再生できることが予測できた。口径は10cm-13cm程度のサイズが最適であると判断した。

机上検証の結果を踏まえて試作品ウーファー (Fig. 12) を製作し, 実車による聴感評価を行った。結果として, 低音の量感は十分に得られていることを確認できた。更に, 専用エンクロージャを持つウーファーは, 従来のドアマウントのウーファーに比べメリハリのある低音を再生すること

ができた。これは, 剛性の高い専用エンクロージャにより, 箱の共鳴を抑えたことで入力電気信号に対する音響再生の応答性が良くなった結果と考えている。この試聴結果から3リットルウーファーで前世代商品群に比べ量感も応答性も良い低音を再生できると判断した。

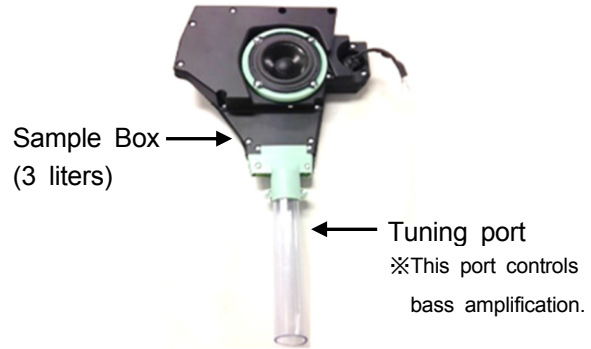


Fig. 12 3L Woofer Box Sample

4.2 中高域再生用スピーカーの配置

中高域再生用スピーカーとなるツイーターとスコーカーは前述のとおり直接音重視で配置することを前提にした。更に, 音楽を聴く上で重要な要素である定位感, 広がり感も視野に入れ配置場所を検討した。そのために, 乗員耳位置を中心に距離, 高さ, 角度の条件を設定し, デザイン造形と音響性能の両立できる場所を模索した。

ツイーターはAピラーとセーラガーニッシュ二つの候補場所があったが, デザイン造形, 視認性, デミダクトの晴れ性能に影響を与えず, 乗員方向に向けて配置できるセーラガーニッシュを選択した (Fig. 13)。



Fig. 13 Tweeter Location

スコーカーは, 配置可能な空間があるドアでデザイン造形, 遮音構造と音響性能の両立できる場所に配置した。

デザイン造形と音響性能の両立: 音響性能の視点だけでスコーカー配置を考えると, 耳の高さに可能な限り近い位置で, 音像が偏らないよう聴取者から適度に離れた位置に配置することが重要である。更に, フロント用スコーカー設置場所は音像定位を考慮するとツイーターに近い方が良い。しかし, その位置ではインストゥルメントパネルからドアに続くデザイン造形に対する影響が大きい。そこで, デザイン造形を崩さず音響性能が成立する位置としアームレスト前付近に配置した (Fig. 14)。



Fig. 14 Squawker Location

遮音構造との両立：遮音はボディーの穴や隙をなくし多重壁にすることで性能が向上する。新型MAZDA3ではドアに多重壁構造を採用し遮音性能を向上させている。そこで、スピーカー配置場所も多重壁構造にするため、ドアインナーパネルに穴を開けなくとも空間のある場所に配置した。リアドアはチェッカーの取り付け作業穴を塞ぐホールカバーを活用し遮音構造とスピーカー配置を両立させた (Fig. 15)。

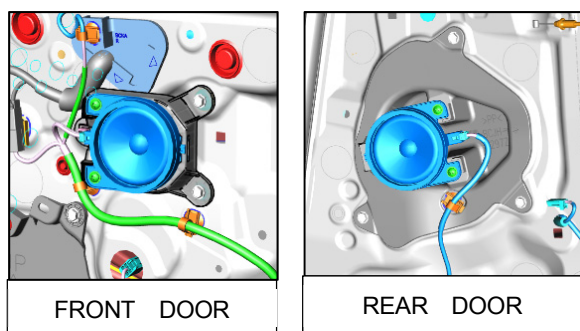


Fig. 15 Squawker Mounting Structure

スピーカーをドアインナーパネルに穴を開けずに配置することは音響性能からしてもメリットがある。パネルに穴を開けて取り付ける場合、防水加工が必要になる。防水加工は、振動板に樹脂を含侵させる必要があり音質に影響を与える。パネルに穴を開けない構造にすることで、振動板材料の選択肢を拡大することが可能となり、スピーカー単体性能を向上させることができた。

5. 新型MAZDA3音質の仕上がり

新型MAZDA3のサウンドシステムでは、中高音で直接音を主体とした音作りを行った結果、音の細部までしっかり再生できるようになり、明瞭度を飛躍的に向上させた。加えて、DSPの制御を活用し、ドライバーモードとオールモードの二種類の音響空間モードを設定した、これは、車両の使用シーンに合わせて常に良い音を聴くことができるためのモードである。ドライバーモードは、ドライバーの耳位置で最も良い音が聴こえるように時間と位相を調整した。オールモードは全席で均等な音質で聴くことができるように運転席と助手席の耳位置の間時点で時間と位相を調整した。低音については、3リットルのバスレフ型ウー

ファーをカウルサイド上部に配置する事で、量感を十分に感じつつ応答性のある低音再生を実現した。前世代商品群では標準化していた低音再生用スピーカーのドア配置をカウルサイドへの移設したことは、車室内の騒音レベルの低減にも貢献した。この効果はオーディオの音が際立つ方向にもつながった。更に、オーディオやハンズフリー通話音などスピーカーから出力される音が車室外に漏れにくくなり車全体の質感を高めることができた。

6. おわりに

新型MAZDA3のサウンドシステムを開発するにあたり、“お客様に聴いていただきたい音は何か？”を熟考した。理想の音を目指し車室内の音場をコントロールする事が重要であると考え、音響工学的にスピーカーの最適位置を探索した。車室内の音場の変化を理解するために、人間の聴覚の仕組みから、室内音響工学、スピーカーのメカニズムなどを調査し、測定、CAEを行う技術も高めた。サプライヤーの方々にも難しい条件の中で素晴らしいスピーカーを開発いただいた。結果、新型MAZDA3のオーディオサウンドは、従来の開発車種を卓越した性能とすることができた。新型MAZDA3に乗車されたお客様には、音楽を通してドライブングを楽しんで頂ける事を期待する。最後に、この開発にあたって多大なご支援をいただいた社内外の関係各位に対し、深く感謝致します。

参考文献

- (1) 山本武夫編著：スピーカ・システム，上巻，(株)ラジオ技術社，p17-20，p58-63，p154-157
- (2) 監修 佐伯多門：新版スピーカ&エンクロージャ百科，(株)誠文堂新光社，p108，p118
- (3) 平原達也共著：音と人間，コロナ社，p191

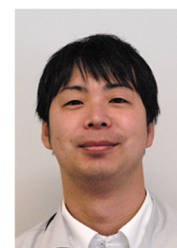
■ 著 者 ■



六浦 潔



若松 功二



山中 尋詞



平尾 幸樹



西嶋 孝祥



手島 由裕

特集：新型MAZDA3

20

新世代リアガラスアンテナシステムの開発

Development of New Generation Rear Glass Antenna System

志村 俊幸*1 Toshiyuki Shimura	重田 一生*2 Kazuo Shigeta	長嶺 晋路*3 Shinji Nagamine	森 大輝*4 Daiki Mori
田中 真帆*5 Maho Tanaka	島谷 信行*6 Nobuyuki Shimatani	沼元 正樹*7 Masaki Numoto	三宅 弘一*8 Koichi Miyake

要約

無線通信技術の進化に伴い、車外と「つながる」機能は、「走る」「曲がる」「止まる」と並ぶ車の基本機能と位置づけられている。このうち、AM/FMラジオ、デジタルラジオや地デジ等の放送受信システムは、エンターテインメントや交通情報等を手軽に入手する手段として、今後も車にとって欠かせない装備である。放送受信システムのアンテナとしては、セダン系車種を中心にリアガラスアンテナが多く採用されている。一方で、SUV等のハッチバック系車種においては、性能確保やノイズ対策の難しさから、シャークフィンアンテナ等のルーフに設置するタイプのアンテナが主に用いられており、デザインに制約を与えていた。マツダは、強みであるデザインの魅力を最大化させるため、ハッチバック系車種に適用可能なリアガラスアンテナの開発に取り組んだ。その結果、アンテナ素子の工夫や構造要件を見出すことで、ハッチバック系車種に適用可能とし、FMダイバーシティーやDAB (Digital Audio Broadcasting) 等の新メディアの受信にも対応可能な新世代リアガラスアンテナを開発し、新型MAZDA3に導入した。

Summary

According to the evolution of radio communication technology, "connect" to outside of car is as basic function as "run", "turn" and "stop". Broadcast reception system like AM/FM radio and DTV will be indispensable equipment to the occupant in the car for getting entertainment and traffic information in the future. Many sedan cars are equipped rear glass antenna for broadcast reception. But many of hatchback cars are equipped roof antenna like shark fin antenna because of difficulties of showing reception performance and noise suppression. It limits designing appearance. We have tackled to develop glass antenna for hatchback car to maximize appearance design that is Mazda's strong point. As a result, we have successfully developed new generation rear glass antenna which is applicable to hatchback car's antenna and which supports FM diversity reception and DAB (Digital Audio Broadcasting) reception by finding new pattern technique and lay-out requirements and introduced it to All-New Mazda3.

Key words : Information, Communication, and Control, HD Radio, Audio, Glass Antenna

1. はじめに

近年、コネクテッドカー・自動運転・電動化へ対応するため、車載電波利用機器が増加している。利用用途もこれまでのエンターテインメント/利便性向上から安全システムへと拡大しつつあり、これまで以上に安定した通信性能が求められている。電波を用いた情報のやり取りの窓口となるアンテナは、電波利用機器の性能を左右す

るキーデバイスである。車載アンテナの特徴として、金属からなる車体による電波の反射や遮蔽の影響を受けやすいだけでなく、周囲に近接する金属物による電磁誘導によりアンテナ性能自体も影響を受ける。このため、その性能を確保するには、ルーフ等の車室外に設置することが望ましい。しかしながら、アンテナを車室外へ設置する場合、外観への影響が避けられない。このため性能とデザインの両立が車載アンテナ開発の課題となる。こ

*1,2,5,6 情報制御モデル開発部

Infotainment and Control Model Development Dept.

*3,4,7,8 電子性能開発部

Electrical & Electronics Performance Development Dept.

の課題を解決する手段の1つとして、AM/FMラジオ受信用としてはリアガラスアンテナが開発され、セダン系車種を中心に採用されている。一方、ハッチバック系車種のガラス面積の狭い車両においては、アンテナ素子を構成するエリアも狭くなることで受信性能の確保が難しく、更には電装品用ハーネス経路がアンテナ素子に近接するため、車両ノイズ対策が必要となる。以上の理由から、ハッチバック系車種には、ルーフアンテナが採用される場合が多く、ガラスアンテナを採用している場合でもAM性能補償用のチョークコイルをデフォグガーのワイヤーハーネスに追加することが必要となり、コストや重量等の問題を抱えていた。

本稿では、上記課題を解決するため、新たに開発した新世代リアガラスアンテナシステムの技術内容について報告する。

2. 開発方針

新世代商品のアンテナ開発構想を立案する中で、お客様への提供価値を最大化するため、理想のラジオ受信システムについてゼロベースで検討した。その結果、マツダの強みである際立つ車両デザイン (Fig. 1) と調和しつつ、「いつでも・どこでも・良い音をお客様へ提供」できる性能が確保できている状態を理想と定義し、それを実現するためのアンテナ方式を選定した。一例として、FMラジオ受信においては、反射波による影響を抑制することで、良好に聴取できるエリアを最大化することをねらった (Fig. 2)。その結果、1) 受信品質改善に効果のある、FMダイバーシティー受信やデジタルラジオ受信へ対応、2) 車両デザインと性能を両立、3) 車種や車形間で共通に構成する部品を使用、4) 物理量 (コスト/重量) を最小化等の実現性の観点から、新世代商品では、AM/FMラジオ受信用としてのルーフアンテナは廃止し、ガラスアンテナのみでアンテナシステムを構築すること (Fig. 3) を基本方針とし、開発を進めることとした。

2.1 ガラスアンテナ素子技術開発への取組み

ラジオ受信システムは、アンテナ素子→アンテナアンプ→フィーダー線→チューナーの4つの構成要素からなる。このうちアンテナ素子は、リアガラス上にデフォグガーとともにプリントされるもので、車種や車形ごとに開発が必要であり、受信システム全体の性能を左右する。このため、マツダはこの技術をカーメーカーが保有すべき重要な要素技術を考え、技術開発に取り組んできた⁽¹⁾。この技術を応用し、全車でリアガラスアンテナを採用する上で最大のネックとなるハッチバック系車種の狭面積リアガラスでアンテナを成立させるための技術開発に注力することとした。



Fig. 1 Example of Mazda's Design Concept

～FM Radio Audible area～

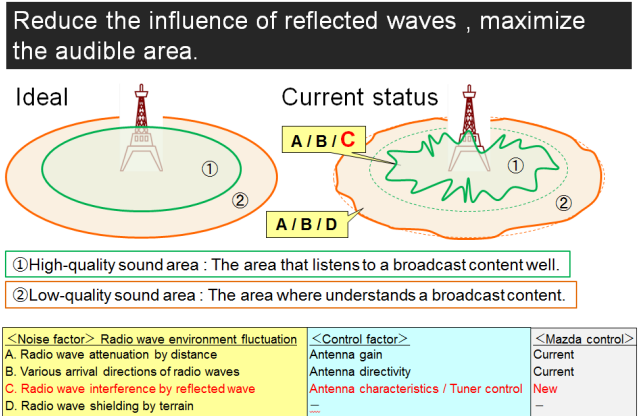


Fig. 2 Ideal Reception System

～Minimum constitution of rear glass antenna system～

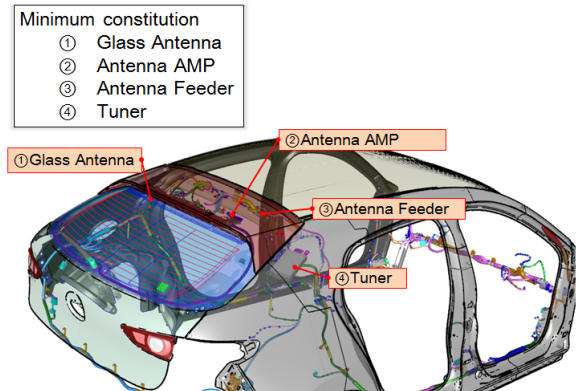


Fig. 3 Constitution of Rear Glass Antenna

2.2 FMフェーズダイバーシティー受信技術の採用

FMラジオの移動体受信においては、地形や建物で発生する反射波による電波干渉、いわゆるマルチパスフェージングの影響を受け、音声にノイズが発生する場合がある。従来はノイズ感を抑えるために耳障りなノイズ成分が多く含まれる音響特性の高域のレベルを下げ、ノイズ感の抑制を行っていたが、音質劣化の弊害もあった。一方、近年のデジタル技術の進展により、複数のアンテナによる受信電波を位相調整/合成することで、反射波の影響を打ち消し、音質劣化を招くことなくノイズを排除でき

る新しいダイバーシティー受信技術（フェーズダイバーシティー）のカーラジオへの実装が進んでいる。

新世代商品では、本技術を実装したラジオを採用するとともに、アンテナ素子の最適設計により、ノイズなく良い音で聞こえるエリアを最大化することをねらいとした。

3. 技術上の課題と解決への取り組み

リアガラスアンテナは、視界確保用のデフォグラーの上方スペースに線状素子をプリントし、アンテナとして利用している。ハッチバック系車種はガラスの傾きが小さく、ガラス自体の面積も小さいため、セダン系車種に比べアンテナを構成するスペースが狭小となる。このスペースにAM/FMラジオ用アンテナ、デジタルラジオ（海外）、地上デジタルテレビ（国内）等の数多くのアンテナ素子を所望の性能を確保しつついかに配置するかが課題となる。一方で、ハッチバック系車種においては、アンテナ素子近傍にノイズ源となるハーネスやハイマウントストップランプ等が近接配置されるため、対策が必要となる。

ここでは、これらの課題を解決するための技術のポイントについて紹介する。

3.1 アンテナ素子設計技術の確立

(1) AM受信性能確保のための要件抽出

AM性能補償用のAMチョークコイルを追加することなく実用的なAM受信性能を確保するためには、アンテナ素子を配置するスペースの確保が重要となる。そこで、最初にこの要件を見極めるための実験検証を実施した。その結果、ボディーフランジとデフォグラーの最上段の線の間隔を一定以上離せば、AM性能の確保が可能であることを見出した。本要件は、車の外観や後方視界等の要件にも影響するため、車両開発の早い段階から関連部門と調整し、必要なスペースの確保に繋げた。

(2) CAE解析によるアンテナ素子設計

アンテナ素子を設計するには、前述の配置スペースの他に、ボディー形状、ガラス形状、デフォグラー形状、給電部位置、他アンテナ素子との位置関係等、数多くの制御因子が存在する。従来は、実車を用いたチューニング設計が主体であり、試作車レス化や開発の短期化等が課題となっていた。課題解決のため、CAEによる性能予測と実車による測定との比較検証を積み重ね、モデルの規模や詳細に再現すべき部位の明確化を実施した。その結果、実用的な計算時間で精度の高い（実測値との乖離が帯域平均利得で2dB以内）予測結果が得られる条件を導き出し、アンテナ素子形状の最適化検討に活用した（Fig. 4, Fig. 5）。

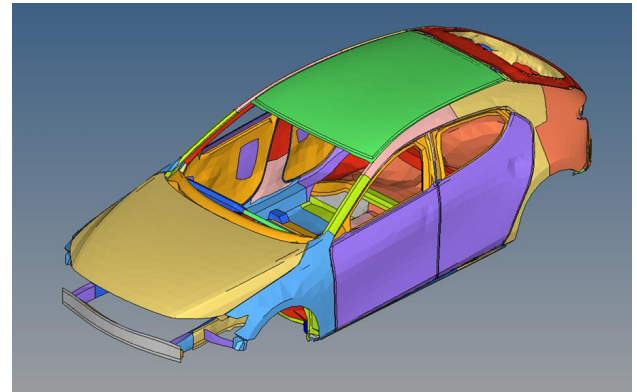
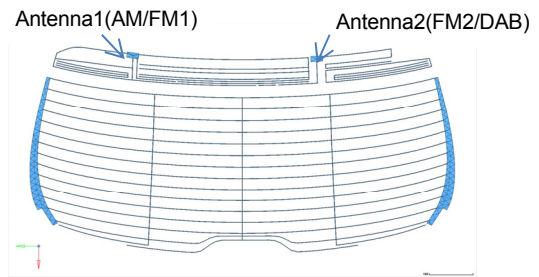


Fig. 4 CAE Model (Rear Glass, Body Shell)

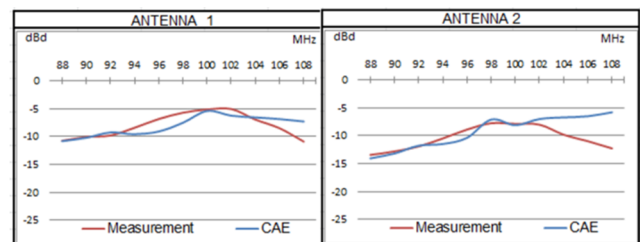


Fig. 5 Measurement vs. CAE (FM Band)

(3) 複数アンテナの最適配置

1) FMフェーズダイバーシティー受信への対応

フェーズダイバーシティー受信は、2つのアンテナの受信信号の片方の信号の位相と振幅を制御して足し合わせることで、一方の信号に含まれる反射波成分を打ち消す仕組みであり、有効に機能させるためには、それぞれのアンテナの受信状態の相関を小さくする必要があります。複数のアンテナの受信状態の相関を定量評価するには、市場と同じ多重波環境が必要であり、現状では実走評価に頼らざるを得ないが、アンテナチューニングのたびに実走評価することは現実的ではない。このため、電波暗室内で評価可能な代用特性への置き換えを実施した。具体的には、アンテナ利得計測を行う際に測定可能なパラメーターである位相に着目し、二方向から到来する電波に対する位相差をダイバーシティー受信に使用する2つのアンテナ間で比較し、その値（位相差の差 = $\Delta \theta$ ）が大きいほど2つのアンテナの受信状態の相関が低いとの仮説をたて、実車検

証結果と比較することで、「 $\Delta \theta$ 5度以下の発生頻度」を評価指標として運用することとした。この値と従来からの指標であるアンテナ利得を評価しながら作りこみを行った。

2) 複数メディア用アンテナの兼用化技術の開発

部品点数を極力抑えるため、また限られたスペースにより多くのメディア用のアンテナを構成するため、複数のメディア用アンテナの統合化を図った。具体的には、FMラジオとDABラジオの2つの異なる周波数帯の電波を、1つの給電端子で広い周波数帯域をカバーするアンテナ素子を構築する技術を開発した。

3.2 ガラスアンテナ周辺の耐ノイズ性能確立

(1) ワイヤハーネスの経路規制

車載電装品から発生する不要輻射ノイズはラジオアンテナ、またはアンテナフィーダー経由でラジオに混入し、受信性能を劣化させる。不要輻射ノイズを低減するためには車載電装品からのノイズの輻射やワイヤハーネスへの伝導を抑制することが主な対策手法となるが、ラジオアンテナ素子やアンテナフィーダーとの距離を離すことも重要である。そこで車室内ワイヤハーネスのレイアウト段階である開発初期において、大電流、高電圧を要する補機や過去にラジオノイズ問題となった補機類の関連ワイヤハーネスの経路を抽出し、アンテナ及びアンテナフィーダーが車室内で最大限に離れるように調整を行った。

(2) ガラスアンテナ周辺の耐ノイズ性能確立

ガラスアンテナ周辺は、ワイヤハーネスがレイアウトされているため、車載電装品から発生する不要輻射ノイズを回避することが困難なエリアである。そこで下記の5つの施策を行うことにより、ラジオシステムのノイズ耐性を向上させた。

- 1) デフォグ用ワイヤハーネスへのノイズフィルター設定 (AMノイズ対策用コンデンサー, FMノイズ対策用コイル)
- 2) ハッチゲート貫通グロメット部におけるアンテナフィーダーとワイヤハーネスの分離配策
- 3) リアワイパーモーターへのノイズフィルター設定
- 4) ハイマウントストップランプ回路へのノイズフィルター設定 (AMノイズ対策用コンデンサー) とGND位置の指定
- 5) ハイマウントストップランプ (以降、HMSLと略称) とアンテナ間の隔離要件確立

5)については模擬的な車両試験によりFig. 7のHMSL回路とアンテナ素子間の距離に対する性能劣化量の関係を求め、Fig. 6の検証結果から、隔離要件となる距離を30mm以上確保した。

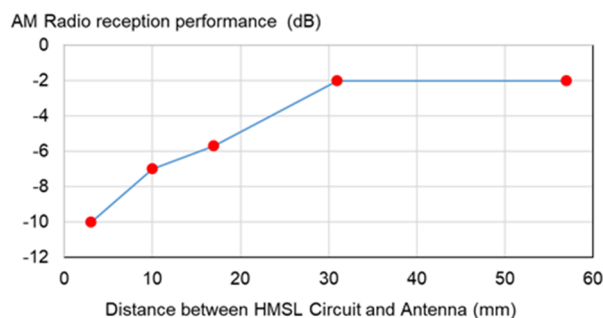


Fig. 6 AM Radio C/N vs. Distance between HMSL

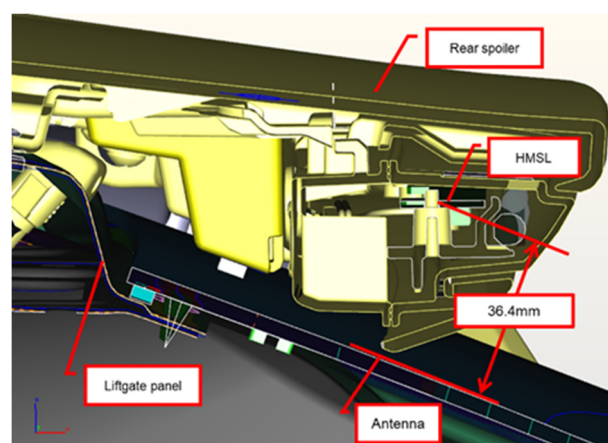


Fig. 7 Distance between HMSL Circuit and Antenna

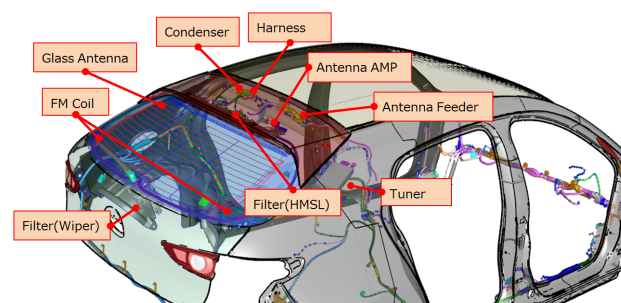


Fig. 8 Constitution of New Generation Rear Glass Antenna System

3.3 システム構成例

上述の検討結果、課題であったAM性能補償用のチョークコイルを用いずに、新世代リアガラスアンテナシステムを構築することができた (Fig. 8)。

AM/FMラジオ用アンテナ, デジタルラジオ (海外), 地上デジタルテレビ (国内), FMダイバーシティー受信への対応し, ガラス上にFMラジオ用アンテナを2つ, AM用アンテナ, デジタルラジオアンテナ (海外), 地上デジタルテレビアンテナ (国内) をガラス上へ形成し, デフォグ端子にFMコイル機能を付加, ノイズ対策用コンデンサーのリアヘッダー搭載, ワイパーユニット内部へノイズフィルターの追加, ワイヤハーネス/

フィーダー線の別経路配策、チューナーのCピラー部へ搭載、前述の車両構造要件の反映（デフォッガー線、HMSL）を行っている。

3.4 受信性能評価

前述の技術進化を織り込んだ新世代リアガラスアンテナシステムを、新型Mazda3に搭載した。その際、開発当初の”あるべき姿”である、高音質な聴取エリアを最大化するため、リアガラスアンテナ以外の受信システムの構成要素についても入念にチューニングした。具体的には下記2点に注力した。

1) アンテナアンプのパラメーター決定

北米の電波環境において複数のアンテナアンプ仕様を試し、AGC量/利得量などの最適値を選定した。

2) フェーズダイバー制御仕様の決定

高音質な聴取エリアの最大化をねらい、以下の方針でチューニングを行った。

- ・音響特性；フラットな周波数特性、かつノイズ処理による音質劣化を極力回避
- ・ダイバーシティ処理；弱電界までフェーズダイバー動作を継続

ベンチテストや市場でのさまざまな電波環境での走行評価を通じて、上記パラメーターや仕様を最適化した後、お客様視点の最終確認の位置づけとして、北米の開発拠点であるMazda North American Operations (MNAO)からカリフォルニア州を南方に縦断する長距離実走評価を行い、Fig. 9のとおり、高音質/良音質で聴けるエリアを現世代比で約2倍に拡大することができた。

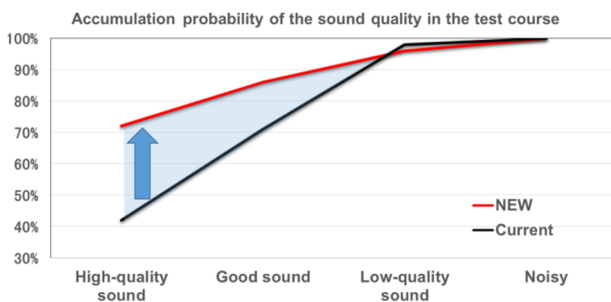


Fig. 9 Listening Area
(New Generation vs. Current Generation)

4. おわりに

今回は、理想の受信システムについてゼロベースで検討をすることにより、コスト/重量の増加を最小限に、受信性能と美しいプロポーションの車両デザインとの両立を実現し、お客様価値を最大化することができた。これからもコネクテッドカー・自動運転・電動化等の技術進化に対応していく中で、通信性能とデザイン性の優れ

た車を開発するために、アンテナシステム開発技術を磨き、お客様の期待を超える車づくりを実現していく。

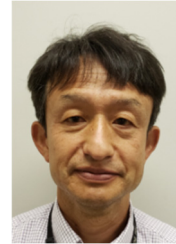
参考文献

- (1) 重田ほか：新型AM/FMラジオ用ガラスアンテナの開発、[マツダ技報, No.27, pp.114-118\(2009\)](#)

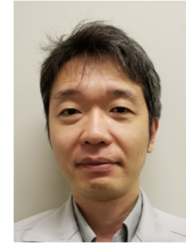
■ 著 者 ■



志村 俊幸



重田 一生



長嶺 晋路



森 大輝



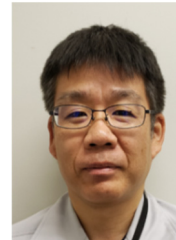
田中 真帆



島谷 信行



沼元 正樹



三宅 弘一

特集：新型MAZDA3

21

カメラを用いたドライバー・モニタリングの開発 Development of Driver Monitoring Using Camera

後藤 誠二*1

Seiji Goto

峯岸 由佳*2

Yuka Minegishi

山本 直樹*3

Naoki Yamamoto

森谷 貴行*4

Takayuki Moritani

中村 創*5

Hajime Nakamura

片山 翔太*6

Shota Katayama

要約

危険な状況に陥ってから対処するのではなく、危険自体を回避する「MAZDA PROACTIVE SAFETY (マツダ・プロアクティブ・セーフティ)」は、ドライバーの認知・判断・操作をサポートし、事故のリスクを最小限に抑えるマツダの安全思想である。この安全思想に基づき、ドライバーに危険を気づかせて安全運転をサポート、または事故の被害を軽減する先進安全技術「i-ACTIVSENSE」を2012年に市場導入し、それ以降も機能進化を続けている。

ドライバーの認知・判断・操作をサポートするためには、ドライバーの危険な状態・行動を検知し、いち早く危険な状況に気づかせる安全技術が必要となる。今回、ドライバーの顔表情・視線をとらえることが可能なカメラ技術の採用により、ドライバー状態とドライバー行動の検知を行う新技術「ドライバー・モニタリング」を、新型MAZDA3へ新たに導入したので、その開発成果を紹介する。

Summary

“Mazda Proactive Safety” is Mazda’s safety philosophy to support the driver’s perception, judgment and operation, and minimize the risk of an accident. Mazda aims to make a driver be able to avoid potential hazards instead of taking an action after being in a critical condition. Based on this philosophy, “i-Activsense”, an advanced safety technology, which supports the driver’s safety by alerting him/her and minimizes damage from the accident was introduced to the market in 2012, and has been continuing to evolve.

To support the driver’s perception, judgment and operation, we need the safety technology to help the driver to avoid the risk by detecting the driver’s dangerous condition/behavior. We adopted a new technology, “Driver Monitoring” to the All-New Mazda3, which detects the driver’s condition and the driver’s behavior by the adoption of new camera technology which can capture the driver’s face expression and gaze direction. This article describes this new technology.

Key words : Human Engineering, Driver Condition, Drowsiness, Fatigue/Burden, Distraction, Warning System, Driver Sensing/Driver Monitoring

1. はじめに

マツダは、「MAZDA PROACTIVE SAFETY」の思想に基づき、安全技術の進化を追究している。その取り組みの一つとして、人間の認知・判断・操作をサポートし、ドライバーに起因するヒヤリ・ハットを減らすための安全技術の開発を進めている。そのためには、ドライバーにいち早く危険な状況を気づかせ、安全運転をサポー

トする技術により、ドライバーが『正しい「認知」→「判断」→「操作」のサイクルを繰り返している状態』を提供することが必要である。このような背景の下、「i-ACTIVSENSE」の技術の一つとして、ドライバー・アテンション・アラート (DAA) ⁽¹⁾を2012年に市場投入した。

今回、新型MAZDA3では、ドライバーモニタリングカメラを搭載し、ドライバーの顔表情・視線をとらえるこ

*1～3 情報制御モデル開発部
Infotainment and Control Model Development Dept.

*4～6 電子基盤開発部
Electronic Platform Development Dept.

とで、その人の特性に沿った認知・判断・操作の支援を可能とする技術「ドライバー・モニタリング」を市場導入した。「ドライバー・モニタリング」は、ドライバーの眠気を検知した場合に、2段階の警報により休憩を促す。また、対象物への衝突の可能性があるときに、ドライバーが正面を注視していないと判断した場合に、通常より早期に衝突警報を行うことで、ドライバーにいち早く危険な状況気づかせ、衝突回避をサポートする技術である。その技術内容について以下紹介する。

2. 開発のねらい

2.1 事故の実態

国内の交通死亡事故発生件数を法令違反別（第1当事者）にみると、安全運転義務違反が55.0%を占め、中でも漫然運転（15.9%）、運転操作不適（13.2%）、わき見運転（11.1%）、安全不確認（9.6%）が多い（Fig. 1）^②。

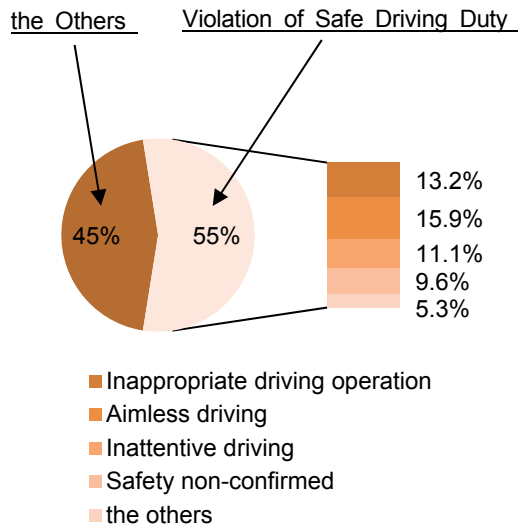


Fig. 1 Number of Fatal Accident Per Violation of Law, 2016 (This Target is the First Party)^②

これらの中で、ドライバーの注意力の低下が要因で引き起こされる漫然運転・わき見運転・安全不確認については、死亡事故全体の1/3を占めている。

また、交通事故発生件数を事故類型別にみると、追突が37.0%を占めている^②。正面を注視していれば防げた可能性のある事故が多いといえる。

2.2 開発のねらい

事故の実態を踏まえると、死亡事故を減少させるためには、運転中のドライバーの注意力低下を検知し、人・車それぞれをリスクに近づかせないようにする必要がある。よって、新型MAZDA3から導入した「ドライバー・モニタリング」では、ドライバー起因の事故の主要因で

ある、眠気・わき見を検知し、ドライバーにいち早く危険な状況気づかせることを目標とした。

3. ドライバー・モニタリング手法の検討

3.1 ドライバー状態・行動検知手法

運転能力は個々人のスキルや運転経験のみで規定されるものではなく、ストレスなどの心理的要因や覚醒度などの生理的要因といったドライバーの心身状態の影響を受けることが知られている。ドライバー状態と行動の検知手法には、運転操作や安全確認行動などを観察する手法、脳波や心拍といった生体情報を計測する手法、本人の主観報告などがあるが、検知精度や測定自体の簡便さ、測定装置の車載適合性の観点で一長一短である。このため、ドライバー状態・行動検知手法は測定するドライバーの状態や目的に応じて適切に選択する必要がある。新型MAZDA3のドライバー・モニタリングの開発では、事故の実態に基づき眠気・わき見に適した検知手法について検討した。

3.2 眠気・わき見の検知手法とセンシングデバイス

眠気の検知手法としては、ドライバーの生体情報を用いる手法と、ドライバーの運転行動や車両挙動を用いる手法がよく知られている。生体情報を用いる手法は、ドライバー自身の反応を直接計測することから多くの研究知見があるが、眠気を反映する多くの生体情報のなかでも、瞬目活動は眠気の変動をよく反映することが知られており、その有効性が確認されている^③。

次に、わき見を検知するためには、ドライバーがどこを見ているかを知る必要がある。視線を検知する手法としては、眼鏡型などの装着型装置を用いるものや、顔映像の画像処理結果から算出する手法などが一般的である。これらの知見から、眠気、わき見ともにドライバーの顔映像から検知する手法が有望である。

次に、公道を走行する車両に搭載するための要件について検討した。運転中のドライバーの状態・行動を安全に検知するためには、ドライバーに煩わしさを感じさせることなく測定可能であること、運転に伴う認知・判断・操作を妨げないことが必要となる。これらの条件に合致するセンサーとしては、非接触・非装着状態で、なおかつドライバーにセンサーの存在を気にさせることなく測定可能なドライバーモニタリングカメラやシート埋め込み型の生体センサーなどが挙げられる。眠気とわき見を検知するためには顔映像を用いる手法が有望であるとした前述の検知手法の検討結果を踏まえると、ドライバー・モニタリングの機能を実現するセンサーとしてはドライバーモニタリングカメラが最も適していると考え、これを採用した。

4. システム構成

ドライバー・モニタリングのシステムは、ドライバーモニタリングカメラ、眠気・わき見検知等を実行するための電子制御ユニット（ECU）、及び警報ユニットで構成される（Fig. 2）。

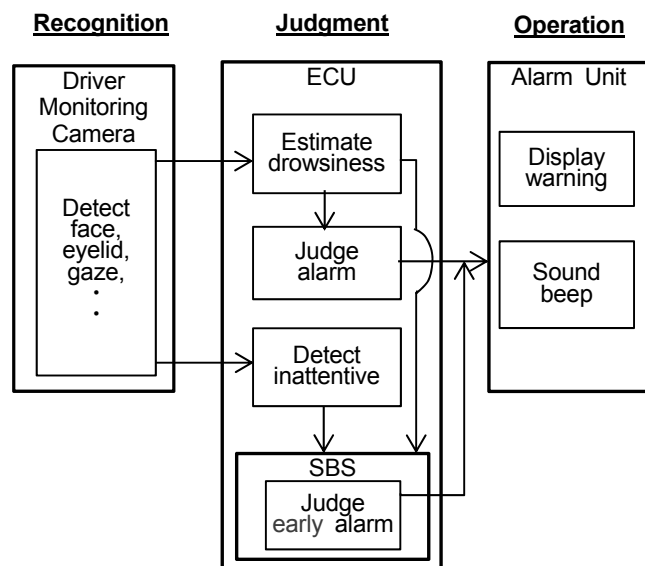


Fig. 2 System Architecture

車室内に搭載されたドライバーモニタリングカメラにて、ドライバーの顔表情をとらえる。そして、その情報を元に眠気を検知し、眠気の充進よりドライバーがリスクに近づいていると判定した場合は、メーターに休憩を促す表示を行い、かつ警報音を吹鳴する。また、眠気・わき見を検知した際に、衝突のリスクが迫っていた場合は、スマート・ブレーキ・サポート（SBS）の警報を早期化することで、ドライバーにいち早くその状況を知らせる。

これらの機能について、詳細を以下に述べる。

5. センシング

5.1 ドライバーモニタリングカメラ

カメラによる顔映像からの瞬目活動や視認行動のセンシングに必要な要件として、以下の3点が挙げられる。①昼夜を問わずセンシングできること、②瞼や視線の動きをとらえられる位置に配置すること、③瞼や視線の動きをとらえるために十分な空間分解能・時間分解能を満たしていることである。

上記の要件を満たすシステムとして、近赤外領域のカメラとLEDから構成されるドライバーモニタリングカメラを導入し、センターディスプレイに配置した（Fig. 3）。

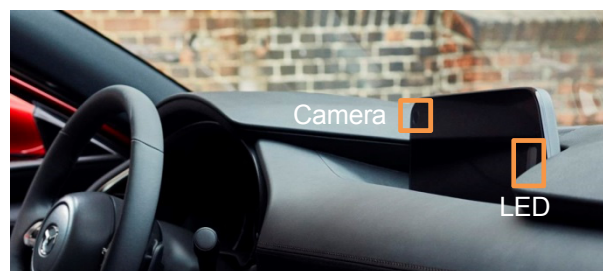


Fig. 3 Driver Monitoring Camera

①昼夜を問わずセンシングできるという要件に対して、通常の可視光領域ではなく、近赤外光領域の感度を高めたカメラを利用することにした。また、外光に影響を受けずドライバーを照らすために、近赤外光を発光するLEDを利用している。この時、ドライバーを照らす近赤外光領域として、乗員に目視されず、太陽光に含まれる近赤外線の影響をできるだけ排除するために、スペクトル強度が低い波長帯の940nmを採用した。

②瞼や視線の動きをとらえられる位置に配置するという要件に対しては、センシング対象であるドライバーの目がまつ毛や前髪によって隠れないように、カメラを目の高さより少し低い場所に配置した。その上で、クルマのインテリア（ハンドル等）やドライバーの運転中の行動によりセンシング対象が遮蔽されにくい、センターディスプレイに内蔵することとした。

③瞼や視線の動きをとらえるために十分な空間分解能・時間分解能を満たしているという要件に対しては、眠気・わき見検知モデルの特性から、必要な空間分解能・時間分解能を検討し、決定した。カメラの解像度は、センターディスプレイに配置した場合も、ドライバーの顔・瞼・視線・口等を撮影できる必要がある。また、カメラの処理能力は、ドライバーの瞬目活動や視認行動を一定間隔でセンシングできる必要がある。

これらの要件を満たしたカメラを用いて、いかなるドライバー、いかなる運転シーンに対してもロバストにセンシングできるよう、性能改善に取り組んだ。具体的には、まず、センシングアルゴリズムの特性から、ドライバーの外見（人種、年齢、ヘアスタイル、アクセサリ、化粧など）やドライバーの行動（ドライビングポジション、安全確認行動など）、運転シーン（走行場所、走行時間帯など）を誤差因子として抽出した。更に、リスク分析の手法を参考に、誤差因子ごとに影響度と発生頻度を検討し、重要度を整理した。その上で、これらの誤差因子に対してロバストなアルゴリズムとなるように、評価・検証を繰り返した。その結果、さまざまなドライバーの外見や行動、運転シーンへ対応した。

5.2 眠気検知

人間は眠くなるると覚醒時と比べて瞬目の挙動が変化する。例えば、単位時間あたりの閉眼時間の割合 (PERCLOS: Percent of the time eyelids are closed, Fig. 4) は瞬目の挙動を表す指標の一つとしてよく知られている⁽⁴⁾。しかし、PERCLOSは、強い眠気に対する感度・精度は高いが、弱い眠気に対しては感度が低い⁽⁵⁾という特性がある。このように単一の指標でドライバーの眠気状態を正確に検知することは出来ない。そこでマツダでは、瞬目の波形から複数の眠気指標を定量化し、ドライバーの眠気が弱い状態から強い状態まで正確に検知するモデルの構築に取り組んだ。

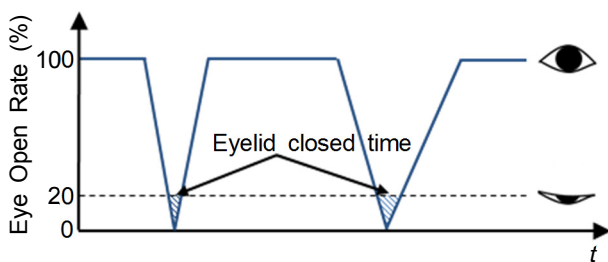


Fig. 4 Eyelid Closure (PERCLOS)

ドライバーの眠気の状態を検知するモデルを構築するためには、ドライバーの眠気が実際にどの程度であったかを表す正解値が必要になる。眠気状態の正解値は、熟練した2名の評定者が運転中のドライバー表情を撮影した映像を観察し、評定する方法 (顔表情評定) を採用した⁽⁶⁾。顔表情評定はドライバーの主観的な眠気、脳波などの生体情報や車両挙動など、従来から知っている眠気の指標との相関があり、その有効性が示されている⁽⁷⁾。また、ドライバーに眠気の報告を求めるなどのタスクを課す必要がなく、自然な運転中の眠気を知ることができるという利点がある。

顔表情評定は以下の5段階のカテゴリーに従って実施する⁽⁶⁾ (括弧内には各カテゴリーで表出する行動例を示す)。

1. 全く眠くなさそう
(視線の移動が速く、頻繁である。瞬きの周期は安定している。動きが活発で体の動きを伴う。)
2. やや眠そう
(視線移動の動きが遅い、唇が開いている。)
3. 眠そう
(瞬きがゆっくりと頻発。口の動きがある。座り直しあり。顔に手をやる。)
4. かなり眠そう
(意識的と思われる瞬きがある。頭を振る。肩の上下動など無用な体全体の動きあり。あくびは頻発

し、深呼吸も見られる。瞬きも視線の動きも遅い。)

5. 非常に眠そう

(顔を閉じる、頭が前に傾く。頭が後ろに倒れる。)

5段階の眠気評定結果 (正解値) を目的変数、瞬目波形から定量化した眠気指標の値を説明変数とした眠気レベル検知モデルを構築した。まず、実際の運転環境に起因するノイズの影響を除外したドライビングシミュレーター (DS) 環境で取得した瞬目波形データを用いて検知モデルを構築し、次に実車走行で取得したデータを用いて検知モデルの検証を実施した。

検証の結果、実車走行では安全確認行動や同乗者との会話、太陽光の変化など、運転時の環境やドライバーの行動などが眠気検知精度低下の要因となることを確認した。これらの要因については、ドライバーモニタリングカメラのセンシング性能向上と画像処理技術の向上、及び眠気検知精度低下要因となるドライバー行動に対応するアルゴリズム構築によりその影響を低減している。

5.3 わき見検知

わき見を前方に注意を向けていない状態と定義するが、常に前方に注意を向け続けることが正しいとは限らない。具体的には、安全確認のために、前方ではなく、周囲に注意を向けている場合もある。また、前方以外に注意を向けていたが、周辺視で前方の変化をとらえ、前方に注意を向けようとしている場合もある。これらの、ドライバーの意図を反映した、わき見検知モデルの構築に取り組んだ。

まず、前方の注意を向けるべき領域が、ドライバーの視野領域に含まれていない場合を、前方に注意を向けていない状態としてリアルタイムに検知している。

このとき、前方の注意を向けるべき領域を、車両に搭載されたセンサーから計算される走行路の曲率と車速から、先行車両が存在すると想定される領域と定義した (Fig. 5)。その上で、視野領域の中心は、ドライバーモニタリングカメラから出力される視線向きとした。また、視野領域の大きさは、車両の速度が高速になるほど狭くなる⁽⁸⁾人間特性に沿った範囲とした (Fig. 6)。

その一方、安全確認のために周囲へ注意を向けている状態を全てわき見として検出しては、必要な安全確認を阻害してしまう。よって、前方の注意を向けるべき領域が視野領域に一定時間以上含まれていない場合のみ、わき見として検知している。同様に、周辺視で前方の変化をとらえ、前方に注意を向けようとしている場合でも、わき見として検出しては、ドライバーの意思を尊重することができず、煩わしさを感じさせてしまう。よって、前方の注意を向けるべきポイントが周辺視の領域に含ま

れていて、かつ、前方に注意を向けようとする眼球運動がみられた場合には、わき見として検知しない。

上記の考えに基づいて開発したわき見検知モデルを、さまざまなドライバー（人種・性別・年齢など）が、さまざまな交通環境（国内外の高速道路・住宅地など）を実際に走行したデータを用いて評価した。

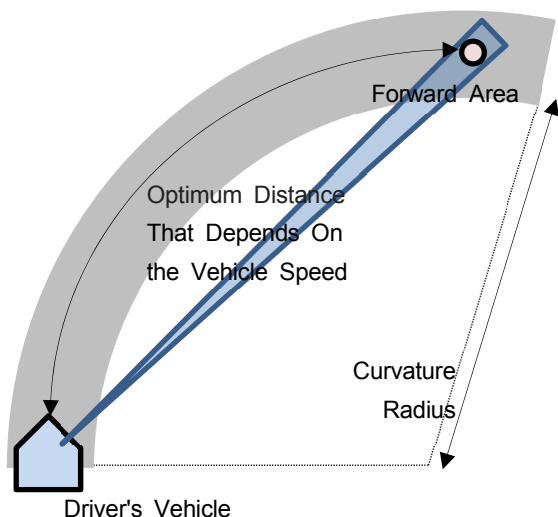


Fig. 5 Forward Area That Depends on the Vehicle Speed and Curvature Radius

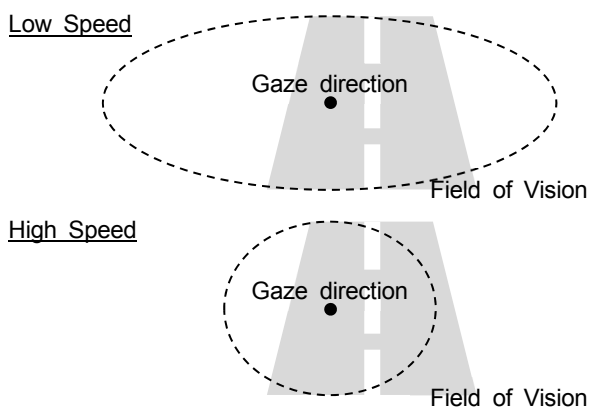


Fig. 6 Field of Vision That Depends on the Vehicle Speed

6. ドライバーへの働きかけ

6.1 眠気に応じた警報

ドライバーの眠気の状態に合わせて最適なタイミングで警報を行うことで、人間の感覚に合いなおかつ煩わしさを感じさせることなくドライバーに休憩を促す機能の実現を目指して開発を進めた。

上記に基づき次の2段階の警報を設定した。注意喚起

(Attention) 段階では、眠気が充進し今後事故が生じるおそれがある状態を検出し、休憩を促すための警報を出力する。また、警告 (Warning) 段階ではいつ事故が生じてもおかしくない状態を検出し、休憩を促す。警報は、各警報段階に応じて設定したメーター内の表示と警報音でドライバーに伝える (Fig. 7)。

警報の出力は、検知した眠気レベルの推移から判定する。警報出力判定の基準は、国内外の公道走行データに顔表情評定を用いて眠気の正確値をタグ付した結果を解析し、眠気の推移や変動のパターンに基づいて決定した。警報が主観的な眠気と合致しない場合ドライバーに煩わしさを感じさせるおそれがあるため、眠気レベル検知結果から最適なタイミングで警報出力判定がなされるように判定基準を調整した。

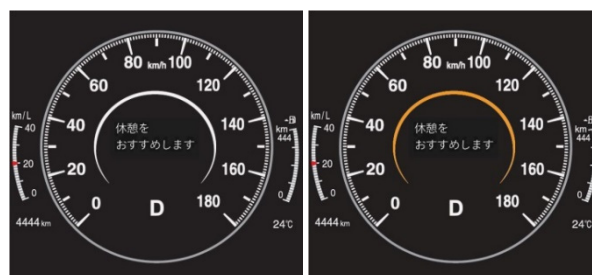


Fig. 7 Examples of Alert Display and Sound (Left: Attention, Right: Warning)

6.2 スマート・ブレーキ・サポート (SBS) 連携

「2.1 事故の実態」で言及したとおりに、ドライバーが正面を注視していないことが、多くの重大事故の発生要因となっている。しかしドライバーが正面を注視していないことを検出するたびに警報を出すことは適切ではない。そのため、対象物への衝突の可能性があるときに、ドライバーが正面を注視していないと判断した場合は、通常より早期に衝突警報を行うことで、ドライバーにいち早く危険な状況を気づかせ、安全運転をサポートする機能を搭載した。

具体的には、衝突の可能性がある状態まで先行車や障害物と接近した場合 (Fig. 8) に、前方不注意状態 (眠気やわき見を検知) であれば、警報とディスプレイの表示で、ドライバーに衝突の危険性を早期に知らせ、ブレーキ操作を促す。この機能により、発見の遅れによる衝突事故を低減する効果を更に高めることができる。

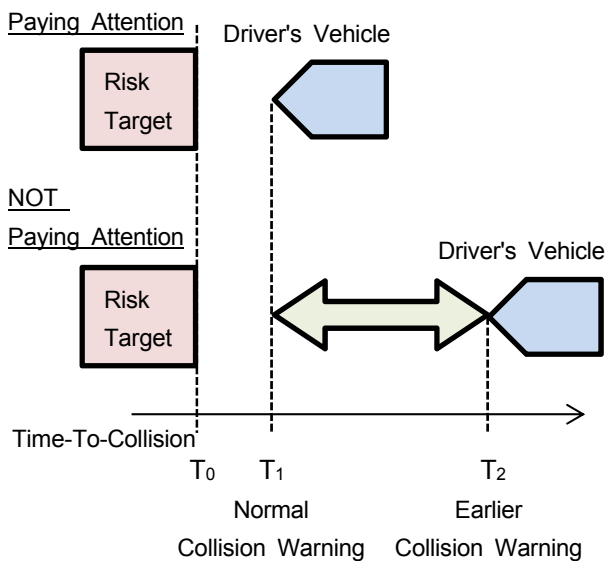


Fig. 8 Collision Warning Timing

7. おわりに

今回、新型MAZDA3に搭載した先進安全技術「カメラを用いたドライバー・モニタリング技術」を紹介した。新型MAZDA3では、運転中のドライバーの眠気・わき見を検知することで、交通死亡事故の実態の中でも、その要因比率が高い、危険な状態・行動について、ドライバーに早期に気付かせる技術を開発した。

今後は、マツダの2030年を見据えた技術開発の長期ビジョン「サステイナブル“Zoom-Zoom”宣言2030」に基づき、安心・安全なクルマと社会の実現により、全ての人が全ての地域で自由に移動し、心豊かに生活できる仕組みを創造し築いていく。そのために、ドライバーのさまざまな状態・行動を検知し、その状況に応じて適切に運転をサポートする技術の研究・開発を続けていく所存である。

参考文献

- (1) 中村ほか：マツダの先進安全技術「i-ACTIVSENSE」の進化，[マツダ技報](#)，No.32，pp.216-221 (2015)
- (2) 平成29年版交通安全白書 全文（内閣府）
（https://www8.cao.go.jp/koutu/taisaku/h29kou_haku/zenbun/genkyo/h1/h1b1s1_2.html）を加工して作成
- (3) 式井ほか：瞬目分析に基づく眠気推定の高精度化，自動車技術会2017年春季大会学術講演会講演予稿集，pp.2638-2641 (2017)
- (4) Dinges, D., Grace, R.: PERCLOS: A Valid Psychophysiological Measure of Alertness As Assessed by Psychomotor Vigilance, TechBrief

NHTSA, No.FHWAMCRT-98-006 (1998)

- (5) 大見拓寛：画像センサによる眠気状態推定とドライバーステータスマニターの開発，[デンソーテクニカルレビュー](#)，vol.21，pp.93-102 (2016)
- (6) 北島ほか：自動車運転時の眠気の予測手法についての研究（第1報，眠気表情の評定法と眠気変動の予測に有効な指標について），[日本機械学会論文集（C編）](#)，63-613，pp.93-100 (1998)
- (7) 寺田ほか：自動車運転時のドライバ眠気レベル推定モデルに関する検討，[自動車技術会2012年春季大会学術講演会講演予稿集](#)，pp.9-14 (2012)
- (8) 一般社団法人 交通工学研究会：道路交通技術必携 2018，東京，一般社団法人 交通工学研究会，p.58 (2018)

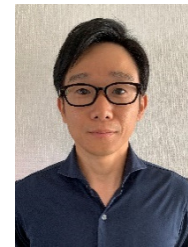
■ 著 者 ■



後藤 誠二



峯岸 由佳



山本 直樹



森谷 貴行



中村 創



片山 翔太

特集：新型MAZDA3

22

新マツダコネクトの開発

Development of New Mazda Connect

日原 圭祐*1 Keisuke Hihara	平嶋 秀一*2 Hidekazu Hirashima	藤丸 翔太*3 Shota Fujimaru	古屋 勝俊*4 Katsutoshi Furuya	伊藤 裕規*5 Yuki Ito
節家 淳*6 Atsushi Setsuie	中尾 堅志*7 Satoshi Nakao	赤坂 佳紀*8 Yoshinori Akasaka	岡野 英紀*9 Hideki Okano	

要 約

モバイルデータ通信の高速化や通信技術の進歩により、クルマがネットワークにつながり新たなサービスや機能を創造する“コネクティッドカー”への需要が高まる中、マツダは人間中心の考え方で、マツダらしい価値“生きる歓び”を創造するコネクティビティ技術の開発に挑んでいる。その中核システムであるマツダコネクトも、ヒューマンマシンインターフェースの進化、車載電子取扱説明書の導入、ナビゲーション機能の改良、さらにコネクティッドサービス対応などのお客様への価値創造を継続しており、その進化点について本稿で詳しく説明する。

Summary

With the ever-increasing speed of mobile data communications and the advancement of communications technologies, the demand for “Connected Car”, a vehicle that is connected to the network and creates new services and functions, has been increasing. Under such circumstances, Mazda is taking a human-centered approach aiming at developing connectivity technologies that will create Mazda-unique values to offer “joy of life” to all customers. The Mazda Connect, the core system of such connectivity technologies, is continuously creating customer values through evolution of human-machine interface, introduction of In-Vehicle Digital Owner’s Manual, improvements in navigation functions, support in Connected Service, and the like. This article describes in detail the points of evolution in the new Mazda Connect.

Key words : Information, Communication, and Control, Vehicle Navigation System/Communication System, Information System, Navigation System, Communication System, Human Interface

1. はじめに

国内でのスマートフォンの世帯保有率が2017年には75.1%^①となり、インターネット利用手段の第一位となっている。そして、どこでもインターネットにつながり、ネット上のコンテンツを楽しむ、気がつけばスマートフォンのアプリがアップデートされている、といったことが普通になっている。

クルマも、そんな“クルマの外のあたりまえ”の変化を反映した価値観や感覚の変化への対応が必要である。さらには、安心安全に走る歓びを提供するという基本的価値の進化とともに、マツダならではの新たな顧客価値を提供することを掲げ、新マツダコネクトを開発した。

その内容を以下に紹介する。

2. 開発のねらい

現行マツダコネクトで重要ポイントとして注力した、安全なヒューマンマシンインターフェース(HMI)の思想を踏襲し進化させている^{②③}。さらに車載電子取扱説明書やナビゲーションなどで機能追加・機能改善を織り込むとともに、車載通信機を搭載することで“コネクティッドサービス”に対応し、マツダならではの新たな顧客価値・保有体験を提供できるシステムとした。

またシステム構成を刷新し、一層の高音質化・高画質化を図っている。

*1, 3~9 情報制御モデル開発部
Infotainment and Control Model Development Dept.

*2 統合制御システム開発本部
Integrated Control System Development Div.

3. 現行マツダコネクトからの進化点

3.1 HMIの進化

現行マツダコネクトの開発では、HMIの再点検を行い、人間にとって理想のインターフェースとはどうあるべきかを考えた上で、その実現に向けた開発を行った^(1, 2)。具体的には、ドライバーの注意が散漫になり、本来維持すべき“運転への注意”が疎かになる状態（ドライバーディストラクション）に注目し、下記の分類に従って、それぞれのディストラクションの低減を目指して設計を行った（Table 1）。

Table 1 Type of Distractions and Measures in Current Mazda Connect

Type of distractions	Measures in current Mazda Connect
Cognitive distraction	Optimum information layout
Visual distraction	Optimum HMI device and layout
Manual distraction	Make commander based interaction

- Cognitive distraction（意識の脇見）：
前方道路から“心”が離れる際の不注意状態
- Visual distraction（見る脇見）：
前方道路から“目”が離れる際の不注意状態
- Manual distraction（操作の脇見）：
ステアリングから“手”が離れる際の不注意状態

新マツダコネクトのHMI開発においても、この三つのディストラクションの低減という考え方を継続しながら、一層の進化を目指した。その指標の一つとして、ISO9241-11のユーザビリティの定義を参考にしている。

ISO9241-11では、ユーザビリティを“ある製品が、指定された利用者によって、指定された利用の状況下で、指定された目的を達成するために用いられる際の、有効さ、効率及び利用者の満足度の度合い”としており、各指標は以下のように定義されている。

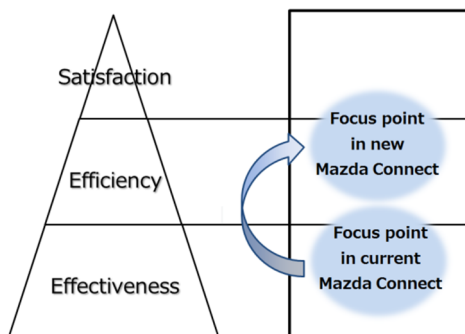


Fig. 1 Evolution of Usability that Mazda Considers

- Effectiveness（有効さ）：
特定の目標を達成する上での正確さ、完全さ
- Efficiency（効率）：
目標を達成する際に費やした資源
- Satisfaction（満足度）：
不快さがない、及び製品へ肯定的な態度

現行マツダコネクトでは、この中の“有効さ”及び“効率”について注力したが、新マツダコネクトでは“効率”について進化させ、さらに“満足度”も改善することを目指した（Fig. 1）。具体的な施策は以下のとおりである。

(1) 見る脇見の低減

運転中にドライバーの視線が前方から逸れる時間を低減するため、現行マツダコネクトでは視線移動時間・焦点調節時間・表示判読時間の三つの時間を最小化できる遠方上方の位置にディスプレイを配置した。新マツダコネクトでは、現行アクセラに対して視距離をさらに遠方化し、焦点調節時間の短縮を図っている。

(2) 操作の脇見の低減

現行マツダコネクトでは、ユーザーが“安定した姿勢で楽に”“操作部を見ずに”“間違えずに確実に”操作できるようにするため、コマンダーを用いた操作体系を構築したが、新マツダコネクトではコマンダーの形状とレイアウトを見直すことで、更なる自然な操作感を目指した。コマンダーの形状は、平均的体形の人間の手の大きさを基準に、より自然につかむことができるように直径を大型化した。また、レイアウトも同様に、コマンダーの位置を前方へ移動し、アームレストとコマンダーの高さの差を減らすことで、コマンダーを操作するユーザーの腕を適切に支えた上で、無理な筋負担なく操作できるように改善した。

(3) 意識の脇見の低減

意識の脇見とは、運転中に運転以外のことに気を取られる状態を指す。現行マツダコネクトでは運転情報とそれ以外の情報を明確に分離したゾーン配置とすることで、走行中に運転以外のことに気を取られる時間を最小限にすることをねらった。

新マツダコネクトの開発に際して人間研究を進めた結果、ユーザーの“注意資源”を最小化することが意識の脇見の低減につながる事が分かった。人間が何かしらの刺激を受け取ってから、機械に対して操作をフィードバックするまでのプロセスは“認知”・“判断”・“操作”に分けられる。この中の“認知”の過程は、感覚器を通して得られた情報を無意識に処理するもの（低次処理）

と、その得られた情報を長期記憶と照合し、情報の意味を認識するもの（高次処理）の二種類があるが、後者は“注意資源”を多く使う。“認知”の過程で高次処理されて行われる操作は“ルールベース行動”と呼ばれるのに対して、人間が習熟し、“認知”の過程が低次処理され判断が自動化された操作は“スキルベース行動”と呼ばれ、比較的“注意資源”を費やさずにできる行動である。ユーザーが学習しやすいHMIを設計し、“スキルベース行動”になるべく早く移行できるようにすることで、意識の脇見の低減し、結果として直観的なHMIとなることを目指した。

新マツダコネクテではその手段の一つとして、全ての画面で操作パターンを統一した。コマンダーの形状から想起される基本的な操作パターンを回転・プッシュと定め、それを基本とした操作体系に全体的に統一することで、ユーザーが無意識のうちに操作を学習し、注意資源を使うことなく直観的に操作できることを目指した (Fig. 2)。

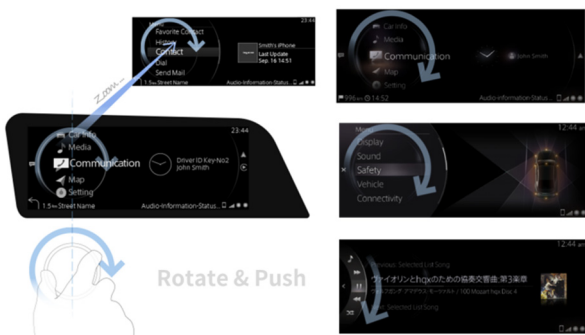


Fig. 2 Operation Rule with Sense of Unity

また操作パターンの統一と合わせ、画面内の情報の一覽性を向上することで、瞬時にユーザーが欲する情報を確認でき、迷いなく希望の機能を実行できるようにした。具体的には、人間の目が縦方向より横方向のほうが動きやすいという特性と前方視界を妨げない高さを考慮し、ディスプレイサイズを現行マツダコネクテの7インチから8.8インチワイドへと大型化している。そのうえで、i-ACTIVSENSE、車内外照明、ドアロック、ナビゲーション・オーディオなどの各種設定項目を対象に、画面右側に 詳細説明の画像と文言を追加した。これにより、各項目が何を設定するもので、変更した結果どうなるかを分かりやすく示すようにした (Fig. 3)。



Fig. 3 Setting Items with Picture and Explanation

(4) タスク完了時間の低減による“効率”の向上
 ユーザビリティの指標における“効率”の改善のため、操作の手数を減らし、タスク完了時間の低減を図った。具体的には、ラジオのプリセットや受信可能放送局／USB Audioなどの曲リストへダイレクトにアクセスできる機能、車両状態や不在着信などさまざまな種類の通知情報に素早くアクセスできる機能を搭載した。

現行マツダコネクテでは、音楽再生中の放送局／楽曲リストを表示する際、コマンダーの回転・プッシュ操作を複数回行う必要がある。新マツダコネクテでは、音楽再生画面からコマンダー回転の1操作のみでリストを表示するようにした。また通知情報を確認する際、現行マツダコネクテでは通知の種類に応じてメニューが分かれており、各種の通知を別々に確認する必要がある。新マツダコネクテでは、ホーム画面からコマンダー左チルトの1操作のみで通知を一覧で表示するようにした (Fig. 4)。



Fig. 4 Direct Access to Playing List and Notification List

また、音声認識にバージン機能を新規搭載した。バージン機能とは、システムによる音声フィードバック中にユーザーの割り込み発話を許可する機能である。現行マツダコネクストでは、システムがユーザーの発話を許可している区間以外では発話が許可されていないため、発話のタイミングが合わずに音声認識がされず、タスクが達成できないことがあった。本機能を搭載することで、ユーザーは発話のタイミングを計ることから解放される。さらに、システムの音声フィードバックが終了するより前に割り込んで発話することが可能となるためタスクをより速く達成することができ、“効率”の改善を実現している。

(5) デザインの進化による“満足度”の向上

新マツダコネクストの開発では、デザインの進化によって、ユーザビリティの指標における“満足度”を向上した。“統一感”をキーワードに、性能とブランド様式を両立するユーザーインターフェースデザインをデザイン部門、開発部門と実研部門で協議し、外観と操作感についてマツダコネクストだけでなく、メーターやアクティブ・ドライビング・ディスプレイ含めてトータルデザインを行った (Fig. 5, 6)。



Fig. 5 Mazda Connect Screen Design with Sense of Unity

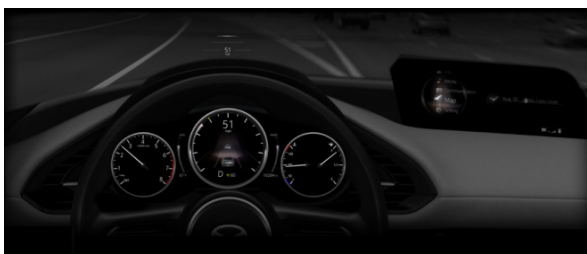


Fig. 6 Cockpit Design with Sense of Unity

またマツダコネクストの機能は多岐にわたるため、膨大な数の画面デザインにおいても“統一感”を保つ必要がある。そこで、画面のレイアウトやUI (ユーザーインターフェース) コンポーネント・インタラクションについて

体系的に要件を整備したデザインガイドラインを作成し、効率的に開発を行った (Fig. 7)。

各画面での例

例：リスト画面

ダイヤル/キー	操作
回転	対象コンテンツの選択
押下	選択項目の決定
左チルト	前の画面状態に戻る
右チルト	画面中の操作対象移動

リスト画面における水平チルト操作は、回転操作の対象を切り替えるために用いる。

水平チルト操作が行える画面状態時では、操作が行えるかどうかをユーザーに明示するためのシグニファイアを設ける。

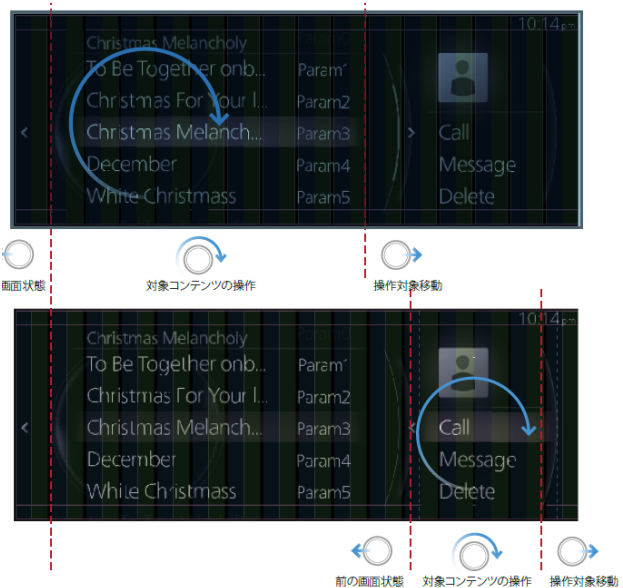


Fig. 7 Design Guideline Example

3.2 車載電子取扱説明書

車両に搭載されている各種の機能を使用したい時、車両内で警告灯が点灯し困った時などに、すぐに適切な説明・対処方法を提供するため、車載電子取扱説明書を導入した。本機能はサービス部門と共同で、ユーザー観点での使い方の説明やわかりやすさなどを議論しながら開発を進めた。

また3.1章にて記載したHMIの考え方にに基づき、同様のUIで実現した (Fig. 8)。



Fig. 8 Top Menu of In-Vehicle Digital Owner's Manual

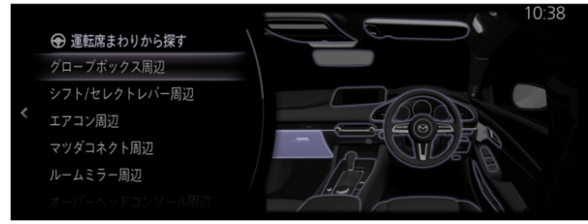


Fig. 11 Interior Feature Search Menu

車載電子取扱説明書の主な特徴は下記の3点である。

(1) 警告灯との連携

メーターの警告灯が点灯した時、対処方法をすぐに参照できるように、新マツダコネクト上に表示を行い、その画面から車載電子取扱説明書の該当記載箇所へ遷移できるようにした (Fig. 9)。車両内で発生する100を超える数のワーニングがどんな条件で発生し、どんな対処をすべきかを確認し、わかりやすく伝えられるように連携機能の設計を行った。

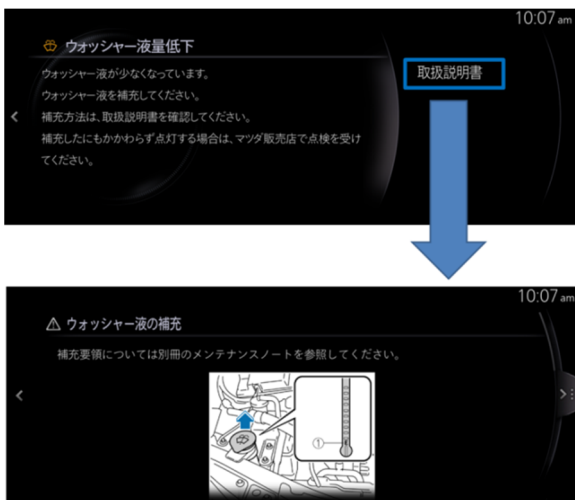


Fig. 9 Link Function Behavior when In-Vehicle Warning Occurred

(Upper: New Mazda Connect Screen,
Lower: In-vehicle Digital Owner's Manual Screen)

(2) 取扱説明書の検索機能

通常の手取扱説明書のように目次から検索する機能 (Fig. 10) に加えて、運転席まわりのスイッチなどから視覚的に検索が可能な機能 (Fig. 11) を提供した。これにより、必要な情報への直感的なアクセスを実現した。



Fig. 10 Table of Contents Menu

(3) 動画再生機能のサポート

車載電子取扱説明書の動画の再生を可能とし、特に車両に新たに搭載された機能に対して、車内で動画を見ながら、操作方法を直感的に理解できるようにした (Fig. 12)。



Fig. 12 In-vehicle Digital Owner's Manual Movie Screen

3.3 地図画面の進化

ナビゲーション機能においても、3.1章で述べた考え方にに基づき、ドライバーディストラクションを最小限にするよう開発を行った。ナビゲーションでは、地図上の自車位置、経路案内中であれば交差点までの距離・右左折の方向等、さまざまな情報が提供される。これらの情報を人間の認知特性に基づいて優先度や視認性を考慮し、ディストラクションが最小となるように表示タイミングや画面上のレイアウトを設計した。以下にその具体例を示す。

(1) 経路案内情報の集約

Zの法則 (人の視線が左上⇒右上⇒左下⇒右下と動く傾向) を利用し、経路案内に必要な情報を画面左上に集めた。ドライバーが、経路案内を必要としたときに、瞬時にどこを見ればよいか分かるように配置した (Fig. 13)。



Fig. 13 Aggregation of Route Guide Information

(2) 方面看板の導入

直観的な案内をドライバーに提供するため、現実世界

と同等の方面看板を表示する機能を追加した。ドライバーが運転している際、現実世界の方面看板とナビゲーション画面内で表示される看板の表現を合わせることで、直観的に方向または方面を把握できる (Fig. 14)。



Fig. 14 Area, Direction and Road Name

(3) 現実世界を模擬した3D表現 (ランドマーク)

ドライバーが運転する際、参考にする情報の一つとしてランドマークがある。ランドマーク情報をより現実世界に近い表現にすることで、ドライバーは曲がるタイミング及び進行方向の確からしさを確認できる (Fig. 15)。



Fig. 15 Landmark Expression

3.4 目的地検索機能の強化

地図画面のみならず、ナビゲーションの各機能を一新した。ここではその中でも、ナビゲーションを利用する入口として重要な、検索機能の進化について解説する。

従来の目的地検索機能には、“検索機能が煩雑で入力し難い”という問題があった。“ある場所に行きたい”という要求に対して、ユーザーは目的地に関する情報を基に、ナビが用意している複数の検索方法から一つを選択しなければならなかった。例えば店舗の名称と住所といった二つの情報を持ち合わせている場合、どちらが入力として最適なのかを考えなければいけない、という手間が発生していた。

こうした手間をなくすため、新マツダコネクトでは従来の検索機能に加え、一つの検索メニューからナビがもつ全ての情報を一括して検索する“フリーワード検索”機能を導入した (Fig. 16)。

フリーワード検索の特徴は、車載のナビゲーション用に最適化されていることである。車載機では計算用のリソースが限られるため、より効率良く検索できるようにファイルサイズや、キーワードの補完等を最適化した。またワイドディスプレイの利点を活用し注意資源の消費



Fig. 16 Search Result Contain Entire Data: Favorite, Genre, Address, POI

を低減した。以下にその具体例を示す。

(1) 文字入力機能の最適化

従来のひらがなによる50音検索だけではなく、漢字変換に対応して検索機能を向上させている。また、予測変換にも対応することで入力負荷の低減を図っている。加えて、変換結果の学習を行うため、使い込むほど文字入力の作業量を低減できる設計になっている (Fig. 17)。



Fig. 17 Input Data Learning: Previous User Input Data Appears Head of Candidate

(2) ワイドディスプレイを利用したUIの最適化

新マツダコネクトで採用したワイドディスプレイを活かし、検索結果と地図表示を一つの画面に集約した。検索結果と地図上での場所を同時に表示することで、意図通りの検索結果になっているかを確認しやすくなっている (Fig. 18)。

また、入力・結果・地図それぞれの画面は、各ページが独立し、情報を断続させる遷移ではなく、コマンドを左右にチルトして表示エリアを切り替えるというシームレスな遷移とし、より直観的で理解しやすい操作を実現している。



Fig. 18 Search Results and Map Pane: Right Tilt will Change Control Pane to Adjust Destination

3.5 車載通信機を使ったコネクティッドサービス

新マツダコネクトでは、新たに携帯電話網を使用する車載通信機を搭載し、さまざまなコネクティッドサービスを利用可能とした。重大な事故や故障などの“もしも”の場面でも安心と安全を感じていただけるよう、24時間さまざまな場面でお客をサポートする。ここでは提供する主なサービスについて解説する。

(1) マツダエマージェンシーコール

エアバック作動時等に事故が発生した地点を車載通信機経由でコールセンターへ自動通報し、救命手配を行う機能である。また体調の急変などにより、SOSボタンを押して手動で通報する機能も搭載した。日本市場においては、自動通報時に、衝突方向・衝突の激しさ・シートベルト着用有無・多重衝突の有無も送信し、コールセンター側で傷害の程度を予測、必要があればドクターヘリに出動要請を行い、救命時間短縮が可能となるD-Call Net®に対応した⁽⁴⁾。

(2) マツダアドバイスコール

車両故障時には、関連する故障内容を車両からサーバーへ自動的にアップロードを行う。更に、走行できないような深刻な故障が発生した場合には、3.2(1)の車載電子取扱説明書と警告灯連携機能により、オペレーターに接続し、適切な処置及び近隣ディーラーへの入庫を案内するとともに購入ディーラーへ情報共有を行う (Fig. 19)。

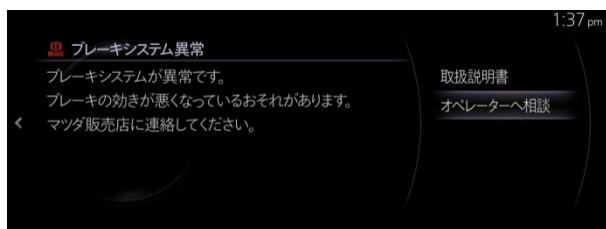


Fig. 19 Link Function Behavior when In-Vehicle Warning Occurred

(3) スマートフォンアプリとの連携機能

専用のMyMAZDAアプリを使い、車両状態の確認（メンテナンス部品の交換時期・燃料残量・走行距離等）や、車両から離れた後の状態通知（ドア、トランクの施錠忘れ・スモールライトやハザードランプの点灯継続・盗難防止アラーム）、施錠や広い駐車場で車両を見つけるためのハザード点滅等の遠隔操作が行える。また、アプリで目的地を検索し、ナビゲーションに目的地転送する機能も備えている。

(4) データ更新機能

サーバーと接続することにより、マツダコネクトシス

テム全体を制御するコネクティビティマスタユニット（CMU）のソフトウェアやナビゲーション地図の差分データ（日本市場のみ）を自動で更新し、システムを最新に保つことが可能とした。

4. システム概要

新マツダコネクトでは、これまで述べてきた進化点を一層の高画質・高音質とともに提供するため、システムを構成するユニットの機能・レイアウトを最適化し、音声・映像のデジタル伝送を全面的に採用した。具体的には、チューナーをリアガラスアンテナ近くに配置し、高周波伝送経路であるアンテナフィーダーを短縮した。これによりノイズと信号減衰の影響を低減し、ラジオ受信性能を向上させている。またオーディオアンプは、スタンダード・プレミアムとも他ユニットと独立した別体構成とし、音響性能向上に必要な出力チャンネル数を確保するとともに、スピーカーとのハーネス経路を最短化できるレイアウトとした。

また、デジタル伝送方式として、音声通信に高帯域車載マルチメディアネットワークの一つであるMOST®テクノロジー（Media Oriented Systems Transport）を採用した。これにより音質劣化を防ぐとともに、CMU・オーディオアンプ・チューナー間で必要となる制御・データ・音声通信を最小限のハーネスで実現している。映像通信にはGMSL（Gigabit Multimedia Serial Link）を採用し、高画質を実現している。

本システムの主要部品構成を (Fig. 20) に示す。

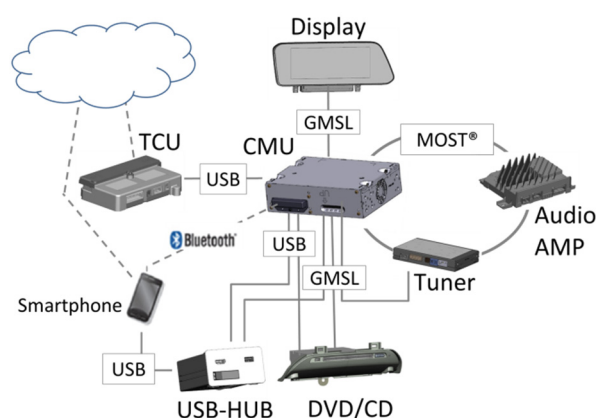


Fig. 20 Mazda Connect System Diagram

5. おわりに

マツダコネクトは、お客様に更なる“つながる楽しみ”と“走る喜び”を実感いただける機能やサービスを提供し、これからもお客様の笑顔とともに進化を続けていく。

参考文献

- (1) 「平成30年版情報通信白書」（総務省）第2部第2節1

インターネットの利用動向

- (2) 山本ほか：マツダコネクトの開発, [マツダ技報, No.31, pp.24-28 \(2013\)](#)
- (3) 藤原ほか：ヘッズアップコクピットの開発, [マツダ技報, No.31, pp.29-33 \(2013\)](#)
- (4) 2019.3.28プレスリリース：「救急自動通報システム「D-Call Net®」, 新たにSUBARU, 日産, マツダにも搭載。D-Call Net®への対応は9団体に拡大」

特集：新型MAZDA3

23

新世代ワイパーシステムの開発

Development of Wiper System for New Generation Vehicles

近藤 啓介*1 Keisuke Kondo	畠中 威*2 Takeshi Hatakenaka	山内 一平*3 Ippei Yamauchi
青木 茂*4 Shigeru Aoki	井上 俊一*5 Syunichi Inoue	伊藤 孝治*6 Kouji Ito

要約

新型MAZDA3から始まる新世代商品群は「走る喜び」を全領域で進化させている。新型MAZDA3の開発に当たっては新世代商品群のトップバッターとして人間中心の考え方のもと人馬一体をこれまで以上に極めることが使命であった。いかなる環境下においても意のままに操れるクルマを実現するためには見たい時に見るべきものがストレスなく見える視界視認性は非常に重要な要素となる。ワイパーにおいては晴天と同じように運転できる安全と安心を提供することが必要である。そこで、ワイパーの原理原則に基づいて基本機能に立ち戻り、目標を設定し直した。その実現のために取り組んだのがワイパーモーター制御を中心に据えた機能進化である。新型MAZDA3では速度、位置の制御によってワイパーの多くの課題を解消した。本稿では新世代ワイパー開発における機能進化の考え方、採用した技術、実現のための活動内容について紹介する。

Summary

The new generation vehicles beginning in all-new Mazda3 have evolved “driving pleasure” in all fields. Our mission in the development of the new Mazda3 is to pursue better “jinba-ittai” (Oneness between horse and rider) based on an idea of “Human Oriented” as a new generation lead-off batter. To realize a car that provides predictable and responsive handling under any environments, the visibility performance to allow the driver to see what should be seen when he/she wants to see without stress is very important. What is required for wiper development, we believe, is that the same level of safety and ease as the one under the fine weather is provided. Therefore we reconsidered the basic functions of the wiper, and re-set a target based on principles. We worked on functional evolution mainly for wiper motor control and solved many problems of the wiper by controlling speed and position in the new Mazda3. This report introduces a concept of functional evolution, an adopted technologies, and activities we engaged in to realize the ideal car.

Key words : vehicle development, electronics and control, visibility, wiper, washer

1. はじめに

ワイパーシステムの歴史は古く、一般的に進化の乏しいシステムというイメージがある。そうした中で新型MAZDA3を始めとした新世代商品開発に当たり、マツダではワイパーの理想を定義することから始めた。本稿では、ワイパー開発において行ってきた機能進化の考え方、採用した技術、実現のための活動内容について紹介する。

2. 機能進化

2.1 開発コンセプト

ワイパーの基本機能は、視界を阻害するものを除去することである。それによるお客様への提供価値は晴天と同じように運転できる安全と安心を提供することである。つまり晴天同様に存在を感じさせないのが理想のワイパーと考えた。そのために払拭性能と広い視界という2つの機能を進化させ、理想のワイパーに近づけることとした。

*1, 3 電子基盤開発部
Electronic Platform Development Dept.

*4 電駆・PT制御部品開発部
Electric Drive & PT Control System
Component Development Dept.

*2 ボデー開発部(兼)統合制御システム開発本部
Body Development Dept.
And Integrated Control System Development Div.

*5, 6 車両実研部
Vehicle Testing & Research Dept.

(1) 新世代ワイパーにおける進化概要

新世代ワイパーでは、払拭速度、払拭角など制御因子を拡大することで、払拭性能の向上に加え、Aピラー拭き残し低減、視界妨害の低減、更にウォッシャー洗浄効率向上といった視界視認性を大幅に向上させることをねらった。その実現のために、従来の物理的な構造進化に加えて、制御を中心としたソフト領域の進化を行った。

(2) 払拭性能

ワイパーはFig. 1のようにガラス面上の水を均一な厚さの水膜にすることで光の透過を均一にし、視界を確保している。この薄い均一な水膜を形成した状態を流体潤滑と呼んでいる⁽¹⁾。

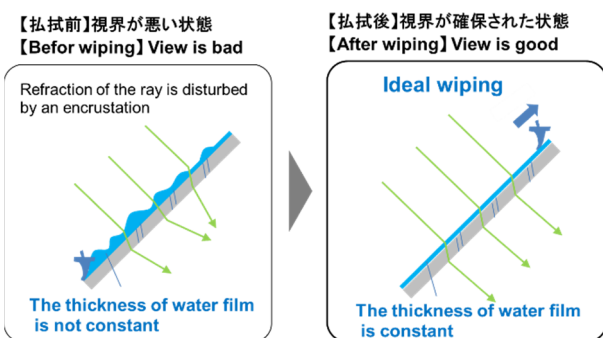


Fig. 1 Relation of Visible Ray and Wiping

Fig. 2にブレードラバー先端における流体潤滑の模式図を示す。Pは圧力、 v は速度、 l は接触長さ、 h_1 、 h_2 は払拭前後の水膜厚である。これらをコントロールし、あらゆる環境変化に対して流体潤滑を実現させる技術こそが、ワイパー払拭性能の本質である。

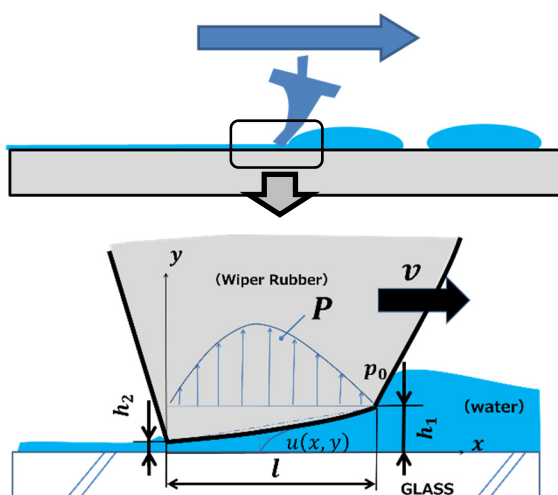


Fig. 2 Fluid Lubrication of Wiper

この考え方を基に、ラバーとガラスの間に潤滑の基礎方程式をあてはめて考えてみると、水膜厚は速度、圧力、接触幅の関数で表すことができる。よってこれらをコン

トロールすることで水膜厚をねらいの値にすることが可能である。

一方で、現実のワイパーシステム的设计においては、ラバーをはじめとした業界標準品の採用などの制約もあることから、第一段階としてモーター出力でコントロール可能な速度を払拭性能において注力する制御因子とした。

(3) 広い視界

Fig. 3のように運転席側Aピラーは横断歩行者の確認をはじめ、視界の重要機能が集約している。

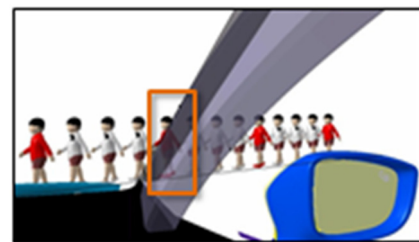


Fig. 3 Visibility of A-PILLER

しかしここにワイパーの拭き残しによる汚れが残っていると、十分にその機能を発揮できない。この拭き残しは、部品の劣化、使用環境、車速など作動抵抗の変化によるワイパー反転位置の変動に対して、Aピラーとブレードを干渉させないための必要クリアランスである。よって、作動抵抗の変化を検出し、Aピラーとのクリアランスを縮小させる機能を追加することにより拭き残しを理想であるゼロに近づけることができる。

また、ワイパーを室内から見えないようレイアウトすれば下方視界を妨害させないようにできる (Fig. 4)。これは優れた車両外観見映えを実現するためにも効果的である。よって、アーム&ブレードの停止位置の理想はボンネット下である。ただし、単純にボンネット下に格納すると、背反として寒冷地要件であるアームのロックバック (アームを立てる動作) や積雪による拘束で発生する作動停止を起こす。そのため、使用環境によって停止位置を変え、負荷に応じて反転位置を変える機能の追加により下方視界妨害を解消できる。

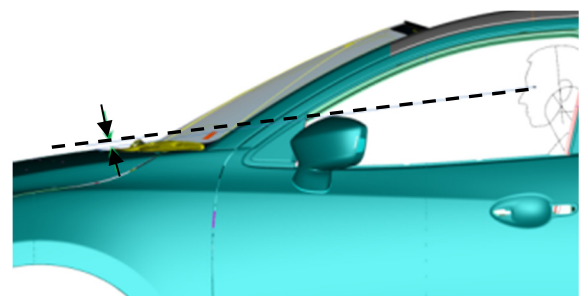


Fig. 4 Wiper Appearance from Cabin

従来、マツダで採用してきた一般的なウォッシャーシステムは、Fig. 5のようにガラス面の広範囲にウォッシャー液を散布した後にワイパーで拭き取る構造としており、ウォッシャー液による視界妨害と無駄なウォッシャー液の消費があった。

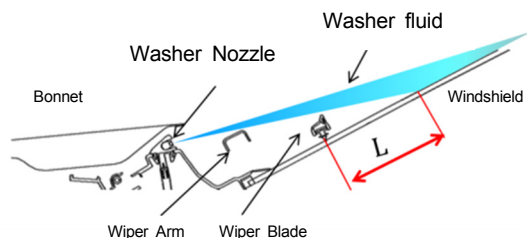


Fig. 5 Previous Washer System

この視界妨害とウォッシャー液の無駄はFig. 6のようにウォッシャー液とブレードの距離Lを最小化することでなくすことができる。ウォッシャーノズルをアームに設定し、アーム位置情報を基に、ウォッシャー液を噴射させる機能の追加によりこれらの課題を解消することができる。

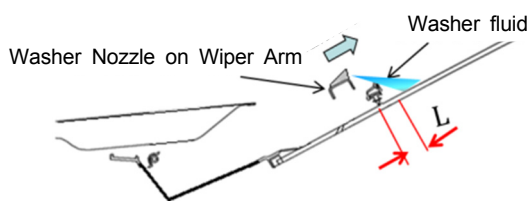


Fig. 6 New Washer System

上記のように用途や環境に応じてワイパーの位置をコントロールすることが広い視界を実現するために重要である。したがってワイパー位置を広い視界の実現において注力する制御因子とした。

3. 実現手段

3.1 優れた払拭性

ワイパーは外部に露出した機構部品であることから走行風をはじめとして変化する作動抵抗を常に受けている。流体潤滑では作動速度の変化により水膜厚は変動するため、モーターの速度コントロールではこうした外的な作動抵抗を高精度に検出し、作動速度を変化させることなく出力制御する必要がある。一方、ワイパーはガラス面上で扇状の揺動運動をしているため反転位置で必ず速度が0となる。それらを考慮しねらいのモーター速度としては、Fig. 7のように通常払拭域の速度を極力一定にするとともに、反転位置からの加減速区間の最小化を行った。加減速区間においては急激な変化が異常挙動とならないよう車両で確認しながら最終値を決定している。

速度はモーター内のセンサーマグネットによる3相のパルスを基に換算している。これら情報を基に内マイコンによるフィードバック制御によってねらいの速度に補正させている。

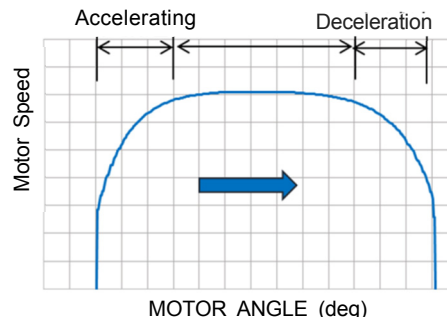


Fig. 7 Speed Map of Motor

また走行風による作動抵抗の急激な変化を生じないようにするためにアームの形状、配置の見直しを行い、アーム周りの整流化をおこなっている (Fig. 8)。

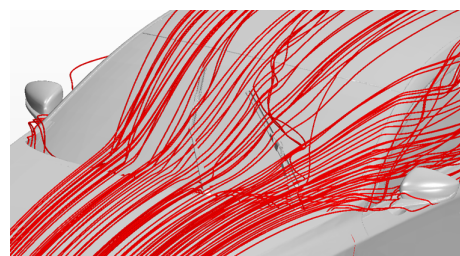


Fig. 8 Wind Stream Line of All-New Mazda3

3.2 Aピラー部の視界

オーバーランによるAピラーとの干渉を回避するため、新型MAZDA3のワイパーでは以下2つの対応を行った。

これらにより反転位置でのAピラーとのクリアランス縮小を可能とし、拭き残しをブレード先端で従来車比最大約15mm低減させている (Fig. 9)。

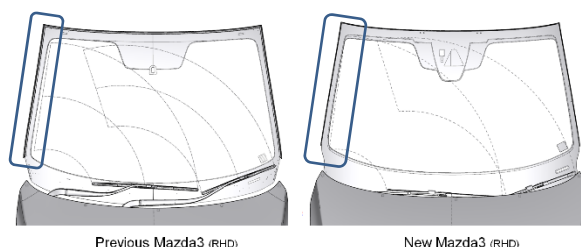


Fig. 9 Wiping Area

- (1) Aピラーに溜まった水によるスリップ対応
Aピラー側反転位置にはワイパーが揺きあげた水が溜まる。少雨環境下では溜まった水の影響で反転位置付近のみ摩擦抵抗が低くなり、機構的な弾性変形、制御上の

オーバーシュートにより反転位置付近でブレードのオーバーランが必ず発生する。そのため、Aピラーとのクリアランスを広げることなくオーバーラン干渉させないようにすることが課題であった。そこでこの現象が発生するのはAピラー反転位置以外の摩擦抵抗が高い時（ガラス面が乾いている）ということに着目し、ガラス面の摩擦抵抗から作動角を変動させることとした。抵抗値を検出し、モーターECU（Electronic Control Unit）にドライ判定機能を設け、反転位置以外の摩擦抵抗が大きい場合は作動角を縮小する制御を実装している。これによりワイパー払拭視界として必要なウェット状態の拭き残しを悪化させることなく、Aピラーの溜まった水によるオーバーラン干渉を解消している。

(2) 高速走行中の風によるオーバーラン対応

そのほか、Aピラー部でオーバーランが発生する使用環境が高速走行時である。一般的に走行風によるオーバーラン量は車速に応じて拡大するため、従来は開発目標車速に応じてAピラーとのクリアランスを設定してきた。走行風の大きさを事前に予測する方法は車速情報を使用するなどいくつかあるが、より実環境に近い制御とするため、新型MAZDA3では特定作動角度における作動抵抗値を用いている。これにより、走行風によりオーバーランが大きいと予測される時には、積極的に反転位置をAピラー手前で止め、走行風による必要クリアランス不足の課題を解消している。

3.3 ワイパーシステムの視界妨害

人間中心の考え方においては運転に関係のないものが見えることはノイズである。ドライバーが運転に集中できるようボンネット下格納とウォッシャー噴射タイミングの制御を行った。

(1) ワイパーのボンネット下格納

新型MAZDA3ではアーム&ブレードをボンネット下に配置している（Fig. 10）。

一方でボンネット下にワイパーがあるとアームを立てることができず利便性が悪化する。そこで位置制御によりサービスポジション機能を追加している。この追加機能によりアームを立てたい時には簡単なコンビスイッチ操作でアームを立てられる位置まで動かせるようにした。

また、降雪地域などにおいてボンネット下に雪が堆積することでアームがロックし動かなくなることも弊害事象として存在する。これに対しては作動トルクに閾値を設け自動反転機能を追加している。これにより降雪環境においても弊害を感じることなく作動可能としている。

なおボンネット下格納にしたことは視界や外観映えの向上に加えて風切り音低減にも効果があり車両品質向上に貢献している。

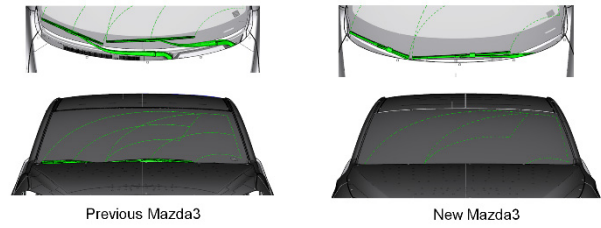


Fig. 10 Wiper Arm Set Position

(2) ウォッシャー噴射妨害

ウォッシャーノズルをアームに設定し、噴射タイミングをワイパー作動と緻密に連動させることで、ドライバーは視界妨害なくガラス面の洗浄を行うことができる。

モーターの情報を基に、オープン作動（停止位置→反転位置）の一定区間でウォッシャー液を噴射するよう制御している。また着水点はブレード手前に設定した（Fig. 11）。これによりクローズ作動（反転位置→停止位置）では飛散させることなく、十分なウォッシャー液をブレードに供給できるようにした。ウォッシャーノズルはブレード後方に配置し、噴射はジェット方式とすることで走行風などの外乱を受けにくい構造としている。

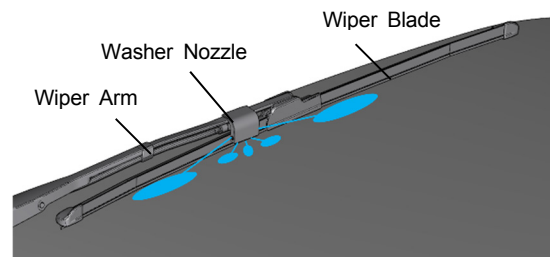


Fig. 11 New Washer Nozzle of Mazda3 (Driver-side)

この構造は高速走行中の洗浄性改善にも貢献している。従来のボンネット下からの噴射では風の影響によってねらいどおりにガラス面に着水せずガラス面洗浄に時間を要したが、アームに装着させたことで、高速環境下においても必要な水分をブレード全域に行き渡らせることができた。社内実験でも洗浄可能車速の向上を確認できている。

3.4 システム概要

(1) モーター仕様

速度、角度、停止位置の制御を行うために、角度によって回転方向を調整できる反転制御タイプのモーターユニットを採用した。

(2) システム構成

車両の統合ECUであるセントラルボディコントロールモジュール（C-BCM）で作動モードをコントロールし、使用環境や状況に応じた制御機能をモーターに機能配分した（Fig. 12）。

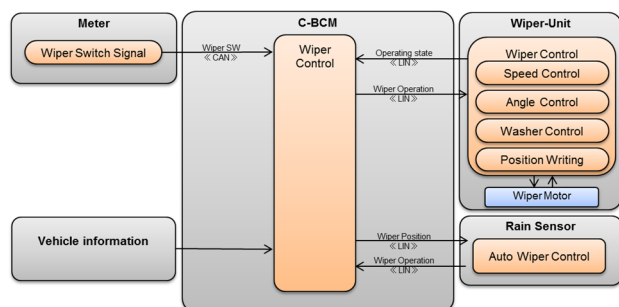


Fig. 12 Structure of Wiper System

4. 機能進化とモノ造りのつながり

4.1 生産工程でのAピラー学習

新世代ワイパーの開発は五位一体（生産、購買、物流、品証、開発）で行ってきた。ここでは、代表事例としてAピラー拭き残し最小化を生産部門と取り組んだ活動を紹介する。

いかなる制御を部品単体の実装させたとしても、車体や組み付けに伴う製造バラツキは必ず発生する。一般的に複数の部品で構成される車両設計においては製造上の工程能力を基にしたバラツキを考慮しなければならない。それは、今回注力したAピラーとの必要クリアランスも同様であり、作動角制御を用いても解消できない必要な隙が存在した。そこで新型MAZDA3では、ワイパー側の作動角度を書き込み可能な状態にし、工場で車両完成後に一台一台、Aピラーとのクリアランスを学習する工程を追加した。工程構築のために、ワイパーシステムが弾性変形することによる位置決め精度悪化の対応、手動による位置決めで生産タクト要求を満足させるための学習専用モードの対応、生産工程において誤操作をした場合の対処方法など、多くの課題解決を新型MAZDA3量産化と併行し行った。このようにマツダでは五位が一体となって機能進化とモノ造りを支えている。

4.2 ワイパー性能の机上評価

従来、機構設計を主体としてきたワイパー開発において、ソフトウェアを中心とした機能進化は、これまでの開発手法を見直すきっかけとなり、新たな取り組みを開始している。新世代ワイパーでは、ワイパー主機能が複数のECUに分散され、検証すべきテストケースは増加し従来の開発手法では全ての評価をしきれない状況が顕在化していた。

そのため新世代ワイパー開発では機構設計の性能検証に加え、車両及び部品の完成前からユニット間のモデル結合による机上検証をワイパー開発として初めて行った。ワイパー作動品質検証、ユニット間の整合性確認を、Fig. 13のような簡易な評価環境を構築し実施した。これによりソフトウェア検証の前倒し、各ユニットの仕様誤認識に

よる作動不良について早期発見を行った。しかし、机上で検証すべき機能はまだ多分にある。それらは今後のワイパー開発の課題として現在取り組んでいる。

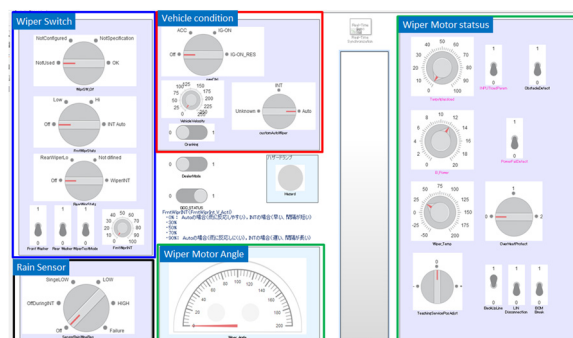


Fig. 13 Control Panel for Evaluation

5. おわりに

理想からのバックキャストで開発を進めた新型MAZDA3のワイパーシステムは、クラスの域をはるかに超えた性能を確保できていると自負している。一方で、水膜形成カラクリなど分かっていないことも多く、理想実現は道半ばである。今後も人間中心の考え方の下、お客さまに喜んでいただけるクルマ造りにワイパーを通して貢献していくつもりである。

最後に、(株)ミツバ様には開発にあたって多大な協力をいただき心から感謝を申し上げます。

参考文献

- (1) 前川ほか：自動車用ワイパーのトライボロジー技術の50年を振り返る，トライボロジスト第50巻第9号（2005）

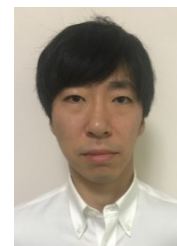
■ 著 者 ■



近藤 啓介



畠中 威



山内 一平



青木 茂



井上 俊一



伊藤 孝治

特集：新型MAZDA3

24

新型MAZDA3の車両電子制御システム New Vehicle Control System for All-New Mazda3

薬師寺 英明*1
Hideaki Yakushiji

要約

マツダは、お客様の安心・安全・快適を更に高めるべく、クルマを日々進化させ続けている。その進化を下支えする車両電子制御においては、大幅な機能追加に加え、車両全体が連携する複雑な処理が必要不可欠となっている。

新型MAZDA3では、今後の車両進化の加速に対応するために、車両電子制御に必要な情報・処理を頭脳ECU (Electric Control Unit) に集約した新たな車両電子制御システムを開発した。新型MAZDA3で実現した車両電子制御システムについて、車両電子制御の機能集約の視点での進化を報告する。

Summary

We continue to evolve to further enhance customer relief, safety and comfort. To support this evolution, realization of complicated processing to connect the entire vehicle is required as well as substantial addition of functionalities for vehicle control.

We developed a new vehicle control system integrating information/processing required for vehicle control into ECU (Electric Control Unit) for further vehicle evolution in All-New Mazda3. We will report on this integration of the vehicle functions and vehicle electronic control system.

Key words : Electronics and Control, Integration Control/Vehicle Body Control, System Engineering, Vehicle Development, Platform, Design Optimization/Robust Design

1. はじめに

マツダはお客様に安心・安全・快適に走る喜びを提供するために、電子制御機器を実現手段とする機能を開発し市場導入してきた。今後、クルマの更なる高機能化は必須であり、電子制御機器の技術進化を取り入れ、安価で高品質な新機能をタイムリーに市場導入しなければならない。

これまで、電子制御機器によって実現される新機能の多くは、個別に開発したシステムを一括で車両に追加搭載する方式を採ってきた。この開発手法のメリットは、システムの一括追加により、従来車両の機能アップが容易に実現できることである。しかし、昨今の機能の多様化・機能の複雑化により、従来手法の抱える問題点が顕在化してきた。新型MAZDA3の開発においては、従来の開発手法における問題点を解決すべく、新たな車両電子制御システム及び、システムを中心とする頭脳ECU (Electric Control Unit)

の開発に取り組んだ。

2. 従来開発の問題点

システムを一括で追加するということは、機能を構成する要素、入力・処理・出力全てを、機能ごとに車両搭載するということである。

従来のシステムによる機能実現は、スイッチ入力と車両動作を行うアクチュエーター制御の出力がダイレクトに接続される単純な構成で実現されていた。しかし、近年のシステムは高機能化を実現するために、処理部の電子制御化が必須となっており、システム追加時には、マイコンを搭載したECUを搭載しなければならない形態となっている (Fig. 1)。

*1 統合制御システム開発本部
Intgrated Control System Development Div.

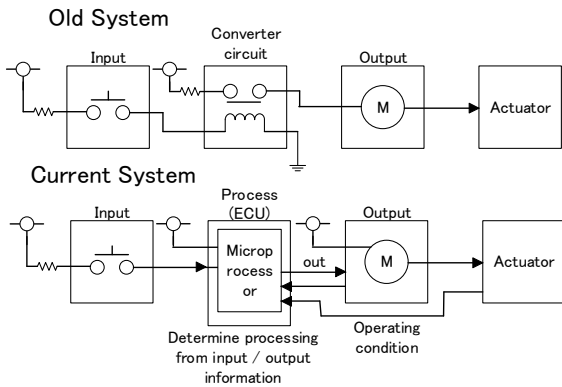


Fig. 1 Difference in Functional Configuration to Realize Old System and Current System

今後、これまで通りのシステム追加による機能追加を継続した場合、電子制御機器は更に増加し、搭載可能な車両スペースを浪費し続ける。併せて、システムの一括性を保つために、他システムと類似機能をもつセンサーの搭載を行うなどの無駄を発生させる状況に陥りかねない。

その結果、居住性悪化・デザイン制約を引き起こし、最終的には電装品搭載スペースが枯渇し、新機能を搭載したシステムが搭載できなくなる。更には重量増加による燃費性能悪化や、コストアップにもつながる。

また、システムを一括で追加する開発手法は、サプライヤーからシステムを丸ごと購入するビジネススタイルが主流であり、この手法を続けることで機能のブラックボックス化を誘発し、マツダの技術力低下も避けられない。

更に、車の電子制御化が進んだことにより、機能安全規格や情報セキュリティ対応など、今後の市場導入にて電子制御機器が対応しなければならない新たな技術要件が発生している。これらに対応するためには、サプライヤーが開発を主導していた実装領域にまで踏み込んだ理解が必要となる。このままシステムの丸ごと購入を続けた場合、高度な技術開発力がある一部のメガサプライヤーへの依存が進む。

以上の結果から、このままではマツダの実現したい機能のタイムリーな市場導入ができなくなる懸念を抱いた。

3. 車両電子制御システム開発構想

新型MAZDA3の車両電子制御システムは上記問題の解決と、今後の機能進化を支える基盤とすべく、以下の流れで開発構想を進めていった。

まず、自身が問題解決するために、電子制御で車の機能を実現する手段を理解し、個別に開発できるレベルまで技術の手の内化を行う。

次に、個々に開発した機能を車両全体視点で最適化する。

最適化のポイントは、全ての機能を視野に入れ、機能間で重複する処理を統合し、連携が必要な処理については最も効率的な情報の受け渡し方法と処理分担を明確にする。その結果、車両全体視点で最適化された機能群（統合機能）が完成する (Fig. 2)。

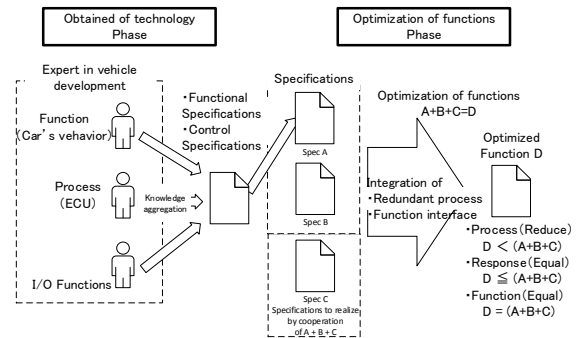


Fig. 2 Obtained of Technology and Optimization of Functions

最後に、入力・出力機能を最適化する。統合機能によって集中処理が実施されるため、入力側は外部情報の入力、出力側は車両の振る舞いに関わる動作のみを実現すればよく、入出力情報の重複が解消され、シンプル化が図れる。

また、最適化された機能とシンプル化された入出力情報が受け渡されることで、真に必要な部品のみを車両に搭載した無駄ゼロの状態に持っていきける (Fig. 3)。

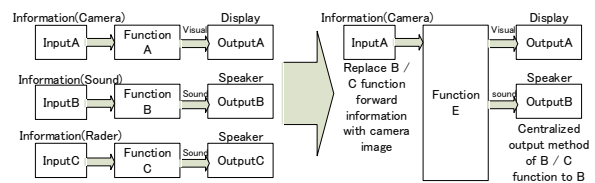


Fig. 3 I/O Function Optimization

この活動により、車両全体視点で最適化された車両電子制御システムが生み出される。

4. 新型MAZDA3の車両電子制御システム開発

前述の開発構想に従い、新型MAZDA3の車両電子制御システムを開発した。

4.1 技術の手の内化と機能最適化

車両は、さまざまな機能ドメイン（ボディー／PT (Power Train) /IVI (In Vehicle Infotainment) / ADAS (Advanced Driver Assistance System) など)の集合体となっており、車両全体視点での技術の手の内化と車両展開には膨大な時間を要するため、段階的に最適化することとした。

類似機能を多くもつドメイン内での最適化が最も効果的であること、最適化後の統合機能は処理量が増加することから、最適化前の個別機能の処理が少ないドメインが具現化しやすいことは明白である。

新型MAZDA3では上記視点から、ボディードメインを手の内化の対象とした (Fig. 4)。

Functional domain	Functional Features	Throughput (min/mid/high)	Responsiveness (slow/mid/fast)	Complexity (min/mid/high)	Priority
Body	<ul style="list-style-type: none"> There are many collaborations each functions Single functional throughput is small The amount of information handled is small 	Min	slow	min	1
ADAS	<ul style="list-style-type: none"> There is a lot of input information Single functional throughput is heavy There is a lot of information to handle 	Mid	Mid	mid	2
PT	<ul style="list-style-type: none"> There is a lot of input information There are requirement of fast response speed 	Mid	Fast	mid	3
IVI	<ul style="list-style-type: none"> There are many collaborations each functions Single functional throughput is heavy There is a lot of information to handle 	high	Slow	high	4

Fig. 4 Gradual Approach of Obtaining of the Technology

ボディードメインの最適化活動においては、機能の開発主幹部門と機能を搭載するECUの設計者が協力し、社内に蓄積された知見の再整理・最適化を実施した。結果、70機能の機能・制御仕様書を新たに作成した。これは旧MAZDA3の2倍の規模になる。

そして、この機能群を処理可能な頭脳ECUを設け、一元処理することとした。また、機能間で共有される車両情報・車両状態等を一元管理・記憶し、情報量を最適化した。

4.2 車両電子制御情報の集約 (通信トポロジ)

旧MAZDA3では2系統のCAN通信ネットワークにCAN通信する全ECUが接続されており、機能間の情報通信量増加によって伝送可能な情報量が逼迫していた。新型MAZDA3では、情報通信はCAN通信を踏襲しているが、通信システムを機能ドメインごとに分割し、通信システムをすべて頭脳ECUに接続することで、車両電子制御情報を集約した。

機能ドメインごとに通信システムを分割することで、同系統内のECU通信のみで実現できる簡便な機能の実現及び、機能ドメインごとに合わせた技術進化が容易に行える基盤が整った。

更に、頭脳ECUが機能不全に陥った場合でも機能ドメイン内で関連性の高い機能同士が連携し、フェールセーフに移行するための情報網としても使用可能となった。

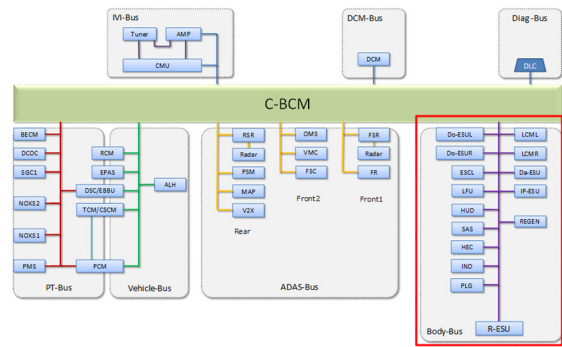


Fig. 5 Functional Communication Topology of All-New Mazda3

4.3 入力・出力部品のシンプル化

機能の制御部は頭脳ECUに配置する、入力部品はセンサーからの入力信号をデジタル化する、信号伝達はCAN信号によって頭脳ECUに送信する、出力部品は頭脳ECUからの指示に基づきアクチュエーターの出力を制御することで機能が成立するシンプルな構成を目標とした。

その結果、応答性や頭脳ECUが機能不全に陥った際のフェールセーフなど、現時点技術的に入出力部品に残さざるを得ない制御*は残ったが、入出力部品のシンプル化を実現した。

* ドア入出力部品では頭脳ECUに窓の開閉判断機能を集約し、ドアに配置したESUは窓開閉のアクチュエーター制御と異物挟み込み防止のフェールセーフ機能のみを残しシンプル化した。

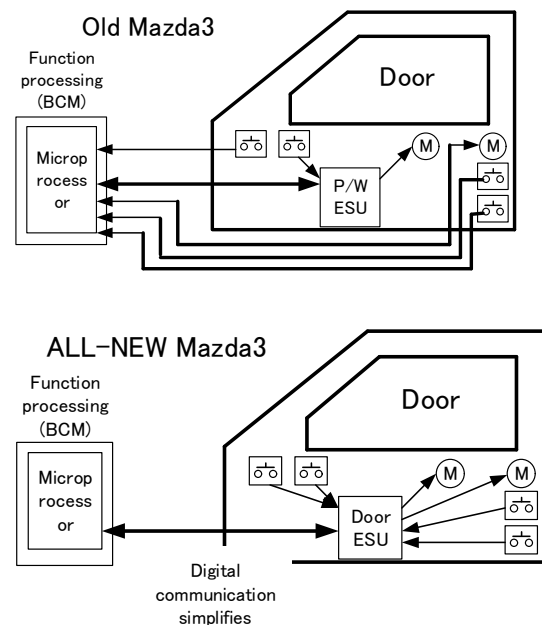


Fig. 6 Simplification of Door Input / Output Parts

5. MAZDA3 BCMの開発

次に車両電子制御システムの頭脳ECUであるBCM (Body Control Module) の詳細について説明する。

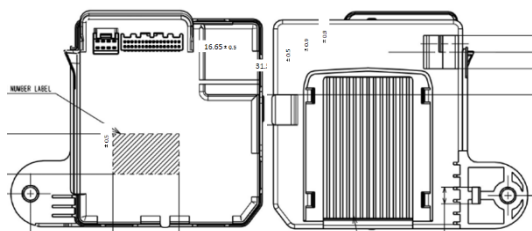


Fig. 7 Outline of BCM

5.1 車両電子制御情報の集約と情報ゲートウェイ

機能ドメインごとのCAN通信系統との接続と、今後の通信系統の増加に備え、CAN通信の入出力は10系統とした。

また、セキュリティ対応として車両外から車両内の情報に容易にアクセスできないよう、車両電子制御に必要な情報のみ車内通信が可能な情報ゲートウェイ機能を実装した。

異なるCAN通信系統間の情報伝送時間は、車両電子制御に影響が出ないよう、情報ゲートウェイ機能に特化したBSW (Basic Soft Ware) *1を実装することにより1ms以下を実現した。

更に、今後の車種搭載においても、長期間使用できるよう、HSM (Hardware Security Module) *2やCanFD*3を予約設計として搭載することで、将来の通信情報量の増加やセキュリティ性の向上に追従可能な設計とした。

*1 AUTOSAR規格で規定されている、アプリケーションを動かす為の必須サービス (通信、情報ゲートウェイなど) を提供/実現するソフトウェアモジュール。

*2 通信で使用する情報の暗号と復号化をハードウェア (本項では通信用の電子デバイス) によって高速処理するためのモジュール。

*3 ISO11898-2 2016 にて規定されている従来のCAN通信の通信速度高速化と情報密度向上により、従来CANより多量の情報通信と可能とした通信規格。

5.2 機能処理部

機能最適化により集約された多量なボディー制御機能の処理・調停を機能ごとに許容された時間内で行う必要があるため、BCMは旧MAZDA3搭載のBCM比で4倍の処理能力をもつ高性能マイコンを採用し、処理時間の要求を解決した。

これに加え、ADAS機能制御を行うマイコンも搭載した。旧MAZDA3ではADAS専用のECUを設けていたが、ECU統合により機能的な統合はできていないが物理的な無駄を

削減した。

5.3 ソフトウェアアーキテクチャ

多くの機能を平行処理しつつ、継続的な機能追加・機能間連携による複雑な機能を実現するためには、機能ごとのモジュール化とモジュール間の相互通信機能の仕組みが必須となる。

加えて、機能安全規格に対応するためには、機能的な安全やフェールセーフの堅牢性を担保することが必須となる。これら必須の要件を実現するために、ソフトウェア上に実装される機能の独立性及び、機能モジュール間における相互通信の安全性を確保したソフトウェアプラットフォームを使用した。

具体的には、車載ソフトウェアの階層化構造であるAUTOSAR (AUTomotive Open System Architecture) と機能安全規格に準拠したOS (Operation System) を開発し、BCMに搭載した。

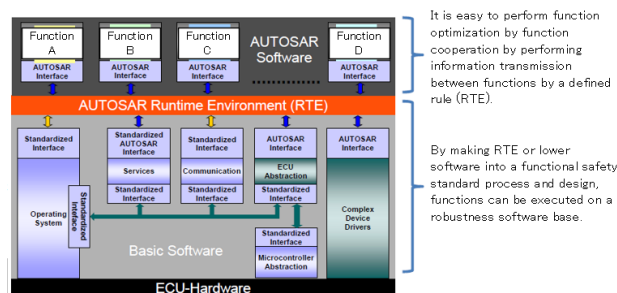


Fig. 8 Software Architecture ⁽¹⁾

6. 今後の課題

新型MAZDA3の車両電子制御システムとBCM開発を通じ、頭脳ECUを中心とした車両電子制御システムを実現することができた。一方、明らかになった課題もあり、以下の課題解決活動を行っていく。

6.1 技術の手の内化継続

新型MAZDA3の開発においては、ボディードメインの技術の手の内化を実施した。

今回、機能の最適化に注力したため、機能のモデル化は一部にとどまった。今後、手の内化済の機能から優先的にモデル化への取り組みを行っていく。モデル化による効果は、モデルから生成されたソフトウェアを実機搭載していくことで、仕様検討から実装までの開発期間の短縮化が図れ、機能開発全体の効率化を加速することができる。

今回対象外とした機能ドメインについては、個別に手の内化を進めており、これらの領域についても機能最適化を検討していく。

6.2 車両電子制御システム開発構想の進化

新型MAZDA3の車両電子制御システムの完成によって、ボディードメイン機能を最適化した。今後は、電子デバイスの進化動向を見据えながら、システムの更新を続けていく。

入力・出力部品のシンプル化は、現状最善の結果となっているが、さらなるシンプル化を行っていく。具体的には、高機能化したICとアクチュエーターを開発することで更なるシンプル化を達成することができると考える。

頭脳領域においては、自動運転などの更に高度で複雑な機能の導入は確実であり、今回開発したBCMでは処理能力の不足に陥ってしまうことが予測される。新機能のニーズとその導入時期、マイコンの技術進化を見据え、無駄なくタイムリーに頭脳部の更新を行っていく。

6.3 大規模システム開発のマネジメント力強化

新型MAZDA3ではBCMに多くの機能を集約したことで、機能開発工数がBCMに集中した。その結果、ボディードメインの車両電子制御ECUとしては、過去最大規模の開発人員及び工数を投入せざるを得なかった。

その対応として、情報通信機器などで主流となっている大規模ソフトウェア開発手法とプロジェクトマネジメントを効果的に取り入れる。そのねらいは、効率的な目標設定と目標達成計画の策定及びリスク・リソース・納期管理の徹底により、いかなる大規模システムの開発にも適応できる開発力の会得と、その定着である。

7. おわりに

新型MAZDA3で新規開発した車両電子制御システムは、今後、マツダが実現したい機能を効率的かつタイムリーに具現化する技術基盤として、以降の車両においても随時導入していく予定である。

今後の開発活動では、本システムの更なる進化を図り、マツダらしい車両電子制御の具現化とタイムリーな市場投入を実現していく所存である。

参考文献

- (1) AUTOSARにおける「Safety, Security」に対する最新動向&事例紹介
<https://www.ipa.go.jp/files/000036229.pdf>

■ 著 者 ■



薬師寺 英明

特集：新世代商品群の生産技術

25

マス・クラフツマンシップへの変革 Development of Mass Craftsmanship Production System

安達 範久*1
Norihisa Adachi

要 約

近年、自動運転やカーシェアリングなど、お客様のクルマの使い方と求める価値が急激に変化しており、その対応には、IT関連などのこれまでの自動車以外の技術と融合した大規模な技術開発が必要となってきた。この状況の中で、自動車メーカーとしてスモールプレーヤーであるマツダが生き残るためには、ブランド構築を核とした高付加価値&ニッチ戦略が必須であり、生産技術は、ビジネス効率 = 価値/コスト（以下“ $E = V / C$ ”）を向上させるために、機能的価値と意味的価値の同時進化を目指した「Mass Craftsmanship（職人技の量産化）」の実現に取り組んでいる。本稿では、この概念と具体的な取組みを紹介する。

Summary

Car companies are required to execute extensive technology development with non-automotive industries such as IT companies, to meet drastic change of customers use and demand value, as typified by Autonomous driving and Car-sharing service. In this situation, to sustain as small-scale car company, Mazda is required high-added value and niche product based on brand building strategy. In the production engineering area, we, to improve “Business Efficiency = Value / Cost” ($E=V/C$), are addressing to achieve “Mass Craftsmanship” production system pursuing concurrent evolution of functional & emotional value. We would like to introduce “Mass Craftsmanship” concept and approach in this report.

Key words : Production・Manufacture, CAD/CAM/CAE, Design, Paint, Machining, Material, CAE, Press Technology, Skill, Robust Quality Engineering

1. はじめに

マツダは、クルマを通じてお客様に人生の輝きを提供することを目指して、「魂動デザイン」「人馬一体」「燃費」を継続的に進化させたクルマの開発に取り組んでいる。近年は、IT技術の進化や交通インフラの発展を背景に、電動自動車、コネクテッド、自動運転、ライドシェアリング、カーシェアリングなどが急速に普及しつつあり、お客様のクルマとの接し方と使い方の変化に伴って、クルマに求められる機能と価値が急激に変化している。これに対応するには、従来の自動車関連以外のIT企業や電機メーカーなどと連携し、クルマのハードとソフトの両方を、多大な投資と期間をかけて開発することが必須となる。このような自動車の大きな変化の中で、スモールプレーヤーとして生き残るためには、他社とは異なる、商品とモノ造りへの変革が急務である。従来の

大量生産技術を超えて、ブランド構築を核とした高付加価値&ニッチ戦略が必須であり、自動車の機能の変革に伴う多大な投資を確保しつつ、モノとしてのオリジナリティと意味的価値を造り込んだクルマを創造することで、お客様に特別な企業であると認識されることが最重要課題である。モノ造りの中核である生産技術は、ビジネス効率 = 価値/コスト ($E = V / C$) の向上を使命と認識し、これを実現する仕事のやり方への変革と技術開発を、モノ造りのプロ意識を持って愚直に推進している (Fig. 1)。

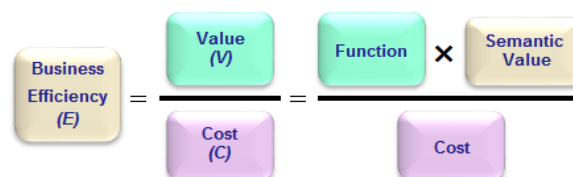


Fig. 1 Business Efficiency

*1 技術本部
Production Engineering Div.

2. マス・クラフツマンシップ

生産技術では、一般的に基準化されたQCDを中心とする目標を達成する生産システムを追求する。マツダは、「物を造る企業としての本業の強み」を生かし、機能的価値の高効率な造り込みに、モノ造りの意味的価値を加える新たな生産システムを構築して、クルマを所有する喜びを感じていただけるマツダプレミアムを適正な価格でお客様にお届けすることを目指している。

モノ造りの意味的価値は、クラフツマンシップを持つ匠や職人、複雑な工程や技術より、こだわりの手仕事で感じる感動やプレミアム性をモノに造り込むことと考えている。従来の大量生産は、技術で機械やロボットを使って、高精度で均一な製品を短時間・低コストで生産できるが、それだけではプレミアム性を感じていただくことは困難である。従って、ビジネス効率 $E = V / C$ の最大化をしながら顧客価値を創出するためには、クラフツマンシップとマスプロダクションの良い所取りをし、手仕事と技術を融合して職人技を量産化する生産システムの構築が必須である。この生産システムについての概念を、マス・クラフツマンシップ⁽¹⁾と定義した (Fig. 2)。

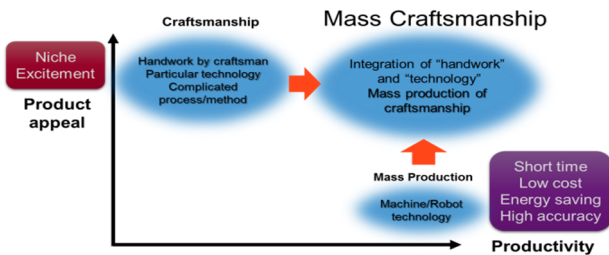


Fig. 2 Mass Craftsmanship

マス・クラフツマンシップを実現するには、従来の分業効率を重視した、デザインから生産までセグメント化された役割分担と責任分担の下で図面や基準を受け渡すことを基本とする仕事のやり方では不可能である。数値では表すことができない、デザイナーや匠が持つイメージやノウハウを、大量生産に関わる関係者全員が認識できる形に変換した上で、提供価値の共通目標に向けて協働する仕事のやり方に変える必要がある (Table 1)。

この実現には、発想の転換をベースとし、業務プロセスと技術の両方についての統合的な取り組みが必要であり、キーネーブラーは以下の3つと考える。

2.1 心のフロントローディングと統合的基準プロセス

大量生産に関わる多くの部門とお取引先様が、同一の提供価値の実現を目指す協働活動を進めるためには、統合的なプロセスアプローチによって、モノ造りの想いをデザインから生産までを貫く業務プロセスへの転換が必要である。そのためには、従来のコスト削減や手戻り防

Table1 Comparison of Mass Craftsmanship

従来 Conventional	マス・クラフツマンシップ Mass Craftsmanship
プロや専門家に任せる Rely on professionals & experts	自分もプロになり、プロを超える Be a professional, and surpass
コストや生産性を優先して設計を変更 Modify design for cost and productivity	提供価値を優先する生産技術開発 Develop technology for product value
相反のバランス取り Conflict balancing	基本機能でパラメータ設計 Parameter design for generic function
数値基準での役割分担 Role sharing by criteria	意図を共有して協働 Collaborate with mutual intent
各部門個別の活動 Individual activities in organization	お取引先様/部門を横断した統合的な活動 Integrated activities across related people
デザインを数値データで伝達 Hand over numerical design data	デザイン意図と意味的価値を共有 Share design intent and emotional value
提供価値を言葉で提示 Indicate product value with language	提供価値を物理特性に変換 Convert product value to physical property
既存材料の組み合わせ Combine existing materials	原材料の製造まで踏み込む Cut into raw material

止を主目的とした“生産性のフロントローディング”に、モノ造りの価値の織り込みを主目的としたクラフツマンシップの“心のフロントローディング”も加えることで、デザイナーや設計者の意図とモノ造りの意味的価値の統合、機能開発の課題に対する生産面からのサポート、材料や部品メーカー様との共創活動や共同技術開発などを、一貫したモノ造りの想いで推進する量産準備プロセスに変革する。

2.2 暗黙知の形式知への変換

クラフツマンシップの暗黙知を、関係者が共通理解できる形式知へ変換することが要件となる。そのために、デザイン領域では、工場や生産技術の技術者がデザイナーと直接対話をして、造形やカラーで表現したい感性を理解した上で、人間工学に基づいて可能な限り物理特性へ変換し、製品価値の目標を共有する。また、感性を具現化する匠や職人の手仕事を、科学的な解析に基づいて加工特性へ変換し、加工技術の開発目標を定める。ただし、これらの目標を共有して活動する上では、数値では暗黙知を完全に表現できないため、クラフツマンシップの暗黙知に立ち戻った価値判断を優先することを関係者で共通認識が必要である。

(注) ・暗黙知：簡単に説明できない知識

・形式知：図表・数値などで説明できる知識

2.3 低コスト/低投資の高精度材料と精密加工技術

クラフツマンシップの物理特性と加工特性の目標を大量生産で実現するためには、お客様にとっての価格対価値と、経営視点での費用対効果の両方を考慮したアフォーダブルコストでの製造技術が必須である。そのために、品質工学の概念を適用し、物質と加工の基本機能を定めた上で、そのSN比と感度を上げるための技術開発を行う。例えば、車体組立での多車種混流生産における設備・治具の極小化、アクアテック塗装⁽²⁾での工程短縮&統合などでは、基本機能を向上させた高精度材料や精密加工技術の開発によって、資源効率とエネルギー効率を向上させ、低コスト/低投資の生産システムを実現した。

3. 具体的な活動事例

3.1 心のフロントローディングと統合的量準プロセス

クルマには、“より美しく”，”よりリニアな応答性”，“燃費とパワーの両立”などの領域で，多岐にわたりクラフツマンシップが存在する。ここでは「魂動デザイン」の実現に向けた事例を紹介する。

視覚的なブランドアイデンティティの要素である「魂動デザイン」は，外板パネルのビードに頼るのではなく，繊細なパネル曲面で反射する光の陰影で，造形のダイナミズムを表現するデザインである。この繊細な曲面をボディー全体で表現するためには，従来のパネル間のスキヤ段差の精度向上に加え，ボディー全体で統合した曲面の造り込みが必要であり，プレス金型～完成車組立までの全領域で，光の反射を造り込む量産準備活動を実践した。

まず，製造に関わる全ての関係者がクレイモデルを見ながら，デザイナーの表現したい造形の意図を聞いて提供価値の目標を共通理解する (Fig. 3)。



Fig. 3 Clay Model Presentation

次に，各領域の製品特性に合わせた光の反射の計測手法と単品部品の曲面精度を制御する製造技術を進化させる。具体例として，鉄板パネル部品では，実成型工程のビッグデータとCAEを活用して，プレス成型後に弾性で元に戻るスプリングバック現象を見込んだ金型形状の設計技術と，高精度の金型製作技術を開発することで，パネルの面精度を向上した (Fig. 4)。

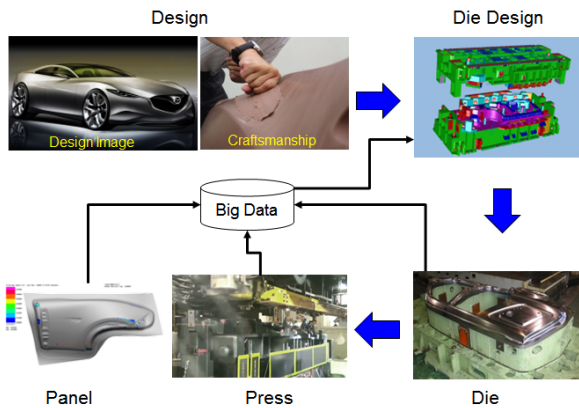


Fig. 4 Pursue KODO Design on Steel Panel Surface

またバンパー成形においては，高温射出から冷却までの樹脂流動と収縮を予測するCAEを進化させ，射出成形に伴う樹脂変形をキャンセルする金型設計により，柔らかく変形しやすい樹脂の面精度を向上した (Fig. 5)。

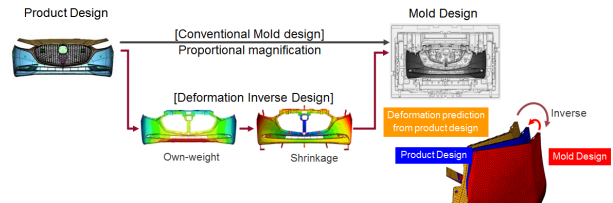


Fig. 5 Activity for Plastic Parts Surface

更に，ゼブラ状の光源の映り込み形状で，全部品曲面のつながりを関係者で確認し，擦り合わせることで，ボディー全体で一体感のある光の陰影を表現した (Fig. 6)。

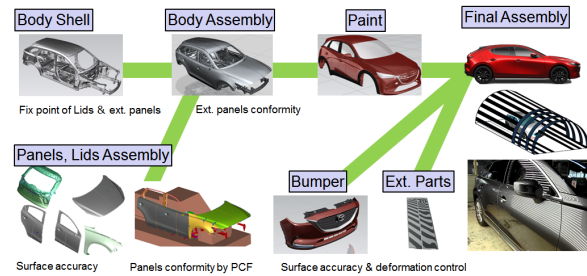


Fig. 6 Surface Adjustment on Body Exterior

また，ボディーカラーにも光の陰影へのこだわりを展開し，ソウルレッドクリスタルメタリックなどの高匠匠カラー開発では，従来の平面に近いパネルでのカラー評価ではなく，魂動デザインの躍動感を造り込むために進化させた金型製造技術で，魂動デザインのエッセンスを凝縮したデザインパネルを製作し (Fig. 7)，このパネル上での陰影表現をデザイナーと確認しながら，塗膜構造のファインチューニングを実施することで，造形の陰影を際立たせるカラーを実現した (Fig. 8)。



Fig. 7 KODO Project for Stamping Die

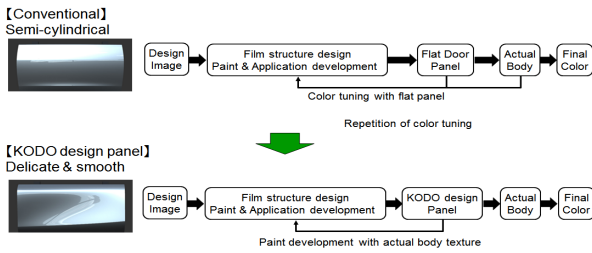


Fig. 8 Color Fine Tuning on KODO Panel

3.2 暗黙知の形式知への変換

具体例として、高意匠カラーのソウルレッドクリスタルメタリックの開発では、デザイナーが求める感性のキーワードは「宝石の深い赤」「潤い」「金属感」「マグマの躍動感」であった (Fig. 9)。これらの感性を、視神経の感度特性と脳の画像処理 (Fig. 10) を考察しながら、塗膜反射光の波長分布などの光学特性に変換し、塗膜構造を設計した (Fig. 11)。

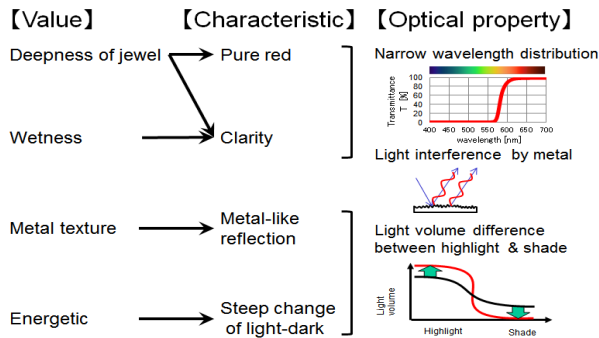


Fig. 9 Image Conversion to Optical Property

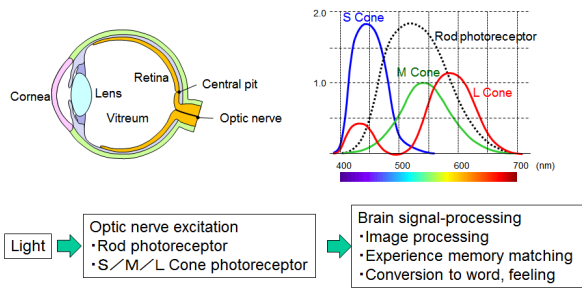


Fig. 10 Visual Perception

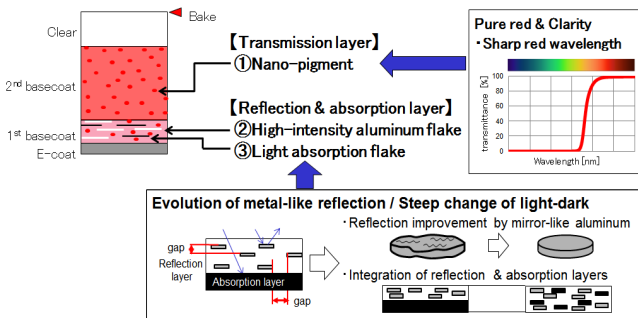


Fig. 11 Paint Film Design to Realize Optical Property

このカラーの塗膜構造の要件の1つは、 $10\mu\text{m}$ 以下の1ベース塗膜に含まれる円盤状アルミフレークによる反射光の強度を上げて反射方向を揃えることである。後述するアルミフレークの高精度材料の開発と、その塗膜内の配列を均一化する塗布工法が必要であった。また、塗布工法については、塗装の匠の、スプレーガンの距離や塗り重ねの時間間隔を調整しながらアルミフレークの配列を整える塗布動作を解析して、ロボット動作に変換し、塗料組成と塗装工法をセットで開発することによって、匠の技の量産化を実現した。

また、匠の技能の形式知への転換については、最先端の人間工学とIT技術を活用した取り組みも行っている。プレス金型表面の仕上げ加工では、モーションキャプチャ/アイトラッカ/筋骨格シミュレーションで、 0.1mm を研削して磨くグラインダ作業などを計測し、単純な動きや力だけでは解明できない「コツ」を、可能な限り数値化して、体の使い方や注視ポイントなどについての課題を客観的に把握することで、初心者への早期習熟と匠の更なるスキルアップに活用している (Fig. 12)。

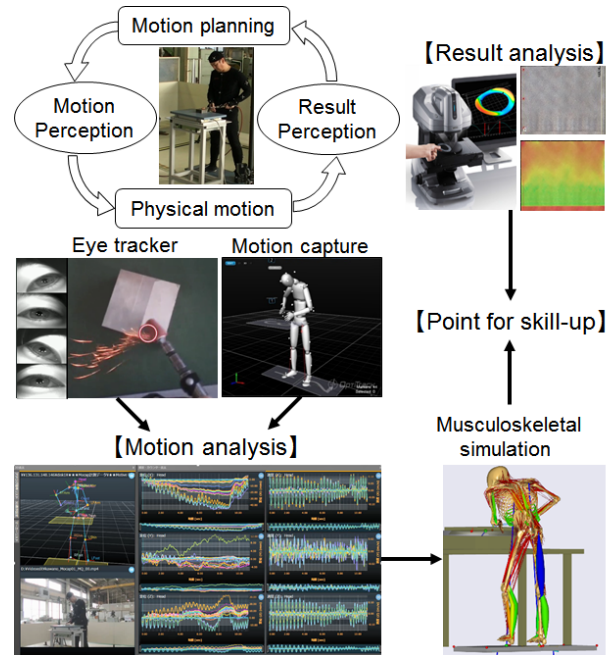


Fig. 12 Skill Measurement System

3.3 低コスト/低投資の高精度材料と精密加工技術

高精度材料の例として、高意匠カラーでは、塗料の原料の製造工程まで遡り、高輝度アルミフレークを開発した。この原料は、通常、アルミフレークメーカーの製品バリエーションから、塗料メーカーが選択するが、今回のカラー感性表現に求められる反射特性をもつ製品は量産化されていなかった。そこで、反射特性とフレーク形状の物理目標を、塗料メーカーを通じてアルミフレークメーカー様に提示し、製造工程に遡って3社での共同活動

を行うことで、従来の製造精度を超えた平滑な表面のアルミフレークの量産化を実現した (Fig. 13)。

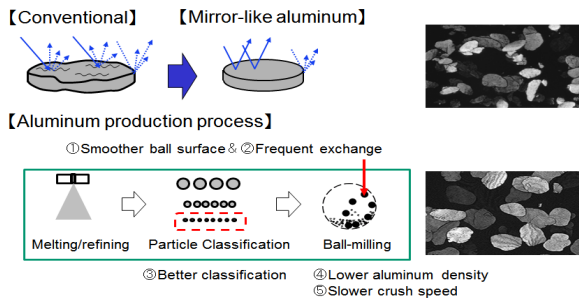


Fig. 13 Skill Measurement System

精密加工技術の例として、「人馬一体」と「燃費」を進化させたSKYACTIVエンジンを支える、高効率&高速アルミ切削加工技術⁽⁴⁾を開発した。マシニングセンターによる切削加工の加工点では、摩擦熱によるアルミ材と刃具の軟化/剪断/切粉排出の相反する事象が同時に起こるため、最大効率となる刃具の送り速度が存在するが、この速度は連続加工による刃具摩耗に伴い変化する (Fig. 14)。従来、加工中の刃具摩耗の検出が困難なため、バリや主軸装置破損の防止を優先し、余裕を持った一定の低速に設定していたが、主軸装置の必要強度と構造設計に踏み込むことで、加工中の応力を直接計測するセンサの組み込みに成功し、リアルタイムの刃具摩耗に基づいた送り速度制御による、刃具のパフォーマンスを使い切る高効率な切削加工システムを実現した (Fig. 15)。

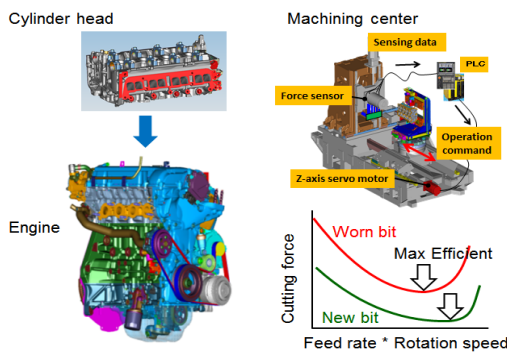


Fig. 14 Aluminum Cutting Work on Cylinder Head

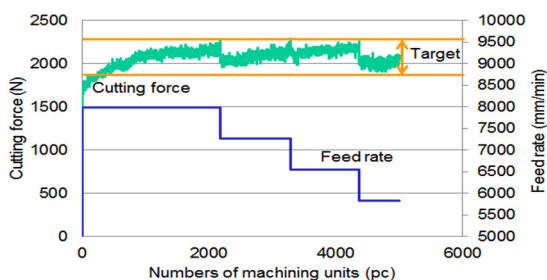


Fig. 15 Efficiency of Real-time Bit Feed Control

4. おわりに

新型MAZDA3に展開したマス・クラフツマンシップの取り組みの事例を以下に示す (Fig. 16)。

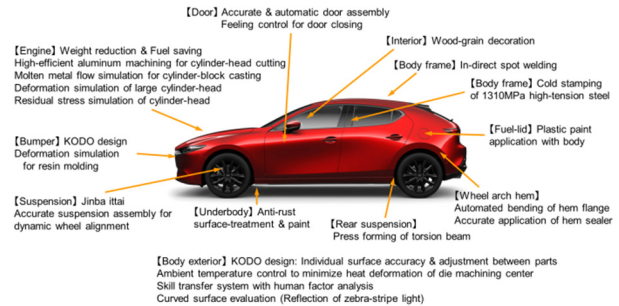


Fig. 16 Mass Craftsmanship on All-New Mazda3

お客様にモノ造りの意味的価値を感じていただくことは、モノ造りを担う人の根源的な責務であり、マス・クラフツマンシップは、これを大量生産の中で実行するための重要なアプローチであると考えている。ビジネス構造が激変する自動車業界の中で、モノ造りを行う企業として輝きを持った存在になるために、今後もマツダプレミアムの実現に向けて、高いお客様価値を生み出す生産システムを追求しつづける所存である。

参考文献

- (1) Kentaro Nobeoka : ART THINKING BEYOND DESIGN THINKING MAZDA DESIGN: CAR AS ART, 2016 Portland International Conference on Management of Engineering and Technology, pp.2499 (2016)
- (2) 篠田ほか：VOCとCO2を同時削減する新塗装技術「アクアテック塗装」、自動車技術, Vol.70, No.6, pp77-82 (2016)
- (3) 榎本ほか：アルミ加工のための低コスト高効率加工技術～切削力センシング適応制御技術の開発～, 精密工学会誌, 85巻, 第2号, pp.133-136 (2019)

■ 著 者 ■



安達 範久

特集：新世代商品群の生産技術

26

「魂動デザイン」の深化に向けたこだわりのモノ造り ～金型加工精度を向上させる空調空間の造り込み～

Special Manufacturing toward “KODO” Design Deepening -Craftsmanship for Air Condition Space to Improve Die Machining Accuracy-

中山 教憲*¹ 名越 慶*² 森下 喬*³
Takanori Nakayama Kei Nagoshi Takashi Morishita
井川 史朗*⁴ 木谷 英治*⁵
Shiro Ikawa Eiji Kitani

要 約

生命感・躍動感をカタチにする「魂動デザイン」は、「クルマに命を宿す」ことを普遍的なものとして、新世代デザインでは「引き算の美学」により要素を削ぎ落したシンプルなフォルムとし、より研ぎ澄まされた繊細な光の表現を追求している。そのデザインの深化は「魂動デザイン」を量産する生産技術の進化なしには実現できない。金型加工ではその新世代デザインの繊細な造形をカタチ造るため加工精度を更に向上させる必要がある。本稿では、金型加工精度を向上させるために、加工精度に影響する金型加工機周辺の温度環境について、気流シミュレーションを用いて必要最小エネルギーで金型加工精度向上を実現した取り組みについて紹介する。

Summary

Under the universal theme of “Provide a life to a vehicle, “KODO” design which makes the vitality and dynamics a form pursues the simple form which scraped off the elements by the “Aesthetics of deduction” in the next generation design and further seeking for the expression of the well-honed sensitive light. The deepening of that design cannot be achieved without an advancement of the production engineering to realize mass production with “KODO” design. Stamping die machining needs to improve the machining accuracy more in order to form that sensitive next generation design form. This article introduces the efforts to achieve the improvement of the die machining accuracy under the temperature environment around the die press machines which largely influences the die machining accuracy by using the air current simulation with minimum energy.

Key words : Production・Manufacture, Die/Mold, Machining, Die Machining Accuracy, Heat・Fluid, Air Conditioner, CFD, Temperature Control/Environmental Control

1. はじめに

マツダは、「魂動デザイン」を通じてお客様へ人生の輝きを提供することを目指し、先代（2012年～）以降、マツダの象徴として多くのお客様に受け入れていただいた。新世代デザインは見る方向によってボディに映り込んだ「景色」, 「光」がさまざまなリフレクションを表現しており、シャープエッジのキャラクターラインはなく曲面のみでシンプルなフォルムから発するキャラク

ターは「力強さ」と「艶やかさ」を感じさせるデザインへと深化した（Fig. 1）。新世代デザインを支える金型製作革新はマツダの使命としてより高みを目指している。

Fig. 2はデザイン形状に対する要求精度の変遷を示している。キャラクターライン重視の先々代に対して面重視の先代は金型精度1/7化を実現した。そして新世代デザインは部品間の一緻度を高めボディ全体でデザインの流れを表現するため、金型精度を先代比2/3にする必要があった。

*1～4 プラント技術部
Plant Engineering Dept.

*5 ツーリング製作部
Tool & Die Production Dept.



Fig. 1 KODO Design

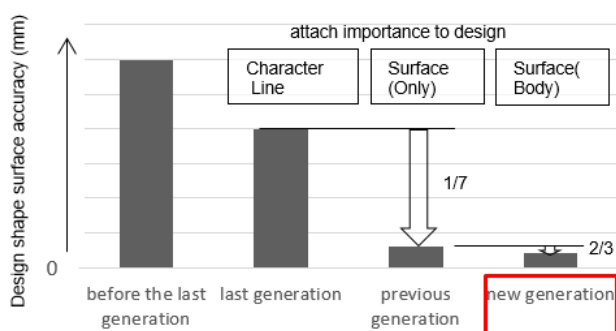


Fig. 2 Transition of Design Requirement Accuracy

金型精度を向上させるため、金型加工機械（以下、加工機）の加工誤差要因である①主軸先端位置変位（以下、主軸変位：Fig. 3）、②切削異常、③刃物異常、④加工原点設定、⑤NCデータ誤差を改善すべく技術開発を行った。本稿では、機械加工誤差の43%を占める①主軸変位を少なくするため加工機械周辺温度環境の改善を実現した取り組みについて紹介する。

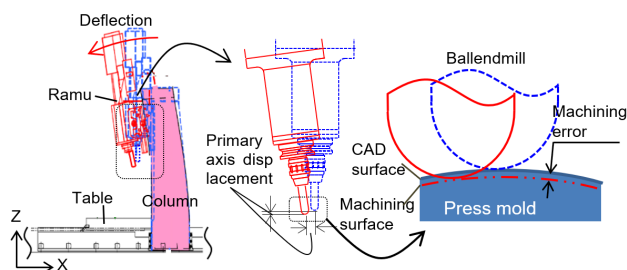


Fig. 3 Primary Axis Top End Position = Machining Error

2. 魂動デザイン深化に向けた課題抽出

加工機は切削物を段取りするテーブルを挟んで、高さ5mの2本のコラム（主柱）とクロスレールで門型を構成している。主軸変位とは加工機周辺の温度変化によるコラムのたわみと、主軸が付くラムとテーブルの伸び縮みで主軸先端の位置変位をもたらす現象のことをいう。経験値より数十マイクロメートルの主軸変位があることは分かっていた。そのため、金型を機械加工する場合は複数の工具を使用するが、交換の都度主軸変位に伴う誤差の補正を行っている。しかし、切削中の主軸変位には対応できず、新世代デザインの繊細な曲面を崩す懸念があったため、主軸変位対策が急がれた。

主軸変位は加工機上下の温度差と1日の温度変化が大きく影響することが考えられる。そこで加工機周辺の温度環境と主軸変位量の関係を明確にするため調査を実施した。温度測定は熱電対を加工機のコラム上下（床面から0.5mと4.5m）と前後の計8箇所を設置し、変位測定はラムのX/Y/Z軸に非接触式変位センサーを設置した（Fig. 4）。

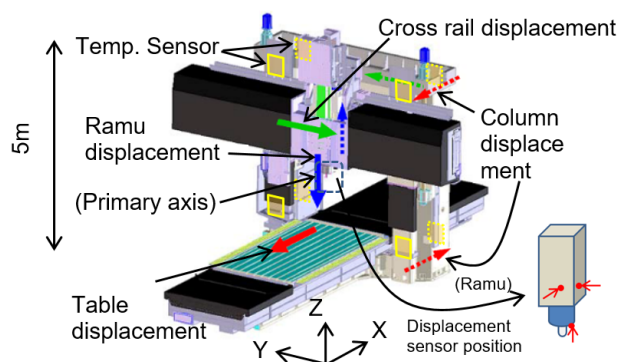


Fig. 4 Processing Machine Heat Displacement Minimization

加工機周辺の温度環境は時々刻々と変わるため、一定期間調査を実施し、そのなかで特に加工機コラムの上下の温度差及び1日の温度変化が大きい日と小さい日と比較検証した。Fig. 5に調査結果を示す。上のグラフはコラム上下温度差と主軸変位の時間変化を示し、上下温度差が大きくなると主軸変位も大きくなっている。下のグラフはコラム上部の温度と主軸変位の時間変化を示し、温度変化の大きい日ほど主軸変位は大きくなっている。以上より、加工機上下の温度差と1日の温度変化が主軸変位に影響を与えていることが確認できた。また温度変化の小さい日は、目標とする主軸変位量以下にも収まっているため、この日の温度環境を年間通じて維持することを目標として設定した。

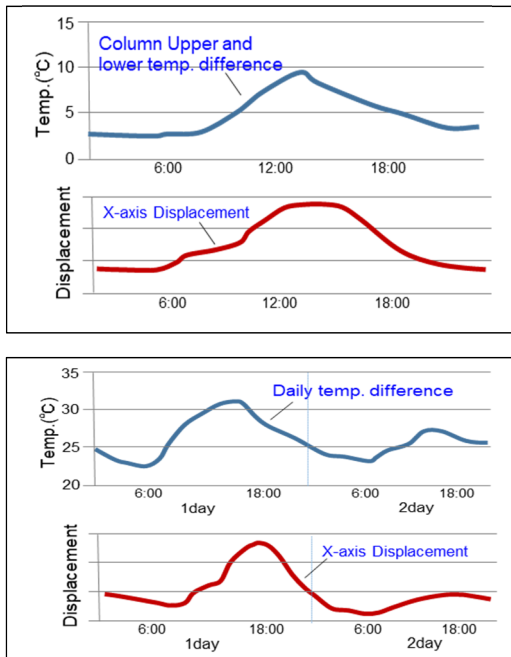


Fig. 5 Sensing Result

更に、作業者に対する温熱環境も改善させるため、作業位置 (FL.+1.5m) で、夏期28℃以下、冬期18℃以上とすることを前提条件とした。主軸変位の改善目標、及び加工機周辺温度の目標値をTable 1に示す。

Table 1 Target Value

	Status	Target
Displacement	—	6G ratio 1/3
Column Upper and lower temp. difference	Max 10℃	Under 2.5℃
Daily temp. difference	Max 10℃	Under 4℃

3. 課題解決

3.1 課題解決コンセプト

金型加工工場は面積が約10,000㎡と広く、室内温度は外気温や日射の影響を受けやすい。また、建屋高さは15mあるため室内の上下温度差も大きい環境である。従来技術で室内温度を均一化しようとする建物を全館空調し、莫大なエネルギーを使用することとなる。また、加工機周辺に仕切りを設け、空調空間を極力小さくした場合でも加工機発熱や加工機自体の高さ (5m) を考えると加工機周辺の温度ムラを解消するためには、同様に大きなエネルギーが必要となる。マツダの環境ビジョンにある「豊かで美しい地球と永続的に共存していく未来」を実現するために大空間の中でも加工機周辺の空間だけを必要最小エネルギーで温度均一化することをコンセプトとした。

必要最小エネルギーで加工機周辺空間の温度を均一化させるためには、成り行きでは空気の性質により自然と上下に温度差がつくため空間を上下にかき混ぜる。そして加工機周辺空間の外側空気の影響を受けないよう仮想の壁を作り、空調した空気を循環させて余計なエネルギーを使わないことが有効と考えた。そこで、空調した空気を加工機周辺で動かし、上下の空気をかき混ぜて温度を早く、精度良く均一に維持する。更に外乱に強い循環 airflow を空調機の風向風速温度を調整することで実現する技術の確立を目指した。

加工機周辺で循環する気流を作るため、加工機の周辺に吹き出し方向が調整可能な空調機を4台設置する構成とし、吹き出し温度、風向、風速をコントロールすることで目標達成を目指した。

3.2 CFD解析による事前検証

加工機周辺の温度環境は昼夜・四季により刻々と変化する。この中で24時間365日温度環境を維持する方策を実機や試作機を用いて構築することは時間と手間がかかる。そこで、これまで進めてきたCFD (Computational Fluid Dynamics) 解析を更に進化させ、机上で十分に事前検証をすることが重要と考え解析を開始した。今回CFD解析した解析モデルをFig. 6に示す。加工機は中央のMachining areaに設置されている。

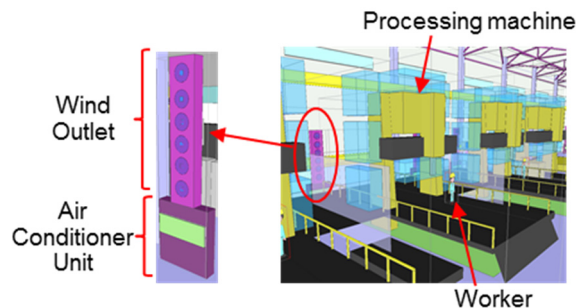
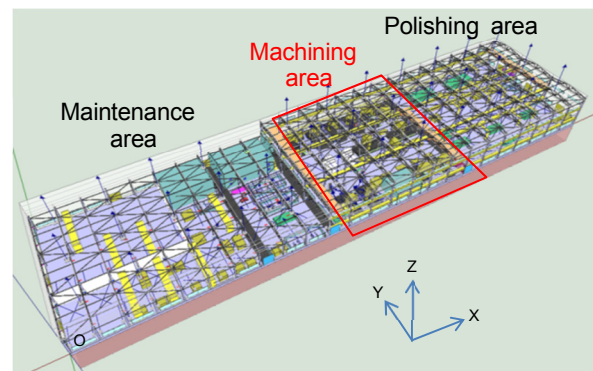


Fig. 6 Analysis CFD Model

金型加工工場の熱収支を考えると外気温や日射による熱負荷が支配的であり、これらは屋根・壁等から熱伝

導・熱対流・熱放射といった複雑な形で入ってきて刻々と変化する。CFD解析を精度よく行うためには、これらの影響を正確に解析モデルに反映する必要がある。そのためにCFD解析のIPO (Input-Process-Output) を明らかにした上で、全ての項目について評価・検証した (Fig. 7)。

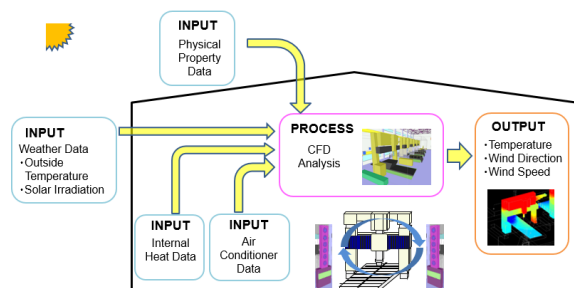


Fig. 7 CFD Analysis IPO Model

影響因子ごとに理論式から熱量を計算し、部位ごとの単純モデルによる計算結果と、現地での測定結果を比較検証し、モデルの確からしさを確認した上で解析モデルに投入することを繰り返し、精度向上させた。そしてCFD解析で精度よく再現できるようになった後、魂動デザインを実現するため、年間を通して目標を達成できる気流を検討した。

3.3 上下温度差対策 (暖房期の気流検討)

加工機周辺の空気をかき混ぜ、温度を均一化するために、空調機4か所のうち2か所の風向を上向き45度に、残り2か所を下向き45度にして、上向きの気流が周辺空気により自然と冷却され下降することで、加工機の周辺を大きく循環する気流を作ることをねらいCFD解析を実施した。すると、上向きの暖房風が循環することなく、そのまま上昇し発散した。解析結果を分析すると、日中に外気温上昇と日射により温められた空気が天井付近に滞留しており、上向きの気流が周辺空気により自然と冷却されることなく発散しねらいの気流とならなかった (Fig. 8a)。そこで、空調機からの気流の慣性により加工機周辺の空気をかき混ぜることを考えた。空調機4か所のうち2か所の風向を、加工機上部をねらった上向き15度に、残り2か所を下向き15度に調整し、互いに平行に向かい合う風向とすることで、その間に挟まれた空気をかき混ぜることを考えた (Fig. 8b)。CFD解析により、各空調機から吹き出した暖気が加工機周辺を仕切り、その間の空気が加工機周辺で循環する気流が形成され、温度が均一化されていることが確認できた。更に風向や風速、温度を変化させ、気流の挙動を確認しながら、よりよい気流を作り込んだ結果、加工機上下温度差が2.4℃となり目標の2.5℃以下に抑制できることを確認できた。また、温度を均一化する空間を極力小さくすることで、最

小限のエネルギーで温度均一化できることも確認できた。

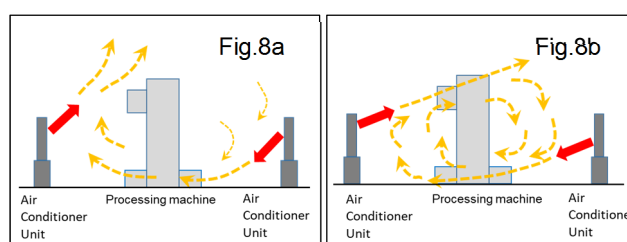


Fig. 8 Air Flow in Winter

3.4 上下温度差対策 (冷房期の気流検討)

冷房期も暖房期と同様の風向で加工機の周辺を循環する気流をねらいCFD解析を実施した。しかし、加工機上部の発熱源が循環気流を温めることと、下向きの冷気が床付近に滞留し、ねらいどおりの気流とならなかった (Fig. 9a)。

そこで、空調機の風で強制的にかき混ぜるだけでなく、冷たい空気が下降する性質も利用し、空調機からの冷気が加工機の上から下へ降りてくるような気流を考えた。その気流が加工機上部の発熱源を直接冷却するとともに、加工機上部の熱い空気との仕切りを作る効果をねらい、空調機の風向を4台とも加工機の上部付近に設定した (Fig. 9b)。

CFD解析結果より、加工機上部に吹き出した冷気が加工機を包み込むように降りてきて温度を均一化していることを確認できた。暖房期と同様に風向や風速、温度を変化させ、気流の挙動を確認しながら、よりよい気流を作り込んだ結果、加工機上下温度差が2.2℃となり目標の2.5℃以下に抑制できることを確認できた。

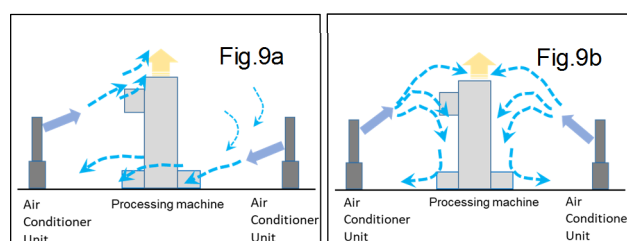


Fig. 9 Air Flow in Summer

こうして、季節ごとに気流を調整することで加工機周辺の温度を効率的に均一化する運用計画を立案した。

3.5 1日の温度変化対策

1日を通して温度一定に保つため、加工機に設置した温度計で空調吹き出し温度を制御する方式でCFD解析を開始した。これは設定温度に対してセンサー部温度が近くように吹出温度を調整する一般的なものである。しかし解析結果は1日の温度変化が目標値に届かない結果となった。結果を分析すると、設定温度になるまでの応答遅れ

が発生していることや設定温度に近づこうとして過度な冷風/温風が一時的に出ていることが分かった (Fig. 10)。このような現象は、外部からの熱影響が大きい場合や大空間の場合に発生する。今回のような工場環境ではこの影響が顕著に現れていると考えた。

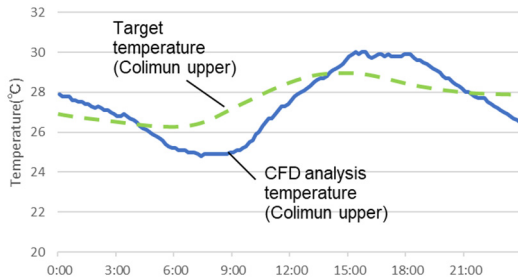


Fig. 10 Temperature Transition in One Day

工場全体の熱収支を計算すると、外気温と日射を起因とする熱負荷が95%以上で支配的であり、この熱が外乱として温度変化に影響を与えている。1日の温度変化を抑制するためには、外乱に対する応答性を向上させることと、外乱の影響を極力防止することが必要と考えた。また、必要な時間に必要だけ空調を行うことで、最小限のエネルギーで温度均一化を実現することを目指した。

まずは空調の応答性を向上させるため、温度変化の速度をとらえ、これに合わせて吹出温度を制御することが重要と考えた。吹出温度制御にセンサーの温度変化を微分パラメーターとして反映するとともに、設定値の最適化を進めた。更に温度変化に遅れなく対応するため、温度変化の主要因である外気温を考慮したパラメーターを追加し、外気温変化に応じて目標を補正することで、制御の応答性の改善を進めた。

また、加工機周辺気流の外側からの温度変化の影響を極力防止するため、外側との温度差に応じて空調機の吹出風速を調整することを考えた。温度差が大きくなるにつれ気流を強くし、周囲の空気との遮断効果を高くすることをねらい、気流の制御を取り入れた。

CFD解析でFig. 10と同様の条件で改善後の制御方式を適用した場合の解析結果をFig. 11に示す。応答性の向上と気流調整による外乱の影響防止により、加工機周辺の温度変化が小さくなっていることが分かる。

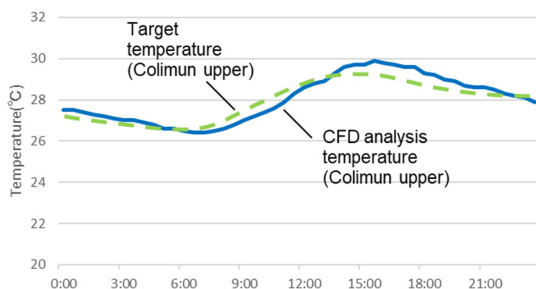


Fig. 11 Temperature Transition in One Day

4. 効果検証

このCFD解析の検討結果に基づき空調システムを構築した。実機での冷房期における温度測定結果をFig. 12 (上下温度差グラフ)、Fig. 13 (1日の温度差グラフ)に示す。上下温度差の目標2.5°C以内、1日の温度差の目標4°C以内ともに達成している。主軸変位も従来の1/3以下で目標を達成しており、本空調システムによる加工精度向上を確認できた。空調エネルギーについても全館空調と比べて約40%のエネルギー量で温度均一化を実現できている。

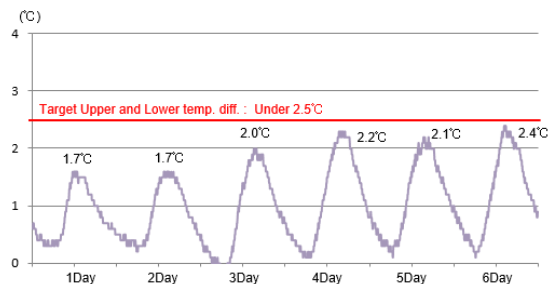


Fig. 12 Column Upper and Lower Temp. Difference

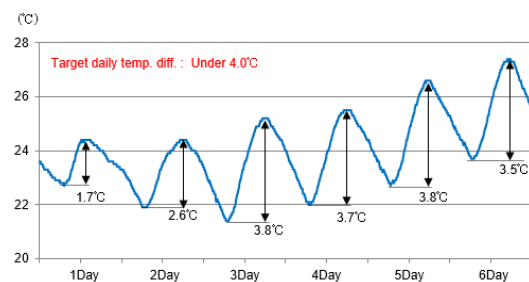


Fig. 13 Column Ambient Temperature

5. おわりに

この取り組みは、深化した「魂動デザイン」をお客様に届けたいという関係部門の共通した熱い思いが部門を超えた共創活動となり、加工精度向上につながった。今後、引き続き四季の実機検証を行い、年間を通しての温度環境改善を実現し、「魂動デザイン」を深化させ、お客様の人生の輝きにつながるクルマを提供していきたい。

参考文献

- (1) 長澄ほか：「魂動デザイン」実現に向けたプレス成形安定化の技術開発, [マツダ技報, No.35, pp.106-111 \(2018\)](#)
- (2) 西本ほか：「魂動」デザインの再現に向けたこだわりのモノづくり ～プレス金型製作編～, [マツダ技報, No.34, pp.81-86 \(2017\)](#)

■ 著 者 ■



中山 教憲



名越 慶



森下 喬



井川 史朗



木谷 英治

特集：新世代商品群の生産技術

27

「魂動デザイン」を支える技能者の育成 Nurturing of Craftsmen to Support “KODO Design”

久保 祐貴*1 Yuki Kubo	須賀 実*2 Minoru Suga	大谷 卓史*3 Takushi Ohtani
加藤 康裕*4 Yasuhiro Kato	江草 秀幸*5 Hideyuki Egusa	大田 敦史*6 Atsushi Ohta

要 約

マツダは、クルマ造りに想いを込めている。クルマに命を宿す「魂動デザイン」は、随所にデザイナーの想いを込めている。その想いを実現していくことがマツダブランドの構築に重要である。マツダの金型製作部門では、この「魂動デザイン」を実現するために、Mass Craftsmanship（職人技の量産化）を積極的に取り組んでいる。長年かけて培われる匠技をもつ技能者の動作をモーションキャプチャーで計測し、眼球運動と筋骨格運動を併せて分析することで匠技の見える化に取り組んでいる。更に、技能カルテを用いて、定量的に技能を比較し、技能者の早期育成を進めている。本稿では、「魂動デザイン」を支える金型製作部門の新たな技能伝承の取り組みについて紹介する。

Summary

Mazda is committed to developing and manufacturing vehicles with its whole heart. Mazda designers' aspiration appears everywhere throughout the “KODO Design - Breathing Life into the Car”. We believe that even reproducing such aspiration is important for establishing Mazda brand. Mazda's Tool & Die Production Department is aggressively proceeding with “Mass Craftsmanship” which is essential in realizing the “KODO Design”. By measuring the motions of craftsmen, which had been cultivated over the years, with a motion capture system and analyzing them along with their eye movements and musculoskeletal motions, we worked on visualization of the know-how of craftsmen. Furthermore, we implemented quantitative comparisons with skill medical record and proceed to develop craftsmen early. This article introduces new efforts to pass down the skills and techniques to sustain the “KODO Design” by Tool & Die Production Department.

Key words : Production・Manufacture, Die/Mold, Press/Resin (Plastics), Engineering, Behavior Observation, Musculoskeletal System, Fatigue/Burden

1. はじめに

マツダは、お客様へ人生の輝きを提供するクルマ造りを目指している。これを実現する上で重要なお客様への提供価値の一つとして「魂動デザイン」がある。美しいフォルムをまとった「魂動デザイン」は、クルマに命を与え、生命感を伝えたいデザイナーの想いが込められており、こだわり抜いて造り上げられている。いわば、1つの芸術作品、アートともいえるものである。その美しいデザインを高い精度で量産車にて実現することが生産技術の使命である。そこで、生産技術領域では、技能による造り込み（希少性・感動）と生産性の高さ（高速・高

精度）を高次元で両立させるMass Craftsmanship（職人技の量産化）に取り組んでいる。マツダの金型製作部門も、お客様へ「魂動デザイン」をお届けすることにこだわり、Mass Craftsmanshipに向けた取り組みを行っている。金型製作は、多くの技術とともに、高度な技能が組み合わさり成り立っている。その“技能による造り込み”，すなわち職人技は、金型製作のプロセスの随所に存在し、これにより、繊細な「魂動デザイン」を支えている。しかし、金型製作における職人技を習得し、匠とよばれる技能者になるには、20年以上もの長い歳月を要しており、職人技を高い効率で受け継いでいく必要がある。

*1～6 ツーリング製作部
Tool & Die Production Dept.

本稿では、金型製作における技能者の仕上げ動作を計測し、匠技の見える化と技能構築の重要因子解析、更に、技能カルテを用いた技能者の早期育成に取り組んだ事例について紹介する。

2. 技能伝承の目指す姿と課題

金型製作における技能育成は、通常、グラインダー作業、溶接などの基礎技能教育や安全作業の手順指導は行いが、匠技は、明文化することが難しい。そのため、これまでは熟練技能者の動きや判断を見ながら、技能者自身が失敗を重ねながら体感、習得していく経験学習が主流であった。進化し続ける「魂動デザイン」を最高の効率で実現するためには、従来の経験学習ベースの技能伝承から、自己の技能を定量的に認知して育成ポイントを明確にし、短期かつ達成感のある技能伝承に変革する必要がある。以下4項目を重点課題として取り組んできたので詳細に述べていく。

- ① 技能の見える化（定量化）
- ② 技能階級の定義（目標、実力把握）
- ③ 技能のメカニズム解明
- ④ 技能指導の定量化

3. 技能の見える化

現在、マツダの金型製作部門では、技能伝承・育成期間に応じた5階級（初級、中級、準上級、上級、匠級）に区分した技能階級を設定している。技能育成の目標は、各階級への到達期間を半減、つまり、初級から匠級になるために、従来20年を要していた期間を10年にすることを目指している（Fig. 1）。

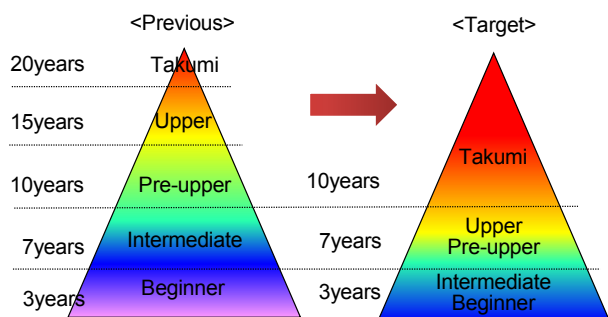


Fig. 1 Target of Skill Tradition

技能育成の早期化に向けては、技能を定量化し、技能者自身が達成目標レベルと技能向上課題を定量的に認知でき、同時に、技能者自身が成長を実感し自信と誇りを持って自己研鑽することで、働きがいのある職場作りにもつながる仕組みの開発が必要と考えた。金型製作には高度な技能を必要とする作業がある。その中でも、最終的に「魂動デザイン」を造り上げる磨き作業の基礎であるグラインダーによる研削作業（以下グラインダー作業）

の技能の定量化から始めた。

モノ造りにおいて「技能」は、「人の動き」となって表現される。その「人の動き」を定量化するには、外見として表れる身体動作と、その基となる判断や身体内部の筋骨格の情報までも可視化していくことが重要であると考えた。そこで、技能者が判断し動作を行う一連の行動情報となる、眼球運動、身体動作と筋活動量の計測・推定を行い、更にグラインダー作業の結果である被削材寸法精度と併せて分析・評価・指導ができる技能計測システムを開発した（Fig. 2）。

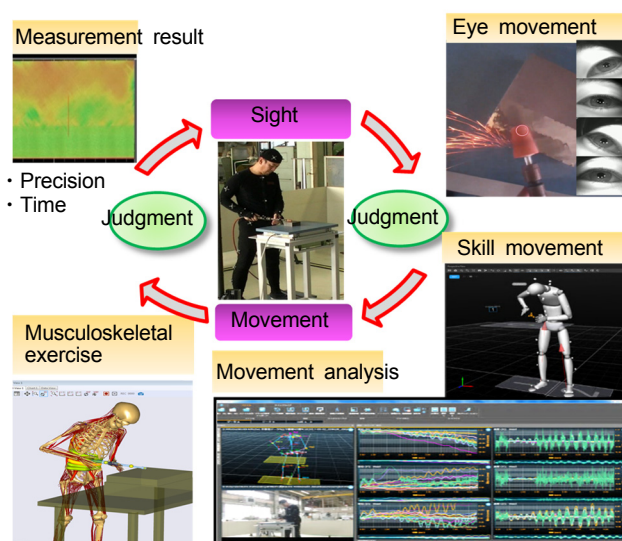


Fig. 2 Skill Measurement System

眼球運動は、視線計測器を用いて技能者の注視点座標を計測可能とした。また、身体の動作情報は、カメラ8台で構成された光学式モーションキャプチャーを採用し、4m×4m×2mの範囲における身体に取り付けた複数マーカーの三次元座標を計測可能とした。反射体となるマーカーは技能者の身体に41個、グラインダーに3個取り付けた。更に、左右の足元と作業台の3箇所にフォースプレートを設置し、床面反力を計測可能とした。また、作業中の筋活動量は、モーションキャプチャーで計測した関節角度などの身体動作情報と、フォースプレートで計測した身体に作用する外力情報を基に、筋骨格モデリングシミュレーションを用いて推定を可能にした。被削材寸法精度は、3D形状測定機にて計測した。このような膨大な行動情報と被削材寸法精度の情報を基に分析することで評価・指導につなげる。

4. 技能階級の定義

技能計測システムの結果から、匠技の分析をする必要がある。そこで、技能レベルが最も高い匠級の技能者を基に匠技の分析をすることにした。しかし、3章で述べた

5階級設定では、初級から上級までの4階級は、国家技能検定の取得や経験年数によって定めているが、匠級は、上級の中でも20年以上の業務経験を持ち、指導・育成の経験したことがある「だれもが認める技能の優れた人」という周囲の官能評価で定められていた。そのため、まずは、技能階級の定義を明確にすることから始めた。

そこで、当部門に所属する金型仕上げ技能者全員に対して、グラインダー作業試験を実施し、技能計測システムによって一連の行動情報を計測した。試験は、あらかじめ被削材中央に0.1mm凹の基準面を設けた100mm×100mm×35mmの一般構造用圧延鋼材（SS材）を用いて、グラインダーで基準面と同一高さになるまで均一に研削する内容とした（Fig. 3）。

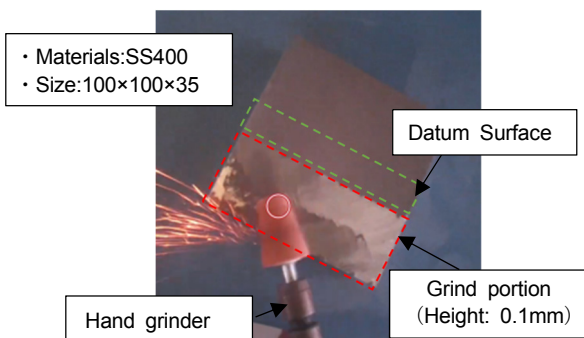


Fig. 3 Materials of Rank Examination

グラインダー作業試験の被削材寸法精度と研削時間から算出した平均値と標準偏差を基に各階級の設定を行った。「魂動デザイン」を造り込む上で必要な寸法精度と研削時間を両立できる5名を匠級と定義し、各階級の精度・時間の閾値をTable 1にまとめた。この試験によって、技能者の定量的な技能階級を定義することができた。また、新旧の階級の人数分布を比較し、大きな乖離がないことも確認した。この定量的な技能階級の定義によって、自身の立ち位置と閾値が明確になり、上の階級に挑戦するための目標を設定しやすくなった。

Table 1 Accuracy and Time in Each Rank

Class	Precision [mm]	Time [min]
Class5 : Takumi	≤0.03	≤10
Class4 : Upper	≤0.04	≤14
Class3 : Pre-upper	≤0.05	≤18
Class2 : Intermediate	≤0.07	≤26
Class1 : Beginner	≤0.09	≤34

5. 技能のメカニズム解明

5.1 技能の解明トライアル

技能階級を定義し、目標が明確になれば、目標達成に向けてどのポイントを伸ばしていくかの確に指導することが重要になる。そのため、技能計測した結果から、指導につなげるトライアルを行った。そこで、4章で階級設定した匠級と初級の技能者各1名を比較した。

以下、眼球運動・身体動作・筋活動量の3要素におけるデータ処理方法と判明したことを述べる。

(1) 眼球運動の分析

視線計測器から得たXYZの注視点座標から、まばたき等で発生するエラー値を除去し、注視点の分析を行った。その中でも、匠級技能者と初級技能者で注視点座標の分散値に差があることが分かった（Fig. 4）。匠級技能者は視線移動が少ない。一方、初級技能者は視線移動が多い。このことから、初級技能者は見るべき部位が定まらず、情報探しや判断遅れによって時間を費やしていると考えられる。更に、少ない視線移動が、頭部の変位量を少なくし作業姿勢が安定することから、寸法精度にも影響が出ると考える。このように、無意識・無自覚に行っている視線移動からも行動情報を得ることができた。

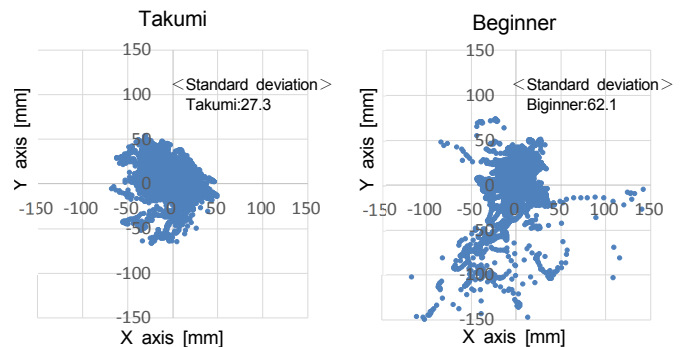


Fig. 4 Comparison of Eye Movement

(2) 身体動作の分析

モーションキャプチャーで得られる44個のマーカークの位置情報と3個のフォースプレートの床面反力の計測結果を分析した。身体動作は、41個のマーカークの位置情報を基に、19個の身体部位（頭・首・胸・左右肩・左右上腕・左右前腕・左右手・腰・尻・左右腸骨・左右膝・左右足）の重心位置を得ることができる。グラインダーも同様に3個のマーカークから重心位置を得た。この合計20箇所の重心位置を分析した。両者の動作の特徴をFig. 5に示す。匠級技能者は体幹の動きが小さく、Fig. 5左に示すようにグラインダーと前腕の左右への動きが同調している。それに対して、初級技能者は、Fig. 5右に示すようにグラインダーと体幹を含む全身の動きが同調して

いることが分かった。

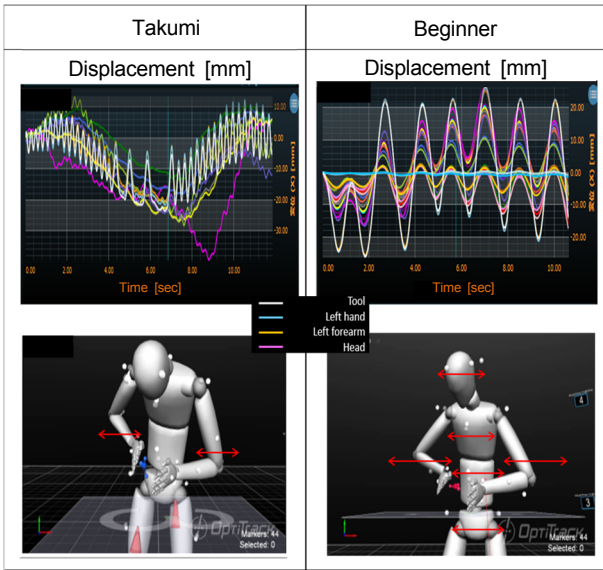


Fig. 5 Comparison of Movement

(3) 筋活動量の分析

筋骨格モデルリングシミュレーションから得られる筋活動量は約820部位ある。筋活動量は、最大可能筋力 $F_{max}[N]$ に対する筋力 $F[N]$ の割合であり、単位は[%]で表される。約820部位のデータは、体幹・右上肢・左上肢・右下肢・左下肢の5部位に集計し比較した。

匠級技能者の筋活動量の特徴は、姿勢維持のため体幹の使用割合が高く、左右の下肢の差が少なくなっている (Table 2)。

Table 2 Comparison of Musculoskeletal Exercise

		Takumi	Beginner
Muscle active mass [%]	Trunk	1.4	1.0
	Left arm	1.3	1.5
	Right arm	1.2	1.0
	Left foot	0.6	1.5
	Right foot	0.6	0.6
Tool reaction force[N]		8.2	2.1

また、少ない総筋活動量で、グラインダーに反力を与えている。このことから、匠級技能者は、初級技能者よりも、作業中の身体の軸がしっかりしており、左右へのずれが少ない。更に、自身が発した力をグラインダーへ効率良く伝達していることが分かる。すなわち、匠級技能者は伝達効率の高い作業を行っていると考えられる。

以上のことから、匠級技能者と初級技能者を比較し分析することで、グラインダー作業における技能のポイントが分かった。しかしながら、この技能動作の分析方法

では、個人ごとの比較を必要とするため、分析に工数を費やしてしまう。よって、計測した大量の技能データから、グラインダー作業の技能動作の特徴を抽出する解析が必要と考えた。

5.2 多変量解析を活用した技能動作メカニズム推定

技能動作の特徴を抽出するための解析手法として、多変量解析の一つである主成分分析を活用した。技能計測システムから得られるTable 3に示す69種の説明変数に対し、相関行列の主成分分析を行った。

Table 3 Explanation Variable

Item	Details	Quantity
Center of gravity of body	Center of gravity of 19 portions of each body Displacement, Velocity, Acceleration of XYZ axes	57
Center of gravity of tool	Displacement, Velocity, Acceleration of XYZ axes	3
Force	With 3 force plates X axis component, Y axis component, Z axis component	9

匠級技能者5名に対し分析を行い、累積寄与率が70%以上となる第6主成分までのデータで評価を行った。匠級の中の個人では無く、匠級としての技能動作の特徴を抽出するため、第1主成分から第6主成分までの固有ベクトルを、匠級技能者5名で合成した。更に、第1主成分から第6主成分のそれぞれに強く寄与している変数を確認し、各主成分の意味付けを行った。新たに設定した主成分は、第1主成分から順に「ツール把持部変位」「回転速度」「腰加速度」「左足荷重」「踏み込み動作」「右足荷重」と表現し、主成分スコアを計算した (Fig. 6)。

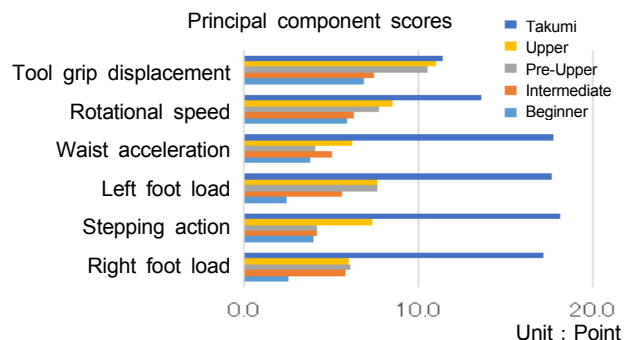


Fig. 6 Principal Component Scores

主成分スコアは、上位階級の方が高い傾向になっており、グラインダー作業における技能動作の特徴量を6つの変数で定量的に表現できていると考えられる。

この主成分スコアは、訓練者と匠級を比較し評価に活用する。また、この分析手法は、グラインダー作業に限

らず、金型製作における磨き作業や溶接など、その他の技能動作の特徴を特定できる可能性があると考えている。

6. 技能指導の定量化

6.1 技能カルテによる定量評価

4章で述べた階級判定試験の際に技能計測システムから得た一連の行動情報を基に、従事者の技能カルテを作成した。例をFig. 7に示す。

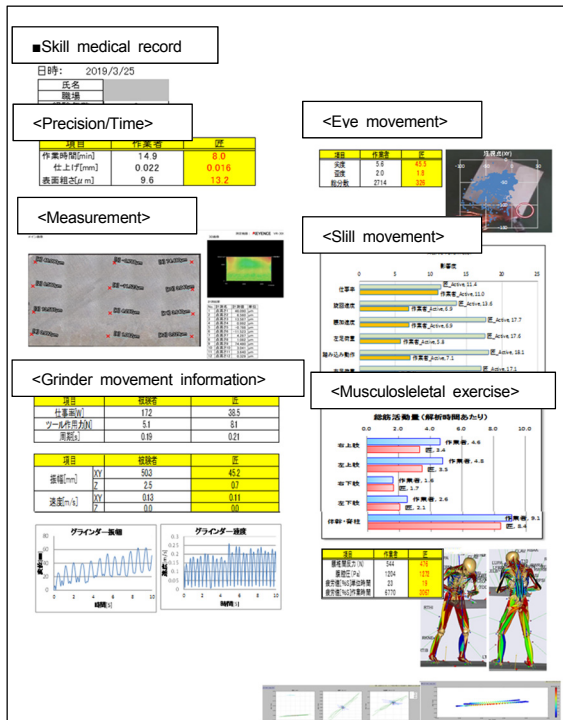


Fig. 7 Example of Skill Medical Record

この技能カルテに記載した行動情報は、項目ごとに訓練者と匠級を並べて表示しており、技能をより定量的に比較・評価できる。更に、訓練者の長所と短所を細かく評価できる。また、5章の分析手法から得た特徴量を多く含んでおり、本人が理解し動作につなげやすい「グラインダー動作情報」を技能カルテの評価項目に追加した。この技能カルテを指導前後に作成することで、技能の変化を定量的に把握でき、成長に向けた指導ができる。

また、筋骨格モデルリングシミュレーションからは、技能動作の疲労度[%S]（疲労度[%S]=総筋活動量[%]×作業時間[S]）や腰椎間反力[N]を求めることができる。これらの情報を技能カルテで管理することで、作業中の身体負荷が評価でき、体にやさしい作業姿勢を伝えることができる。このように、技能面だけでなく、身体負荷の影響も評価できる技能カルテを作成した。

6.2 治具・センサーを活用した定量指導

技能カルテを基に指導と訓練を行う。まずは、訓練者

の技能カルテと作業中の動画を使って、訓練者と匠級の特徴と違いを説明する。その後、Fig. 8に示すグラインダー動作「左右の振幅[mm]」「動作速度[m/s]」「ツール反力[N]」が匠級の基準値に近づくように、実際にグラインダー作業をしながら訓練を行う。

	Trainee	Takumi
Tool Amplitude[mm]	50.3	45.2
Velocity[m/s]	0.13	0.11
Frequency[S]	0.19	0.21
Tool Force[N]	5.1	8.1

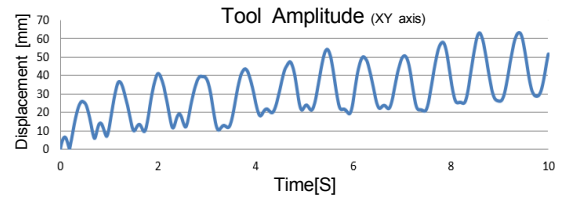


Fig. 8 Grinder Movement Information

効率的な成長につなげるには、動作中に指摘し、補正しながら体で感覚をつかんでいくことが重要である。しかし、技能カルテは、データ分析に若干の時間がかかる。

そこで、匠級の基準値を設定した指導治具と指導センサーを用いて定量的に伝えることができる環境を整えた。

グラインダーの「左右の振幅[mm]」は、匠級の基準値である振幅に切ったマグネットを被削材に貼り付けて動作の目安にした。「動作速度[m/s]」は、グラインダーを振る周期に換算し、匠級の基準値の周期で音が鳴るように、メトロノームを設定した。「ツール反力[N]」は、FSRセンサーを用いて匠級の基準値の加圧力で音が鳴る圧力センサーを設計製作した (Fig. 9)。

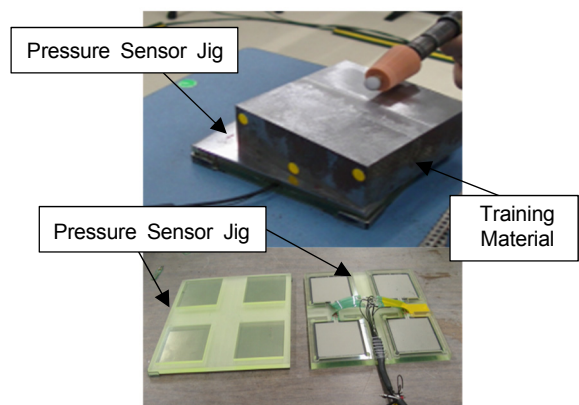


Fig. 9 Pressure Sensor Jig (in-house production)

以上のように、匠級の基準値をセンサーや治具へ設定し定量的な指導が可能となった。そして、指導中に技能者が自らの気づき・発見に変換すると同時に、ツール動作を身体動作へ習得していくことが可能となる。更に、

この治具を用いることで、技能計測システムを活用した大掛かりな計測を行わずとも、簡易的にグラインダー作業の訓練ができる方法を確立した。

7. 技能育成の効果

技能計測システムにて、4か月で12名の指導を行った結果を紹介する。一人あたりの指導回数は、毎週2時間の計4回とし、4回目に、階級判定試験を行って成長の確認をした。対象12名の指導前後の階級分布をFig. 10に示す。

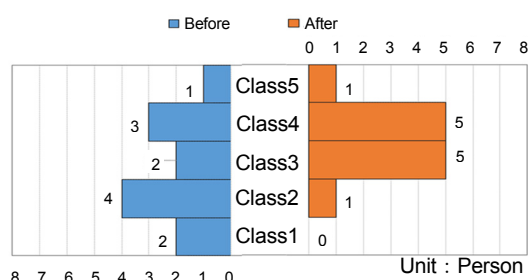


Fig. 10 Rank Change Before and After Instruction

7名が階級上昇した。また、寸法精度と研削時間は、12名中11名が向上し、基準面に対する研削面の平均誤差である寸法精度は66%向上（指導前0.033mm，指導後0.011mm），研削時間は26%向上した（指導前18.0min，指導後13.4min）。なかでも成長が著しかった中級から上級へ昇格した技能者の結果をFig. 11に示す。

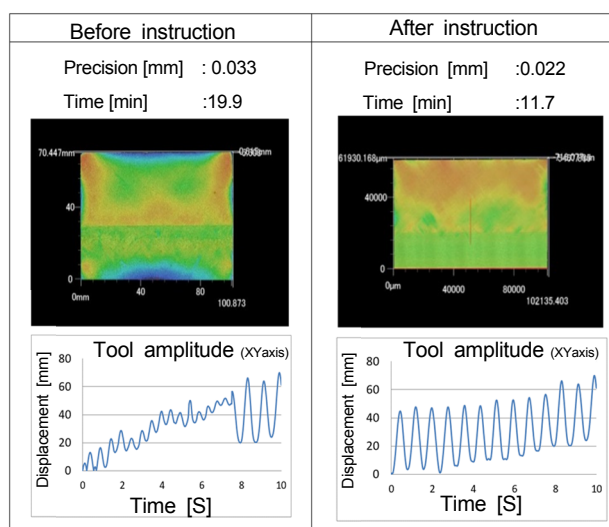


Fig. 11 Medical Record Change Before and After Instruction

「左右の振幅[mm]」や「ツール反力[N]」など、各項目が匠級の基準値に近づいた。結果、無駄な動作が少なくなり寸法精度・研削時間の向上につながったと考える。

また、従来の階級基準であれば15年かかる上級に経験年数7年で早期に到達できた。技能者自身も成長を実感することができ、働き甲斐のある職場造りに一歩つながったと考える。技能計測システムを適用することで初級・中級は、容易に階級上昇できる見通しが立った。一方、準上級・上級は、同階級内での若干の成長に留まり、階級上昇にまでは至らなかった。今後は準上級・上級の技能者を匠級に成長させるための技能の解明及び指導方法を見出していく。

8. おわりに

本取り組みによって、従来の経験学習から定量的な技能伝承を行う仕組みができた。今後も進化し続ける「魂動デザイン」実現に向けて金型製作におけるMass Craftsmanshipを加速させていく。そして、お客様へ「魂動デザイン」をお届けすることにこだわり、人生の輝きに貢献できるクルマを提供していきたい。

参考文献

- (1) 長澄ほか：「魂動デザイン」実現に向けたプレス成型安定化の技術開発，[マツダ技報, No.35, pp.106-111 \(2018\)](#)
- (2) 西本ほか：「魂動」デザインの再現に向けたこだわりのモノづくり～プレス金型製作編～，[マツダ技報, No.34, pp.81-86 \(2017\)](#)

■ 著 者 ■



特集：新世代商品群の生産技術

28

「魂動デザイン」の深化を実現する樹脂成形技術の開発 Development of Plastic Molding which Realizes Deepening of “Kodo design”

埤 慎一*1 田中 宣隆*2 田中 慶和*3
Shinichi Tao Nobutaka Tanaka Yoshikazu Tanaka影本 真也*4
Shinya Kagemoto

要 約

マツダは、シンプルなフォルムと繊細な光の表現でクルマに命を吹き込むことを目指し、「魂動デザイン」を深化させている。その中で生産技術部門として、滑らかに繋がる面の流れによって感じる「塊感」を量産車で実現するため、車両外装の隣り合う部品が一枚の面であるかのような連続感の実現に向け取り組んできた。本稿では、バンパー樹脂成形において、デザイナーの意図をより正確に実現する生産工程設計と新たなプロセスについて紹介する。

Summary

Aiming to give a life to vehicles with the simple form and the sensitive light expression, Mazda is deepening the “Kodo – Soul of Motion” design. We, in charge of production engineering, have worked on the realization of the “continuous look” of adjacent parts in the vehicle exterior as if they are one-piece surface part, to achieve "Kodo" that we can feel from the smoothly connected surface flow in the mass production vehicles. In this paper, we introduce a production process design which accurately realizes the design intention, and a new process in the bumper resin molding.

Key words : Materials, Production・Manufacture, Bumper/Body/Vehicle Body/Exterior, Forming Process, Die/Mold, Modeling, Process, Press/Resin (Plastics)

1. はじめに

「魂動デザイン」のねらいは、命を宿したもののだけが放つ、一瞬の動きや美しさを表現することにある。それには、クルマ全体を一つの金属から削り出したかのような「塊感」が必要であり、車体に映り込む光や背景が、ズレや歪なく見えるクルマ造りを目指している。それを量産車で実現するには、バンパーとボンネットなど、隣り合う部品が一枚の面であるかのような連続感が重要である。

本稿では、デザイナーが意図する面の連続感を正確に実現するための製品構造設計から生産工程設計における取り組みについてバンパーを事例にして紹介する。

2. 面の3Dデータ評価

ねらいの面の連続感を実現するためには、バンパーが車

両に組付けられた時に、どのように光が映り込むかを定量的な指標で判断する必要があり、3Dデータで面の評価ができる仕組みとそのシステムを整備した。

2.1 車両状態の面形状の3Dデータによる再現

実際の車両では、各部品の自重や樹脂成形特有のソリ変形した複数の部品を締結することで、部品同士の引っ張り合いが生じ、部品単体の面の状態から変化している。その複雑な変形を3Dデータで再現するため、構造解析ソフトを用い、実車状態の面を再現することに取り組んだ。Fig. 1 にバンパーユニットの事例を示す。まず、ユニットを構成する樹脂部品に対してソリ変形解析を実施する。次に解析で得られた各部品のソリ変形したモデルを実車同様に3Dデータで組み付けていく。その時に、締結穴や爪などの締結構造や接触する座面の形状に対し、適切な接触条件や拘

*1~4 車両技術部

Painting, Trim & Final Assembly Engineering Dept.

束条件を与えることで実車状態を忠実に再現した。その結果、バンパーユニットを実車両に組み付けた時の面の状態と同等の変形を3Dデータで表現することを可能にした。

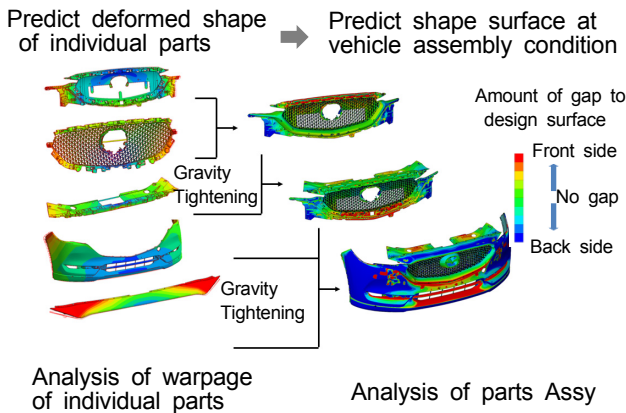


Fig. 1 Deformation Prediction by Parts Assembly

2.2 光の映り込みの3Dデータによる再現

実車では、車体にライトを当てて光を映り込ませることで、面のズレや歪みの有無を目視評価しており、これを3Dデータで再現することに取り組んだ。検証に当たり、まず実車の形状面をレーザースキャンし、デジタルデータ化することで、実車の面の状態を3Dデータで再現した。この形状面に対し、視点の位置や光源の数・位置を考慮して陰影付けを行うCADツールのレンダリング機能を使い、光を映り込ませた。黒い線が車両の形状面に映り込んだ光のラインを表している(Fig. 2)。その光のラインが、光源の位置や角度を実車と同様になるように設定・調整することで、実車と同じ光の映り込みを3Dデータで再現した。その環境の下、2.1で再現した実車状態の面に対し、このレンダリング評価を行うことで、3Dデータで光の映り込みを評価することを可能にした(参考文献(3)参照)。

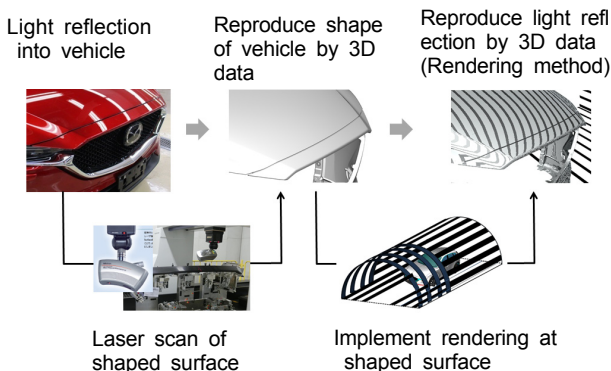


Fig. 2 Reproduce Light Reflection by 3D Data

2.3 面の評価指標の設定

これまでの車両品質は、隣り合う部品間の隙と段差の大きさを評価してきた。それに対し本取り組みでは、面の連

続感を“隣り合う部品の法線ベクトルが滑らかに繋がること”と定義し、部品間の法線ベクトルの差と光の映り込みの関係性を明らかにし、これを車両品質の新たな評価指標として加えた(参考文献(1)参照)。Fig. 3は、横軸をデザイン造形曲率、縦軸を部品間の法線ベクトルの差とし、グラフより下のエリアが違和感を覚えない領域を表す。デザイン造形曲率の大小により違和感を覚えるエリアは変化し、平面に近づくほど僅かな法線ベクトルのズレも視認しやすくなる。この取り組みで、面の連続感を3Dデータで定量的に評価することを可能にした。

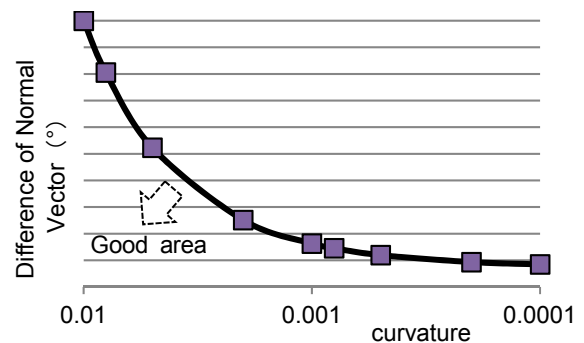


Fig. 3 Standard Normal Vector on Vehicle

3. 製品構造/生産工程設計

3.1 製品構造設計

樹脂部品であるバンパーは、金属より剛性が低いため、自らの重量に加え、構成部品が取り付くことで重力により面が変形する。そこで、自重で変形しにくい製品構造とするため、デザイン造形を再現する意匠部位と荷重を受ける骨格部位に機能を分離した。Fig. 4にバンパーユニットの骨格部位を示す。バンパーユニットに骨格構造を設定することで、重量による変形に対するロバスト性が向上できた。

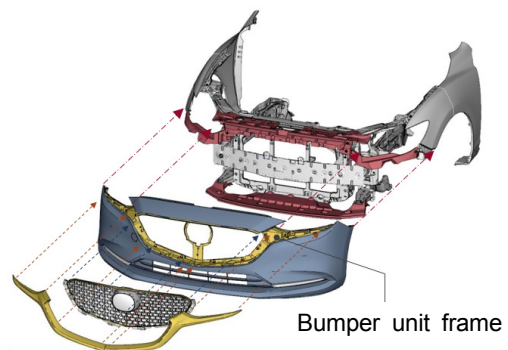


Fig. 4 Product Structure Design by Separate Functions

3.2 生産工程設計

(1) 樹脂流動解析

内外装樹脂部品の射出成形では、金型に充填する熔融樹脂が、冷却されて固化する際に収縮し、その量は充填時の樹脂の圧力・温度により決まる。バンパーのような大物樹

脂部品では、金型の樹脂注入口（ゲート）が複数必要となることに加え、製品機能を最小重量で満足させるために、製品板厚は部位毎に異なる。そのため、ゲート毎の樹脂の流動速度や距離に差が生じ、金型内の樹脂の圧力・温度が不均一になる。その結果、Fig. 5に示すとおり、部位毎の収縮率に差が生じ、面内歪み、面外曲げや倒れ込みが起こり、部品にソリ変形が発生する。そこで、樹脂流動解析を用い、製品板厚分布、ゲートのサイズや点数、樹脂の射出速度などの工程条件を調整し、収縮率の分布の差が最小になるように工程設計をしている。

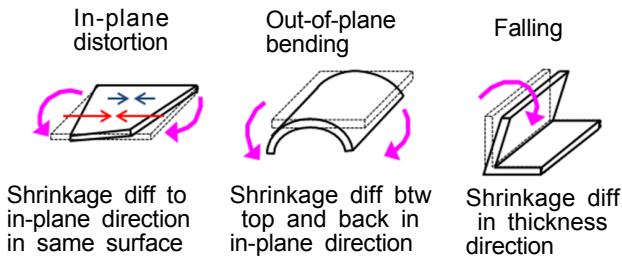


Fig. 5 Pattern of Warpage Deformation

(2) ソリ変形解析精度の向上

樹脂流動解析で収縮率の分布の差を最小にしたとしても、ソリ変形をゼロにすることは困難であり、抑制する製品構造、金型構造、生産工程をCAEで造り込むためには、ソリ変形をこれまで以上に正確に予測する必要がある。そこで、東レエンジニアリング株式会社と共同で、3D TIMON®の解析ロジックの強化に取り組んだ。より本質的な対策をCAEソフトに実装するために、成形工程で起きている実現象と現状のCAEソフトの解析ロジックを対比し、不足しているロジックを明確にし、モデル化してCAEソフトに実装した。以下に、今回CAEソフトに実装した主要な施策を紹介する（参考文献(4)参照）。

① 樹脂弾性率の温度依存性の加味

Fig. 6は、横軸が成形工程の時間軸、縦軸に弾性率を表しており、金型に充填された樹脂は、赤実線のように、冷却・固化が進むにつれて弾性率が高くなる。成形時の樹脂の収縮により発生する内部応力と成形品の剛性の釣り合いを計算するソリ変形解析は、この弾性率の経時変化を加味する必要があるが、従来のCAEでは、常温における一定の弾性率を用いていた（Fig. 6の青点線）。今回の活動で、冷却中の樹脂の温度変化に応じて弾性率を変化させるロジックを実装した。

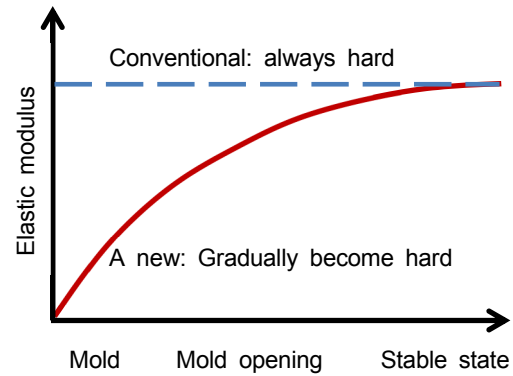


Fig. 6 Elastic Modulus by Temperature Change

② 成形品の金型拘束状態の再現

Fig. 7は、横軸が成形工程の時間軸、縦軸に型内拘束力を表しており、実際の樹脂部品は、上図のように金型を抱き抱える形状のため、金型内で成形品は収縮出来ない。従来のCAEでは、左下図のように、金型拘束状態を再現していなかった。今回の活動で、型内では成形品が金型に拘束されて収縮せず、冷却完了後、成形品が金型から解放されてから収縮するロジックに変更した。

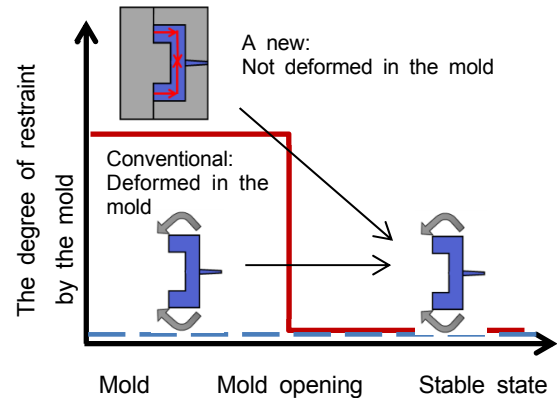


Fig. 7 Mold Restrain in Molding Parts

③ 板厚方向収縮率の算出

一般的にL形状を持つ樹脂部品は、成形時にL字の内角側に形状が倒れ込む変形が発生する。このメカニズムはFig. 8に示すとおり、成形品の面内方向（青矢印）と板厚方向（黒矢印）の収縮率の差による幾何学的な形状の変化であることが知られている。従来のCAEでは、面内収縮率に一定の係数を掛けて板厚収縮率を算出していた。この計算では、面内方向と板厚方向の収縮比率は常に一定になるが、検証の結果、実際の成形では、製品板厚等の条件によって比率が変化することが分かった。Fig. 9は横軸を面内収縮率、縦軸を板厚収縮率を面内収縮率で割ったものである。このデータを基に板厚収縮率を、体積収縮率と面内収縮率から演算するロジックに変更した。

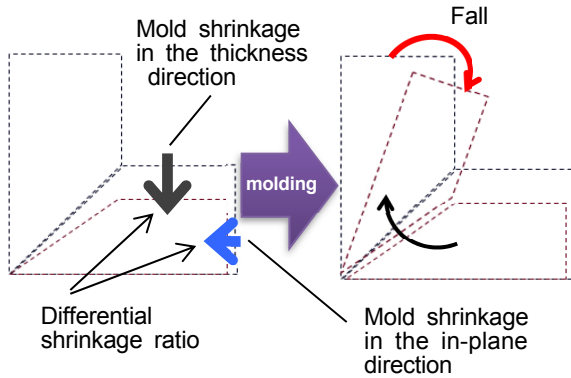


Fig. 8 Shrinkage and Fall in Thickness Direction

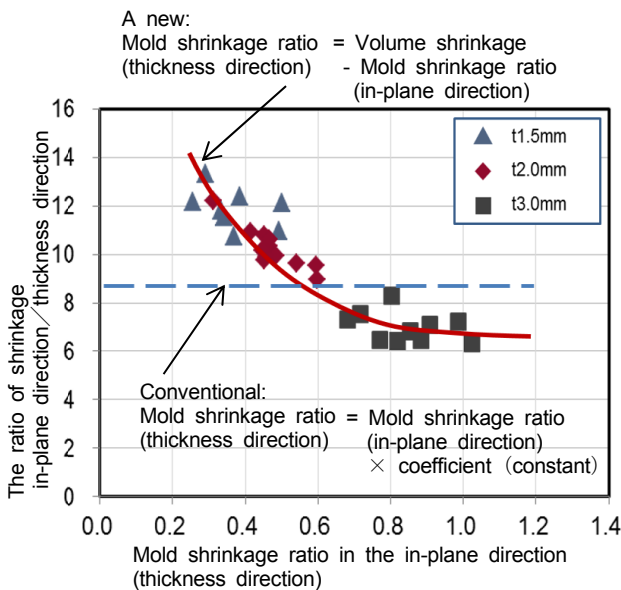


Fig. 9 Shrinkage Ratio of Thickness Direction and In-Plane Direction

4. 美しい面の創成技術

4.1 インバースプロセス

樹脂部品は、材料や工法の特性上、自重による変形や成形時のソリ変形が発生する。それらの変形を、製品設計や生産工程設計だけで完全に回避するには、膨大な時間や投資を費やす必要がある。従来のプロセスでは、製品形状に対し、収縮率分布を平均化した一定の収縮率を見込んだ金型を製作していた。今回の取り組みでは、自重による変形と部位毎の収縮率を逆算して金型に見込むプロセス（インバースプロセス）を構築した（Fig. 10）。以下にそのプロセスの概要を紹介する。

(1) 自重変形インバース

前述3.1で述べたように、バンパーの機能を分担し、自重変形に強い製品構造としたが、それだけでは解消できないわずかな自重変形が発生する。そのわずかな変形を金型に見込むため、構造解析ソフトを用い、構成部品を組み付けたバンパーユニットに対してマイナス方向に自重を掛ける

ことで、自重変形を逆算した製品モデルを作成する。

(2) ソリ変形インバース

自重変形インバースを行ったバンパーの製品モデルをインプット形状とし、ソリ変形解析を実施する。その結果得られるソリ変形したモデルに対し、3D TIMON®のソリ変形逆算機能を使用して、変形を逆向きに反転した形状モデルを作成し、再度ソリ変形解析を行う。これを繰り返してソリ変形後のモデルと製品モデルの形状が近似するまで収束計算を行い、最終的に得られた逆算形状モデルを出力する。そのモデルを使用し、後述する4.2金型設計に示す手法により、自重変形と部位毎の収縮率を予め予測した金型サーフェスモデルが完成する。

一定の収縮率のみを見込む従来のプロセスでは、製品形状と金型形状が相似形だったのに対し、本プロセスでは、製品モデルと金型モデルが異なった形状となるが、この金型で成形したものが自重及びソリ変形した結果、製品モデルと一致した形状になる。

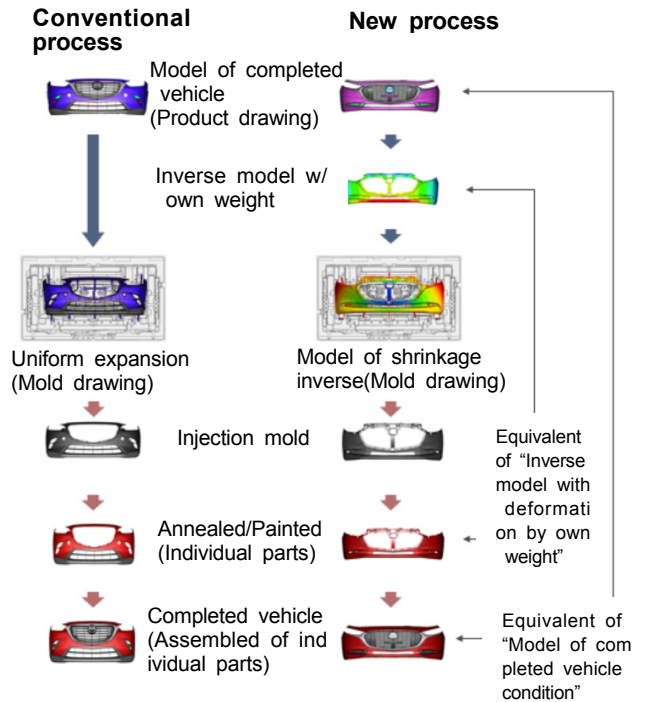


Fig. 10 Inverse Process

4.2 金型設計

ソリ変形インバースモデルは点群モデルの為、金型設計モデルとして点群をサーフェス化する必要がある。そこで、製品サーフェスモデルを、ソリ変形インバース後の点群モデルを基に変換する手法を構築した（Fig. 11）。インバース前のサーフェス面とインバース前後の点群データを用いて、各点群の変位量に応じて元のサーフェスを追従させ、インバース後のサーフェス面を自動創成する。この際サーフェスの面品質が、デザイン意匠としての品質を確保できるように、点群への追従量と面の滑らかさが両立するパラ

メータを設定した。これを行うにあたり、(株)電通国際情報サービスのご協力の下、「Omnicad for NX」を用い、点群からサーフェス面を自動創成する仕組みを構築した。

このサーフェスを使用して金型設計・製作し、バンパー成形、車両組み付けすることで、重力による自重変形と成形時のソリ変形がキャンセルされたデザイン意図通りのバンパーを得る事ができる。

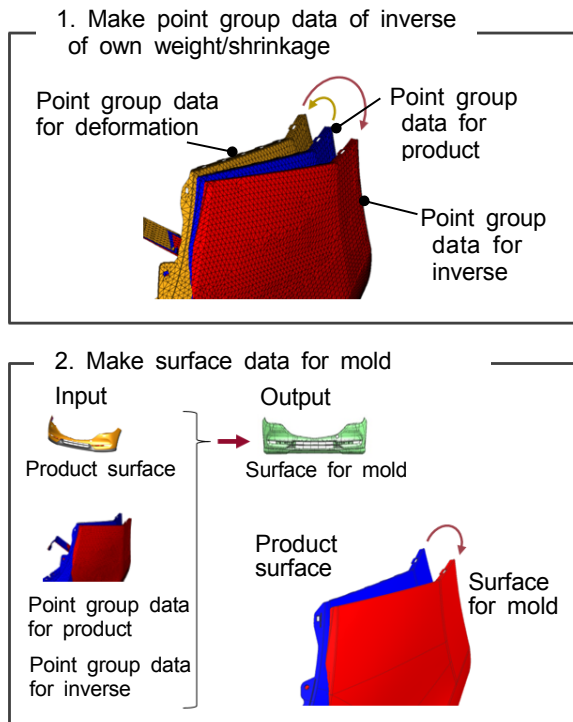
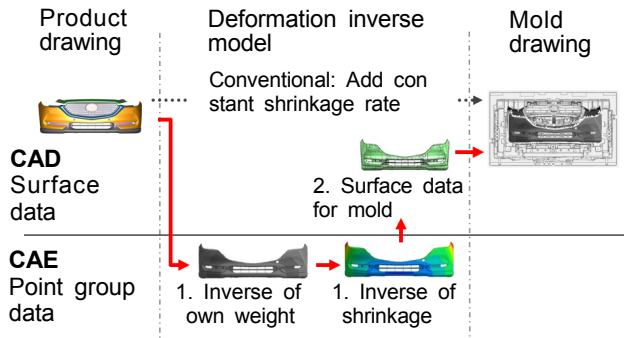


Fig. 11 Automatic Creation of Surface with Point Group

5. 結果

上記の取り組みをダイキョーニシカワ(株)と共同で実施し、新型MAZDA3では、部品間を跨ぐ連続的な光の映り込みを実現できた。Fig. 12に新型MAZDA3のバンパーに適用した結果を示す。



Grill upper



Front bumper



Rear bumper

Fig. 12 Light Reflection in Vehicle

6. おわりに

本稿で紹介した取り組みは、樹脂部品共通の課題を解決できる技術である。今後は、更なるCAE精度向上への取り組みを進めると同時に、バンパー周辺部品に対して今回紹介した技術とプロセスを展開し、デザイン意図をより高いレベルで実現していく。

参考文献

- (1) 田中ほか：魂動デザインを際立たせる“面の連続感”実現の取り組み, [マツダ技報, No.34, pp.93-98 \(2017\)](#)
- (2) 藤末ほか：魂動デザインの実現に向けた樹脂部品の面精度保証プロセスの構築, [型技術, Vol.32 No.13, pp.72-73 \(2017\)](#)
- (3) 上西ほか：魂動デザインの実現に向けた樹脂部品にお

ける面精度向上の取り組み, 型技術, Vol.32 No.8,
pp.64-65 (2017)

(4) 下野ほか: 魂動デザインの実現に向けたそり変形解析
技術の構築と金型づくり, 型技術, Vol.31 No.13,
pp.38-39 (2016)

(5) “ Omnicad ” Copyright@2019 Omnicad All Right
Reserved
“ NX ” Copyright@2019 Siemens All Right Reser-
ved

■ 著 者 ■



堺 慎一



田中 宣隆



田中 慶和



影本 真也

特集：新世代商品群の生産技術

29

「人馬一体」を実現する 動的ホイールアライメントの造り込み

Building Quality of Dynamic Wheel Alignment to Realize “Jinba Ittai”

福永 明*1 Akira Fukunaga	井上 大河*2 Taiga Inoue	土井 洋子*3 Yoko Doi
高本 尚志*4 Takashi Takamoto	金 壯憲*5 Changhun Kim	鈴木 竜司*6 Ryuji Suzumura

要 約

マツダは、“人間中心のものづくり”を一貫した哲学として掲げ、まるで自分の体の一部のように動かせる、ドライバーの意思とクルマの動きの一体感を追い求める。そこにある安全に、快適に、思いどおりに操れる走りこそ、マツダの目指す「人馬一体」である。それを実現するために、人間特性に合わせた車両運動特性を定義し、車両組立工程においてはその車両運動特性を忠実に実現する車両構造設計と生産工程設計を行う活動に取り組んできた。現状は四輪ダイナミックアライメントテスターにより空車状態のホイールアライメントを保証している。更に、車両運動特性に直結する走行中のタイヤの動きをねらいどおりにコントロールすべきと考え、車高変化に応じたホイールアライメントの変化量（以下動的ホイールアライメント）に着目した。本稿では新型MAZDA3の量産準備での動的ホイールアライメントの造り込み活動の事例を報告する。

Summary

Under its consistent “Human-centered Monotsukuri” philosophy, Mazda pursues a sense of oneness between the driver’s intention and the vehicle’s behavior, the sense that a driver and a vehicle become one as if the vehicle were a natural extension of the driver. Driving performance that ensures safety, a sense of comfort and handling just as wanted, which is realized by this sense of oneness, is what Mazda aims at “Jinba-Ittai”. In order to realize this, we worked on a project in which we defined vehicle motion characteristics matched with human characteristics and then designed vehicle structures and production processes so that these vehicle motion characteristics could be realized accurately in the form of a product in the final assembly phase. In the current status we guarantee the wheel alignment in the empty condition by the All-Wheel Dynamic Alignment Tester. Additionally, in order to control the movement of rolling tires, as intended, which is directly linked to the vehicle motion characteristics, we focused on the variation of wheel alignment with respect to the change in vehicle height (hereinafter referred to as Dynamic Wheel Alignment). This article introduces the efforts made in the process of building the quality in Dynamic Wheel Alignment in preparation for mass production of the All-New Mazda3.

Key words : Vehicle Dynamics, Suspension System, Driving Stability, Dynamic Wheel Alignment

1. はじめに

マツダは中期経営方針に基づき、更なる本格的成長を

目指している。生産技術領域の取り組みの3本柱は【魂動デザイン】【燃費】【人馬一体】の更なる進化で、お客様に生涯顧客になっていただけることを目指している。

*1～6 車両技術部
Painting, Trim & Final Assembly Engineering Dept.

その実現に向けて、「人馬一体」では安全に、快適に、思いどおりに操れ、いつまでも楽しみたくなる気持ちよい走りの実現を目指している。ドライバーの意図どおりにクルマが動くこと、人の感覚に合った車両応答が得られることを「マツダらしい操縦安定性」ととらえ、付加価値としたい。これを量産車で実現するには、路面との唯一の接点であるタイヤの姿勢を全ての走行シーンにおいてねらいどおりに造り込むことが重要である。本稿では、「マツダらしい操縦安定性」を動的ホイールアライメントに落とし込み、量産工程で実現させるプロセスを構築し実践した内容を報告する。

2. 動的ホイールアライメント

2.1 動的ホイールアライメントとは

従来は、構成部品の寸法公差を管理した上で、完成車両静止状態でのイニシャルアライメントを調整し、完成車の動的ホイールアライメント品質を提供してきた (Fig. 1)。

一方、お客様がクルマを走行させるシーンでは段差の乗り越えや加速、減速時の車両姿勢変化、コーナリング中の車両の傾きなどに応じてタイヤは常に上下にストロークし、ストローク量に応じてタイヤの姿勢は変化する。そこでマツダは車両静止状態だけでなく、動的なホイールアライメントの変化までも工程内で造り込むことが更なる人馬一体の実現につながると考え、評価指標に動的ホイールアライメントを加えた (Table 1)。

Table 1に示すように、付加価値である安全、快適、楽しみの全ての項目は動的ホイールアライメントと密接に関わり合っている。特に◎の欄は寄与度が大きい項目である。

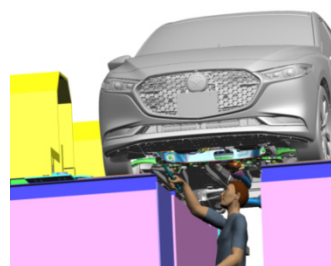


Fig. 1 Adjustment of Initial Wheel Alignment

2.2 動的ホイールアライメントの構成要素

タイヤの姿勢はホイールアライメント ((1)トー角, (2)キャンバー角, (3)キャスター角) の3つの角度で表される。車高は、フェンダー下端からホイールセンターとしている (Fig. 2)。

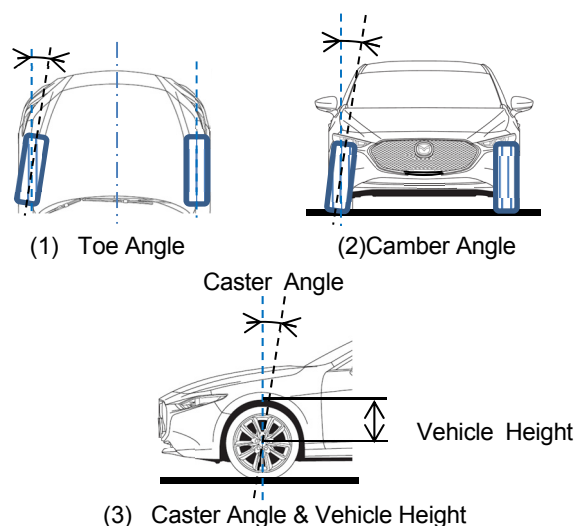


Fig. 2 Wheel Alignment

Table 1 Relationship between Value and Characteristics

Value	Inclination by Dynamic Characteristics	Dynamic Wheel Alignment				Friction of Damper	
		Initial wheel alignment					
		Toe Angle	Camber Angle	Caster Angle	Vehicle Height		
Safety	Damping to Roll and Road Surface Input	◎	○	○		◎	○
	Straight Driving Stability	○	◎	◎	◎		
	Vehicle Attitude During Acceleration and Deceleration	○	○	○	○	○	◎
Comfort	Ride Comfort	○	○	○		◎	○
Precise Response	Linearity of Steering and Yaw Movement	◎	○	○	○		◎
	Line Traceability	◎	○	○	○	○	○

◎ : Strong Relationship ○ : Relationship

走行中などタイヤが上下にストロークし車高が変化
 する際、サスペンションのジオメトリーにより、これら
 の3つの角度も合わせて変化する。車高とトー角の
 関係を示す (Fig. 3)。動的ホイールアライメントは
 車高とアライメントの関係が設計のねらいである
 実線を変化することが理想である。しかし量産状
 態においては、部品寸法のバラツキなどから点
 線の範囲内で動的アライメントのバラツキが
 発生する。

このバラツキをねらいどおりの実線状態に近づ
 けるためには、①イニシャルアライメント、②車
 高、③グラフの傾き (以下、動特性の傾き) を
 コントロールできる必要がある、この3つが
 動的ホイールアライメントの構成要素である。

2.3 動的ホイールアライメントの目標値の設定

従来、生産技術では図面規格を基に寸法バラツ
 きを小さくすることを価値ととらえて、クルマ造
 りを行ってきた。しかしながら、今一度本来の
 お客様志向における付加価値を高める業務は
 どうあるべきかを考え、付加価値を起点とし、
 それを車両運動特性、構造モデルに置き換え、
 構造・工法を同時に開発し量産車に織り込む
 業務プロセスへと変革してきた。この業務プロ
 セス変革の上で、生産技術者自身も動的ホイ
 ールアライメントの違いを試乗により納得し、
 全てのお客様にねらいの運動特性を提供でき
 る目標値を設定した。

(1)付加価値の肚落ち

生産技術部門としても目指す付加価値を肚落
 ちするために活動を行った。動的ホイールア
 ライメントに関係する項目として、車高・動
 特性の傾きのバラツキに着目し、それぞれ意
 図的に2~3水準の寸法特性とした完成車を
 準備し、生産技術部門のメンバーで試乗を
 行った。試乗の結果、ほとんどのメンバーが
 図面中央値を再現した車両に対して完成車
 のバラツキ実力最大を再現した車両でフィー
 リングの悪化を感じ、当活動における付加
 価値向上の重要性を肚落ちした。

(2)目標設定

車高と動特性の傾きについて目標を設定し
 た。車高の目標は操縦安定性の評価指標を用
 い、全てのお客様にねらいの操縦安定性を
 感じてもらえるレベルを目標値とし、既存
 車の車高バラツキから約30%減とした。こ
 の目標値は操縦安定性の向上だけでなく、
 デザイン性の向上や燃費の向上にも寄与す
 るものである。動特性の傾きの目標値は車
 両のステアリング特性の指標の一つである
 スタビリティファクター⁽¹⁾と動特性の傾
 きの関係をシミュレーション検証した結果
 から算出し、既存車の動特性の傾きバラツ
 きから約22%減を目標とした。

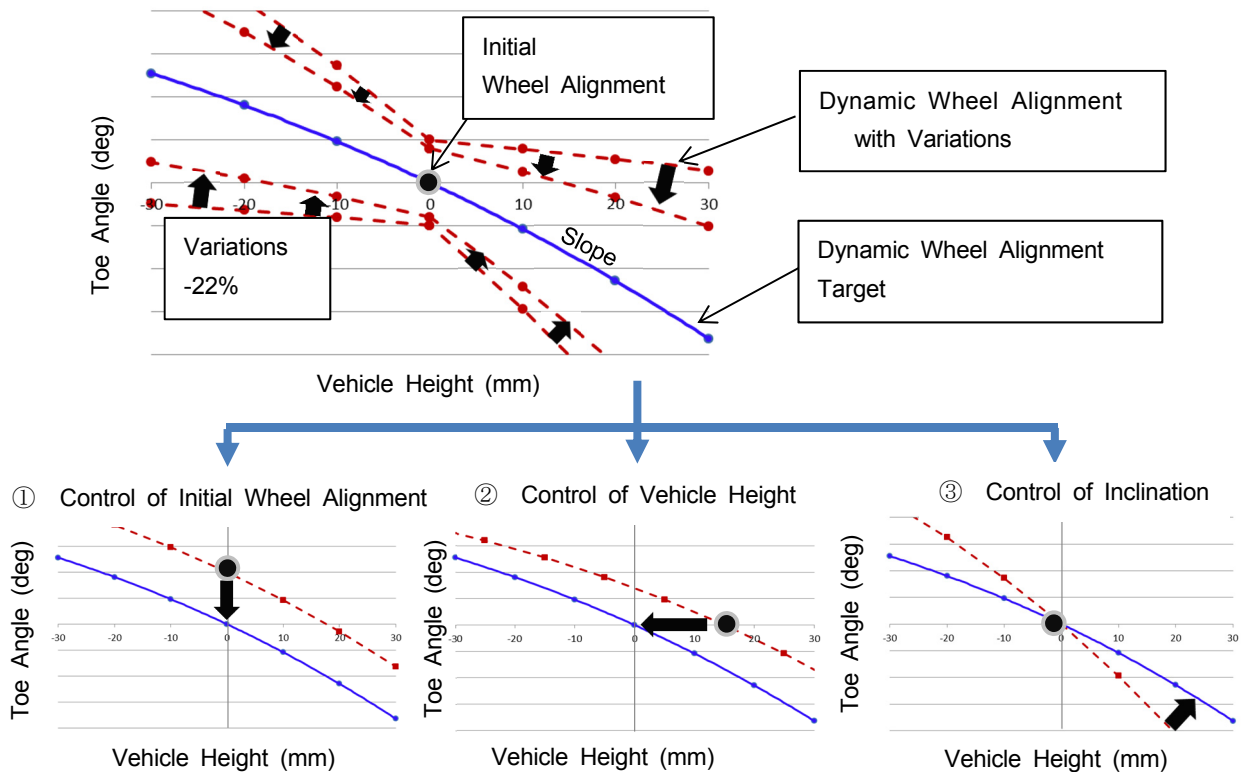


Fig. 3 Control of Dynamic Wheel Alignment

2.4 アライメントUCF

前項で設定した新たな目標を達成するためには、関連する因子の影響度を詳細に把握できた上で有効な対策を行う必要がある。しかし、完成車状態で測定できる検証方法からは、影響因子別の要因分析が困難であった。そこで新たにサスペンションユニット状態での検証が可能なアライメントUCF (Unit Coordination fixture) を検証ツールとして活用した。アライメントUCFによる検証の目的は構造モデルと実機の差を要素分析することであり、影響因子別 (①部品寸法影響, ②ボディー寸法影響, ③組立順序や④工法の影響など) に分離して検証が行える (Fig. 4)。

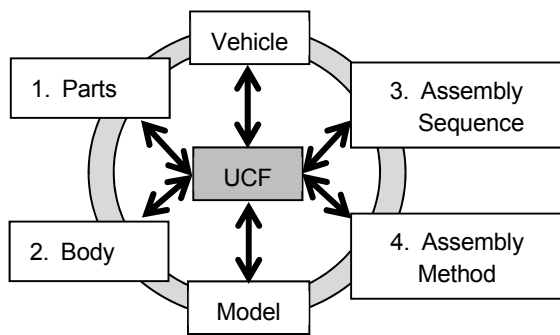


Fig. 4 Conceptual Diagram

アライメントUCFは次に示す4つの機能をもつ (Fig. 5)。
 ①サスペンションユニットとボディーの締結部位を正寸で再現。
 ②タイヤ接地面高さを自由に昇降させることで車高変化を再現。
 ③ストラット上部とタイヤ接地面下部にロードセルを配置することで、タイヤ接地反力とストラット反力を同時に測定。
 ④締結部位のハードポイントを位置変更可能な構造としており、シムを挿入することで部品のバラツキを再現。

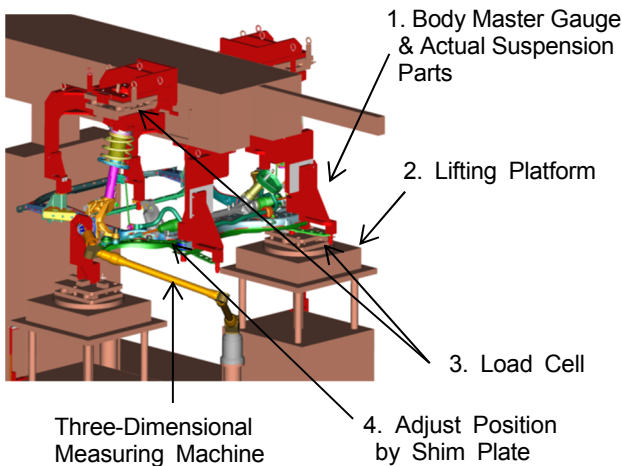


Fig. 5 Alignment Unit Coordination Fixture

このアライメントUCFにサスペンションをセットし、三次元測定機を用いてホイールアライメント、部品の取り付け位置、リンク類の形状変形等を計測することで、影響因子別とその影響量を定量的に計測することができるようになり、この結果をフィードバックすることで、構造モデルの精度を向上できる。

3. 車両構造/工程の造りこみ

従来のクルマ造りに加えて、動的ホイールアライメントの品質向上を実現させるプロセスを新型MAZDA3で構築した。先に述べた動的ホイールアライメントの3つの構成要素 ①イニシャルアライメント, ②車高, ③動特性の傾きについて、モデルの検証と車両構造、そして工程設定を通じた取り組みを以下に紹介する。

3.1 アライメントUCFを活用したモデルの実機検証

ADAMS等のサスペンションユニット単位で行うシミュレーションと実車の差について要因分析を行う場合、ボディーや部品寸法のバラツキが相互影響している実車測定値を用いての比較は困難である。そこで、モデルと同じユニット単位で、影響因子別に分離検証が可能なアライメントUCFを実機検証ツールとして活用した。

はじめに、リアサスペンションのイニシャルアライメント検証事例を紹介する。新型MAZDA3のリアサスペンション構造を示す (Fig. 6)。

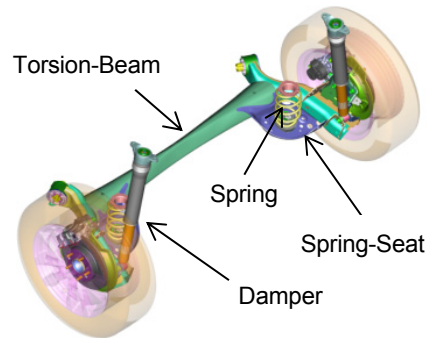


Fig. 6 Rear Suspension

新型MAZDA3のリアサスペンションはトーションビーム形式 (以下TBA) を採用している。

TBA形式のサスペンションは軽量かつスペース効率の良さを高め、力の伝達を滑らかにすることができている。一方でTBAは、アライメントを調整する構造を有しておらず、また曲げ剛性による変位によってホイールアライメントを変化させるため、精度良く曲げ変位によるホイールアライメント変化の関係を把握しておく必要があった。そのため、TBA単品状態 (無負荷状態) と完成車静的な状態 (1G状態) のホイールアライメントの変化量をモデルと実機で比較検証を行った。この結果、モデルと

実機には0.05degの差があり、このうち0.03degについては解析条件を見直した。残る0.02degについて検証を行うために、アライメントUCFを活用し車両組立工程内の組み付け作業を手順どおりに再現しながら、各作業単位でアライメントの変化を計測した (Fig. 7)。

この結果、ダンパーロアブッシュを締結する際に、ブッシュを挟み込むブラケットとブッシュの隙間の変化に連動しブラケットが撓み、ブラケット固定されているTBA本体が変形することでアライメントに影響を与えることが分かり、新たな影響因子として明らかにできた (Fig. 8)。これらの検証結果をモデルや車両構造へフィードバックし、ねらいの特性の造り込みを実施した。

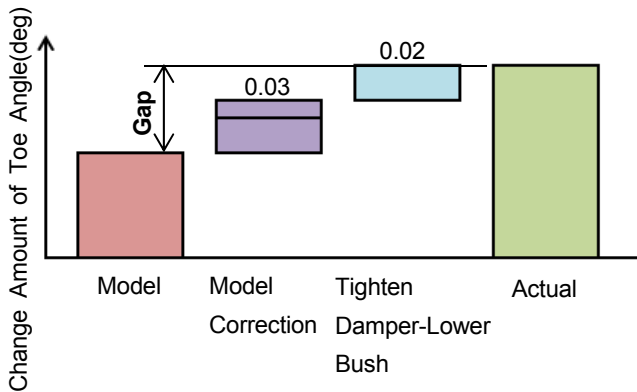


Fig. 7 Factor of Gap

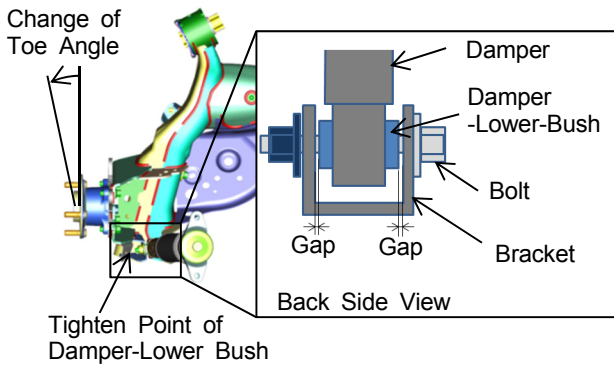
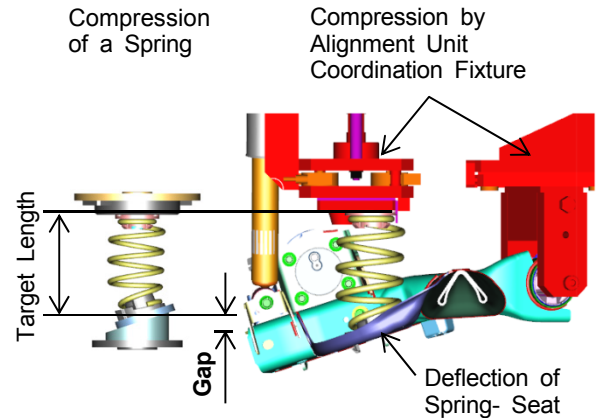


Fig. 8 Image of Toe Angle Change

2つ目に、リアサスペンションの車高検証事例を紹介する。車高はTBAへの入力荷重とスプリングの反力、及び構成部品の寸法によって決まるが、量産準備の初期段階において、スプリング反力に対して完成車の車高が低くなる現象が発生した。当活動でも、アライメントUCFを活用し、車高ズレの要因分析を行った (Fig. 9)。スプリング単品をねらいの高さまで圧縮した場合と、TBAのホイールセンター高さを規定の位置に合わせた場合のスプリング反力を比較したところ、ねらいの反力が発生していないことが分かった。その要因を調査するために三次元測定機で寸法計測し、次の2つの要因が分かった。

1つ目はスプリング反力を受けてスプリンシートが2.5mm撓んでいること、2つ目はTBA自体の部品寸法ズレによりスプリングセット位置に1.7mmズレがあることであった。この2つの寸法影響により、ねらいどおりの寸法までスプリングを圧縮できていないため、ねらいのスプリング反力を発生させることができず、結果車高が低くなっている現象であることが分かった。この結果をモデル及び部品構造にフィードバックし、ねらいの車高を実現した (Fig. 10)。



Factor of Gap	(mm)
Deflection	2.5
Variation	1.7

Fig. 9 Measurement of Deflection by Alignment Unit Coordination Fixture

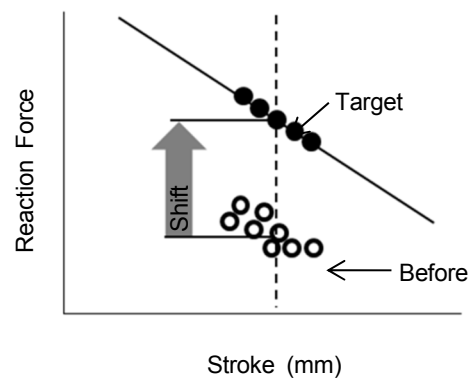


Fig. 10 Relationship of Stroke and Reaction Force

3つ目にフロントサスペンション動特性の傾き検証事例を紹介する。動特性の傾きに影響を与える部品寸法バラツキの寄与度を精度よく把握し、結果を構造に織り込むことで目標を達成する。

寄与度の把握は事前に算出したシミュレーション結果 (Fig. 11) に対して、アライメントUCFを用いて測定結

果の一致度確認を行った。実部品を使った検証では各部品のバラツキが相互に作用し、個々の部品バラツキ影響を正確に把握することが難しい。そこで本検証ではアライメントUCF上でフロントクロスメンバーを図寸どおりに再現したParts Master Gauge (以下PMG) を使用して行った (Fig. 12)。またPMGはギア&リンクやサスペンションアーム類の取り付け部位をシムプレートでXYZの3方向に調整できる構造を有しており、方向別に1つ1つ部品のバラツキを再現させることができる。クロスメンバーの部品寸法バラツキを、シムを使い再現させ、寸法バラツキと動特性の傾きの変化量の関係がシミュレーションで精度よく計算できていることを確認した。

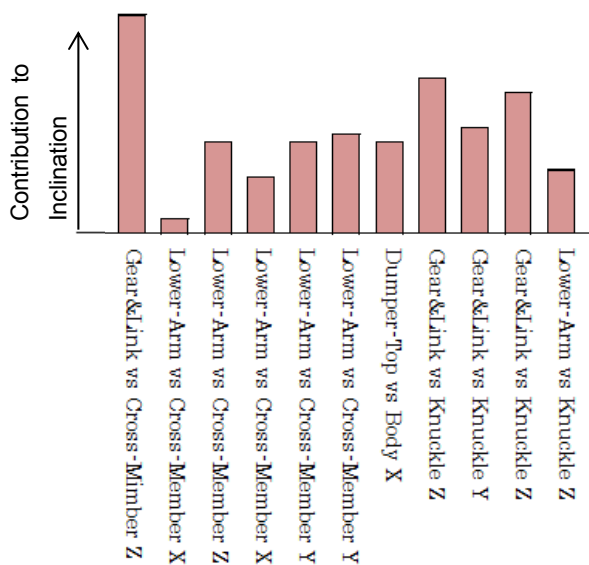


Fig. 11 Contribution to Inclination

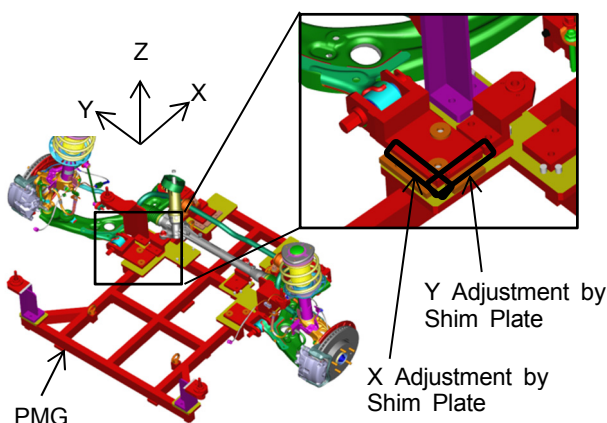


Fig. 12 Parts Master Gauge

この結果を受け、機械加工部位に比べ部品バラツキが大きい板金部品で、かつ動特性の傾きの寄与度が高い部位であるギア&リンクの締結面であるフロントサスクロスメンバーWL位置の部品寸法公差設定の見直しを行っ

た。従来、位置度や面輪郭度などの幾何公差を設定しているが、更に高い工程能力を保証するため、重要管理特性の設定を行った。

これらの活動の結果、ねらいの特性に造り込むことができ、目標とした既存車の動特性の傾きバラツキから約22%減を達成した (Fig. 13)。

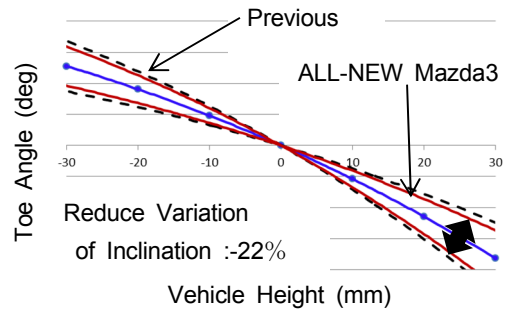


Fig. 13 Improvement Rate of Variation by Inclination of Dynamic Characteristics

3.2 BOMと生産システム改善による車高バラツキ縮小の取り組み

車高バラツキの低減を目指し、新たな部品構成と生産指示システムを導入した。従来はエンジン・トランスミッション・駆動形式等の主な車両仕様ごとに重量範囲を算出し、その範囲に対して適切なスプリングを設定していた。新型MAZDA3からは、シートやオーディオ仕様などのお客様選択部品も含めて重量をきめ細かく算出し、かつ車両四輪それぞれの輪重を部品重量と重心から計算する。その輪重情報と生産管理システムをリンクさせ最適なスプリングを選択する工程を導入した。また、サプライチェーン各社にも当活動への理解・協力をいただき、部品公差の縮小も実現できた。これらの結果、新型MAZDA3では従来から車高バラツキを37%低減し、目標を達成できた (Fig. 14)。

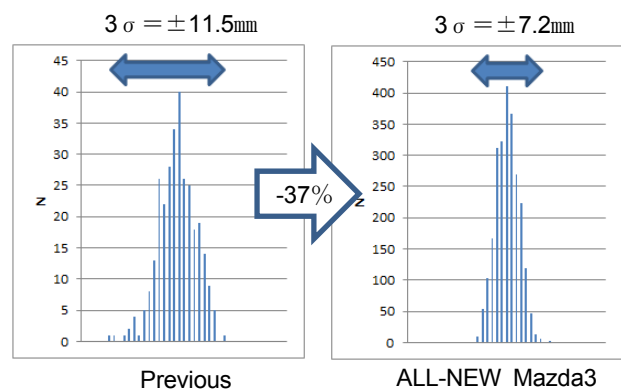


Fig. 14 Improvement Rate of Vehicle Height Variation

4. 量産維持管理

量産工程において、これまではインシヤルアライメントの計測のみを行っていたが、車高傾向監視による中央値ズレやバラツキの早期発見と是正及び輪重情報の精度向上を目的に、完成車の車高と輪重の計測を行う工程を導入した (Fig. 15)。

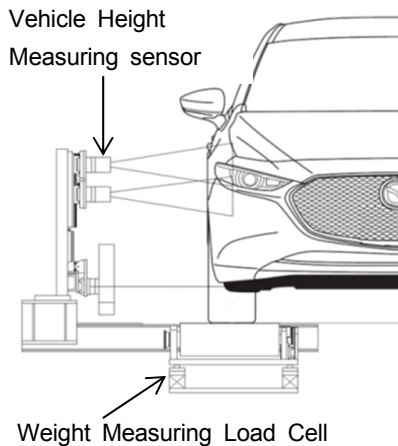


Fig. 15 Measuring Vehicle Height
in Dynamic Alignment Tester

この車高計測は、既存のホイールアライメントを計測する3つのセンサーを活用し、またフェンダー下端の高さを測定するセンサーを追加した (Fig. 16)。

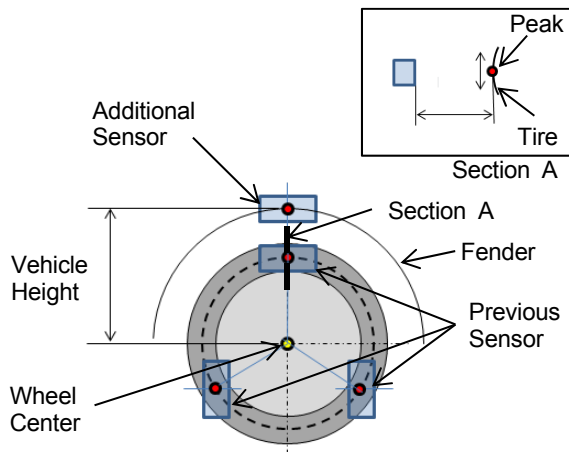


Fig. 16 Measurement of Vehicle Height

従来のホイールアライメント計測ではセンサーとタイヤ表面の距離を精度よく測定することが重要であり、その距離の差からトー・キャンバー値を算出していた。今回は同センサーを用いてタイヤ中心座標も算出したが、タイヤ径方向の測定精度も重要となったため、新たにタイヤ径方向のタイヤピーク測定ロジックを開発し、従来のセンサーを活用しながらホイールアライメントとホイー

ル中心座標の算出が精度よくできるようになった。

併せてストラット組立工程においてもストラット組立時にストラット反力を計測する工程を導入した (Fig. 17)。

これらにより、ストラットと完成車の荷重と車高データを対で関連付けて管理できるようになった。このデータを用い量産車の品質維持管理が行えるプロセスを構築し、また次期車種を更なる品質向上させるために当データの活用を図る。

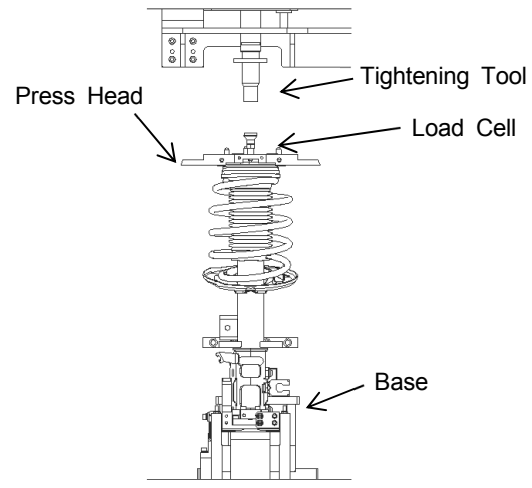


Fig. 17 Measuring Load of Strut
in Assembly Device

5. 結果と今後の課題

今回、動的ホイールアライメントの造り込みという考えに基づき、モデル段階からインシヤルアライメント、車高、動特性の傾きについて、ねらいどおりの特性を実現させる車両構造設計、生産工程設計を取り入れたクルマづくりのプロセスを構築した。今後の課題は、この考えを全ての部品とクルマづくりへと発展させ、マツダが進めるMBD開発の進化につなげることである。

6. おわりに

「人馬一体」を達成する「マツダらしい操縦安定性」を量産車で忠実に再現するため、サスペンション領域における動的なホイールアライメントの造り込みに取り組んだ。本稿では従来詳細な検証が困難であったサスペンションの挙動を、アライメントUCFを活用し挙動を明らかにできたことで、その結果を車両構造、生産工程に反映できた。今後もお客様に感動を提供し続けるため、更なる技術開発を継続していく所存である。

参考文献

- (1) 安部：自動車の運動と制御，山海堂，pp.70-72 (1992)

■ 著 者 ■



福永 明



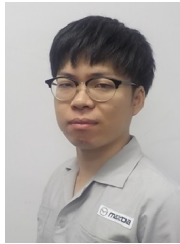
井上 大河



土井 洋子



高本 尚志



金 壯憲



鈴木 竜司

特集：新世代商品群の生産技術

30

リヤホイールアーチヘムの高精度シーリングと品質保証システム The High Accuracy Sealing and All Number Guarantees of the Rear Wheel Arch Hem

服部 博晃*1 石崎 剛*2 福田 靖英*3
Hiroaki Hattori Go Ishizaki Yasuhide Fukuda
辻 雅一*4
Masakazu Tsuji

要 約

新型MAZDA3では、「魂動デザイン」の更なる深化に向けて、リヤホイールアーチのフランジを従来の90度折り曲げて接合するL型構造から180度折り曲げて接合するヘミング構造へ変更することによってタイヤを極限まで車両の外側に出し、ボディとタイヤの一体感、強い踏ん張り感を実現した。

しかし、ヘミング構造を採用するにあたって、目視確認できないヘミング部の防錆保証とタイヤとのクリアランス確保を両立させる必要があった。本稿では、ヘミング部の防錆保証のために、ねらいの厚みで塗布する高精度シーリング及び全数保証検査システムを開発し、日本・メキシコ・タイ・中国の工場へ導入したので、その紹介を行う。

Summary

For All-New Mazda3, tire position is designed wider to express “Sense of unity” and “Strong holdout feeling” to evolve “Kodo design”, by changing structure of rear tire arch from L-shape flange that are angled at 90 degree to hemming that are angled at 180 degree.

For hemming structure, it is necessary to secure both anti-rust performance for the area unable to confirm visually, and clearance to tire. In this report, we would like to introduce the development of accurate sealer application and all units inspection system of hemming sealer introduced to Japan, Mexico, Thailand, and China plants.

Key words : Production・Manufacture, Painting, Inspection/Measurement, Quality Assurance, Rust Prevention, Seal

1. はじめに

新型MAZDA3では、ボディとタイヤの一体感、強い踏ん張り感を際立たせ、「魂動デザイン」を更に深化させるため、リヤタイヤをボディ外側に張り出させる車両構造を実現した。具体的には旧型アクセラでは、リヤホイールアーチ部のボディ外板パネルと内板パネルの接合構造に起因し、結果的に奥まった位置にタイヤを配置する必要があったが、新型MAZDA3では、両パネルの接合構造を新たにする事で、タイヤを外側に張り出させ、デザイン意図を具現化した (Fig. 1)。



Fig. 1 Design Comparison

*1~4 車両技術部 塗装技術 Gr.

Painting, Trim & Final Assembly Engineering Dept. Painting & Plating Engineering Gr.

2. 従来構造との違い

旧型アクセラでは、リヤホイールアーチにおいて、L型フランジ構造と呼ばれる、ボディ外板パネルと内板パネルをタイヤ側に90度折り曲げて接合する構造を採用していた。この構造では、①スポット溶接、②サイドフレームアウターとリヤピラーインナーのアッシー公差、③防錆シール保証に必要な寸法などの積み上げにより、長いフランジ幅を必要とし、更に④フランジエッジによるタイヤの傷付き防止の安全マージン（バースト要件）を確保した位置にタイヤを配置する必要がある。一方、新型MAZDA3ではヘミング構造と呼ばれる、ボディ外板パネルをタイヤ側に180度折り曲げて接合する構造を採用することで、タイヤを車両外側に張り出す車両構造を実現した (Fig. 2)。

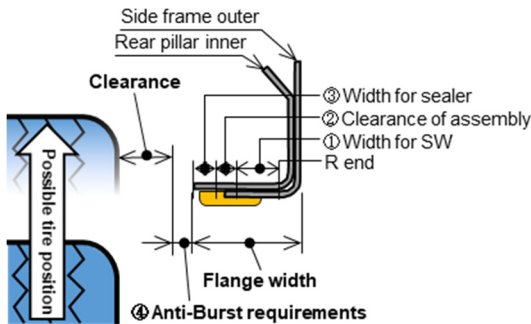


Fig. 2 Relations of a Tire and Body

3. 実現に向けた課題

リヤタイヤアーチにおけるヘミング構造を実現するにあたっての最大の課題は、ボディ外板パネルと内板パネルの合わせ目に塗布するシーリングの品質保証である。具体的には以下の3つの観点での品質保証を実現しなければならない。

3.1 水を侵入させない防錆性能保証

ホイールアーチは、サイドフレームアウターとリヤピラーインナーの2枚のパネルで構成されているが、同部位はタイヤが泥水を巻き上げ厳しい環境にあり、この2枚のパネルの合わせ部に水が浸入しないよう、確実にシールしなければならない (Fig. 3)。

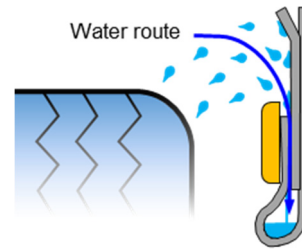


Fig. 3 Route of Water into Hemming Structure

3.2 タイヤとのクリアランス保証

ヘミング構造の採用により、タイヤを最大限外側へ出すためには、シーラーを塗布した結果の全体の厚みをヘミング厚み以内で管理しなければならない (Fig. 4)。

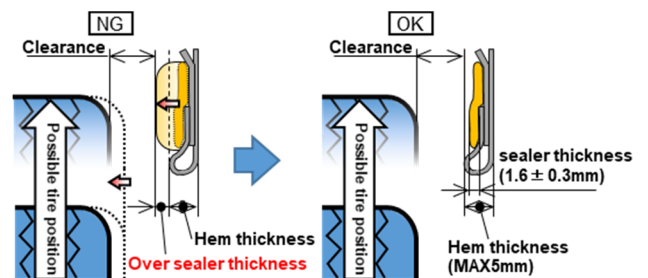


Fig. 4 Relations of a Sealing Thickness

3.3 目視困難部位としての品質保証

ヘミング構造のホイールアーチでは、塗布欠陥があっても適切な方向から目視できない。また、シーラー厚みの上限管理も目視では容易に検査できない (Fig. 5)。

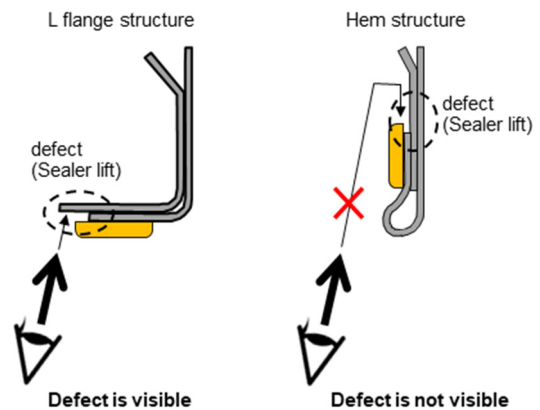


Fig. 5 Visibility of Sealer Applied Area

4. 課題解決

4.1 シーラー塗膜位置保証

(1) ねらいの寸法リレーション

水を侵入させない防錆性能を確保するためには、ボディー外板パネル（サイドフレームアウター）と内板パネル（リヤピラーインナー）の鉄板どうしの接合精度とシーラー塗布位置精度の寸法リレーションを成立させ、さまざまな故障モードに対してもロバストかつ確実なシーラー塗布を行う必要がある。

代表的な故障モードとして、以下の2つが挙げられる。

- a) シーラー浮き：板厚やパネル板間隙による段差によりシーラーが着地せず、シーラーが浮いた状態。
- b) シーラー外れ：シーラーがサイドフレームアウターパネルに被さっていない状態（Fig. 6）。

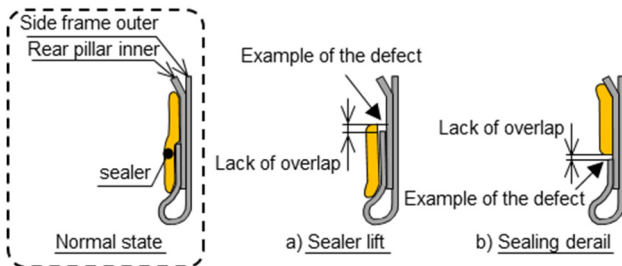


Fig. 6 Target Position of the Sealer and Failure Mode / Sealer Dimension Criteria

これらの故障モードに対して、シーラー浮きを発生させないためのオーバーラップ寸法A（以下『寸法A』）と、シーラー外れを発生させないための寸法B（以下『寸法B』）を考慮する（Fig. 7）。

寸法A：最悪条件（段差・吐出量・塗布速度・塗着角度などが最も不利な状態）でもシーラー浮きなく必ずリヤピラーインナーパネルに塗膜を着地させるために必要なオーバーラップ寸法。

寸法B：最悪条件（上記同等）でもシーラーが合わせ目から外れることなく被せるために必要なオーバーラップ寸法。

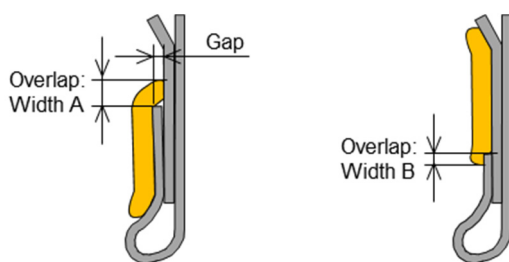


Fig. 7 Overlap Width of Sealer and the Hem Flange

シーラー浮きを発生させない寸法Aを保証するためには、寸法A \geq ③-(①+②)が必要である（Fig. 8）。

①ヘミング長さMAX寸法

サイドフレームアウターがヘミングされた状態で管理された、寸法公差の最大値。

②シーラー塗布位置ばらつき寸法

シーラー塗布作業で起こる塗布ばらつき寸法の最大値。

③シーラーノズルの製作公差MIN寸法

ノズル納品時のガイドからノズル上端までの管理寸法の最小値。

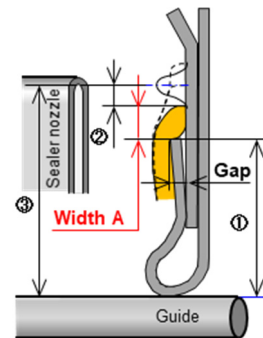


Fig. 8 Width A Relation

シーラー外れを発生させない寸法Bを保証するためには、寸法B \geq ④-(⑤+⑥+⑦)が必要である（Fig. 9）。

④ヘミング長さMIN寸法

サイドフレームアウターがヘミングされた状態で管理された、寸法公差の最小値。

⑤シーラー塗布位置ばらつき寸法

シーラー塗布作業での起こる、シーラー位置のばらつき寸法の最大値。

⑥シーラーノズルの製作公差MAX寸法

ノズル納品時のガイドからノズル下端までの管理寸法の最大値。

⑦シーラーノズルのガイド摩耗限界寸法

日常使用でのガイドの摩耗の点検管理寸法の最大値。

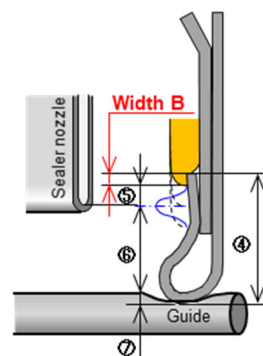


Fig. 9 Width B Relation

(2) ねらいの塗布位置を実現する相対位置決め

前述の寸法リレーションを成立させるため、合わせ目に対してねらいの位置に確実に塗布できるロボット塗布システムを開発した。このシーリングシステムは、工場ごとにワーク（ホワイトボディー）の搬送精度が異なる国内外工場に展開することを前提に開発を進めた。

シーラー塗布の塗布位置を保証するために、従来は作業者が、合わせ目そのものにノズルを接触させ、ズレ量を目で見つつ触感を働かせながら瞬時にノズルの位置を補正して塗布していた。このシステムでは、ホイールアーチ位置の合わせ目がどこにあるかをレーザーセンサーにて測定した上で、ガンツールをボディーにフィットさせて塗布する機構により、ワーク位置のばらつきの影響を受けずに人間作業同等以上の塗布精度を実現した。

まず Fig. 10 に示すように、ホイールアーチの2か所を測定し、おおまかな位置を認識し、相対位置のズレを補正する。具体的にはホイールアーチ前端と最上部の2か所で、ボディー前後方向：X、ボディー左右方向：Y、ボディー高さ方向：Zの3方向を測定している。

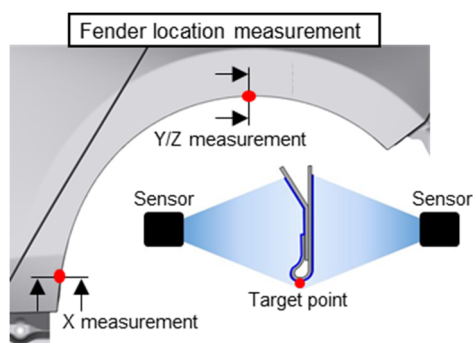


Fig. 10 Fender Measurement for Location Correction

次に、Fig. 11 に示すガンツールにより、合わせ目とノズルの相対位置をねらいの位置関係に保ちながら塗布する。

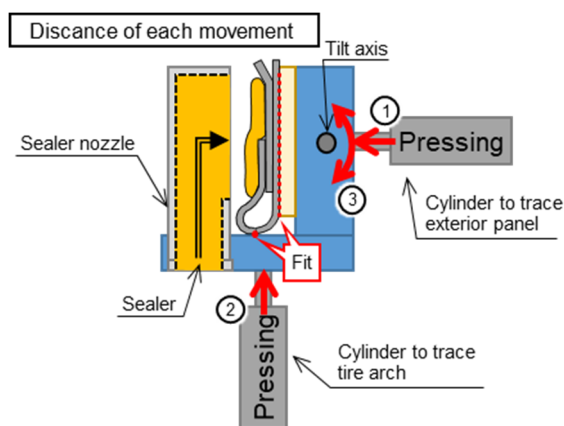


Fig. 11 Gun Tool

具体的には以下の3つの機構により、ホイールアーチを3次元トレースする。

- ①外板パネルにガイドを押し当てるシリンダー
- ②へミング端にガイドを押し当てるシリンダー
- ③外板パネルに傾きをフィットさせる回転機構

上述のように、人による塗布では合わせ目にノズルを接触させているが、3.2 で述べたクリアランス確保の目的で全体の厚みを管理するため、このツールでは、外板基準でへミング構造に完全にフィットさせて、ノズルの相対位置を保証するようにした。

具体的には、まず①のガイドを押し当てるが、その接触時に③がフリーで回転して外板とノズルが平行になるようにし (Fig. 12) , その後②のシリンダーにより全体がへミング端に当たるまで動くことにより、合わせ目とノズルの相対位置を一定に保つことができる。

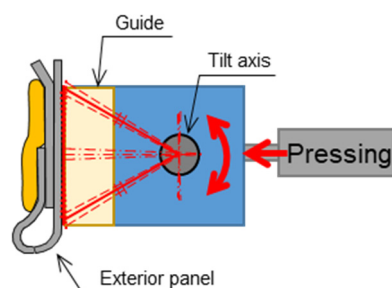


Fig. 12 Mechanism to Fit Exterior Panel

フィットさせるときの力加減は、人間作業の技能を参考に、エアシリンダーの圧力で制御している。

以上により、防錆を保証するためのシーラー塗膜位置の保証を実現した。

4.2 シーラー厚み保証

(1) ねらいの寸法リレーション

へミング構造の採用による効果を最大にするために、シーラー厚みの上限をへミング厚み（5mm以内）より厚くならないようにする必要がある。また、シーラー厚みが薄くなり過ぎても、シーラー切れの発生要因となるため、シーラー厚みを高精度に管理する必要がある。具体的には、シーラー厚みを $1.6\pm 0.3\text{mm}$ にコントロールする (Fig. 4)。

(2) ねらいの塗膜厚みを実現する塗布システム

そして、これまで経験にない高い精度であるねらいのシーラー厚み $1.6\pm 0.3\text{mm}$ にコントロールするためには、ノズルから出る塗料の吐出量とそれを塗るロボットの速度を高精度に制御する必要がある (Fig. 13)。

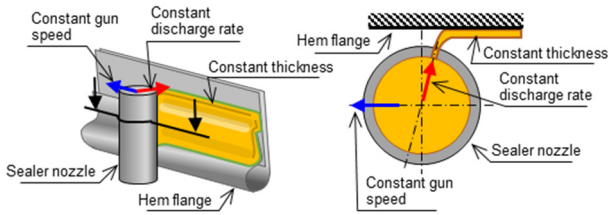


Fig. 13 Sealer Thickness Control

塗料の吐出量については、定量ポンプを用いて制御している。しかしながらシーラー材料は非常に粘度が高く（歯磨き粉と同等）、一般的にこのような塗料の供給システムにおいて、高精度な吐出精度を実現することが難しい。粘度の高い液体は、ドロドロの飲み物を飲む時に吸いにくいのも同じで、塗料供給する時にホース内を通るだけで抵抗が大きい。そして抵抗が大きいため高い圧力で圧送が必要で、ホースは風船のように微小だが膨らむ。そしてホースの湾曲により、ホース内の圧力が変動し、結果として吐出量の変動を引き起こす。逆に言えば安定した吐出を実現するためには、ノズル出口での圧力を安定させることが必要である。

具体的に実装した機能としては、吐出前の準備圧制御と吐出中の間の塗料温度調節機能である。

シーラー塗料は、温度が高くなると柔らかくなり、温度が低くなると固くなるという特性を持っている。塗料の温度の変動は、塗料の粘度の変動に大きく影響し、塗料温度が高いほどホース内では流れやすく、変動は小さくなる傾向にある。これを利用し、比較的高い温度域で高精度に塗料温度を制御することで、吐出量の変動を最小限に抑えるようにした。具体的には、塗料の出始めから終わりまでの塗料温度を一定にするため、1台のワークに塗布するために必要な塗料の全量を同じ温度に保つ必要があるが、そのために経路全体を温調するのではなく、ガン近傍の塗料温度を制御する温調システムを組み込むことで、それを実現した。

ロボットの塗布速度については、オフラインプログラミングの高精度化により、実機速度の安定化を行った。

オフラインプログラミングでの重要ポイントは、

- ・ 教示点を同じ間隔にする
- ・ 形状の接線方向とロボットのベクトルを合わせるという2つである。

従来のオフラインプログラミングでは、教示点を人が1ポイントずつノウハウに基づいて設定していたが、これではわずかな教示点間距離の差が生まれ、速度変動が発生する。また、教示点群が形状に完全に沿っていないと、速度の進行方向成分に狂いが生じ、結果的にノズルの進行方向速度が変動してしまう。

今回これを解決するために、ボディーの3DCAD図面から自動的に教示点を作成し、プログラムに変換することをおこなった (Fig. 14)。

これにより、塗布開始から終わりまでねらいの一定速度でロボットを動かすことを実現し、吐出量制御と併せて、塗着量一定の塗布を実現した。

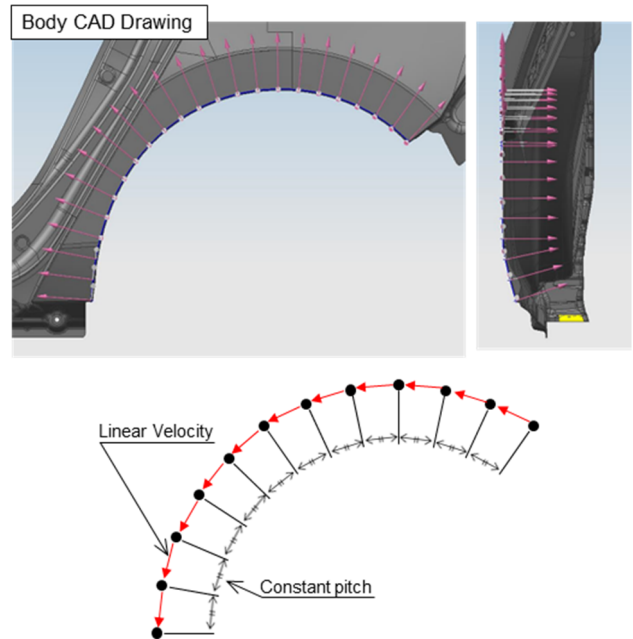


Fig. 14 Robot Teaching Point

4.3 目視困難部位の品質保証

4.1と4.2によりねらいの塗膜形状 (Fig. 15) を塗布するシステムを構築したが、この品質保証を行うため、塗布した部位の塗膜品質を全数検査するシステムを開発し導入した。

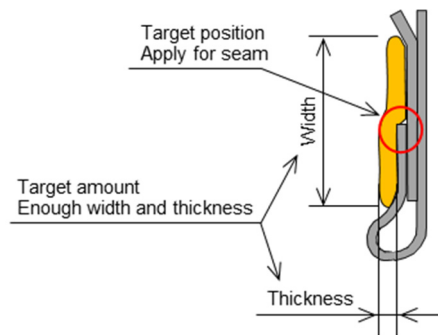


Fig.15 Target of Sealing

当部位は目視困難であるため、上述した位置補正システムのセンサーを利用して、塗布と同じロボットで品質検査を行う。

検査内容としては、

- ①シーラー塗布前のヘミング形状が適切であること
- ②塗布後のシーラー塗膜位置と厚みがねらいどおりであること

の2点を検査している。

まず①については、塗布前に、Fig. 16のようなヘミング形状の異常を判別検査している。

判定は、下記の a b c に示す。

- a：ヘミング長さが適正な長さで閾値内であること
- b：板厚とパネル板間隙の段差が閾値内であること
- c：ヘミング厚みが5mm以内であること

上記 a b c の寸法を検査している。

計測はFig. 16に示すようなヘミング形状を表す寸法を、塗布開始点から終了点までの全範囲にわたって 1mm 以内の間隔で検査する (Fig. 17)。

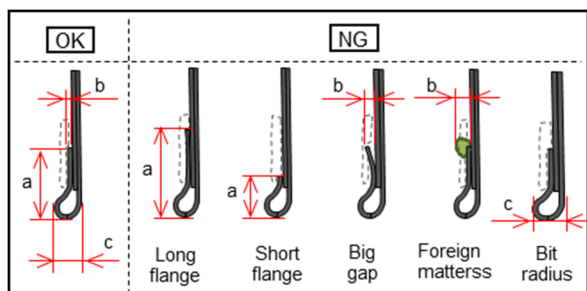


Fig. 16 Hemming Structure Criteria (Before Sealing)

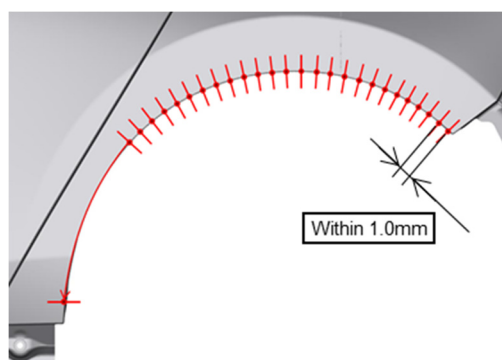


Fig. 17 Sensor Measurement Interval

このような詳細な検査を行うにあたっては、測定～データ処理～判定の繰り返しでは、処理時間がかかってしまい、生産効率が下がってしまう。今回はホイールアーチ全ての部位の寸法をセンサーで一とおり計測してデータを蓄積し、塗布前にまとめてデータ処理及び判定を行うことで計測時間を短縮し、なおかつ高分解能での検査を可能にし、最終的には0.5mm間隔で計測を行うようにした (Fig. 18)。

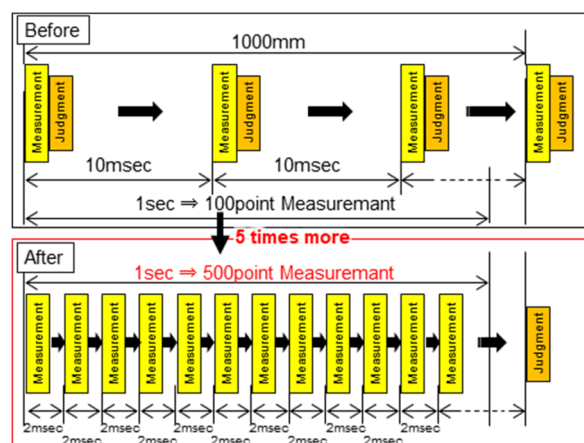


Fig. 18 New Sensor Measurement Interval

次に②については、塗布後に、塗布後のシーラーが防錆保証に必要な範囲にあり、シーラーの厚みがねらいどおりになっているかを計測し判別している。機能として、Fig. 19のThin/Cut/Derail/No seal/Thickを判定することができるようにした。

判定は、下記の a b に示す。

- a：外板面からの最小厚みが閾値内であること
 - b：外板面からの最大厚みが閾値内であること
- 上記 a b の寸法が閾値内か検査している。

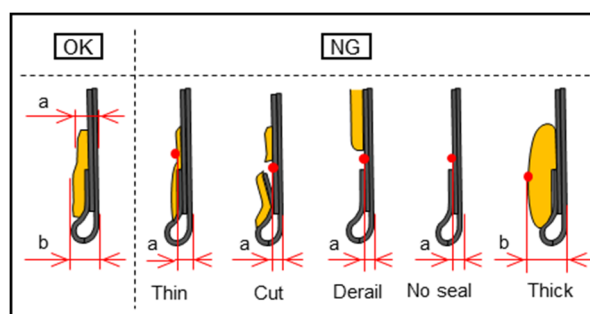


Fig. 19 Sealer Dimension Criteria(After Sealing)

具体的には、ヘミング断面を計測するために、前述のセンサーをFig. 10のように向かい合わせにすることで、外板からの厚み・幅を計測し検出判定を行っている。

この計測は、わずかな塗料温度の変動により塗着後の塗膜の断面形状が変動することも考慮に入れ、ロバストな検出を行うために、Fig. 20に示すように、計測範囲(青線枠)を指定し、シーラー厚みの最大値と最小値を検査している。

この最小値 a を測定し、Fig. 19のようにThin/Cut/Derail/No sealなどの防錆保証に関わる検出をしており、また、最大値 b を測定してシーラーの厚みを検出し、タイヤとの干渉がないことを保証している。

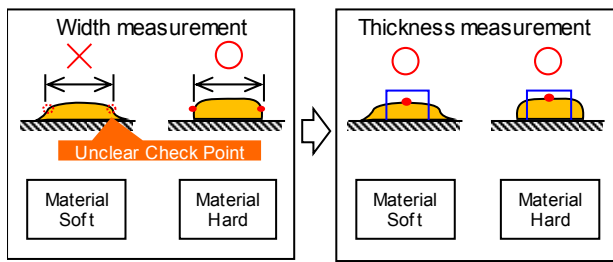


Fig. 20 Items to be Checked by Sealer-Shape Sensor

シーラー塗布後検査は、シーラー厚みの寸法を1台1台データとして残しており、品質状態がパソコンで確認できる。縦軸がシーラー厚み、横軸がポイント数でグラフ表示する (Fig. 21)。

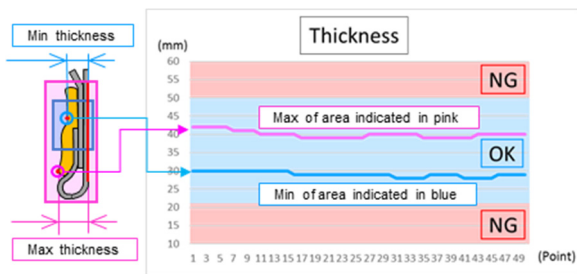


Fig. 21 Measurement Result of Sealer Thickness

本システムでは検査データを残すことで、不良を逃さないだけでなく、どの部位の厚みに変動しているのか確認し、品質の傾向監視と要因系との相関分析にも役立てられる。

不良例をFig. 22に示す。上図が作為的に異物を付着させた塗膜を検出した時の結果で、下図が作為的にシーラーの切れを設けた塗膜を検出した結果である。

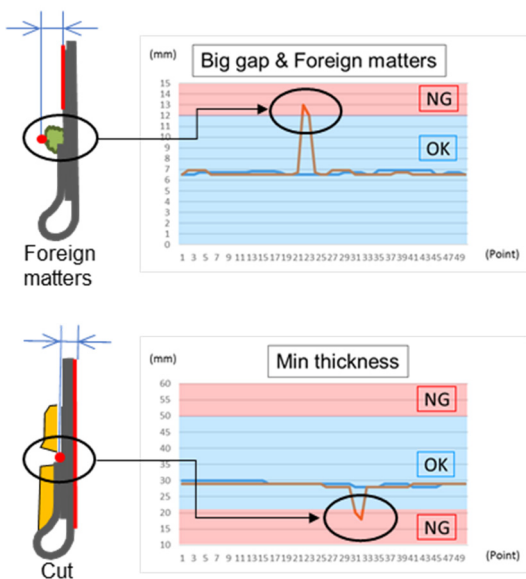


Fig. 22 Graph of Defects

今後は要因系データと結果系データをIoTで結びつけて、世界中の各生産拠点での品質向上を、より効率的に行っていくるようにシステムを進化させていく。

5. おわりに

今後も世界中のお客様に、マツダブランドとして同じ価値の商品を提供し続けていくため、工程を革新しながら、全世界の拠点で等価な品質を実現し、1台1台を大切に造るクルマづくりを進化させ続けていきます。

■ 著 者 ■



服部 博晃



石崎 剛



福田 靖英



辻 雅一

特集：新世代商品群の生産技術

31

1310MPa級高張力鋼板冷間プレス部品の開発 Development of 1310MPa Class High Tension Steel Sheet Cold Stamping Parts

酒井 明*1 Akira Sakai	松本 茂*2 Shigeru Matsumoto	矢野 峰治*3 Mineharu Yano	田丸 真司*4 Shinji Tamaru
新井 直樹*5 Naoki Arai	吉崎 真吾*6 Shingo Yoshizaki	庄司 庸平*7 Yohei Shoji	末長 昭大*8 Akihiro Suenaga

要約

ドライバーの手足のように意のままに動く「人馬一体」のドライブフィールと安全性を兼ね備えた車を実現するためにボディの軽量化と高強度化に日々取り組んでいる。ボディの軽量化にはCFRP、アルミ等の材料置換もあるが、我々はお客様が求めやすく、軽量化と高強度化を同時に達成できる高張力鋼板冷間プレスの技術開発にこだわった。鋼板の高張力化に伴う成形性・寸法精度及びせん断加工性の変化に対応するため、プレス工法・形状凍結技術の開発やせん断加工の適正化に取り組んだ。その成果として、世界で初めてボディ構造用に1310MPa級高張力鋼板（以下、1310MPa材）を採用した冷間プレス部品の量産化に成功した。また、ボディを組立てる際の溶接性への対応は、これまで溶接条件パターンを最適化することで適正電流範囲を確保したが、1310MPa材では更に、加圧力の適正化とそれに基づいた熱量コントロールを行うことで狙いの溶接強度を実現した。本稿では、これら人馬一体を実現するために取り組んだ自動車ボディの造り込み技術を紹介する。

Summary

In order to realize the vehicle which balances driving feeling with “Jinba Ittai” as if driving the car is part of driver’s hand and foot, we have challenged to realize weight saving and high strength of the body. There is material replacing method in CFRP and aluminum etc. to realize body weight saving. However, we have stuck to technology development of cold-stamping with high-strength steel to realize both lighter body and high strength at same time for customers to purchase the vehicles easily. We have worked on development of press method, shape fixability, and an adjustment of shearing workability to response to changes of material characteristics by formability, dimensional accuracy, and shearing workability according to realize high tensile of sheet metal. As a result of this, mass production of cold-pressed parts with 1310MPa class high-strength steel (hereinafter called 1310MPa sheet metal) for body structure was the first successful in the world. For weldability of body assembly, we used to secure optimal current range by optimizing the patterns of welding conditions before. In addition to this, the target welding strength was feasible by an adjustment of welding pressure and heat amount control base on this for 1310MPa sheet metal. This article introduces vehicle body manufacturing development to realize “Jinba Ittai”.

Key words : Materials, Production, High-Strength Steel Sheet, Forming Process, Die, Assembly, Stamping Technology, Welding, Weight Reduction

1. はじめに

地球環境に配慮したCO₂の削減、そして自動車の衝突安全性と操縦安定性への社会からの要求は年々高くなってい

る。その要求に答えるためには、自動車ボディの高強度化と軽量化の両立が必要である。材料面での解決策として、鋼板材料の更なる高張力化によるボディの高強度化とそれに伴う薄板化による軽量化がビジネス効率面でバランス

*1～8 車体技術部
Body Production Engineering Dept.

が良い手法である。既にマツダ技報にて1180MPa級高張力鋼板の採用の報告をし、これまでも高張力化を推進してきたが、新型MAZDA3では1310MPa材冷間プレス部品を世界で初めて採用した⁽¹⁾。高張力化に伴う材料特性の変化は、プレス成形及び溶接組立加工が困難になり、加工方案・加工条件及び要具での対応が必要となる。本稿では、1310MPa材を採用し、お客様に安心・安全なドライブを提供することを目指した自動車ボディーの造り込みを紹介する。

2. プレス成形上の課題と取り組み

2.1 高張力化に伴うプレス成形の課題

鋼板の高張力化が進むにつれ、プレス成形においては、Fig. 1に示すようなさまざまな課題が表面化してくる。その中で本章では、1310MPa材の適用において難易度の高い、プレスの成形性・寸法精度とせん断加工性の課題について紹介する。

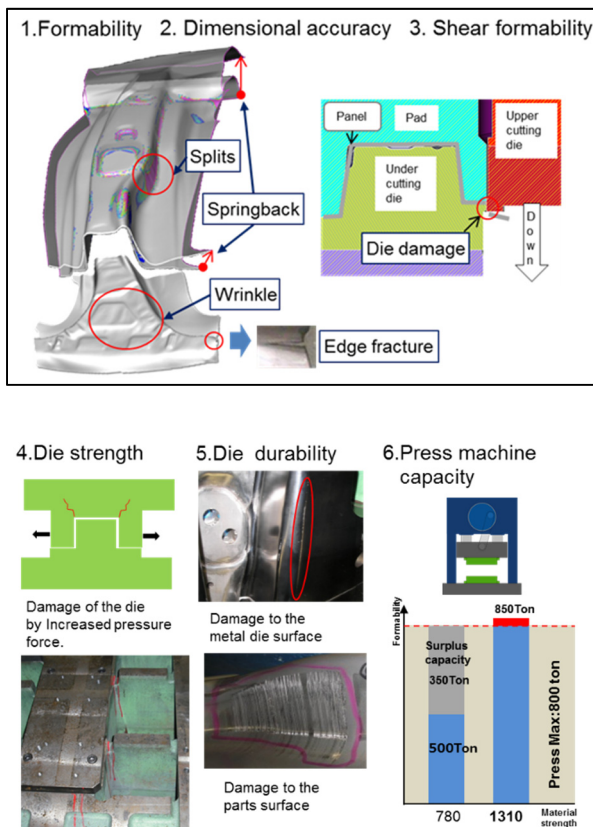


Fig. 1 Challenge in Press Forming UHSS

(1) 成形性の課題

プレスの成形性の課題は割れ、しわである。これらは高張力化に伴い鋼板が硬くなるほど延性が低下することで発生する。また同様に材料の縁から発生する縁割れも顕著になってくる。

(2) 寸法精度の課題

プレス成形は鋼板を塑性変形させることで目的の形状を得ることができる。しかしながら、高張力鋼板になるほど降伏応力と最大引張応力が上昇するためスプリングバック（弾性変形）量が増すことで、成形された鋼板を金型から取り出した際にスプリングバックにより大きく形が崩れてしまう課題がある。

(3) せん断加工性の課題

1310MPa材のせん断加工では、加工の過程で刃先の損傷が見られた。刃先の損傷が進展すると、プレス部品の品質阻害要因になるため、せん断加工性の課題はこの刃先の損傷問題を解決することである。

2.2 1310MPa材適用部の特徴

新型MAZDA3への1310MPa材の適用部品をFig. 2に示す。Fig. 3に示す特徴的な2部品を例に以降の話を進める。いずれも自動車骨格部品で前側面の衝突安全性を担う高強度な部品特性が求められる重要な部品である。ヒンジピラーレインフォースメント（以下、HピラーRF）の形状の特徴は深い断面ハット形状でボディー下部の片側はすり鉢形状をもつ成形難易度の高い部品である。一方、フロントピラーインナー（以下、FピラーIN）は、ハット形状部品に蓋をする部品となるため断面は比較的浅いため剛性は低く、平面視で見ると緩やかな弓型をしているため高張力化に伴い寸法精度が課題となる。

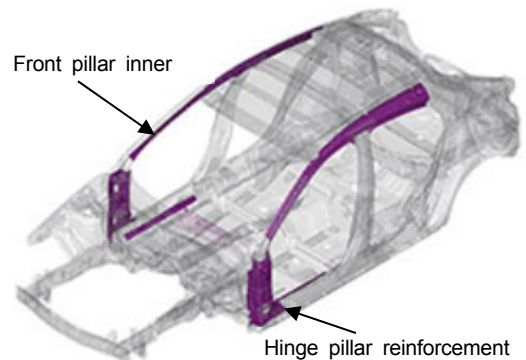


Fig. 2 1310MPa Grade Materials in All-New Mazda3

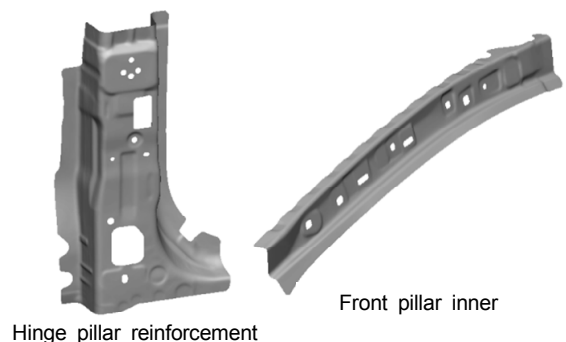


Fig. 3 In-House Manufactured 1310MPa Parts

2.3 成形性の課題解決の取り組み (HピラーRF)

先に述べたようにHピラーRFは難成形部品でありながら、旧アクセラの590MPa級から一気に1310MPa級へと高張力化が進んだ。これにより、従来工法の絞り工程→リスト工程では成形が成り立たないことを成形シミュレーションによる事前検証で確認した (Fig. 4)。

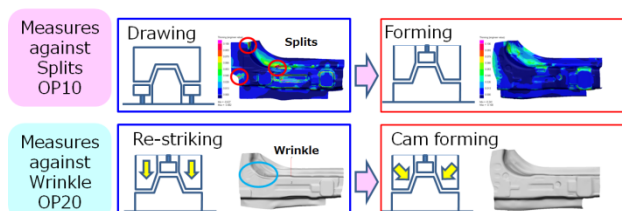


Fig. 4 Establish Forming Technology to Address 1310MPa Material

従来工法の初工程は絞り成形で大半の製品形状を成形し、次工程のリスト成形は残った細かな形状部分の成形を行う工程方案である。絞り成形は材料外周を強く拘束するためしわ抑制には有利であるが、それがゆえに延性の低い高張力鋼板では割れが発生する。そこで、1310MPa材においては初工程で材料外周を拘束しないフォーム成形とし、初期のしわ発生が多い平面視上部は先行的にパッドで押さえ込む工法を採用した。しかしながらそれだけでは、縦壁やフランジ部位にしわが発生するため初工程の予成形量や成形形状を適正化することで成立させた。一方、次工程のリスト成形では、初工程の予成形量が減ったことによる成形量増加と高張力化の影響で再びしわが発生した。これには、従来のプレス方向からの成形ではなく、しわを分散させやすい成形方向を導き出し、カム成形とすることで解決した。また、縁割れに関しては、材料端部に局所的にひずみが集中することで発生するため、材料端形状を扇状にすることで縁割れ懸念個所のひずみが均一になるよう工夫した。

これら一連の成形性向上策は工法のみならず、高精度な成形シミュレーションを活用し各工程が成立する成形パラメータを緻密に導き出すことで達成した。

2.4 寸法精度の課題解決の取り組み (FピラーIN)

FピラーINもHピラーRFと同様に旧アクセラに比べ、590MPa級→1310MPa級へ大幅な高張力化を進めた。更に板厚も1.8mm→1.4mmへと薄板化したことでボディの高強度化と軽量化の両立に成功した。この性能の両立はプレス部品からすると、特に剛性の低いFピラーINでは、薄板化でさらに剛性が低下し高張力化による成形後の内部応力増加の影響を受け、スプリングバック量の増加が顕著で寸法精度面の難易度が高くなる。また、寸法精度は図面寸法そのものが狙いであるが、スプリングバック量が大きくな

るにつれ、素材からプレス成形までの製造バラツキも無視できないものになる。そこで、スプリングバックそのものを抑制する形状凍結性を重視したプロセスに変革することを目指した (Fig. 5)。

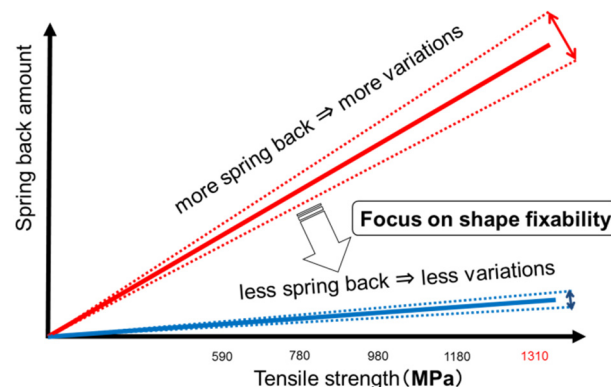


Fig. 5 Process Innovation for High Tensile Steel Sheet

スプリングバックを起こす要因は2つあり、一つは部品剛性、もう一つは成形時に発生する内部応力の不均一である。部品剛性は通常、車両性能面から決まるが、今回のFピラーINにおいては、車種開発の初期段階からボディ開発部門と共創することで性能と生産性を両立した部品形状を目指した。また内部応力の不均一についても、成形シミュレーションを活用し発生する応力不均一を見極めバランスさせるプレス方案や製品形状を開発した。その一例をFig. 6に示す。フロントウインドウの取付け部は弓型になっており、プレス成形時に材料が縮むことで圧縮応力が発生する。そのため弾性回復時に部品の両端が跳ね上がるキャンパーバックが起こる。そこで、あらかじめ縮み量を見越した座面を製品形状とすることでプレス成形後の圧縮応力を抑制できる。前述の共創活動の中で車両性能上も問題ないことを確認し採用した。

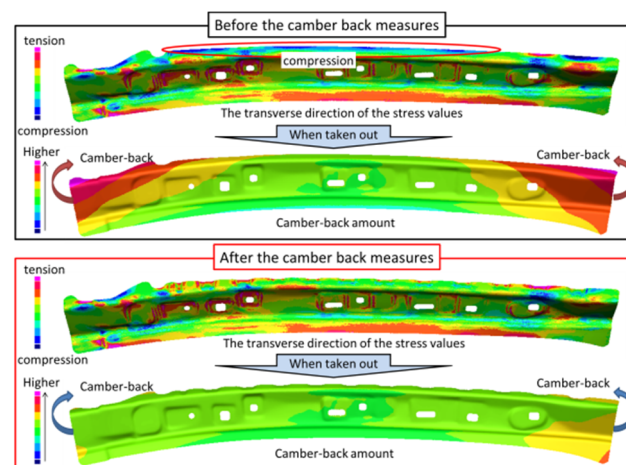


Fig. 6 Example of Spring-Back Suppression

2.5 せん断加工性の課題解決の取り組み

(1) せん断加工の過程

せん断加工はFig. 7の①～④の過程で加工される。まず、①下刃に置かれた鋼板が板押えで押えられた状態で上刃が下降し、だれが形成される。次に、②上刃下降に伴いせん断面が形成される。そして、③上下刃の刃先付近から亀裂が生じる。最後に、④この亀裂が進展することにより、破断面が形成され、加工が完了する。このせん断加工の過程で、上下刃間のクリアランスによってはカエリが発生する。このカエリの高さは、上下刃間のクリアランスが数十ミクロン変わるだけで増減する。増加するとプレス成形時の割れや接合時の部品間に隙間が発生するため、成形性・溶接性などに悪影響を及ぼす。

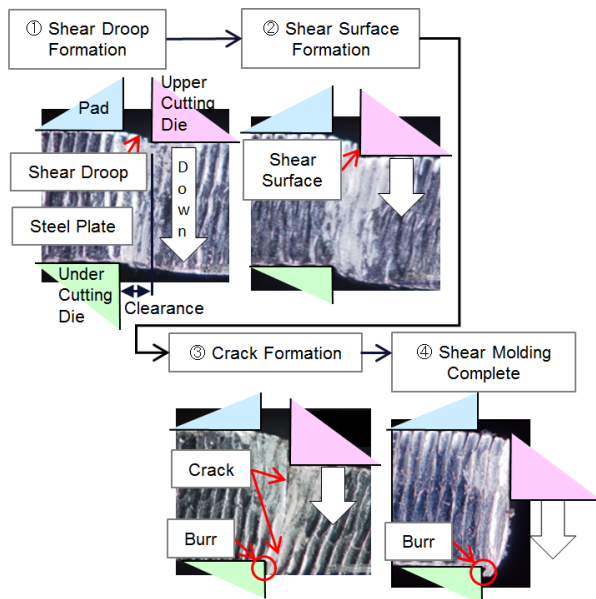


Fig. 7 Process of Shear Molding

(2) 1310MPa材のせん断加工実現のための課題

1310MPaの高張力鋼板では、せん断加工後に、Fig. 8のように、上刃刃先に塑性変形による損傷が見られた。

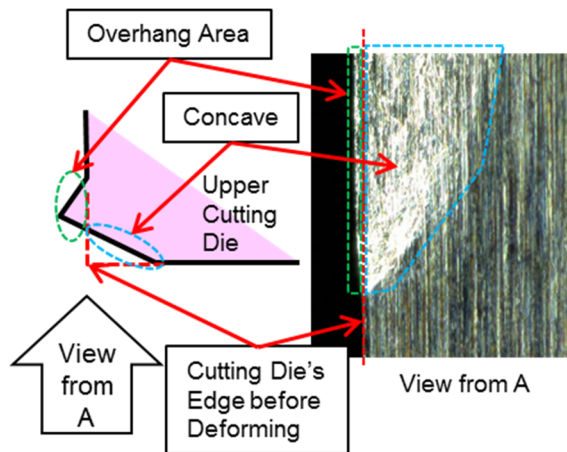


Fig. 8 Image and Photo of Upper Cutting Edge eformation

この塑性変形が進行し亀裂が生じると、せん断加工後に上刃が上昇する際、Fig. 9のように、①塑性変形により上刃が飛び出た部分に鋼板が引っ掛かり、②上刃の亀裂部から欠けが発生する。この欠けが発生すると、上下刃間のクリアランスが広がり、カエリ高さの増加となる。そのため、1310MPa材のせん断加工を実現する上での課題は、せん断加工時の上刃刃先の塑性変形問題を解決することである。

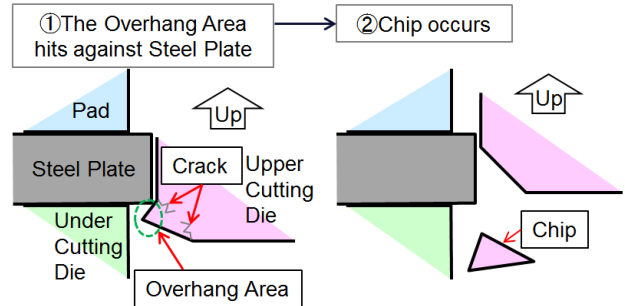


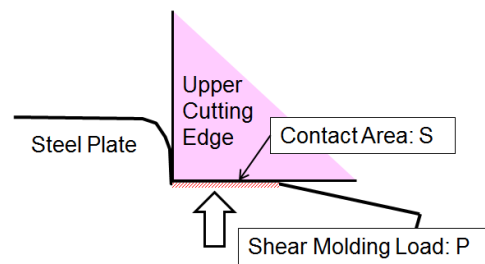
Fig. 9 Image of Chip Occurrence

(3) 上刃刃先の塑性変形問題解決への取り組み

1) 上刃刃先の塑性変形メカニズムの解明

はじめに、上刃刃先の塑性変形問題の解決に向け、高張力鋼板をせん断加工した際に刃先に発生する塑性変形のメカニズムの解明に取り組んだ。

上刃刃先の塑性変形は刃先にかかる応力が、降伏点を越えることで発生し、更に応力が高くなることで塑性変形量が大きくなる。この刃先にかかる応力は、Fig. 10のように上刃にかかるせん断荷重と上刃と鋼板の接触面積により決まるため、このせん断荷重と接触面積の2つの視点で上刃刃先の塑性変形の原因追究を行った。



$$\text{Stress on Upper Cutting Edge} = \frac{\text{Shear Molding Load: } P}{\text{Contact Area: } S}$$

Fig. 10 Stress on Upper Cutting Edge

まず、上刃刃先の塑性変形が起こる原因として、せん断荷重に着目した。せん断荷重P[N]は、せん断部の長さL[mm]、板厚t[mm]、引っ張り強さ σ_B [MPa]としたとき、式(1)によって求められる。

$$P = K \cdot L \cdot t \cdot \sigma_B \quad (1) \quad K: \text{係数}$$

1310MPa材は、鋼板の引っ張り強さ σ_B を高くすることで強度を上げつつ、板厚 t を薄くすることで軽くし、より軽量高強度なボディを実現している。そのため、式(1)により、理論上せん断荷重 P は減少する。このことは、実機検証結果からも確認できた。以上のことより、刃先の塑性変形量増加の原因は、せん断荷重ではないことが分かった。

次に、上刃刃先の塑性変形が起こる原因として、接触面積に着目した。接触面積の変化を確認するため、鋼板の引っ張り強さを変えて実機でせん断実験を行い、せん断後の上刃と鋼板の接触面積を計測した。その結果、引っ張り強さが上がるほど、接触面積が狭くなること確認できた (Fig. 11)。

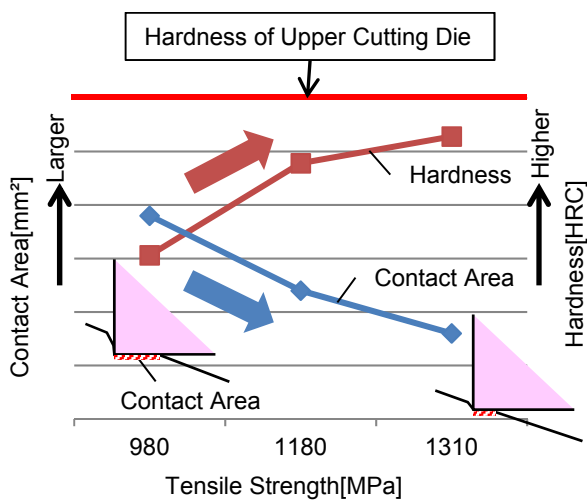


Fig. 11 Contact Area and Hardness per Tensile Strength

また、鋼板の硬度を計測した結果では、Fig. 11のように引っ張り強さが上がるほど、鋼板の硬度が切刃の硬度に近づいてきており、鋼板が変形しづらくなることで、上刃と鋼板の接触面積が狭くなることわかった。そのため、刃先にかかる応力が大きくなり、刃先の塑性変形が大きくなることがわかった。

2) 刃先の塑性変形対策の取り組み

上記の刃先の塑性変形のメカニズムを基に、刃先の塑性変形の対策に取り組んだ。鋼板にかかる応力が降伏点を超えないようにするためには、Fig. 12のように①上刃の降伏点を上げる対策と、②刃先にかかる応力値を下げる対策の2つの対策が考えられる。

対策①として降伏点の高い切刃の材質に変更すると、大幅に材料費がかかってしまう。そのため、対策②の刃先にかかる応力を低減するための接触面積を広げる対策として、Fig. 13のように、抜き角を抑えることが有効であると考え、抜き角に着目した。

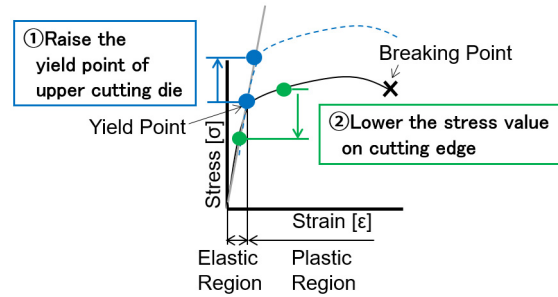


Fig. 12 Concept of Measures against Deformation

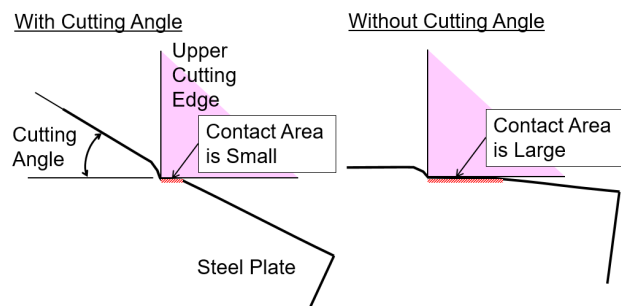


Fig. 13 Concept of Contact Area with and without Cutting Angle

そこで、抜き角を変更した際の接触面積と刃先の変形を実機により検証した結果、Fig. 14のように抜き角を抑えることで、接触面積を広げられ、刃先の変形も小さくできることが確認できた。この検証結果より、1310MPa材のせん断加工では、刃先が損傷しない抜き角を標準化し、それを達成するため新たに工程方案の見直しを行った。具体的には、せん断加工工程で問題ない抜き角に設定した展開形状にてせん断し、次工程でリスト成形を行い図面形状にすることで成立させた。

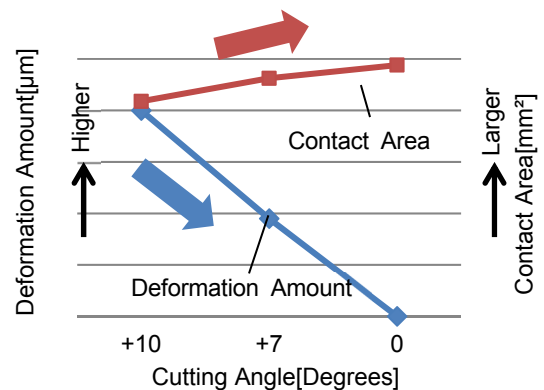


Fig. 14 Deformation Amount and Contact Area per Cutting Angles

以上のように、本章ではプレス成形性、寸法精度及びせん断加工性の課題に対しさまざまな取り組みを行い、衝突安全性と操縦安定性を両立したプレス部品の造りこみに成功した。これは高精度なシミュレーションを活用し、開発部門と生産技術部門の共創活動の中でボディー性能と生産性を追求することで実現した。

3. 抵抗スポット溶接の課題と取り組み

3.1 抵抗スポット溶接の原理

車体組み立て工程では主な接合法として抵抗スポット溶接を使用している。この接合法では、銅電極を用いてプレス成形部品を挟み、電流による抵抗発熱を利用して溶融部を形成する。一般的に高強度の材料ほど固有抵抗値が高いため発熱しやすくなり、材料硬度に起因する接触抵抗の影響を受けやすくなるため、材料特性に応じて適切に加工条件を設定する必要がある。Fig. 15は材料強度による加工条件の違いを図示したものである。材料単体の比較では、外板等に使う270MPa材と本稿の1310MPa材では加工条件のレンジが異なる。そのため、270MPa材と1310MPa材を組み合わせて溶接する場合、重なり合う加工条件のレンジが狭く、強度を保証しようとするスパッタが発生しやすいという問題がある。このスパッタは外板面にダメージを与えることから、魂動デザイン再現のためにはスパッタが出ないスポット溶接の実現が必須である。事前検証では高張力鋼板に対する有効な加工条件パターンを検討した。実験的に材料による条件レンジを吸収するため、電極で挟む力による通電面積の制御と、溶接電流の多段階制御による溶融状態の制御により、溶融部を安定して形成できる加工条件を実現した。

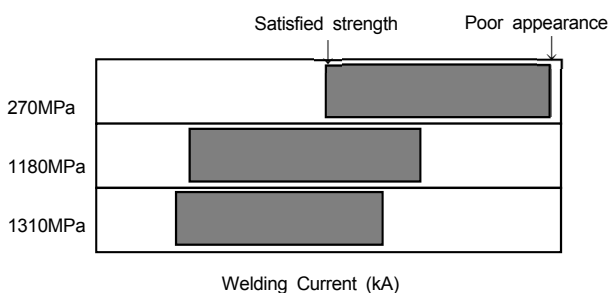


Fig.15 Effect of Tensile Strength of Base Steel on Suitable Welding Current Range

3.2 生産工程の課題と取り組み

実際の生産工程ではスポット溶接を高速(1点あたり1秒)で行う。一方で高張力鋼板向けに導出した加工条件は従来比で高い溶接電流と長い溶接時間となるため、高速で加工すると溶接機自体の放熱が間に合わず熱による故障が発生する。そのため、前述の加工条件を実現できる溶接機器仕様を決定し量産設備として導入している。具体的にはスポッ

ト溶接ガン内蔵の溶接トランスの定格容量UP、インバータ整流器のダイオードスタック容量UPにより、耐熱性を向上した。更に冷却水経路の見直しにより放熱効率も向上している。この設備を生産工程に導入し、高速で安定して接合を行える量産ラインを構築した。

3.3 生産管理の課題と取り組み

実際の部品に対する溶接では、特定の打点で部品形状及び加工位置の微小な差により溶接時のスパッタが発生してしまう場合がある。3D計測機の活用により部品に対する加工位置の適正化を実施しているが、最終的にスパッタ撲滅を達成するには1点1点に対する加工条件の緻密な調整が不可欠である。クルマ一台当たりの溶接打点数は数千点にも及ぶため、ヒトによる管理には限界がある。そこで溶接ガン先端部の状況を定量データで可視化するシステムを導入し、設備のネットワーク経由で生産中のデータを自動収集/判定する仕組みを導入した。これらのシステムを活用することで、量産移行前に加工パラメータが適正であることをデータで確認し、1点1点の溶接加工の最適化を短い量産準備期間の中で達成した。

また、溶接検査工程において、従来行ってきたタガネを挿し込む検査方法ではクルマに微小な傷が残る可能性があるため、傷のつかない磁気タイプの非破壊検査装置を導入した。これらの検査データもネットワーク経由で収集し、異常を検出する精度/感度を高めている。

以上の取り組みにより、これらの打点の1点1点の加工を鋼板の組み合わせに応じて最適化することで、お客様にお渡しするクルマの安全性を保証している。

4. ボディーの精度保証

ボディー精度は複数のプレス部品を接合し、多数の車体組立工程を経て精度を保証する。ボディー精度を保証するために、位置決め、拘束、接合、解放という実ラインのプロセスを机上検証し、車体でボディー精度をコントロールする条件を車体組立ての各工程へ織り込んだ。位置決めと、拘束と解放の事例を中心に紹介する。

4.1 位置決めの取り組み

2.4で紹介した通り、プレス部品の寸法精度は高張力化が進むにつれて、成形後の内部応力影響を受け、弾性変形の増加によって寸法精度保証の難易度が高くなる。ボディー精度はプレス部品同士を接合するときの隙間や部品同士の干渉の影響を受けやすく、接合面精度を保証するうえで大切な条件の一つである。そこで、弾性変形後のプレス精度の早期向上と精度の安定化、ボディー精度保証を早期にかつ経済的に行うため加工基準の使い方を1310MPa材で見直した。加工基準とは、図面で決められた空間上の位置に部品を固定し、接合による変形をコントロールしながら

狙いのボディ精度を確保するための穴と面のことである。これまでの考え方は、図寸で決められた位置の穴と面により絶対値を完全固定することで部品とボディ精度を保証するものであった (Fig. 16)。

1310MPa材を使うにあたり精度の作り込みに、実際に計測した部品精度をフィードバックすることで、部品精度を保証する考え方へ変えた (Fig. 17)。これにより、接合面精度の調整範囲と量が適正化され、ボディ精度を造りこむための条件を早期に実現することが可能となった。

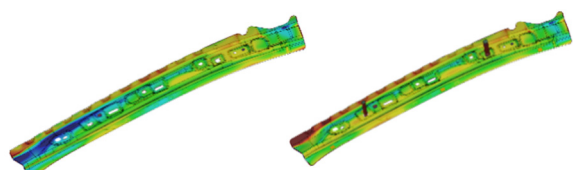


Fig. 16
Nominal Locating

Fig. 17
Feedback Locating

4.2 拘束の取り組み

部品を位置決めした後は、接合時に変形しないように拘束をする必要がある。今まで部品を拘束するために必要な力は、治具標準で決まった力で拘束していた。1310MPa材の導入するに先立ち、今までと同じ標準で問題ないかを再検討するため、2.4で実施した成形シミュレーション結果から加工基準にかかる反力を求めることで適正な拘束力を設定した。適正な力で拘束した部品同士を、接合によりその位置にとどめ、解放しても狙いの精度が保たれていることが条件となる。成形シミュレーションの結果から求めた拘束力をCAEで解析を行い、部品同士を接合し拘束力を解放したときにおこる精度変化が発生しないことをCAE上で検証することで仮説として完成させた。

4.3 精度保証

見直しを行った位置決めと、シミュレーション結果から得られた必要機能が確実に折り込まれていることを確認した後に、ボディ精度に対して狙いの精度が保証可能か、実機で検証を実施した。3次元測定器を用いて、工程の精度、部品の精度、位置決めから解放までのプロセスを計測していくことで狙いのボディ精度が確保できていることが確認できた。新しい構造に対して、CAEで事前予測を行い、現物で確からしさを確認するというプロセスを進めることで、図面検討段階中の構造変化に迅速に対応し、予測から考えられる対策をプロセスごとに反映していく活動により、狙いのボディ精度品質を早期に実現させた。

5. おわりに

お客様に意のままに動く「人馬一体」のドライブフィールと安全性を兼ね備えた車をお届けし、クルマのある生活を

楽しんでもらいたいという思いで、世界で初めての1310MPa高張力鋼板をボディに使用した。これまで積み上げてきたプレスとボディアセンブリの技術を、精度品質を含め一貫したプロセスとして組み込んだ。新型MAZDA3の人馬一体実現の裏側には、このようなつくり方の技術の詰め込みがあることをお分かりいただけたと思う。

この新手法で実現した乗り心地を新型MAZDA3で楽しんでいただきたい。

参考文献

- (1) 坂野ほか：1180MPa級高強度鋼板のボディへの適用について、[マツダ技報, No.32, pp.65-70 \(2015\)](#)

■ 著 者 ■



酒井 明



松本 茂



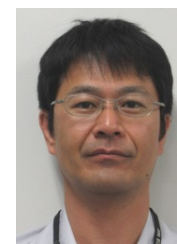
矢野 峰治



田丸 真司



新井 直樹



吉崎 真吾



庄司 庸平



末長 昭大

特集：新世代商品群の生産技術

32

「魂動デザイン」を実現する高精度ドア自動組付技術の開発 Development of Door Automatic Assembly Technology with High Accuracy to Realize “Kodo Design”

中野 直樹*1 中林 裕介*2 庄司 光宏*3
Naoki Nakano Yusuke Nakabayashi Mitsuhiro Shoji

要 約

マツダは生命感あふれる躍動的な造形美「魂動デザイン」を追求している。その美しいデザインの意匠をお客様にお届けするためには、各部品精度及びドアやボンネットフードなどの蓋物部品組付・折合精度の更なる向上と長期的な安定が必要となる。車体組立領域における蓋物組付工程は、ロボットによる自動組付作業と作業員による折合調整作業で構成する。技能による造り込み“希少性・感動”と生産性の高さ“高速・高精度”を両立させる自動化技術“Mass Craftsmanship（職人技の量産化）”の取り組みとして、ドア自動組付工程の飛躍的な折合精度向上に挑戦した。組付・折合精度の向上には、そのばらつき発生メカニズムの解明と構造的な課題に対する確実な対策が必要であった。本対策導入後には、作業員と同等の折合精度で自動組付作業を維持し続けている。本稿では、ばらつき発生の要因とその対策内容について紹介する。

Summary

Mazda is pursuing “Kodo design” which expresses the dynamic beauty with full of vitality. In order to deliver this beautiful design to customers, it is required to improve fitting accuracy of closure panel assembly such as a door or a bonnet and secure their long-time stability. In vehicle assembly area, the closure panel assembly processes are consisted of automatic assembly by the robot and fitting adjustment by the operator. As efforts for automatic technology, “Mass Craftsmanship” which balances the manufacturing (“Rarity/Deep emotion”) by skills and high productivity (“High speed/High accuracy”), we have challenged to improve fitting accuracy of the door in the automatic assembly process drastically. For improvements of the assembly/fitting accuracy, we needed to clarify the mechanisms of occurrence of variations and took countermeasures to address structural issues. After introduction of the countermeasures, the automatic assembly operation has been kept same fitting accuracy as provided by the operator. This article introduces the factors that caused occurrence of variations and their countermeasures.

Key words : Production・Manufacture, Quality Control, Computer-aided Quality, Door, Assembly Technology

1. はじめに

マツダの追求する生命感あふれる躍動的な造形美を表現した「魂動デザイン」を量産車で再現するために、生産技術では広くボディー精度向上に取り組んできた。

なかでも車体領域ではそれを実現するために、複数のパーツに分割された隣り合う外板部品があたかも一枚面であるかのような連続性を持たせることを重要視してい

る。パーツ間の段差をなくし外装面をつなげて魅せる一方で、パーツ間の分割線となるパーティングラインの隙を均一にし、一体感を阻害させないようにすることも必要となる（Fig. 1）。

そのため生産ラインでは、隙・段差の精度を意図したとおりに制御する高い工程能力が必要とされる。板金部品の“プレス成型精度向上”と板金部品を溶接組立てする“ボディーシェル組立精度向上”に加えて、ドアや

*1 車体技術部
Body Production Engineering Dept.

*2～3 第4車両製造部
Vehicle Production Dept.No.4

フードをボディシェルへボルト締結する“蓋物部品組付・折合精度向上”が欠かすことができない。

プレス成型精度，ボディシェル組立精度向上については，その成果をこれまでも多くの既出の論文で語られており，それらを進めることを前提に，本稿では蓋物部品組付・折合精度の向上について述べる。



Fig. 1 Continuous Surface of Parting Line

2. 蓋物部品組付工程の現状

車体組立領域の最終工程である蓋物組付工程は，ロボットによる自動組付作業と作業者による折合調整作業で構成する。

ボディシェル及び蓋物部品の寸法精度は，たくさんの溶接接合工程を経て組み立てるため，定めた公差範囲内でのわずかな寸法ばらつきをもつ。自動組付工程では，そうした寸法ばらつきを自動で計測し補正して組み付ける仕組みに取り組んできた。

しかしながら，従来の自動工程ではパーティングラインの不均一な隙や段差を完全になくすことはできておらず，次の折合調整工程の熟練作業者の行うチェックと折合調整を介して隙・段差の寸法精度を保証している。

更に，マツダでは技能による造り込み“希少性・感動”と生産性の高さ“高速・高精度”を両立させる自動化技術“Mass Craftsmanship (職人技の量産化)”を目指している (Fig. 2)。

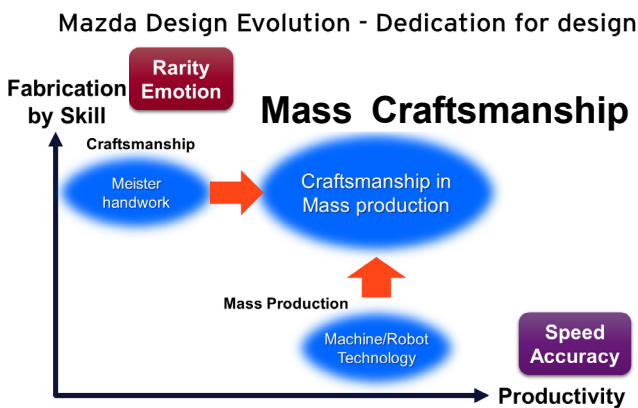


Fig. 2 Mass Craftsmanship

今回その取り組みとして，隙や段差のばらつきを最小限に抑え，ロボットによる自動組付作業までの工程で品質を完結させる「折合調整の自動化」に挑戦した。

3. パーティングラインのばらつき要因の特定

ドアパーティングラインの隙や段差のばらつきを最小限に抑えるために，まず，その全ての要因を洗い出した。それらは影響する精度の種類によって大きく下記の3つに分類できた (Fig. 3)。

- ①【部品精度】 部品精度のばらつき
- ②【設備精度】 設備の部品位置決め精度のばらつき
- ③【加工時変化】 ボルト締付時の挙動によるばらつき

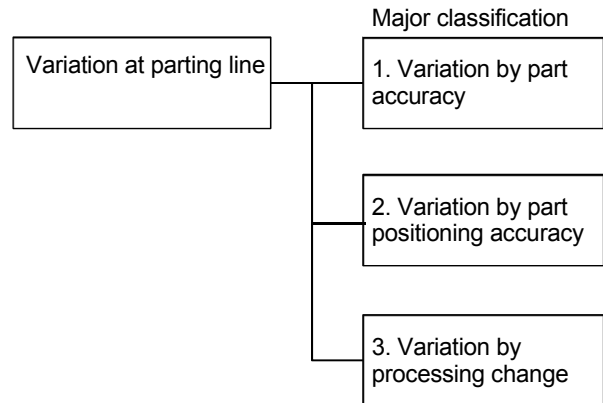


Fig. 3 Factors of Variation at Parting Line

そして，ひとつひとつのばらつき量を調査した。すると，部品精度のばらつきや設備の位置決め精度のばらつきに比べて，加工時変化のばらつきが大きいことが分かった。公差内のわずかな誤差しかないパーツどうしを組み合わせ，精度管理された設備を用いて図寸ねらいで組付作業を行っても，加工結果としての隙や段差の誤差が元の部品や設備のもつ誤差の和の倍以上の誤差になるケースが確認できた。

ドアはヒンジの締結のみで保持されるため片持ちりの状態となる。そのため，ドアのヒンジ支点近辺の根元側で発生したわずかなばらつきは，ドアの支点から離れたドアノブ近辺の先端側では桁ひとつ上の大きなばらつきに増幅されて，ドア位置精度を著しく悪化させる。

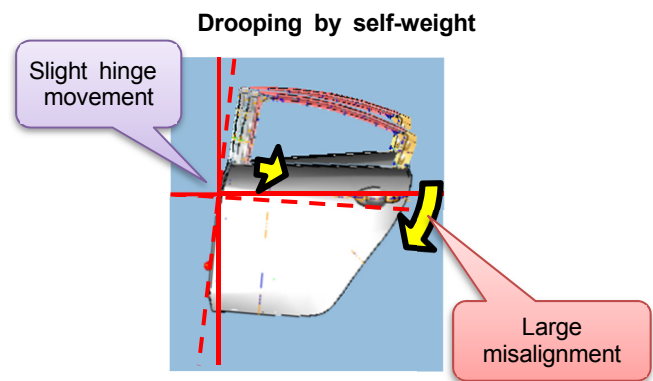


Fig. 4 Relation between Hinge Movement and Door Misalignment

ひとつの例でいえば、ドア本体外板面を把持してヒンジのボルトを締結することによってドアをボディに固定し、外板面の把持を解除したとき、ドアはヒンジによって片持ち状態になる。そのため、ドアは自らの重量負荷によって下がり方向の変位が発生する。その変位量はヒンジからの距離に比例してヒンジから遠い箇所ほど大きくなる。ヒンジの回転軸芯と穴のはめあいは厳しい公差で管理されているが、微小なばらつきはある。その微小なはめあいの差はドア自重による下がり変位に影響するためドアのヒンジから離れた先端側では距離に比例して大きなばらつきとなる (Fig. 4)。

しかも実際の締付加工時のヒンジ面では更に複雑な変化が発生する。ボディにドアを組み付ける前はボディ側ピラーの上下のヒンジ取り付け面とドア側の上下のヒンジの面とが完全に一致するというのではなく、必ずどこかが接し、どこかにわずかにマイクロオーダーの隙ができるという状態となる。

これをボルトで締め付けると、ボディとヒンジは完全な面当たりとなって密着するが、そのときヒンジにはわずかにひねりが発生し、片持ちであるドアのヒンジ付近の根元側で発生したそのわずかなひねりは、ドアの先端側では桁ひとつ上の大きなばらつきに増幅される (Fig. 5)。

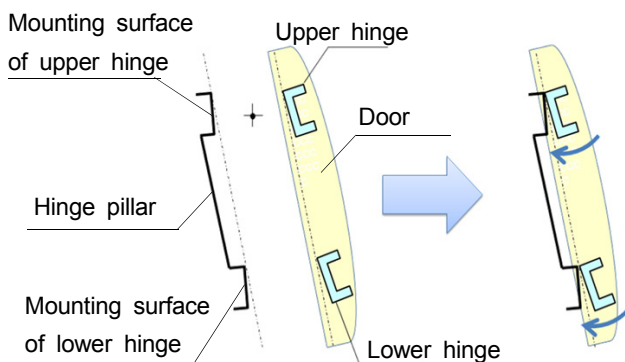


Fig. 5 Mechanism of Variations at Hinge Tightening

そのばらつき方向もそれぞれの部品の微妙なばらつき具合の組み合わせで決まるため不規則な変化となるのである。

つまり、ドアの位置決め精度を左右する要因として最も大きな要因がヒンジ面の密着性であり、ドア先端側に増幅して伝搬されるヒンジ面法線方向の精度は桁ひとつ下の高い精度管理が要求される。しかし、現状の精度保証体系の管理水準を変更することは現実的には困難である。それがドア組付精度が自動組付だけで保証できない最大の要因であった。

ただし、そのばらつきは他の要因のばらつきと比較して最も大きかったが、全体のばらつきを占めてい

る訳でもなかった。それとは因果関係の少ない多数の要因が存在し、それらもそれぞれが相応のばらつきをもっており、ヒンジ密着性を改善するだけでは目標を達成し得ないことも分かった。

4. 対策方針と対策システムの考え方

4.1 対策方針の決定

「折合調整の自動化」を実現する大きな対策方針として次の2つの方針を考えた。

- 1) 全ての部品精度レベルを引き上げるとともに、従来の図寸ねらいのドア組み付け技術を極めることで精度が保証できるようにすること。
- 2) 計測補正の技術を駆使して、ロボットによる自動組付工程で図寸ねらいを越え部品の公差内のわずかなばらつきをもキャンセルすることのできる高度な折り合い調整機能を有するドア自動組付技術を開発すること。

従来から1)の方針に沿った地道で着実な取り組みを継続してきたが、今回は新たな着眼点として2)の方針を取り入れた。

ばらつき発生メカニズムを特定していくなかで分かったことは、その発生要因のすそ野の広さと扱う精度が従来の数字と桁が変わって高い精度になることである。ばらつき発生要因を掘り下げれば掘り下げるほど、すそ野は広がり、増幅される前の微小なばらつきに着目することになり、扱う数字の桁が下がり、より高い精度保証が必要になる。

しかも、その要因は、部品精度、部品材質など部品に起因するものから、照度、温度、湿度など工場内の環境に起因するものなど多岐にわたり、それぞれの要因どうしに因果関係はなかった。1)の方針に沿って目標を達成するためにはあらゆる要因に対して対策を打つ必要があった。しかし、期間やコストに制約があるなかで、個々の工程の全てのばらつき要因を洗い出して潰し込んでいくことには限界があり、また現状から扱う数字の桁を下げて精度管理レベルを上げていくことは難しく、1)の方針だけで今回掲げた高い目標を達成することは現実的に困難であった。これまでの活動で極小化してきた部品の公差内のばらつきや工場内の環境を今回は前提としてとらえ、それら全てに起因する加工結果への影響を計測補正してキャンセルする新システムを造り込むという新たな2)の方針への取り組みが「折合調整の自動化」実現のためには必要であると考えた。今回マツダは変革を目指しめざし、そこに重点を置いて取り組んだ。

4.2 対策システムの考え方

今回2)の方針に重点を置いて新システムを構想するにあたり、管理が容易でかつ限定された既知の制御因子をもつシステムへの置き換えを考えた。汎用のセンサー・

ロボットによって対象物のばらつきを計測し補正を行う「計測補正システム」はその置き換えが可能であると考えた。

しかし、従来から取り組んでいた蓋物組付けの「計測補正システム」ではその置き換えはできていなかった。3章で述べたとおり、ドア組付けにおいては①部品のばらつきや②設備のばらつきよりも③加工時変化のばらつきが大きい。しかし、従来の「計測補正システム」が計測しキャンセルしていたのは部品と設備のばらつきのみであったためである。加工による変位までも含めて計測し補正しなければ、加工に伴う多くの誤差因子を排除することができず、目標とする安定したシステムへの置き換えとはならない。そこで、一度加工してその変位を計測し補正し再度加工しなおすのである。そうすればどのような外乱要因があろうとも、一度発生したばらつきは全てキャンセルできるため、元の工程のもつさまざまなばらつき因子について扱う数字の桁を下げてまで極端に高い精度で管理する必要がなくなるからである。この「加工変位計測補正システム」を造り上げ、導入することにより、ドア組付けシステムは安定したものとなり飛躍的な精度向上が期待できるものとなる。

しかし、その代わりに「加工変位計測補正システム」特有の因子については新たに管理が必要になる。

- (1)「補正ロジック精度」・(2)「繰り返し再現精度」・(3)「補正動作追従精度」・(4)「計測精度」の4種の品質を維持するための因子である。

しかし、これらのうち(3)「補正動作追従精度」と(4)「計測精度」の2種の制御因子の発生源は「ロボット」「センサー」など限定的であり、適用先としては汎用性があるものである。それらの分析はいちど行えば水平展開が可能な内容のものが多い。これらは対策を標準化・手順化してしまうことが容易である。

対象部品特有の事象について考えなければならないのは(1)「補正ロジック精度」・(2)「繰り返し再現精度」の2種の制御因子に絞られる。

(1)「補正ロジック精度」は蓋物全体の誤差を最小限にする一貫した考え方で「補正ロジック」を組むことで保証する。

(2)「繰り返し再現精度」は3章の「ばらつき要因分析」で得られた知見から「繰り返し精度」に特化した精度保証対策を打ち保証する。

対象部品に応じて上記2点を部分修正していくことができれば、このシステムには汎用性があるため広く一般的に適用し多数の工程の問題を一気に解決できる可能性がある。ただし、このシステムの適用対象はボルト締付など可逆的な加工方法に限定される。

5. 「加工変位計測補正システム」の立案

「加工変位計測補正システム」を導入するという方針をとった場合、課題は上述の4種の精度をいかに上げるかということに絞られた。これら個別の課題の具体的な解決策について以下に詳細説明をするが、その前にまず本システムの概要について説明する。下記に動作フローを示す (Fig. 6)。

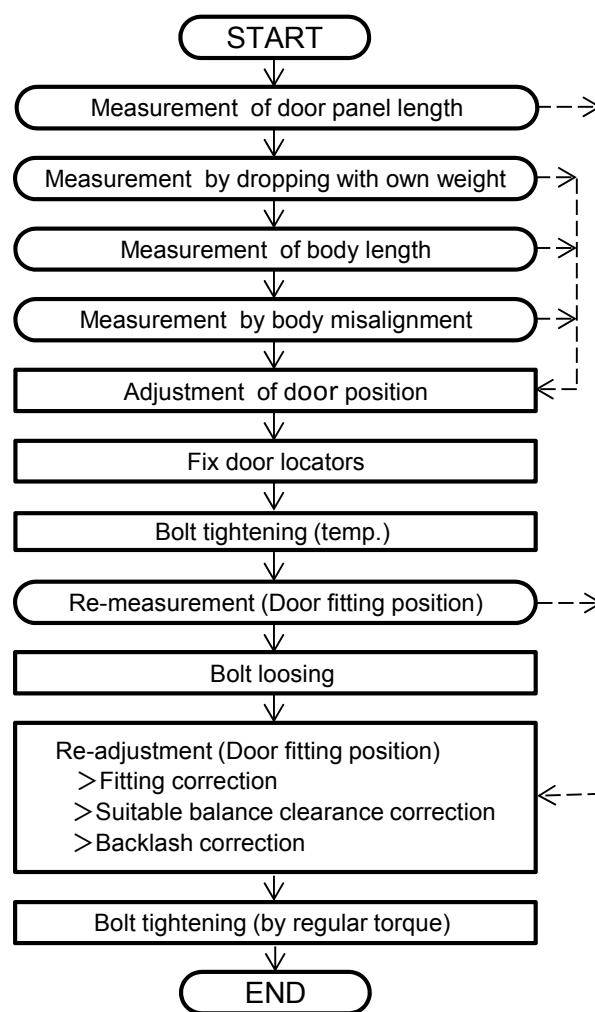


Fig. 6 Operation Flow of Door Fitting System

本システムの特徴は以下の点である。

- ・加工前のドア単体、ボディー単体、そして加工後のドア・ボディーの位置関係を計測する。
- ・ドアの主な把持にドアヒンジランプを有するツールを使用しロボットでその搬送・補正を行う。このツールを以下マテハンと呼ぶ。
- ・ボルトを緩めてから補正して再度締め付ける
- ・2段階の締付に対応する2段階補正を行う。

5.1 補正ロジック精度

補正ロジックを決定するにあたり数理的に考えれば、

3箇所のポイントの座標を計測すれば、3次元的な位置は確定しねらいの位置への補正量も確定する。しかし、実際の部品の実長はばらつきをもつためそれだけでは位置が確定せず自由度をもつ。個別最適の考え方で測定ポイントを増やせば、システムの一貫性がなくなり複雑化し車全体としての精度を阻害する恐れがある。品質保証体系と部品特性を知り、組付け工程で補正すべき特性と前工程で保証すべき特性を切り分け、測定ポイントや補正先を取捨選択し、誤差を最小にするための一貫した考え方に基づいてロジックを決定する必要がある。

5.1.1 基本的品質保証体系

マツダでは単体部品からアッセンブリーまで一貫した加工基準を使用して品質を保証している。部品単品の各機能部位の位置精度は加工基準からの位置で保証し、その加工基準を部品組み上げ時にも通して使用することで全体を保証する。加工基準を介した間接保証体系である。本システムでは補正のために美観機能部位そのものである外殻を計測するが、直接保証体系を取るわけではない。測定ポイントは加工基準からの位置関係を重点管理されたポイントを選定しており加工基準に準ずるものとして扱う。その基準ポイントからボディー全体の位置関係を把握することで、個別のパネルではなく蓋物全体のあるべきベストな配置を割り出してそこへ向けた補正を行うのである。それにより、計測ポイントでは加工基準からの部品誤差がキャンセルされた補正となり精度は上がる。だが計測されていない部位については、部品単品において計測部位からの位置関係が保証されていることで保証される。加工基準が基準穴から外殻へ変換されただけであり、間接保証の考え方を変えるものではない。

本システムは「位置補正」と「回転補正」を組み合わせることで補正を行っている。また、従来の図寸ねらいの補正に加えて組み付ける部品精度に応じた補正機能である「実長補正」を織り込むが、実長補正は位置補正のみで行い、角度補正は行わない。部品単品のひずみは補正することはできないので、この特性は前工程で保証されていることが前提となる。また、ボディーの測定ポイントはフロントドア・リヤドアのどちらを組み付けるときも一貫した測定ポイントを使用する。

5.1.2 補正方法と計測ポイントの取り方

位置補正に比べて回転補正は、手順を誤ると誤差を増幅してしまう恐れがあり、下記の点に注意して設定する必要がある。

- ・計測時の計測ポイントの設定と選択
- ・補正時の回転中心点の設定

基準計測ポイントは全体的な誤差を極小にするため、補正対象物のできるだけ対極の端に近い位置付近で距離を長めに取るのが原則である。

回転補正の中心点の設定によっては誤差も拡大してし

まう危険性があるため、回転中心は最も保証したい重点管理ポイント付近に設定する。

なお、回転中心には以下の3種類のものがあるので混同に留意する必要がある。

- ①最も保証したい重点管理ポイント
- ②ロボットの物理的な回転中心
- ③アウトプットとして補正出力するロボットのツール座標系の中心

理想はこの3点が共通であることであるが、実際の生産ラインでは物理的制約やメンテナンス上の問題から、この3点が一致させられないケースの方が多い。

①は主たる補正ロジック上の回転中心に設定される。

しかし、実際の回転動作は②を中心に行われるため5.3節に後述するバックラッシュが発生するとき、その補正は②を中心計算する。①②を基準に算出した補正値は実際の指示値として扱いやすいに③に換算する。

5.2 繰り返し加工再現精度

いかにして「繰り返し加工再現精度」上げるかが本システムの最も重要な課題である。

「加工変位計測補正システム」を導入することにより多数の管理困難な因子まで管理する必要はなくなるが、相対精度の保証が必要になる。

ただし、従来システムのように部品ごとにその因子がばらつくことを制御するのではない。

本システムでは一度加工して計測し、加工を解除し補正を掛けたら、再加工する。2度の加工の間にその因子が変化しないように維持すればよい。しかし、この課題の解決には部品固有の知見が必要であった。本システムでは3章の「ばらつき発生要因」での分析を生かし、(1) 2段階補正の採用と(2) ドア把持機構の変更によりこの課題を解決した。

5.2.1 2段階補正

「ばらつき発生要因」で述べたとおり、ヒンジ密着性は最大のばらつき要因である。補正前後でヒンジ密着性が変化すれば繰り返し加工の再現性も保証できなくなる。そのため2度の加工の間に行う補正は、同一ヒンジ平面内での2次元補正でなければならない。

本システムでは、2次元補正を2度行うことで3次元の補正を行うこととした。最終精度は「繰り返し加工」で保証し、1度目の補正はその条件を整えるための予備補正の位置づけとなる。1度目の補正⇒1度目の締付⇒2度目の補正⇒2度目の締付の順に行う。1度目の補正はドア・ボディー単体の計測結果からドアをボディーにセットする位置を補正する。ヒンジ密着度を上げるため、ボディー側は上下のヒンジ取り付け面を測定し、ヒンジがそれに沿うようにボディー前後方向軸周りの回転補正を行う。2度目の補正は加工時変化を計測してセット位置をボディ

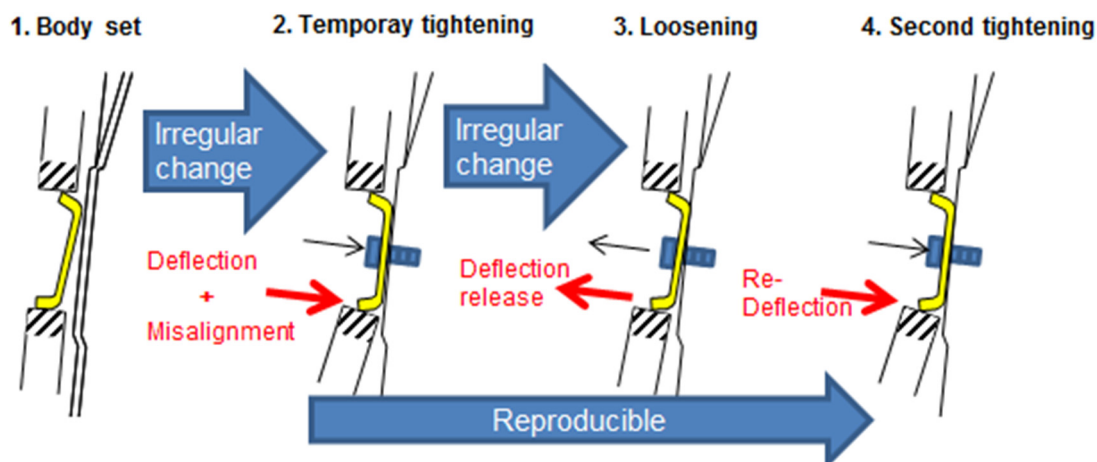


Fig. 7 Behavior of Hinge in Twice Tightening

一前後方向と上下方向に補正する。回転補正としてはボディ横方向軸周りの補正となる。

上下方向軸周りの回転補正は行なわない。これはドア自体がヒンジを起点にボディ上下方向軸周りで回転するためその調整が不要なためである。例え補正したとして、その回転補正量を決定するためのヒンジ取り付け面の傾きを求めるにはボディ前後方向の計測ピッチが必要なのだが、ヒンジ面のボディ前後方向の長さはドアに比べて短くそれを測定補正しても誤差の増幅を招いてしまう。そもそも締め付け前のヒンジ面とヒンジ取り付け面が完全に密着することはなく安定もしない。そこは別の対策が必要となる。

5.2.2 ドア把持方法の変更

本システムでは、ドアヒンジをクランプして、ボルトを緩めてから補正して再度締め付けるまでの間、ヒンジの位置関係が変わらないようにそれを上下からクランプして把持し続けることとした。「ばらつき発生要因」で述べたとおり、ヒンジ面法線方向の精度はドア先端側に増幅して伝搬されるため、本来は数字の桁がひとつ下の高い精度管理が要求され、そもそも精度保証のネックであった。そのヒンジ精度がドア把持方法を従来と変わらない管理精度のクランプに変更することで保証できるようになる理由を以下に説明する (Fig. 7)。

ボルト締め装置の軸力はクランプ力と比較すると桁違いの巨大な力である。初回加工時は、その巨大な軸力によって、ヒンジとボディのヒンジ取り付け面の間の隙がなくなり密着する。その時、板厚が厚く剛性のあるボディ側にドアごとドアヒンジが引き寄せられる。マテハンも当初クランプごとヒンジに引き寄せられ、たわみが発生する。しかし、ボルトが締まっていく過程で徐々にたわみの反発力が大きくなり、クランプとヒンジの間の摩擦力を越え、滑りを発生する。滑りにより、たわみの反発力が弱まり、再び摩擦力とバランスする位置で滑りが止まり、ふたたびたわむ。

このクランプが安定する位置は、クランプとヒンジのわずかな噛み合わせ状態の違いでも変わるため、誤差因子となっている。しかし、同一部品で一度加工したのち開放することなく圧をかけたままクランプし続けることにより、2回目以降加工時いったん安定したその位置関係は変化しない。また、ボディ側の剛性が高く何度加工してもヒンジがボディに沿うことによりヒンジ面法線方向の位置再現性も高い。そのことから、マテハンのたわみもその反発力も同じ状態で繰り返されるため2回目以降は滑りが発生せず、この再現性は高く維持することができるのである。

5.3 補正動作追従精度

ドアを搬送するのに必要な可搬重量を満足するロボットの位置再現精度のカタログ値は蓋物組付「折角調整の自動化」に必要な精度を満足してはいない。ただし、このカタログに謳われている精度の中には、「どの経路を通っても」「定格範囲内のどの負荷でも」という条件が含まれている。「一定の経路、一定の負荷」という限定的な条件下ではロボットの精度能力は更に高めることができる。補正に使用する動作範囲は限定された約1立方mm程度の狭い範囲であり、その中で発生する機械的ずれは法則化が容易である。

補正動作に使用する実用動作範囲内のロボットの動作指示値と実働値のずれ量を実測した (Fig. 8)。ロボットのギヤが正転から逆転に転じるときはどうしても機械的なバックラッシュが発生する。そのため、逆転方向の動きははじめでは無動作の区間が発生してしまう。そのずれは無視できない量であったが、再現性は高かった。

そこで、本システムではそのずれ量をキャリブレーションする方法を確立し、マツダが独自開発した上記の補正ロジックに織り込み、キャンセルさせた。それにより目標とする補正動作追従精度を満足することができた。

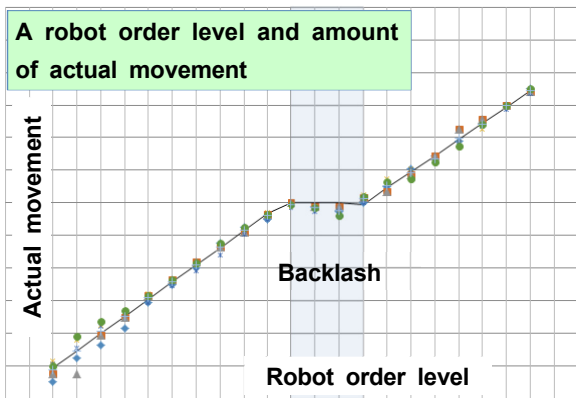


Fig. 8 Backlash Amount of Robot

5.4 計測精度

本システムでは、測定対象によりセンサーを使い分けている。画像センサーは基準穴の円形状などの特徴点を測定してXYの2方向の位置座標を一度に計測できる利点があり、レーザーセンサーは基準平面の奥行方向の座標を計測するのに適している。更に2次元レーザーセンサーを用いて断面形状を測定すれば、従来計測が困難であった複雑な形状の中から部品エッジ、最大や平均の高さ、R止まりなどを見つけ出して計測することが可能である。

必要精度をセンサーカタログ値が満足していても、その能力を最大限に引き出すためには、外乱・ちらつきを排除する最適設定ができるかにかかっている。

5.4.1 画像センサーの計測精度

近年の計測技術の発達はめざましく、画像センサーではさまざまな画像処理技術が織り込まれた製品が普及している。しかし、それでも画像処理工程では、認識不可や誤認の対策に腐心するケースが多い。

対象物の境界線を明確に撮影できていないこと、別の境界線が映り込んでしまうためである。光と影のコントラストにより対象物と背景の境界線が確実に撮影でき、

他の境界線が映り込まないようにするには、対象物の形状とそれに対する光源の位置関係が重要になる。

物理的制約によりその関係が崩れないよう事前検討段階で照明の位置を検討し、レイアウトに織り込んだ。

5.4.2 レーザーセンサーの計測精度

レーザーセンサーにおいては各種の設定をユーザーサイドで調整できる製品が普及しており、その設定調整により、外乱要因を打ち消すことが可能になっているが、逆にユーザー側にその内容を理解し、調整するスキルも求められるようになってきている。

これらの設定は対象物の角度と材質表面処理状況によって変わってくる車体蓋物組み付け工程で取り扱う代表的な部品について、有望な組み合わせ条件を選定し、各組み合わせでのトライを実施して最適条件を設定した。

これら5.3節と5.4節は、例えツールが異なっても特性は似通っており、特性把握は困難なものではなく、他の蓋物組み付け工程に対しても広く汎用的に適用できるものである。

6. 効果

本対策導入後には作業者と同等の折合精度で自動組付作業を長期間にわたり安定して維持し続けている (Fig. 9)。

現在このシステムの導入が完了しているのは一部の工程であるが、このシステムを蓋物自動組付の全工程に展開していくことで「折合調整の自動化」は実現できる見込みである。

7. ドア以外への活動の展開

現在はリアドア、フロントドアについてのベストな位置への補正組付を行っているが、今後は適用範囲を広げボンネット、フロントフェンダーも含めた蓋物全体のベスト位置調整を実現すべく活動を進めている。

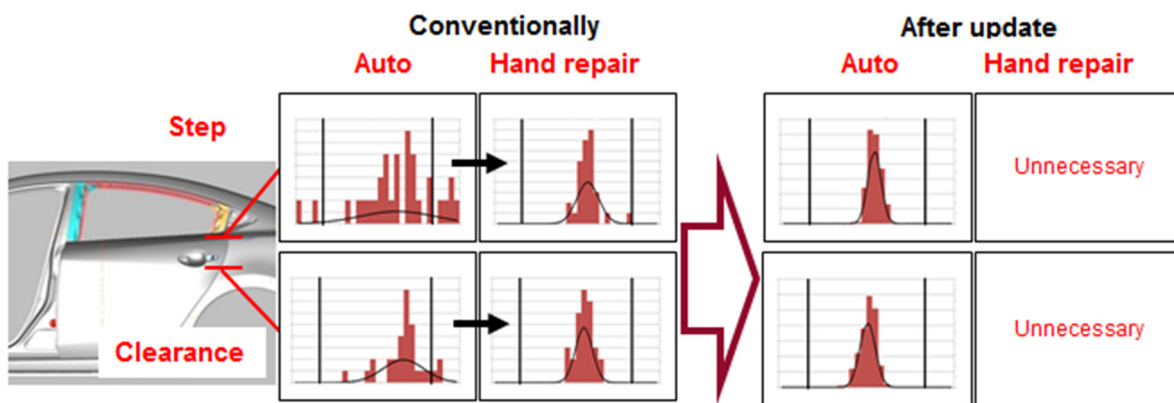


Fig. 9 Effect of New Door fitting System

8. おわりに

マツダが生産技術を向上させていくことで、マツダの意図する優れた品質のクルマをお客様の手元に届けることができ、お客様の笑顔を増やすことにつながる。そう信じてマツダは日々新技術への挑戦を続ける。

■ 著 者 ■



中野 直樹



中林 裕介



庄司 光宏

特集：新世代商品群の生産技術

33

アルミ切削加工のための低コスト高能率加工技術開発 Low Cost High Efficiency Machining Technology for Aluminum Cutting

榎本 智章*1 林 一哉*2 増田 雅彦*3
Tomoaki Enomoto Kazuya Hayashi Masahiko Masuda
森本 博幸*4 藤原 秀行*5
Hiroyuki Morimoto Hideyuki Fujiwara

要 約

次世代商品群のエンジン部品は高機能化により、その加工時間は常に増える傾向である。そのため、加工品質を保証しつつ、更に高能率で加工を行うためには、加工中の切削状態を把握し、切削力に合わせて切削条件を適切にコントロールする必要がある。

これを実現するため、①正味切削力を高精度に計測する「切削力センシング技術」、②この技術により得られた実切削力とCAEとの整合取りを行い、最大切削効率となる切削力の目標値をCAEで予測する「切削力決定方式」、③これらの技術をベースとし、刃具摩耗や被削材硬度の変化に対し、常に最大切削効率となるように切削条件をコントロールする「適応制御技術」を開発した。これらの取り組みについて紹介する。

Summary

Machining time for the engine parts tends to increase by realizing high functionality of the products in next generation. In order to implement machining with higher efficiency while assuring machining quality, it is necessary to confirm the cutting condition during machining and control cutting conditions properly according to cutting force.

In order to realize this, the following technologies are necessary. 1. "Cutting force sensing technology" to measure net cutting force with high accuracy, 2. "Cutting force determination method" by ensuring consistency between actual cutting force with #1 technology and CAE, and expect the target value of cutting force as the maximum cutting efficiency by CAE. 3. Based on these technologies, for the changes by wear of cutting tool and hardness of work material, we developed "Adaptive control technology" to control cutting conditions to realize the maximum cutting efficiency. This article introduces the efforts of these technologies.

Key words : Production・Manufacture, Machining, Sensing of Cutting Force, Adaptive Control, High Efficiency Machining

1. はじめに

アルミニウム合金は特殊なものを除き被削性が良く、比較的高能率加工が容易であるが、さらなる加工能率を追求するには加工の状態をインプロセスでモニタリングすることで定量的に把握し、刃具の性能を十二分に引き出すよう切削力に合わせて切削条件を最適化する適応制御も視野に入れ、取り組む必要がある⁽¹⁾⁽²⁾。

筆者らは主軸のサーボモーター負荷を参考としながら加工条件やツールの仕様を見直し、高能率加工に取り組んできた。しかしサーボモーターによる切削力評価は、使用回転数によってサーボモーター負荷の割合が異なり、切削力の変化に対する追従性が悪く、適応制御には向かない。

そこでマシニングセンターの主軸に力センサーを埋め込み、直接切削力を計測できるセンシング主軸を開発した。

*1～5 技術本部
Production Engineering Div.

2. 切削力センシング技術の開発

量産加工の過酷な状況の中で、安定的に高精度な切削力を計測するために次の3つを開発目標として、設備メーカーと協働で主軸に力センサーを組み込んだ。

- ①温度ドリフトが小さい (40N/分以下)
- ②計測精度が高い (計測精度±20N)
- ③応答性がよい (応答遅れ0.02秒以下)

力センサーは計測感度が高く、かつ高剛性である水晶圧電型を選択した。

センシング主軸の基本的な構造は筆者らが検討し、設備メーカーと何度も協議し、力センサーのレイアウトや油気圧配管経路を決定した。

主軸への力センサー組込み検討では、CAEによる静剛性解析を行い、マシニングセンターの軸移動性能に影響を与えないレベルで部材の寸法・形状を見直し、力センサー取り付けによる主軸剛性の低下に対する補強を行った。

また、温度ドリフトは、主軸内部を流れる切削油の温度変化が大きく影響を与えるため、断熱化と温度分布の均一化に主眼を置き、数パターンの切削油油路仕様を選定した。これらを熱変形解析で評価し、最適な切削油油路の仕様・レイアウトを選定した。

以上の対策を織り込んだセンシング主軸をFig. 1に示す。



Fig. 1 Main Sensing Spindle

また、ドリル加工における加工初期のセンシング主軸とサーボ負荷の計測状態を比較したものをFig. 2に示す。

センシング主軸はサーボ負荷に対し、応答遅れが0.001秒以下と少なく、制御のオーバーシュートの影響もない実切削力が測定可能である。

Fig. 3にセンシング主軸の入力荷重と出力荷重の関係を示す。入力荷重は水晶圧電型の力センサーで計測したものである。

Fig. 4に入力荷重に対する出力荷重の誤差との関係を示す。計測精度も±20N以下を確保した。

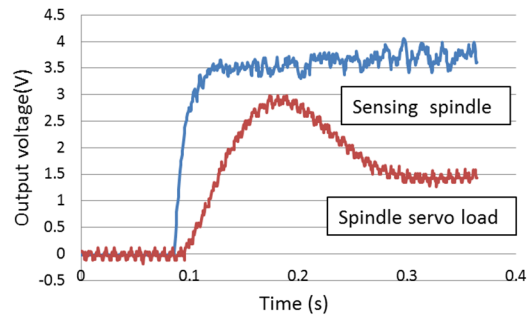


Fig. 2 Comparison of Cutting Force Responsiveness at Initial Period of Drilling

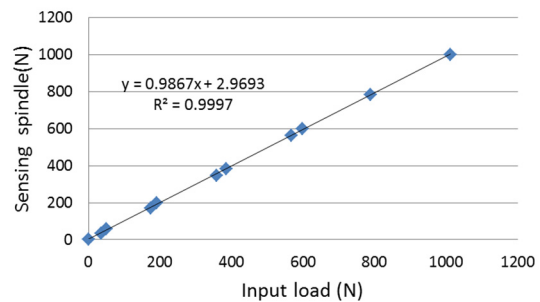


Fig. 3 Measurement Accuracy

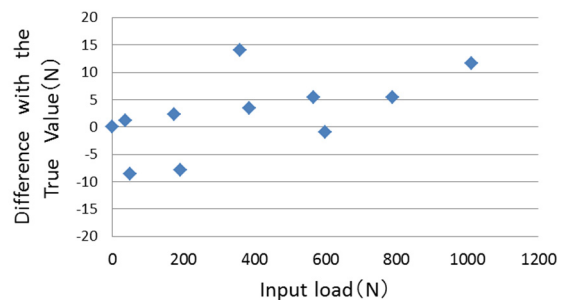


Fig. 4 Output Error for Input

Fig. 5に1台のワークを加工するために使用する刃具の、加工開始から終了までの温度ドリフトを示す。力センサーへの熱影響対策と、センサー近傍の温度変化を測定・計測値の補正を行い、温度ドリフトを40N/分以下とした。

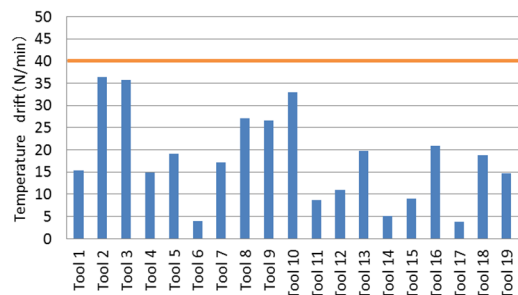


Fig. 5 Temperature Drift of Each Tool

3. 切削力決定方式の構築

高能率かつ加工品質を保証可能な目標切削力予測のため、まずFig. 6のように解析に使用する3Dモデルの溝・シンニング・逃げ角・マージンといった形状諸元を細部に至るまで再現することで、モデリング精度を向上させた。

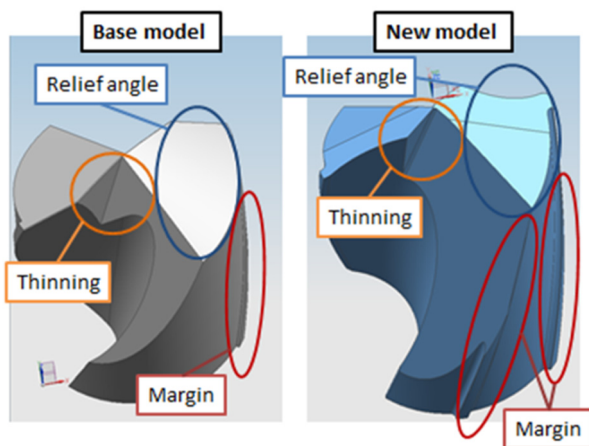


Fig. 6 3D Model of Drill Bit Shape

このモデルを使用し切削力シミュレーションと、センシング主轴による量産加工時の切削力を一致させ、解析の信頼性を向上した。

これらにより、CAEによる予測誤差を±50%から±6.0%以下とした (Fig. 7)。

この切削力シミュレーションをベースに、比切削抵抗が最小となる切削送りで発生する切削力を、最適切削力と定義して適応制御における目標値とした⁽³⁾⁽⁴⁾。

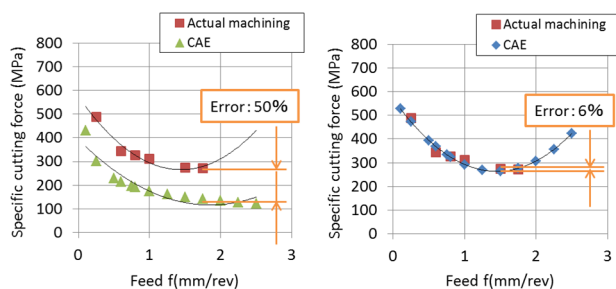


Fig. 7 Comparison of Actual Machining Data and CAE Data

4. 適応制御システムへの取り込み

開発したシステムの概略をFig. 8に示す。主轴に組み込んだ力センサーにかかる切削力をチャージアンプにて電圧変換する。この負荷信号をADコンバータにてデジタル化して、既設PLCにてフィードバック高速処理することで制御遅れを最小化し、Z軸の切削送りオーバーライド

を設定条件でコントロールする仕様となっている。切削送りオーバーライドとは加工プログラムで設定された送り速度に倍数をかけて、送り速度を変更する機能である。

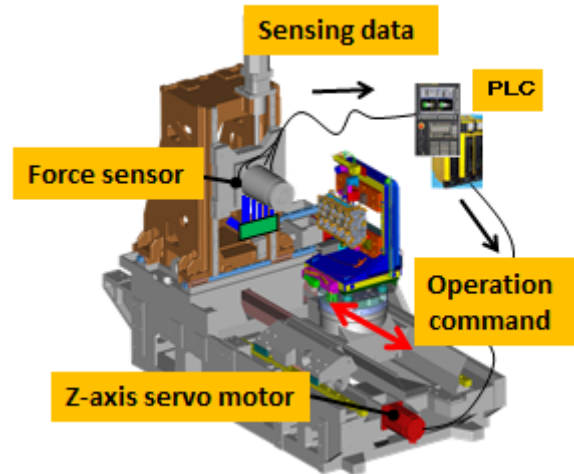


Fig. 8 System Schematic

量産部品加工において必要と考えられる制御ロジックを次の2つとした。

①1穴当たりの加工時間が数秒以上と長く、取り代や切粉排出性に変化を生じるものは、その瞬間ごとの切削力から、切削送りオーバーライドを変更 (以降、リアルタイム制御と記載) するロジックとした。Fig. 9に示すようにリアルタイム制御は、上下限の許容値を持たせた切削力为目标値とし、切削力が上限を超えた場合は設定した割合で送りオーバーライドを下げることで切削力が許容値に入るようコントロールし、切削力が下限を割った場合は、同様に設定した割合で送りオーバーライドを上げることで切削力が許容値に入るようコントロールする。この制御を随時行うことで送り速度を変化させ、切削力を許容値内に制御する。

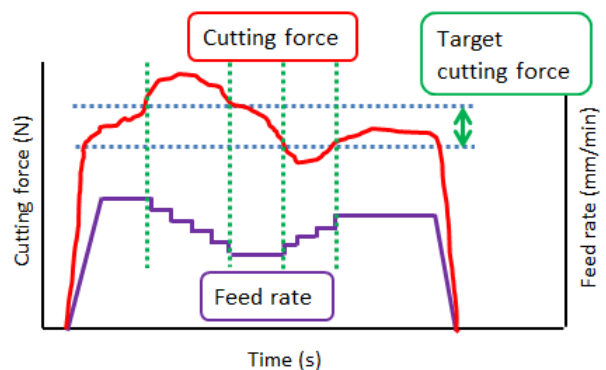


Fig. 9 Conceptual Diagram of Real-time Adaptive Control

②1穴当たりの加工時間が1秒前後以下と短く、切削条件が同じ場合、その平均切削力から次のワークで切削送りオーバーライドを変更（以降、ワンサイクル制御と記載）するロジックとした。Fig. 10に示すようにワンサイクル制御は切削力の平均値が、許容値に入るよう切削送りオーバーライドをワーク1台ごとにコントロールするもので、1台ごとの加工時の送り速度は一定である。

前回加工時の切削力が許容値を超えた場合は設定した割合で今回加工時の送りオーバーライドを下げることで切削力が許容値に入るようコントロールし、前回加工時の切削力が許容値を割った場合は設定した割合で今回加工時の送りオーバーライドを上げることで切削力が許容値に入るようコントロールする。

なお、①・②どちらの制御もオーバーライドの補正周期・量、及び切削力の許容値等を任意に設定できるよう開発した。

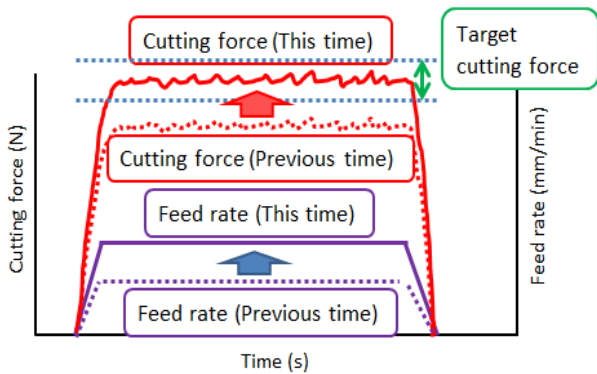


Fig. 10 Conceptual Diagram of Feed Rate Control

加工した部品の加工品質情報に、刃具ごとの加工数や切削力の情報を追加し、これをサーバーに蓄積することで量産加工における刃具の新品時から摩耗交換時までの切削力の推移と加工品質の相関を把握することが可能となった。この技術によって切削条件の設定や刃具諸元の選定を、定量的かつ実態の加工状態で比較・選択できるようになり、より高い切削効率を引き出せるようになった。

5. 適応制御加工による効果

エンジン部品のシリンダーブロックにおけるボア荒ボーリング加工にリアルタイム制御を導入した事例をFig. 11に示す。刃具の摩耗状況とシリンダーライナーの硬度バラツキに対し、随時切削送りオーバーライドをコントロールすることで、切削力によるボアライナー下端の割れを監視しながら、加工時間を平均で約25%短縮した (Fig. 12)。

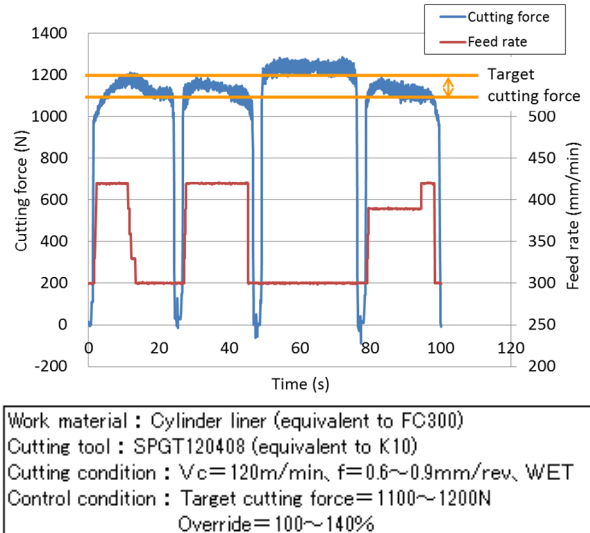


Fig. 11 Machining Example by Real-time Adaptive Control

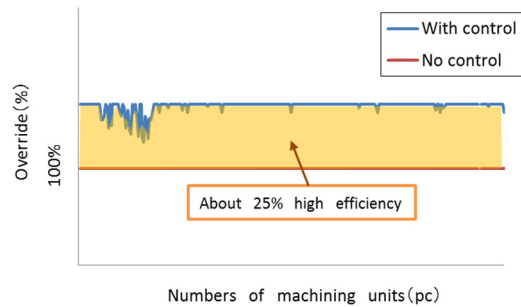


Fig. 12 Transition of Override

エンジン部品のシリンダーヘッドにおける油穴加工にワンサイクル制御を導入した事例をFig. 13に示す。刃具が新品時には切れ味がよいため、設定した上限送り速度で加工を行っている。刃先の摩耗に伴い、設定した上限切削力の2300Nを超えると切削送りオーバーライドを下げ、目標切削力の範囲に送り速度をコントロールする。

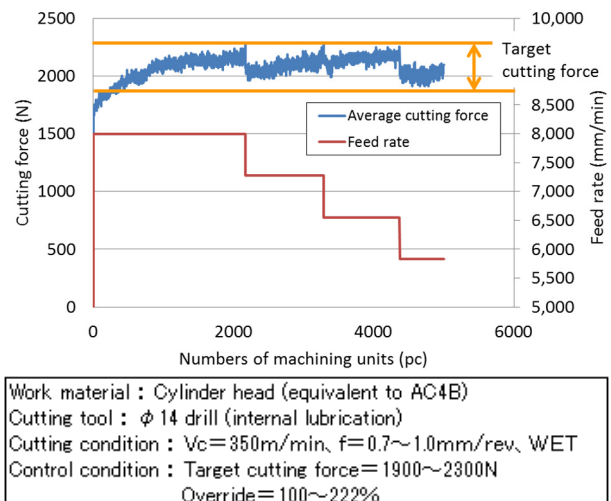


Fig. 13 Machining Example by Feed Rate Control

この制御の導入により、当初の切削条件に対し平均約30%の加工時間短縮を実現した (Fig. 14)。

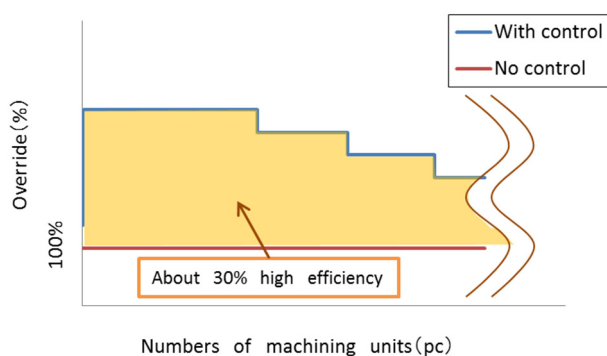


Fig. 14 Transition of Override

6. おわりに

アルミ製エンジン部品加工における高精度・高能率加工追求のため、量産加工用のマシニングセンターに、力センサーを組み込んだ切削力センシング技術を開発し、2種類の適応制御加工システムを内製した。

この技術による高能率化で、商品性機能UPのための加工部位増加への対応と、高精度化を実現することができた。

また、切削力の常時監視により、加工品質保証が可能となった。

参考文献

- (1) 社本英二, 樋野励, 梅崎雅之, 森脇俊道: 切削力モデルに基づくエンドミル加工状態の知的認識, 日本機械学会論文集(C編)69巻683号, pp.1927-1932 (2003-7)
- (2) 佐藤智典, 垣野義昭, 松原厚, 藤嶋誠, 西浦勲, 鎌谷康史: 知能化工作機械によるドリル加工制御に関する研究 (第1報), 精密工学会誌Vol.66, No.8, pp.1270-1274 (2000)
- (3) 切削油技術研究会: フライス加工ハンドブック, pp.35-34 (1988)
- (4) 切削油技術研究会: 現場技術者のための穴加工皆伝, pp.18-19 (1994)

この論文は公益社団法人精密工学会誌85巻2号に投稿した内容に追記・転載したものです。

■ 著 者 ■



榎本 智章



林 一哉



増田 雅彦



森本 博幸



藤原 秀行

特集：新世代商品群の生産技術

34

走る喜びを実現するAPMC鑄造のモデルベース開発

Model-Based-Development of Advanced Precision Mazda Casting
to Realize Celebrate Driving

國松 大知*1	菅谷 智*2	橋本 修一*3
Daichi Kunimatsu	Satoshi Sugaya	Shuichi Hashimoto
村瀬 宏治*4	小杉 一浩*5	丸尾 幸治*6
Koji Murase	Kazuhiro Kosugi	Koji Maruo

要 約

ブランドエッセンスの「走る喜び」を実現するため、シリンダーヘッド素材領域でも「軽量化」を重要課題として取り組んでいる。しかし、軽量化として薄肉化を追求すると製品の機能限界に到達するため、各部位での限界を精度良く予測する技術が必要である。そのためには運転時に発生する応力に加え、製造時に製品内に残留する応力分布の考慮が不可欠であると考えた。そこで、残留応力予測技術を開発し、その結果を開発部門の機能評価に組み込む製品開発プロセスを構築した。

今回、この技術を用いて新型MAZDA3シリンダーヘッドをモデルベース開発し、製品機能を維持しつつ業界TOPレベルの薄肉軽量化を実現した。本稿ではその取り組みについて報告する。

Summary

In order to realize the brand essence “Celebrate Driving”, we are engaged in “Weight Reduction” as a critical theme in cylinder head casting area. However, if we easily pursue to reduce thickness for the weight reduction, the limit of the product function will be reached. Thus, the verification technology of function limit at each part with high accuracy is necessary. For that, we assumed that, in addition to several stresses which occur in driving, the residual stress distribution which remains in the product at manufacturing is the crucial factor. So, we developed the residual stress verification technology and structured the product development process that the residual stress distribution is coupled to the function verification at R&D Division.

This time, the cylinder head of All-New Mazda3 has been model-base-developed by this technology and we realized to reduce thickness and weight as the industry top level while keeping product functions. This article introduces the approach of the technology.

Key words : materials, and production・manufacture, aluminum alloy/magnesium alloy/titanium alloy, formed and fabricated materials, and quantity production prototyping, reliability/robust design, and design/prototyping, thickness reduction, weight reduction, residual stress, APMC=Advanced Precision Mazda Casting, casting, In-Process-Out, Coupled

1. はじめに

ブランドエッセンス「走る喜び」の追求に向けて、生産部門では「魂動デザイン」「人馬一体」「燃費」を実現&追求する方針を掲げている。これらを機能展開すると因子に「重量」が影響する。よって、素材領域では

製品の「軽量化」を重要課題に挙げている。本稿では、シリンダーヘッドの事例を紹介する。

Fig. 1に示すように、シリンダーヘッドは燃焼時の火炎伝播を制御する燃焼室や必要な空気の吸排気の流れを制御するポートと、燃焼熱の冷却に必要な水流を制御するウォーター・ジャケットを組み込んでおり、動力性

*1, 3~6 パワートレイン技術部
Powertrain Production Engineering Dept.

*2 MPS推進部
MPS Promotion Dept.

能や燃費を大きく左右する重要なエンジン部品である。製品機能向上のため燃焼や冷却をより緻密に制御する必要があるため、付帯部品の増加や冷却回路の多系統化が進み、シリンダーヘッドの形状は複雑化している。複雑になるほど形状間に余肉がつき重量が増加している。

2. 軽量化の追究

2.1 軽量化に向けた課題

一般的に、薄肉化や除肉により軽量化するには、アルミ溶湯の湯流れ性や鋳型の造型性といった生産性に加え、軽量化による製品機能への影響も考慮する必要がある。例えば、強度を維持しつつ軽量化しても、鋳造後の素形材に残存する応力（以下、残留応力）が局所的に大きくなると、耐久性が悪化する。これを防ぐために、生産性評価のみならず、生産技術と開発部門が一体となり、開発初期段階から残留応力を考慮し製品耐久性を評価することが重要な課題である。

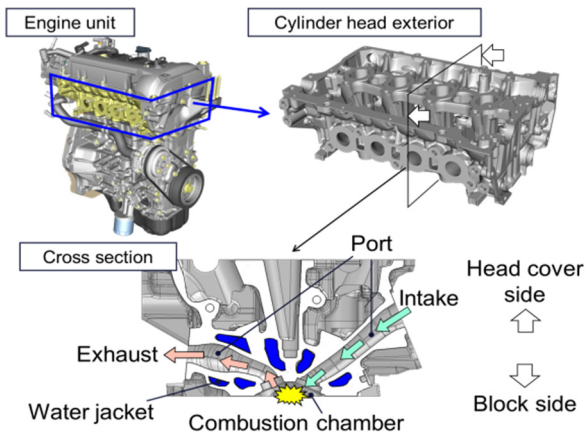


Fig. 1 Outline of Cylinder Head

2.2 開発部門での耐久性評価

Fig. 2の上段に耐久性評価基準を示す。製品設計段階で運転中にかかる応力を予測し材料の疲労限界に対する余裕度をCAEで評価している。

運転中にかかる応力は燃焼による熱応力と製造工程で発生する残留応力に分けられる。Fig. 2のグラフに示すが、部品が持つ残留応力を、従来では「過去の実測を基に設定した任意の均一値をシリンダーヘッド全体へ与える」との条件で行っていた。しかし、実際はそれより残留応力が低い部位が大部分であるため、軽量化できる領域を逃していた。一方で、残留応力が局所的に高くなる部位は、開発耐久評価時に手戻りが発生していた。つまり、CAEで軽量化を進めるには、より実態に近い耐久性検証が必要で、そのためには部品が持つ残留応力分布を考慮することが欠かせない。

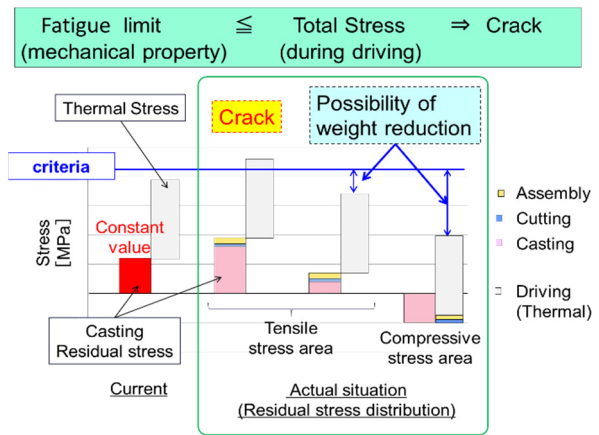


Fig. 2 Necessity of Residual Stress Coupled Analysis

3. 残留応力の発生メカニズム

3.1 シリンダーヘッド鋳造方法

一般的にシリンダーヘッドは低圧鋳造法（ロープレッシャーダイカスト（以下、LPD））と呼ばれる工法で製造されるが、マツダでは世界オンリーワンのアドバンスド・プレジジョン・マツダ・キャストィングプロセス（Advanced Precision Mazda Casting, 以下APMC）を採用している。

これは常温造型高精度砂型（以下、砂型）に低圧注湯する鋳造法をベースとし、砂型の一部に金型を取り入れることで鋳造組織の緻密化を図りつつ、シャワーを用いた急冷工程を取り入れた工法である。砂型と「冷却プレート」と呼ぶ金型を積み木のように組合せ鋳型を形成し、アルミ溶湯を注湯する。その後、狙いの材料素性になるように常温まで緻密に冷却制御し、砂型を除去することでシリンダーヘッド素材品を得る工程となる（Fig. 3）。

一般に広く採用されているLPDに比べ、必要な部位のみ機械的性質を大幅に向上しつつ、薄肉な形状が形成できる。また、冷却制御により急冷による焼き入れ効果と復熱による時効効果を得ることができ、熱処理レスによる低コスト生産を実現している（Fig. 4）。

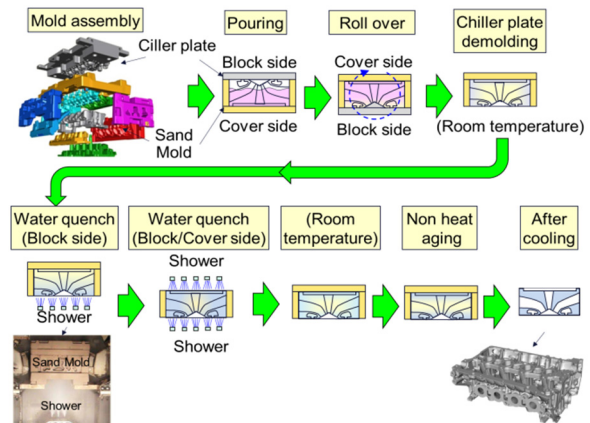


Fig. 3 APMC Process Flow

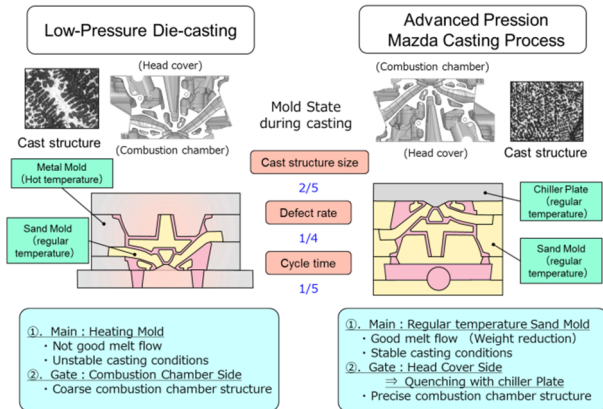


Fig. 4 Comparison between LPD and APMC

3.2 残留応力の発生メカニズム

先述のとおり、APMC工法の casting~冷却工程では、製品のさまざまな部位がダイナミックに温度変化することで、Fig. 5に示すように大きな温度ギャップが生じ（金型と中子によるアルミの冷却差及びシャワー照射部の急冷）、各部位で温度収縮差が発生するため、熱応力が発生する。そして、この熱応力（圧縮・引張応力）が冷却中に変化しながら最終的に釣り合った状態になり、素形材内部に残留する。以上がAPMC工法で残留応力が発生するメカニズムであり、残留応力の予測には各部位の温度変化を正しく計算することが最も重要である。

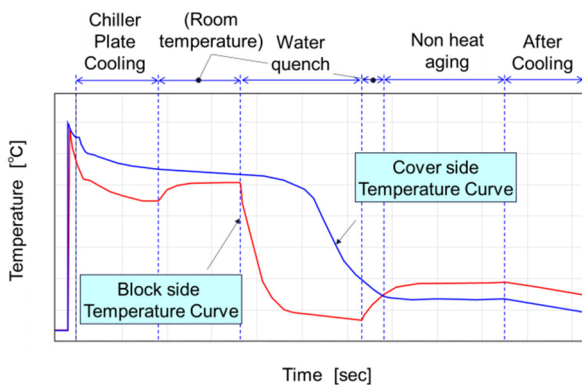


Fig. 5 Temperature Curve of APMC Process

4. 生産工程における定量化とモデル化

4.1 モデルベース技術の考え方

まず、現場・現物での実態測定により対象となる現象を徹底的に定量化し、現象のからくり（原理）を解明する。次に、このからくりを入力情報（Input）と出力情報（Output）の相関式（Process）で記述する（以下、IPO）。この式を構成する変数の内、コントロール可能な変数を制御因子、そうでないものを誤差因子とする。後は、相関式を解くために最も適したツールを使って

システム化を図るが、製品開発では部品形状が重要な変数となるため、FEMなどの3次元形状を計算可能なCAEソフトを使うことが多い。

本稿では、まず全 casting 工程の温度測定によりキーとなる各工程での温度変化のからくり（IPO）を解明した。次に、これらIPOを計算できるようにシステム開発するとともに、計算パラメータとして必要となる境界条件や物性値を詳細調査した（Fig. 6）。以下にその詳細を述べる。

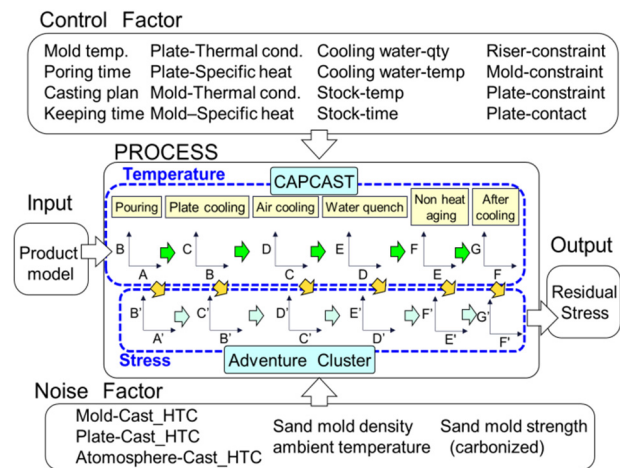


Fig. 6 Residual Stress In-Process-Out

4.2 全工程測温実現と測温精度向上

APMC工法では casting の各工程がシーケンシャルにつながっているため、工程ごとの温度変化を定量化する目的で全工程をまたいで連続測定する必要がある。

ところが、一般的な有線タイプの測温機器では配線が長くなるため取り回し性が悪く、断線トラブルなどにより連続測定は困難であった。そこで、Fig. 7-①に示すように測温機器を有線タイプから無線タイプに切り替えてこの問題をクリアすることで、配線が取り回せない工程（搬送中、シャワー冷却工程等）の温度プロファイルも取得可能となった。

測定精度向上のために、熱電対のセット方法にも改善を加えた。APMC工法の特徴である冷却プレートに溶湯が接触して急冷される部位では、計測ポイントが数mmずれるだけでも測定結果が大きく変わってしまう。溶湯の流れにより熱電対が倒れてセット位置がずれることを防ぐため、湯流れ解析結果から確認した溶湯の流れ方向に沿わせて熱電対を設置した。加えて、熱電対自体の剛性を上げられるように、飛び出し部へセラミックベースの接着剤で補強を行うなどの改善を加えることで測定ばらつきを抑制している（Fig. 7-②）。

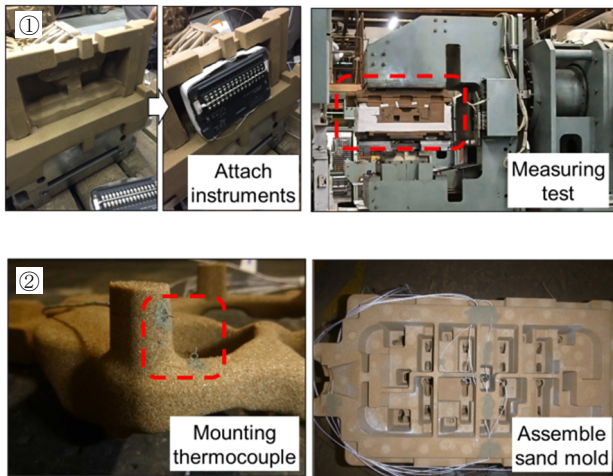


Fig. 7 Temperature Measuring Test

4.3 熱伝導特性の測定

冷却過程ではアルミと鋳型との熱の授受による温度変化が支配的である。よって鋳型の高温時の熱物性を正確に把握することは重要である。

砂型は砂が98%以上を占めていることから、従来は砂であるケイ素の熱伝導物性を入力していた。しかしながら、砂型は砂粒と微量の接着剤の集合体であるため、製造工程の上下限品の密度と接着剤の配合量をパラメーターとしてテストピース砂型を製作し、全組み合わせで熱伝導特性を実測した。結果、砂型は砂単体よりも伝熱性が低く、量産条件（温度・時間）では、溶湯接触面から約5mm程度しか砂型温度が上昇しないことが判明した。この結果から熱伝導率を算出し解析へフィードバックした。

4.4 熱間機械的性質値測定と分布考慮

凝固収縮過程では鋳型による拘束が残留応力に影響する。そこで、鋳型状態で常温から高温域500℃までの、線膨張係数、応力歪線図等を実測した。

一方、シリンダーヘッド鋳造材（AC4B相当材）の機械特性については、従来は現物から一つの応力-ひずみ曲線を測定して使用していたが、APMC工法の特徴に合致させるべく、急冷部と徐冷部での機械特性の差を考慮できるように改善した。具体的には、ブロック面は金型で冷却するため微細な結晶組織になり強度が高いが、ミドルデッキ・カバー面といった領域は相対的に強度が低い。この機械的性質の分布を考慮するために、冷却速度と機械的性質の相関式を作成し解析条件へ織り込んだ。

5. システム開発

5.1 ハード・ソフトウェアの改善

システム化にあたり、温度モデルを再現するソフト

ウェアはAPMC工法特有の制御因子を織り込むため、市販の鋳造解析ソフトを自部門でカスタマイズして利用している。APMC工法のダイナミックな温度変化が残留応力に大きく関わるが、ソフトウェア導入時は急激な温度変化を伴うシャワー工程を再現することが出来なかった。理由として、シャワーが当たる鋳物面は、冷却プレートや砂型、空気、水といった各工程で異なった材料と熱の授受を行っているが、材料設定変更をせず熱伝達係数のみで合わせ込みを行うと、内部の熱伝導計算が不確かなので、大きな誤差が生まれたためである。そこで、専用の解析プログラム（ロールオーバー～シャワーリング）を作成した。具体的には、材料設定を砂から水へ変更させるため、シャワーリング工程を独立して計算させ次工程のインプットとなるようなプログラムを開発した。また、シャワーノズルの水流量や噴霧範囲から冷却能分布を再現する仕様も開発した。具体的には、冷却時の壁面熱伝達率を計算する上で、沸騰現象を再現するのは膨大な計算時間がかかり現実的ではない為、各種冷却条件と熱伝達率との重回帰式を品質工学で効率的に構築し、ソフトウェアへ組み込んだ。

応力モデルを再現するソフトウェアは市販の弾塑性構造解析システムをそのまま使用するが、温度モデルとの連成はインターフェースを開発した。ハードウェアは、非常に重い計算になること想定してクラスター化対応を前提とすることで、段階的なCPU数増強により計算時間を短縮可能とした（Fig. 8）。

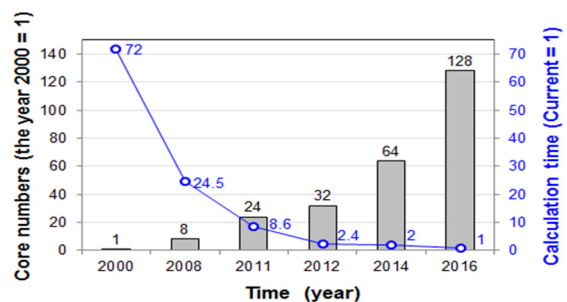


Fig. 8 Core Numbers and Calculation Time

5.2 残留応力予測精度確認

以上の取り組みにより、Fig. 9に示すように、注湯／凝固～シャワーリング～室温までの全域で温度曲線を±10℃以内に収めている。得られた温度曲線を残留応力解析の温度荷重にインプットすることで、鋳造工程で発生する残留応力を過渡的に確認できるようになった（Fig. 10）。

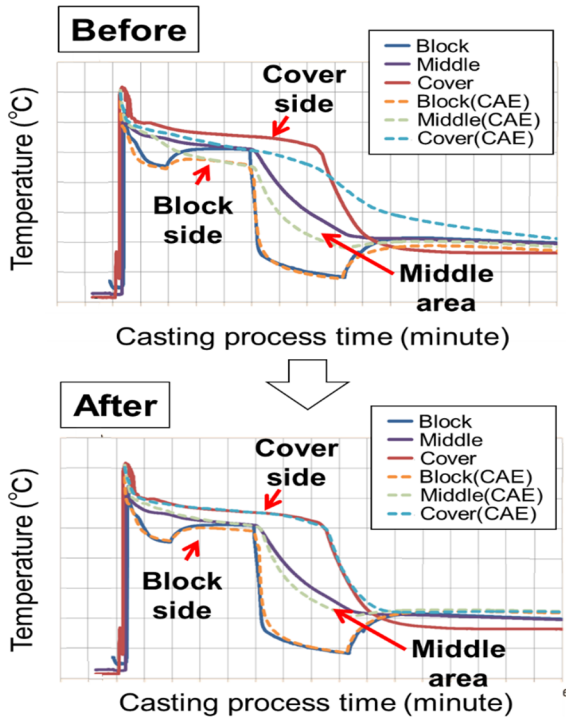


Fig. 9 CAE and Measured Temperature Curves (Before / After)

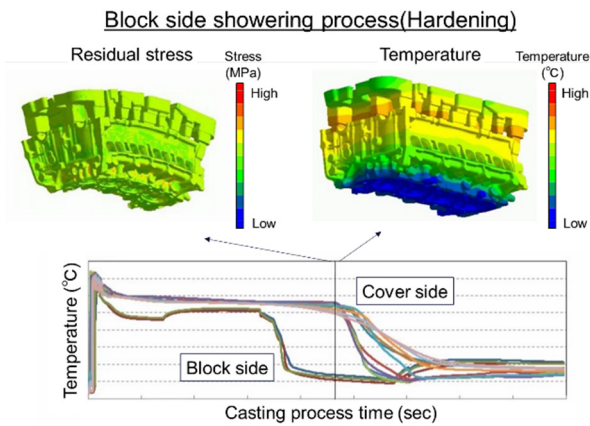


Fig. 10 Example of Stress and Temperature Change

SKYACTIVエンジンのシリンダーヘッドの残留応力計算結果を実測と比較した結果をFig. 11に示す。引張・圧縮方向及び応力値共に製品の各部位に渡って良い一致を示しており、モデルベース開発に適用可能と考え、鋳造プロセスや形状の最適化への活用を開始した。例えば、鋳造後の冷却過程で発生していたクラック等のメカニズム分析が可能となり、応力を低減させる鋳造条件変更や形状改善などを実施している。この残留応力予測結果を、開発部門で検証している耐久性評価システムの境界条件へ活用するため連成システムの構築を進めた。

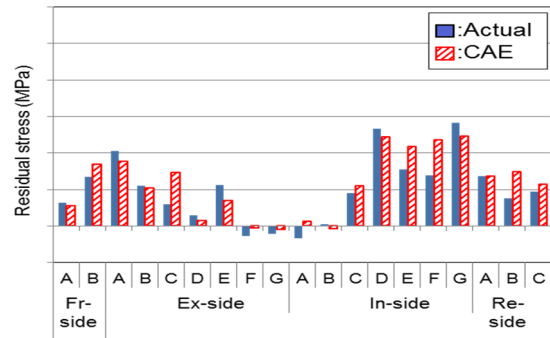


Fig. 11 Residual Stress Difference between CAE and Actual Measurement (SKYACTIV Engine)

6. 開発モデルとの連成

6.1 開発モデルとの連成システム構築

生産技術部門で残留応力予測を行う3Dモデルは鋳造時の形状であり、開発部門で耐久性評価を行う3Dモデルは機械加工を終えた最終製品形状であるため、形状が異なる。そのため解析を行うメッシュのノードが一致しておらず、当初は連成させることが困難であった。そこで、最も近いノード同士で残留応力を貼り付ける（マッピング）ことができるプログラムを開発した。また、耐久性評価の際、部品等の組み合わせを考慮して解析するため、設計ノミナル形状でやる必要がある。しかしながら、鋳造時に発生する残留応力や加工時に解放される残留応力を単純に耐久性評価用の製品形状へマッピングすると、釣り合いが取れず製品形状は変形してしまう。そこで、開発部門で残留応力による変形量の逆数を、製品形状の初期変位情報として与えるプログラムを開発した。

つまり、生産技術部門と開発部門でそれぞれ独立して耐久性向上に取り組むプロセス (Fig. 12上段) を、開発部門と共同で、各工程をつながることができるプロセス (Fig. 12下段) を構築した。これにより残留応力から耐久性までシームレスな解析プロセスを実現できた。

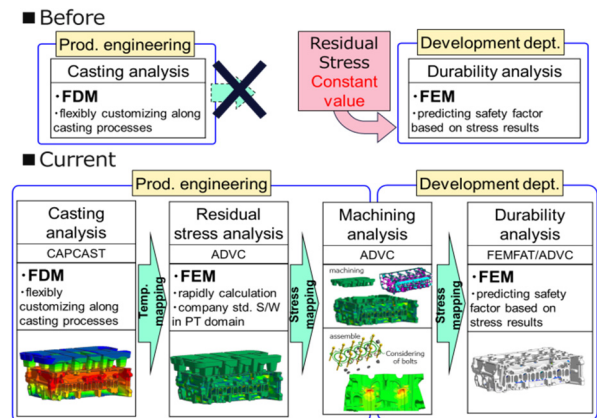


Fig. 12 Residual Stress Coupled Process Flow

6.2 達成有無の効果検討

Fig. 13に残留応力結果の達成あり・なしの、シリンダーヘッド耐久性評価結果を示す。ここで耐久性の評価指標は材料限度に対する応力の余裕度として、「安全率」と呼んでいる。開発モデルと連成したことで、分布や値が変化することがわかる。青で囲った部分は余裕があり、除肉による軽量化ポテンシャルがある部位と判断できる。一方、赤で囲った部分は耐久性のリスクがあり、残留応力と連成しない場合では予測ができていなかった部位を造り込めるようになった。次に、新型MAZDA3へ適用した内容を紹介する。

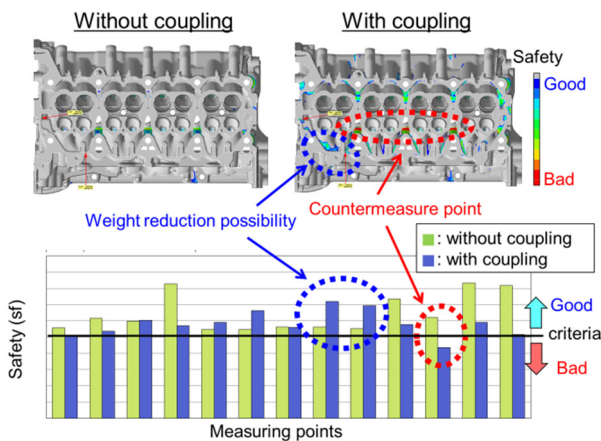


Fig. 13 Residual Stress Coupled Process Flow

7. 新型MAZDA3シリンダーヘッドへの適用

Fig. 14にSKYACTIV-Gでの適用例を示す。余裕がある部位 (Fig. 14-①) は、開発部門と連携し各部位の薄肉軽量化を検討し最小肉厚3mm達成した。一方で、余裕がない部位 (Fig. 14-②) はR拡大などの形状改善を加え製品剛性を向上し、耐久性を改善させた。

薄肉軽量化を検討する上で、製品機能とともに生産限界を見極めることも重要となるため、製品湯流れ温度予測技術との連携により鋳造方案の最適化を行い、生産性を確保しながら検討した。

この技術は新型MAZDA3やCX-8などに搭載されるエンジンに適用しており、成果として、SKYACTIV-Xシリンダーヘッドでは、インテークポート側・エキゾーストポート側の外壁肉厚は業界Topレベルである全域2.5mmを達成し、業界Best in Classの軽量シリンダーヘッドを実現した。その他のエンジンでも従来比で最大で950g (SKYACTIV-D) の軽量化を達成し、走る喜びを実現できるシリンダーヘッドを開発部門と一体となり開発できた (Fig. 15)。

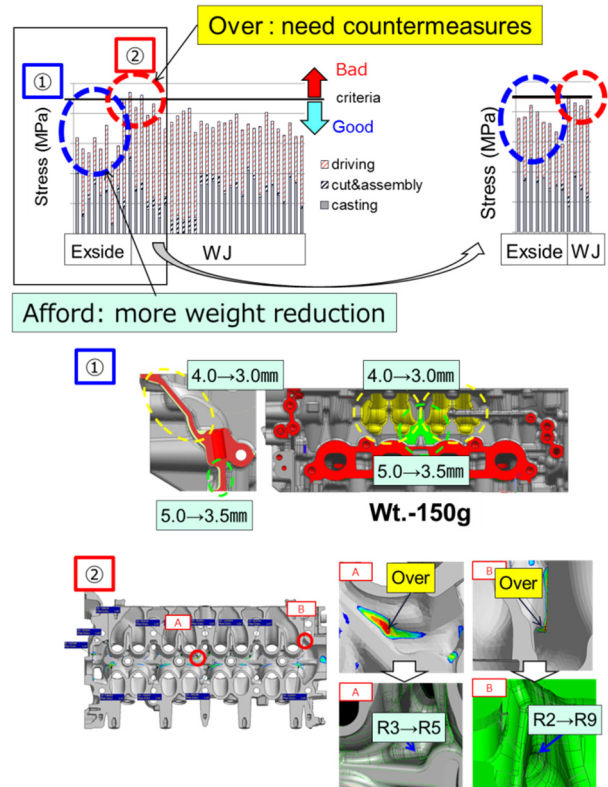


Fig. 14 Application Example of Development Process

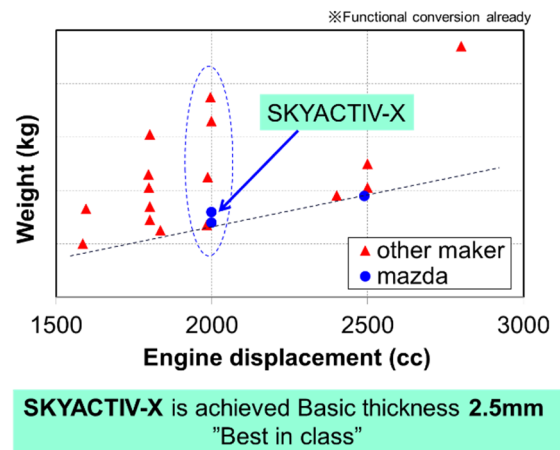


Fig. 15 Weight of Cylinder Heads (2010~)

8. まとめ

製品開発の初期段階から、開発部門と一貫通貫で形状育成可能な技術を構築し、その結果を製品形状に織り込むことで、より高い次元で商品性と生産性をブレークスルーできた。今後も、シリンダーヘッドの残留応力・耐久性の予測技術をレベルアップすることで、更なるお客様価値向上へつながっていくと考えている。

最後に、モデルベース開発を進めていく上でCAEをいかに活用し効率的に開発を進めるかが重要になる。そのためには『実現象を詳細に捉えIPOを整理しメカニズム

を考える』ことが必須となり、この考える部分を今後も強化していきたい。

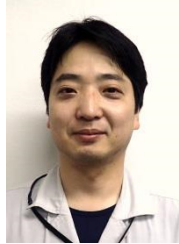
■著者■



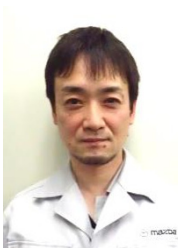
國松 大知



菅谷 智



橋本 修一



村瀬 宏治



小杉 一浩



丸尾 幸治

論文・解説

35

NA ロードスター レストアサービスの紹介

Introduction of NA Roadster Restore Service

山本 修弘*1	西田 芳伸*2	伏見 亮*3
Nobuhiro Yamamoto	Yoshinobu Nishida	Akira Fushimi
國本 拓也*4	野村 裕之*5	中矢 健次*6
Takuya Kunimoto	Hiroyuki Nomura	Kenji Nakaya

要 約

NAロードスターレストアサービスは、Webで申し込みいただいたお客様のお車を、近くの販売会社様で事前確認し、その後、広島の子品工場の中にある(株)マツダE&Tの工房で作業する。そのプロセスは受付検査から始まり、分解、塗装、組立、完成検査、TUV（テュフラインランド社様）の認証を取得する。また、車両をレストアするだけでなく、お客様のクルマの分解前後の検査記録、記録写真、お客様のロードスターとの思い出、ロードスター誕生の記録などを収めたフォトブックをお渡しする。レストアサービスと同時に複製部品の検討も行い、現時点で170部品を複製した。レストアサービスとパーツ供給サービスを継続することで、愛するロードスターを長く乗り続けてもらえる環境と、古いクルマを大切に作る自動車文化に貢献していく。

Summary

For the procedure of the NA Roadster Restore Service, the customer makes an application through the website, and we pre-check the vehicle at the nearest dealership of the customer, and work on the vehicle at the workshop of Mazda E&T located in the Ujina Plant, Hiroshima. The entire process starts with the reception inspection, and we disassemble, paint and assemble the vehicle, conduct the completion inspection and finally obtain the TUV (TUV Rheinland) certification. We not only restore the vehicle, but also present the customer a photo book which consists of the inspection records before and after disassembly, some photos as well as the customer's memory with Roadster and information on the birth of Roadster. We have also studied the supply of some reproduction parts together with the restoration service, and so far reproduced 170 types of parts. By providing the restoration and parts supply services, we establish the environment where the customers can continue driving their Roadster that they love for a long period of time, and contribute to the automotive culture in which old vehicles are cherished and respected.

Key words : production・manufacture, bumper/body model, suspension system, drive axle/joint, engine accessory, color, maintenance, anticorrosion/stray current corrosion/electrolytic corrosion, inspection/measurement, service, NA Roadster, restore

1. はじめに

NAロードスターレストアサービスは、お客様の「NAロードスターを長く乗り続けたい」という愛情と熱意、そして「長く愛されてきたクルマを愛でる文化を育てたい」というマツダの願いによって、2015年11月、実現へ

の具体的な検討が始まった。皆様から長く熱望されたパーツの復活や継続生産の検討は、多くのサプライヤー様のご尽力と、レストアトライアルにおいてはロードスターショップの皆様の示唆に富むアドバイスに加え、ロードスタークラブオブジャパンの皆様の厚いご支援により、2017年12月13日、まずは日本国内にて晴れてサービスを

*1, 2 商品本部
Product Div.

*5, 6 (株)マツダE&T
Mazda Engineering & Technology

*3, 4 カスタマーサービス本部
Customer Service Div.

開始した。時代を超えてクルマを愛してやまない方たちと一緒に、NAロードスターのある人生の楽しさを追求していきたい」という想いを胸に、今後も“マツダにおけるレストアサービス”のありたい姿を目指す。

2. レストアサービスの志

マツダは、NAロードスターのレストアサービスやパーツの供給を通じて、クルマを愛してやまない人たちとともにクルマ文化の育成に挑戦する。

そして、それらの取り組みを通じて、お客様との間に特別な絆を守り続けるブランドになることを目指す。また、純正パーツの供給を続けることで、ロードスターを愛する全ての人と真摯に向き合い、「共に走り、共に飲む」ことのできるパートナーであり続ける。

マツダのNAロードスターレストアサービスは、ただ車を修理するだけでなく、「新しい命を吹き込み、息を吹き返らせ、そしてお客様と共にずっと走り続ける」このような気持ちで1台1台と向き合う。そして「以前よりも本当に綺麗になったね」「生き生きとした表情になったね」と、まるで愛しい家族や信頼する相棒に語るような、温かい感情をお客様と共有することが私たちの喜びである (Fig. 1)。



Fig. 1 NA Roadster

3. レストア開始までの経過

3.1 NA ロードスターに込められたメッセージ

1989年、初代となるNAロードスターが誕生した。その紹介は、こんなクルマにのりたい。こんなクルマをつくりたい。こんなクルマをおとどけしたい。新時代のライトウェイトスポーツ“NAロードスター”はまさしく「クルマの新しい楽しみ方」をお客様にご提供するコンセプトであった。そして、お客様が初めて手にするカタログに記されている「だれもが、しあわせになる。」というメッセージは、このクルマを手に入れるためにほんの少しの勇気を持てば、しあわせな人生がおくれるという想いがこめられていた (Fig. 2)。



Fig. 2 Catalog of NA Roadster

3.2 お客様の声

日本中で開催されるロードスターのファンミーティングに参加すると、NAロードスターを永く乗り続けるためのサービスパーツの供給をずっと続けて欲しい、また、カスタマイズをやり尽くしたので、オリジナルのNAロードスターに戻したいという多くのファンからの要望を聞くようになった。初代となるNAロードスターが誕生して約30年が経過した。このNAロードスターレストアサービスは、マツダが、NAファンの「NAロードスターを永く乗り続けたい」という愛情と熱意に応えるという信念、「NAロードスターへの愛情を永遠に持ち続けて欲しい」という願い、そして、「長く愛されてきたクルマを愛でる社会・文化を育む」という強い願いが事業検討への後押しとなった。

3.3 準備活動

レストアサービスの検討は、商流、物流、お客様との接遇など、新しいビジネスモデルの検討からスタートした。社内の経営企画部門のメンバーのサポートや、実際に作業を実施してもらう(株)マツダE&Tとの役割分担や契約などのビジネス課題を克服した。次は、レストアができるだけの新品パーツが供給できるか必要な部品を一点一点調べた。供給が停止している部品は、サプライヤー様と供給可能かどうかの折衝をし、レストアに必要な大事な部品については特別にお願いした。

最後は、レストアのトライアルである。走行距離が20万km越えの中古車を購入し、実際に車両の分解、車両の痛み具合や部品の損傷箇所、再使用可能かどうかを調査した。トライアルにより実施手順と品質確認の実績を積んだ。また、塗装は品質と見栄え検証を行い、当時と同じ色合いになるまで色合わせを重ねた。更に、塗膜の耐腐食性能や耐候性テストを実施した。

3.4 お客様説明会

レストアサービスの受付をする前に、2017年12月10日マツダR&Dセンター横浜でお客様説明会を開催した。午前と午後の2回で200組のお客様を予定していたが、申し込みは2倍以上の500人を超え、1月にマツダR&Dセンター横浜、そして広島本社で実施し合計439人の追加説明会を実施した。説明会は、スペシャルパッケージとVスペシャルの2台のトライアル車を展示し、これまでの経過、具体的な実施要領、申し込み方法、受付場所、対象車、メニュー、価格、支払方法など説明した。心配していた価格は、お客様よりレストアへの感謝とエールをいただいた (Fig. 3)。



Fig. 3 Briefing of Restore Service

4. 実施要領

4.1 レストアの流れ

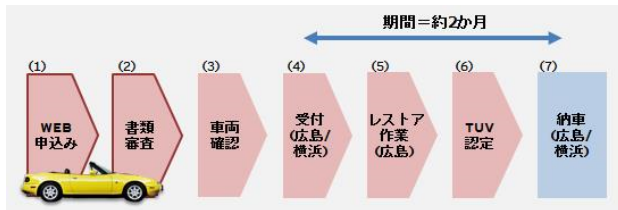


Fig. 4 Process of Restoration

Fig. 4に具体的なレストアの流れを示す。Webでの受付から始まり納車までの7つのステップである。レストア期間は受付から約2か月を想定しているが、実際には車両の状況によって延びる場合がある。申込みは、マツダの公式Web内にあるレストア専用のサイトからお客様が申し込む。ここから申し込みされたお客様の車両情報により、ロードスターがレストア適用車であるかどうかを確認する。

4.2 適用車

受付できる車両は、ナンバー付きのNA6CE型で、グレードは標準車、スペシャルパッケージ、Vスペシャル、Jリミテッド[®]、カラーはカタログモデルの6色に加え、サンバーストイエローも対応する。また、限定車、M2については専用部品をそろえることができないため、開始時点では対応しない。車両の状態は、錆の補修、車体の歪みや板金が必要な車両や、カスタマイズパーツなど、純正以外のパーツ装着車両には対応しない。最初は小さく始めて、今後、経験と技術を積み上げていきたいと考えている。

4.3 メニューと価格

レストアメニューの考え方は、マツダがメーカーとして実施するレストアの価値である“安心して永く乗り続けて頂く”ことを実現することである。そのため、ボディとエクステリアを防錆に配慮した作業を行い、新車に近い状態に戻す“基本メニュー”を設定した。全ての部品を取り外しホワイトボディの状態にした上で全塗装を行い、外装フタ物を防錆力の高い電着済みの新品部品へ交換する。板金が必要な場合は、後述のTUVの認証を取得した協力会社様にて丁寧な補修作業を実施する。

その上で、お客様のご要望にお応えするため、オプションメニューとして“インテリア”“エンジン”“シャシー”“エアコン”“タイヤ&ホイール”を個別に選択可能とした。各メニューでは、新品の純正部品の交換ばかりでなく、復刻が困難な部品においても、オーバーホール、シートリペアにより対応する。

また、価格については、上記の内容によりレストアの価値を発揮しながらも、できるだけリーズナブルな価格で提供できることを考慮し、基本メニューと、オプションメニューも含めたフルレストアを設定した。具体的な価格はWebで確認できる。

4.4 事前確認

レストアを実施する前に、受付可能な状態を確認するため車両の診断を行う。お客様のお近くのマツダ販売会社様で場所を提供いただき、レストアサービスのチームメンバーが、ロードスター専門ショップのサポートを受けて、車体のダメージや修理状況、カスタマイズの状況を確認する。その際、外板の修理履歴調査のため塗膜厚の計測と、車体の歪みを確認するために、フロント、アンダーボディー周辺の車体寸法を測定する。

4.5 実施要領

(1) 受入検査

お預かりしたお客様の車両は、分解する前に素性を確認するため、各ボディーパネル間のパネル隙について16か所を計測し最大値と、最小値を検査部門が外観測定フォーマットに沿って記録する。次に灯火や電装部品など各種装備品の機能について29項目、各種動作や作動の状態を確認する。その他、社内の試験路にて試乗し異音の有無、不具合がないかの確認やホイールアライメント、車両重量(輪荷重)の測定など入庫時の車両状態についても確認し記録する。社内的高速試験路を使用し高い速度領域での試走も実施し、入庫時の状態を漏れなくレコードキープしてから次の分解工程へ移行する。

(2) 分解

2柱リフトで車体を持ち上げフロアアタッチメントを取外し、油水の漏れや部品の不具合などを目視で確認後に、高圧洗浄機にてアンダーボディーの洗浄を行い、蓄積された泥などを洗浄する。お客様が選択したメニューは勿論のこと、選択していない部品についても不具合がないことを1品ずつ慎重かつ丁寧に確認する。お客様が選択していないメニューの部品に不具合が発見された場合は定型の不具合リストに記入、分解時に確認された不具合内容を漏れなく管理する。発見された不具合内容はお客様に提示し、修理の必要性を詳しく説明して対応方法について相談する。お客様が納得し承諾を済ませた上で追加作業として再契約手続きを行う。その後、部品の追加手配、追加作業として分解作業を継続する。希望されるメニュー

内容により交換する部品が異なるが、再使用する部品については内外装の部品を洗浄する。塗装が必要な部品については塗装を施し、見栄えだけでなく防錆処理の意味も含め仕上げ組立工程のタイミングに備える (Fig. 5)。



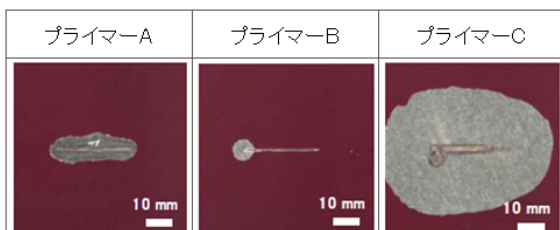
Fig. 5 Problems Discovered Disassembly

(3) 塗装

全部品を取り外したホワイトボディは、シーラーとアンダーコートを当時の設計図面を基に、現在の基準と照合しながら劣化や破損部分を修復する。新品のサービスパーツに交換するフタ物部品においては、現行車と同じプロセスでシーラー施行し、最新の品質基準でお客様へ提供する。

塗装は、経年による色褪せやキズ、汚れ、錆などが全体に及ぶため、当時の塗装範囲を超え、見える範囲全てが対象である。特に外板では、紫外線や外的要因による塗膜の経時劣化を考慮して、オリジナル部品を使用する場合は、旧塗膜を完全除去する。下塗り材料の選定は、マツダ販売会社様やプロショップ様からの情報を基に、複数のプライマー候補の中からレストア作業プロセスを想定したテストピースを作製し、実腐食試験により防錆効果を検証した。プライマー種により耐食性に違いがあることが分かった。Table 1にプライマーの実腐食試験における塗膜腐食剥離の代表T的な事例を示す。プライマー種により耐食性に違いがあることが分かった。

Table 1 Sample of Corrosion Test



また、この車の特徴的な車両サイドの耐チップング塗装では、当時の担当者から生産プロセスや、苦労したことやノーハウを織り込み、トライを繰り返してツブツブ

肌を再現した。こうして上塗り前の下地を作り込む (Fig. 6)。



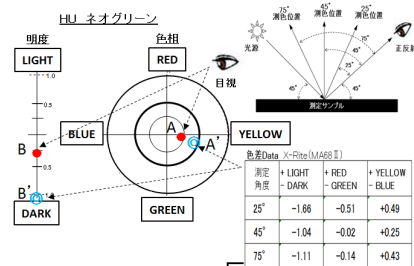
Fig. 6 Before Top Coating

上塗りは、最初に車両をリフトアップし、アンダーフロアをマットブラック色で塗装する。しっかりと乾燥させたのちリフトから降ろし、ボディ色塗装へ進む。室内、トランクルーム、エンジンルームと部品が装着すると隠れてしまうボディ内部から塗装し、外板へと仕上げる。塗装の最後はクリア塗料を全面塗布して完了である。当時、ソリッド色にはクリア塗装の設定はなかったが、耐久性と艶やかさを高めるために採用した。

当時の再現においては、第一印象に深く関わる色味に着目した。幸いにも当時のカラーマスター板が残っていたためそれを目標にした。カラー評価においては、見る時の環境が大きく影響することから目視評価が最優先される。そこで、色評価を専門とするデザインカラーチームと協力しながら、測色計の数値データで補足確認し、現在の原色塗料での最適配合を作り出し忠実に再現した。

Table 2にネオグリーンの調色事例を示す。測定データ0=中心が当時の色を表すが、測定数値では黄色味A'を0に近づけようとするとも度B'がマイナス方向に進む傾向があった。最終的にはこの2要素のバランスに注目し、多角方向の目視評価で最も当時の色に見える配合に決定した。

Table 2 Neo-Green Color Tuning Example



塗装工程の仕上げは、匠の手による表面研磨とポリッシングを行い当時の新車以上の輝きを実現する (Fig. 7)。



Fig. 7 Coating Film Polishing

これらチッピング肌の再現，色味の再現，ランクアップした表面の艶やかさをそれぞれ品質基準として定め，塗装視認用マスター板を作製した（Fig. 8）。これを手元に置き，チェックしながら作業を進めることで，一品一品匠の手により品質の統一を実現した。



Fig. 8 Painting Visual Reference

(4) 組立

塗装工程へ渡す前に，入荷したサービスパーツの外板パネルをホワイトボディーへ組み付け，全ての外板について合い沿いを個々に確認，調整する。出荷部品は量産当時の部品形状と若干差異があり，場合によっては合い沿いが調整しきれない場合がある。そのような場合には外板パネルそのもの，もしくはヒンジ類を変形させるなどして車体全体としてバランスを取るよう合い沿いの合わせ込みし，次の工程である塗装工程へ進める。車体内外の塗装が完成した後に組み立てを開始するが，実際に部品を車体へ取り付けていく場合においても手戻りが発生しないよう，何を最初に組み付けていく必要があるか手順を考え，パーツカタログや整備書を参考に正しい工程で組み立てる。各部品の締付トルクは整備書の数値でトルクレンチを使用し組立工程内チェックシートに記録し抜け，漏れを防止する（Fig. 9）。

整備書には各数値が記載されていない組み付け部位も多々存在する。そのような部位については図面を探し出し記載内容を参照し組み立てる。そのことで，マツダの純正品質で正しく組み立てる。ホイールアライメント数値は担当実研部門からの情報を基にポイントを押さえた

調整でマツダならではの品質を確保する。

Fig. 9 Assembly Process Check Sheet

(5) 完成検査&最終チェック

Fig. 10 Appearance Measurement Result

完成検査は，灯火類などの法的基準の確認と，車体の外観隙間のデータ確認しPhoto Bookへ記載する（Fig. 10）。合わせてダイナミック評価をロードスターアンバサダーの山本修弘氏が担当し，お客様に引渡の時にフィードバック結果をお伝えする（Fig. 11）。

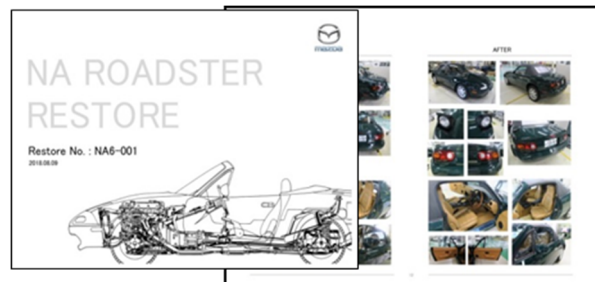


Fig. 11 Photo Book

5. クラシックカーガレージ認証

レストア事業開始にあたり最初に考えたことは、レストアした車が市場で正当に評価され信用されることである。欧州でヒストリックカーの査定や日本の板金修理業界で認証を行っているTUVに相談し、全世界でレストア車の認定制度に着手されているとの情報を得た。

そして、「第三者機関が車の出来上がりを保障する」その認証一号取得を目指した。2年間かけて、受付体制、契約書類の準備、レストア作業場の環境/設備管理の状況、作業者のスキル/教育計画の管理などをTUVの厳しい監査を受け2018年12月1日に世界初クラシックカーガレージ認証を取得した。

今後この認定制度を活用してレストア車の価値向上や車両保険への加入、そしてドイツのような工業文化遺産として扱われ税制優遇が受けられる時が訪れることを願い活動を続けたい (Fig. 12)。



Fig. 12 Certification Document by TÜV Rheinland Japan

6. 復刻部品

レストア検討開始時、量産終了から20年が経過したNAロードスターの部品は約半数が供給不可であった。その中からマツダがレストアをするために必要な部品や、お客様に今後も乗り続けていただくために必要な部品として約170部品を復刻した。専門ショップやユーザーの皆様にご意見をいただいたご意見やご要望を参考に部品を選定し、各部品サプライヤーの皆様にご協力いただき、NAロードスターオリジナルの雰囲気や質感にこだわった以下のような復刻部品を設定した。

復刻ソフトトップは、当時の幌生地（ドイツ製）が入手不可となり、同じ風合いの生地をアメリカから取り寄せ、量産時より厳しい耐久試験をクリアし生まれた商品である (Fig. 13)。



Fig. 13 Soft Top

復刻BS社様製タイヤ (SF-325) 185/60R14は、当時のトレッドパターンや側面デザインだけでなく、乗り味も再現するよう当時の開発者によって作り込みが行われたこだわりのタイヤである (Fig. 14)。



Fig. 14 BS Tire SF325

7. おわりに

レストアサービスを開始し1年が経過した。受付基準が厳しい現状ではあるが50人のお客様より申込みをいただいた。2019年5月時点で3台のレストアを完成し現在4台目に取り組んでいる。マツダは、NAロードスターのレストアサービスやパーツの再供給をとおして、お客さまの人生をより豊かにし、お客さまとの間に特別な絆をもったブランドになることを目指す。そして、お客様とともに古いクルマを大切にす自動車文化の発展に貢献できるよう取り組んでいきたい。

■ 著 者 ■



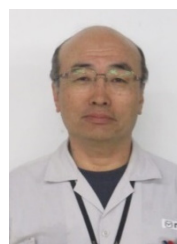
山本 修弘



西田 芳伸



中矢 健次



野村 裕之



伏見 亮



國本 拓也

論文・解説

36

バイオエンブラ新意匠2層成形技術の開発 Development of New-design Two-layer Molding Technology using Bio-based Engineering Plastic

一原 洋平*1
Yohei Ichihara

要 約

マツダはこれまで「環境性」「商品性」「経済性」を両立できるバイオエンジニアリングプラスチックを開発し、現在国内で販売している全ての乗用車の内装意匠部品や外装意匠部品に採用している。今回開発した技術は、更に「商品性」を向上させた技術である。環境に優しく透明性のあるバイオエンジニアリングプラスチックを使用した表層と、基材表面に柄を刻み込んだ基材樹脂との2層成形により、深みのある色合いと精緻感、陰影感など、従来の技術では実現困難な意匠を実現させた。本技術課題は、自動車内装意匠部品に要求される「表面意匠性」「表面意匠耐久性」「機械物性」「生産性」を両立させることであるが、マツダは「材料」「構造」「工法」の3つの因子を用いることで樹脂部品性能をコントロールし、課題を解決することができた。本技術は、新型MAZDA3のシフトパネル、カップホルダーリッドパネルに採用している。今後も引き続き「環境性」「商品性」「経済性」を高いレベルで両立できる新技術開発に取り組んでいく。

Summary

The previously developed bioengineering plastic achieved high “environmental performance”, “marketability” and “economic efficiency”, which has been applied to the interior/exterior design parts of all Mazda vehicles on the Japanese market. This time, a new technology focusing on the “marketability” was developed: two-layered surface-molding composed of bio-engineering transparent plastic placed on the top and pattern-engraved resin at the base generates a rich color, delicate shades/shadows and exquisite appearance, realizing a novel design unachievable by conventional technologies.

The new technology controls the resin part performance utilizing three factors including “material”, “structure” and “method”, and succeeds in a balance-taking between “surface design”, “surface durability”, “mechanical property” and “productivity” required for car interior design parts.

The new technology is applied to the shift panel and cup-holder lid panel of the All-New Mazda3. We will continue to work on new technology development to further enhance all the “environmental performance”, “marketability” and “economic efficiency”.

Key words : Environment, Materials, Design, Polymer Material, Injection Molding, Two-layer Molding, Bio-based Engineering Plastic

1. はじめに

1.1 バイオエンジニアリングプラスチックとは

バイオエンジニアリングプラスチックとは、植物由来原料を用いて製造したエンジニアリングプラスチックのことである (Fig. 1)。マツダが開発したバイオエンジニアリ

ングプラスチック (以下、バイオエンブラ) は、「透明性」「耐傷つき性」「耐光性」に優れた特徴を持っている。これまで、バイオエンブラの特徴を活かした内外装意匠部品の無塗装化技術開発を行い、材料のもつ優れた環境性能だけでなく、従来の塗装では実現できない高質感と、従来塗装工程廃止による環境貢献及びコスト改善を実現する

*1 装備開発部
Interior & Exterior Components Dept.

ことができた。バイオエンブラは、2015年にロードスターの内装意匠部品に初めて採用して以来、現在国内で販売している全ての乗用車の内装意匠部品や外装意匠部品に採用している。その過程で、当初のロードスターのカップホルダーリングの小型内装意匠部品から、現在はCX-5のフロントグリルの大型外装意匠部品に採用できるようになるまで、技術を進化させてきた。

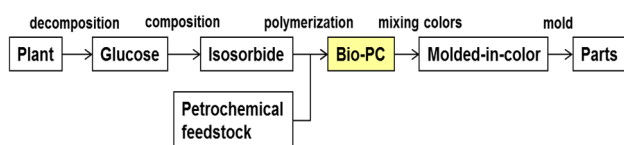


Fig. 1 Production Process

1.2 本技術の特徴

本技術は、環境に優しく透明性のあるバイオエンブラを使用した表層樹脂と、基材表面に柄を刻み込んだ基材樹脂との2層成形により (Fig. 2)、深みのある色合いと精緻感、陰影感など、従来の技術では実現困難な意匠を実現させながら、環境負荷の低減を可能にする技術である。

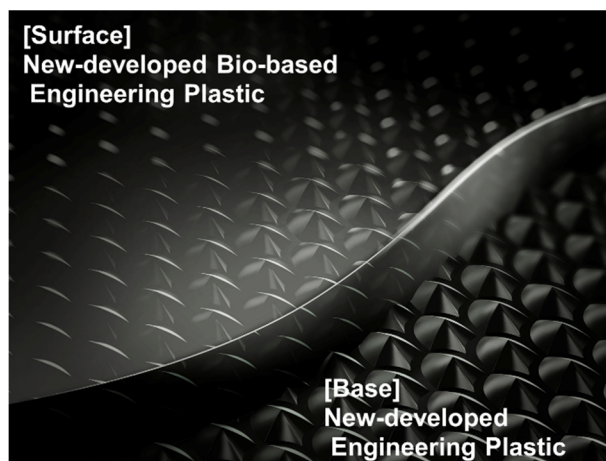


Fig. 2 Schematic Illustration

(1) 環境性

植物由来原料を使用していることからCO₂排出量の削減や石油資源使用量の削減、更に塗装工程廃止によるVOCの削減により、優れた環境性能に貢献することができる。

(2) 商品性

本技術は、これまでのバイオエンブラ技術の商品性を更に向上させたもので、従来技術では実現困難な意匠を実現できる技術である。具体的には、深みのある色合いを持ちながら光を受けると精緻な柄が浮かび上がる新しい仕立てで2層構造となっている。表層を形成するカラークリア層はまっすぐ光を透過・減衰させ、基材を形成するブラックメタリック層の表面に柄を刻み込み、入ってきた光を反

射・吸収させることで、黒の精緻さと深みのある透明感を両立させることができる。

(3) 経済性

本開発材料を着色し2層成形することで、従来技術である塗装やフィルムでは実現困難な新しい仕立てを実現することが可能となり、従来必要だった塗装工程やフィルム工程などの製造工程を廃止することで、部品レベルでコスト改善に貢献することができる。

2. 技術課題

技術課題は、自動車内装意匠部品に要求される「表面意匠性」「表面意匠耐久性」「機械物性」「生産性」を両立させることである。それぞれの代表的な要求性能として、表面意匠性は「深みのある色合い」と「精緻感と陰影感」、表面意匠耐久性は「耐光性」と「耐傷つき性」、機械物性は「耐衝撃性」と「耐熱性」、生産性は「成形性」と「生産効率性」などがある。従来であれば、これらの要求性能を塗装やフィルム、基材の樹脂で満足させてきた。しかしながら、今回目指した表面意匠性は深みのある色合いを持ちながら光を受けると精緻な柄が浮かび上がる新しい仕立てである。従来の塗装では表面の平滑感を保ちながら精緻感を実現させることが困難であり、従来のフィルムでは深みのある色合いと精緻感を両立させることが困難であった (Fig. 3)。

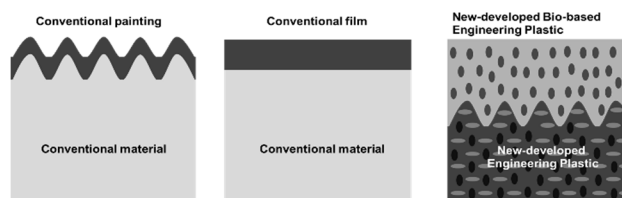


Fig. 3 Conventional-Technology / Developed-Technology

3. 解決手段

樹脂部品性能に大きな影響を与える因子として、「材料」「構造」「工法」があり、これらの3つの因子を用いることで、樹脂部品性能をコントロールすることができる。今回は、Table 1のように、材料からのアプローチとして「表層樹脂の最適化」「基材樹脂の最適化」、構造からのアプローチとして「表面構造の最適化」「断面構造の最適化」、工法からのアプローチとして「2層成形技術」「金型仕様の最適化」を行うことで、「表面意匠性」「表面意匠耐久性」「機械物性」「生産性」の要求性能の両立を図った。

今回は、表面意匠性の実現にポイントを絞って紹介する。

Table 1 Required Performance & Approach

		Required Performance				
		Surface Design	Surface Durability	Mechanical Property	Productivity	
		Color-depth, Refinement, shade & shadow	Fading-resistance, Scratch-resistance	Impact-resistance, Heat-resistance	Moldability, Production-efficiency	
Approach	Material	Surface material	highly effective	highly effective	highly effective	highly effective
		Base material	highly effective	highly effective	highly effective	highly effective
	Structure	Surface structure	highly effective	highly effective	effective	highly effective
		Cross-section structure	highly effective	highly effective	highly effective	highly effective
	Method	Two-layer injection molding technology	highly effective	effective	effective	highly effective
		Mold specification	highly effective	effective	effective	highly effective

3.1 表面意匠性

深みのある色合いを持ちながら光を受けると精緻な柄が浮かび上がる新しい仕立てを実現させるには、正反射付近（ハイライト部）で緻密な柄が浮かび上がり、それ以外の部分（フェース～シェード部）では漆黒になる必要がある。しかしながら、これを樹脂の単層で実現させることは困難である。そこで、光を透過・減衰させる「表層」と、光を反射・吸収させる「基材」に機能を分担させることで実現を図った（Fig. 4）。

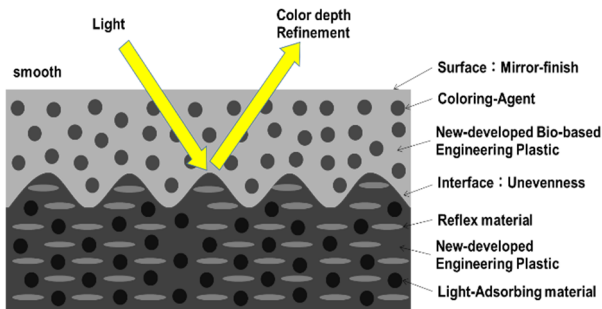


Fig. 4 Developed-Technology

(1) 材料からのアプローチ

材料からのアプローチとして、「表層樹脂」と「基材樹脂」に着目し、各層の樹脂の光学特性をコントロールすることで、「深みのある色合い」と「陰影感」の実現を試みた。基材樹脂については、光輝材を配合することでハイライト部での強い反射を実現し、それに加えて光吸収剤を配合することでそれ以外の部分での強い吸収を実現させた。基材に光輝材を配合することで耐衝撃性が大幅に低下するが、新開発エンブレにより、意匠性と機械物性を両立させた。表層樹脂については、樹脂自体を高透明にすることでハイライト部での透過を実現し、着色剤を高分散させることでそれ以外の部分での減衰を実現させた。

今回の意匠のポイントとなる基材樹脂の反射特性についてもう少し詳しく説明する。Fig. 5に、基材樹脂の着色処方のみを変えた3つのサンプルの受光角度と輝度の関係を

示す。サンプル1は光吸収剤を処方した黒調のサンプルで、シェード、フェース、ハイライトで輝度が全く上がらない波形を示した。サンプル2は酸化チタンを処方した白調のサンプルで、輝度自体の絶対値は高くなっているものの、シェード、フェース、ハイライトで輝度の変化のない波形を示した。サンプル3は光輝材を処方したメタリック調のサンプルで、シェードからフェースまでは輝度が低いが、フェースからハイライトにかけて輝度が急激に高くなる波形を示した。このように、基材樹脂に光輝材を配合することでハイライト部での強い反射を実現し、それに加えて光吸収剤を配合することでそれ以外の部分での強い吸収を実現させた。

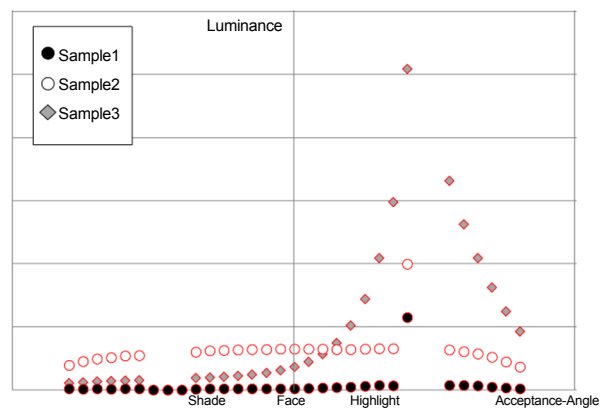


Fig. 5 Luminance / Acceptance-Angle

(2) 構造からのアプローチ

構造からのアプローチとして、「表面構造」と「断面構造」に着目し、構造で光をコントロールすることで、「深みのある色合い」「精緻感」「陰影感」の実現を試みた。

今回の意匠のポイントになるのが表面構造であり、「表層表面の微細形状」と「基材表面の凹凸形状」がある。表層表面の微細形状については、鏡面のような平滑感を実現することで、表層表面で光が乱反射することなく、光を基材表面まで透過・減衰させるようにすることで深みのある色合いを実現させた。基材表面の凹凸形状については、柄の高さや傾斜角度などで光の反射をコントロールすることで、精緻感と陰影感を実現させた。Fig. 6とFig. 7に柄と輝度の関係を示す。サンプル1は光吸収剤を処方した黒調のサンプルで、基材表面が鏡面では輝度の変化が全くないが、凹凸形状を設けることで輝度に変化しているのが確認できた。サンプル2は光輝材を処方したメタリック調のサンプルで、凹凸形状を設けることで、サンプル1以上に輝度の変化が大きいことが確認できた。このように、材料に加えて、構造からも光の反射をコントロールすることで、精緻感と陰影感を実現させた。

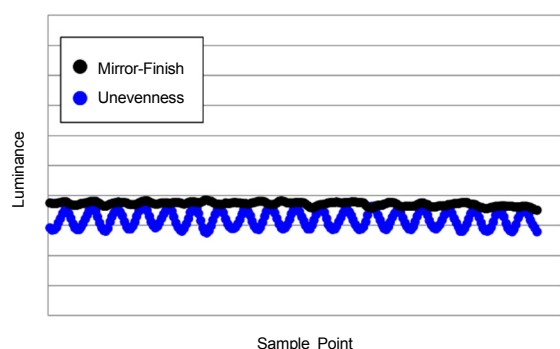


Fig. 6 Luminance of Sample 1 [black]

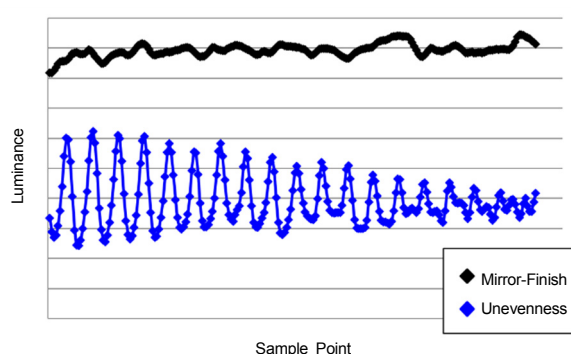


Fig. 7 Luminance of Sample 2 [metallic]

(3) 工法からのアプローチ

工法からのアプローチとして、「金型仕様」と「2層成形条件」に着目し、金型内の樹脂流動をコントロールすることで、「深みのある色合い」「精緻感」「陰影感」の実現を試みた。

金型仕様として、金型内の樹脂流動解析を行うことで、樹脂の流れ方や圧力分布や温度分布などの検証を行い、金型内のゲート、ランナー、リップ形状などの最適化を行った。

更に2層成形条件として、今回開発した表層樹脂と基材樹脂のそれぞれの特徴と、表層と基材それぞれの成形不良のメカニズムをしっかり把握し、可塑化条件や射出条件などを最適化して、樹脂の熱劣化や金型流動中の樹脂のせん断力を抑制することで、成形不良を抑え、深みのある色合いと精緻感と陰影感を実現させた。

4. 結果

表層を形成するカラークリア層はまっすぐ光を透過・減衰させ、基材を形成するブラックメタリック層の表面に柄を刻み込み、入ってきた光を反射・吸収させることで、黒の精緻さと深みのある透明感の両立を可能にさせた。光が当たらないときは、精悍で艶やかな漆黒のパネル。しかしひとたび光を受ければ奥底から柄が浮かび上がり、精緻さと透明感が際立つなど、まるで光の移ろいでリニアに表情

を変化させていくエクステリアの造形のように豊かな表情を見せるパネルを実現することができた。

5. おわりに

本技術は、新型MAZDA3のシフトパネル、カップホルダーリッドパネルに採用しており (Fig. 8) , CX-30のシフトパネル、カップホルダーリッドパネルにも採用している。

今後も引き続き「環境性」「商品性」「経済性」を高いレベルで両立できる新技術開発に取り組んでいく。

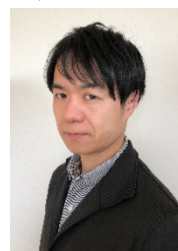


Fig. 8 All-New Mazda3

参考文献

- (1) 一原：無塗装・高質感の内外装意匠部品用バイオエンジニアリングプラスチックの開発，[マツダ技報，No.33, pp.78-82 \(2016\)](#)

■ 著 者 ■



一原 洋平

論文・解説

37

車両を運転する人間の姿勢変化の観察に基づく考察 Consideration Based on Observation of Human Posture Change to Drive Vehicle

徳光 文広*1 鐵本 雄一*2
Fumihito Tokumitsu Yuichi Tetsumoto

要約

お客様が車両を運転操作した際に、「こう動かしたい」と描いたイメージと車両の応答や挙動が一致することで得られる達成感や高揚感によって、適度に脳を活性化させて元気にする。加齢に伴う脳や身体の変質の傾きも鈍化させる人間中心開発に取り組んでいる。お客様がこう動かしたいと描いたイメージと車両の応答や挙動が一致している状態を「理想の状態」「達成感を得た良い状態」として定義し、この理想の状態を実現できる設計諸元を最高の生産効率で導出する手段としてModel Base Development (以下、MBD)を活用している。理想の状態を実現できる設計諸元を導出するためには、まず設計諸元と運転操作の因果関係を解明する必要がある。ドアの開閉においてもボタン操作においても、上腕だけの局所的な運動に留まらず全身運動を伴うため、人間の運動行動の網羅的な定量化が必要となる。

本稿では、設計諸元と運転操作の因果関係を解明する前段階として、車両を運転する人間の全身運動を網羅的に定量化する計測技術および分析技術を開発して、人間の運動行動の本質を観察した結果を報告する。

Summary

When driving a car, if vehicle's responses /behaviors match driver's vehicle motion image, the driver feels a sense of achievement and exaltation, which activates the driver's brain and vitalizes him/her. Mazda's human-centered vehicle development focuses on slowing down the aging of human body including the brain. The status that driver's intended vehicle motion matches vehicle responses and behaviors is defined as an ideal status that gives a sense of achievement to the driver. MBD is used as a means to achieve design specifications to realize the ideal status with the highest production efficiency.

For the human-centered vehicle development, a causal relationship between the design specifications and driving operations needs to be clarified. For example, to open/close a vehicle door and operate switches, the driver uses not only his/her upper arm but also upper body or even full body. Therefore, the exhaustive quantifications of human's motor behaviors are necessary. As a preliminary step, we developed measuring and analysis technologies to exhaustively quantify the changes in driving position. This paper introduces the result of the observations of the nature of human's motor behaviors, which obtained by using the technologies.

Key words : Human Engineering, Driving Ability, Behavior Observation, Human-centered Development

1. はじめに

ひと昔前であれば高価のため安易に購入できなかった車両や携帯電話などの製品も、現在では生産効率の向上に伴い低価格化が進み所有していることが当たり前となり、日常生活の一部になっている製品も多い。これらの製品の市

場は爆発的に拡大し、市場獲得に向けた競争は激化の一途を辿っている。

この市場ニーズに対応するため、性能を向上させながら低価格化する矛盾を解く技術開発に各社がしのぎを削り、高性能でありながら低価格で商品を提供して来たものの、頭打ち感や横並び感のある昨今では、独自性や利便性など

*1 ボデー開発部
Doors & Lids Development Gr.
(2019.8.23時点)

*2 エンジニアリングシステム部
Engineering Systems Dept.

の付加価値が市場を獲得する大きな要素となっている。この中で、使い手に達成感や高揚感を提供することを目的とする人間中心開発は大きな付加価値になると考える。人間中心開発の具体化にあたり、人間がどのようなシーンでどのように動こうとしているのかを明らかにする技術と、表面的な動作と内面的な意図や心理状態そして人間の感覚機能に入力される物理量の元になる設計諸元との因果関係を解いて人間の動きを支援する設計諸元を導出できる技術が必要であると考えた。

本稿では、人間がどのようなシーンでどのように動こうとしているのかを明らかにする試みを行った結果を報告する。まず、評価対象の選定と評価方法に対する考え方について述べる。次に適用事例を示す。

2. 評価対象の選定

2.1 選定条件

お客様が、車両に近づきドアを開けて乗車もしくは荷物を積み込む等から始まる出発地点から目的地点までに行う一連の動作は多種多様であり、基礎研究の段階からこれら全てを研究対象にすることは合理性に欠ける。

そこで、人間の本質が顕在化される無意識運動つまり記憶した運動行動計画プロファイルをトレースする動作であること。行動開始から0.5秒後に行われるとされる運動行動計画プロファイルの修正要否を判断するフィードバック情報及び人間挙動のメリハリがしっかりしていること。これらを実験対象の選定条件とし整理した模式図をFig. 1に示す。操作量を観測すれば運動行動計画プロファイルの修正要否の判断状況が推察できる。人間挙動を観測すれば運動行動計画プロファイルの修正要否の判断に至る要因系を推察できる。

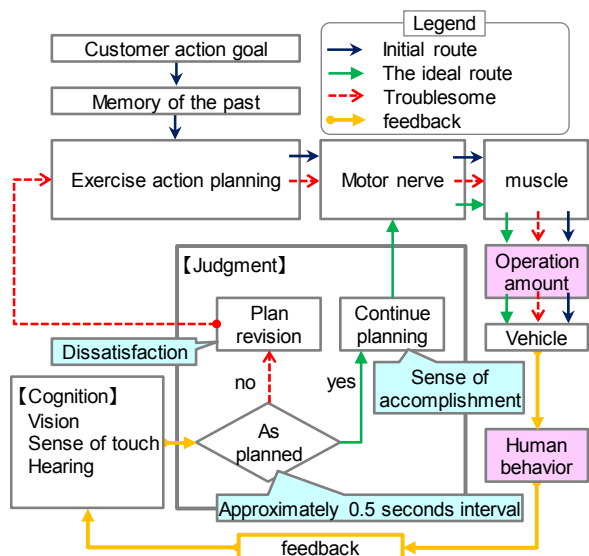


Fig. 1 Human Behavior

既知の知見として、信号が赤から青に変わるもしくは前

の車両が動き始めると、ブレーキからアクセルに踏みかえるが、アクセルの踏み込み量は無意識であり車両が動き始めた後に、足りなければ踏み足し多ければ踏み込み量を減らしている。ハンドルも同様で、初期舵角は無意識であり車両が曲がり始めた後に、足りなければ切り足し多ければ舵角を緩めている。Fig. 2に示すこれらの人間特性は誰もが知り共感できるため、人間の本質を明らかにする今回の試みに適している。

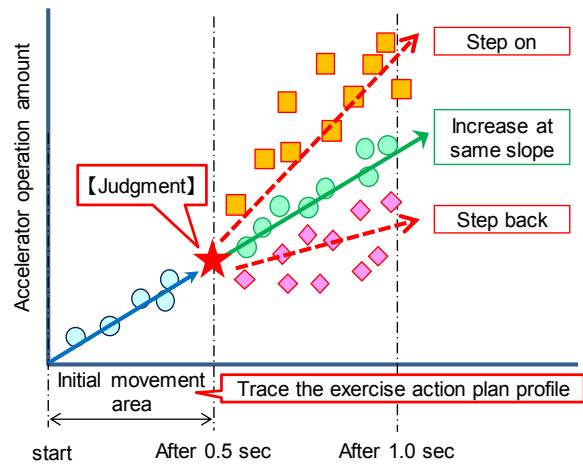


Fig. 2 Change of Exercise Action Plan

Fig. 3に示すように、人間は前方向に倒れそうになると後方へ重心を移動しようとし、右方向に倒れそうになると左方向へ重心を移動しようとする。その際に立っていると足で踏ん張り、座っていると足と腰で踏ん張っている。これも一般的に知られている動物の本能であり、動かす部分と踏ん張る部分の役割分担をした全身運動である。人間がどのようなシーンでどのように動こうとしているのかを明らかにすることは、人間が動物として普遍的に備えている機能の本質を明らかにする本研究の目的である。そこで、車両から、前後、左右、上下方向への加速度を受けながら直進加速や旋回といった運転操作を行う人間の挙動を評価対象とした。

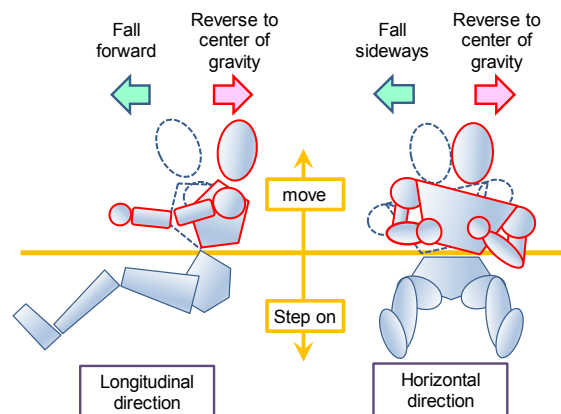


Fig. 3 Human Posture Change

2.2 評価範囲

人間の挙動から運動動作に関する人間の本質を抽出するためには、被験者固有の癖や好みが計測値に入り込まないように工夫する必要がある。前述したように、信号が赤から青に変わるもしくは前の車両が動き始めるとアクセルを踏み込んでいるが、頭の中で電卓を叩きながらアクセル踏み込み量を算出している訳でも、メジャーで測りながらアクセルを踏み込んでいる訳でもない。車両を運転する誰もが普遍的かつ自然に行っている動作であり、これくらいの力加減でアクセルを踏み込んだら、これくらいの加速度を得たという過去の記憶の中から、今回のシーンに適した加速度が得られそうな力加減を無意識に選択し、選択した力加減を無意識にトレースしてアクセルを踏み込んでいる。

これらを整理した模式図をFig. 4に示す。人間が無意識にアクセルやハンドルを操作する時間を0.5秒と仮定し、操作を開始する0.5秒前から無意識操作を終えてから0.5秒後のトータル1.5秒間に注目して、アクセルとハンドルの操作及び人間の挙動を評価することとした。

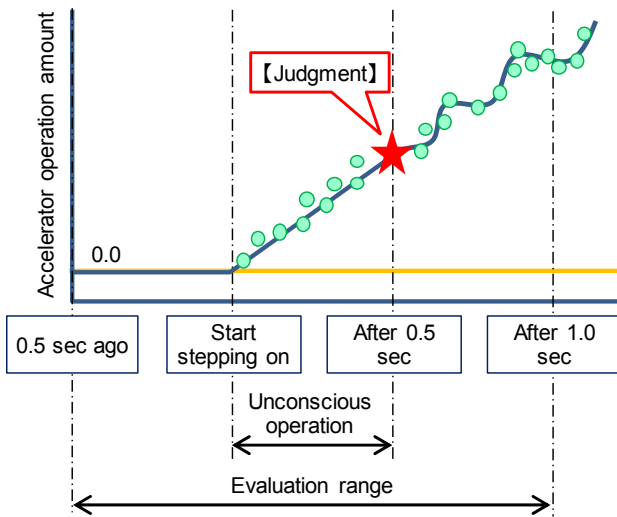


Fig. 4 Memory Trace and Motion Correction

評価方法

3.1 計測手段

人間の挙動を計測する際に多く用いられている光学式モーションセンサーは、被写体に取り付けたマーカがカメラの視野に入っていることが必須条件である。この計測技術を、本稿で紹介する車両を運転する人間の挙動の計測に適用する場合、車室内にカメラを設置する必要がある。しかし、カメラを設置する車室内は遮蔽物も多いため、被写体に取り付けたマーカを漏れなく捕捉し続けられる位置にカメラを設置することは困難を極める。加えて、カメラとマーカの相対位置からマーカの空間座標を導出しているため、カメラの位置が変化しないことも必須条件になっている。しかし、走行中の車体は絶えず変形し振動してい

るため、車体に固定されているカメラの位置も変化している可能性も高くなり、計測精度に影響を与えている可能性を否めない。

これらの課題に対し、身体に密着するスーツに嵌め込まれたセンサー同士の相対位置によって挙動を導出する方式となるウェアラブルモーションセンサースーツであれば、カメラの設置場所を気にする必要がなく、走行中の車体の変形も気にする必要がない。その一方で、人間や動物の脊柱は多関節によって構成され直立時に加わる負荷を分散するため、側面から見ると、緩やかなS字になっていることが知られている。この機能に着目し表面的な挙動の基になっている骨格の動きを可視化することとした。具体化にあたり、ウェアラブルモーションセンサースーツの計測結果を基に逆運動学解析を行えば、脊柱に留まらず、頭部や手足など全身の骨格の動きを網羅的に可視化できる。これらのシステム構成をFig. 5に示す。

ウェアラブルモーションセンサースーツはXsens MVNを使用し、逆運動学解析はnMotion muscularを用いることとした。

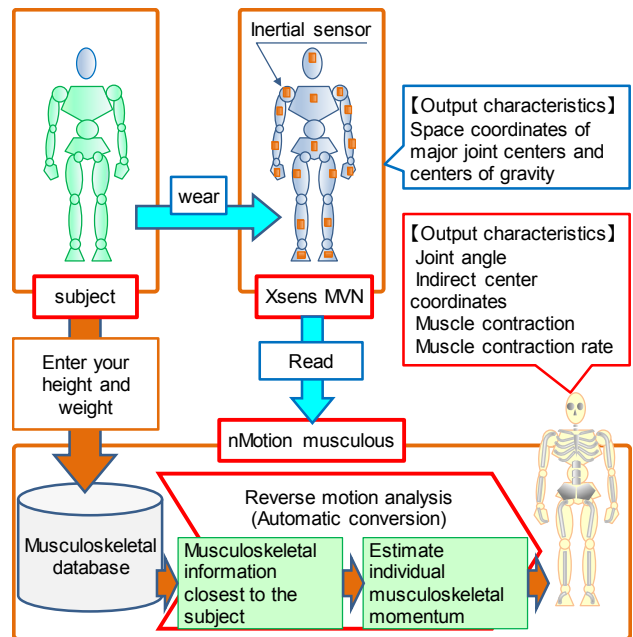


Fig. 5 System to Measure whole Body Movement

3.2 評価仕様

人間が動物として普遍的に備えている機能の本質を明らかにすることが本研究の目的であるから、匠でなければ感じ取れない微小な物理量の差になる仕様違いだと意味が無い。一般人でも違いがハッキリと分かる仕様違いを用意する必要がある。しかし、試験路を変えたり車両を変えたのでは意味がない。日時、試験路、車両、被験者を固定し、アクセル操作とハンドル操作に共通して大きく影響を与えるユニットの中からシートを選定し、誰もが「良かった」

と感じた仕様と、誰もが「普通」と感じた仕様を用意して、実機評価を試みることにした。

3.3 評価モード

市場でお客様に使って頂いている状況を対象にすべきだが、本稿で紹介する内容は基礎研究を対象としているため、外乱を最小とし人間が車両を運転する過程における運動する本質を抽出することを目的に、整備された試験路にて実験を行った。実験結果の中から代表的な走行モードとして加減速操作と旋回操作を選定した。

4. 実験結果

4.1 直進加速

10km/h定常走行から30km/hまで、0.2G狙いで直進加速を行った。直進加速にあたりアクセルを踏み込むために必然的に動かざるを得ない右足周り以外に顕著な挙動を示した脊椎に着目し観察を行った。

当初の計画では、操作を開始する0.5秒前から操作開始後1.0秒までを評価対象としていたが、操作を開始する0.5秒前には既に加速Gに備えて前景姿勢をとっており、加速Gが抜ける操作開始から後5.0秒後には脊椎の関節角度が、ほぼ定常走行中の状態に復帰していることが確認されたため、全体像を把握することを目的に評価範囲を加速開始1.0秒前から加速開始後5.0秒まで拡大した。

Fig. 6は、加速開始1.0秒前を基準とし脊椎の前後方向の関節角度の時刻歴変化を示す。

この中でシートの仕様に関わらず、加速開始0.5秒前には同量程度の前傾姿勢を取っていることに着目し、被験者に確認したところ無意識であったことから、本能的な加速Gに備えた予備運動を行っているかと推察できる。

4.2 直進加速とアクセルペダルの操作量

10km/h定常走行から30km/hまで、0.2G狙いで直進加速を行った過程のアクセルペダル操作量の時間経過をFig. 7に示す。

直進加速にあたりアクセルペダルを踏み込むために足首が動き始めた瞬間を基準つまり0.0秒とし、シートの仕様が異なってもアクセルペダル操作量が一定になり始める1.5秒間の右足首角度の変化量を示す。アクセルペダル操作量だけを観察すると、アクセルペダル操作量が増加する傾きについて、シートの仕様違いによる差異はあるものの、線形性には顕著な差異が認められない。しかし「普通」と言われているシート仕様1は「アクセルペダルが踏み難い」「良い」と言われているシート仕様2は「アクセルペダルが踏み易い」という官能評価には普遍性があるため、実測値の観察の仕方や考え方を工夫する必要があると考えた。

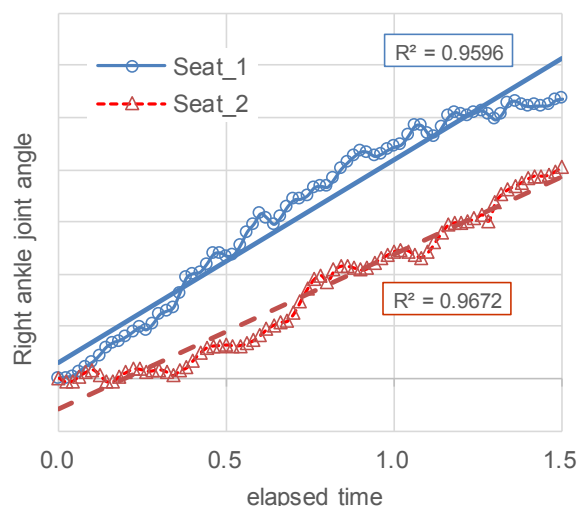


Fig. 7 Relationship between Time and Right Ankle

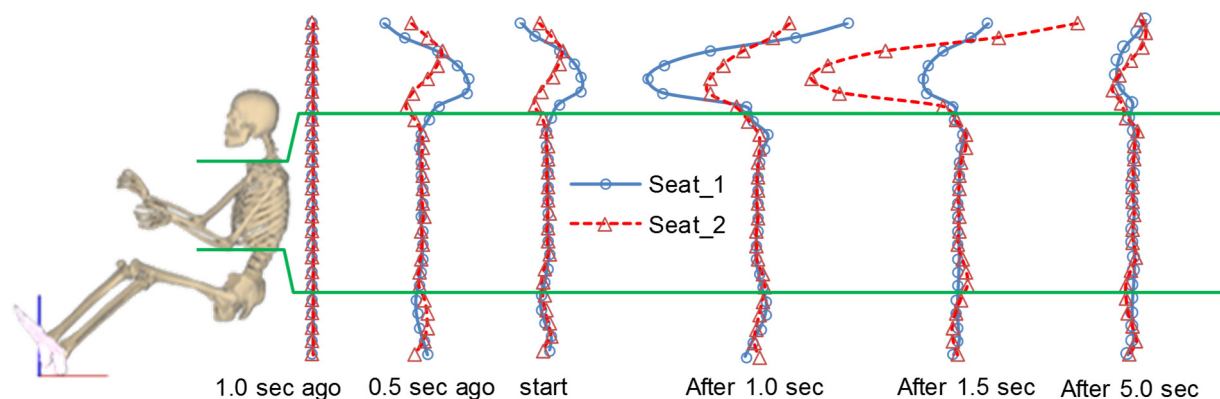


Fig. 6 Joint Angle in Anteroposterior Direction of Spine

4.3 直進加速と右股関節の角度

アクセルペダルを踏み込むために人間はどのように動く必要があるのかを考えた場合、着座及び踵を支点に足首に回転運動をさせる前提では、右股関節を動かすことが最も合理的となる骨格に着目した。前項に示した1.5秒間の右足首角度の変化量と同条件にて右股関節角度の変化量をFig. 8に示す。「普通」と言われるシート仕様1は、加速開始0.5秒以降の右股関節角度が振幅運動しており最小二乗誤差（以下R2）も約0.6であり線形性が損なわれている。「良い」と言われるシート仕様2は、加速開始0.5秒以降も右股関節角度が一定の傾きでありR2も約0.9であり線形性が保たれている。これらを考察すると、シート仕様1は描いたイメージどおりに動いていないと脳が判断し補正が入り、シート仕様2は描いたイメージどおりに動いていると脳が判断し計画を続行したと考えられる。

右股関節角度と右足首角度の関係を見ると、シート仕様1よりもシート仕様2の方が2倍近いR2の値つまり高い加法性を示しており体の中心から足先に向けた運動のリレーが安定して行われていることを示している。意のままに車両を扱うためには、人間自身が意のままに動ける必要がある。

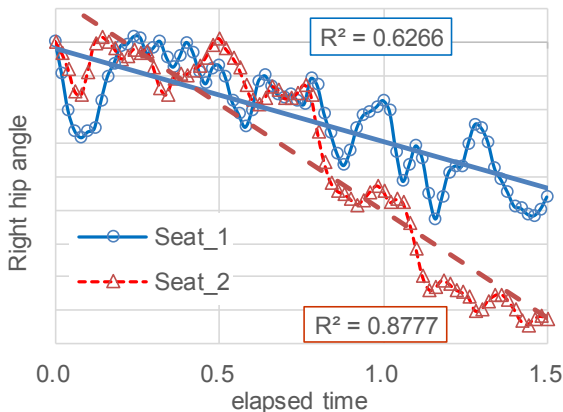


Fig. 8 Relationship between Time and Right Hip

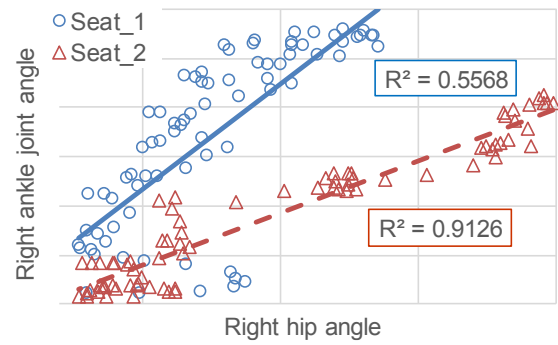


Fig. 9 Relationship between Right Hip and Right Ankle

4.4 旋回と脊椎の関節角度

30km/h一定速度にて連続的に右旋回から左旋回を行った。旋回にあたりハンドルを操作するために必然的に動かざるを得ない上腕以外に顕著な挙動を示した脊椎に着目し観察を行った。当初の計画では、操作を開始する0.5秒前から操作開始後1.0秒までを評価対象としていたが、直進加速と同様に操作を開始する0.5秒前には既に横Gに備えた予備運動を開始し、旋回を終え横Gが抜ける操作開始から後15.0秒後には脊椎の関節角度が、ほぼ定常走行中の状態に復帰していることが確認されたため、全体像を把握することを目的に評価範囲を旋回開始1.0秒前から旋回開始後15.0秒まで拡大した。Fig. 10は、右旋回開始1.0秒前を基準とし脊椎の左右方向の関節角度の時刻歴変化を示す。シートの仕様に関わらず、操舵開始0.5秒前には同方向かつ同程度に腰椎を動かしている。被験者に確認したところ無意識であったことから、横Gに備えた予備運動であると推察した。その一方で、右旋回を終え舵角がゼロになった瞬間の腰椎に着目するとシート仕様1は腰仙関節角度が大きくなり直進安定域に入っても残っている。被験者に確認したところシート仕様1は旋回すると着座位置が動き座り直しを要すが、シート仕様2は旋回しても着座位置が動かず座り直し不要とのことから、旋回後の座り直しは覚醒運動であり労力も伴うため、煩わしさが顕著に感じられるためと推察した。

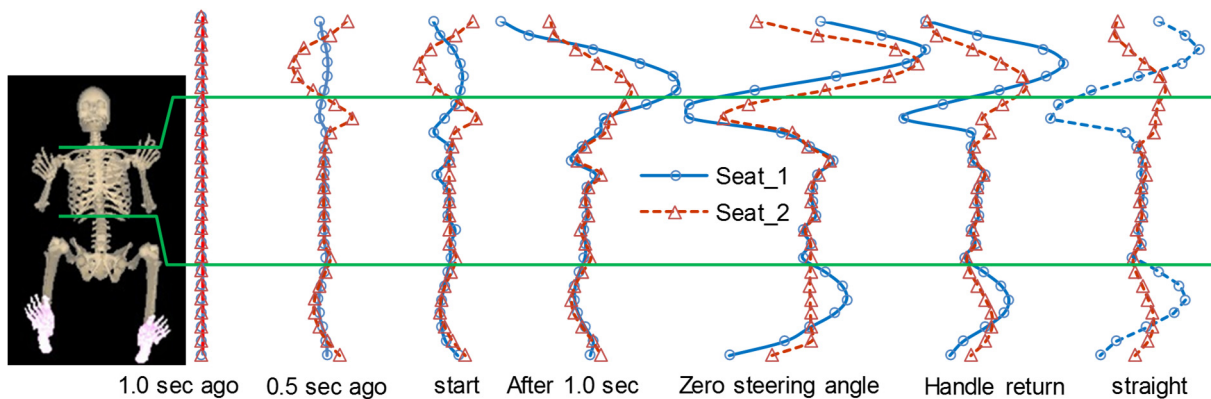


Fig. 10 Joint Angle of Lateral Direction of Spine

4.5 旋回と腰仙の関節角度

ハンドルを回転させるために人間がどのように動く必要があるのかを考えた場合、着座姿勢を前提にすると骨盤を支点に上体を左右方向に回転させることが最も合理的となる人間の骨格に着目した。直進加速と同様に操作対象物に接している上腕の動きにはシートの仕様違いによる差異は確認できなかった。顕著な差異が確認できた腰仙関節角度について旋回開始から1.0秒間の時刻歴変化をFig. 11に示す。0.5秒以降の変遷に着目すると「普通」と言われるシート仕様1は、全域にわたり顕著な振幅が発生しているが、「良い」と言われるシート仕様2はなだらかな放物線を描いている。

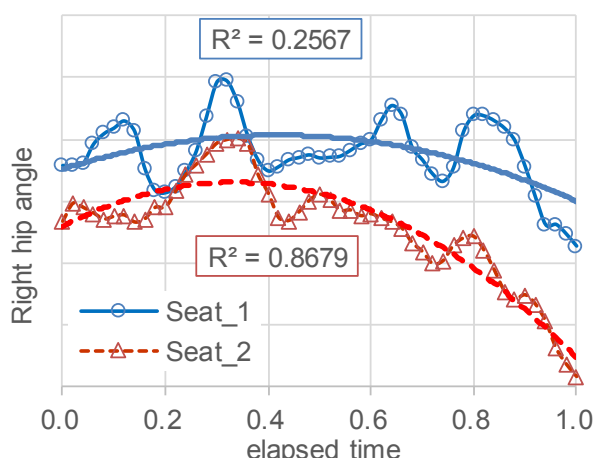


Fig. 11 Joint angle of Lumbar Sac in Left and Right Direction

4.6 直進加速と旋回に共通する傾向

衆多が「普通」と評価するシート仕様1は加速Gが抜けた直後の姿勢と定常走行中の姿勢の差が大きく、衆多が「良い」と評価するシート仕様2は加速Gが抜けた直後の姿勢と定常走行中の姿勢の差が小さい傾向にある。初動域はシートを替えても、アクセルやハンドルの操作量に変化がないが人間の挙動に差異が発生していた。同一の目標であれば運動行動計画も同一となり、初動域における操作量も同一であった。足首角度の変化は同一だが、姿勢が崩れることで、アクセル踏み込み量に差異が発生し、車両の加速度が変化し狙いの加速度を得るために操作量の補正が入る。

切り返しにおける人間挙動の差異が最も顕著であった。初回の操舵による横Gによって崩された姿勢が定常走行中の姿勢に復帰する前に切り返しを行うため、窮屈な姿勢のまま反対方向からの横Gに耐えながら狙いの操舵量を達成することは容易ではないと考えられる。

おわりに

コースや車両や人を固定し、直進加速と旋回といった走

り方のみ変更し、人間の全身の姿勢変化を時刻歴で観察することで、直進加速や旋回が終了した時点で最小の運動エネルギーで定常走行中の姿勢に復帰できるように、直進加速や旋回による姿勢変化に備えて予備運動を行っていることが分かった。直進加速や旋回によって姿勢が崩されないようにバランスを取る中で、動かす部分と踏ん張る部分で役割分担を行っていることも分かった。加えて、被験者にヒヤリングした結果からも、直進加速や旋回が終わり、Gが抜けた時点で、定常走行中の姿勢に復帰できていることが望ましいとの知見を得た。

これらのことから、予備運動の方向と量を観察していると、どのように動こうとしているのかを推察可能であり、お客様がこう動かししたいと描いたイメージどおりに運転操作ができると、姿勢の補正量が小さくなることも解った。よって、姿勢の補正量を小さくする設計諸元を見つけることが「人間中心開発」の具体化になるとの方向性も得た。

本稿で紹介した事例は、直進加速と旋回といった車両を運転する際の基本的な人間の動作を観測対象とし、自動車試験場というクローズドされた環境下における基礎研究の範囲に留まる。しかし、ドアを開けて乗車もしくは荷物を積み込む等から始まる出発地点から目的地点までの間に行う一連の動作全てにおいても、共通して使える技術であり、分野を超えて全体像を描き網羅的かつ効率的に因果関係を解いて適正な方向性を示すMBDという手法を基礎技術開発に応用した事例でもある。

その一方で、ロボティクスの分野では統計学的な機械学習を用いて人間の運動行動計画を予測する技術の開発が進み、人間と協業するロボットが開発され実用化もされている。これらの技術と今回の試みによって得られた知見を連携し、車両を運転すればする程に適度に脳が活性化されて人間が元気になる。加齢などに伴う脳や身体の劣化の傾きも鈍化させる「人間中心開発」の具体化を加速させて、豊かな社会造りに貢献して行きたい。

参考文献

- (1) 田口玄一：田口玄一論説集<第三巻>，日本規格協会，P413-438 (2012)

■ 著 者 ■



徳光 文広



鐵本 雄一

論文・解説

38

G-Vectoring Control Plus の開発 Development of G-Vectoring Control Plus

梅津 大輔*1 高原 康典*2 砂原 修*3
Daisuke Umetsu Yasunori Takahara Osamu Sunahara
加藤 史律*4 津村 和典*5
Fuminori Kato Kazunori Tsumura

要 約

車両の横加加速度に基づき、前後加速度制御と直接ヨーモーメント制御を連係させる G-Vectoring Control Plus を開発した。本制御技術はエンジン駆動トルク制御とブレーキ制御を用いており、旋回中のヨー、ロール、ピッチ姿勢の過渡的な動きをスムーズに連係させることで、ドライバーの運転操作を安定化し、車両限界性能を向上することができる。

Summary

G-Vectoring Control Plus developed for mass production integrates longitudinal acceleration control and direct yaw moment control based on lateral jerk information. The integrated-control-system uses engine torque control and brake unit, improving smoothness in transition between yaw, roll and pitch attitudes of a vehicle at turning. This stabilizes driver's steering operations and enhances vehicle's limit handling performance.

Key words : Vehicle Dynamics, Driving Stability, Chassis Control, Driver Model

1. はじめに

減速・旋回・加速という車両の各運動を連係させることが運転の楽しさや安心感といったダイナミクス性能の質感を論じる上で非常に重要であり、マツダはこれまでに横運動に対して前後運動を連係させる G-Vectoring Control (GVC) を高応答エンジンで実現した⁽¹⁾⁽²⁾。

GVCはドライバー操作による横加加速度情報に基づいてエンジン駆動トルクを緻密に制御し、旋回初期の車両横運動と前後運動をスムーズに連係させ、一般走行領域から限界域におけるドライバーの運転操作負担を低減した。

今回、新たにGVCの進化版として、同じ制御則を用いて旋回後半に直接ヨーモーメント制御を加えることで、中高G領域の車両安定性を向上させる G-Vectoring Control Plus (GVC Plus) を開発したので報告する。

2. GVC Plus の概要

GVCとGVC Plus の制御則を式(1), (2)に示す。

$$\begin{cases} G_{xc} = -\text{sgn}(G_y \cdot \dot{G}_y) \frac{C_{xy}}{1+T_s} |\dot{G}_y|, (-\text{sgn}(G_y \cdot \dot{G}_y) < 0) \\ G_{xc} = 0, (-\text{sgn}(G_y \cdot \dot{G}_y) \geq 0) \end{cases} \quad (1)$$

$$\begin{cases} M_{zc} = -\text{sgn}(G_y \cdot \dot{G}_y) \frac{C_m}{1+T_s} |\dot{G}_y|, (-\text{sgn}(G_y \cdot \dot{G}_y) > 0) \\ M_{zc} = 0, (-\text{sgn}(G_y \cdot \dot{G}_y) \leq 0) \end{cases} \quad (2)$$

ここで、 G_{xc} はGVCの前後加速度指令値であり、車両の横加加速度 \dot{G}_y に制御ゲイン C_{xy} をかけ1次遅れを付与した値である。また、 M_{zc} はGVC Plusの付加モーメント制御量であり、車両の横加加速度 \dot{G}_y に制御ゲイン C_m をかけた値である。

次にGVC Plusの制御コンセプトをFig. 1に示す。

*1, 4 操安性能開発部
Chassis Dynamics Development Dept.
*3 統合制御システム開発本部
Integrated Control System Development Div.

*2 シャシー開発部
Chassis Development Dept.
*5 電子基盤開発部
Electronic Platform Development Dept.

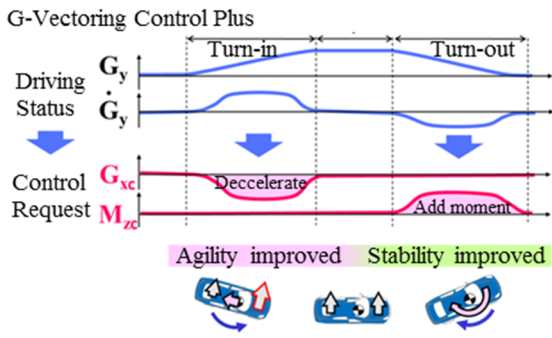


Fig. 1 Concept of GVC Plus

3. システム構成

GVC Plus のシステム構成をFig. 2に示す。GVC Plus のロジックを Powertrain Control Module (PCM) に実装した。PCMは車両に搭載されている各種センサ信号をCANバス経由で受信し、制御要求量 G_{xc} 、 M_{zc} を演算する。アクチュエータには高応答エンジンによる減速度制御とブレーキユニット (DSC) による直接ヨーモーメント制御を用いた。

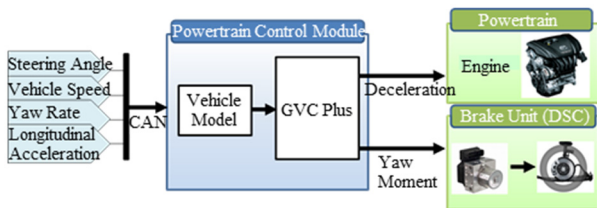


Fig. 2 Control System Configuration

上記PCM内で演算されるGVC Plusの制御作動フラグと制御指令値の一例として、車速80km/hの右レーンチェンジ走行時の時系列データをFig. 3に示す。

操舵切り込み時に $-0.2m/s^2$ 程度の前後減速度指令を出し、操舵を戻す時に200Nm程度のヨーモーメント指令を出しており、ねらいどおりのGVC Plus制御機能を実現していることが分かる。

次にGVC Plusのヨーモーメント指令に基づいて、ブレーキユニットで実際に付加される制動制御の作動状況として、4輪のブレーキ液圧の時系列データをFig. 4に示す。

本システムは、旋回前外輪の液圧を制御しており、制御指示に対して100~150ms程度の遅れ時間でねらいどおりのブレーキ液圧が付加されていることが分かる。

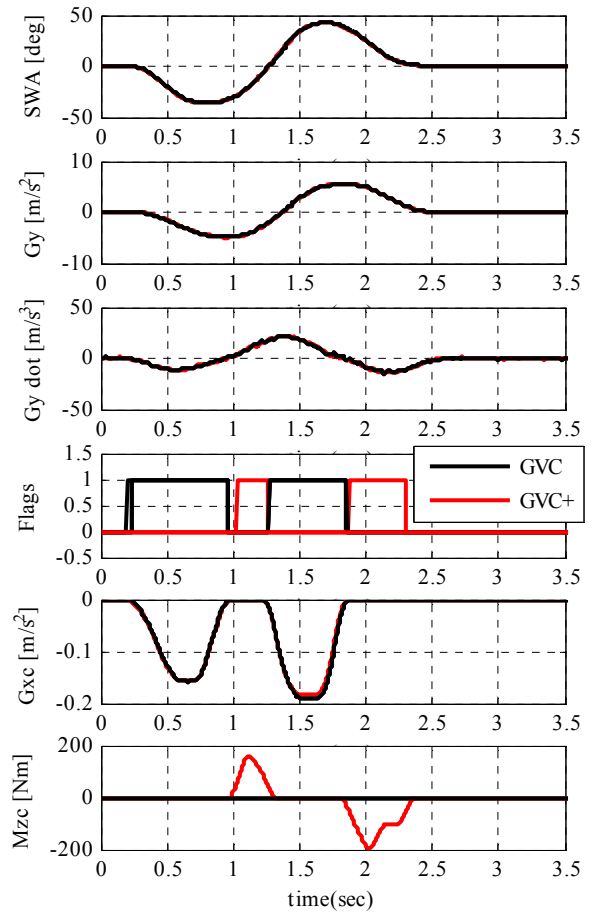


Fig. 3 GVC Plus Control Flags and Request Signals

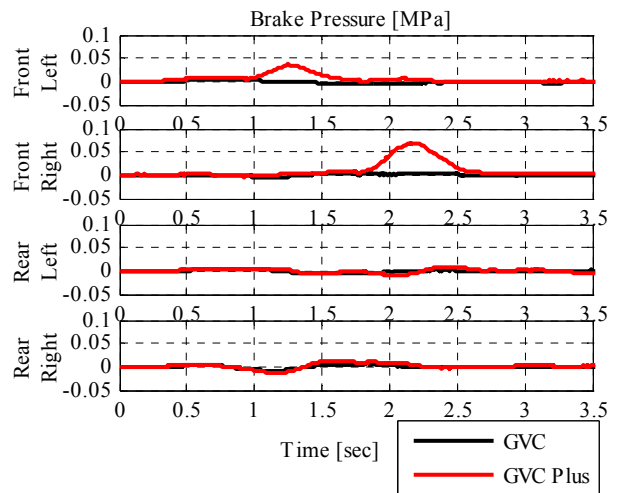


Fig. 4 Yaw Moment Control Actuation by Brake

4. 人間-自動車系での制御効果

人間-自動車系（閉ループ）でのGVC Plusの制御効果を実際の試験車両で明らかにする。

4.1 試験車両

2台の試験車両（Fig. 5）の車両諸元をTable 1に示す。



Fig. 5 Test Vehicle

Table1 Test Vehicle Specification

Dimension	unit	AXELA	CX-5
Length	mm	4470	4495
Width	mm	1795	1840
Wheelbase	mm	2700	2700
Tread (Fr/Rr)	mm	1555/1560	1595/1595
Weight(Fr/Rr)	kg	803/521	874/648
CG height	mm	561	668

4.2 レーンチェンジ性能の評価

Fig. 6に示すコースで、アクセラを用いてレーンチェンジ評価を行った。車速は80km/h（アクセル開度一定制御）、車線移行幅（横変位）は3.0m、レーン乗移り区間（前後変位）は37mとした。中央に設置した方向指示器は、車両前軸が車線移行区間に入った時に点灯し左右方向をドライバーに知らせる。

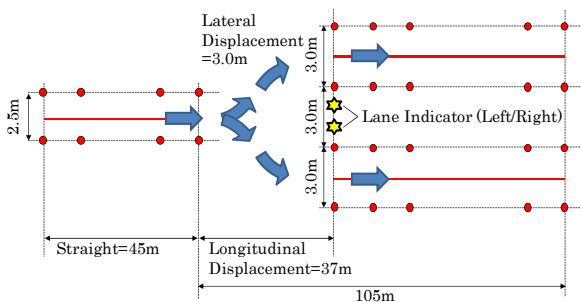


Fig. 6 Lane Change Test Course

制御仕様は前後減速度制御（Gxc）を常時ありとし、直接ヨーモーメント制御（Mzc）の有無を比較評価した。ドライバー操舵角の時系列データと車両走行軌跡をFig. 7に示す。ほぼ同じ走行経路を通っているがGVC Plusにより、時刻1.6sec付近の操舵角がおよそ20%程度小さ

く、レーンチェンジ後半のドライバーの運転操作負担が低減されている。

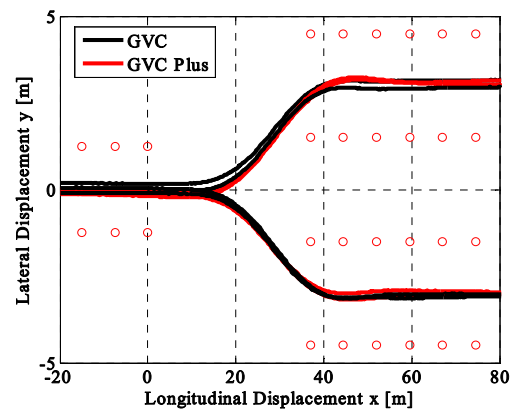
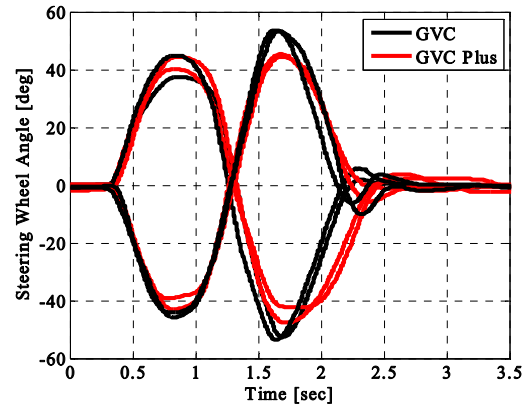


Fig. 7 Lane Change Test Result

人間-自動車系の走行結果について車種間でのドライバー運転行動の違いを相対的に比較するため、Fig. 8に示すドライバー-車両モデルを用いて評価を実施する。先行研究においてドライバーパラメータ τ_L の値が大きいほどドライバーはゆったりと余裕を持って運転できていることが知られている⁽⁴⁾。

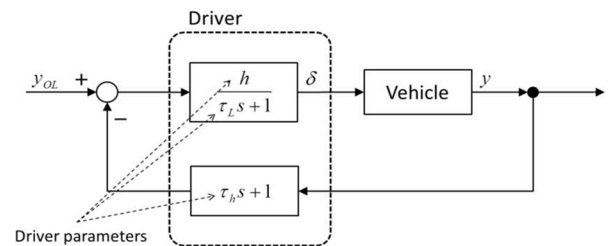


Fig. 8 Driver-Vehicle Closed Loop Model

ここで、 h はドライバーゲイン、 τ_L はドライバー遅れ時間、 τ_h はドライバー前方予見時間を表し、 y_{OL} は目標軌跡（横変位）、 y は車両の実走行軌跡、 δ_h はドライバーの操舵角を表す。実車実験の y 、 δ_h の計測値とモデル計算値の誤差が最小となるように、パラメーター h 、 τ_L 、 τ_h を同定する。

τ_L を同定した結果をFig. 9に示す。GVC Plus なしに比べて、GVC Plusありの車両では τ_L がおよそ0.013 sec大きくなっており、ドライバーが余裕を持って運転操作できていることが分かる。

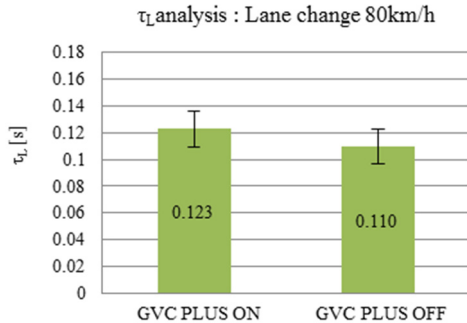


Fig. 9 Identification Result of Driver Parameter τ_L

実際のドライバーの官能評価でも、GVC Plusありの方が操舵後半の車両挙動の繋がりが良く安定性が上がるため、楽にレーンチェンジできると感じており、 τ_L の分析結果と一致する。

4.3 車両限界性能の評価

次に、Fig. 10に示すコースでCX-5を用いてダブルレーンチェンジ時の最大通過车速（区間平均）を評価した。ドライバーによる操舵、加減速の運転操作は任意とし、コース上の光電管で通過车速を計測した。

制御仕様は前後減速度制御Gxc とDSCは常時制御ありとし、直接ヨーモーメント制御Mzcの有無を比較評価した。この時の操舵角、车速、制御要求量、ヨーレート、横加速度の時系列データをFig. 11に示す。

通常のDSC制御による車両安定化効果に加えて、GVC PLUS が付加されることによって、車両の収斂性が向上し、ダブルレーンチェンジの最高通過车速（区間平均）が4.45km/h向上した。

5. 車両機械特性での制御効果

次に、前述のGVC Plusによるドライバーの運転操作負担低減効果が、人間の影響を排除した車両の機械特性（開ループ）として見た場合に、どのような車両挙動変化に起因して生じたのかを明らかにする。

5.1 車両への操作入力

ドライバーの操作ばらつきを排除するために、自動操舵装置とアクセル開度一定制御を併用し、車両への入力を揃えた。

操舵入力にはドライバー操舵によるレーンチェンジ試験のデータを基にFig. 12に示すような自動操舵入力波形を設定し、车速は進入车速のばらつきを81km/h±0.2km/h

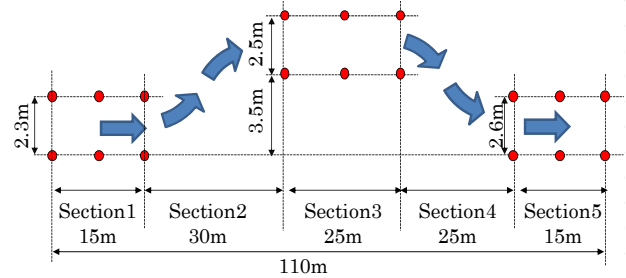


Fig. 10 Double Lane Change Course

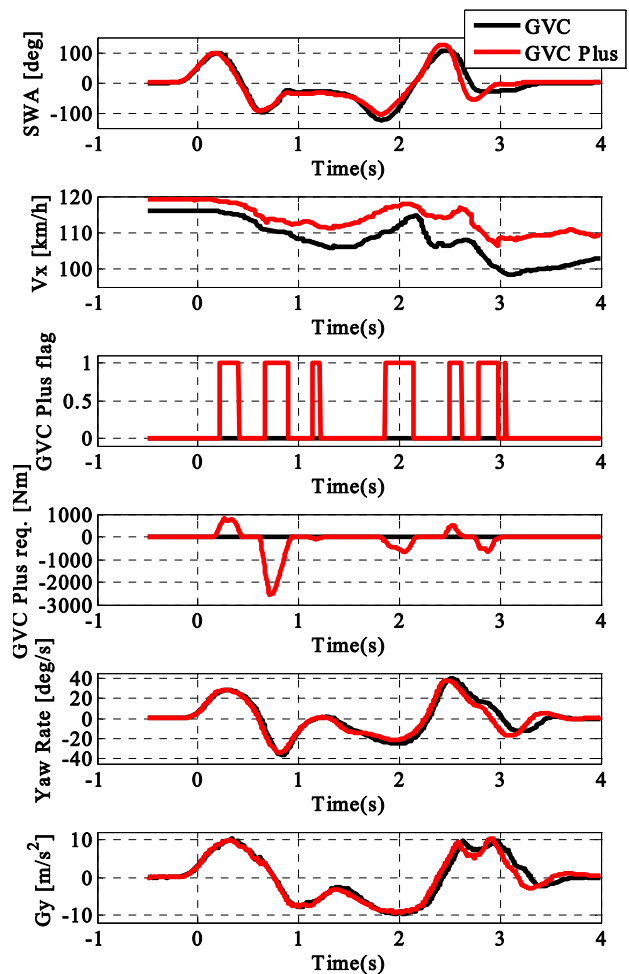


Fig. 11 Double Lane Change Test Result

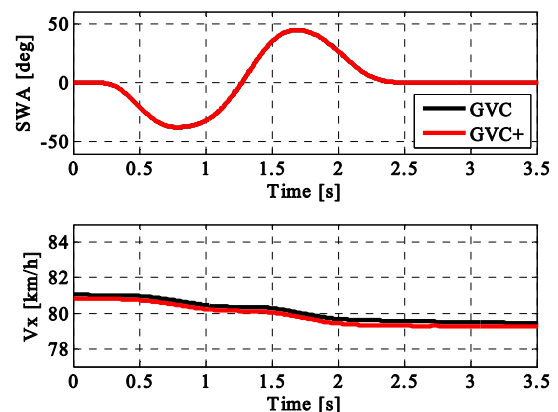


Fig. 12 Vehicle Input for Open Loop Test

以内とし、その後はアクセル開度を固定した。以降に示す結果はアクセラを用いた右レーンチェンジの走行データである。

5.2 車両平面運動の改善効果

車両平面運動の改善効果として、まず操舵角に対するヨーレートのリサージュをFig. 13に示す。

GVC Plus によって1次操舵を戻す時のヨーレートの応答遅れがわずかに低減している。

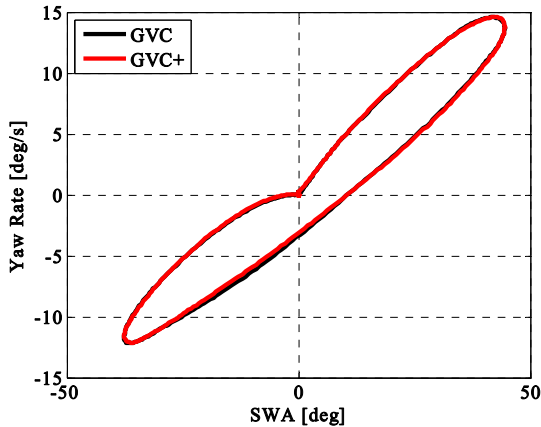


Fig. 13 Vehicle Planar Motion (Yaw Rate Response)

次に、前後加速度と横加速度の時系列データとリサージュ (G-G diagram) をFig. 14に示す。前後加速度は正の符号が加速方向を示す。

1次操舵の戻し操舵と2次操舵の戻し操舵の区間で、GVC Plusが旋回前外輪を制動することによって車体減速度が最大0.05m/s²程度発生し、結果として前後加速度の揺り返しが抑えられている。これにより、G-Vectoring制御 (操舵切り込み時のエンジン減速度制御) だけでは実現できなかった切り戻し操作時のGの繋がりも同時に改善している。

5.3 車両ばね上旋回姿勢の改善効果

次に、3次元的な車体ばね上旋回姿勢の改善効果として、ピッチ角とロール角の時系列データとリサージュをFig. 15に示す。ピッチ角は正の符号が前下がりピッチを表す。

時系列データで見るとGVC Plusによって操舵を戻す際のピッチ角の揺り返しが小さくかつスムーズになり、結果的に遅れも少なくなる。リサージュ図で見ると、GVC Plusなしのピッチ角が不連続になっているのに対し、GVC Plusありはスムーズな下に凸の波形になっており、レーンチェンジ全区間で操舵入力に対するロール角とピッチ角の連係性が改善している。

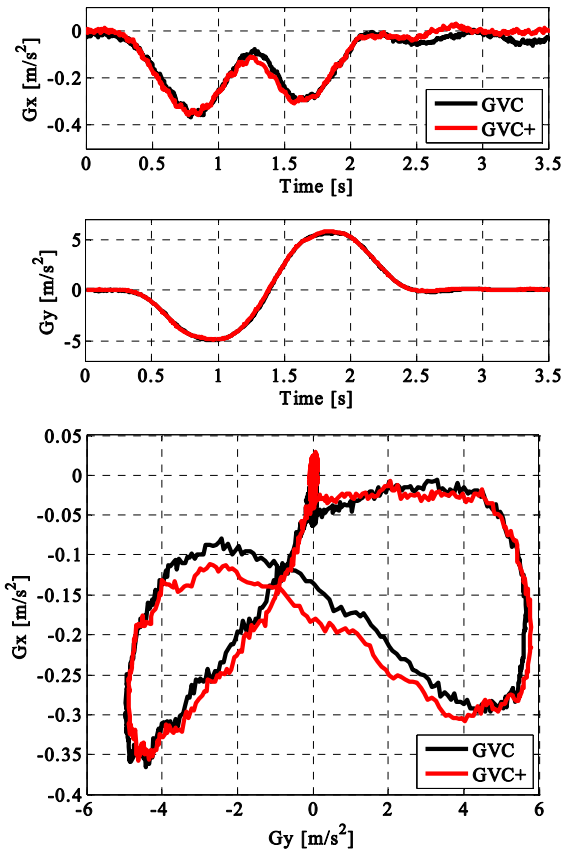


Fig. 14 Vehicle Planar Motion (G-G Diagram)

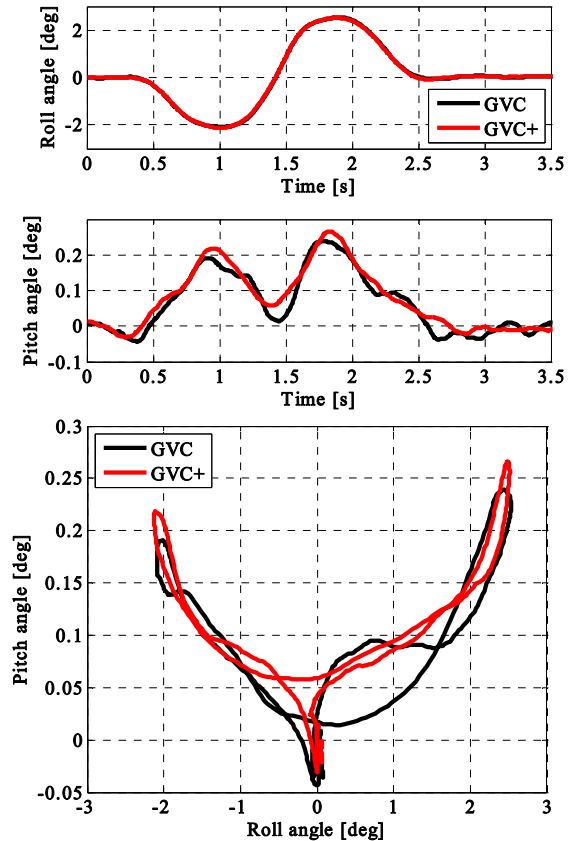


Fig. 15 Vehicle Body Attitude (Roll-Pitch response)

6. GVC Plus制御効果についての考察

ここまでの閉ループ評価と開ループ試験の結果から、GVC Plusによってドライバーが運転行動を変化させる要因は、車両機械特性として操舵角入力に対する車両平面運動（ヨー応答、前後G・横Gの繋がり）と車体ばね上旋回姿勢（ロール角・ピッチ角の繋がり）が改善することが主要因であると考ええる。

このことは、従来のGVC開発を通じて知られている、ごくわずかな車体姿勢制御や車両応答のリニアリティー改善が、閉ループでのドライバーの操作を大きく改善するという結果とも一致している。

今回新たに開発したGVC Plusではその機能を、ハンドルを切り戻すシーンや左右に切り返すつながりの部分にまで拡張することで、ドライバーにとって更に質感の高い車両挙動を実現することができたと考える。

7. まとめ

- ・横加加速度に基づく直接ヨーモーメント制御機能であるGVC Plusを、エンジン制御コントローラとブレーキ制御ユニットを用いて実現した。
- ・主な制御効果として、車両の安定性向上によりドライバーの操作負担が低減する。レーンチェンジ走行時のドライバー操舵負担が約20%低減し、ダブルレーンチェンジ限界走行時の最大通過車速が約4km/h向上する。
- ・GVC Plusによってドライバーの運転操作が好適となる要因は、車両平面運動のヨー応答の改善に加えて、前後加速度・横加速度の係りや、ばね上車両姿勢のピッチ角・ロール角の係りといった車両3軸6自由度運動の係り性を微小な質感レベルまで改善しているためであると考ええる。

参考文献

- (1) 山門ほか：横運動に係りして加減速を制御する車両の運動特性に関する検討，学術講演会前刷集，No.8-08，pp.9-14 (2008)
- (2) 梅津ほか：高応答エンジンを用いた量産型G-Vectoring制御車両の開発，学術講演会講演予稿集，No54-16，pp.1310-1314 (2016)
- (3) 山門ほか：通常領域におけるブレーキDYCとG-Vectoring制御の比較検討，自動車技術会論文集，Vol.43，No.6，pp.1299-1305 (2012)
- (4) 安部：ドライバの車両運動性能評価の新たな視点（特集 走りの質感を追求する評価技術），自動車技術 Vol.69，pp.30-37 (2015)
- (5) 酒井ほか：視覚感受性に基づくロール感の向上，TOYOTA Technical Review，Vol.55，No.1，pp.20-25 (2006)

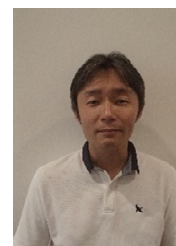
■ 著 者 ■



梅津 大輔



高原 康典



砂原 修



加藤 史律



津村 和典

論文・解説

39

新開発SKYACTIV-D 1.8 の紹介

Introduction of newly developed SKYACTIV-D 1.8

丸岡 規之*1 Noriyuki Maruoka	平林 千典*2 Kazunori Hirabayashi	福馬 真生*3 Masaki Fukuma
森永 真一*4 Shinichi Morinaga	牛谷 真樹*5 Masaki Ushitani	三村 勇樹*6 Yuki Mimura

要約

SKYACTIV-D 2.2とSKYACTIV-D 1.5では、超低圧縮比と高効率過給をイネーブラにした燃焼コンセプトによって、幅広いユーザーへトルクフルかつ伸びやかな走り、クラストップレベルの燃費、NO_x触媒を用いずに最新の排気規制に適合するクリーン排気の提供を実現した。この価値を日常的に使用されるシーンにおいて、更に高いレベルで「走る喜び」と「優れた環境性能」の両立を狙ったSKYACTIV-D 1.8を新たに開発し、新型MAZDA CX-3に搭載した。本報ではこの新型エンジンの開発コンセプトと、新たに採用した技術について紹介する。

Summary

With a combustion concept realized by super-low compression ratios and high-efficiency boosting, the Skyactiv-D 2.2 and Skyactiv-D 1.5 delivered powerful and extensive acceleration and class-top level fuel economy to a wide range of users, as well as clean emissions that meet the latest emission regulations without using NO_x after-treatment systems. Aiming to enhance this value in everyday usages, Mazda newly developed Skyactiv-D 1.8 that achieved both driving pleasure and environmental performance at a higher level, and installed it in the All-New Mazda CX-3. This paper introduces the development concept of the new engine and newly adopted technologies.

Key words : Heat Engine, Compression Ignition Engine, Turbocharger/Variable Geometry Turbo, Post Treatment System, Performance/Fuel Economy/Efficiency, Fuel Injection/Fuel Spray

1. はじめに

マツダは2012年に発表した新世代クリーンディーゼルエンジン「SKYACTIV-D 2.2」⁽¹⁾、2014年に発表した「SKYACTIV-D 1.5」⁽²⁾(以下1.5L)で、低圧縮比と高効率過給をイネーブラにした燃焼コンセプトによって

- ・トルクフルかつ伸びやかな走り
- ・クラストップレベルの低燃費
- ・NO_x触媒なしで厳しい規制に適合したクリーンな排気

を実現した。新型MAZDA CX-3 (Fig. 1) に搭載された新開発「SKYACTIV-D 1.8」(以下1.8L) (Fig. 2)は、日常的に使用されるシーンにおいて、更に高いレベルで「走る喜び」と「優れた環境性能」の両立を狙った。本稿では、この新開発エンジンの開発コンセプトと新たに採用した技術について紹介する。



Fig. 1 New MAZDA CX-3



Fig. 2 SKYACTIV-D 1.8

*1~3 エンジン設計部
Engine Design Engineering Dept.

*4~6 エンジン性能開発部
Engine Performance Development Dept.

2. 開発コンセプト/お客様への提供価値

マツダでは究極の内燃機関を目指し、Fig. 3に示すように、熱効率の7つの制御因子を理想状態に近づける取り組みを進めている⁽³⁾。この活動による一貫したコンセプトで各因子を理想に近づけてきた。本エンジンはこれまでのコンセプトを踏襲した上で、ディーゼルらしい力強さに加え、応答性を改善、より深化したエンジンでお客様へ下記の価値を提供した。

- (1) 意のままの走り：自分の体のように加速コントロールができる
- (2) 実用燃費：実際の使用環境での燃費性能
- (3) 環境性能：実際の使用環境でのエミッション低減

市場の燃費やエミッションは使用される外気温や乗員数、道路の状態や加減速などさまざまな要因で変動する。これらを考慮し、変動の少ないシステムや性能を実現することで、いつでも走りと燃費の良さを実感できるようにした。

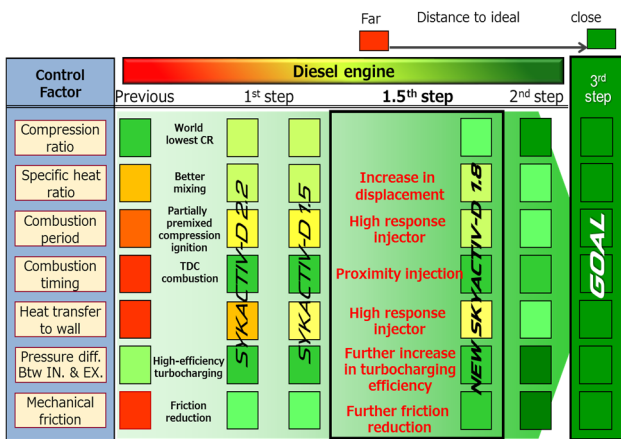


Fig. 3 Vision for Evolution of Diesel Engine

3. エンジン諸元と性能

3.1 エンジン諸元

Table 1 に主要なエンジン諸元を示す。Fig. 4 にエンジン制御システム図を示す。1.5Lからの変更点は、排気量/インジェクタシステム/可変ジオメトリターボチャージャーである。排気量は 1498cm³ から 1756cm³ へと増やした。可変ジオメトリターボチャージャーは排気量を増やしたことに伴う出力向上のための空気量を確保しつつ、実用域の低速においても十分な過給能力をもつ高効率なものを採用した。インジェクタは 1.5Lでも採用した高分散インジェクタであるが、より高応答に噴射可能なピエゾアクチュエータ駆動のものを採用した。1.5Lと同様に後処理なしで規制に対応した。

Table 1 Main Dimension and Specifications

Engine	SKYACTIV-D 1.5	SKYACTIV-D 1.8
Engine Type	In-line 4	←
Displacement	1498 cm ³	1756 cm ³
Bore x Stroke	φ76 x 82.6	φ79 x 89.6
Compression Ratio	14.8	←
Injection System	DENSO G4 Solenoid (Max. 200 MPa)	DENSO G4 Piezo (Max. 200 MPa)
Nozzle Type	10 Holes, Short Hole Length Nozzle 600 cm ³ /min	←
Piston Combustion Bowl Shape	Stepped Egg-Shaped Bowl	←
Turbocharger	Turbocharger with Variable Turbine geometry w/ Rev. Sensor	Turbocharger with Variable Turbine Geometry
EGR System	High Pressure Loop w/o Cooling & Low Pressure Loop w/ Cooling	←
After-treatment System	DOC + Diesel Particulate Filter	←
Maximum Torque	270 Nm / 1600-2500 rpm	270 Nm / 1600-2600 rpm
Maximum Power	77 kw / 4000 rpm	85 kw / 4000 rpm
Emissions	JPN PNLT	WLTP

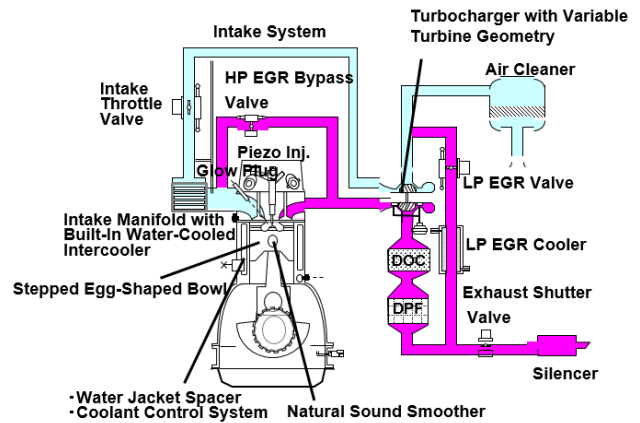


Fig. 4 Engine System

3.2 出力/トルク性能

Fig. 5 にエンジン回転数[rpm]に対するトルク[N・m]を示す。1.5Lに対し排気量アップ及び可変ジオメトリターボチャージャーの高効率化により、高回転域における出力及びトルクの向上を実現した。最大トルクは1500rpmから2600rpmの幅広い領域で 270N・mという高トルクを維持し、最高出力点は 4000rpmで、出力を 77kWから 85kWへと約 10%向上させた。

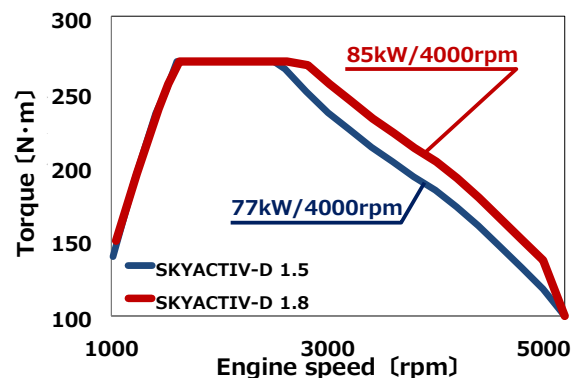


Fig. 5 Engine Performance

3.3 燃費性能

1.8Lは1.5Lで導入した冷却水制御バルブによる冷却損失低減、高応答インジェクタによる壁面熱損失低減、及び燃焼期間短縮、可変ジオメトリターボチャージャーの高効率化による混合気均質リーン化により熱効率の改善を図った。更に、機械抵抗の低減もあわせて、排気量アップしたにもかかわらず、同一トルクにてエンジン燃費率を改善した (Fig. 6)。

これにより、実用走行に近いとされる世界統一試験サイクル (以下WLTC) ベースの市街、郊外、高速走行の各走行モードにおいて1.5L比3%前後のCO₂改善を実現した。

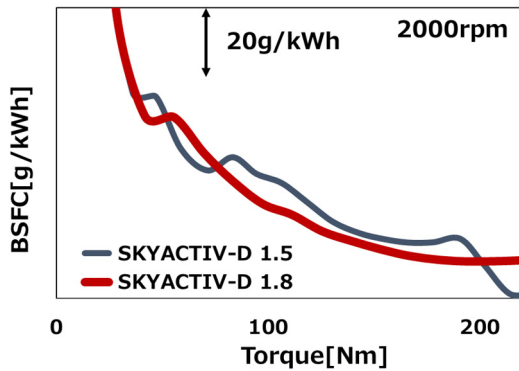


Fig. 6 Fuel consumption

3.4 走行性能

1.5Lでも採用しているDE精密過給制御を本エンジンも採用している。DEのトルクは燃料噴射量調整により制御されるが、排気エミッションや煤低減の観点から排気酸素濃度を制御するため発生トルクは制約を受ける。

そこで加速中のEGRガス流量と可変ジオメトリターボチャージャーを最適に制御することで、加速初期において早期にトルク上昇させることを実現した。また、排気量を増やしたことや、高効率の可変ジオメトリターボチャージャーを採用することで、加速後半においてもEGRを導入したまま、高い加速度G [m/sec²]を実現している。

Fig. 7に3rd 30km/hからの全開加速性能を示す。1.5Lと比べて、加速初期のGの落ち込みを改善し、伸びのあるリニアな加速性能を実現した。更に、EGR導入によるNO_x排出量低減と、噴射量やEGR制御による排気酸素濃度制御での煤改善を同時に実現し、環境性能を向上させている。また、過渡トルクの制御性を改善したことでFig. 8に示すように、アクセルの踏み分けに対するリニアリティを実現した。

これらにより操作に対する実際の車両挙動がドライバーのイメージと一致 (予見性が向上) することで、意のままの走りを実現した。

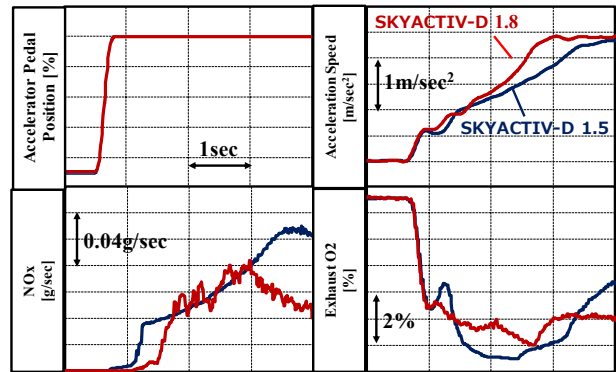


Fig. 7 Acceleration Performance from 3rd 30km/h

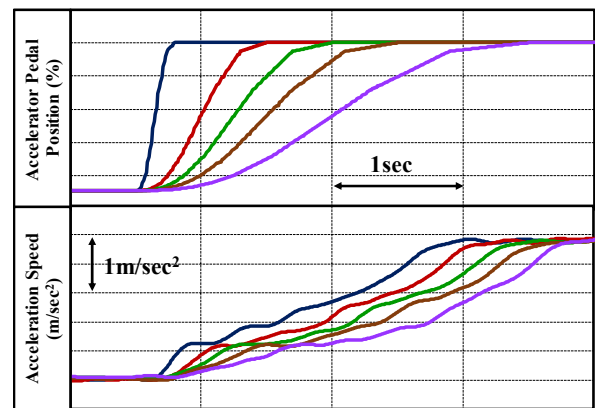


Fig. 8 Acceleration Speed Per Accelerator Pedal Position

4. SKYACTIV-D 1.8で採用した新技術

前章で紹介した性能を実現するために、また、更に高いレベルで「走る喜び」と「優れた環境性能」の両立をうぐために採用した下記の技術について紹介する。

- (1) 排気量最適化 (ライトサイジング)
- (2) 高応答インジェクタによる燃焼改善
- (3) Diesel Particulate Filter 再生制御
- (4) 機械抵抗低減

4.1 排気量最適化 (ライトサイジング)

排気量は、低圧縮比コンセプトで実現した燃焼のリーン化及び低温化を維持したまま、エミッション性能を更に低減するため最適化を実施した。Fig. 9に1.5Lから2.2Lまでの排気量違いのエンジントルクに対するNO_x排出量を示す。NO_x排出量の変曲点が、1.5Lは約210N・m、1.8Lは約270N・m付近である。実用使用最大負荷を1.5Lで走行した場合、NO_x変化点以上のトルクを使用するためNO_x排出量が急増し、NO_xを浄化するために高価なエミッションシステムの追加が必要となる。一方、1.8Lで走行した場合、NO_x変曲点以下での走行が可能となるため、走り方に依存

せず、エミッションを改善できる。Fig. 10に、1.5Lまたは1.8Lにおけるエンジン回転数[rpm]とトルク[N・m]に対するWLTP時間頻度分布及びEGR率を示す。このように、最適な排気量を選択することで、高負荷でのNOxを低減した。同時に、最高出力を上昇させることができ、ディーゼルらしく力強い、高回転まで伸びのある加速性能を実現した。

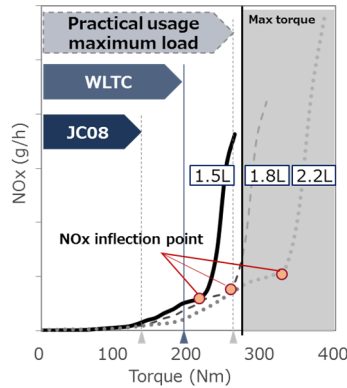


Fig. 9 NOx Inflection Point

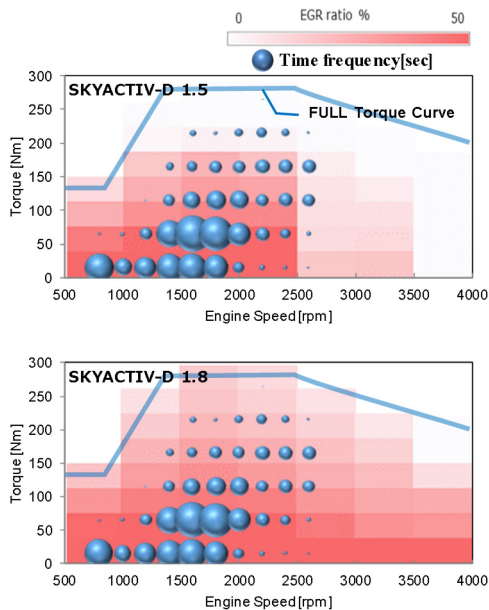


Fig. 10 EGR Ratio Map with WLTP Time Frequency

4.2 高応答インジェクタによる燃焼改善

新たに採用したピエゾ駆動インジェクタは1.5Lのソレノイド駆動に比べて高応答な噴射が可能である。この特性を活用し、熱効率改善とノック音低減による静粛性の向上を図った。燃料噴射段数を増やし、1段あたりの噴射量を減らすことで、噴霧ペネトレーションが下がり、燃料の燃焼室壁面への付着量を低減させ燃損失を低減した。同時に、燃焼ガスと燃焼室壁面を空気層で断熱することで壁面熱伝達を低減し、熱効率を改善した (Fig. 11)。

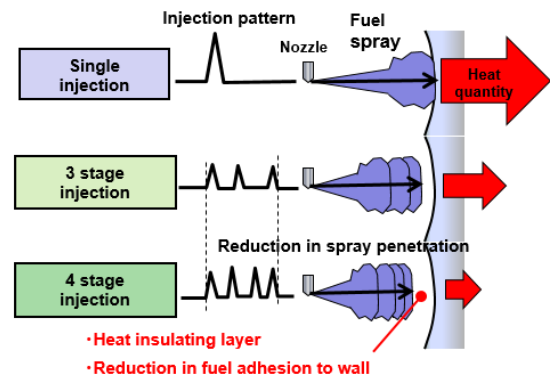


Fig. 11 Aim of Injecting Small Quantity at Each Injection Stage

また、1.5Lと同一の噴射段数にて、高応答化したインジェクタによって、従来に比べて噴射間隔を短くすることが可能となった。メイン噴射前に近接噴射を行うことで、メイン燃焼の傾きを抑制することができノック音が改善。更に、アフター噴射近接化により煤再燃焼量は減少するものの、噴射後の燃料だれ減少によって煤発生量も減少するため、煤排出量は同等となり、燃焼期間が短くなることで、熱効率が改善した (Fig. 12)。

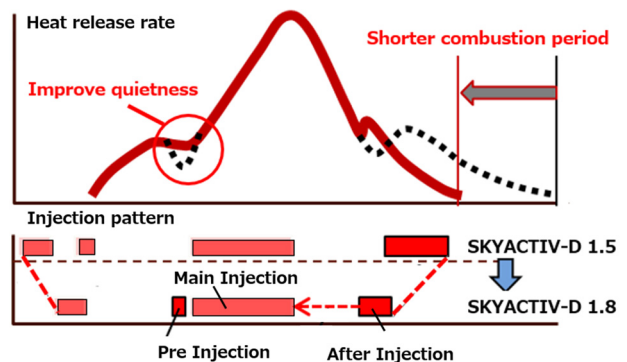


Fig. 12 Shorter Combustion Period

ノック音は燃焼による加振力とそれを伝える部品の共振特性及び放射特性により決まる。これまで、熱発生山谷の間隔を最適にコントロールすることでノック音ピークを下げたり、ナチュラル・サウンド・スーマー⁽⁴⁾によって構造系の共振を下げる等の手段で改善を図ってきた。

本エンジンは熱効率を改善しつつ、さらなるノック音改善を可能とする新たな燃焼を採用した。燃焼加振力は、噴射から着火までの着火遅れが長く、着火する際の予混合気量が多いほど強くなる。そこで、燃料を最大6段で分割噴射することによって、上死点付近で各噴射の燃焼を連続的につなげることで、各噴射の着火遅れを短くし、燃焼初期の熱発生の傾きを抑制した。これにより、等容度の改善にて熱効率改善しつつ、ノック音の低減が可能となった。

また、筒内の温度や圧力などの状態と噴射パターン及び燃焼の関係を明確にすることで、時々刻々と変わる筒内状態に応じた噴射パターンを選択、走り方によらずロバストにノック音を改善した。Fig. 13に1600rpm/Pe600kPaでの1.5Lと1.8Lの噴射パターン及び熱発生率を示す。Fig. 14に15deg.ATDCにおける燃焼ガス温度の3D-CFDの図を示す。

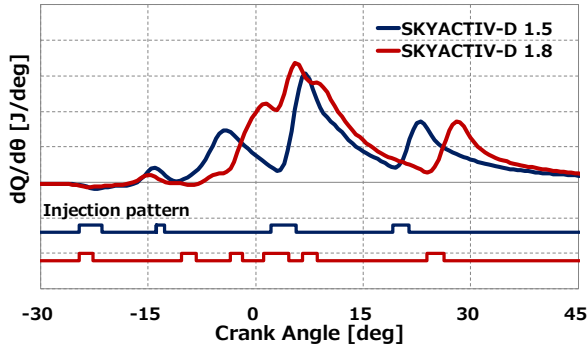


Fig. 13 Heat Release Rate Compared with 1.5L

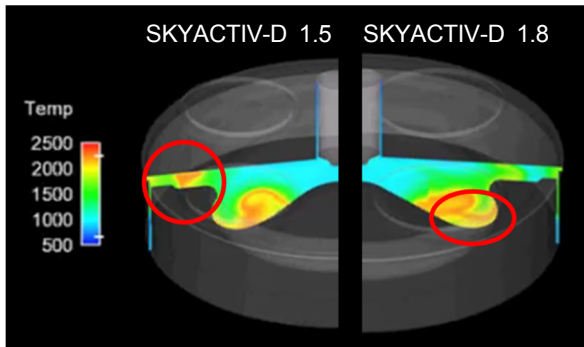


Fig. 14 Combustion Gas Temperature at 15 Deg. ATDC

4段噴射の1.5Lと比較して、6段噴射の1.8Lはキャビティトップ部の高温部の低減と、キャビティ内での壁面との断熱層が確認できる。この噴射パターンにより、煤やNOx同等で、燃費率が4%改善、ノック音の指標であるCylinder Pressure Levelを3dB改善した。

これらの燃焼コンセプトで7つの制御因子の中の、壁面熱伝達と燃焼期間を理想に近づけた結果、市街地走行などの低車速、軽負荷を多用するシーンではより静粛性を高めながら、力強い走りを求めるシーンでは、加速Gと調和するリニアなエンジンサウンドを低燃費とともに実現した。

4.3 Diesel Particulate Filter再生制御

走行時にDiesel Particulate Filterに捕集した煤を高温の排気ガスで燃焼するDiesel Particulate Filter再生制御は、排気ガス温度昇温のために通常よりも多くの燃料を必要とし、燃費が悪化する。特に、1回当たりの運転時間が短いユーザーについては、Diesel Particulate Filter再生が中断するたびに再昇温が必要となり、再生時間が長くなること

で燃費悪化が顕著になる。そこで1.8Lでは、実用燃費の改善を目的として、Diesel Particulate Filter昇温時間の短縮及び堆積した煤の燃焼を効率化することで、再生時間を減した(Fig. 15)。昇温時間の改善は、Diesel Particulate Filter再生燃焼時の排気ガス流量を増やし、多量の高温ガスをDiesel Particulate Filterに流入させることで実現した。煤燃焼速度の効率化は、Diesel Particulate Filter内部の温度と煤量を分割モデルとし予測することで、効率的に内部の煤が燃焼できるように改良することで実現した。

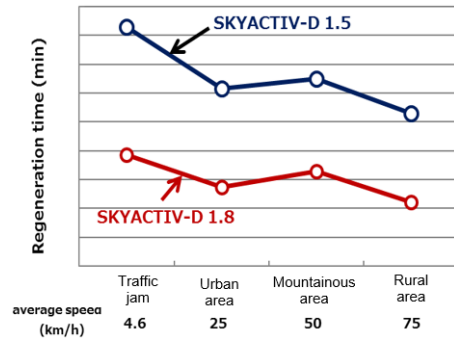


Fig. 15 Comparison of Regeneration Time

4.4 機械抵抗低減

一般的に排気量を増やした場合、主運動系部品の重量と運動速度が増加し慣性力が増大するため、機械抵抗は増加する。

1.8Lでは、ピストン圧縮高さの低減と薄肉化、コンロッド小端テーパ角増大と小径ボルトの採用(Fig. 16)、クランクカウンターウェイト配置の最適化などにより、主運動系部品の重量を1.5Lから排気量が増えたにもかかわらず約300g軽量化し、慣性力起因の機械抵抗を低減した。

更に、ピストンリングに非対称バレル形状の摺動面を採用することで20%の張力低減を実現したことと合わせて、同一排気量当たりの機械抵抗低減を実現した。

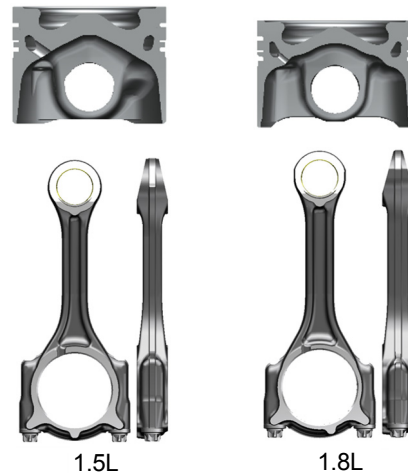


Fig. 16 Reduction in Mechanical Friction

4.5 新技術に対する燃費改善効果

Fig. 17に1.5Lに対するWLTC CO₂排出量の改善率を示す。排気量を増やすことで機械抵抗が悪化する一方で、7つの制御因子の中で、機械抵抗、比熱比、燃焼期間及び時期を、排気量増加と高応答インジェクタを用いることで改善し、1.5L比3%前後のCO₂改善を実現した。

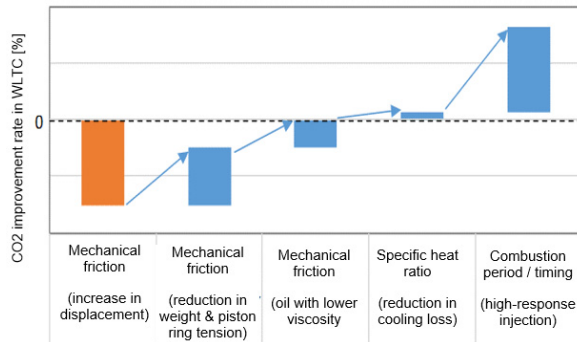


Fig. 17 WLTC CO₂ Improvement

■ 著 者 ■



丸岡 規之



平林 千典



福馬 真生



森永 真一



牛谷 真樹



三村 勇樹

5. おわりに

新型MAZDA CX-3に搭載した新開発SKYACTIV-D 1.8は、これまでの低圧縮比コンセプトに加え、排気量最適化や高応答インジェクタなどの新技術によって「走る喜び」と「優れた環境性能」の両立を高い次元で実現させたことに加え、熱効率を支配する制御因子の状態の更なる改善を達成した。これによりSKYACTIV-Dシリーズの共通価値である、走り、燃費、クリーンな排気、及び静粛性を高い次元でバランスさせたクリーンディーゼルエンジンとなった。

参考文献

- (1) 森永真一，詫間修治，西村博幸：SKYACTIV-D エンジンの紹介，[マツダ技報, No.30, p9-13 \(2012\)](#)
- (2) 平林千典，大西毅，白井裕久，佐藤雅昭，森永真一，志茂大輔：小排気量クリーンディーゼルエンジン SKYACTIV-D1.5 の開発，[マツダ技報, No.32, p.21-27 \(2015\)](#)
- (3) 人見，第21回内燃機関シンポジウム講演論文集，pp.1-23 (2010)
- (4) 白橋尚俊，森恒寛，岩田陽明，長門清則，菊池拓哉：SKYACTIV-Dディーゼルノック音の低減技術，[マツダ技報, No.34, p29-34 \(2017\)](#)

論文・解説

40

「人馬一体」を実現する駆動力制御システム開発 Development of Driving Force Control System to Realize “Jinba Ittai”

山崎 篤史*1 名越 匡宏*2 津田 顕*3
Atsushi Yamasaki Masahiro Nagoshi Akira Tsuda
石山 雄貴*4 多田 努*5 渡部 雅晃*6
Yuki Ishiyama Tsutomu Tada Masaaki Watanabe

要 約

“人馬一体”とは「ドライバーが車との一体感を感じること」、「意図どおりにクルマが動くこと」とマツダは定義し、ダイナミック性能共通のねらいとして一貫した取り組みを行っている。マツダはこれまで“人馬一体”を体現するため研究を積み重ね、製品へ織り込みを継続してきた⁽¹⁾⁽²⁾。

新型MAZDA3から始まる新世代商品群では、ドライバーの体の一部のように動かせることをねらいとし、人間の自然な動作と車両挙動を合わせるため、遅れやノイズなく、人間の基本行動特性に合うリニアな挙動の実現を目指した。本稿では、“人馬一体”を実現する新たな駆動力制御システムについて紹介する。

Summary

Mazda's development of vehicle dynamic performance has been consistently performed with “Jinba Ittai” concept, defined as “oneness feel between car and driver” and “vehicle moves as driver intends”. Mazda accumulated researches for the realization of the concept, and the outcomes have been incorporated in production vehicles.

For Mazda's next generation cars starting with All-New Mazda3, aiming to achieve a vehicle that moves as a part of the driver's body, linear vehicle behaviors matching human basic behavioral characteristics without delay and noise is targeted, so that vehicle dynamic behaviors are synchronized with human's natural behaviors. This paper introduces the new driving force control system for the realization of the “Jinba Ittai” concept.

Key words : Vehicle Dynamics, Vibration, Noise, and Ride Comfort, Body Vibration While Driving, Motion Control, Device Technology/Control Technology, Driving Force Control System

1. はじめに

新型MAZDA3から始まる新世代商品群に採用した駆動力制御システムでは、人間の自然な動作と車両挙動を合わせるため、遅れやノイズなく、人間の基本行動特性に合うリニアな挙動の実現を目指した。

本稿では、“人馬一体”を実現できた状態、実現するための課題について解説し、課題を解決する新たな駆動力制御システムについて紹介する。

2. 駆動力制御システムのねらい

2.1 目指す姿

マツダは、“人間中心のものづくり”を一貫した哲学として掲げ、まるで自分の体の一部のように動かせる、ドライバーの意思とクルマの動きの一体感を追求している。人は道具を使用した際に人間特性に合った挙動を示すものを扱いやすいと感じる。具体的な事例として、水道の蛇口を捻った際に想定どおりの手ごたえで想定どおりのタイミングに想定どおりの水量が得られると扱いやすいと感じる。対して手ごたえが軽い割に水量が多く出

*1,2 PT制御システム開発部
PT Control System Development Dept.

*5,6 ドライブトレイン開発部
Drivetrain Development Dept.

*3,4 走行・環境性能開発部
Driveability & Environmental Performance Development Dept.

る、あるいは水が出るタイミングが遅れると違和感があり扱いにくいと感じる。これをクルマに置き換えても同じであり、加速したいと思いきアクセルを踏み込んだ際に思い通りの加速を得られると扱いやすいと感じる。

アクセル操作に対する理想の車両挙動のイメージをFig. 1に示す。操作に対して遅れを感じない応答、操作に対してリニアな応答、ショックや振動（ノイズ）がない加速度、これらを具体化し人の特性に合った挙動を実現することで扱いやすい理想的なクルマ造りを目指した。

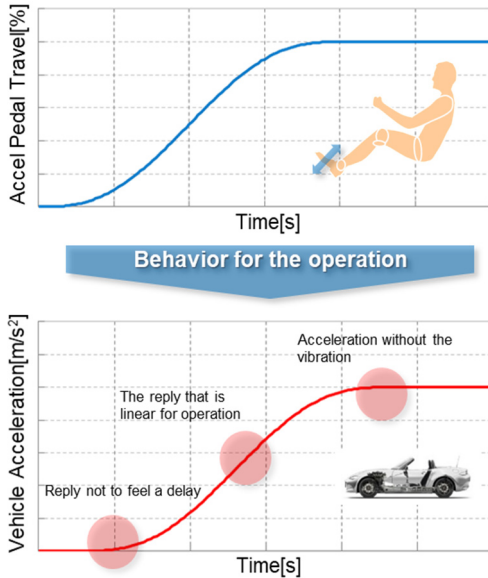


Fig. 1 Ideal Vehicle Behavior

2.2 背反性能のブレイクスルー

アクセル操作に対する理想の車両挙動に対し、従来の駆動力制御システムではレスポンスと振動・ショックの両立に課題がある。操作に対してリニアな応答を実現するためにレスポンスを良くすると不快な振動・ショックが発生する。また、トルクの入力を抑え振動・ショックを抑制するとレスポンスが悪化する。つまり、これらの性能はトレードオフの関係性にあり、この中で両立解を設定するのが通常の開発手法である。

新世代の駆動力制御システムではレスポンスと振動・ショックの各性能をブレイクスルーして高次元で両立できる状態とし、本来実現したいドライバー操作に対するリニアな車両応答の実現を目指した (Fig. 2)。

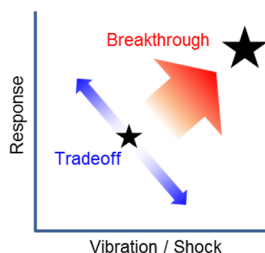


Fig. 2 Breakthrough of the Contradictory Performance

3. 駆動力制御システム構想

3.1 駆動力制御構想

新世代の駆動力制御では、背反性能をブレイクスルーして“人馬一体”を一括開発で実現するため、目標の車両加速度を描き、駆動系システム特性に対してあるべきエンジントルクを常に指示する制御を構想した (Fig. 3)。この実現にはドライブシャフト(以下、D/S)のねじれ角を常に正しく把握する技術が重要となる。以下でこれらの詳細を説明する。

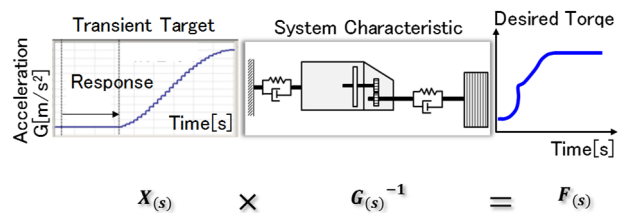


Fig. 3 Concept of the Driving Force Control

3.2 目標ドライブシャフトねじれ角制御

描かれた目標を実現するために、車両の前後運動とホイールの回転運動とドライブシャフトの回転運動を表現した運動方程式を用いて目標車両加速度をD/Sねじれ角に変換し、その目標D/Sねじれ角に実D/Sねじれ角を追従させることで目標の加速度を実現する制御を構築した (Fig. 4)。

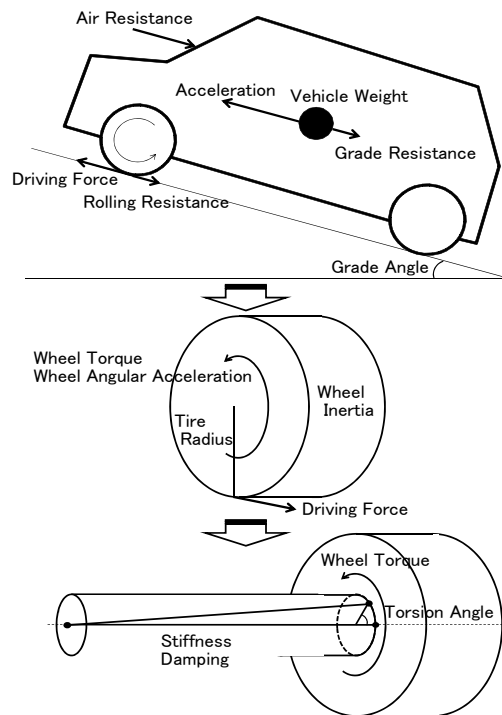


Fig. 4 Target D/S Torsion Angle Control

目標をD/Sねじれ角にした理由は、振動の主要因がD/Sのねじれ一次共振のためねじれ角をコントロールできれば振動を抑制できると考えたからである。この制御をモデルベースで構築することで、派生車種などへの対応の際も、D/Sねじれ角を管理指標として制御することで車両諸元値の変更のみで制御可能となる。

3.3 制御構成

目標D/Sねじれ角制御の制御系はFig. 5のように構成しており、実D/Sねじれ角を目標D/Sねじれ角に応答良く追従させるため、フィードフォワード（以下F/F）制御は駆動系システム特性の逆モデルを使用する。また、F/F制御に用いるモデルのモデル化誤差や外乱による実D/Sねじれ角のズレを補正するためフィードバック（以下F/B）制御を併用する。F/Bに用いる実D/Sねじれ角は、オブザーバにより推定する。オブザーバとは、直接計測できないパラメーターの値を推定するために、他の計測可能なパラメーターの値を代入してシステムの作動を模擬するものである。

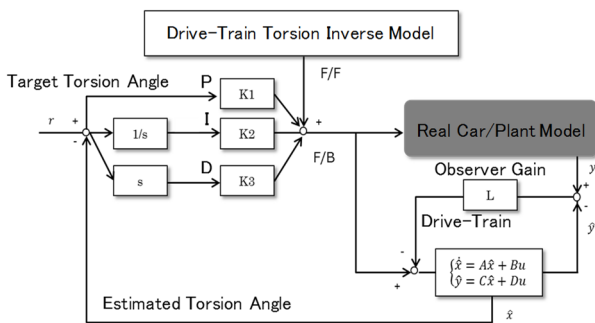


Fig. 5 Control Constitution

この制御系ではモデル化誤差を補正するF/Bが重要であるため、F/Bに用いる実D/Sねじれ角の推定精度が非常に重要となる。Powertrain Control Module（以下、PCM）の限られた処理能力の中でシンプルなモデルを用いて推定精度を確保した領域を広げるには駆動系の非線形領域への対処が課題となる（Fig. 6）。以下で今回の対処の内容を説明する。

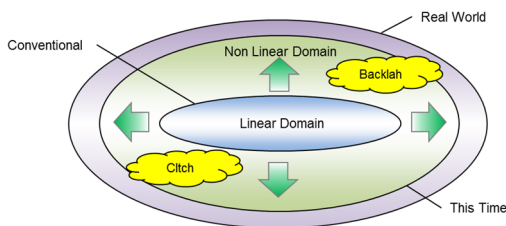


Fig. 6 Estimated Domain

3.4 オブザーバ

オブザーバモデルは、通常はシンプルなエンジンからタイヤまでの常時締結状態のモデルだが、クラッチの締結状態が変化するとシステム特性が実際と大きくずれるため、クラッチ操作中から締結後所定期間はD/Sねじれ状態の推定精度を確保できなかった。その対策として、Fig. 7のようにクラッチ後からタイヤのモデルに変更することで、クラッチ締結状態の影響を受けないモデルとなり、推定精度を確保した。これにより、発進・変速時に従来制御より早くフィードバックを開始できるため、振動収束の早期化が可能となる。この変更には、オブザーバモデルに入力する実値としてクラッチ後の回転数が必要であり、後述するP軸回転数センサーを採用した。

以上はMT車について述べたが、AT車についても非線形要素に対処するためオブザーバモデルをトルクコンバーター後からタイヤまでのモデルとした。

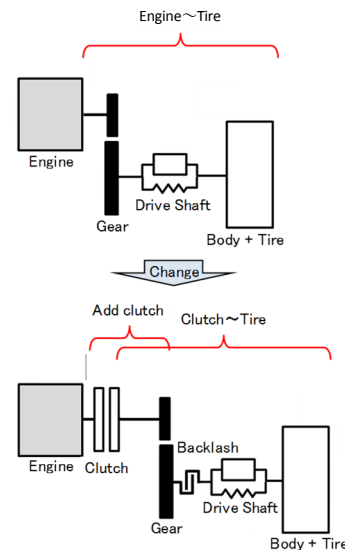


Fig. 7 Improvement of the Observer Model

また、D/Sの反力を受けパワートレイン全体が、ねじれる挙動を再現するため、マウントモデルを追加し推定精度を向上した（Fig. 8）。

- J_m : Engine Inertia
- η : Gear Ratio
- J_b : Vehicle Inertia
- J_{pt} : Powertrain Inertia
- θ_m : Mount Torsion Angle
- ω_e : Engine Angular Velocity
- K_s : D/S Stiffness
- ω_v : Wheel Angular Velocity
- ω_{pt} : Mount Torsion Angular Velocity
- K_m : Mount Stiffness
- T_e : Engine Torque
- C_s : D/S Damping
- T_b : Running Resistance
- C_m : Mount Damping

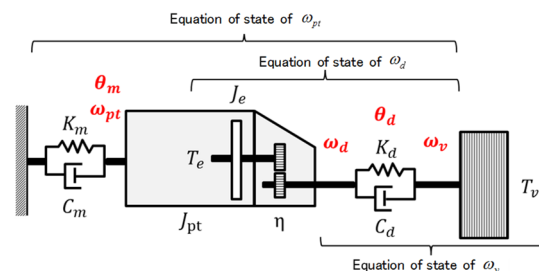


Fig. 8 Added the Mount Model

更に、D/Sねじれ角を逐次推定するため、駆動系非線形領域（ガタ）の推定が必要であり、ガタ領域について、エンジントルクを入力、ガタ角を出力としたガタ角推定モデルを構築した（Fig. 9）。

J_m : Engine Inertia ω_e : Engine Angular Velocity T_e : Engine Torque
 K_b : D/S Stiffness C_b : D/S Damping J_b : Vehicle Inertia
 ω_v : Wheel Angular Velocity T_b : Running Resistance
 θ_b : Backlash Angle b : Backlash width

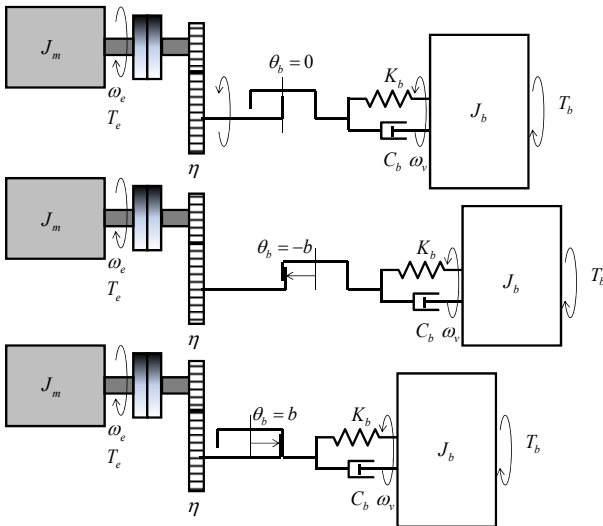


Fig. 9 Backlash Model

上記ガタ角推定モデルとD/Sねじれ角推定モデルをスイッチングすることでガタ領域とガタ領域以外の推定を連続的につなげた（Fig. 10）。

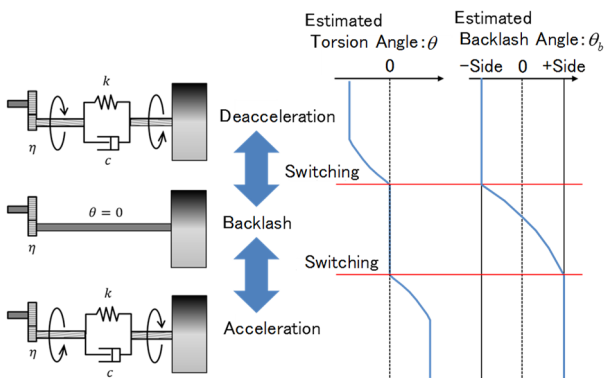


Fig. 10 Model Switching

4. P軸回転数センサー

クラッチ操作中のオブザーバ推定精度を改善するため、P軸回転数センサーを採用した。P軸回転数センサーは、Fig. 11に示すトランスミッションのPrimary軸の回転数を検出するセンサーである。

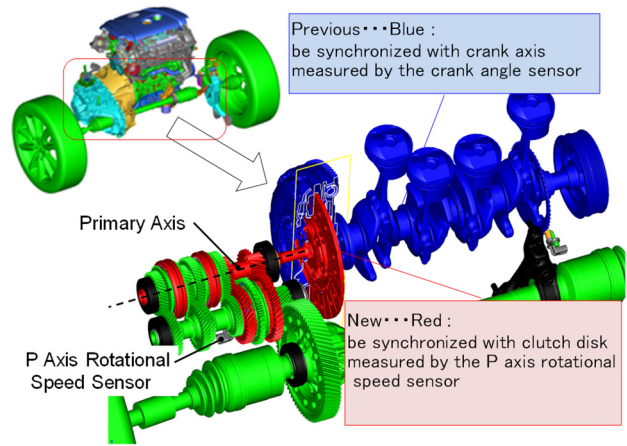


Fig. 11 P Axis Rotational Speed Sensor

本センサーは、GMR（Giant Magneto Resistive effect）センサーを採用し、クラッチディスクと同期している凹凸のある回転体（2ndギア）との磁力変化により回転数を検出する方式とした（Fig. 12）。

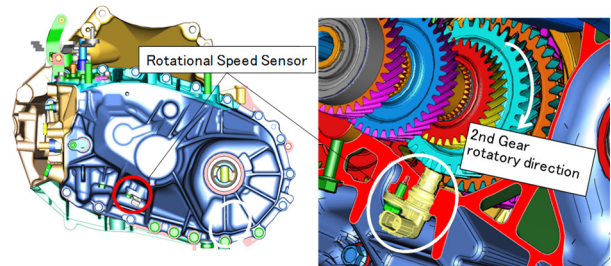


Fig. 12 Detection Method of the P Axis Number of Revolutions Sensor

5. モデルと試作車による推定精度検証

P軸回転数センサーを用いたD/Sのねじれ角推定について、詳細モデルによる机上検証を実施した上で、実車検証を実施することで、短期間で高精度なオブザーバを構築した。机上検証結果をFig. 13に示す。D/Sねじれ角をねらいの精度で推定できることを確認した。

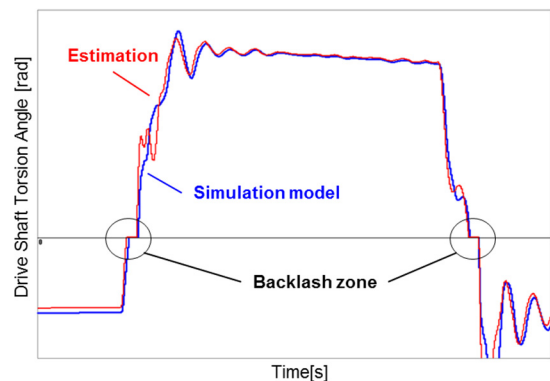


Fig. 13 Simulation of Estimated Torsion Angle

実車にて推定精度の良否を判断するため、D/Sにトルクメータを取り付け、P軸回転センサーの取り付けに対応したミッションケース及びハーネスを試作し検証車両を製作した。また、PCM制御にP軸回転センサーを使用可能とする変更を織り込んだ試作ソフトウェアを作成して実車にて検証した。推定精度の検証にあたり、ねじれ量と伝達トルクを計測した。

検証結果をFig. 14に示す。机上検証時と同様の精度でD/Sのねじれ角を推定できることを確認した。

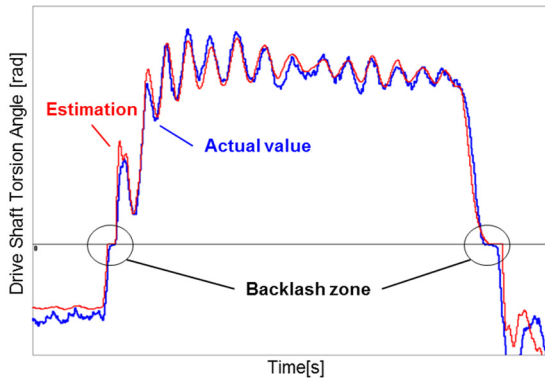


Fig. 14 Experiment of Estimated Torsion Angle

6. 制御設計

駆動力制御システムの制御設計は、モデルベース制御を採用し、実機適合を大幅に低減した上で、制御目標への追従性を改善した。ここでは、その内容を紹介する。

6.1 フィードフォワード制御

F/F制御は、エンジントルクを入力、D/Sねじれ角を出力とした駆動系システム特性モデルの逆モデルで構築した (Fig. 15)。

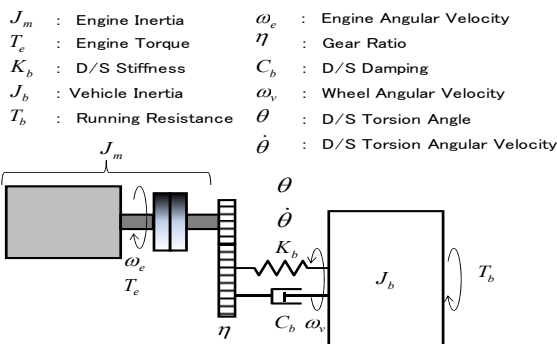


Fig. 15 Model of the Feedforward Control

6.2 フィードバック制御

F/B制御は、オブザーバによる推定D/Sねじれ角を用いたPID制御である。PID制御のF/Bゲインについて、理論

的な制御器設計をするため、内部モデル制御 (Internal Model Control : 以下, IMC) を適用した。

IMCはF/Bゲインの導出にプラントモデルを使用する制御である。また、目標の成形・モデル化誤差等を考慮したロバストな設計になるよう制御系にフィルターを有している。F/F制御とF/B制御で構成される2自由度制御系のIMCを設計するとFig. 16となる。F/F制御は駆動系逆モデルにフィルターをかけたものをゲインとして使用し、F/B制御はFig. 16の青枠のようなゲインとなり、フィルターとF/B用プラントモデルから構成されるため、モデルを与えれば、調整するパラメーターはフィルター時定数のみである。

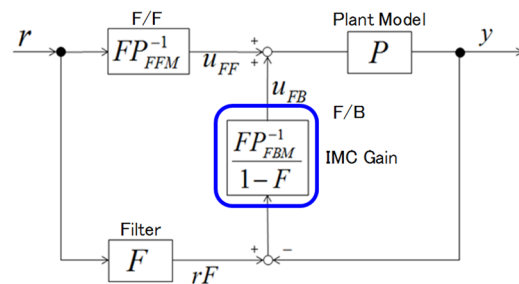


Fig. 16 Internal Model Control (IMC)

通常、PID制御はP/I/Dゲインの3パラメーターがあり、3パラメーターを試行錯誤で調整すると大変時間がかかるが、今回、IMCゲインをP/I/Dゲインに等価変換し、調整パラメーターをフィルター時定数のみとした上で、周波数特性を考慮して時定数設定することで、試行錯誤することなしにP/I/Dゲインを決定した。Fig. 17にフィルター時定数と制御+プラントの周波数特性の関係を示す。時定数が小さいほど、ゲインの損失が少なく、応答性が高いことを示している。本システムでは応答性を重視し、時定数を小さく設定した。

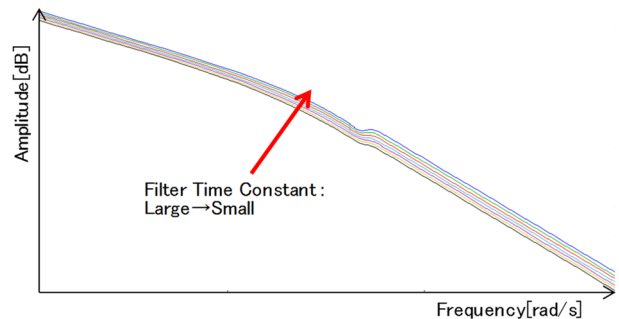


Fig. 17 Bode Plot of Closed-Loop Transfer Function

7. 駆動力制御システムの効果

最後に、今まで説明してきた駆動力制御システムの代表的な効果を紹介する。加速シーンと発進変速シーンについて現行制御と新制御の比較をFig. 18, 19に示す。現

行制御でトレードオフの中、応答性を重視したセッティングに対して、新制御では同等以上の応答性を確保しつつ全走行領域で振動・ショックのレベルを改善させた。これにより不快なノイズの発生を抑制しつつドライバーの意図に合ったリニアな車両挙動を実現した。

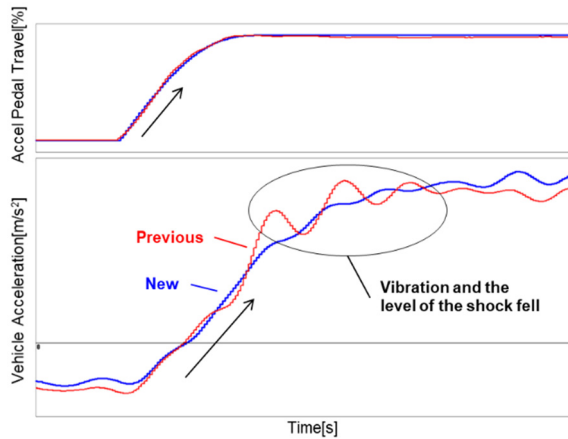


Fig. 18 Comparison of the Accelerating Scene

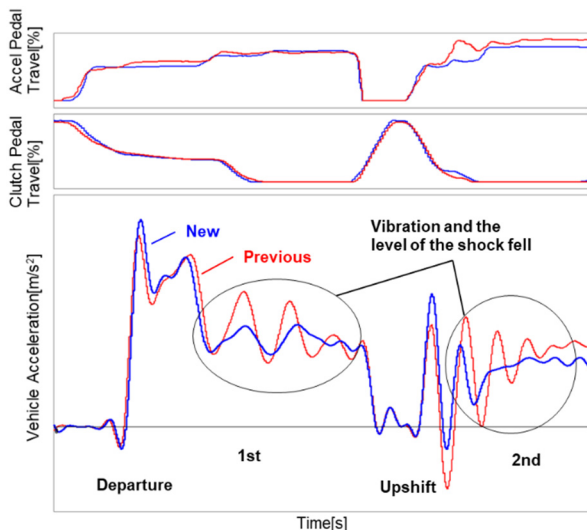


Fig. 19 Comparison of the Scene Performing Departure & Upshift

8. おわりに

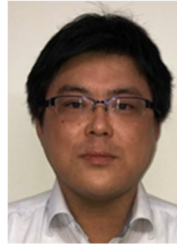
レスポンスと振動・ショックのトレードオフをブレイクスルーできたのは、観測技術を改善し、得られたD/Sねじれ角により車両を振動させないF/B操作量を逐次決定できる制御システムを構築したためである。

新型MAZDA3では、ドライバーの意図どおりの動きをさせることをねらいとし、人間の自然な動作と車両挙動を合わせるため、遅れやノイズなく、人間の基本行動特性に合うリニアな挙動を実現する駆動力制御システムの開発を行った。新型MAZDA3を運転される際に、操作に対して車が素直に反応することを実感していただけると幸いである。

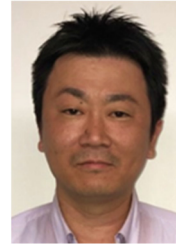
参考文献

- (1) 渡辺ほか：新型デミオのパフォーマンスフィール、[マツダ技報, No.32, pp.42-47 \(2015\)](#)
- (2) 兼為ほか：人馬一体 新型ロードスターのパフォーマンスフィール、[マツダ技報, No.32, pp.114-118 \(2015\)](#)

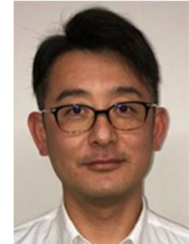
■ 著 者 ■



山崎 篤史



名越 匡宏



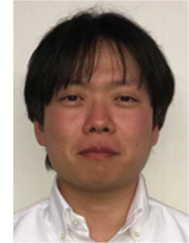
津田 顕



石山 雄貴



多田 努



渡部 雅晃

論文・解説

41

システムからハーネス設計まで一貫通貫した エレキシステム開発

Seamless Electric System Development from System Design to Harness Design

竹本 明*1 Akira Takemoto	安原 潤紀*2 Junki Yasuhara	高田 純司*3 Junshi Takata
戸手 孝則*4 Takanori Tode	戸井 隆史*5 Takashi Toi	

要 約

マツダが目指すエレキシステム開発を実現するため、部門の垣根を越えてシステム設計からハーネス設計まで一貫通貫で行う開発プロセスを構築し、車一台の電気回路をモデル化した。新世代商品群から量産開発に適用した全社レベルでの取組内容と将来展望について報告する。

Summary

We established a seamless development process (from system design to harness design without the division of the department) and the electric circuit model for one vehicle with an eye to putting it into practical applications for the electric system. This article introduces the efforts we made in applying this development process to the mass-produced models, which started with new generation vehicles, and future prospects.

Key words : Vehicle Development, Computer-Aided Design (CAD)/Computer Aided Engineering, Tool/Design Modeling, Design Simulation/Design, Electronics And Control, Wiring Harness, Electric Circuit/Electronic Circuit, Model Based Development, Efficiency

1. はじめに

自動車業界は、高機能化によりエレキ部品の増加、複雑化の一途をたどっている。さらに近年では『CASE』（Connected：コネクティッド化，Autonomous：自動運転化，Shared & Service：シェア&サービス化，Electric：電動化）というキーワードで表される新たな変革期へ突入しようとしている。例えば、自動運転では自律した安全性を確保するために、車一台に搭載されるセンサーやカメラは飛躍的に増え、また、電子制御に異常があった場合の電子制御機能の冗長化（二重系）が求められる。その結果、エレキ部品の増加や複雑化は更に加速することが予想される。このような環境下、従来どおりの開発を行っていても、リソース不足に陥り、高品質で安価で軽量のエレキ部品のタイムリーに商品化する事は困難である。

マツダでは、このような状況を回避するために、開発

の効率化をねらい、コモンアーキテクチャー開発に取り組んでいる。開発の効率化としては、部品共通化が一般的であるが、コモンアーキテクチャー開発は部品共通化とは異なり、特性の数理モデルを共通化する開発である。その理由は、車の設計から製造までの開発工数を俯瞰すると、個別に適合させるキャリブレーションの工数削減が最も重要と考えているからである。エレキ領域でのコモンアーキテクチャー開発の具体例として、EMC（ELECTRO MAGNETIC COMPATIBILITY）性能開発を取り上げて説明する。アーキテクチャー設計段階では、車として達成したいEMC性能に対し、必要な特性の数理モデル化を行い、その特性を各部品に適用できる状態にする。その後の工程となるシステムからハーネス開発段階において、特性レンジに合せた開発を行う（Fig. 1）。

この開発を実現するためには、量産開発工程の効率化を行い、リソースをアーキテクチャー開発へ移す必要がある。その最初のステップとして、量産開発段階で上流

*1～5 電子基盤開発部
Electronic Platform Development Dept.

工程がモデル化した電気回路情報を下流工程のハーネス設計が一気通貫で活用できる開発基盤とプロセスの構築に取り組んだ (Fig. 1の赤囲)。

本稿では新世代商品群より量産適用したその取り組み内容と成果を紹介する。

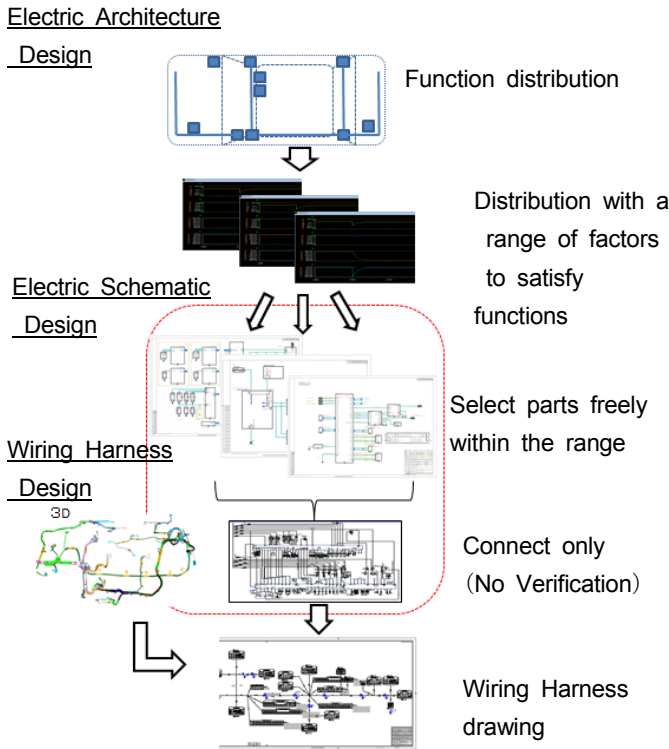


Fig. 1 Ideal Car Electronics Development Flow

2. 従来のエレキ開発プロセスと問題点

コモンアーキテクチャー開発を実現する手段として、マツダはMBD (Model based development) による開発を推進している。

エレキシステム開発のソフト領域では制御仕様をモデル化し、プラントモデルや環境モデルと連結したMBDが進んでいる。一方、ハード領域ではエレキシステム図という情報伝達媒体を用いた開発が行われていた。エレキシステム図とは、システム設計部門が、電気的な仕様や、接続情報、車種/仕向けごとの設定条件を自然言語 (各設計部門の文化や歴史的な背景から使用されている言語) を用いて作成し、関連する部門へ展開/共有するものである。システム図を受け取ったハーネス設計部門は、人海戦術により、約80種のエレキシステム図の間の整合取りを行いながら、数千に及ぶ回路をつなぎ合わせていた。そして、各機能と車種仕様ごとに回路の品質を保証するために、約30項目の電気的な性能検証を行っていた (Fig. 2)。

その結果、従来のエレキシステム開発は、量産開発工程において以下の慢性的な問題を抱えていた。

(1) ハーネス設計部門は、システム設計部門が作成するエレキシステム図を理解する作業 (不明点確認), 特に設定条件の確認に多大な工数を要している。

(2) 複数のエレキシステム図に登場する部品は、相互に不整合 (同じ部品なのに仕様が異なる) が生じ、整合取りに多大な工数を要している。

(3) エレキシステム図の情報は、ハーネス設計用の別の媒体に転記が必要で、更にその確認に多大な工数を要している。

(4) 回路をつなぎ合わせる作業に多大な工数を要している。

(5) 回路の電気的な性能検証に多大な工数を要している。

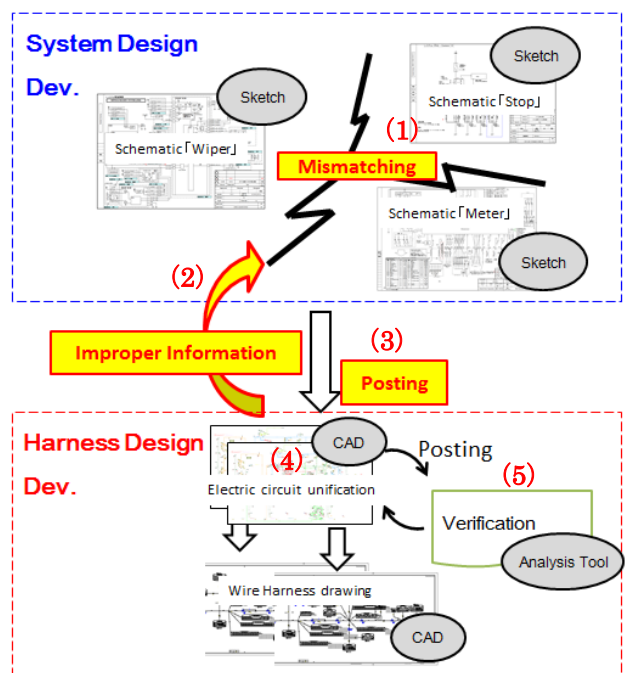


Fig. 2 Conventional Process and Problem

3. 問題点の分析と解決への課題

3.1 問題点の分析

2章で述べた (1) ~ (5) の各問題点に対して分析を行い、真因を以下のとおり特定した。

(1) 設定条件の確認作業は、送り/受け取り側とも、これまでの慣習で業務の一部ととらえており、双方の問題認識が低く、表記方法が見直されていない。

(2) 複数のエレキシステム図に登場するエレキ部品は、仕様の確定や更新時に、全てのエレキシステム図に情報を反映する必要がある。しかし、反映漏れや反映遅れにより、不整合が生じている。

(3) エレキシステム図は紙面による情報伝達を想定しており、判読できれば良く、データ形式と作成手段に決まりがない。

(4) ツールの制約により車種仕様ごとに回路設計を行っており、マツダの理想とする全車種仕様を一括した車一台の回路が作れない。

(5) これまでの回路検証作業は、人海戦術に頼った手作業に近いツールで対応できていたが、回路数の指数関数的な増加に伴い、検証工数も指数関数的に増加している。

3.2 問題解決への課題

3.1の分析を踏まえ、各問題を解決するために取り組むべき課題を以下のとおり設定した。

- (1) エレキシステム図の表記統一、ルール化。
- (2) 抜け漏れ、不整合を抑制するエレキシステム図の作成環境構築。
- (3) システム設計からハーネス設計まで一貫通貫でモデルを運用するプロセス。
- (4) 車一台の回路をモデル化できる基盤構築。
- (5) 効率的な回路検証手段の構築。

4. 課題に対する施策

3章で述べた課題 (1) ~ (5) に対して4.1~4.5の施策を行った。

4.1 エレキシステム図の標準化

(1) ネーミングの統一

エレキシステム図には、図面名称をはじめ、エレキ部品(デバイス)やコネクタ等、種々の名称が使用される。各名称の命名ルールを作り、登録制としたことで、類似する名称を統一した(例 BONNET SW/HOOD SW, DOOR SW/AJAR SW等の名称を統一)。

(2) 部品の設定条件/表記方法のルール化

設定条件を、自然言語から社内公用語となる装備ディクショナリの名称を用いて表記するルールとした。

4.2 エレキシステム図の作成環境構築

(1) システム図のモデル化

エレキシステム図をモデル化するツールは、既にハーネス設計で実績があり、抜け漏れ、不整合を抑制する機能を有しているシーメンス社製『Capital』を選定した。そして、このツールを上流工程のシステム設計部門、及びエレキ部品設計部門へ導入した。

(2) 入力条件の設定

設定条件やデバイス名等の統一した名称を、全てツールの辞書に登録し、その名称のみエレキシステム図に記載できる仕組みを作った。

(3) 部品情報の一元管理

複数のエレキシステム図に登場するエレキ部品の情報一元化を、ツールの『共有』機能(マスター情報がアップデートされたら、自動的にシェアリング先の情報が更

新される仕組み)を活用した。

(4) 情報の資産化

作成したエレキ部品(モデル)を他プロジェクトへ継続して利用するために、『ライブラリ』機能を活用した。

4.3 一貫通貫プロセスの構築と運用

ツールによるモデル作成工数の極小化を念頭に置いたプロセスの構築を行った(Fig. 3)。

(1) マツダユニークなモデル化プロセス

エレキシステム図のモデルは、エレキ部品とその接続情報が重要となる。部品設計担当が複数のシステム図へ部品情報を転記することは煩雑なため、新たに部品情報を表す『デバイス図』を設定した。そして、全てのエレキ部品に対して最初にデバイス図を一品一様で作成し、『共有』の設定を行うこととした。デバイス図の完成後、システム設計担当は『共有』されたデバイスの中からエレキシステム図に記載したいデバイスを選択するだけでよく、その後、接続情報を入力し、完成させるプロセスとした。

(2) ライブラリ登録の簡易化

部品情報(デバイス図)は、情報をライブラリに登録することでモデル化が完了する。しかし、『ライブラリ』は全てのエレキシステム図に影響する重要なデータベースであるため、登録や更新に細心の注意が必要となる。また、ライブラリ作成工数は部品設計担当にとって負担となる懸念があったため、登録や更新を系統的にサポートできるプラグインソフトウェアを開発した。誤入力防止する機能を備えたエクセルシートに情報を入力すればデータがコンバートされ、ツールにインポートさせるソフトがその一例である。

なお、ライブラリへの登録は運営事務局が審査後に行うことで、ライブラリ健全性を担保した。

(3) 関係者への方向付け

統一ツールによる情報伝達を実現するには、システム設計部門及びエレキ部品設計部門に、エレキシステム図のモデル化を受け入れていただく必要がある。しかし、多くの部門では、慣れないツール(回路CAD)を使用する新しい取り組みに対しての不安があり、受け入れてもらうことの難易度が高かった。そこで、開発部門を横断した会議での発表や、各部門に出向いての紹介活動、実演を繰り返すことで、理解を深めて頂いた。

(4) 教育体制

各設計部門の担当者は、これまで回路CADに触れる機会がほとんどなかったため、運用に向けて半日~一日コースの教育カリキュラムを組み、数週間かけて社内関係者全員へ教育を実施した。なお、新たな担当者に対しては、定期的に集合教育を実施した。

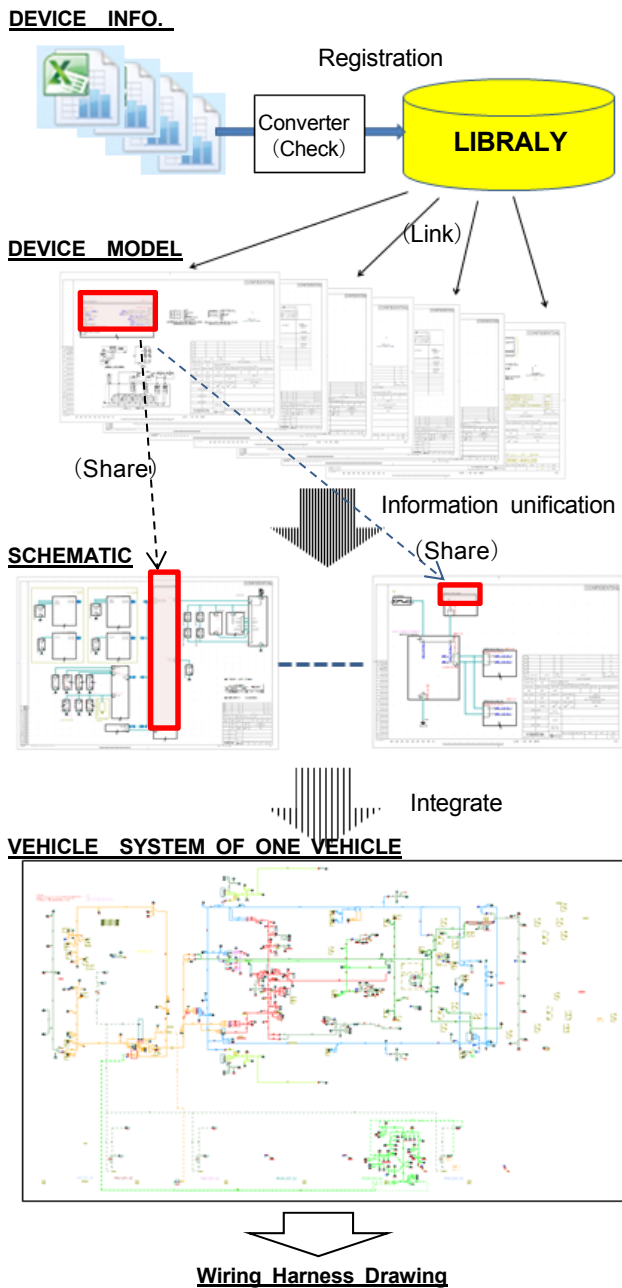


Fig. 3 Development Process Using Model

4.4 車一台の回路をモデル化できる基盤構築

システム設計部門でモデル化されたエレキシステム図を有効活用し、ハンドル位置やボディタイプ、エンジン、仕向け違い等による設定条件を包含した車一台の回路モデルが作成できる基盤構築を行った (Fig. 4)。代表的な施策を以下に記す。

(1) ツール機能の増強

設定条件を全て包含した車一台の回路モデルは、モデルの一元管理ができる反面、回路が複雑になり莫大なデータを取り扱うため、ツールの計算ロジックでは処理しきれない問題が発生した。この問題に対して、ツールベンダーに改善の必要性を理解していただくことで、大規模

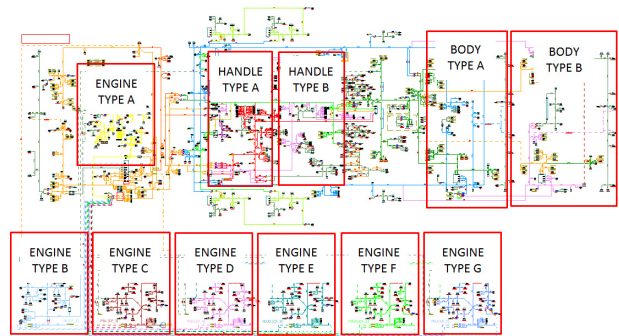


Fig. 4 Model of Circuit for One Vehicle

回路に対応可能な計算ロジックを作成し、標準機能としてツールへの実装を行った。また、回路モデルを作成する際の問題として、回路の複雑化から現状の計算ロジックでは設計者の意図どおりに回路作成できない問題が発生し、設計者のスキルに頼った検出と修正の作業が生じていた。そのため、原因となるモデル化の作成ルール/プロセスを見直すとともに、誤入力の防止/検出、入力作業を簡易化する約20個のプラグインソフトウェアを開発し、回路作成作業の簡易化を行った。

(2) 回路モデルのチェックツール開発

車一台の回路をモデル化できるツール基盤を構築したものの、その回路全てを自動でモデル化するまでには至っていないため、回路の接続ミスや漏れを防ぐ仕組みが必要となる。しかし、車の仕向けや装備仕様等による莫大な回路の組み合わせを人手によりチェックすることは不可能なため、自動でチェックできるツールを開発した。

Fig. 5にその概念を示す。対象とする車の仕様から必要となる回路をシステム図から抽出し、車一台の回路モデルとの比較を行うことで、回路の抜け漏れを自動でチェックする仕組みである。これは、部品の設定条件を社内公用語に統一し、社内のさまざまなデータベースと連携したことで実現できた。

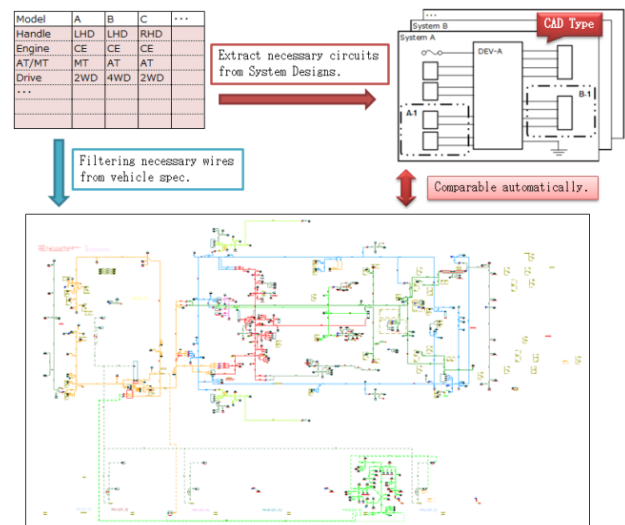


Fig. 5 Automatic Check Concept of Circuit

4.5 モデルによる回路検証プロセスの構築

カラクリの解明が既にできている電気回路の定常領域に限定し、モデルを活用した回路検証プロセスを構築した (Fig. 6)。その一例としてエレキ部品の電圧検証を紹介する。

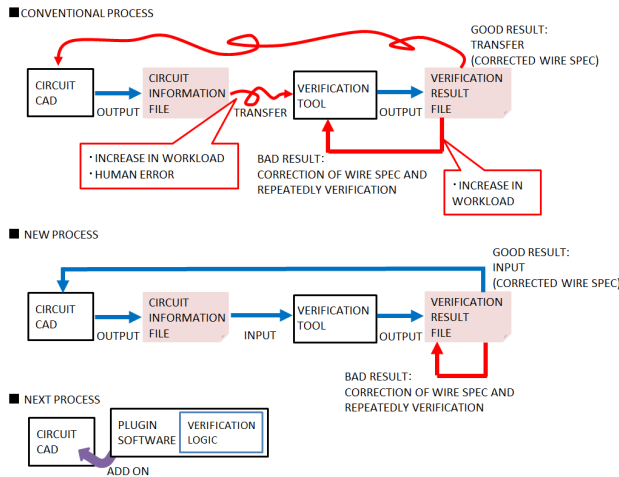


Fig. 6 Electrical Performance Verification Process

電圧検証の目的は、エレキ部品に必要な電圧レベルを設定した電線仕様で保証できるか確認することである。エレキ部品への印加電圧は以下の計算式で表される。

$$\text{「エレキ部品の電圧} = \text{電源電圧} - \text{電線電圧降下} \text{」}$$

また、この式は以下のように展開できる。

$$\text{「エレキ部品の電圧} = \text{電源電圧} - (\text{電線に流れる電流値} \times (\text{電線長} \times \text{単位長さあたり電線抵抗値})) \text{」}$$

単位長さあたりの電線抵抗値は、エレキ部品に接続される電線仕様 (電線種, 電線径, 端子サイズ) により異なる。この計算式を解くために、車一台の回路モデルが保有している電線接続, 電線仕様, 電線長, 電線に流れる電流値の情報を活用し, 上記計算式が組み込まれた検証ツールにデータをインポートすることで電線仕様の妥当性を判定している。

なお, 検証ツールから出力される検証結果のファイル (Fig. 7) に対して, 電線径を修正すれば再計算できる機能も持たせている。

5. 施策の効果

新世代商品群のリードビークル開発から, 全社レベルで新たなエレキ開発プロセスを導入して開発をスタートした。上流工程では, エレキ部品の最新情報が, 時間差なく関係のあるエレキシステム図へ反映でき, 役割分担も明確になったため, 作成/反映の作業効率が向上した。さらに, 下流工程はシステム図をそのまま取り込み, 車に実装する物理単位となる電線に直接変換することで, 人の手による介入を極小化した一気通貫のハーネス設計が可能となった (Fig. 8)。その結果, システム設計部門と

	RESISTANCE	CURRENT	VOLTAGE
BATT	0.15mΩ	36.18A	0.01V
FUSE_BFT_MAIN	0.46mΩ	36.18A	0.02V
BATT_P_MAIN	0.45mΩ	36.18A	0.02V
0A	0.16mΩ	36.18A	0.01V
RFBOX_BATT	1.08mΩ	36.18A	0.02V
T_O_BOX,1	0.92mΩ	36.18A	0.03V
9A	0.06mΩ	36.18A	0.04V
T_O_BOX,2	0.61mΩ	18.00A	0.08V
FUSE_ESVT_EX	0.45mΩ	18.00A	0.02V
FUSE_RELAY_BOX,2	0.30mΩ	18.00A	0.05V
42A	1.10mΩ	18.00A	0.02V
FUSE_RELAY_BOX,1	0.58mΩ	18.00A	0.10V
RLY_ESVT_EX	1.10mΩ	18.00A	0.02V
FUSE_RELAY_BOX,2	0.45mΩ	18.00A	0.08V
4376A	0.85mΩ	18.00A	0.01V
W010200,2	1.00mΩ	18.00A	0.01V
ELEC_EX_SVT_G2[259]	1.25mΩ	18.00A	0.11V
SVT_G2_POWER_ESVT[RLY]	1.00mΩ	18.00A	0.10V
ELEC_EX_SVT_G2[259]	0.45mΩ	18.00A	0.04V
921A	0.45mΩ	36.18A	0.02V
E020_1B[275]	0.28mΩ	36.18A	0.01V
EARTH_BODY,2	0.45mΩ	36.18A	0.02V
8990A	0.45mΩ	36.18A	0.01V
BATT_N3	0.45mΩ	36.18A	0.02V

Fig. 7 Verification Output File

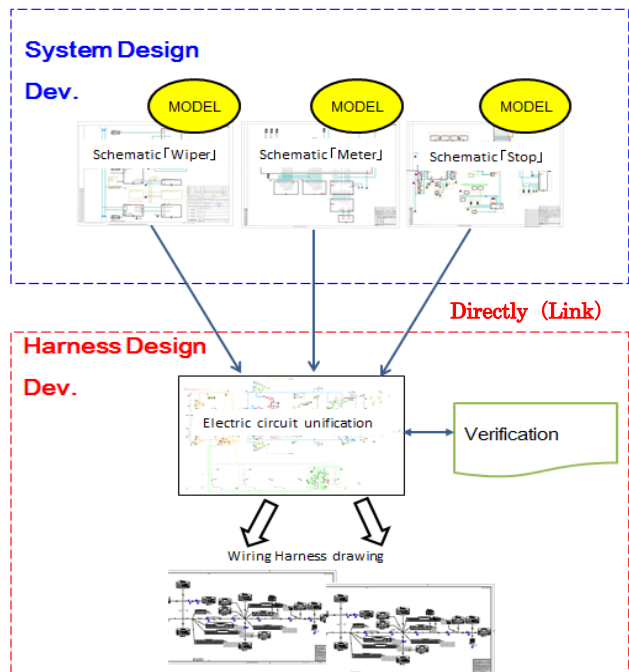


Fig. 8 New Electric System Development Process

ハーネス設計部門間でのエレキシステム図の内容に関わる不明点件数と問合せ確認工数は減少。ハーネス設計での転記工数は不要になるとともに, 試作車両製作時の回路不具合は従来から半減した。また, 車一台の回路モデルと回路検証のプロセスを構築できたことで, 主要ユニットの数と配置違いによるコスト及び質量の机上計算を容易に繰り返すことを可能とし, 回路検証における最適仕様算出工数を最小限に抑えることができた。

6. おわりに

今回の取り組みは, 理想のコモンアーキテクチャー開発に向けた最初のステップである。次のステップでは, 車一台を俯瞰できる電気回路モデルを活用し, 検証の領域を定常から時間軸を加えた領域に拡大させていく。最

最終的には過渡、EMC等の領域まで広げカククリ解明を行い、鍵となる電気的特性を見定め数理モデル化していく。そして、アーキテクチャー設計段階で部品に必要な電気的特性のレンジを定めることができる基盤とプロセスを構築していく。その実現に向けて取り組みを継続していく所存である。

参考文献

© 2019 Mentor Graphics Corporation.

Capital製品はMentor Graphics Corporationの登録商標です。

■ 著 者 ■



竹本 明



安原 潤紀



高田 純司



戸手 孝則



戸井 隆史

論文・解説

42

人間特性に基づく情報伝達音の開発

Information Transmission Sounds Development Grounded
on Human Characteristics

大杉 郁代*¹ 井野 寿信*² 大池 太郎*³
Ikuyo Ohsugi Hisanobu Ino Taro Oike
浜田 康*⁴ 手島 由裕*⁵
Yasushi Hamada Yoshihiro Teshima

要 約

情報伝達音とはクルマから人に注意を促す音と、車両の機能を操作するシーンで受付状況を伝える音が対象で、コクピットにおけるヒューマン・マシン・インターフェース (HMI) の認知インターフェースの1つである。

ドライバーはクルマを運転する中で五感を通じ多くの情報を知覚・認知し、総合的に判断しながら運転操作につなげるタスクを繰り返し行っている。マツダは従来から走行安全最優先の哲学の下、コクピットHMI開発を行っている。先進安全制御システムやインフォテインメントシステムの進化に伴いドライバーに伝える情報量が増加の一途をたどる中で、この哲学を守りながら人間特性の研究と実現手段の技術開発に取り組んでいる。

新型MAZDA3の情報伝達音はメーターのワーニング文言表示など視覚情報と連携し、聴覚刺激の機能を有効に果たす制御因子を特定した音創りにより、コクピットHMIの進化を実現している。

Summary

Information transmission sounds, which include the sounds for urging attention from vehicle to user and users' operations for the vehicle functions, represent one of a cognitive interface of Cockpit Human-Machine Interface (HMI).

The drivers perceive and recognize a great deal of information through their five senses while driving, and perform the tasks linking to driving operations repeatedly while making judgments in a comprehensive manner. Mazda has been undertaking the development of Cockpit HMI under the philosophy of "Driving safety is the top priority". With the evolution of Advanced Driver Assistance System (ADAS) and infotainment system, the amount of information conveyed to the drivers goes on increasing. Under such circumstances, we are engaged in human characteristics study and technology development while keeping this philosophy. In cooperation with the visual information such as warning wording displayed on the meter, information transmission sounds of the All-New Mazda3 have contributed to the evolution of cockpit HMI by creating a sound that specifies the control factor that effectively performs the function of auditory stimulation.

Key words : Human Engineering, Human Machine Interface, Alarm/Warning, Information Transmission Sounds

1. はじめに

マツダのコクピットHMIは走行安全最優先の哲学の下、コクピット内で情報量が増えても安全性が損なわれないよう、人間の注意散漫という現象を最小化するアプローチで従来から開発している。具体的には、クルマの中で見て・聴いて・触って情報をやり取りする認知・操作インター

フェース開発において、注意散漫の要素である「見るわき見」「意識のわき見」「操作負荷」のリスクを人間特性に基づいて最小化することをねらいとしている。

新型MAZDA3は、3要素のうち特に人間の頭の中にある「意識のわき見」部分に注力して開発した。情報伝達シーンで人間が刺激を五感で知覚し認知するプロセスにおいて不必要に注意資源を費やさない認知インターフェースの実

*1, 2, 4, 5 電子性能開発部

Electrical & Electronics Performance Development Dept.

*3 情報制御モデル開発部

Infotainment and Control Model Development Dept.

現を目指した。本稿では、認知インターフェースの1つである情報伝達音開発の取り組みを報告する。

2. 聴覚刺激の機能と制御因子

情報伝達音とは、衝突の危険性やシステムの機能低下などの安全性にリスクのあるシーンでメーターやヘッドアップディスプレイのワーニング表示と連動して注意を促す音と、スイッチなどにより車両の機能を操作するシーンで受付状況を伝える音が対象である。

人間の認知プロセスにおいて不必要な注意資源を費やさない状態を実現するために、各シーンでの聴覚刺激の機能を再検討し、音に付加する情報の最適化と、その機能を有効に果たす制御因子を特定し、それをコントロールした音創りについて以下に述べる。

2.1 情報伝達シーンにおける聴覚刺激の機能

人間の認知プロセスにおける五感の割合は視覚が約8割、聴覚が約1割、触覚がそれ以下と言われているが、クルマの運転環境下での情報伝達シーンにおける認知の機能配分を検討し、聴覚刺激の機能は以下の4つと定義した。

安全性にリスクがあるシーンで注意を促す音の機能はⅠ～Ⅲ、車両の機能を操作シーンで受付状況を伝える音の機能はⅣである。

- Ⅰ. 即座に気づかせる
- Ⅱ. 緊急性の高低を伝える
- Ⅲ. 意識を向けるべき方向に誘導する
- Ⅳ. 受付状況が不確かなケースでサポートする

(1) 安全性にリスクがあるシーン

このシーンでは、視覚と聴覚刺激の優位性を以下に示す3つの観点で検討し「音で気づき、表示で状況・対処方法を理解する」という認知の機能配分とした。

1) 知覚の速さ

物理的には光速は秒速30万km、音速は秒速340m(1気圧・湿度0%・気温15℃)であるため、知覚の速さとしては視覚の方が遥かに優位である。ただ、クルマの運転環境下では視覚で周囲のクルマや歩行者などの動きを常に確認しながら走行しており、車外に意識が向いている状況が多い。このように他に意識が向いている状況下では視覚は能動的な刺激であるため、表示デバイスにワーニングを表示しても気づくタイミングが遅れてしまうケースがある。一方、聴覚は受動的な(無意識下の)刺激であるため、他に意識が向いている状況下でも即座に気づくことができる。衝突の危険性やドライバーの誤操作などその瞬間に気づいてもらう必要のある情報や走行に関わる失陥などの緊急対応が必要な情報を伝えるシーンでは、聴覚刺激を付加することで知覚を早める効

果がある。

以上より、確実に即座に気づかせる機能を聴覚にもたせる認知の機能配分とした。

従来車では、聴覚刺激を付加すべきシーンについて明確な考えがなかったが、新型MAZDA3では上記に基づいた設計指針を新たに設定した。

2) 状況・対処の理解

ドライバーに伝えたい情報は「(どこで)何が発生し、どう対処すればよいか」である。聴覚刺激だけでどこまでの情報を理解できるかを検証するため、ブレーキ・ハンドル・スイッチ操作を想定させる試験音源を操作ごとに数種類ずつ製作し、各音が3択のどの操作を示すか回答してもらった実験を行った⁽¹⁾。なお、本研究で行った全ての被験者実験は、試験開始前にインフォームドコンセントを得て行っている。結果をFig. 1に示す。これは各操作の選択割合が最も高かった試験音源の結果のみグラフ化したものである。

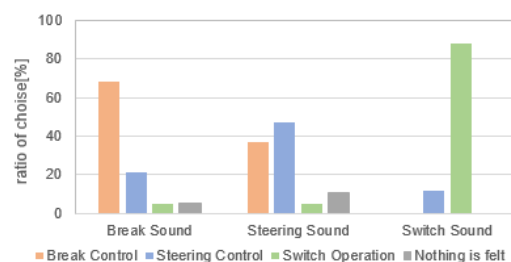


Fig. 1 Operation Associated from Sound

ブレーキとスイッチ操作を連想させることをねらった試験音源については選択割合が60%を超え、ねらいどおりの操作をイメージした被験者が多かったが、ハンドル操作を連想させる試験音源は選択割合が50%に満たず、ブレーキ操作をイメージして選択した割合も多い結果となった。これをどう解釈すべきか判断するために、回答に至った思考プロセスを被験者に聞き取り調査した。その結果、いずれの操作も音のイメージが直接操作に結びついたのでなく、各操作が必要なシーンでの緊急性のイメージと音から感じる緊急性の高低を結びつけた、という回答が多かった。

本実験は3択のため、この思考プロセスでもブレーキやスイッチ操作は正解が多かったが、クルマには多くのシステム・機能が存在し、安全性にリスクがあるシーンでの伝達情報は100種類を超える中で、これら全ての状況や対処方法をこの思考プロセスにより聴覚刺激だけで正確に理解するのは極めて困難であると判断した。

以上より、状況・対処を伝える機能は視覚に、音から直観的に理解できる緊急性の高低を伝える機能は聴覚に

もたせる認知の機能配分とした。

従来車の情報伝達音も緊急性を伝える機能はもたせているが、それだけではなく状況を伝える機能もねらいシステム・機能ごとに違う音を割り当てている。その結果、音の種類数が増加の一途をたどっていた。新型MAZDA3では、この機能配分を見直した。

3) 方向の特定

人間は生活の中で無意識に周囲の音をモニターし、その変化から状況を把握している。また、異常を感じる音が聞こえると、反射的に音が聞こえる方向を確認する行動特性をもっている。この特性を踏まえて、車両後方の衝突危険を伝えるシーンでの情報手段として聴覚と視覚を比較検討すると、まず車両後方から聴覚で伝えた場合、知覚と同時に方向を特定→バックミラーや直視で後方確認し状況を理解、という認知プロセスとなる。一方、視覚の場合は車両後方に視覚情報を呈示しても視野角外は気づかないケースがあるため、車両前方の表示デバイスで伝える場合を想定すると、表示点灯を知覚→二次元の情報を三次元に置き換え方向を特定→バックミラーや直視で後方確認し状況を理解、という認知プロセスとなる。車両後方の特定は視覚よりも聴覚刺激の方が早く、認知プロセスにおける情報処理負荷が少ないという研究結果もある²⁾。

人間の音方向知覚の弁別限は、周波数や到来方向によって差はあるが5~25°と言われており³⁾、この精度で瞬時に音の到来方向を特定できる。ただ、車室内特有の音場環境では、窓ガラスの反射などにより車両の前後方向は直観的に特定できるが、左右方向や前後方向でも更に細かい角度は特定し難いことが自他銘柄車の官能評価実績から判っている。

以上より、「どこで何が発生しているか」の伝達情報のうち方向を伝える機能は聴覚にもたせる認知の機能配分とした。具体的には、車両後方に意識を向けるべきシーンでは車両後方から音が聞こえる状態とし、それ以外のシーンでは状況・対処方法を理解できる表示デバイスがある正面方向から音が聞こえる状態とした。

(2) 車両の機能を操作するシーン

このシーンでは、視覚と聴覚、触覚の優位性を以下に示す観点で検討し「基本は触覚で受付タイミングを理解する。受付タイミングや状態変化が不確かなケースは聴覚で理解する」という認知の機能配分とした。

このシーンは安全性にリスクがあるシーンで注意を促す音とは異なり、スイッチ操作など自らの意図した行動が情報伝達のトリガになるため「何がいつ、どう変化するか」の情報は基本的に理解できている。「いつ」の情

報は、短操作タイプのスイッチであれば操作時のクリック感(触覚)でクルマの受付タイミングを理解できるという解釈である。ただ、以下のように例外となるケースもある。

まず、受付のタイミングの理解が不確かなケースは、音声認識のように触覚フィードバックがない操作や、長操作タイプのスイッチのように受付が確定するまで押し続ける必要がある操作シーンである。次に、状態変化の理解が不確かなケースは、何らかの理由により意図した状態に変化しない、つまり受付が拒否されるシーンである。

このような受付状況の理解が不確かとなるケースでは、視覚や聴覚で認知をサポートする必要があると判断した。伝達機能は以下の2点を理由に聴覚刺激にもたせることとした。理由の1つ目は従来からの検証により家電などの生活環境の中で形成されたメンタルモデルを活用した音創りにより、視覚情報がなくとも聴覚刺激から直接的に受付・拒否・終了などの事象を特定できることである。2つ目は聴覚刺激を伝達手段とすることで運転中の操作における「見るわき見」のリスクが減ることである。

以上より、車両の機能を操作するシーンではクルマの受付状況の理解が不確かなケースのみ、事象を伝える機能を聴覚刺激にもたせる認知の機能配分とした。

2.2 聴覚刺激の機能を果たす制御因子と音仕様

2.1で述べたI~IVの機能ごとに、その機能を有効に果たす制御因子を人間特性に基づいて特定し、音創りや発音体のレイアウトや発音制御といった設計仕様に落とし込む活動を行った。各機能の制御因子は以下と結論づけた。

安全性にリスクがあるシーンで注意を促す音

I. 即座に気づかせる:

音の立ち上がり特性・S/N比(信号対雑音比)

II. 緊急性の高低を伝える:

音の種類数・倍音構造とスペクトル重心の違い

III. 意識を向けるべき方向に誘導する:

周波数・両耳の音圧差と時間差

車両の機能を操作するシーンで受付状況を伝える音

IV. 受付状況が不確かなケースでサポートする:

音の長さ・発音周期・音階や音圧変化(メンタルモデルの活用)

(1) 安全性にリスクがあるシーンで注意を促す音

このシーンでの聴覚刺激の機能であるI~IIIのうち、新型MAZDA3の1番の進化ポイントである「II. 緊急性の高低を伝える」の制御因子について検討内容を報告する。

従来車はブザーを発音体としており、その構造から制御できる音特性は限られていた。単一周波数音を前提に、周波数は1.5kHz・1.8kHz・2kHz・2.8kHzのいずれか、音の

長さや発音周期（ピピピ、ピピピピッ、ピーピーピーなど）は自由に設定でき、これらの組み合わせで緊急性の高低を表現していた。しかし、2.1 (1) 2)で述べたようにシステム・機能ごとに違う音を割り当てる考えから音の種類数は100を超える状況となり、机上での比較評価では緊急性の違いが分かるが、走行中の複合タスク下では違いが分かり難く、総じて高周波の類似した音に聞こえる傾向にあった。

新型MAZDA3の進化として、音の違いを区別しやすく、緊急性の高低が分かり易い音創りを目指し、制御因子を以下の2つに特定し、音創りの設計仕様を具体化した。

1) 音の種類数

人間が無意識に区別できる音の種類数は3~4音といわれている。新型MAZDA3の注意を促す音は、緊急性をFig. 2に示す重要度3段階と対処への猶予4段階で定義し、合計4種類の音設定とした。

従来車のシステム・機能ごとに違う音を割り当てる考えはなくし、全てをこの4種類に割り当てる考えとした。

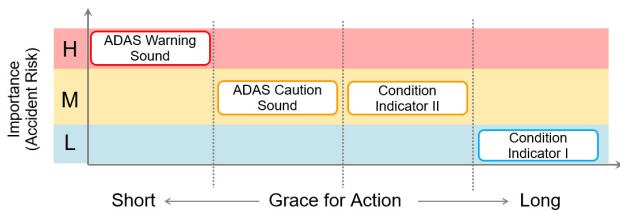


Fig. 2 Definition of Sound Classification

2) 倍音構造とスペクトル重心の違い

音の違いを区別しやすく、緊急性の高低が分かり易い音創りの制御因子は、倍音構造とスペクトル重心である。これらに違いをもたせることがポイントとなる。

まず、音の違いを区別しやすい制御因子である倍音構造について説明する。音の3要素は、音の強さ（音圧）・音の高さ（周波数）・音色である。例えば、同じオクターブのラをトランペットとフルートで奏でた場合、人間は楽器の違いを認識できる。これは音の3要素のうち音色の違いを聴き分けているためである。注意を促す4種類の音に、この特性を活用することで、区別しやすい音創りができると考えた。

音色の構成要素を分解すると、スペクトル要素では基本周波数と倍音構造、時間要素では音の立ち上がり特性・持続性・減衰特性があり、このうち、音色への寄与度が高いのは倍音構造である。倍音構造の特性は、Fig. 3に示すように基音（f）に対する倍音成分の周波数（2f以上）と各倍音の音圧バランスで決まる。

従来車のブザー音は、ブザーの構造上倍音がほとんど出ない周波数特性（単一周波数音）で、倍音構造は制御できていない要素である。ブザー音のような単一周波数

音の基本周波数のみ制御した音よりも、倍音構造に違いをもたせた複合音の方が、緊急性の表現幅も広くなるということが判っている(4)。

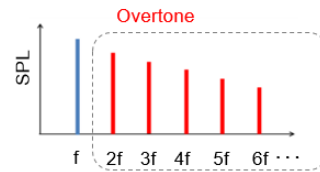


Fig. 3 Overtone Structure

次に、緊急性の高低を分かりやすく表現する制御因子であるスペクトル重心について説明する。周波数の高低と人間が感じる緊急性の高低は、ほぼ比例関係にあることが従来からの検証で判っている。この特性を活用し、重要度3段階は、Fig. 4に示すスペクトル重心の要件を適用した複合音を製作した。最も緊急性が高い音のスペクトル重心を2kHzとしたのは人間の周波数対音圧感度を示した等ラウドネスレベル曲線(6)から音圧感度が最も高い周波数帯域であること、加齢により聞こえにくくなる高周波帯域は除くこと、走行騒音にマスキングされ難い帯域であることが理由である。緊急性が中レベルのスペクトル重心は、聴覚の臨界帯域幅(6)の特性から2kHzに対して容易に周波数の違いを区別できる1kHz、緊急性が低レベルのスペクトル重心も同様の考えで500Hzとした。スペクトル重心の要件に幅をもたせているが、これも同様の考えで設定している。Fig. 4の要件は、広帯域の発音体が必要なことを意味しており、従来のブザーでは実現できず、新型MAZDA3ではスピーカーを採用した。

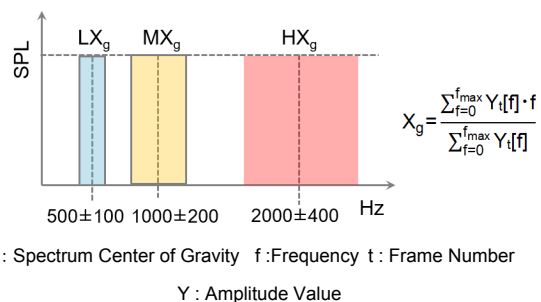


Fig. 4 Important Matter of Spectrum Center of Gravity

以上、新型MAZDA3の注意を促す音は、音の種類数の適正化と、倍音構造とスペクトル重心に違いをもたせた音創りにより、音の違いを区別しやすく、緊急性の高低が分かりやすい音特性を実現した。

(2) 車両の機能操作シーンで受付状況を伝える音

このシーンでの聴覚刺激の機能は「IV. 受付状況が不確かなケースでサポートする」である。この機能を有効に果

たすための音創りの制御因子は、音の長さ・発音周期・音階や音圧変化が主因子である。

このシーンの対象音は、受付音・拒否音・終了音・ウインカー音・リバース音・音声認識の発話開始音・電話着信音などの10種類の事象である。受付であれば短音や音階上昇音、終了は長音や音階下降音、拒否は否定感のある低い不協和音や短音の2~3回繰り返し音、ウインカーはカッチカッチを表現する短い繰り返し音など、各事象に対して音をイメージできる。これは、2.1 (2)で述べたようにクルマや家電、携帯電話など生活環境の中でメンタルモデルが形成されているためである。

従来車では、受付音や拒否音、ウインカー音など単一周波数でも音の長さや発音周期の制御でメンタルモデルに近い音創りができていたが、新型MAZDA3ではコクピット内の全ての音を対象にしたことから電話着信音などの新たな表現が必要となり、これらのメンタルモデルに合致させるためには、従来からの音の長さや発音周期の制御に加え、音階や音圧の時間軸での制御も必要と判断した。

従来、単一周波数音で表現していたウインカー音なども音階や音圧変化の制御を加えたことで、事象を特定する機能性をより高め、更に、複合音を活用した音創りにより落ちつき感のある音表現など商品性も高めることができた。

3. 統一感のある音創り要件

新型MAZDA3では、2.で述べた機能性の追求に加え、コクピット空間との統一感も目指した音創りを行った。

具体的には、マツダが目指すブランド表現のキーワードを上げ、それらがどういった音の表現要素につながるか、シンプルなメロディーを複数の楽器で奏で比較評価しながら特定する検討を行った。特定した要素は音創りのベース要件とし、緊急性の高い音源以外の全てに適用することで、統一感をもたせた。緊急性が高い音源は、2.2 (1) 2)で述べたように音の違いを区別しやすい音創りの要件として倍音構造(音色)を制御する必要があるため、機能音の要件を優先することとした。

4. 部品の機能統合

新型MAZDA3は、音の種類数削減などの人間特性からの機能統合と合わせて、部品の機能統合も行った。従来車と新型MAZDA3の情報伝達音システム構成の違いをFig. 5に示す。

従来車はメーター内のブザー以外にシステム固有のブザーが存在し、車室内では最大で5つの発音体を設定していた。また、発音制御するコントロールユニットも複数存在していた。新型MAZDA3では、倍音構造とスペクトル重心を制御するために広帯域の音創りが可能なスピーカーを発音体とし、車両の前後2か所に情報伝達音の専用スピーカーを設定した。2か所に設定したのは、2.1 (1) 3)で述べた方向

を特定する機能をもたせるためである。また、発音制御のコントロールユニットは1つに統合した。

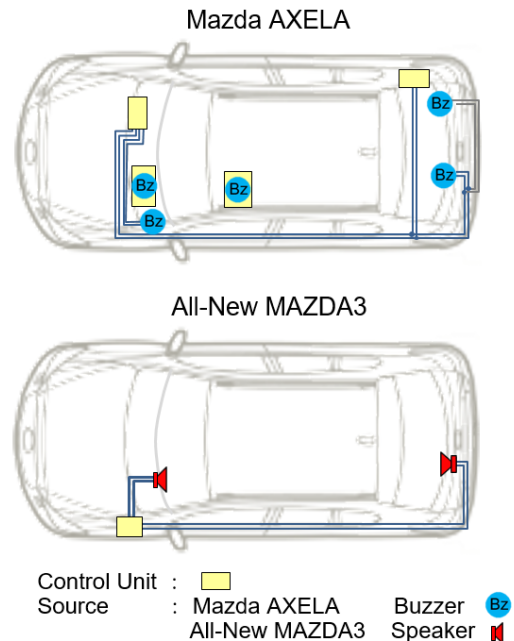


Fig. 5 Construction of Information Transfer Sound System

5. おわりに

新型MAZDA3の情報伝達音は、コクピットHMIの進化を目指し、認知プロセスにおいて不必要に注意資源を費やさない認知インターフェースの実現を目指して開発した。人間特性に基づき情報伝達シーンでの聴覚刺激の機能を再検討し、音に付加する情報の最適化と、その機能を有効に果たす制御因子を特定し、それをコントロールした音創りを行った。機能性だけでなくコクピット空間での統一感もねらった音創りにより、商品性も進化したと自負している。今後も継続的な進化を目指し、取り組む所存である。

参考文献

- (1) 世良：サイン音の緊急感のレベルを制御するために必要な音響特性の検討，九州大学修士論文，2016.
- (2) 茂木ほか：脳活動計測に基づく情報音の音像定位による方向認知支援，自動車技術会論文集，46巻6号，pp.1093-1098，2015
- (3) 飯田ほか：空間音響学，東京，コロナ社，2010
- (4) 田口：自動車内のサイン音の音響特性と高級感、快適感、警報感の対応関係。九州大学修士論文，2007
- (5) 城戸：音響工学講座(1) 基礎音響工学，東京，コロナ社，1990.

■ 著 者 ■



大杉 郁代



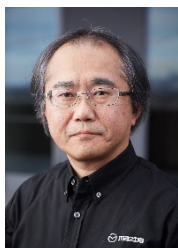
井野 寿信



大池 太郎



浜田 康



手島 由裕

論文・解説

43

高温高圧雰囲気場における水添加が
自着火・燃焼反応におよぼす影響The Effect of Water Addition on Auto-Ignition and
Combustion under High Temperature and Pressure Condition

葛 晰遥*1

Ge Xiyao

原田 雄司*2

Yuji Harada

清末 涼*3

Ryo Kiyosue

山下 洋幸*4

Hiroyuki Yamashita

山本 寿英*5

Toshihide Yamamoto

要 約

高圧縮比エンジンでは、ノッキングに代表される異常燃焼の抑制が課題であり、水添加による燃焼制御技術が提案されている。本研究では詳細化学反応計算を用い、水の化学的特性が自着火・燃焼化学反応に与える影響について、一般的なノッキング抑制手段であるEGR (Exhaust Gas Recirculation) ガス添加と比較した。その結果、水添加は、「EGRガス添加に比べて自着火に至る過程の反応を抑制する効果が小さい」、 「EGR添加とは違い自着火後の燃焼反応を活性化する効果がある」ことが分かった。この差は、燃焼過程におけるOHの挙動に違いがあることによる。

Summary

Knocking occurred by auto-ignition is the major issue of high compression ratio engines, and water addition has been proposed for its suppression. In this report, the effects of water addition on auto-ignition and combustion compared with EGR gas addition which is a general method for the suppression of knocking were investigated using a computer-aided engineering method based on detailed chemical kinetics. As the results, “water addition has smaller inhibiting effect on low temperature oxidization than EGR gas addition.” and “water addition has an activating effect on high temperature oxidization unlike EGR gas addition” are cleared. These differences were caused by the difference in the OH radical production and consumption process.

Key words : Heat Engine, Compression Ignition Engine, Spark Ignition Engine, Homogeneous Charge Compression Ignition, Numerical Calculation, Combustion Analysis, Additive

1. はじめに

地球温暖化やエネルギーセキュリティ等の地球規模の課題に対応するため、内燃機関の熱効率向上が強く求められている。熱効率の飛躍的な向上には、エンジンの高圧縮比化が有効である⁽¹⁾。高圧縮比エンジンでは、従来エンジンよりも圧縮端の燃焼室内温度・圧力が高くなることにより、混合気の急峻な自着火に起因するノッキング（通常圧力振動を伴う）が発生する。このノッキングにより、エンジンの信頼性が大きく損なわれる。ノッキング抑制には、ノッキング発生の起点である混合気

の自着火を抑制することや、燃焼化学反応を緩慢にすることが重要であり、従来からEGRガス添加や水添加を用いた燃焼制御技術が提案されている。EGRガス添加には、混合気中の酸素、燃料濃度を低下させることにより、混合気

の自着火抑制効果、燃焼緩慢化効果がある⁽²⁾。また、水添加による自着火抑制効果も報告されており、ガソリンエンジンのノッキング抑制手段としての活用も検討されている⁽³⁻⁶⁾。同様にディーゼルエンジンにおいても燃焼緩慢化効果、NO_x低減効果⁽⁷⁻⁹⁾があることが報告されている。このようにEGRガス添加、水添加ともに、自着火抑制効果、燃焼緩慢化効果をもつが、水添加についてはそ

*1~5 技術研究所

Technical Research Center

の物理的冷却効果（潜熱・顕熱）に着目した報告が多く、水添加が高温高压場での自着火・燃焼に与える化学的影響やEGRガス添加との差異等、明らかになっていない点が多い⁽¹⁰⁾。本研究では、水添加が自着火・燃焼の化学反応に与える影響について、冷却効果以外の化学的特性に着目し、EGRガス添加による効果との差異を明らかにすることを目的とした。

2. 計算条件

2.1 計算条件

水添加が自着火・燃焼の化学反応に与える影響について、EGRガス添加との差異を明らかにするため、化学反応速度論に基づく計算解析を実施した。計算解析は、ANSYS社製CHEMKIN-PROのClosed Homogeneous Batch Reactor modelを用い、定容かつ断熱条件として実施した。なお、2207化学種、10289素反応式をもつ反応機構を使用した。計算条件を表1に示す。標準燃料（PRF90）を供試燃料として用い、初期温度は600K～1000Kの範囲、当量比 ϕ は0.4～2.0の範囲で計算を実施した。また、希釈率を全ガスに対する水またはEGRガスの体積割合と定義し、本研究では水添加、EGRガス添加ともに希釈率10%とした。なお、水は計算開始時期において水蒸気として存在するものとした。EGRガス組成は、Cooled-EGRを想定して当量比によらず $N_2:CO_2=79:21$ とした。

2.2 定義

本研究では、Fig. 1に示すとおり計算開始からOHラジカル濃度が第一ピークを迎えるまでの期間を低温酸化反応支配期間、OHラジカル濃度の第一ピークから H_2O_2 濃度ピークまでの期間を H_2O_2 ループ支配期間、 H_2O_2 濃度ピークから熱発生量が最大となるまでの期間を高温酸化反応支配期間と定義した。

Fig. 2に本研究における着火遅れ時間、燃焼期間の定義を示す。 H_2O_2 ループ支配期間終了時期を自着火時期

(Thermal ignition) と定義し、計算開始から自着火時期までの期間を着火遅れ時間 (τ) とする。各計算における熱発生量の最大値を総発熱量とし、自着火から総発熱量の90%に至るまでの期間を燃焼期間 (τ_{comb}) とする。

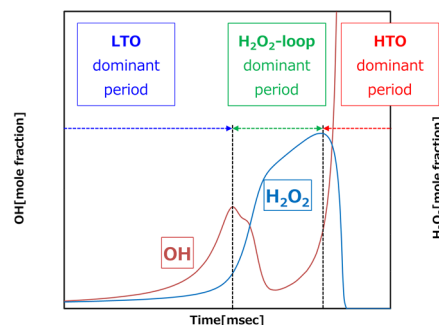


Fig. 1 Definition of LTO, H_2O_2 -loop and HTO Dominant Period

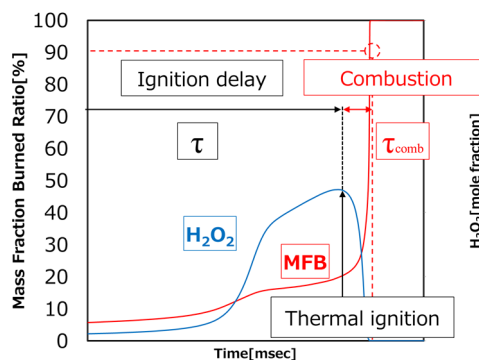


Fig. 2 Definition of Ignition Delay and Combustion Period

3. 結果・考察

3.1 着火遅れ時間への水添加とEGRガス添加の影響

希釈なし（以下Base）、水添加、EGRガス添加の着火遅れ時間をそれぞれ τ_{Base} 、 τ_{H_2O} 、 τ_{EGR} とする。Fig. 3, 4に、初期温度、当量比に対する水添加またはEGRガス添加の着火遅れ時間のBaseに対する割合（ τ_{H_2O}/τ_{Base} 、 τ_{EGR}/τ_{Base} ）を示す。またFig. 5に τ_{H_2O}/τ_{EGR} を示す。Fig. 3, 4から、水添加、EGRガス添加のいずれの条件においても、当量比、初期温度によらず τ_{H_2O}/τ_{Base} 、 τ_{EGR}/τ_{Base} は1以上であり、このことはBaseに比べて着火遅れ時間は長くなっていることを示している。これは、希釈による酸素、燃料濃度低下によるものと考えられる。Fig. 5から、700K以上において τ_{H_2O}/τ_{EGR} が1以下となっていることから、水添加がEGRガス添加に対して着火遅れ時間が短くなっていることが分かる。この温度域では、着火遅れ時間に対して H_2O_2 ループ支配期間の割合が大きい⁽¹¹⁾、

Table 1 Calculation Condition

Fuel	PRF90		
Initial Temperature	600~1000	K	
Initial Pressure	6.3	MPa	
Equivalence ratio	$0.4 \leq \phi \leq 2.0$		
Oxidizer Mixture	N_2	79	vol%
	O_2	21	vol%
Dilution rate	10	vol%	
Dilution gas mixture and Condition			
H_2O additon	Vapor_ H_2O	100	vol%
EGR addition	N_2	79	vol%
	CO_2	21	vol%

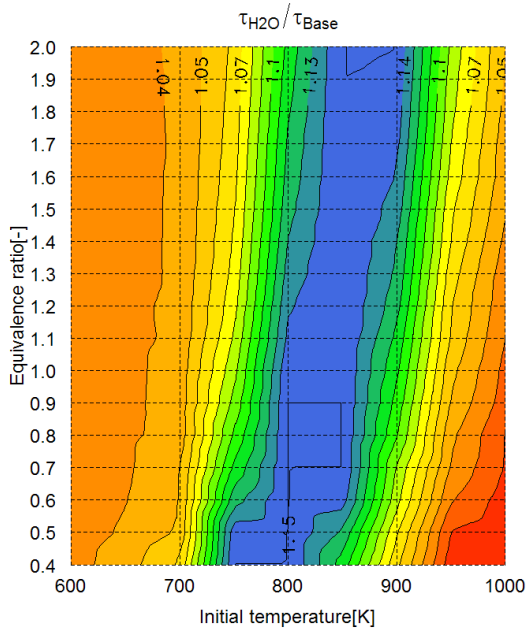


Fig. 3 Contour Plots of τ_{H_2O}/τ_{Base} against Initial Temperature and Equivalence Ratio

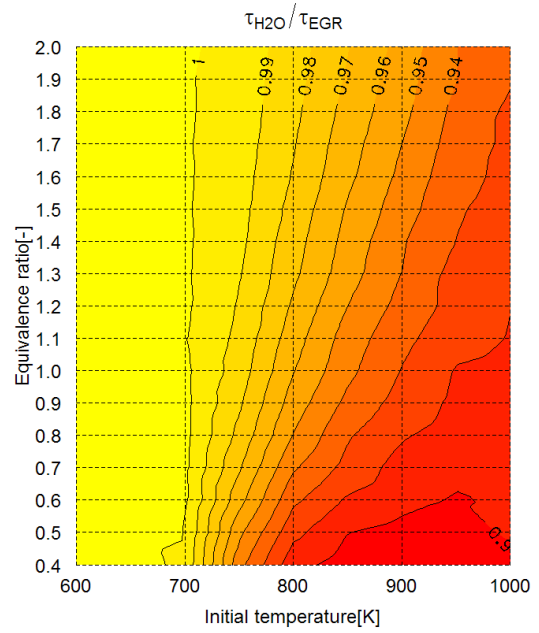


Fig. 5 Contour Plots of τ_{H_2O}/τ_{EGR} against Initial Temperature and Equivalence Ratio

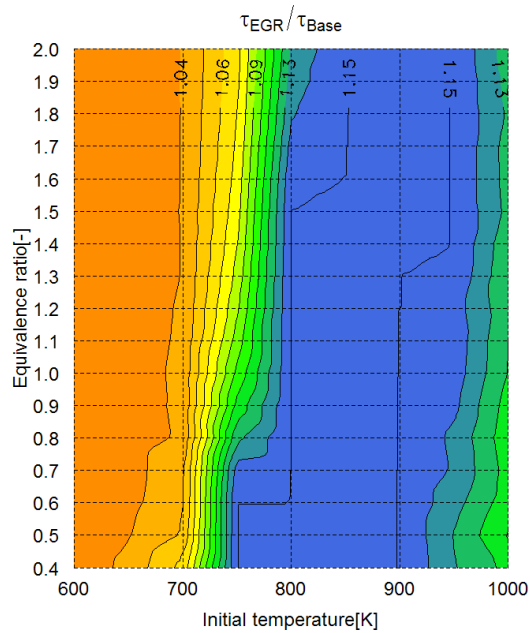


Fig. 4 Contour Plots of τ_{EGR}/τ_{Base} against Initial Temperature and Equivalence Ratio

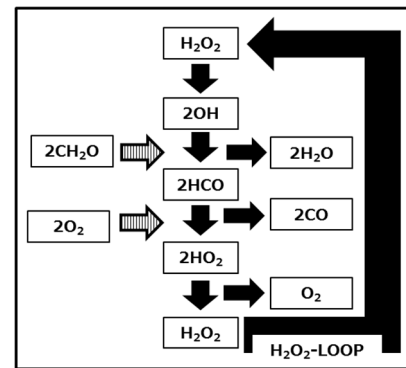
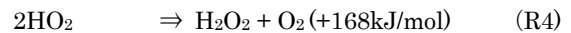
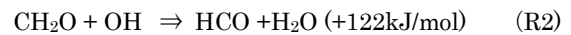


Fig. 6 Schematic Diagram of H₂O₂ Chemistry

主たる反応経路であるH₂O₂ループ (H₂O₂ Chemistry) ⁽¹²⁾ における素反応に着目する。Fig. 6に、H₂O₂ループにおける主たる反応経路を模式的に示す。H₂O₂ループの主たる反応は以下に示す (R1) ~ (R4) で構成されており、H₂O₂の吸熱反応 (R1) によるOHラジカルの生成、燃料の熱分解から生成されるCH₂OとOHラジカル反応を起点とした発熱反応 (R2) ~ (R4) によってH₂O₂を生成する

ループ反応である。



H₂O₂ループの役割は (R1) ~ (R4) の反応によって系の温度を上昇させることにある⁽¹³⁾。そこで、水添加、EGRガス添加のH₂O₂ループ支配期間中の温度変化を比較する。Fig. 7にφ=1.0, 初期温度850Kの環境下の水添加、EGRガス添加の温度、OHラジカルの時間変化を示す。Fig. 7から、水添加、EGRガス添加ともに1.0msec以降はH₂O₂ループ支配期間であることが分かる。また、水添加はEGRガス添加に比べ1.5msec以降の温度上昇が速いこ

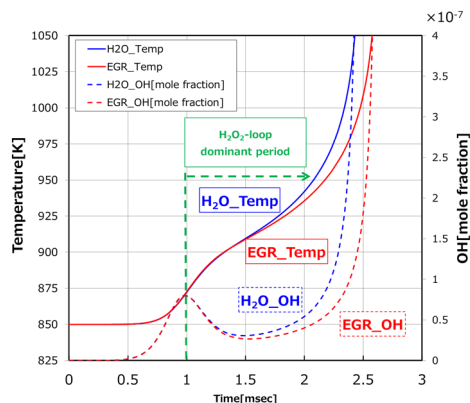


Fig. 7 Temporal Variation of Temperature and OH Radical under the Condition of H₂O Addition and EGR Addition in 850K of Initial Temperature and $\phi = 1.0$

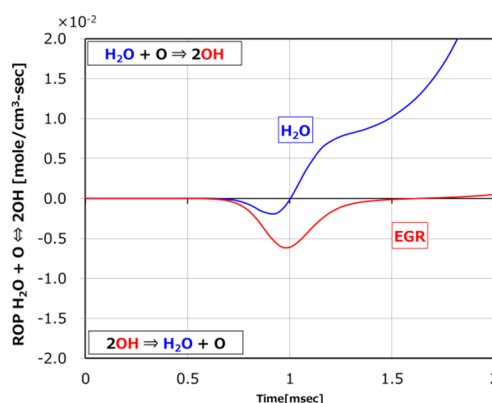


Fig. 9 Temporal Variation of the ROP of OH Radical Generated by H₂O + O \rightleftharpoons 2OH Reaction under the Condition of H₂O Addition and EGR Addition in 850K of Initial Temperature and $\phi = 1.0$

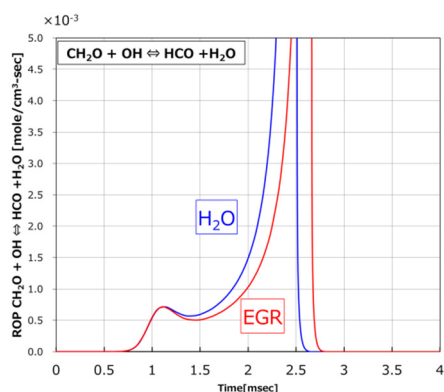


Fig. 8 Temporal Variation of the ROP of H₂O Radical Generated by CH₂O + OH \rightleftharpoons HCO + H₂O Reaction under the Condition of H₂O Addition and EGR Addition in 850K of Initial Temperature and $\phi = 1.0$

とから、水添加はEGRガス添加に比べH₂O₂ループが活性化していることが分かる。H₂O₂ループ支配期間の温度上昇はCH₂OとOHラジカルを起点とした (R2) ~ (R4) 依存する。そこで、(R2)の反応速度の時間変化を比較することとした。その結果をFig. 8に示す。Fig. 8より、水添加の場合、EGRガス添加に比べH₂O₂ループ支配期間での (R2) の反応速度が速いことが分かる。この反応速度差を分析するため、水添加、EGRガス添加のOHラジカルの生成速度 (Rate Of Production 以下ROP) について調査した。その結果、H₂O₂ループ支配期間中のOHラジカル生成速度に明確な差が観察できたのは、以下に示すH₂O₂ループの主たる反応以外の素反応 (R5) であることが分かった。



Fig. 9に水添加、EGRガス添加における (R5) の反応

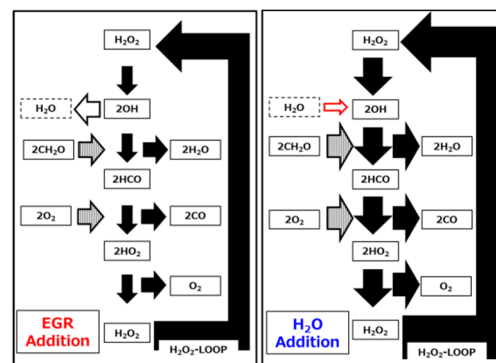


Fig. 10 Effect of H₂O addition on H₂O₂ Chemistry

速度を示す。水添加の場合、H₂O濃度が高いため、OHラジカル消費速度が相対的に小さくなり、(R5)によるOHラジカル濃度が増加する。その結果、水添加はEGRに比べH₂O₂ループに関与可能なOHラジカルの濃度が高くなり、Fig. 8における (R2) の反応速度上昇に繋がったものと考えられる。以上の考察を模式的に示すとFig. 10となる。なお、図中において、矢印の太さは生速度の大きさを相対的に表す。

以上のことから、水添加、EGRガス添加ともに、希釈による効果により、Baseに対して着火遅れ時間が長くなる。また、水添加とEGRガス添加を比較した場合、水添加は (R5) によりOHラジカル生成が促進されることで、R2)が活性化し、H₂O₂ループ支配期間における温度の上昇が早まる。そのため、水添加は、EGRガス添加に比べて自着火に至る過程の反応を抑制する効果が小さい。

3.2 高温酸化反応への水添加とEGRガス添加の影響

次に、水添加、EGRガス添加が高温酸化反応 (HTO) に与える影響について考察する。高温酸化反応の主たる

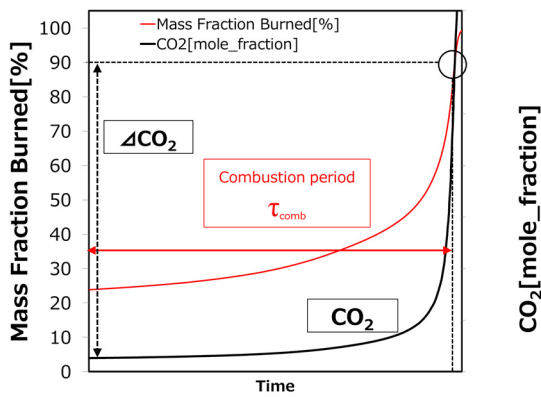


Fig. 11 Definition of Mean CO_{2_ROP} during Combustion Period

反応は、 H_2-O_2 Chemistry⁽¹²⁾、 CO_2 Chemistry⁽¹²⁾であり、 CO と CO_2 の酸化・還元反応が律速反応となっている。そこで、Base、水添加及び、EGRガス添加での高温酸化反応中の CO_2 平均生成速度 (CO_2_ROP)を比較する。なお、 CO_2 平均生成速度はFig. 11に示すとおり燃焼前の CO_2 濃度と燃焼質量割合90%における CO_2 濃度の差を τ_{comb} で除した値と定義し、以下の式で求める。

$$CO_{2_ROP} = \Delta CO_2 / \tau_{comb} \quad (1)$$

Fig. 12, 13に $CO_{2_ROP-H2O} / CO_{2_ROP-Base}$ 、 $CO_{2_ROP-EGR} / CO_{2_ROP-Base}$ の初期温度、当量比に対する変化を示す。なお、 $CO_{2_ROP-Base}$ 、 $CO_{2_ROP-H2O}$ 及び $CO_{2_ROP-EGR}$ は、それぞれBase、水添加及びEGRガス添加における CO_2 平均生成速度を示す。Fig. 12, 13より、 $CO_{2_ROP-H2O} / CO_{2_ROP-Base}$ 、 $CO_{2_ROP-EGR} / CO_{2_ROP-Base}$ はほぼ1以下であることがわかる。すなわち、水添加、EGRガス添加とも、Base条件に対して高温酸化反応中の CO_2 生成速度が低下する。これは、水添加、EGRガス添加による希釈が原因であると考えられる。また、水添加とEGRガス添加における CO_2_ROP の差異を評価するため、初期温度、当量比に対する $CO_{2_ROP-H2O} / CO_{2_ROP-EGR}$ の変化を調査した。その結果を、Fig. 14に示す。これより、 $CO_{2_ROP-H2O} / CO_{2_ROP-Base}$ は全域で1以上であり、水添加がEGRガス添加に比べて CO_2 生成速度が速いことが分かる。また、当量比が大きくなるにつれて差異が大きくなる。水添加とEGRガス添加で CO_2 平均生成速度に差が生じる要因を明らかにするため、容器内温度に対する CO_2 生成速度の変化を分析した。

Fig. 15に $\phi=1$ 、初期温度1000Kの環境における容器内温度に対する CO_2 生成速度を示す。水添加、EGRガス添加を比較すると、容器内温度1750K以上において CO_2 生成速度に差が見られ、容器内温度が高くなるにつれてこの差が拡大している。そこで、この温度域における CO_2 生成に関連する素反応に着目して分析を行う。 CO_2 生成

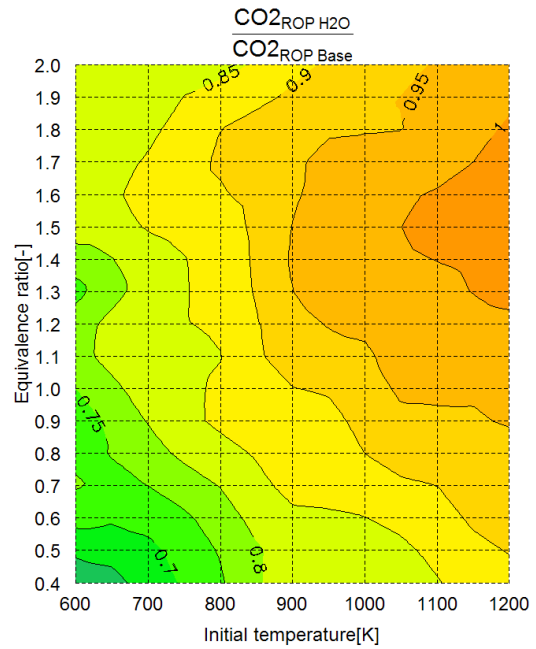


Fig. 12 Contour Plots of $CO_{2_ROP-H2O} / CO_{2_ROP-Base}$ against Initial Temperature and Equivalence Ratio under H_2O Addition and Base Condition

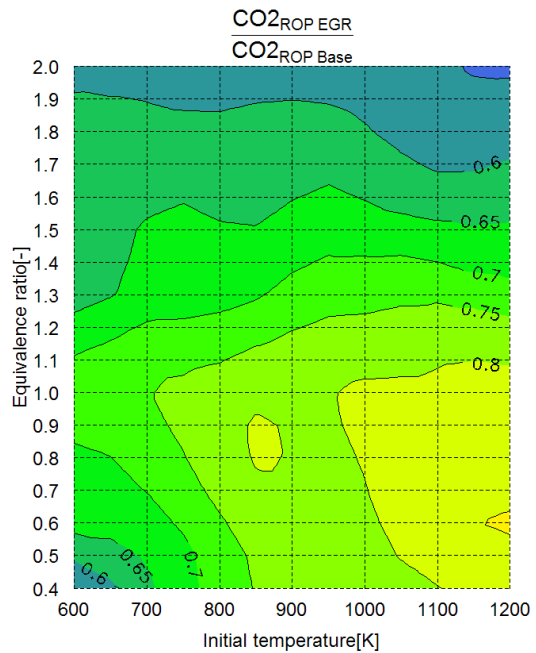
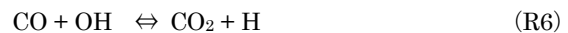


Fig. 13 Contour Plots of $CO_{2_ROP-EGR} / CO_{2_ROP-Base}$ against Initial Temperature and Equivalence Ratio under H_2O Addition and Base Condition

の主要な素反応⁽¹³⁾である (R6) における CO_2 生成速度を Fig. 16に示す。



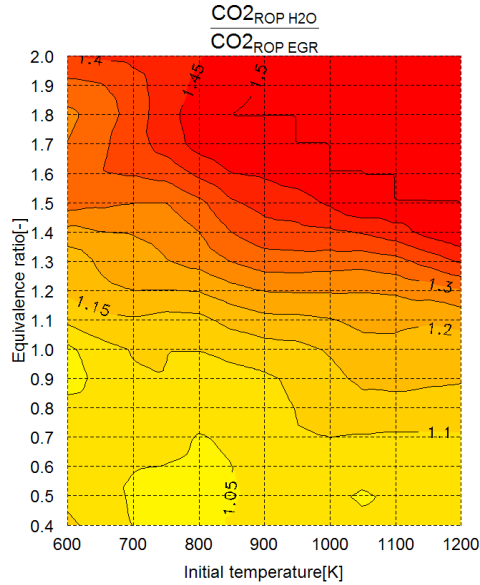


Fig. 14 Contour Plots of $CO_2_{ROP-EGR} / CO_2_{ROP-Base}$ against Initial Temperature and Equivalence Ratio under H₂O Addition and Base Condition

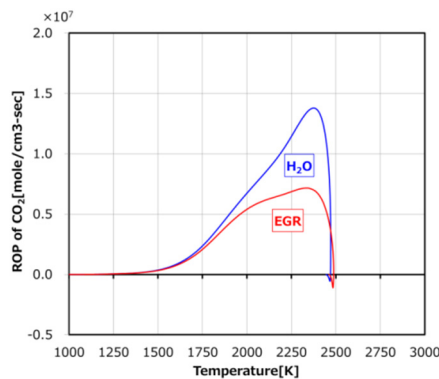


Fig. 15 CO_2_{ROP} under 1000K of Initial Temperature and $\phi = 1.0$ (H₂O Addition and EGR Addition)

Fig. 16から、水添加、EGRガス添加では (R6) におけるCO₂生成速度に違いが見られる。水添加の場合、1750K以上で(R6)におけるCO₂生成速度がEGRガス添加と比較して大きく、温度の上昇に伴い差異が大きくなる。高温酸化中のCOは燃料濃度に依存するため、OHラジカル濃度が水添加により変化していることが影響していると考えられる。そのため、H₂OとOHラジカルが関係する素反応を探したところ、次の (R7) の反応速度に違いが見られた。



Fig. 17に(R4)によるH₂O消費速度を示す。水添加の場合、H₂O濃度が高いため、(R7)左方向の反応速度が相対

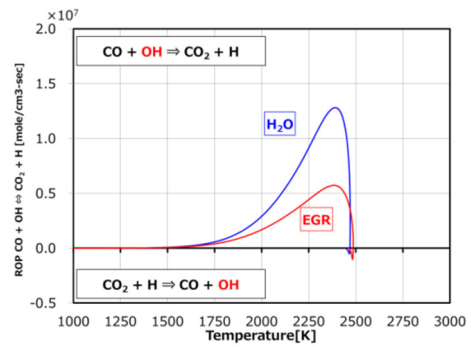


Fig. 16 CO_2_{ROP} on $CO + OH \rightleftharpoons CO_2 + H$ under 1000K of initial temperature and $\phi = 1.0$ (H₂O addition and EGR addition)

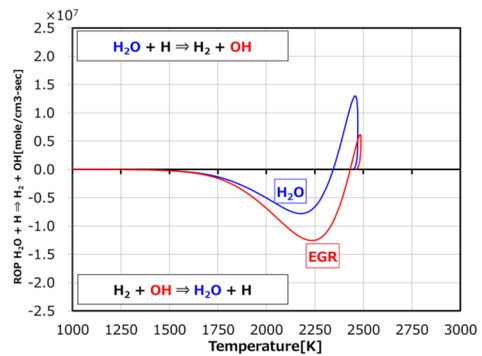


Fig. 17 ROP of H₂O on $H_2O + H \rightleftharpoons H_2 + OH$ during Combustion (H₂O Addition and EGR Addition in $\phi = 1.0$ Initial Temperature 1000K)

的に小さくなり、OHラジカル濃度が増加する。その結果、(R6)右方向のCO₂生成速度が大きくなったものと考えられる。以上から、水添加では、EGRガス添加に比べ高温酸化反応期間が短縮することにより、エンジン燃焼において燃焼期間が短縮できる可能性があると考えられる。

4. 結論

本研究では水添加が自着火・燃焼化学反応に与える影響について、冷却効果 (潜熱・顕熱) 以外の化学的特性に着目し、EGRガス添加による効果との差異を明らかにすることを目的とした。以下に得られた主な知見を示す。

- (1) 水添加、EGR ガス添加ともに、希釈効果により、希釈を行わない場合に対し、着火遅れ時間が長期化する。水添加と EGR ガス添加を比較した場合、水添加は EGR ガス添加に比べて、H₂O₂ ループに寄与する OH ラジカルが増加し、H₂O₂ ループ支配期間における温度上昇が早まるため、EGR ガス添加に比べて自着火に至る過程の反応を抑制する効果が小さい。
- (2) 自着火後の燃焼反応である高温酸化反応を活性化する

効果がある。これは、水添加によって高温酸化反応中に H_2O となる OH ラジカルが減少するためである。

以上の検討結果から、水添加は EGR ガス添加に比べ、化学的側面からは、着火遅れ拡大効果が小さく、自着火後の高温高圧場では燃焼期間が短縮できる可能性があることが分かった。これは水添加によるノッキング抑制効果と燃焼期間短縮、未燃損失低減両立の可能性を示唆している。

謝辞

本研究の一部は、国立研究開発法人新エネルギー・産業技術総合開発機構 (NEDO) の支援を受け、戦略的省エネルギー技術革新プログラムの一環で実施したものである。ここに記して謝意を表す。

参考文献

- (1) H. Yamashita *et al.*: Thermal Efficiency Improvement by Increasing Compression Ratio and Reducing Cooling Loss, COMODIA 2012, pp.36-42 (2012)
- (2) 三好明 : 火炎伝ばとノックへのEGR の効果に関する反応解析, 自動車技術会論文集47巻(2016) 4号 pp. 873-879
- (3) F. Hoppe *et al.*: Water Injection for Gasoline Engine: Potentials, Challenges, and Solutions, International of Engine Research 17 (2016), pp.86-96
- (4) A. d'Adamo *et al.*: A Numerical Investigation on the Potentials of Water Injection as a Fuel Efficiency Enhancer in Highly Downsized GDI Engines: SAE paper No. 2015-01-0393 (2015)
- (5) R. Yamada *et al.*: A Study on Reduction of Cooling Loss by Water Addition in SI Engine by using Rapid Compression and Expansion Machine, COMODIA 2017, A206 (2017)
- (6) B. Tesfa *et al.*: Water injection effects on the performance and emission characteristics of a CI engine operating with biodiesel, Renewable Energy 37 (2012), pp.333-344
- (7) X. Tauzia *et al.*: Experimental study of inlet manifold water injection on combustion and emissions of an automotive direct injection Diesel engine, Energy 35 (2010), pp.3628-3639
- (8) A. Maiboom *et al.*: NO_x and PM emissions reduction on an automotive HSDI Diesel engine with water-in-diesel emulsion and EGR: An experimental study, Fuel 90 (2011), pp.3179-3192
- (9) 堀場ほか: 水噴射技術による高出力・高効率ガソリン

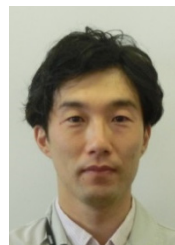
エンジン, 自動車技術会学術講演会前刷集 No.20175342 (2017)

- (10) C. E. Roberts *et al.*: The Effect of Water on Soot Formation Chemistry, SAE paper No.2005-01-3850 (2005)
- (11) 中野道王 : 化学種の添加による自着火促進効果に対する温度及び当量比の影響, 日本燃焼学会誌 第55巻171号(2013), pp.57-66
- (12) 酒井ほか: $\text{RO}_2 \cdot \text{H}_2\text{O}_2$ ケミストリーに基づく簡略化反応モデルの構築, 自動車技術会学術講演会前刷集 No.20105232 (2010)
- (13) 安東ほか: 炭化水素の熱着火反応は酸水素系の分岐連鎖反応と言ってよいか? 自動車技術会論文集41巻 (2009) 5号 pp. 1173-1178

■ 著 者 ■



葛 晰遥



原田 雄司



清末 涼



山下 洋幸



山本 寿英

論文・解説

44

自動車車体構造の設計支援技術の開発 Development of Computer Aided Designing Technology for Car Body Structure Design

釧持 寛正*¹ 小平 剛央*²
Hiromasa Kemmotsu Takehisa Kohira

要約

マツダでは、軽量かつ高性能な車体構造の実現のため、車体構造最適化技術（MDO：Multidisciplinary Design Optimization）を用いている。しかし、シミュレーションで定量的に解析できない性能は取り扱えないため、MDOで求められた結果からだけでは商品に反映する仕様を設計者で判断できないという問題を抱えていた。そこで、性能と設計変数との関係を関数式で表現し、設計変数の性能への影響度を質量効率として定量化する新たな寄与・可視化分析手法を開発した。本手法の特徴は、設計者の意思決定・判断の支援を目的に、設計者の構造発想を促すための可視化方法を取り入れていることである。本手法を商品開発に適用した結果、性能間のトレードオフ関係の定量的な可視化が可能になり、質量効率の高い構造仕様決定を効率的に行える開発プロセスへ改善することで、軽量化と性能の両立に貢献した。

Summary

Aiming at a lightweight and high-performance vehicle body structure, Mazda uses Multidisciplinary Design Optimization (MDO) technology. However, as the MDO handles only quantitatively analyzable performances in simulations, designers are unable to make decisions on vehicle body specifications only by result of MDO. As a countermeasure, a contribution and visualization analysis method was developed, which expresses the relation between vehicle performance and design variables by polynomial regression models, and quantifies the contribution of design variables to the vehicle performance as a mass efficiency. The “visualization analysis”, a feature of this method, prompts designers to conceive structural ideas, supporting their making judgments/decisions. Application of this method to product development allowed the quantitative visualization of the trade-off relations between vehicle performances, and contributed to the efficiency of the development process, weight reduction and improvement of the vehicle performance.

Key words : Vehicle Development, Body Structure, Body Design, Weight Reduction

1. はじめに

近年、顧客ニーズ等の多様化に伴い、自動車の構造や制御・安全システムは複雑化の一途をたどっており、商品性能の向上が求められる一方、各市場の環境（CO₂）規制強化に伴い、燃費に直結する軽量化も同時に図る必要がある。そこで、自動車業界では、自動車を丸ごと机上で効率的に開発を行う手法として、モデルベース開発（MBD：Model Based Development）⁽¹⁾に着目している。

ボディー設計領域では、MBDの技術の一つとして、性能と設計変数との関係を実験計画法のサンプル点から、応答曲面という近似モデルを導出し、応答曲面内で性能を満足しながら軽量化構造を探索する車体構造最適化技術（以下、MDO）⁽²⁾が提案されている。しかし、Fig. 1に示すように、商品性能開発の中で、MDOで取り扱える要件は衝突、車体剛性などシミュレーションで定量化できるものに限られるため、デザインや製造方法などの要件は取り扱うことができない。そのため、MDOにより、

*1～2 技術研究所
Technical Research Center

商品性能を満足する構造仕様が決まったとしても、MDOで考慮していない要件で性能を満足しない場合、MDOの結果をそのまま図面に反映することができなかった。

そこで、設計者がデザインなどの他要件を含め構造検討ができるようにするため、最適仕様の結果を示すのではなく、性能に影響のある設計変数のみを抽出し、各変数の性能に対する影響度合いを定量化する設計支援技術を考案した。また、設計者が軽量化や商品性能間のトレードオフ関係を考慮しながら直観的に構造発想できる可視化方法も取り入れた。本論文では、本手法の概要と商品開発での適用事例について報告する。

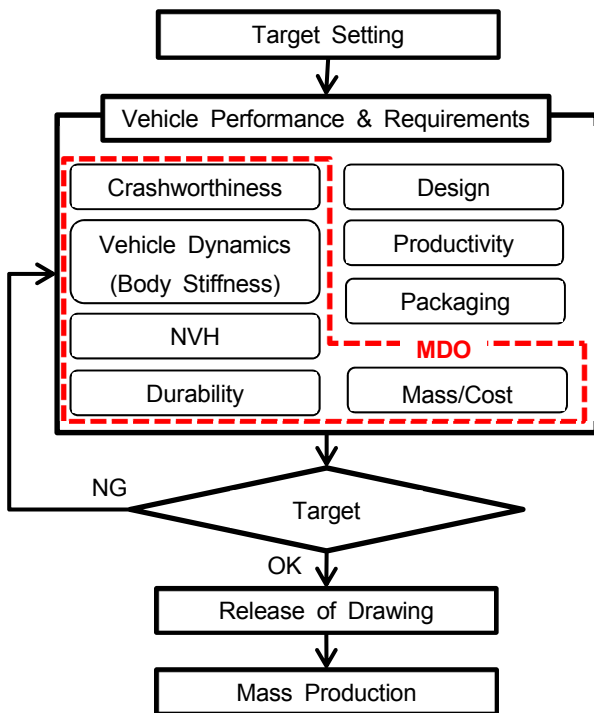


Fig. 1 Flow of Vehicle Performance Development

2. 部品影響度を明らかにする技術

2.1 従来の寄与分析手法の問題点

本手法の特徴は、性能と各設計変数との関係を関数式で表現し、設計変数にかかる偏回帰係数を性能に対する設計変数の影響度として定義することにある。これは、性能は設計変数の仕事により成り立っていることから、各設計変数の仕事の足し合わせで性能を表現できると考えたためである。影響度を計算する一般的な統計手法の一つとして、式(1)に示すような関数を考える重回帰分析がある。

$$y = \beta_0 + \sum_{j=1}^D \beta_j x_j + e \quad (1)$$

y は商品性能の応答値、x は設計変数、β は偏回帰係数、e は残差である。本論文では、この偏回帰係数 β を

影響度と定義している。ここで重要となるのが、式(1)の応答値 y に影響のある設計変数のみを選択し、重回帰分析で影響度 β を導出することである。影響のある変数のみを選択する手法としてはステップワイズ法が広く用いられている。ステップワイズ法は、設計変数を取り入れたり、取り除いたりしながら、ある評価指標を満足するか否かを判定し有意な関数式を求めるとの手法である。評価指標には、各変数にかかる偏回帰係数 β の信頼度（変数の影響度の有無の判断に使える指標）を表す p 値が用いられる。しかし、p 値の閾値によって選択される変数が変化するため、影響のある変数のみを選択できないという問題がある。

Fig. 2は、ステップワイズ法について、正解の分かっている関数式（影響のある変数30と影響のない変数10を組み合わせた式）で、p 値の閾値を変化させた時の選択される設計変数を正解率として検証した結果である。閾値は、一般的に偏回帰係数の信頼度の判別に用いられる0.05未満と、より閾値を厳しくした0.03未満、0.02未満の3ケースで検証した。どの場合も正解率が目標の100%に達しておらず、影響のある変数を選択できていないことが分かる。よって、閾値により制約（上限）を設け変数選択を行う従来手法では、影響のある変数を全て選択することができないリスクを抱えており、設計者が誤った意思決定・判断をする可能性がある。

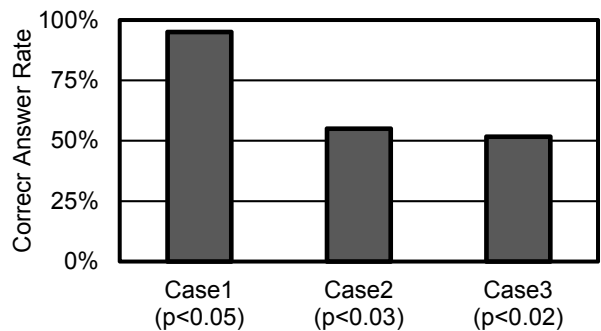


Fig. 2 Correct Answer Rate of Methods

2.2 寄与分析手法の問題点の解決手法

2.1節で説明した影響のある変数を選択できない問題の要因は、選択される変数によって変化する p 値に対し最適な閾値を決定できないことである。本要因については、近年、アメリカ統計学会でも問題提起されており⁽³⁾、閾値に依らない変数選択手法が必要である。

そこで、閾値を変数の選択の指標に用いず、選択された変数の偏回帰係数の p 値の総和を求め、その p 値の平均値が最小となる、変数組み合わせを最適化手法で選択し、重回帰分析する寄与分析手法を開発した (Fig. 3)。これによって、選択された変数全ての信頼度が高い関数式を求めることが可能になる。なお、重回帰分析で用いる

データは、従来のMDOの実験計画法を用い、また、最終的な収束判定は、決定係数 R^2 、情報量基準量BICなどを用いて総合的に判断している。

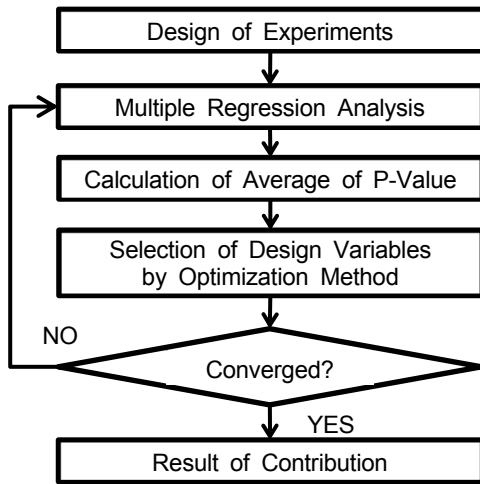


Fig. 3 Flow of Development Method

2.1節で従来手法の検証に用いた関数式に関して、本開発手法を適用した結果をFig. 4に示す。従来手法で一番正解率が高かったCase 1の約95%に対して、本開発手法では100%となっており、影響のある設計変数全てが選択できていることが分かる。

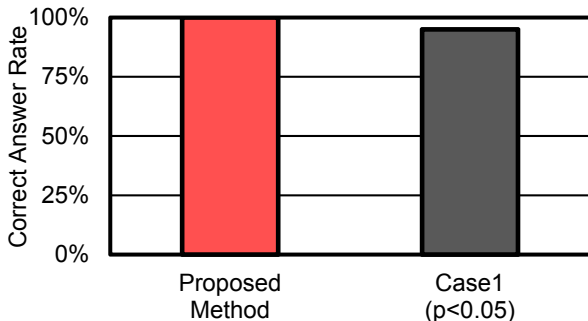


Fig. 4 Correct Answer Rate of Methods

3. 設計者の構造発想を促す可視化方法

開発した寄与分析手法によって性能に影響のある設計変数のみ抽出できるが、影響度には各設計変数の質量が考慮されておらず、また各性能で評価指標の単位系や水準が異なっているため、経験の浅い設計者の場合、設計知見の発掘において誤った解釈をする可能性がある。

そこで本章では、設計者が容易に理解でき構造発想を促すことができる可視化手法として、軽量化視点の導入と性能間の影響度水準の統一化について述べる。

3.1 軽量化視点の導入

2.1節の式(1)のように本開発手法により得られたモデル式は、以下のような線形重回帰式で表される(再掲)。

$$y = \beta_0 + \sum_{j=1}^D \beta_j x_j + e \quad (1)$$

更に、各変数の影響度はこの式を設計変数で次式のように偏微分することでも求めることができる。

$$\frac{\partial y}{\partial x_j} = \beta_j, j = 1, 2, \dots, D \quad (2)$$

式(2)で求められた影響度は、すなわち、各設計変数の単位当たりの応答値 y への影響度と解釈できる。これを、次式のように単位板厚あたりの質量 M で偏微分すると、単位質量あたりの影響度 β' となり、影響度と質量を考慮することが可能になると考える。

$$\frac{\partial \beta_j}{\partial M_j} = \beta'_j, j = 1, 2, \dots, D \quad (3)$$

Fig. 5は、現行量産車を対象にねじり剛性を応答値とした場合の分析結果と対象設計変数の単位板厚あたりの質量を表しており、棒の長さが長いほど、それぞれ影響度が高い、質量が大きいことを示している。今回は5個の設計変数のみ表示しているが、実際にはそれ以上の設計変数を考慮に入れる必要があり、仕様変更時の性能の変化量と軽量化量を考慮しながら構造仕様を導出するのは困難である。

これに対し、Fig. 5の影響度に式(3)を適用したものがFig. 6であるが、棒の長さがFig. 5に比べ変化していることが分かる。本結果においては、設計変数3が、質量増加を最小限にしながら効果的に性能向上を図れる設計変数であるといえる。このように、これまで性能に対する設計変数の影響度情報に対して、各設計変数の質量情報を考慮しながら軽量化構造を検討していたものが、一つの指標で見ることができると、軽量化構造の導出の効率化とともに、検討漏れをも防ぐことができると考える。

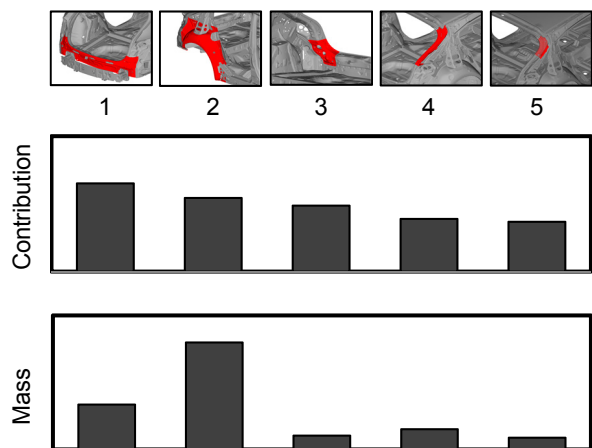


Fig. 5 Contribution and Mass

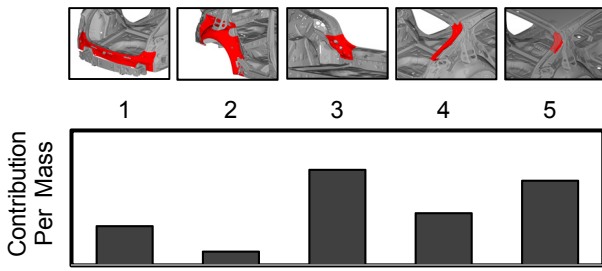


Fig. 6 Contribution per Mass

3.2 性能間の影響度水準の統一化

各性能に対する各変数の影響度を同じ水準で比較できるようにするため偏回帰係数を標準化する。標準化とは、サンプルデータを平均が0、標準偏差が1のデータに変換する操作のことをいい、以下の式で与えられる。

$$\beta_j'' = \beta_j' \cdot \frac{S_j}{S_y}, j = 1, 2, \dots, D \quad (4)$$

S_j は x のサンプルの標準偏差、 S_y は y のサンプルの標準偏差である。標準化のイメージをFig. 7に示す。左側には標準化前、右側には標準化後の衝突、車体剛性のサンプル分布の例を示している。左側では衝突、車体剛性の両性能の分布が異なるため、サンプルから求められる影響度をそのまま比較できない。一方、右側のようにサンプル分布を同一にすることで、求められる影響度の水準を同一に扱えるので、相対的に比較することができるようになる。標準化は、一般的に単一性能における設計変数の係数の水準を揃え影響度を比較するために用いられるが、今回、サンプル分布の同一性に着目し、性能間の影響度の比較に応用したものである。

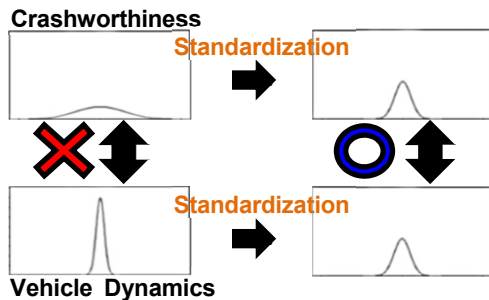


Fig. 7 Standardization

標準化処理前後の影響度の結果をTable 1, 2に示す。性能の応答値は、衝突、車体剛性、NVHの評価指標の一部を抜粋したものである。表中の値は各設計変数の性能に対する影響度を表しており、“-”は、性能に対して影響がないことを意味している。Table 1より、各性能の単位系が異なると各評価指標の値に二ケタ以上差がある。

この値をそのまま解釈すれば、影響度の大きい性能のみに着目する可能性がある。このように、単純に影響度を求めるだけでは、性能間を定量的に比較・評価することができない。これに対し、式(4)を用いて、Table 1の偏回帰係数を標準化したものがTable 2であるが、Table 1と比較して各性能間の影響度の水準が統一化されていることが分かる。この状態であれば性能間を同じ水準で比較・評価することができ、影響度の大きさによって優先度を付け構造検討ができるため、新たな構造仕様の発想が期待できる。

Table 1 Contribution of Vehicle Performance

Design Variable	Crashworthiness [mm]	Vehicle Dynamics [mm]	NVH [Hz]
1	-	0.11	0.36
2	15.46	-	0.38
3	47.35	-	-
4	-	0.05	0.27
5	16.91	0.03	0.27

Table 2 Standardized Contribution of Vehicle Performance

Design Variable	Crashworthiness [-]	Vehicle Dynamics [-]	NVH [-]
1	-	0.19	0.18
2	0.12	-	0.17
3	0.42	-	-
4	-	0.10	0.16
5	0.13	0.05	0.12

4. 商品開発への適用事例

本章では、本設計支援技術を商品開発に適用し、軽量化構造仕様の導出に貢献した事例について報告する。設計変数は最大104変数（184部品の板厚）、性能評価項目は、衝突、車体剛性、NVHなど129項目である。なお、設計変数として取り扱う部品には、フロントフレーム、サイドフレーム、リアサイドフレーム、ルーフレールなど車体骨格部品が主に含まれている。

適用した結果の一部を抜粋したものをTable 3に示す。セル内の色は各性能に対する設計変数の影響度を表しており、赤は板厚を上げると性能が向上するもの、青はその逆で板厚を上げると性能が悪化するものを表している。

色の濃淡は影響度合いを示しており、濃いものほど影響度が高く、無色のものは影響がないものである。設計変数3のように性能間（AとE）で赤、青が存在する場合は、トレードオフの関係があることを意味している。これが軽量化を阻害している要因である可能性がある。このように各評価項目を横並びにし比較することで、性能間の関係を把握でき、的確な意思決定が可能になり軽量化構造の導出が効率的に行える。

また、本結果は質量効率として影響度を算出しているため、単一性能内だけでも質量増加を抑えながら性能を向上させる部品の発掘にも有効である。例えば、性能項目Fの設計変数6は、青で示されており、板厚を下げて性能向上するもの、つまり軽量化と性能向上を同時に達成できるもので積極的に採用したい設計変数である。

更に本適用においては、これまで設計者が持っていた知見を裏付ける結果とは別に、これまで考えていなかった新たな知見も見つかっており、新知見発掘にも本手法は有効であると考えられる。

Table 3 Contribution of Vehicle Performance

Design Variable	Vehicle Performance					
	A	B	C	D	E	F
1				Red		
2				Blue		
3	Red				Blue	
4	Red				Red	Red
5				Red		Blue
6						Blue
7			Red	Red		
8				Red		
9	Blue			Red		
10	Red	Blue	Blue			

5. おわりに

本論文では、従来の車体構造最適化技術（MDO）^②では、困難であった軽量化視点での設計者支援技術として、設計変数の影響度を複数性能間で統一的に比較・可視化分析できる寄与分析手法を開発した。本手法では、影響のある設計変数の選択手法の工夫、影響度の質量効率への変換、複数性能間で統一的に比較できる標準化計算、それらを設計者が直感的に理解する可視化手法を考案した。

実際の商品開発へ適用した結果、これまで設計者が持っていた知見を裏付ける結果とともに、新たな知見も見つかり、今後、設計知見の検証や発掘も期待できる。

しかしながら、実際の商品開発のような設計変数、性

能評価項目ともに、100を超える場合、設計者の分析負担が大きいことも新たに分かった。

今後も、設計者の分析負担の低減技術や、本論文では割愛したが、本手法は、一部非線形性の強い性能の影響度計算に課題が残っており、それらの課題解決のための技術開発にも取り組んでいく。

参考文献

- (1) 藤川智士：マツダの目指すモデルベース開発，[マツダ技報, No.31, pp.44-47 \(2013\)](#)
- (2) 小平剛央ほか：複数性能を扱う車体構造最適化手法の開発，[マツダ技報, No.29, pp.104-109 \(2011\)](#)
- (3) <https://www.amstat.org/newsroom/pressreleases/P-ValueStatement.pdf>

■ 著 者 ■



釘持 寛正



小平 剛央

論文・解説

45

放射光を活用した自動車用材料分析の取り組み Synchrotron X-ray Analysis for Automobile Materials

三根生 晋*¹ 國府田 由紀*² 百崎 賢二郎*³
Susumu Mineoi Yuki Koda Kenjiro Momosaki
中西 美恵*⁴ 住田 弘祐*⁵
Mie Nakanishi Hirosuke Sumida

要約

自動車の進化は、お客様のより豊かなカーライフを実現するために必要不可欠である。その進化には各部品を構成する材料の高性能化が求められ、これに応じて革新的な材料を継続的かつ効率的に創出するためには、車両機能からバックキャストして、原子・分子レベルの挙動から機能発現メカニズムを解明し、モデル表現とその統合により材料・部品特性までをつなぐモデルベースリサーチ (MBR) が必要である。原子・分子レベルでの挙動解明には従来の実験室系分析装置では成し得ない方法が必要であり、幅広い材料に対応するために、放射光を活用した分析解析技術を構築している。本報では、材料高機能化のため、ナノ粒子分散樹脂複合材料を小角X線散乱法、ゴム材料をX線吸収分光法、薄膜材料を硬X線光電子分光法で分析解析した事例を紹介する。

Summary

Advancement of automobile technologies is essential to support customers' enriched car life. To bring this into reality, it is necessary to develop more reliable and high-performance materials which make up each of the car components and are backcasted from car functions. If innovative materials are to be created both continuously and efficiently, it is required to unravel the mechanism of functional expression based on atomic- and molecular-level behavior and implement model-based research, which goes as far as taking into account material and component properties, by combining the unraveled mechanism with model representation. As the atomic- and molecular-level unraveling of behavior requires powerful analysis methods that cannot be viable with existing laboratory equipment, we developed an analysis technique using synchrotron radiation so as to cope with a wide range of materials. In this article, we introduce the three synchrotron radiation experiments conducted to boost the function of materials: nanoparticle dispersion resin composite material by SAXS (Small Angle X-ray Scattering) method; rubber material by XAS (X-ray Absorption Spectroscopy) method; and laminated thin films by HAXPES (Hard X-ray Photoemission Spectroscopy) method.

Key words : Materials, Composite Material, Nanotechnology, Synchrotron X-ray Analysis

1. はじめに

自動車の進化に求められる高性能な材料を効率的に研究開発するため、材料の機能発現メカニズムや挙動を明らかにしてモデル表現し、そのモデルをマルチスケール・マルチフィジクスで統合する材料MBRを行っている。本アプローチでは、従来のマクロ視点に加えて、原子・分子といったサブナノメートルスケールに踏み込んで材料特性及び化学

反応に寄与する因子の状態を明らかにしてコントロールし、材料特性の自在なコントロールと高機能化によって自動車の進化につなげる。コントロールすべき因子の状態を明らかにするためには、材料の構成原子・分子スケールに対応した分析解析技術が必要であり、これを実現するために実験室系分析技術の高度化に加えて、最先端分析技術として放射光分析の活用を進めている。放射光は高速に加速した電子を磁場によって曲げる際に発生する電磁波であり、大

*1~5 技術研究所
Technical Research Center

型放射光施設では、例えば実験室系X線回折装置に用いられるようなX線源と比較して桁違い（約 10^8 倍）の輝度となる。この高輝度なX線を用いることで、鮮明なシグナル取得、異なる分析手法の同時実施、反応のリアルタイム検出（優れた時間分解能）などの実験室系分析では得られない材料の情報を取得できる。本報告では、革新的材料の創出のため、粒子の分散、化学反応、積層・界面構造について放射光分析を行い、材料MBRに求められるデータ解析までを行った事例、得られた知見及び活用展開について報告する。

2. 自動車用樹脂複合材料のフィラー分散状態分析

2.1 自動車用樹脂複合材料について

樹脂をベースとする複合材料は、フィラー（短繊維、粒子）や布状に織った長繊維を樹脂中に存在させることで樹脂のみでは実現できない剛性や耐衝撃性を備え、複数の機能を高いレベルで保有する材料として、自動車での適用が拡大している。この複合効果は、添加されるフィラーの特性、さらにフィラーと樹脂の相互作用により発現するため、フィラーの効果を最大化するためには、その分散状態（樹脂内でのばらけ具合）が重要なコントロール因子となる。また、樹脂複合材料に添加されるフィラーは、マイクロメートルサイズからナノメートルサイズに微細化し、複数のフィラーを組み合わせることが行われているが、単純にフィラーサイズを微細化して混合しても樹脂中で塊になりやすく、狙った分散状態とならずに部材特性の向上が得られない。フィラーの分散状態をとらえてコントロール可能とするため、小角X線散乱法を用い、ナノフィラー分散樹脂複合材料を分析解析した結果を紹介する。

2.2 小角X線散乱分析技術について

小角X線散乱（SAXS：Small Angle X-ray Scattering）分析は、試料に単色X線（波長： λ ）を照射して試料内に存在する物質の密度差から生じるX線の散乱を測定する方法である。散乱角度 θ と試料中の構造サイズ L の関係は式(1)で表され、散乱角度が小さい領域ほどサイズの大きな構造からのシグナルを取得できる。

$$L = \lambda / (2 \sin \theta) \quad (1)$$

小角X線散乱分析の概要をFig. 1に模式的に示す。

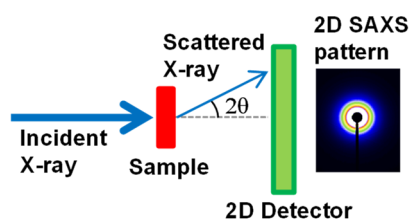


Fig. 1 Schematic Representation of SAXS Measurement

取得した2次元パターンは円周方向に積分して散乱ベクトル q と散乱強度 I のプロファイルとする。散乱角度 θ と散乱ベクトル q は式(2)で表現される。

$$q = (4\pi/\lambda) \sin \theta \quad (2)$$

2.3 中空ナノフィラー分散複合材料の分散状態分析結果⁽¹⁾

中空ナノフィラー分散複合材料は、中空ナノフィラー（材質：シリカ、メーカーカタログ平均径：100nm）と樹脂（有機溶媒を含む）を攪拌・混合した後、金属板上に成膜、熱処理を行うことで作製した。また比較試料として、有機溶媒中で攪拌処理のみ行った中空ナノフィラーを作製した。小角X線散乱分析実験は公益財団法人高輝度光科学研究センター・大型放射光施設SPring-8の兵庫県ビームラインBL08B2で、中空ナノフィラーの形状観察は透過電子顕微鏡（JEM-3000F, JEOL, ひろしま産学共同研究拠点）で実施した。Fig. 2に、透過電子顕微鏡（TEM：Transmission Electron Microscope）の観察結果を示す。中空ナノフィラーの外形は球形ではなく、角張っており立方体に近い形状であることを確認した。また、複数視野の観察から、中空ナノフィラーは直径相当で50～150nmと幅をもつこと、粒子の壁面厚さは約10nmであると分かった。未処理と有機溶媒中で攪拌を行った中空ナノフィラーを比較すると、攪拌試料では粒子の割れが散見された。中空ナノフィラーは樹脂との攪拌・混合時にも割れを生じ、破片が複合材料中に存在すると推察される。

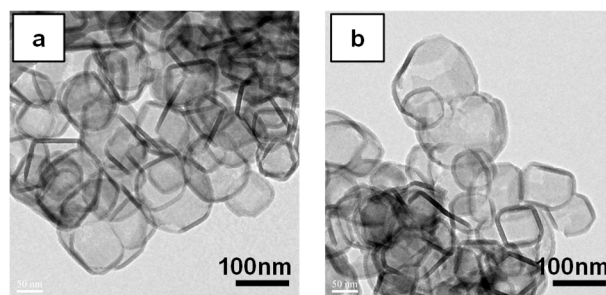


Fig. 2 TEM Image of Hollow Particle Powders, a) Unprocessed, b) Stirring Processed

Fig. 3に小角X線散乱分析で取得した未処理の中空ナノフィラー粉末及びフィラー分散複合材料の散乱曲線を示す。散乱曲線を比較すると、ほぼ同様の q 値で上に凸の形状が認められ、複合材料でも中空ナノフィラーの特徴が強く現れていると分かる。

取得した散乱曲線から粒子の分散状態及び形状変化を評価するため、Fig. 4に示すような円板で中空ナノフィラーの特徴（立方体に近い形状）を表現することを検討し、散乱ベクトル $q=0.05\sim 2.5$ の範囲について円板モデルを用いてフィッティング解析を行った。フィッティング曲線を

Fig. 5に、解析で得られた円板サイズをTable 1に示す。

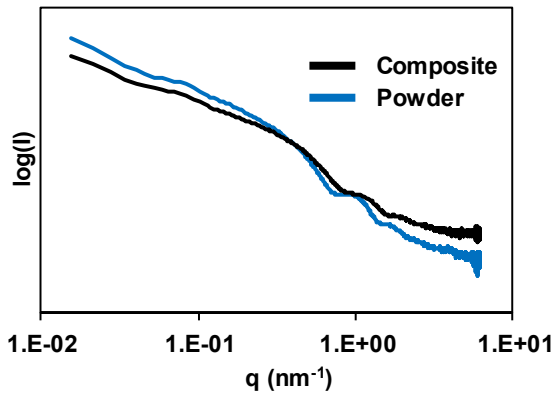


Fig. 3 SAXS Profiles of Hollow Particle Powder (Unprocessed) and Composite Material

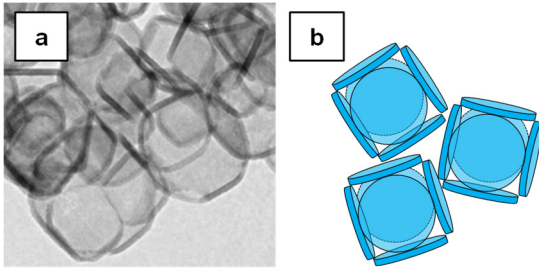


Fig. 4 TEM Image of Hollow Particle (a) and Image of Disc Model (b)

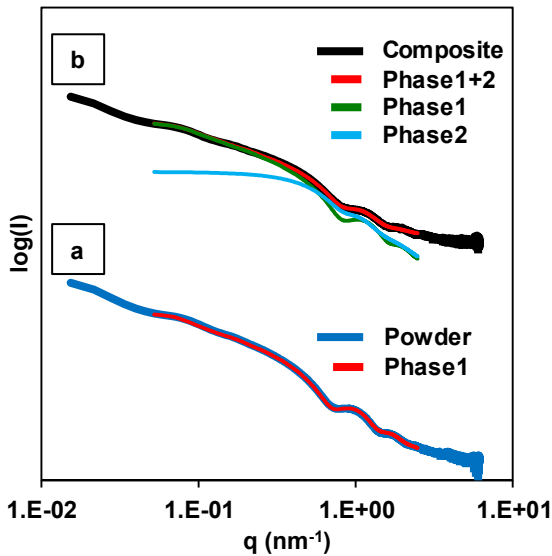


Fig. 5 Curve Fitting Analysis of SAXS Profiles with Disc Model, (a) Hollow Particle Powder (Unprocessed) and (b) Composite Material

Table 1 Curve Fitting Results

Sample	Phase	Average Diameter(nm)
Hollow Particle Powder	1	90
Composite Material	1	78
	2	10

未処理の中空ナノフィラー粉末では、円板直径約90nm（厚さ約10nm）でよいフィッティングが得られた。この結果はTEMでの観察サイズとよく一致している。なお、フィッティングと実験の曲線は $q=0.05$ より低 q 側では一致せず、実験の曲線が立ち上がる傾向にあることから、中空ナノフィラーは凝集していると解釈できる。

次に、複合材料では円板の直径約80nm及び10nmの2つの成分を用いることで、よいフィッティング結果が得られた。サイズの小さい2つ目の成分を必要とすることから、複合材料中に中空ナノフィラーの破片が存在していると考えられる。また、複合材料の散乱曲線は中空ナノフィラー粉末と同様に $q = 0.05$ より低 q 側で立ち上がる傾向にあることからフィラーは凝集していると判断される。

本結果のように、比較的複雑な形状の添加粒子を分散させた試料であっても、小角X線散乱法での測定とデータ解析用形状モデルの考慮により、添加粒子について形状の特徴と凝集の情報を取得することが可能である。小角X線散乱法は、ポリマー中のフィラー分散評価の他に、ゴム中カーボンブラックの分散、ポリマーの相分離、溶液中での粒子分散など、多様なサイズと形状のフィラー分散評価に適用している。

3. 自動車用ゴム材料の硫黄架橋状態分析

3.1 自動車用ゴム材料について

自動車用ゴム材料の多くは振動減衰の機能が求められ、使用環境に応じて耐熱性、耐油性などの特性両立が必要である。ゴムの機械的特性は巨大なポリマー間をつなぐ架橋構造の形成と分子鎖の絡み合いによって発現する。天然ゴムを始めとして多くの架橋形成には硫黄が用いられ、外的要因による機能低下を抑制するために多様な劣化防止の添加剤が用いられる。高機能かつ長寿命なゴム材料を効率的に研究開発し実現するためには、架橋構造形成と変化のメカニズムを明らかにすること、更に、ゴム特性と紐付けたモデル構築が必要である。硫黄架橋を定量的に評価する分析解析手法としてX線吸収分光法を用い、ゴム材料中における硫黄の化学状態、及び、加熱試験によるその変化を評価した結果を紹介する。

3.2 X線吸収分光分析技術について

X線吸収分光 (XAS : X-ray Absorption Spectroscopy) 分析は、X線のエネルギーを連続的に変化させながら試料に照射して試料から発生する蛍光X線、または、試料を透過したX線量を計測することで、X線吸収微細構造 (XAFS : X-ray Absorption Fine Structure) と呼ばれる内殻電子の励起を反映したスペクトルが得られる。本評価で用いた蛍光法XAFSの概要をFig. 6に示す。

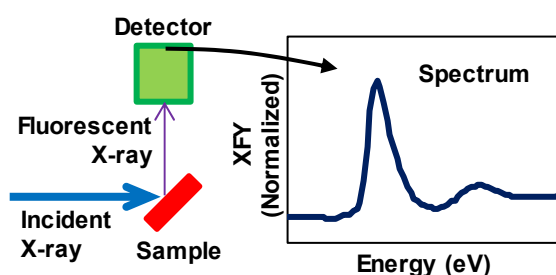


Fig. 6 Schematic Representation of XAFS Measurement (in Fluorescence Mode)

3.3 ゴム材料中硫黄架橋の化学状態分析結果

Table 2に示す原料を混練し、圧縮条件下で150°C加熱することで、硫黄架橋したシート状ゴム試料を作製した。シート状ゴム試料は、大気雰囲気下100°Cに保持した恒温槽で最大80時間加熱した後、XAFS分析実験に用いた。XAFS分析実験は、広島大学放射光科学研究センター (HiSOR) のビームラインBL11で実施した。

Table 2 Raw Materials of Test Rubber

ポリマー	合成イソブレンゴム
架橋形成材	酸化亜鉛
	ステアリン酸
	硫黄
	加硫促進剤

取得した硫黄K吸収端のXAFSスペクトルをFig. 7に示す。全ての試料で2472eV付近にピークが認められ、加熱時間が増加すると2482eV付近に新たなピークが現れた。

まず、2472eV付近のピークは硫黄と硫黄、もしくは、硫黄と炭素の結合に由来し、硫黄原子が連なって結合している数が多いほど低エネルギー側に現れる。取得したスペクトルを比較すると、加熱時間の増加に伴いこのピークは高エネルギー側へシフトしていることから、加熱によって硫黄と硫黄の結合数が多い部分の割合が減少していると分かる。

次に、2482eV付近に現れるピークは硫黄と酸素の結合に由来し、加熱時間の増加に伴いこのピーク強度が増加していることから、硫黄と酸素の反応が進行していると分か

る。この変化を定量的に評価するため、試料内で形成されていると考えられる硫黄の各結合状態に対応するピークをガウス関数で設定し、硫黄 (または炭素) と結合した硫黄、酸素と結合した硫黄に対応した2つの吸収端をアークタンジェント関数で設定してピーク分離の解析を行い、プロファイルの全面積に対する2482eV付近のピーク面積の割合を求めた。

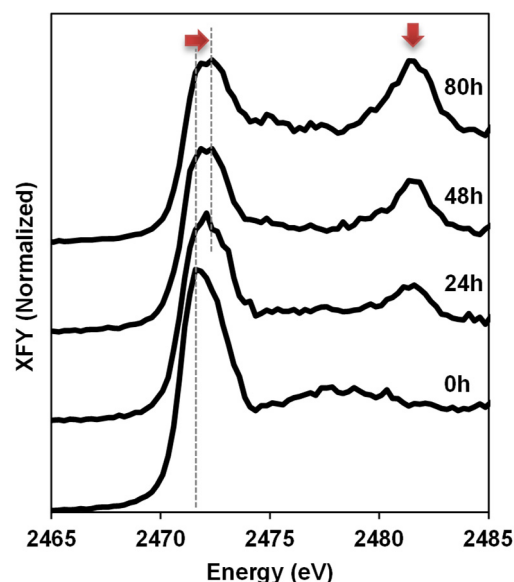


Fig. 7 XAFS Spectra of Heat Treated Rubber Samples

解析結果をFig. 8に示す。加熱時間の増加に伴い、酸素と結合した硫黄の割合が比例的に増加しており、ゴム表面から加熱試験時に雰囲気中の酸素を取り込みながら、硫黄と酸素の反応が継続的に進行したと考える。本手法により、ゴムに含まれる硫黄の中で、酸素と結合して結合に寄与しない硫黄の割合を定量化可能となり、機械的特性との相関評価、ゴム特性変化のメカニズム解明について効率的に仮説と検証の研究開発サイクルを回すことができる。

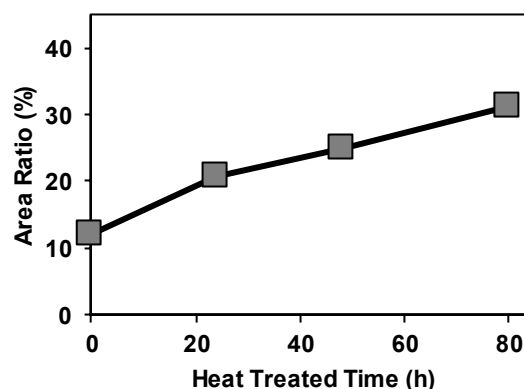


Fig. 8 Area Ratio of Reacted Sulfur with Oxygen

本結果のように、キーとなる元素をX線吸収分光分析することにより、材料中での化学反応を定量的に評価することが可能である。X線吸収分光法は、ゴム材料をはじめとして、リチウムイオン電池電極材、排ガス浄化触媒、金属材料を中心に化学状態変化の分析に適用している。

4. 自動車用薄膜材料の界面・積層構造分析

4.1 自動車用薄膜材料について

材料表面への薄膜形成は、新しい機能や特性の付与、耐久性向上に有効であり、求められる機能と特性により、原子・分子スケールから数百マイクロメートルスケールの薄膜が多様な自動車用材料でも適用されている。自動車用機能材料として重要なリチウムイオン電池電極材や排ガス浄化触媒では、ナノメートルスケールで薄膜の厚さ、組成、薄膜と基材の結合界面、または積層した複数薄膜間の界面・構造をコントロールすることが求められる。このような薄膜構造を定量化可能とするため、硬X線光電子分光分析を用いて、リチウムイオン電池電極材用活物質の薄膜コーティングを想定した金属酸化物の薄膜積層体の界面・構造を評価した結果を紹介する。

4.2 硬X線光電子分光分析技術について

硬X線光電子分光 (HAXPES : Hard X-ray Photoemission Spectroscopy) 分析は、硬X線 (高いエネルギーをもつX線) をエネルギー一定の条件で試料に照射し、試料から発生する光電子の運動エネルギーとその量を計測することで、物質の化学状態 (電子状態) を評価する手法である。HAXPES法の概要をFig. 9に示す。

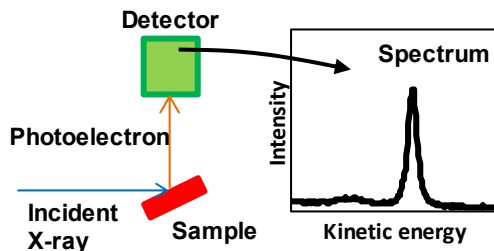


Fig. 9 Schematic Representation of HAXPES Measurement

4.3 薄膜積層材料の界面状態及び構造分析結果

リチウムイオン電池電極材用の活物質は直径数十ナノメートルから数マイクロメートルの粒子であり、この粒子表面には出力性能向上や長寿命化などの目的に応じて薄膜コーティングが施されている。この活物質の表面状態を模して、Fig. 10に示す簡素化した構造の薄膜積層体を作製して分析用試料とした。実験はSPring-8の兵庫県ビームラインBL24XUで行った。

三層構造試料 (Fig. 10-c) のSi1s, Ti1s, Al1sスペクトルについて、

検出した運動エネルギーをBinding Energy (束縛エネルギー) に変換してFig. 11に示す。SiのスペクトルではSi-Si結合に由来するピークとSi-O結合に由来するピークが確認される。Si-Si結合はSi基板、Si-OはSi基板表面に存在する酸化被膜からのシグナルである。Ti1sとAl1sのスペクトルではそれぞれ1つのピークが確認され、出現エネルギー位置から各元素が酸素と結合した状態であると判断できる。

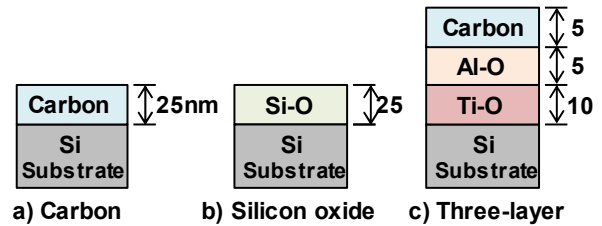


Fig. 10 Laminated Structures of Samples

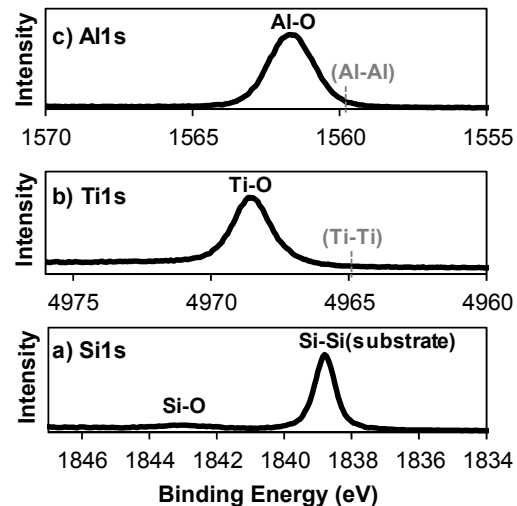


Fig. 11 HAXPES Spectra of Three-Layer Sample

次に各層の厚さを定量評価するため、試料を検出器に対して傾斜させながらスペクトルを取得する角度分解測定を行い、式 (3) を用いて解析を行った。

$$\frac{I_A}{I_B} = \frac{n_A \times \sigma_A \times \lambda_A^A \times \left\{ 1 - \exp \left[-\frac{d}{(\lambda_A^A \times \cos \theta)} \right] \right\}}{n_B \times \sigma_B \times \lambda_A^B \times \exp \left[-\frac{d}{(\lambda_A^B \times \cos \theta)} \right]} \quad (3)$$

ここで、 n : 原子密度、 σ : 光イオン化断面積⁽²⁾⁽³⁾、 d : 薄膜の厚さ、 θ : 試料の傾斜角、 λ_A^B はBから放出された光電子の膜A中における非弾性平均自由行程⁽⁴⁾⁽⁵⁾である。なお、三層構造試料については、解析対象の層に対して上に存在する層による光電子の減衰を考慮するように式 (3) を修正した。解析により得られた薄膜厚さをTable 3に示す。作製厚さ (触針式段差計で測定 $\pm 20\%$ の誤差をもつ) に対して、十分に構造を推定できる結果が得られることが分かる。

本手法をベースとすることで、基材と薄膜の接触界面において、それぞれとは異なる化合物が形成する場合に化学状態と厚さを評価可能である。角度分解測定を含め硬X線光電子分光法は、リチウムイオン電池電極材、排ガス浄化触媒、複合材料用繊維材料、ゴム材料、オイルなどの表面、薄膜界面・構造評価に適用している。

(5) 田沼繁夫：X線光電子分光法およびオージェ電子分光法による定量分析の標準化，表面科学 Vol.24, No.4, 233-238(2003)

■ 著 者 ■



三根生 晋



國府田 由紀



百崎 賢二郎



中西 美恵



住田 弘祐

Table 3 Thickness of Laminated Structures

Type	Element	Prepared thickness (nm)	Analyzed thickness (nm)
Carbon	C	25	25
Silicon oxide	Si-O	25	33
Three-layer	C	5	8
	Al-O	5	5
	Ti-O	10	13

5. おわりに

自動車用材料のMBRに必要な原子・分子レベルでの挙動解明及びその状態の定量的評価のため、放射光を活用した分析解析を行っており、その一部について材料開発の事例を交えて紹介した。材料研究開発の進化とメカニズムが明らかになるのに伴い、材料の使用環境を模した動的条件下での分析（その場分析）の重要性が増している。これらの研究開発プロセスで必要なその場分析技術、取得データから材料特性のコントロールで最重要な要因を見出すためのデータ解析技術について高度化していく。

本報には、広島大学大学院工学研究科 早川慎二郎教授、兵庫県立大学放射光ナノテクセンター 横山和司センター長、京都大学大学院工学研究科 豊田智史助教との共同研究成果を含みます。公益財団法人高輝度光科学研究センター・大型放射光施設 SPring-8 での実験は課題番号 2015B3389, 2017A3231, 2017B3231 で実施しました。ここに厚く御礼申し上げます。

参考文献

- (1) 三根生ほか：小角X線散乱法によるナノフィラーの分散状態解析，兵庫県ビームライン年報・成果集 Vol.5, 6, 24-27(2016, 2017) より一部改定して転載
- (2) Scofield, J.H.: Theoretical photoionization cross sections from 1 to 1500 keV.. United States: N. p., 1973.
- (3) J.J.Yeh et al.: Atomic subshell photoionization cross sections and asymmetry parameters: $1 \leq Z \leq 103$, Atomic Data and Nuclear Data Tables, Vol.3 2 Issue 1, 1-155(1985)
- (4) NIST Standard Reference Database 71

論文・解説

46

構造接着を用いた車体振動減衰技術の開発

Development of Damping Technology for Car Body Using Structural Adhesive Bonding

山本 研一*1 中川 興也*2 氷室 雄也*3 渡邊 重昭*4 小橋 正信*5
 Kenichi Yamamoto Kohya Nakagawa Katsuya Himuro Shigeaki Watanabe Masanobu Kobashi
 吉田 智也*6 三好 雄二*7 伊藤 司*8 鍵元 皇樹*9 八巻 悟*10
 Tomoya Yoshida Yuji Miyoshi Tsukasa Ito Koki Kagimoto Satoru Yamaki
 片岡 伸介*11
 Shinsuke Kataoka

要 約

車両の軽量化と乗心地の向上，ロードノイズ低減との両立をねらい，振動の伝達系にあたる車体フレームを対象とした減衰制御構造（減衰節構造，減衰ウェルドボンド接合），及び本構造に使用する振動減衰性に優れた構造用接着剤を新たに開発した。減衰節構造について，同等質量の簡易フレームを用いて基礎検証した結果，剛性に加えて減衰性が向上し，高い質量効率で振動が低減することを確認した。実車を用いた効果検証では，車体の振動が低減したとともに，100km/h走行時のロードノイズが運転席で最大5dB低減することを確認した。

Summary

Aiming at weight reduction, ride comfort and less road noise, damping control structures (damping stiffener and damping weld-bonding) and structural adhesive with high damping property applied for body frames have been newly developed. From the result of basic verification of test frame using this structure, it has confirmed that vibration of test frame decreased in effect of improvement of not only stiffness but damping. In addition, from the result of verification using car body and test car, it has confirmed that vibration of body decreased, and that road noise decreased up to 5 dB at driver position during driving at 100 km/h.

Key words : Vibration, Noise, and Ride Comfort, Body Structure, Adhesive, Joining, Damping

1. はじめに

近年，CO₂排出量低減に向けて，更なる車両の軽量化が必須となる一方，商品力向上のため，操縦安定性や乗心地の向上，ロードノイズの低減が求められている。

従来，上記の性能向上につながる車体の振動抑制には，補強部材の追加や板厚増などの剛性向上の手法が用いられてきたが，質量が増加するデメリットがあった。そこで，振動の制御因子である剛性に加えて減衰性に着目し，これを車体に積極的に付与することで，振動低減の質量効率を高めることを考えた。減衰性の活用はこれまで，振動の応答系である車体パネルを対象に，制振材の施工

位置やパネル形状を研究した報告がなされている⁽¹⁾⁽²⁾⁽³⁾。これに対し今回，より起振源に近く振動の伝達系である車体フレームを対象とした減衰制御構造（減衰節構造，減衰ウェルドボンド接合），及び本構造に使用する振動減衰性に優れた構造用接着剤（減衰接着剤）を開発し，新型MAZDA3に採用した（Fig. 1）。

減衰制御構造のひとつである減衰節構造をFig. 2に示す。本構造は，車体フレームの断面変形を抑制し剛性を向上すると同時に，断面変形部位に高減衰材料（減衰接着剤）を配置しそこに歪を集中させ，振動を低減するものである。

*1~3 技術研究所
 Technical Research Center

*9~11 技術本部
 Production Engineering Div.

*4~8 車両開発本部
 Vehicle Development Div.



Fig. 1 Body-in-white of Mazda3 with Damping Control Structures Using Structural Adhesive (light blue line)

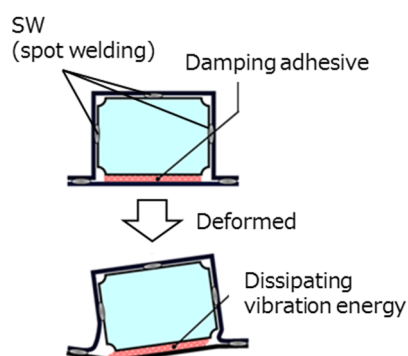


Fig. 2 Schematic Diagram of Damping Stiffener

本報では、減衰節構造の構造設計の考え方とその検証結果、及び減衰接着剤の開発に加え⁽⁴⁾⁽⁵⁾、本構造を実現する生産技術について報告する。

2. 減衰制御構造の開発

2.1 構造設計の考え方

車体フレームの断面変形を考えた場合、剛性向上にはFig. 2のように断面に節（隔壁）を設けて節の面内力で変形を抑制することが有効である。従来、節とフレームとの接合はスポット溶接（以下、SW）であるが、断面変形時には節とSW部で歪エネルギーを分担することになる。そこで、構造体全体の減衰性を向上させるため、SW部を高減衰材料（減衰接着剤）に置き換え、その歪エネルギー分担率を高めることができれば、剛性に加えて減衰性を向上できると考えた。

2.2 簡易フレームを用いた効果検証

減衰節構造の簡易フレームを用い、剛性向上と減衰性向上の効果を検証した。ここで、試作した簡易フレームは質量同等であるため、剛性の代用特性として共振周波数を用いた。試作した簡易フレームの形状・寸法をFig. 3に示す。簡易フレームの板厚は1.2mm、SWピッチ40mmとし、2枚の節の板厚は0.7mm、位置はフレーム中央から60mmとした。

計測システムをFig. 4に示す。簡易フレームを弾性支持し、フレーム端部を電磁加振機で上下に加振して、加

振点での加振力とフレーム各点の加速度を計測した。共振周波数とモード減衰比は、フレームの20点（前後、左右、上下）のイナータンスを用いてモード解析で同定した。今回の検証では、フレームの断面変形が生じるモードとして、Fig. 5に示す1次ねじりモードを対象とした。

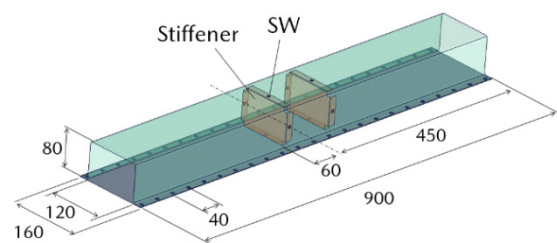


Fig. 3 Test Frame (unit: mm)

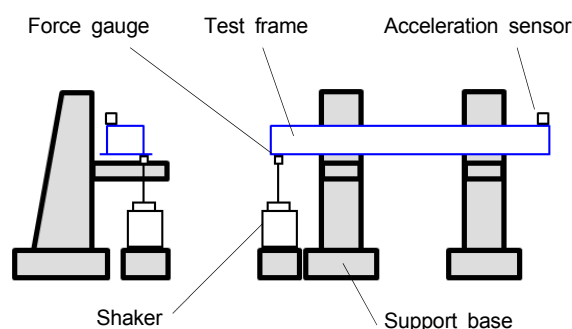


Fig. 4 Measuring System

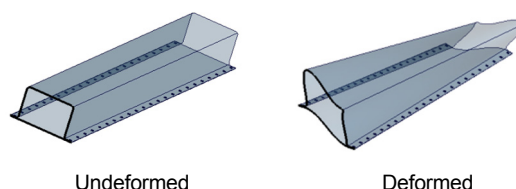


Fig. 5 Mode Shape of 1st Torsion Mode

評価した簡易フレームの節の仕様をTable 1に、節とフレームとを接合した接着剤の特性をTable 2に示す。節による剛性向上の検証として、(a)と(b)、(c)を比較、節を減衰接着剤で接合することによる減衰性向上の検証として、(b)と(c)を比較、高い減衰特性の接着剤を用いることによる減衰性向上の検証として、(d)と(e)を比較する。

Table 1 Specification of Stiffener in Test Frame

(a)	(b)	(c)	(d)	(e)
	SW Stiffener	Adhesive Type A	Adhesive Type A	Adhesive Type B

Table 2 Properties of Structural Adhesives (20°C, 20Hz)

	Loss factor (-)	Storage modulus (MPa)
Adhesive Type A	0.45	564
Adhesive Type B	0.04	2279

各仕様の1次ねじりモードの共振周波数をFig. 6に、モード減衰比をFig. 7に示す。Fig. 6から、節を設定していない(a)に対し、節を設定した(b)と(c)で共振周波数が高く、剛性が向上していることが分かる。またFig. 7から、(a)と(b)に対し、損失係数が高い接着剤Aで接合した(c)のモード減衰比が大幅に高く、減衰性が向上していることが分かる。加えて(d)と(e)の比較から、接着剤の損失係数が高いほどモード減衰比が高いことが分かる。

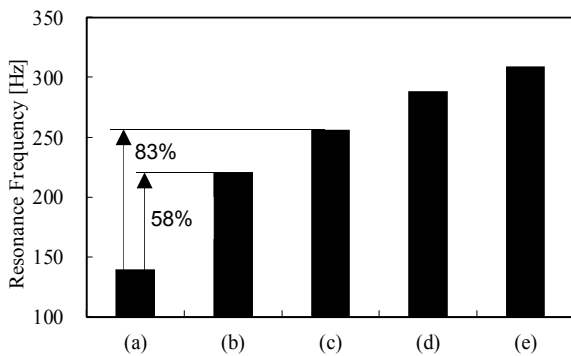


Fig. 6 Resonance Frequency of Test Frames

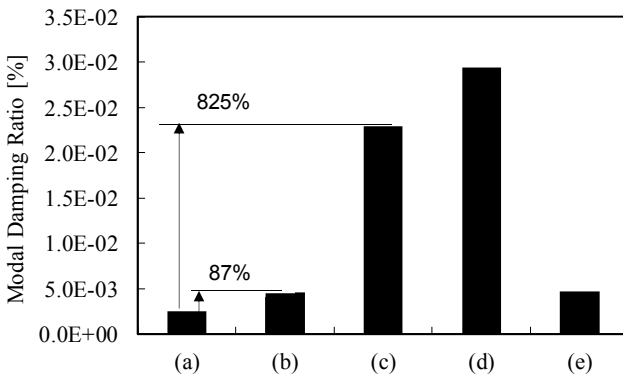


Fig. 7 Modal Damping Ratio of Test Frames

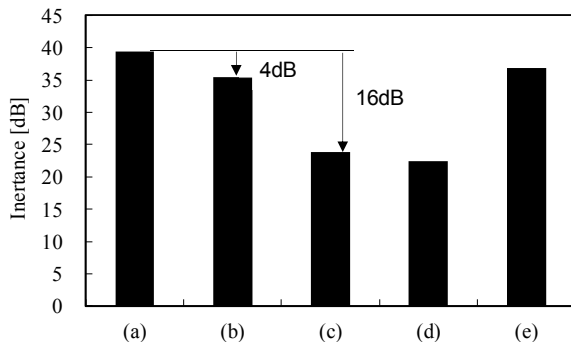


Fig. 8 Inertance of Test Frames

1次ねじりモードにおけるイナータンスをFig. 8に示す。節を設定していない(a)に対し、減衰性の高い接着剤Aで接合した(c)と(d)は大幅にイナータンスが低減する。ここで、(a)に対する低減量は(b)が4dB, (c)が16dBである。(b)と(c)は同等質量であるため、剛性と減衰性を向上させた(c)は高い質量効率で振動を低減することが分かる。

2.3 実車を用いた効果検証

減衰節構造を実車のフレームへ適用し、車体フレームの断面変形モードを伴う振動モードにおいて、車体の剛性向上と振動低減効果、更に車両でのロードノイズ低減効果を調べた。今回は、減衰節構造を配置しない車体と配置した車体で比較した。Fig. 9に、減衰節構造を配置した例を示す(赤塗りの部位)。接着剤は、Table 2に示したタイプAと同等特性である。

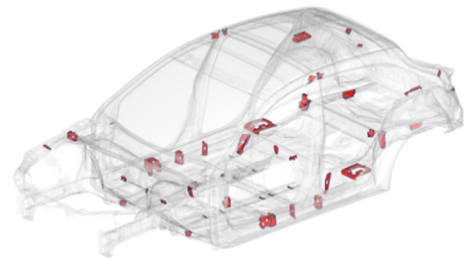


Fig. 9 Applied Location of Damping Stiffener (red painted)

(1) 車体を用いた検証

車体のフロントフレーム先端を加振したときのフロア各点(車体全体の70点)のイナータンスを計測し、周波数ごとに合計した値をFig. 10に示す。主要な共振ピークで共振周波数が約3Hz高くなるとともに、イナータンスが約6dB低減することが分かる。

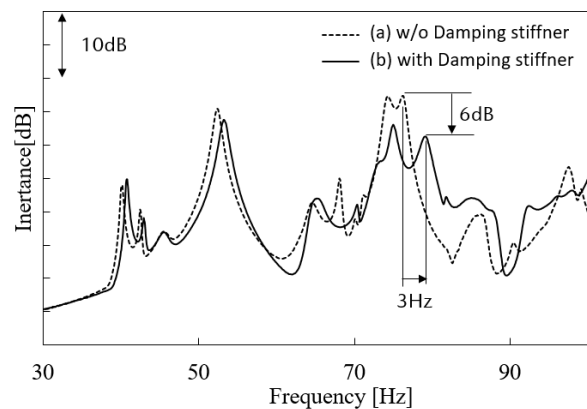


Fig. 10 Floor Inertance of Body in Panel

(2) 車両を用いた検証

ロードノイズは、荒れた路面を走行中に発生するゴーという音であり、代表的な車内騒音である。タイヤで発

生じた振動がサスペンションを介し、車体のフレームを伝ばして、キャビン内に音として放射されることで発生する。伝達系である車体フレームの振動特性を改善することはロードノイズ改善において有効であり、今回の減衰節構造による効果を確認できると考えた。

まず、台上加振での評価を実施した。ロードノイズの主要経路をなすサスペンション取付け点での音響感度をFig. 11に示す。減衰節のない車両(a)に対して、減衰節を入れた車両(b)は、ロードノイズ域での音響感度のピークが低減している。

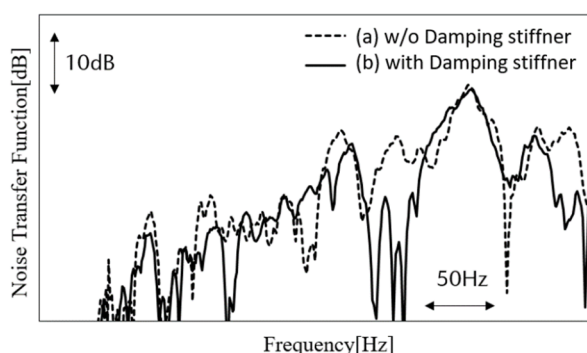


Fig. 11 Comparison of Noise Transfer Function by Suspension at Driver Position of Test Cars

次に、100km/h走行時での運転席の音圧レベルをFig. 12に示す。減衰節構造を配置することで、音圧レベルが最大で5dB低減できることが確認できた。

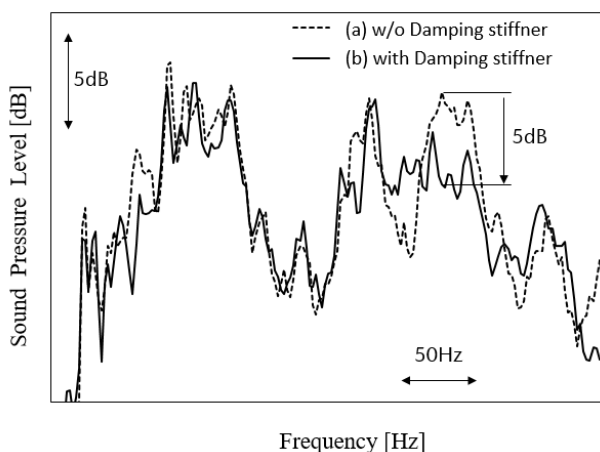


Fig. 12 Comparison of Road Noise of Test Cars

3. 減衰接着剤の開発

3.1 接着剤の開発目標

(1) ヤング率

2章の結果から、減衰節構造はフレームと節の3面をSW、残りの1面を減衰接着剤で接着する構造とした (Fig. 2参照)。したがって接着剤の剛性の目標は、フレームの静ねじり剛性が、フレームと節の4面をSWした場合と同等となるときのヤング率の値とした。Fig. 13に、

フレームと節の4面をSWした場合のフレームの静ねじり剛性と接着剤のヤング率との関係をFEM解析した結果を示す。接着剤のヤング率が100MPaあれば、節の4面をSWした場合の静ねじり剛性と等価であることが分かる。このことから、接着剤のヤング率の目標値を100MPaとした。

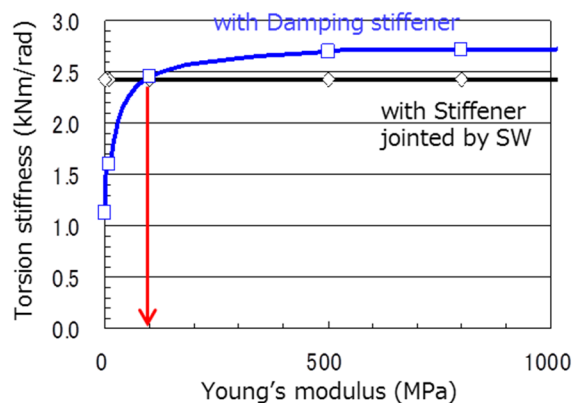


Fig. 13 Relation between Young's Modulus of Structural Adhesive and Torsion Stiffness of Frame

(2) 損失係数

接着剤の減衰性の目標値は、減衰節構造で使用したときに、フレームの1次ねじりモードの振動レベルが半減するときの損失係数の値とした。Fig. 14に、フレームの1次ねじりモードの振動レベルと接着剤の損失係数との関係をFEM解析した結果を示す。接着剤の損失係数が0.3あれば、振動レベルが半減することが分かる。このことから、接着剤の損失係数の開発目標を0.3以上とした。

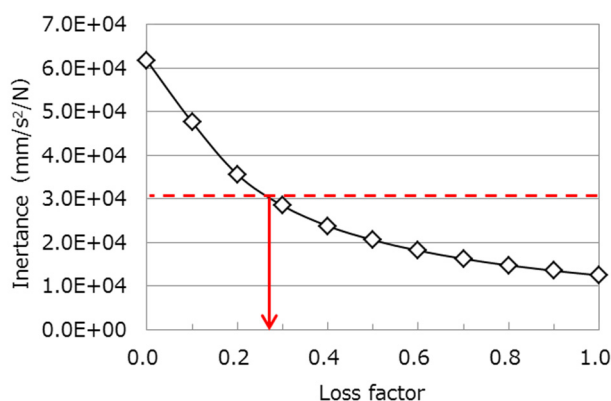


Fig. 14 Relation between Loss Factor of Structural Adhesive and Inertance of Frame

3.2 材料設計の考え方

減衰性の高い構造用接着剤を実現するための材料設計の考え方を以下に示す。一般的に、ヤング率と損失係数はトレードオフの関係にある。そこで、複数の樹脂を配合することで、幅広い温度域で減衰性を確保しつつ、フィラーの形状を選択することでヤング率を制御した。

(1) 常温域での減衰性の確保

Fig. 15に、複数の樹脂を配合した際の損失係数の違いを示す。汎用エポキシ樹脂aはガラス転移温度 (Tg) が高いため、常温域では損失係数が低く、減衰性を確保することができない。そこで、Tgが低い変性エポキシ樹脂bを使用し、常温で減衰性を発現するようにした。更に、Tgの異なる変性エポキシ樹脂cを配合し多成分系とすることで、減衰性の高い領域を広げた。

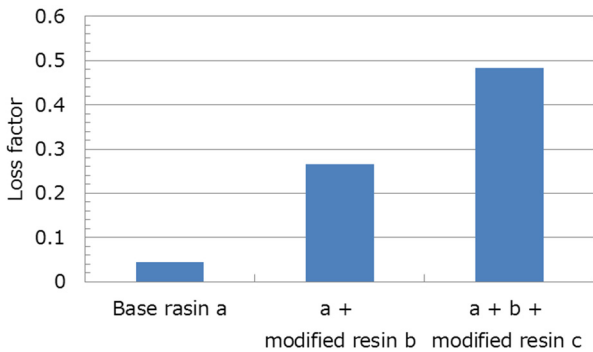


Fig. 15 Loss Factor of Developed Adhesives (20°C)

(2) ヤング率の制御

ヤング率の制御は、アスペクト比が高いため比表面積が大きい針状フィラーによる補強効果を活用した。Fig. 16に、全フィラー中の針状フィラーの配合比と、接着剤のヤング率及び損失係数との関係を示す。針状フィラーの配合で、損失係数を大きく低下させることなくヤング率を制御することができる。

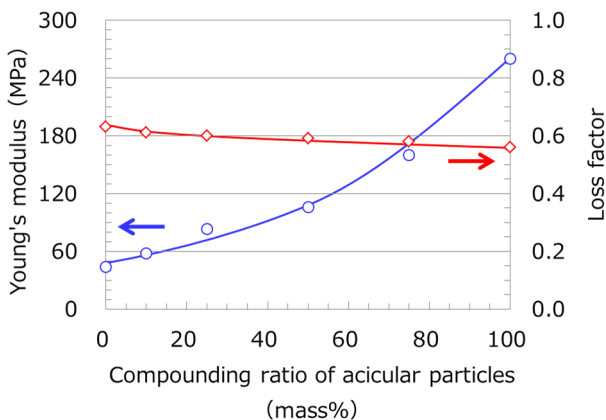


Fig. 16 Relation between Properties of Developed Adhesives and Compound Ratio of Acicular Particle in Filler Components

上記の材料設計の考え方をベースに組成開発を行い、Fig. 17に示すような、剛性と減衰性を両立し目標を満足する接着剤を開発した。なお、同時に自動車の製造ラインへの適合性を確保できるよう組成開発を行った。例えば、生産時のエネルギー低減の視点から、低温かつ短時

間の硬化特性、吐出性の視点から消費期限を考慮した粘度特性を実現している。

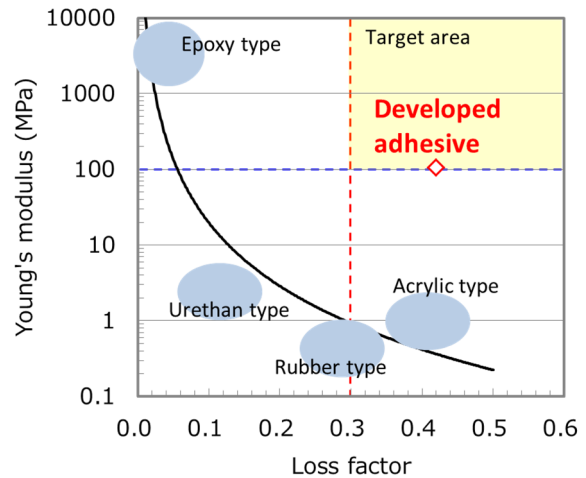


Fig. 17 Relation between Young's Modulus and Damping Factor of Developed Adhesive (20°C)

4. 生産技術開発

本開発においては、開発当初から接着剤、構造、工程、工法で量産適用するために開発、生産、製造の各部門で共創活動をしてきた。その中で、今後の接着工法の品質レベルを向上するために取り組んだ内容を紹介する。

4.1 接着剤の品質管理

接着剤は、製造メーカーから使用工場までペール缶の状態でもトラック輸送され、一時保管された後、塗布システムを用いて製品に塗布される。このプロセスで接着品質を維持するための各管理条件（温度、湿度、接着剤の圧送期間）を、海外工場を含めて決定し、各種要件に織り込んだ。

4.2 塗布の品質保証

接着剤は、塗布された後、車体組立、車体洗浄、車体表面処理、車体電着塗装の各工程を経て、塗装乾燥炉の熱で硬化する。この一連の工程の中に、品質に及ぼすさまざまな影響因子があるが、この影響を(1) 構造要件と(2) 塗布良品条件（塗布径、塗布高さ）に落とし込み、これを満足するための(3) 塗布システムを導入した。これら3点について取り組んだ内容を以下に示す。

(1) 構造要件

実車状態で塗布面が垂直になる部位は、硬化まで密着状態を維持するため、Fig. 18に示すように接着剤を受けける構造とすることで、ロバストな接着を可能とした。

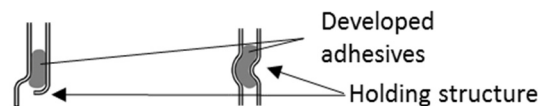


Fig.18 Cross Section of Structure of Damping Stiffener

(2) 塗布良品条件

減衰接着剤を減衰節構造と減衰ウェルドボンド接合に同一工程で塗布するため、塗布ノズルの共通化に取り組んだ。部位ごとの板間隙に応じ、塗布径や塗布高さの関係を実験検証から導くとともに、ロバストな塗布良品条件を導出した。

(3) 塗布システム

上記の塗布良品条件を保証するために、従来よりも塗布精度、及び塗布検査精度を向上したシステムを導入した。塗布精度の向上には、サーボモーターで塗布機内の接着剤をエンコーダー値で吐出量に換算する手法を用いた。塗布検査装置は、ノズル上部に取り付け、塗布しながらカメラによる塗布径を計測し、また塗布機の吐出量で高さを代用計測できるようにした。また、4.1章の接着剤品質管理の面から、Fig. 19に示すように、温調システムに加え、最短で接着剤供給できる配管長とするべく、注射器のように吸い取り、その吸い取った接着剤を塗布するドッキングシステムを採用した。

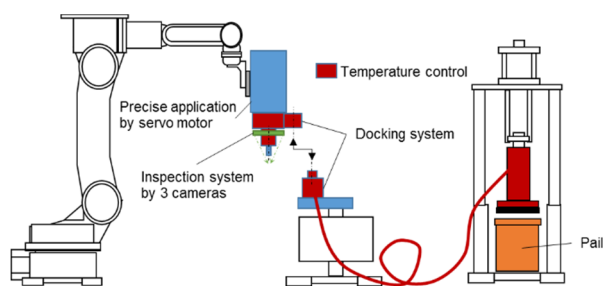


Fig.19 Schematic Diagram of Adhesive Application System

以上の取り組みに加え、接着部の定期的な全破壊検査を実施することで、高い品質を維持している。

5. おわりに

車両の軽量化と乗心地の向上、ロードノイズ低減との両立をねらい、振動の伝達系にあたる車体フレームを対象とした減衰制御構造（減衰節構造、減衰ウェルドボンド接合）、及び本構造に使用する振動減衰性に優れた構造用接着剤（減衰接着剤）を開発した。簡易フレームを用いて検証した結果、従来の剛性向上手段である節構造では4dB低減するのに対し、減衰節構造では16dB低減し、高い質量効率で振動を低減可能なことを確認した。実車を用いた検証では、車体の骨格モードの共振周波数が約3Hzシフトするとともに、振動が約6dB低減することを確認した。更に、100km/h走行時のロードノイズを最大で約5dB低減することを確認した。

最後に、減衰接着剤の共同開発先であるサンスター技研(株)に、感謝の意を表します。

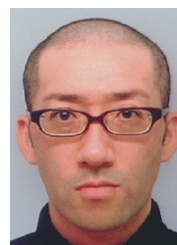
参考文献

- (1) 新田ほか：制振材の効率的な利用に関する一指針，自動車技術会学術講演会予稿集，No.69-99，pp.17-20 (1999)
- (2) 山口ほか：制振材を積層した自動車車体用パネルの減衰特性の有限要素解析，日本機械学会論文集（C編），70巻，699号，pp.76-82 (2004)
- (3) 加村ほか：パネルの放射音低減によるロードノイズの改善，自動車技術会学術講演会予稿集，No.976，pp.327-330 (1997)
- (4) 中川ほか：車体の減衰制御構造の開発，自動車技術会学術講演会予稿集，No.28-19 (2019)
- (5) 氷室ほか：減衰性に優れた構造用接着剤の開発，自動車技術会学術講演会予稿集，No.28-19 (2019)

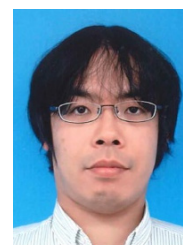
■ 著 者 ■



山本 研一



中川 興也



氷室 雄也



渡邊 重昭



小橋 正信



吉田 智也



三好 雄二



伊藤 司



鍵元 皇樹



八巻 悟



片岡 伸介

社外への発表論文一覧表（2018年1月～12月）

1. 社外講演(海外)

*所属は原則発表時点を示す

日程	主催・大会名	題目	発表者	所属
2018.5.14-16	10th International Cavitation Symposium (CAV2018)	X-Ray Imaging of Transient Cavitation Motion in Nozzles under Steady Injection Condition	Rubby Prasetya 三輪 誠 宋 明良 文 石洙 和田 好隆 植木 義治 横畑 英明	神戸大学 同上 同上 INHA大学 MBD革新部 同上 同上
2018.5.21-23	National Instruments NIWeek 2018	Innovation in Vehicle Infotainment Test With Mazda	足立 智彦	統合制御システム開発本部
2018.6.12	Chassis Tech Plus 2018	Development of GVC Moment Plus Control for mass production	梅津 大輔 高原 康典 砂原 修 加藤 史律 安部 正人 山門 誠 狩野 芳郎 高橋 絢也	操安性能開発部 統合制御システム開発本部 同上 操安性能開発部 神奈川工科大学 同上 同上 (株)日立製作所
2018.6.20-22	The Linux Foundation Open Source Summit Japan 2018 / Automotive Linux Summit 2018	Open Hardware in In-Vehicle Infotainment System	後藤 誠二 原木 俊壽 角田 信次	情報制御モデル開発部 スズキ(株) (株)SUBARU
2018.7.16	International Institute of Welding/Annual Assembly of the IIW 2018	Study on Practical Use of the Low-Slag Welding Process for Automotive Steel Sheets	山崎 亮太 井海 和也 田中 正顕 深堀 貢	(株)神戸製鋼所 同上 シャシー開発部 技術研究所
2018.7.16-20	AVEC'18 14th International Symposium on Advanced Vehicle Control	Effects of Response Parameters and Longitudinal Driver Position on Handling Quality Evaluation	塚野 孝俊 佐藤 一貴 狩野 芳郎 山門 誠 安部 正人	統合制御システム開発本部 神奈川工科大学 同上 同上 同上
2018.7.22-26	ILASS International ICLASS 2018 (14th International Conference on Liquid Atomization and Spray Systems)	High Speed Visualization of String Cavitation and Tomographic Stereo PIV in a Multi-Hole Diesel Injector	出口慎一郎 Rubby Prasetya 中村 峻登 三輪 誠 宋 明良 大木 純一 中島 聖 西田 恵哉 尾形 陽一 和田 好隆 植木 義治 横畑 英明	神戸大学 同上 同上 同上 同上 広島大学 同上 同上 MBD革新部 同上 同上
		X-Ray High Speed Visualization and Measurement of Cavitation Flow in a Nozzle under Transient Injection Condition	小谷 和也 Rubby Prasetya 西原安優実 三輪 誠 宋 明良 文 石洙 Raditya Hendra Pratama 和田 好隆 植木 義治 横畑 英明	神戸大学 同上 同上 同上 同上 INHA大学 産業技術総合研究所 同上 MBD革新部 同上 同上
2018.7.22-27	Polish Synchrotron Radiation Society 17th International Conference on X-Ray Absorption Fine Structure	Ti K-edge XAFS investigation of lithium migration in lithium titanium oxide negative electrode under charge/discharge cycles	早川慎二郎 金田 敦徳 森 啄也 Alvaro Munoz- Noval 三根生 晋 住田 弘祐	広島大学 同上 同上 同上 技術研究所 同上

日程	主催・大会名	題目	発表者	所属
2018.7.22-27	13th World Congress on Computational Mechanics	DES of pulsatile turbulent flow through a double 90° bend pipe for flow analysis of an automotive exhaust system	大木 純一 久家由紀香 西田 恵哉 尾形 陽一 山本 亮 中村 和博 柳田 春奈 横畑 英明	広島大学 同上 同上 同上 エンジン性能開発部 同上 同上 同上
2018.7.24-25	The Symposium on Automotive Passive Safety Technologies & Standards and Regulations	Improvement of accuracy of reconstruction of traffic accident	金子 直樹	衝突性能開発部
2018.8.5-8	The Korean Society of Mechanical Engineers The 14th International Conference on Motion and Vibration Control (MoViC 2018)	Motion and Vibration Control of Automotive Drive System Considering Gear Backlash Nonlinearity	米沢 平成 梶原 逸朗 佐藤 晶太 西留 千晶 坂田 将人 波多野 崇 平松 繁喜	北海道大学工学研究院 同上 同上 キャテック(株) 統合制御システム開発本部 同上 同上
2018.8.5-10	触媒学会 The 8th Tokyo Conference on Advanced Catalytic Science and Technology (TOCATS)	Experimental and computational studies about CO-NO reaction mechanism on rhodium nanocluster for three way catalyst	松村 益寛 国府田由紀 山田 啓司 重津 雅彦 久保田 寛 石元 孝佳 甲斐 裕之	技術研究所 同上 同上 同上 同上 広島大学 同上
2018.9.6-7	China Chemical Fibers Association The 24th China International Man-made Fibers Conference	High-Strength Plastic Composite Technology offering Functional Integration Models	藤 和久	技術研究所
2018.9.9-13	12th European Fluid Mechanics Conference	Experimental study on unsteady vortical structure in pulsating flow within a bend duct using time-resolved stereo PIV	久家由紀香 大木 純一 井上 祐哉 西田 恵哉 尾形 陽一 山本 亮 柳田 春奈 横畑 英明	広島大学 同上 同上 同上 同上 エンジン性能開発部 同上 同上
2018.9.11-12	Dassault Systèmes World-wide SFE Users Group Meeting 2018	Mazda SFE application development	木崎 勇 松岡 智恵	衝突性能開発部 ボデー開発部
2018.9.11-14	Universitat Politècnica de València, Spain The 10th International Conference on Thermo-and Fluid Dynamic Processes in Direct Injection Engines (THIESEL 2018)	Effect of injection pressure on fuel adhesion of flat wall-impinging spray under high ambient temperature condition	駱 洪亮 内富真太郎 渡部 智弘 西田 恵哉 尾形 陽一 張 武 藤川 竜也	広島大学 同上 同上 同上 同上 パワートレイン技術開発部 同上
2018.9.12-14	International Research Council on Biomechanics of Injury (IRCOBI), IRCOBI 2018 Conference	Short communication: Development of a Rotational Brain Injury Criterion with Consideration of the Direction and Duration of Head Rotational Motion	宮崎 祐介 石和健太郎 北川 雅隆 上野 正樹 杉本 繁 朝日 龍介 松村 広隆	東京工業大学 同上 同上 衝突性能開発部 同上 同上 同上

日程	主催・大会名	題目	発表者	所属
2018.9.12-14	International Research Council on Biomechanics of Injury (IRCOBI), IRCOBI 2018 Conference	The Analysis of an Individual Difference in Human Skeletal Alignment in Seated Posture and Occupant Behavior Using HBMs	泉山 朋大 西田 周泰 岩永 秀幸 陳 献 大木 順司 林 尊史 櫻本 逸男 朝日 龍介 杉本 繁 上野 正樹	衝突性能開発部 山口大学 同上 同上 同上 同上 徳山工業高等専門学校 衝突性能開発部 同上 同上
2018.9.20-22	The 5th IFAC Conference on Engine and Powertrain Control, Simulation and Modeling	Study on Model-Based Control for HCCI Engine	疋田 孝幸 水野 沙織 藤井 拓磨 山崎 由大 林 卓哉 金子 成彦	パワートレイン技術開発部 同上 同上 東京大学 同上 同上
2018.9.30-10.4	The Electrochemical Society AiMES2018	Measuring Oxygen Release from Cathode Materials for Li-Ion Batteries	Hackho Kim 池田 卓 阪井 博行 藤田 弘輝	九州大学 技術研究所 同上 同上
2018.10.4	Ministry of Economy, Entrepreneurship and Crafts 2nd International Conference on Structural Integrity and Durability	Effects of Welding parameters on Fatigue Strength of Joints Produced Friction Stir Welding	小川 裕樹 曙 紘之 菅田 淳 田中耕二郎	広島大学 同上 同上 技術研究所
2018.10.4	クラヴィエヴァツ大学工学部 7th International Congress Motor Vehicle & Motors 2018	Automotive safety control system based on timeaxis design	古郡 了 加藤 健郎 松岡 由幸	技術研究所 慶應義塾大学 同上
2018.11.13	Biology and Bioinformatics Society The 5th International Conference on Biomedical and Bioinformatics Engineering (ICBBE 2018)	Brain Activity While Waiting to Steer a Car: An fMRI Study	岡本 宜久 笹岡 貴史 吉田 敏宏 竹村 和紘 曾 智 農沢 隆秀 山脇 成人 辻 敏夫	技術研究所 広島大学 技術研究所 同上 広島大学 技術研究所 広島大学 同上
2018.11.14-16	TANGER Ltd. COMAT 2018	Relationship between hydrogen states present in the vicinity of the fracture surface and hydrogen embrittlement susceptibility for ferrite-martensitic dual-phase steels	浅里 大地 溝上 達志 深堀 貢 高井 健一	上智大学 技術研究所 同上 上智大学
2018.11.30	日本光学会 光設計研究グループ The 11th International Conference on Optics-photonic Design and Fabrication	Evolution of Automotive Safety Technology Supported by Optical Devices	岩下 洋平	技術研究所
2018.12.5-8	日本知能情報ファジィ学会 Intelligent Systems Workshop 2018	Timeaxis design of driving state learning system using non-steady model	古郡 了 加藤 健郎 松岡 由幸	技術研究所 慶應義塾大学 同上
2018.12.21	Seoul National University, Korea 2018 AARC International Symposium for Future Engine Technology	Combustion technologies of high compression ratio engine using high pressure gasoline injection	張 武	パワートレイン技術開発部

2. 社外講演(国内)

*所属は原則発表時点を示す

日程	主催・大会名	題目	発表者	所属
2018.1.16	日本溶接協会 電気溶接機部会技術委員会 平成29年度 溶接技術講演会・見学会	エンジン筒内流動解析を応用した溶接スラグ生成メカニズムの推定	斉藤 直子	技術研究所
2018.1.19	日本機械学会 エンジンシステム部門 2017年度 ES部門講習会	エンジンの熱損失特性と新たな伝熱モデルの構築について	原田 雄司	技術研究所
2018.1.19	日本応用物理学会 電子デバイス界面テクノロジー研究会	環境型硬X線角度分解光電子分光データを用いた積層薄膜界面の深さ方向解析・L1ノルム正則化法と最大エントロピー法の融合	豊田 智史 横山 和司 三根生 晋 住田 弘祐	京都大学 兵庫県立大学 技術研究所 同上
2018.1.21	日本安全運転・医療研究 第2回 日本安全運転・医療研究	復職の為に運転再開され2年間無事故の左同名半盲の症例を経験して～視線計測器を使用したドライビングシミュレーター (DS)走行時の視線傾向と分析～	奥野 隆司 吉田 希 西岡 拓未 高木 洋彰 仲野 剛由 桐畑 将司 石黒 望 岩下 洋平 桑原潤一郎 一杉 正仁	近江温泉病院 同上 同上 同上 同上 同上 同上 技術研究所 同上 滋賀医科大学
2018.1.26	自動車技術会 中部支部 第2回 技術交流会「車体の軽量化を推進する基礎技術」	高い衝突安全と軽量化を実現した、最適手法による超軽量・高強度フレーム断面技術の開発	本田 正徳	技術研究所
2018.1.26	日本金属学会・日本鉄鋼協会中国四国支部 第63回 材質制御研究会	アルミニウム/CF-PPの摩擦攪拌点接合強度に及ぼす接合条件の影響	西口 勝也	技術研究所
2018.1.26	日本マグネシウム協会 平成29年度第7回 技術講演会プログラム「自動車分野のマグネシウム適用動向と展望」	自動車のマルチマテリアル化と異材接合技術	杉本 幸弘	技術研究所
2018.1.26	自動車技術会 構造強度部門委員会 自動車技術会シンポジウム	CFRP部材の予測技術の検討	西原 剛史 河村 力 金本 俊介 西 正人 齊藤 啓	衝突性能開発部 技術研究所 車両開発本部 (株)JSOL 同上
2018.1.26	新構造材料技術研究組合 革新的新構造材料等研究開発 平成29年度 成果報告会	アルミニウム/異種材料の点接合技術	田中耕二郎	技術研究所
2018.1.31	広島大学 感性イノベーション研究推進機構 H29年度 感性イノベーション拠点公開シンポジウム	マツダにおける社会実装開発	西川 一男	技術研究所
2018.2.2	日本機械学会 エンジンシステム部門 第4回 高効率エンジン燃焼技術の高度化研究会	ガソリン高圧噴射を用いた 高圧縮比燃焼技術の可能性検討	養祖 隆	パワートレイン技術開発部
2018.2.2	宇宙航空研究開発機構 モデルベースドシステムズエンジニアリング ワークショップ	マツダの自動車制御システムの開発と今後の取り組み	佃 厚典	統合制御システム開発本部
2018.2.6	自動車技術会 九州支部講演会	SKYACTIVテクノロジーの誕生を支えたモデルベース開発	清水 良	PT制御システム開発部
2018.2.17	京都イノベーション・リソース 第3回 炭素繊維複合材料テクノシンポジウム	炭素繊維強化射出成型複合材料の自動車部品への適用について	藤 和久	技術研究所

日程	主催・大会名	題目	発表者	所属
2018.2.19	ひろしま産業振興機構 ひろしまデジタルイノベーション センター モデルベース開発プロ セス研修	モデルベース開発 ～10年の振り返りと先の10年の展望～	末富 隆雅	統合制御システム開発本部
2018.2.20	第5回 産学連携フォーラム 自動車技術に関するCAEフォー ラム in 東京	SKYACTIVエンジン製造におけるモノ 造り革新の継続的進化	河野 崇	パワートレイン技術部
2018.2.23	日本鑄造工学会 東海支部 鑄造先端プロセス研究部会「軽量 金属材料における先端研究 ～マ ルチマテリアル化を見据えて～	車体のマルチマテリアル化とその要素技 術	杉本 幸弘	技術研究所
2018.2.23	自動車技術会 構造強度部門委員 会 公開委員会	CAEによる接着剤破断予測手法開発 凝集破壊の再現方法の実験同定#2	黒田 一平	衝突性能開発部
2018.2.27	新産業創造研究機構 異種材料構造接着研究会 第4回研 究会	自動車業界における構造接着技術の動向 と課題	山本 研一 麻川 元康 氷室 雄也	技術研究所 同上 同上
2018.2.27	日本機械学会 バイオエンジニア リング部門 第17回 日本機械学会傷害バイオ メカニクス研究会	自動車シート着座でのヒト骨格アライメ ントの個体差分析	泉山 朋大 朝日 龍介 杉本 繁 上野 正樹 西田 周泰 岩永 秀幸 陳 献 大木 順司 櫻本 逸男	衝突性能開発部 同上 同上 同上 山口大学 同上 同上 同上 同上 同上 徳山工業高等専門学校
2018.2.28-3.2	日本材料学会 日本複合材料学会 第9回 日本複合材料会議	成形温度が熱硬化CFRP部材の衝撃エネ ルギー吸収特性に及ぼす影響	河村 力 久田 深作 SIIVOLA JUHO 水口 周 武田 展雄	技術研究所 東京大学 同上 同上 同上
		自動車衝突解析に向けたCFRP積層部材 のモデリングと破壊挙動の予測解析	西 正人 齊藤 啓 西原 剛史 河村 力 金本 俊介	(株)JSOL 同上 衝突性能開発部 技術研究所 車両開発本部
2018.3.2	東北大学大学院 工学研究科 分野セミナー/マッチメイキング セッション	HCCI燃焼における自己着火促進のため の非平衡プラズマ反応機構の構築及び特 性解析	今 陽平	技術研究所
2018.3.3	化学工学会 第20回 化学工学会学生発表会(東 広島大会)	塗装鋼板の耐食性評価に関する研究	岡内 大樹 磯本 良則 浅田 照朗 重永 勉	広島大学 同上 技術研究所 同上
2018.3.7	日本機械学会 中国四国支部 第56期総会・講演会	PIV計測を用いた矩形断面曲り管内脈動 流の非定常流動場特性の考察	久家由紀香 大木 純一 井上 祐哉 西田 恵哉 尾形 陽一 山本 亮 柳田 春奈 横畑 英明	広島大学 同上 同上 同上 同上 エンジン性能開発部 同上 同上
2018.3.8	自動車技術会 生産加工部門委員 会 第68回 技術交流会	走る喜びを実現するエンジン機械加工の モデルベース開発	谷村 一徳	パワートレイン技術部
2018.3.9	インダストリアル・バリュー チェーン・イニシアチブ IVI公開シンポジウム2018・	設備と人の実績可視化による 生産性・ 品質安定性の向上	小森 悠一	パワートレイン技術部
		鍛造プレスラインにおける予防保全と品 質向上	今野 康之	パワートレイン技術部
		AIによる生産ラインの生産性向上と自 動化進展	市本 秀則	生産企画部

日程	主催・大会名	題目	発表者	所属
2018.3.14	兵庫県立大学 高度産業科学技術研究所 先端技術セミナー2018 ポスター発表	雰囲気制御型硬X線光電子分光装置を用いた自動車排ガス浄化用触媒の評価	梶野 雄太 住田 弘祐 三根生 晋	兵庫県立大学 技術研究所 同上
2018.3.14	日本設計工学会 情報・知能・精密機器部門 (IIP 部門) 講演会	位相最適化における荷重伝達指標 (U* (Ustar)の適用) 荷重伝達エントロピーによる経路の明瞭化	藤田 知樹 宮下 朋之 大宮 正毅 高橋 邦弘 本田 正徳 高橋 邦弘 大宮 正毅 宮下 朋之 藤田 知樹 本田 正徳	早稲田大学院 早稲田大学 慶応大学 同上 技術研究所 慶應大学 同上 早稲田大学 早稲田大学院 技術研究所
2018.3.17	応用物理学会 第65回 応用物理学会春季学術講演会	NAP-HARPESによる多層積層薄膜界面のオペランド深さ方向分布解析の可能性	豊田 智史 住田 弘祐 三根生 晋	兵庫県立大学 技術研究所 同上
2018.3.19-21	日本鉄鋼協会 日本鉄鋼協会第175回春季講演大会	複合組織型高強度鋼の異なる評価法による水素脆化感受性比較	浅里 大地 高井 健一 溝上 達志 深堀 貢	上智大学 同上 技術研究所 同上
2018.4.	HPCI (High Performance Computing Infrastructure) HPCI研究成果, 平成29年度利用報告書	GPUハイブリッドMPI並列を活用した車載レーダ電波伝搬のFDTD法計算性能検証	山田 秀行 奥木 友和	技術研究所 同上
2018.4.6	自動車技術会 自動車技術会 材料部門委員会 話題提供講演	アルミニウムとCFRPの摩擦攪拌展接技術	西口 勝也	技術研究所
2018.4.12	自動車技術会 マルチメディア部門委員会	AGL(Automotive Grade Linux)の最新状況とマツダの取り組み	後藤 誠二	情報制御モデル開発部
2018.4.20	型技術協会, 日本金型工業会, 日本金属プレス工業協会 金型サロンin大阪	Mass Craftsmanship 講演	安達 範久	技術本部
2018.4.20	日本能率協会 TECHNO-FRONTIER2018 特別講演会	SKYACTIVエンジン製造におけるビックデータ活用	榎本 智章	パワートレイン技術部
2018.4.26	溶接学会 平成30年度 春季全国大会	異材接合の継手性能比較 アルミニウム/異種材料の点接合技術	平田 好則 杉本 幸弘 西口 勝也 田中耕二郎 山岡 弘人 猪瀬幸太郎 土屋 敦岐 本間 雅登 西口 勝也 田中耕二郎 杉本 幸弘	大阪大学 技術研究所 同上 同上 (株)IHI 同上 東レ(株) 同上 技術研究所 同上 同上
2018.5.8	経済広報センター 企業人派遣講座 同志社大学	Mass Craftsmanship 講演	安達 範久	技術本部
2018.5.18	全国IBMユーザー研究会連合会 第56回 IBMユーザー・シンポジウム広島大会	マツダの衝突安全開発の取り組み	杉本 繁	衝突性能開発部
2018.5.23-25	自動車技術会 2018年 春季大会 人とするものテクノロジー展	2045年のクルマづくりを実現する自動車生産技術 ～Fast Mobility 生産技術～	青木 祐人 他14名	パワートレイン技術部 自動車技術会 生産加工部門委員会 ワーキンググループ

日程	主催・大会名	題目	発表者	所属
2018.5.23-25	自動車技術会 2018年 春季大会 学術講演会	ガウス過程を用いたガソリンエンジンの統計モデリング手法の開発	小川 史恵 清水 良 和田 正義	PT制御システム開発部 同上 東京農工大学
		Trajectory Prediction for Other Vehicles Considering Individual Driving Characteristics	禹ハンウル 池 勇勲 田村 雄介 黒田 康秀 菅野 崇 山本 康典 山下 淳 浅間 一	東京大学 同上 同上 技術研究所 同上 同上 東京大学 同上
		量産型GVC Moment Plus制御車両の開発	梅津 大輔 加藤 史律 高原 康典 砂原 修 高橋 絢也 狩野 芳郎 安部 正人 山門 誠	操安性能開発部 同上 統合制御システム開発本部 同上 (株)日立製作所 神奈川工科大学 同上 同上
		新型2.2L低圧縮比クリーンディーゼルエンジンの開発 (第1報)	皆本 洋 金 尚奎 福田 大介 白橋 尚俊 上杉 康範 山谷 光隆 平林 千典 末國榮之介	エンジン性能開発部 同上 同上 同上 同上 エンジン設計部 同上 同上
		新型2.2L低圧縮比クリーンディーゼルエンジンの開発 (第2報)	上杉 康範 中野 洋平 和田 知行 勝田 真斗 宮崎 正浩 皆本 洋 中島 光広	エンジン性能開発部 同上 同上 同上 同上 同上 エンジン設計部
		ガソリン高圧噴射を用いた高圧縮比エンジンの燃焼技術 (第3報)	養祖 隆 神長 隆史 長野 高皓 藤川 竜也 山川 正尚	パワートレイン技術開発部 同上 同上 同上 同上
		ガソリン高圧噴射を用いた高圧縮比エンジンの燃焼技術 (第4報)	山川 正尚 神長 隆史 養祖 隆 長津 和弘 藤川 竜也 長野 高皓	パワートレイン技術開発部 同上 同上 同上 同上 同上
		エンジンの状態量推定のためのバルブ近傍の吸気流量計測	開澤 恭輔 才野鏡太郎 安野 啓介 山川 正尚 疋田 孝幸	(株)エー・アンド・デイ 同上 同上 パワートレイン技術開発部 同上
		均質化法による吸音材微視構造の最適設計法	山本 崇史 桂 大詞 久保田 寛	工学院大学 技術研究所 同上
		側方走行車両により簡易車両モデルに生じる空気抵抗変化の数値解析的検討	中島 卓司 清水 圭吾 松浦 恭平 平岡 武宜 中村 優佑 農沢 隆秀	広島大学 同上 同上 技術研究所 同上 同上
		圧力極小に着目した新しい渦構造同定手法	中村 優佑 平岡 武宜 農沢 隆秀 中島 卓司 清水 圭吾	技術研究所 同上 同上 広島大学 同上

日程	主催・大会名	題目	発表者	所属
2018.5.23-25	自動車技術会 2018年 春季大会 学術講演会	人体局所部位のエクセルギー収支と温冷感の分析	岡部 力也 永野 秀明 宿谷 昌則 白鳥 英 島野健仁郎 横田 和也 加嶋 利浩	東京都市大学 同上 同上 同上 同上 技術研究所 装備開発部
		基本諸元が操舵に対する車両応答へ及ぼす影響度の評価手法	塚野 孝俊 狩野 芳郎 山門 誠 安部 正人	統合制御システム開発本部 神奈川工科大学 同上 同上
2018. 5. 23-25	腐食防食学会 材料と環境2018	新計測システムを用いた車両腐食環境の定量化と解析	福田 克弘 山根 貴和	車両実研部 同上
2018.5.24-27	日本整形外科学会 第91回 日本整形外科学会学術総会	全脊椎アライメントはカーシートに座るとどう変わるか	山縣 大樹 寒竹 司 西田 周泰 中島 大介 三原 惇史 今城 靖明 鈴木 秀典 船場 真裕 田口 敏彦 岩永 秀幸 泉山 朋大	山口大学 同上 同上 同上 同上 同上 同上 同上 同上 同上 衝突性能開発部
2018.5.25	日本材料学会 第3回 マルチスケール材料力学シンポジウム	固体間摩擦解析のための有限要素法-分子動力学連成解析手法の開発	神田 英慈 波田野明日可 泉 聡志 宮内 勇馬	東京大学 同上 同上 技術研究所
2018.5.27	日本設計工学会 2018年度春季研究発表講演会	恒等写像ニューラルネットワークを用いた自動車制御システムのタイムアクシスデザイン	古郡 了 末富 隆雅 加藤 健郎 松岡 由幸	技術研究所 統合制御システム開発本部 慶應義塾大学 同上
2018.5.29	(株)ヴァイナス VINAS トップソリューション春セミナー2018	最適設計とデータマイニングを用いた自動車車体構造の軽量化	小平 剛央	技術研究所
2018.5.29-31	日本伝熱学会 第55回 日本伝熱シンポジウム学術講演会	ノナン異性体混合燃料の着火遅れ期間の測定と数値解析	山田 眞平 崎間 俊明 松原 圭輝 下栗 大右 三好 明 八房 智顯 乃生 芳尚 斉藤 史彦	広島大学 同上 同上 同上 同上 広島工業大学 技術研究所 同上
		気相・表面化学種の分析に基づくPt/Rh/Pd混合触媒上でのCO/O ₂ の表面詳細反応機構	下栗 大右 森山 大輔 香西 祐輔 三好 明 日隈 聡士 村上 浩 松本 有平 本郷 均 横畑 英明 竹林 広行	広島大学大学院 同上 同上 同上 熊本大学大学院 走行・環境性能開発部 広島大学大学院 エンジン性能開発部 同上 走行・環境性能開発部
2018.5.30	MSC Software 2018 Users Conference	ひずみ成分依存減衰係数モデル化手法V2018新機能 周波数依存・ひずみ成分依存材量定数モデル化	藤田 預詞雄 鄭 宏彬	ボデー開発部 同上
2018.6.1	広島大学 サステナブル物質科学	コンピュータシミュレーションによるマテリアルデザイン	甲斐 裕之	技術研究所
2018.6.2	非線形CAE協会 非線形CAE協会勉強会	Multidisciplinary Desing Optimizationとデータマイニングを用いた車体構造の軽量化	小平 剛央	技術研究所

日程	主催・大会名	題目	発表者	所属
2018.6.6-8	日本計算工学会 第23回 計算工学講演会	連続体損傷力学を用いた極低サイクル疲労破壊の研究	山王丸将吾 田中 義和 渡部 雅晃	エンジン性能開発部 広島大学 ドライブトレイン開発部
2018.6.8	dSPACE Japan(株) dSPACE Japan User Conference 2018	マツダにおけるMBDの取り組みおよび今後の発展	矢野 康英	統合制御システム開発本部
2018.6.8	広島市立大学, 広島修道大学二大 学連携講義 プロジェクトマネジメント論	企業活動とプロジェクトマネジメント	白 雪峰	情報制御モデル開発部
2018.6.11	資源エネルギー学会 第37回 エネルギー・資源学会研究発表会	最適化モデルによる2050年の自動車用燃料を中心としたエネルギー需給分析	野村 誠治	技術研究所
2018.6.11	熊本県社会・システムITコン ソーシウム 熊本大学 特別講義 「組み込みシステム関連産業論」	アクティブセーフティを支えるセンシング技術と制御技術	小嶋 浩一	電子基盤開発部
2018.6.13	ひろしま自動車産学官連携推進会議 自動車用次世代液体燃料シンポジウム2018	内燃機関の進化に向けたロードマップ	中井 英二	パワートレイン開発本部
2018.6.13	(株)日経BP Cloud Days 名古屋 2018	Mass Craftsmanship 講演	安達 範久	技術本部
2018.6.14-15	薄鋼板成形技術研究会	プレス金型設計におけるCAE技術の活用 第2報	新井 直樹	車体技術部
2018.6.15	日本塑性加工学会 接合・複合分 科会 第95回 分科会研究会	アルミニウムと異種材料の点接合技術	杉本 幸弘	技術研究所
2018.6.15	シー・エイ・イー懇話会 第4回 広島CAE懇話会	走る欲びを実現する機械加工のモデルベース開発	牟田 博紀	パワートレイン技術部
2018.6.18-19	型技術協会 第32回 型技術者会議2018	5軸工作機を活用した加工工程集約の取り組み	河妻 正成	ツーリング製作部
2018.6.18-20	日本ゲノム編集学会 第3回大会	プラチナTALENを用いた油糧微細藻類Nannochloropsisにおける高効率ゲノム編集	栗田 朋和 諸井 桂之 岡崎久美子 坂本 敦 佐久間哲史 山本 卓 岩井 雅子 太田 啓之 高見 明秀 野村 誠治 斉藤 史彦	広島大学 同上 同上 同上 同上 同上 東京工業大学 同上 技術研究所 同上 同上
2018.6.19	天然ガス自動車フォーラム 第63回 研究会	内燃機関の効率向上への挑戦	養祖 隆	パワートレイン技術開発部
2018.6.19-21	日本生体医工学会 第57回 日本生体医工学会大会	音声分析による診断技術の自動車への応用とその今後の展望について	岡崎 俊実	統合制御システム開発本部
2018.6.25	日本接着学会 次世代接着材料研究会 次世代接着材料研究会PartVII 第1 回例会講演会	自動車業界における構造接着技術の動向と課題	氷室 雄也 山本 研一 麻川 元康	技術研究所 同上 同上
2018.6.25-26	日経エレクトロニクス/日経 Automotiveセミナー 自動運転の切り札、車載 Ethernet	JASPARが進める1Gbit/s Ethernetの実装に向けた取り組み	河渕 量平	統合制御システム開発本部

日程	主催・大会名	題目	発表者	所属
2018.6.27-28	品質工学会 第26回 品質工学研究発表大会	ヘミング曲げ金型における成形技術の向上	長澄 徹侍	ツーリング製作部
			松村 春樹	車体技術部
			安楽 健次	ツーリング製作部
			中山 光一	同上
			中西 康夫	同上
			橋本 智広	同上
			上岡 紀行	(株)ヒロテック
			松野 勇二	同上
			秋月 匠	ツーリング製作部
			木村 惇史	同上
芝橋 恒成	同上			
中原 寛海	同上			
宇都宮 誠	同上			
大田 敦史	同上			
藤川 宏明	同上			
橋本 昭	同上			
2018.6.29	広島大学 感性イノベーション研究推進機構 平成30年度 感性イノベーション拠点公開シンポジウム	樹脂金型の意匠面仕上げ加工における切削工具及び条件の最適化	廻本 章吾	ツーリング製作部
			久保 裕貴	同上
			江草 秀幸	同上
			中原 寛海	同上
			河妻 正成	同上
			安楽 健次	同上
			大田 敦史	同上
			橋本 昭	同上
			徳留 宏俊	ツーリング製作部
			笠井 将司	同上
澤本 健	同上			
得平 吉輝	同上			
大塚 宏明	同上			
安楽 健二	同上			
長澄 徹侍	同上			
2018.6.29	広島大学 感性イノベーション研究推進機構 平成30年度 感性イノベーション拠点公開シンポジウム	鋼材の溶接条件最適化	上村 勝利	ツーリング製作部
			久保 裕貴	同上
			岡山 一洋	同上
			畑平 拓也	同上
			芝橋 恒成	同上
			安楽 健次	同上
			大田 敦史	同上
			江草 秀幸	同上
			橋本 昭	同上
			西川 一男	技術研究所
2018.7.11-12	シーメンスPLMソフトウェア Siemens PLM Connection Japan 2018	LMS Virtual.Lab Acousticsを駆使した超音波式盗難防止装置開発の効率化	崎山 雅章	電子性能開発部
			甲斐 裕之	技術研究所 (広島大学出向中)
			杉本 幸弘	技術研究所
			甲斐 裕之	技術研究所 (広島大学出向中)
			岡崎久美子	広島大学
			坂本 敦	同上
			山本 卓	同上
			太田 啓之	東京工業大学
			高見 明秀	技術研究所
			野村 誠治	同上
斉藤 史彦	同上			
2018.7.13	日本ゴム協会 第53回 夏期講座 グローバル競争に勝ち残るゴム・エラストマー技術	材料モデルベース研究に基づくマツダのモノづくり革新	甲斐 裕之	技術研究所 (広島大学出向中)
			杉本 幸弘	技術研究所
			甲斐 裕之	技術研究所 (広島大学出向中)
			岡崎久美子	広島大学
			坂本 敦	同上
			山本 卓	同上
			太田 啓之	東京工業大学
			高見 明秀	技術研究所
			野村 誠治	同上
			斉藤 史彦	同上
2018.7.14	日本技術士会 中国本部 化学/繊維/金属部会 平成30年度講演会	車体のマルチマテリアル化とその要素技術	杉本 幸弘	技術研究所
			甲斐 裕之	技術研究所 (広島大学出向中)
			岡崎久美子	広島大学
			坂本 敦	同上
			山本 卓	同上
			太田 啓之	東京工業大学
			高見 明秀	技術研究所
			野村 誠治	同上
			斉藤 史彦	同上
			2018.7.17	横浜市立大学 教室セミナー
杉本 幸弘	技術研究所			
甲斐 裕之	技術研究所 (広島大学出向中)			
岡崎久美子	広島大学			
坂本 敦	同上			
山本 卓	同上			
太田 啓之	東京工業大学			
高見 明秀	技術研究所			
野村 誠治	同上			
斉藤 史彦	同上			
2018.7.23	広島大学 バイオマスプロジェクト研究センター、中国地域バイオマス利用研究会 第66回 広島大学 バイオマスイノベーションセミナー	微細藻類ナンノクロロプシスによるバイオ燃料生産	岡崎久美子	広島大学
			坂本 敦	同上
			山本 卓	同上
			太田 啓之	東京工業大学
			高見 明秀	技術研究所
			野村 誠治	同上
			斉藤 史彦	同上

日程	主催・大会名	題目	発表者	所属
2018.7.24	ダッソー・システムズ(株) 第4回 SFE User交流会 2018	マツダに於けるSFE適用の歴史と事例紹介	木崎 勇 松岡 智恵	衝突性能開発部 ボデー開発部
2018.7.25	広島大学 シミュレーション研究会 第2回 シミュレーション研究会	材料モデルベース研究実現に向けた産学連携の革新	甲斐 裕之	技術研究所 (広島大学出向中)
2018.7.27	プラスチック成形加工学会 第165回 講演会	架橋型ポリシルセスキオキサンを用いた断熱材料開発における計算化学の活用	岡田 健太	技術研究所
2018.7.27	自動車リサイクルの推進～バンパーtoバンパーリサイクル技術について～		藤 和久	技術研究所
2018.7.28	軽金属学会 中国四国支部 第10回 軽金属学会 中国四国支部 講演大会	Development of Al-9Si-Mo/Zr alloys for their as-cast applications	肖 沢沢 松木 一弘 許 哲峰 小田 信行 小湊 裕允 魚崎 靖夫	広島大学 同上 同上 技術研究所 同上 同上
2018.7.29-8.1	会津若松市役所 あいつ未来人財育成塾2018	理想のクルマづくりエンジニアとは？	佐藤 圭峰	技術研究所
2018.8.8	名古屋大学 未来社会創造機構 モビリティ領域, ほか 第6回 産学連携フォーラム 自動車技術に関するCAEフォーラム in 名古屋	SKYACTIVエンジン製造におけるモノ造り革新の継続的進化	池田雄一郎	パワートレイン技術部
2018.8.22-24	日本人体振動学会 第26回 日本人体振動学会	広帯域における人体振動特性の把握	加納 光明 吉村 卓也 玉置 元 北原陽一郎	首都大学東京 同上 同上 技術研究所
2018.8.27-29	日本実験力学学会 2018年度年次講演会	乗員の筋緊張を考慮した内因性事故の逆解析による衝突直前の乗員挙動の実態把握	中畑洋一朗 岩下 洋平 山本 康典 一杉 正仁	技術研究所 同上 同上 滋賀医科大学
2018.8.28-31	日本機械学会 Dynamics and Design Conference 2018	バックラッシュ特性を再現する自動車駆動系の基礎実験装置と振動制御	米沢 平成 梶原 逸朗 佐藤 晶太 西留 千晶 坂田 将人 波多野 崇 平松 繁喜	北海道大学工学研究院 同上 同上 キャテック(株) 統合制御システム開発本部 同上 同上
2018.8.31	ROOB2018実行委員会 The 3rd Workshop of Robotics Ongoing Breakthroughs	筋活動度に基づくステアリング操舵中における力知覚量の予測	岸下 優介 竹村 和紘 山田 直樹 原 利宏 岸 篤秀 西川 一男 農沢 隆秀 辻 敏夫 栗田 雄一	広島大学 技術研究所 同上 同上 同上 同上 同上 広島大学 同上
2018.9.5	日本感性工学会 第20回 日本感性工学会大会	浴室床の表面加飾による質感表現が心理と高次元画像統計量に及ぼす影響	小谷麻美子 加藤 智久 森井 勇次 渡邊 雅之	TOTO(株) 同上 同上 技術研究所
2018.9.6	日本金型工業会 第4回 金型シンポジウム (広島)	基調講演 お客様の輝きにつなげるマツダのモノ造り	安達 範久	技術本部
2018.9.6	リードエグジビションジャパン(株) クルマの軽量化技術展「名古屋軽量化革新フォーラム2018」	摩擦熱によるアルミニウムとCFRPの異種材料接合	杉本 幸弘	技術研究所
2018.9.7	(株)やまびこ エンジン技術討論会-2018	ガソリン高圧噴射を用いた高圧縮比エンジンのSI・HCCI燃焼技術	山川 正尚	パワートレイン技術開発部

日程	主催・大会名	題目	発表者	所属
2018.9.9-12	日本機械学会 2018年度 年次大会	車両CANネットワークの再構築による前後・横運動の協調制御～クルマは何を自動化すべきか？	梅津 大輔	操安性能開発部
		ねじ込みボルト締結体のクリープによる軸力低下～被締付物およびめねじ部材の影響～	渡邊 忠俊 大宮 祐也	技術研究所 岡山大学
		ニューラルネットワークによるHCCI燃焼変動メカニズムの把握	松元 佑樹 山崎 由大 金子 成彦 疋田 孝幸 水野 沙織 藤井 拓磨	東京大学 同上 同上 パワートレイン技術開発部 同上 同上
		SKYACTIV-Dエンジンのノック音低減技術	森 恒寛	エンジン性能開発部
2018.9.12-14	溶接学会 平成30年度 秋季全国大会講演会	超ハイテン鋼溶接部の塗装性改善に向けたスラグ低減手法	山崎 亮太 井海 和也 横田 泰之 田中 正顕 深堀 貢	(株)神戸製鋼所 同上 同上 シャシー開発部 技術研究所
2018.9.12-14	日本音響学会 2018年秋季研究発表会	カーオーディオにおける明瞭度の定量評価指標の開発	神田 有正 石光 俊介 若松 功二 山中 尋詞 中島 正典	広島市立大学大学院 同上 電子性能開発部 同上 NVH性能開発部
2018.9.13-14	日本複合材料学会 第43回 複合材料シンポジウム	繊維・樹脂界面特性を考慮した繊維強化ポリプロピレンのマイクロ構造力学特性モデル	平本 健治 王 存涛 築山 友美 小川 淳一 濱田 泰以	技術研究所 同上 同上 同上 京都工芸繊維大学
2018.9.14	自動車技術会 関西支部 2018年度 講演会	マツダの目指すモデルベース開発とその適用	矢野 康英	統合制御システム開発本部
2018.9.14	日本化学会 関東支部講演会「マルチマテリアル化の実現に向けた接着・接合技術の最前線」	自動車における構造接着技術の動向と課題	山本 研一 麻川 元康 氷室 雄也	技術研究所 同上 同上
2018.9.14	日本鋳造協会 平成30年度 鋳造カレッジ中国四国地区 鋳鉄コース	量産小物鋳鉄铸件を中心とした鋳鉄の材質	黒谷 真司	パワートレイン技術部
		量産小物鋳鉄铸件を中心とした鋳鉄の製造プロセス、鋳造方案	田中 裕一	パワートレイン技術部
2018.9.19-21	日本鉄鋼協会 第176回 秋季講演大会	複合組織型高強度鋼の異なる水素脆化評価法によって得られた破面近傍の水素存在状態比較	浅里 大地 高井 健一 溝上 達志 深堀 貢	上智大学 同上 技術研究所 同上
2018.9.26	自動車技術会 生産加工部門委員会 第69回 技術交流会	「走る喜び」の実現に向けた軽量化と耐久性を両立する設計プロセス革新	丸尾 幸治	パワートレイン技術部
2018.9.26-28	触媒学会 第122回 触媒討論会	分野横断型触媒設計指針ならびに解析手法の構築	日隈 聡士 下栗 大右 松本 有平 村上 浩 竹林 広行 浦川 篤 町田 正人	熊本大学大学院 広島大学大学院 同上 走行・環境性能開発部 同上 カタルーニャ化学研究所 熊本大学大学院
		還元処理が与えるPt/Pd担持La ₂ O ₃ -Al ₂ O ₃ のCO参加性能への影響	滝沢 知也 原田浩一郎 松本 祐樹 長嶋 佳加 國府田由紀 重津 雅彦	技術研究所 同上 同上 同上 同上 同上

日程	主催・大会名	題目	発表者	所属
2018.10.4-5	薄鋼板成形技術研究会 2018年度第2回 研究討論会	品質工学を用いたヘミング成形技術の向上	長澄 徹侍	ソーリング製作部
2018.10.5	アンシス・ジャパン(株) ANSYS INNOVATION FORUM 2018・Innovation is involving everywhere	マツダのモデルベース開発	末富 隆雅	情報制御モデル開発部
2018.10.5	日本ナショナルインスツルメンツ (株) NIDays 2018	マツダのHILS構築・活用事例について	岡田 英之 橋高 徳昭	電子性能開発部 同上
		車載電装品の最先端モデルベース開発事例～LabVIEWでここまで実現。90%の工数削減～	岡田 英之 橋高 徳昭	電子性能開発部 同上
2018.10.9	関西品質工学研究会 品質工学シンポジウム2018in京 都	鋼材の溶接条件最適化	徳留 宏俊	ソーリング製作部
		ヘミング曲げ金型における成形技術の向上	長澄 徹侍	ソーリング製作部
2018.10.11	インダストリアル・バリュー チェーン・イニシアティブ IVI公開シンポジウム2018	AIによる生産ラインの生産性向上/自動化進展と品質改善	市本 秀則	生産企画部
2018.10.12	型技術協会 第131回 技術交流会	魂動デザインの再現に向けた、高精度・高品位加工への取り組み	藤川 宏明	ソーリング製作部
2018.10.16	日本機械学会 最適化シンポジウム2018	ニューラルネットワークを利用した荷重-変位曲線の近似とその最適化に関する研究	高山 陽平 竹澤 晃弘 北村 充 本田 正徳	広島大学 同上 同上 技術研究所
2018.10.17-19	自動車技術会 2018年 秋季大会 学術講演会	塗装仕上がり肌評価技術の確立	湊 允哉 戸来 晶晴 松田 隆臣 中本 克典 赤峰 真明 久保田 寛	技術研究所 第1車両製造部 車両技術部 技術研究所 同上 同上
		座屈と圧縮破断の抑制による、CFRP中空フレームの曲げ強度質量効率を向上させる断面形状の研究	河村 力 本田 正徳	技術研究所 同上
		アルミニウム/CFRPの異種材料点接合技術	西口 勝也 田中耕二郎 森田 泰博 杉本 幸弘	技術研究所 同上 同上 同上
		ガンソリン高圧噴霧の壁面衝突における蒸発特性	張 武 原 亮介 藤川 竜也 山川 正尚 渡部 智弘 市川由記彦 西田 恵哉 尾形 陽一	パワートレイン技術開発部 同上 同上 同上 広島大学 同上 同上 同上
		車内騒音の静粛性評価に向けた聴覚的注意のモデル化	中谷 裕紀 渡邊 雅之 萬 菜穂子	技術研究所 同上 同上
2018.10.20	日本機械学会 関西支部 秋季技術交流フォーラム「内燃機 関シミュレーションの現状と未 来」	詳細燃焼解析技術を使用した3次元エンジン燃焼解析	藤本 英史	技術研究所
2018.10.20	国際P2M学会 第26回 国際P2M学会研究発表大 会	P2MとWakuwaku3D～ワクワク-人財 開発 ワクワク-技術開発 ワクワク-くる ま開発	浜田 康	電子性能開発部

日程	主催・大会名	題目	発表者	所属
2018.10.23	にいがた産業創造機構 先進的金型研究会	アルミニウムと異種材料の点接合技術	杉本 幸弘	技術研究所
2018.10.25	ひろしま産業振興機構 自動車用材料の高機能化研究会	自動車における構造接着技術の動向と課題	山本 研一 麻川 元康 氷室 雄也	技術研究所 同上 同上
2018.10.25-26	日本分析化学会 X線分析研究懇 談会 第54回 X線分析討論会	放射光XPSと理論計算によるRhナノ粒 子上でのNO吸着挙動	國府田由紀 松本 祐樹 住田 弘祐 小川 智史 八木 伸也 生天目博文	技術研究所 同上 同上 名古屋大学 同上 広島大学
2018.10.29-31	腐食防食学会 第65回 材料と環境討論会	大規模データのクラスタリング分析によ る腐食要因推定技術の開発	中本 尊元 本延 愛梨 金本 智 福田 克弘 山根 貴和	車両実研部 同上 同上 同上 同上
2018.10.30	MathWorks Japan MATLAB EXPO 2018 JAPAN	非線形モデル予測制御(NMPC)活用拡大 に向けた取組み	波多野 崇 赤坂 大介	情報制御モデル開発部 MathWorks Japan
2018.11.1	産業技術総合研究所 人間情報研 究部門 第4回 産総研・人間情報研究部門 シンポジウム	「脳機能と感情」セッションのパネリス ト及びポスター展示「精神的価値が成 長する感性イノベーション拠点」	坂本 和夫	技術研究所
2018.11.1	ひろしま感性イノベーション推進 協議会 感性イノベーション講座2018実 践講座 第4回講座	感性脳科学へのいざない	西川 一男	技術研究所
2018.11.1	日本立地センター 東北経産局トップマネジメントセ ミナー	次世代パワートレインの技術ニーズ	小笠原 徹	パワートレイン開発本部
2018.11.2	HPCI 第5回成果報告会(ポスター発表)	電波伝搬解析のための大規模高速FDTD 計算手法の開発	奥木 友和	技術研究所
2018.11.2	自動車技術会 車室内環境技術部門委員会シンポ ジウム	将来の車造りを変えていくモデルベース 開発	増岡 宏明	電子基盤開発部
2018.11.4-6	日本機械学会 第28回 設計工学・システム部門 講演会	進化的重回帰分析を用いた自動車構造の 設計支援技術の開発	釧持 寛正	技術研究所
2018.11.6	慶應義塾大学 総合政策学部・環 境情報学部共通寄附講座 「交通安全文化論」	マツダの安全への取組み	伊東 哲夫	技術企画部
2018.11.8	IDAJ CAE Solution Conference 2018	エンジン吸排気の開発におけるIconCFD の活用事例	山本 亮	MBD革新部
2018.11.8-9	自動車技術会 第5回ガソリン機関部門委員会	ガソリン高圧噴射を用いた高圧縮比エン ジンの燃焼技術	神長 隆史	パワートレイン技術開発部
2018.11.13	日本溶接協会 溶接・接合プロセ ス研究委員会 自動車産業における最新の接合技 術	アルミニウムと異種材料の点接合技術	杉本 幸弘	技術研究所
2018.11.14-16	日本燃焼学会 第56回 燃焼シンポジウム	当量比空間勾配によるノッキング末端ガ ス燃焼モードの制御	寺島 洋史 佐藤 伴音 河野 通治 植木 義治 横畑 英明	北海道大学 同上 MBD革新部 同上 同上

日程	主催・大会名	題目	発表者	所属
2018.11.14-16	日本燃焼学会 第56回 燃焼シンポジウム	気相・表面化学種の分析に基づく三元触媒用のCeO _x 酸素吸蔵モデル Development of surface reaction mechanism of exhaust hydrocarbon species based on surface and gaseous species analysis	内藤 弘貴 下栗 大右 日隈 聡士 村上 浩 Naing Set Kristyawan I Putu Angga 香西 祐輔 松本 有平 竹林 広行 三好 明 Kristyawan I Putu Angga Naing Set 下栗 大右 日隈 聡士 村上 浩 香西 祐輔 松本 有平 竹林 広行 三好 明	広島大学大学院 同上 熊本大学大学院 走行・環境性能開発部 広島大学大学院 同上 同上 同上 広島大学大学院 走行・環境性能開発部 広島大学大学院 同上 走行・環境性能開発部 広島大学大学院
2018.11.15-16	日本イーエスアイ(株) PUCA 2018 - ESI Users' Forum Japan -	マツダの目指すMBDと車両電装システム開発での適用事例	浜田 康	電子性能開発部
2018.11.16-17	第45回 日本臨床バイオメカニクス学会	座位全脊椎アライメントの違いが人体傷害解析モデルに与える影響	山縣 大樹 西田 周泰 中島 大介 三原 惇史 坂井 孝司 田口 敏彦 岩永 秀幸 陳 猷 泉山 朋大 上野 正樹	山口大学 同上 同上 同上 同上 同上 同上 同上 衝突性能開発部 同上
2018.11.17-18	日本化学会 中国四国支部 2018年 日本化学会中国四国支部大会	通常X線源を用いる分散型XFAS測定装置によるリチウム二次電池の動的価数追跡	森村 亮介 大村 健人 三根生 晋 永野 裕己 甲斐 裕之 住田 弘祐 駒口 健治 早川慎二郎	広島大学 同上 技術研究所 同上 同上 同上 広島大学 同上
2018.11.18	システム制御情報学会 第61回 自動制御連合講演会	Gaussian Processを用いたガソリンエンジンの推定手法の検討	小川 史恵 松江 浩太 清水 良 和田 正義	PT制御システム開発部 同上 同上 東京農工大学
2018.11.21	丹後機械工業協同組合	お客様の輝きにつながるマツダのモノづくり革新	安達 範久	技術本部
2018.11.21	エイヴィエルジャパン(株) AVL ASTユーザーカンファレンス 2018	BOOSTを用いた自動車用三元触媒の詳細反応機構構築 マツダにおけるモデルベース開発と今後の展望	松本 有平 矢野 康英	MBD革新部 統合制御システム開発本部
2018.11.22	日本ねじ研究協会 第1回 ねじ研究シンポジウム	ボルト締結体を昇温した際の軸力挙動	渡邊 忠俊 大宮 祐也 藤井 正浩	技術研究所 岡山大学 同上
2018.11.22	日本エネルギー学会 西部支部協会 日本エネルギー学会西部支部 第3回 学生・若手研究発表会	リチウム電池用カソード材料の熱安定性の分析	Hackho Kim 池田 卓 阪井 博行 藤田 弘輝	九州大学 技術研究所 同上 同上

日程	主催・大会名	題目	発表者	所属
2018.11.22	精密工学会 2018年度 精密工学会中国四国支部山陰地区講習会	アルミエンジン加工におけるモニタリングとそのデータ活用について	松田 潤也 福田 祐二	パワートレイン技術部
2018.11.24	早稲田大学 モビリティ研究会 第38回 早大モビリティシンポジウム	SKYACTIV-G 気筒休止システムの紹介	増田 幸男	エンジン性能開発部
2018.11.24	自動車技術会 関西支部 学生自動車研究会 2018年度 新車試乗・技術説明会	MAZDA CX-8 妥協のない“走る歓び”を提供する進化したSKYACTIV-D2.2	皆本 洋	エンジン性能開発部
2018.11.25-27	計測自動制御学会 システム・情報部門学術講演会	遺伝的ネットワークプログラミングを用いたハイブリッド車両走行データ分析	平田宗一郎 間普 真吾 宮腰 穂 原田 真悟 矢野 康英	山口大学大学院 同上 統合制御システム開発本部 同上 同上
2018.11.26-28	日本機械学会, 自動車技術会 第29回 内燃機関シンポジウム	フォーラム II エンジン燃焼技術を振り返って今わかること 「ガソリン希薄燃焼技術の温故知新 – 1990年代技術からの気づき –」 二次元ピストンキャビティ内におけるディーゼル噴霧発達と混合気分布 定容容器による単噴孔ディーゼル噴霧/火炎の壁面衝突熱伝達の研究 (非燃焼時と燃焼時の熱流の比較による熱伝達メカニズム究明) 高圧横風雰囲気下で平板に衝突するガソリン噴霧の挙動	漆原 友則 塩飽 朋也 矢崎真太郎 西田 恵哉 尾形 陽一 神崎 淳 金 尚奎 栗栖 徹 Rizal MAHMUD 西田 恵哉 神崎 淳 芦田 裕司 司 占博 西田 恵哉 尾形 陽一 和田 好隆 上村 匠	エンジン性能開発部 広島大学大学院 同上 同上 同上 エンジン性能開発部 同上 広島大学大学院 同上 同上 エンジン性能開発部 広島大学 同上 同上 同上 同上 MBD革新部 同上
2018.11.28	早稲田大学 鋳造技術研究会	車体のマルチマテリアル化と高延性アルミダイカスト技術	杉本 幸弘	技術研究所
2018.11.28-30	日本分子生物学会 第41回 日本分子生物学会年会	油糧微細藻類NannochloropsisにおけるプラチナTALENを用いた高効率ゲノム編集	栗田 朋和 諸井 桂之 岡崎久美子 坂本 敦 佐久間哲史 山本 卓 岩井 雅子 太田 啓之 野村 誠治 斉藤 史彦 高見 明秀	広島大学 同上 同上 同上 同上 同上 東京工業大学 同上 技術研究所 同上 同上
2018.11.29-30	型技術協会 第24回 型技術ワークショップ 2018inふくい	品質工学を用いたヘミング成形技術の向上 ”魂動デザイン”を忠実に再現できる金型づくりへの取り組み プレス金型設計におけるCAE技術の活用	長澄 徹侍 田中 雄 埜 慎一 岩本 道尚 山口 大輔	ソーリング製作部 車両技術部 同上 同上 車体技術部

日程	主催・大会名	題目	発表者	所属
2018.11.29-12.1	日本植物脂質科学研究会 第31回 日本植物脂質シンポジウム	ナンノクロロプシスにおけるAtSDPIホモログは新規合成されたTAGを小胞体上で分解する	信澤 岳 山川 薫 太田 啓之 高見 明秀 野村 誠治 斉藤 史彦	広島大学 東京工業大学 同上 技術研究所 同上 同上
2018.11.30	IAV TOKYO Powertrain Conference 2018	新型2.2L 低圧縮比クリーンディーゼルエンジンの開発	上杉 康範	エンジン性能開発部
2018.12.4	日本機械学会 ダンピング研究会 @京都大学	SKYACTIV-Dにおける動吸収器を代表としたノック音低減技術	森 恒寛	エンジン性能開発部
2018.12.5	早稲田大学 創造理工学部総合機械工学科 熱エネルギー・反応工学	第6章：企業におけるエンジン開発	養祖 隆	パワートレイン技術開発部
2018.12.6-7	(株)インプレス 第6回 自動車機能安全カンファレンス	システムズエンジニアリングとアシユアランスケースを用いた安全論証の取り組み	休坂 慎也	情報制御モデル開発部
2018.12.8	日本人間工学会 第51回 日本人間工学会中国・四国支部大会	末梢血管剛性を用いた自動車環境下での不安感可視化研究	佐藤 大地 米澤 泰延 高山 雅年 原 利宏 西川 一男 農沢 隆秀 道田 奈々江 辻 敏夫	技術研究所 同上 同上 同上 同上 同上 広島大学 同上
2018.12.11	ひろしま自動車産学官連携推進会議 呉工業高等専門学校機械工学分野特別講義	SKYACTIVにおけるクルマづくり・モノ造りと自動車の未来	小笠原 徹	パワートレイン開発本部
2018.12.11	第2回 材料MBR勉強会	車両NVHのMBDと部品への要求特性	鈴鹿 浩昭	NVH性能開発部
2018.12.11-13	日本流体力学会 第32回 数値流体力学シンポジウム	物体から放出される非定常渦構造と空力特性の関係に関する数値解析的研究	小川 圭 木原 尚 安倍 賢一 李 曄 岡本 哲	九州大学 同上 同上 車両実研部 同上
2018.12.14	平成30年度鑄造カレッジ中国四国地区 鑄鉄コース	鑄鉄鑄造概論（キュポラ溶解理論と実際）	田中 裕一	パワートレイン技術部
2018.12.14-15	日本機械学会 第31回 バイオエンジニアリング講演会	CT画像より構築した3D脊椎モデルの座位姿勢へのマッチング	林 尊史 大木 順司 陳 献 森 浩二 蔣 飛 西田 周泰 櫻本 逸男 泉山 朋大	山口大学 同上 同上 同上 同上 同上 徳山工業高等専門学校 衝突性能開発部
2018.12.15	計測自動制御学会 第19回 計測自動制御学会システムインテグレーション部門講演会 (SI 2018)	車線変更が必須である交通環境下における他車の割り込み場所の推定	杉本 瑞生 禹ハンウル 田村 雄介 山下 淳 浅間 一 山崎 慎也 黒田 康秀 菅野 崇 山本 康典	東京大学 同上 同上 同上 同上 技術研究所 同上 同上 同上

日程	主催・大会名	題目	発表者	所属
2018.12.17-18	日本液体微粒化学会, 日本エネルギー学会 第27回 微粒化シンポジウム	壁面に衝突するガソリン高圧噴霧の蒸発特性に及ぼす雰囲気条件の影響	原 亮介 張 武 藤川 竜也 山川 正尚 渡部 智弘 市川由記彦 西田 恵哉 尾形 陽一	パワートレイン技術開発部 同上 同上 同上 広島大学 同上 同上 同上
		開弁過程におけるノズル内キャビテーション流れの時間応答特性	奥中 勇太 笠原 巧 山本 将貴 宋 明良 和田 好隆 植木 義治 横畑 英明	神戸大学 同上 同上 同上 MBD革新部 同上 同上
		ノズル内キャビテーション流れの局所液相速度と体積率のX線計測	西原安優実 小谷 和也 Rubby Prasetya 三輪 誠 宋 明良 文 石洙 和田 好隆 植木 義治 横畑 英明	神戸大学 同上 同上 同上 同上 INHA大学 MBD革新部 同上 同上
2018.12.21	日本機械学会 エンジンシステム部門 第6回 高効率エンジン燃焼技術の高度化研究会	ガソリン高圧噴射を用いた高圧縮比エンジンの燃焼技術	養祖 隆	パワートレイン技術開発部
2018.12.21	(株)イード 【レスポンスセミナー】マツダの一本道～新世代商品の幕開け～	「走る歓び」を提供し続けるマツダの自動運転の考え方	吉岡 透	統合制御システム開発本部
2018.12.25	広島県音・振動技術研究会 平成30年度第3回研究会	穴隙ゼロ化による防音機能強化の事例紹介	石川 智大	NVH性能開発部

3. 社外寄稿

*所属は原則発表時点を示す

寄稿誌名	巻・号・ページ	題目	発表者	所属
自動車技術	vol.72, No.7(2018), pp.12-13	エンジンとシャシーの協調によるG-Vectoring制御車両の開発	梅津 大輔 高原 康典 砂原 修 高橋 絢也 山門 誠	操安性能開発部 統合制御システム開発本部 同上 (株)日立製作所 神奈川工科大学
	Vol.72, No.8(2018), pp.119-122	動力伝達装置	吉本 直晃	ドライブトレイン開発部
	Vol.72, No.8(2018), pp.146-151	材料	坂手 宣夫	技術研究所
	Vol.72, No.10(2018), pp.59-64	荷重伝達Ustar (U*) 計算を用いた車体構造の適正化	本田 正徳	技術研究所
	Vol.72, No.11(2018), pp.51-55	アルミと炭素繊維強化プラスチック(CFRP)の高速接合技術	西口 勝也 田中耕二郎 森田 泰博 杉本 幸弘	技術研究所 同上 同上 同上
	Vol.72, No.11(2018), pp.87-92	異なる混合条件における複数材料トポロジー最適化	海氣 絵里 木崎 勇 和田 有司 弓削 康平	衝突性能開発部 同上 成蹊大学 同上
自動車技術会論文集	Vol.49, No.1(2018), pp.447-452	車体後端形状が風向の時間変化に伴う過渡空力特性に与える影響	中島 卓司 濱村 航明 清水 圭吾 平岡 武宜 農沢 隆秀	広島大学 同上 同上 技術研究所 同上
	Vol.49, No.3(2018), pp.599-604	自動車内装意匠設計における投影型複合現実感技術を用いた視覚変形と表面質感変調に関する研究	竹澤 拓郎 岩井 大輔 佐藤 宏介 原 利宏 村瀬 健二	大阪大学 同上 同上 技術研究所 同上
	Vol.49, No.4(2018), pp.745-750	ガソリン高圧噴射を用いた高圧縮比エンジンの燃焼技術(第1報)ー高圧噴射による可能性検討ー	神長 隆史 藤川 竜也 原 亮介 養祖 隆 山川 正尚	パワートレイン技術開発部 同上 同上 同上 同上
	Vol.49, No.4(2018), pp.751-757	ガソリン高圧噴射を用いた高圧縮比エンジンの燃焼技術(第2報)ー単気筒エンジンによるコンセプト検証ー	神長 隆史 長津 和弘 養祖 隆 藤川 竜也 長野 高皓 山川 正尚	パワートレイン技術開発部 同上 同上 同上 同上 同上
	Vol.49, No.5(2018), pp.932-937	高応答遮熱壁面の急速圧縮膨張場における壁面熱伝達抑制効果	原田 雄司 田中 達也 山下 洋幸 山本 寿英	技術研究所 同上 同上 同上
	Vol.49, No.5(2018), pp.968-973	ガソリン高圧噴射を用いた高圧縮比エンジンの燃焼技術(第3報)ー混合気制御による熱効率改善の検討ー	神長 隆史 養祖 隆 長野 高皓 藤川 竜也 山川 正尚	パワートレイン技術開発部 同上 同上 同上 同上
	Vol.49, No.6(2018), pp.1156-1161	ガソリン高圧噴射を用いた高圧縮比エンジンの燃焼技術(第4報)ー部分負荷運転時の燃費性能の検討ー	神長 隆史 養祖 隆 長津 和弘 藤川 竜也 長野 高皓 山川 正尚	パワートレイン技術開発部 同上 同上 同上 同上 同上

寄稿誌名	巻・号・ページ	題目	発表者	所属
自動車技術会関西支部ニュース	70周年記念号 第52号(2018), pp.4-5 第53号(2018), pp.3-4	内燃機関の技術革新SKYACTIV-Gの開発 MBDと品質工学の連携による設計諸元と工程の最適化	後藤 剛 徳光 文広	パワートレイン開発本部 統合制御システム開発本部
日本機械学会論文集	Vol.84, No.858, 2018, p. 17-00325 Vol.84, No.858, 2018, p. 17-00458	離散化モデルを用いたHCCIエンジンの制御シミュレーション 高応答遮熱壁面が急速圧縮膨張場の壁面熱伝達に及ぼす影響	林 卓哉 山崎 由大 金子 成彦 疋田 孝幸 水野 沙織 藤井 拓磨 原田 雄司 田中 達也 中尾 裕典 服平 次男 青木 理 山下 洋幸	東京大学大学院 同上 同上 パワートレイン技術開発部 同上 技術研究所 同上 同上 同上 同上 同上
日本機械学会、自動車技術会 第29回内燃機関シンポジウム予稿集	No.19	インジェクタ内における液体の気化を考慮した噴霧モデルの開発	永澤 健 朱 前進 田中 達也 清末 涼 藤本 英史	技術研究所 同上 同上 同上 同上
日本機械学会 計算力学部門 ニュースレター	No.60 (2018), pp.12-13	車両CANネットワークの再構築による前後・横運動の協調制御	梅津 大輔	操安性能開発部
日本燃焼学会誌	Vol.60, No.191(2018), pp.10-17	マツダ SKYACTIV エンジンの環境技術	寺沢 保幸 山川 正尚	パワートレイン技術開発部
触媒学会 会誌「触媒」(60周年記念号)	vol.60, No.4, p.196	高酸素イオン伝導性ZrNd系酸化物を用いたパティキュレート燃焼触媒の開発と実用化	原田浩一郎 山田 啓司 高見 明秀 石原 達己	技術研究所 同上 同上 九州大学
日本音響学会 2018年春季研究発表会 講演論文集	pp. 405-408	自動車の静粛性評価に向けた聴覚的注意のモデル化	中谷 裕紀 渡邊 雅之 萬 菜穂子	技術研究所 同上 同上
日本化学会 第98春季大会(2018)講演予稿集	1C3-28	自動車排ガス浄化用触媒におけるRhナノ粒子上でのCO-NO反応メカニズム解明	松村 益寛 国府田由紀 山田 啓司 重津 雅彦 久保田 寛 石元 孝佳 甲斐 裕之	技術研究所 同上 同上 同上 同上 広島大学大学院 同上
プラスチック成形加工学会 30周年記念特別交流会/創立30周年記念冊子	2008年度～2017年度, p.105	超薄肉軽量バンパーの開発	朝野 千明	技術研究所

寄稿誌名	巻・号・ページ	題目	発表者	所属
日本認知科学会 認知科学	25巻4号, pp.411-420	インストルメントパネルのデザインが車載機器の視認性・操作性に及ぼす影響	藤原 由貴 吉田 誠 貝野 彰 星野 陽子 岩下 洋平 山本 康典 入戸野 宏	技術研究所 同上 同上 同上 同上 同上 大阪大学
日本表面科学会 e-journal of Surface Science and Nanotechnology	2018 vol.16 36	Characterization by Synchrotron-Radiation X-Ray Photoelectron Spectroscopy of NO Adsorption on Rh	國府田由紀 住田 弘祐 小川 智史 塚田 千恵 生天目博文	技術研究所 同上 名古屋大学 同上 広島大学
2018年腐食防食学会中国・四国支部「材料と環境研究発表会」講演集	pp.19-20	電着塗装鋼板のふくれ劣化評価法に関する研究	岡内 大樹 礪本 良則 浅田 照朗 重永 勉	広島大学 同上 技術研究所 同上
	pp. 21-23	塗装部の腐食メカニズム解明～塗面付着物の影響～	浅田 照朗 中本 克典 重永 勉	技術研究所 同上 同上
	pp.24-25	接着継手における樹枝状欠陥が継手耐食性に与える影響	麻川 元康 山本 研一	技術研究所 同上
溶接学会 溶接学会誌	Vol.87, No1, pp.66-70	自動車のマルチマテリアル化と異種接合技術	杉本 幸弘	技術研究所
軽金属学会誌「軽金属」	Vol.68, No.7, July 2018	マツダの紹介記事	杉本 幸弘	技術研究所
日本バーチャルリアリティ学会論文誌	Vol.23, No.3(2018), pp.207-216	自動車運転時の周辺対象認知における頭部と眼球運動	村瀬 健二 武田 雄策 原 利宏 金子 寛彦	技術研究所 同上 同上 東京工業大学
電子情報通信学会 IEICE TRANSACTIONS on Electronics	Vol.E101-C, No.8, pp.640-643	Efficient PML Implementation in Three-Dimensional FDTD Simulation for Vehicle-to-Vehicle Communications in Urban Areas	奥木 友和 山田 秀行 大久保 寛	技術研究所 同上 首都大学東京
型技術	2018年1月号	自動車内外装意匠部品用バイオエンジニアリングプラスチックの開発	古川 智司 一原 洋平	車両技術部 装備開発部
	2018 Vol.33, No.13, pp.070-071	プレス金型設計におけるCAE技術の活用	山口 大輔 吉崎 真吾 丸山 秀幸	車体技術部 同上 同上
第32回型技術者会議2018講演論文集	pp.106-107	5軸工作機を活用した加工工程集約の取り組み	河妻 正成 中原 寛海 村上 武司 楠本 寛容	ソーリング製作部 同上 同上 同上
第24回型技術ワークショップ2018 in ふくい講演論文集	pp.72-73	品質工学を用いたヘミング成形技術の向上	長澄 徹侍 安楽 健次 中山 光一	ソーリング製作部 同上 同上

寄稿誌名	巻・号・ページ	題目	発表者	所属
(株)技術情報協会 発泡樹脂、多孔性樹脂の高強度化と応用技術 第5章5節		自動車車体フレームへの強度発泡充填材の適用	奥山 智仁	技術研究所
日本アルミニウム協会 アルミニウム Vol25, No101, pp.19-24		自動車のマルチマテリアル化とアルミニウムの適用	杉本 幸弘	技術研究所
微粒化 Vol.27, No.92(2018), pp.11-17		高温高圧雰囲気下におけるガソリン噴霧の壁面衝突挙動と液膜形成	内富真太郎 駱 洪亮 西田 恵哉 尾形 陽一 張 武 藤川 竜也 原 亮介	広島大学 同上 同上 同上 パワートレイン技術開発部 同上 同上
一橋ビジネスレビュー 2018年AUT. 66巻2号, pp.108-123		自動車の顧客価値	延岡健太郎 松岡 完	一橋大学 教授 商品ビジネス戦略企画部
広島大学ホームページ https://www.hiroshima-u.ac.jp/news/44080		【研究紹介】基礎研究から社会実装まで一貫通貫するモノづくり革新の実現	甲斐 裕之	技術研究所 (広島大学出向中)
IVI業務シナリオ集2018		AIによる生産ラインの生産性向上/自動化進展と品質改善	市本 秀則	生産企画部
American Chemical Society The Journal of Physical Chemistry C J. Phys. Chem. C, 121, 22720-22726 (2017).		Long-Range Ion-Ordering in Salt-Concentrated Lithium-Ion Battery Electrolytes: A Combined High-Energy X-Ray Total Scattering and Molecular Dynamics Simulation Study	Kenta Fujii Michiru Sogawa Masayuki Morita Masaru Matsugami Kazuhide Ueno Koji Ohara Takashi Utsunomiya	山口大学大学院 同上 同上 熊本高等専門学校 横浜国立大学 JASRI 技術研究所
Association for Computing Machinery (ACM) Proc. of Poster at 2018 Genetic and Evolutionary Computation Conference (GECCO 2018), 2018. (accepted)		Proposal of a Large-Scale Real-World Benchmark Problem using Response Surface Method	小平 剛央 釘持 寛正 大山 聖 立川 智章	技術研究所 同上 宇宙航空研究開発機構 東京理科大学
Elsevier FUEL Vol.232,15 November 2018,p308-316		Near-nozzle spray dynamics of 6-hole GDI Injector under subcooled and superheated conditions	Jeeyeon Jeon Seoksu Moon 佐藤 圭峰 永澤 健	産業技術総合研究所 INHA大学 技術研究所 同上
Elsevier International Journal of Mechanical Vols. 146-147, pp.571-582		Elasto-Viscoplastic Behavior of 980 MPa Nano-Precipitation Strengthened Steel Sheet at Elevated Temperatures and Springback in Warm Bending	斉藤 直子 深堀 貢 養手 徹 船川 義正 久野 大輔 濱崎 洋 吉田 総仁	技術研究所 同上 JFEスチール(株) 同上 広島大学 同上 同上

寄稿誌名	巻・号・ページ	題目	発表者	所属
Fuel	Vol.219(2018), pp.467-476	Microscopic behavior of spray droplets under flat-wall impinging condition	駱 洪亮 西田 恵哉 内富真太郎 尾形 陽一 張 武 藤川 竜也	広島大学 同上 同上 同上 パワートレイン技術開発部 同上
	Vol.234(2018), pp.56-65	Effect of temperature on fuel adhesion under spray-wall impingement condition	駱 洪亮 西田 恵哉 内富真太郎 尾形 陽一 張 武 藤川 竜也	広島大学 同上 同上 同上 パワートレイン技術開発部 同上
IEEE Transaction on Haptics DOI : 10.1109/TOH.2018.2828425		Prediction of Perceived Steering Wheel Operation Force by Muscle Activity	岸下 優介 竹村 和紘 山田 直樹 原 利宏 岸 篤秀 西川 一男 農沢 隆秀 辻 敏夫 栗田 雄一	広島大学 技術研究所 同上 同上 同上 同上 同上 広島大学 同上
International Journal of Engine Research Special Issue, May 2018, pp.1-13		Effect of spray impingement distance on piston top fuel adhesion in direct injection gasoline engines	駱 洪亮 西田 恵哉 内富真太郎 尾形 陽一 張 武 藤川 竜也	広島大学 同上 同上 同上 パワートレイン技術開発部 同上
International Journal of Quantum Vol.118, issue2, No.e25452 (2018)		Combined plane wave and localized orbital electronic structure calculation: adsorption energy of hydrogen on Pd(111)	石元 孝佳 甲斐 裕之	広島大学 技術研究所
Journal of Automobile Engineering		Experimental Study on Flat-Wall Impinging Spray Flame and Its Heat Flux on Wall under Diesel Engine-Like Condition. 1st Report: Effect of Impingement Distance.	Rizal MAHMUD 栗栖 徹 西田 恵哉 尾形 陽一 神崎 淳 田所 正	広島大学大学院 同上 同上 同上 エンジン性能開発部 同上
the Design Research Society Design Studies (Elsevier) Volume 62, May 2019, pp.100-128		Global structures of automotive interiors revealed by algorithms of visual brain	渡邊 雅之 道田奈々江 岸篤 秀 西川 一男 郷田 直一 小松 英彦 農沢 隆秀	技術研究所 同上 同上 同上 生理学研究所 同上 広島大学

編 集 委 員 会

委員長	神八 俊夫	商品戦略本部 技術企画部
編集委員	温品 一雄	商品戦略本部 技術企画部
	田坂 寿康	商品戦略本部 技術企画部
	望月 英生	商品戦略本部 技術企画部
	磯部 太郎	商品本部
	森野 敏峰	デザイン本部 デザイン開発推進部
	中本 尊元	車両開発本部 車両実研部
	安原 完治	車両開発本部 装備開発部
	吉川 尚好	商品戦略本部
	拜崎 幸雄	パワートレイン開発本部 P T制御システム開発部
	横田 和也	技術研究所
	杉山 裕基	技術本部 生産企画部
	安田 孝志	技術本部 生産企画部
	柿沢 修成	広報本部 グローバル広報企画部
編集幹事	大森 正志	商品戦略本部 技術企画部

マツダ技報 第36号

発行 2019年11月
発行人 廣瀬 一郎
編集人 神八 俊夫
事務局 大森 正志
発行所 マツダ株式会社
商品戦略本部 技術企画部
〒730-8670
広島県安芸郡府中町新地3番1号
電話 082(565)2198

Mazda Technical Review No.36

November 2019
Publisher Ichiro Hirose
Editor Toshio Kamihachi
Bureau Masashi Ohmori
Publishing office Technology Planning Dept.
Product Strategy Div.
Mazda Motor Corporation
3-1 Shinchi, Fuchu-cho Akigun,
Hiroshima 730-8670, Japan

©2019 マツダ株式会社 (禁無断転載)

ISSN 2186-3490