

JR東日本の通勤電車の開発経緯



JR東日本研究開発センター 先端鉄道システム開発センター 野元 浩

JR東日本では、1994年に209系の量産を開始して以降、この車両を基本とする通勤・近郊形電車をすでに3,000両以上投入しています。これは、世界にも例を見ない高密度な首都圏の通勤輸送について、混雑緩和をはじめとするサービス向上と、コスト低減を進めるために行ってきた施策です。これらの車両は、国鉄時代とは大きく変わった考え方に基づいて開発されています。ここでは、開発の基本となった考え方と、システムや機器ごとに進められた開発の具体的な内容をご紹介します。

1 通勤電車開発の考え方

JR東日本は首都圏の通勤・通学輸送用に約8,000両の電車を保有しています。これらの車両は、毎年輸送力増強のために増備を続けてきたものですが、JR発足以降はこれらの車両の老朽取替えと、更なる輸送力増強のための増備が必要となりました。鉄道車両の寿命はメンテナンスの状況にもよりますが、概ね20年から30年で、8,000両の車両数に対しては、毎年300～400両の車両を投入しないと寿命を超えて使う車両がでてくることとなります。

会社として将来にわたって健全経営を維持するためには、毎年大量に製造する必要のある通勤形車両に対して、サービス向上、投資の抑制、メンテナンスや運行のための経費低減などの課題が求められます。

JR東日本では、1991年からこれらの課題をクリアするための新たな通勤電車の開発を始めました。このときのコンセプトが「コスト半分」「重量半分」「寿命半分」というものです。「コスト半分」は初期投資額の抑制です。「重量半分」は走行エネルギー低減のほか、地上設備の保

守量低減によるランニングコストの抑制です。「寿命半分」は生活水準の向上に合わせてサービスレベルを向上させること、最新技術をタイムリーに導入できるようにするほか、廃車までの時間を短くしてこの間のメンテナンスコストを大幅に削減するねらいもありました。この方針に沿って1992年にJR東日本として初めての新形式通勤形電車901系（後に209系に改造）を完成させました。

1994年からは901系の量産仕様となる209系の製造を開始し、すでに10年が経過しました。この間、車種の追加や改良を加え、最新形式はE231系となっており、車両数も3,000両を超えて、今年度も増備を続けています。

最新のE231系は209系からの使用実績の反映や最新技術の導入などを行い、システムとして完成度が高くなっています。しかし、将来の通勤形電車を考えると、さらなるコストダウンや機能向上などのために、新たなブレークスルーが必要となります。この課題に取り組んだのがE993系「AC Train」で、別項で紹介しているようなシステムチェンジをはじめとする開発を進めています。

表1：通勤・近郊形電車の導入技術一覧

(凡例 ○:全車導入、△:一部車両で導入 -:導入なし)

項目	車両形式	901系 (209-900)	209系	E217系	E501系	209系 500番代	E231系 通勤仕様	E231系 近郊仕様	E231系 500番代
落成時期		1992.3	1993.2	1994.8	1995.3	1998.11	2000.2	2000.3	2002.1
主な走行線区		京浜東北線	京浜東北線 南武線	横須賀線 総武・成田線	常磐快速線	中央総武 緩行線	中央総武 緩行線	宇都宮線 湘南新宿L	山手線
主な特徴		革新技術の 比較評価	大幅な軽量化 消費電力低減	衝撃吸収 構造の採用	交直流車 ベクトル制御	通勤車初の 拡幅車体	TIMSの採用 自動出区点検	通勤・近郊 性能共通化	VIS(情報案内 装置)搭載
2シート鋼体		△	△	△	△	△	△	△	△
拡幅車体		-	-	○	-	○	○	○	○
衝撃吸収構造		-	-	○先頭車	-	-	-	○先頭車	-
交流電動機		○	○	○	○	○	○高速形	○高速形	○高速形
インバータ	(GTO素子)	○	○	○	○	○	-	-	-
	(IGBT素子)	-	-	-	-	-	○	○	○
ベクトル制御		-	-	-	○	-	○	○	○
制御伝送装置		○	○	○	○	○	-	-	-
TIMS		-	-	-	-	-	○	○	○
軽量ボス外ス台車		○	○	○	○	○	○	○	○
ブレーキ遅れ 込め制御	(ユニット単位)	○	○	○	○	○	-	-	-
	(編成単位)	-	-	-	-	-	○	○	○

2 JR東日本が開発した通勤・近郊形電車の概要

最初に、当社の開発した通勤・近郊形車両の全体像を把握していただくために、各形式の特徴を紹介します。

2.1 209 (901) 系 (図1)

JR東日本が開発した最初の通勤形車両で、車体、台車、主回路機器、制御装置、ブレーキ、内装、デザインの全てにわたって新たな発想から開発を進めました。

量産先行車の901系3編成は主回路装置、車体構造、内装、冷房装置、空気圧縮機、主幹制御器などを異なる仕様として、量産車で採用すべき技術等を見極めました。

量産形式の209系では、これまでの主力の103系に対し、重量で70%、消費電力では47%にまで低減し、以降のJR東日本の通勤・近郊形電車の基本となりました。1998年からは車体幅を広げて混雑緩和を図った仕様(500番代)としています。



図1：209系

2.2 E217系 (図2)

209系を基本に製作した近郊形電車で、主回路機器や制御装置は209系と共通で、駆動装置の歯数比を変更して最高運転速度を120km/hに向上しています。また従来の近郊形車両同様に車体幅は2950mmとし、一部の車両は4扉ながらセミクロスシート配置としました。先頭部は長大トンネルを走行するために、非常時に貫通可能な構造と



図2：E217系

しました。また踏切事故の詳細な分析と解析に基づき、本格的な衝撃吸収構造を採用しています。1997年には通勤・近郊形車両で初めて車椅子対応のトイレを設けました。

2.3 E501系 (図3)

1995年に常磐線用として209系の車体を基本に開発した交直流用の車両で、主回路装置はドイツ製のものを使用しています。これは、駆動力をよりきめこまかく制御することのできる「ベクトル制御」方式を採用するため、当時、国内の電気メーカーではこの制御方式を本格的に導入しているところは無かったことから、海外製品を採用しました。現在では「ベクトル制御」は一般的になり、E231系でも採用しています。また、501系では従来手動で行っていた交直セクションの切替作業をATS-P装置のトランスポンダ機能を活用して自動化しています。この車両は4扉ロングシートの通勤仕様なので、常磐線快速の上野～土浦間で運行しています。



図3：E501系

2.4 E231系 (図4)

通勤形電車の機能向上を図るため、制御装置のインテリジェント化を図り、主電動機の最高回転数を向上させ、歯数比は通勤仕様のままで最高運転速度を120km/hに引き上げた209系950番台を開発しました。この車両の量産タイプがE231系で、初めて通勤形と近郊形の形式上の区別を廃止しました。ただし、走行線区により、一部をセミクロスシート配置とし、トイレを設け、先頭部は衝撃吸収構造とした近郊仕様もあり、番代で区別しています。E231系の最大の特徴は「TIMS」と呼ぶ車両情報管理装置の搭載です。編成各車への指令のほとんどをデジタル伝送として配線を削減、出区点検の自動化なども実現しています。



図4：E231系

3 車体の革新

ここからは、JR東日本の通勤形電車で採用した様々な技術を、その要素別に紹介します。最初は車体構造です。車体は主に軽量化と製造コスト低減、メンテナンスフリーの観点から改良が続けられています。コンピュータによる強度解析技術の進展により、応力の分布に対応した材料の選択も可能となりました。衝撃吸収構造の開発でも、動的な衝突解析技術を活用しています。

3.1 工業化を考慮した車体構造

通勤形電車の車体材料は、従来（国鉄時代）安価な普通鋼を標準に用いてきましたが、国鉄時代の末期には初期コストは増えますが腐食の心配のない軽量ステンレス構造の検討を進め、1986年に登場した205系からはステンレス鋼を標準に用いることとなりました。

JR発足以降もステンレス鋼を引き続き採用することとし、「重量半分」のコンセプトの下で更なる軽量化を進めました。表2に通勤形電車の重量比較を示します。

表2：通勤形電車の重量比較 単位：t

項目	形式	103系 (鋼製)	205系 (ステン製)	209系 (ステン製)
構体重量		9.5	6.5	5.4
空車重量	M車 ¹⁾	39.7	32.6	27.7
	T車 ²⁾	28.8	23.6	22.2
編成重量(10両)		359 (6M4T)	299 (6M4T)	241 (4M6T)

1)電動車 2)付随車

また、新たな考え方として、車体の基本寸法を統一した上で、各メーカーの製造設備に適した車体構造の採用を認めました。国鉄時代は各車両メーカーが設計を分担し、全てのメーカーで全く同じ車体を製作してきましたが、901系では各メーカーが独自の構造を採用することを可能としたのです。これにより、製造コストはさらに低減できるようになりました。

901系で採用した車体構造のうちの一つに、大量生産のための工業化を前提とした「2シート構造」があります。従来の車体構造は、骨組みの上に外板を貼る構造でしたが、この方法では骨組みの製作に手間を要します。このため、自動車の車体のようにプレス加工した板と外板との組み合わせで強度を確保する工法を開発しました。この構造は車体の側部に採用しています。(図5)

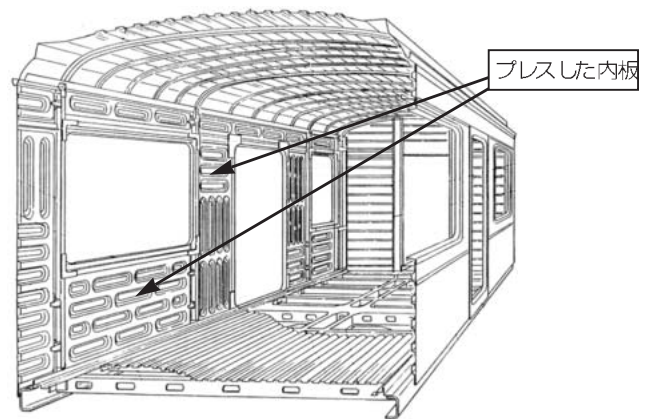


図5：2シート構造の構体

ただし、この工法には大型のプレス機械が必要で、直ちに全てのメーカーで採用できる工法ではありません。

3.2 衝撃吸収構造の開発

1992年に発生した成田線での踏切事故は、過積載のダンプカーとの衝突で、運転席部分がつぶれて、乗務員が命を落とす結果となりました。これを契機として、車両の衝突対策の検討を開始しました。目標は、同様の踏切事故において、お客様への衝撃を緩和するとともに、乗務員のためのサバイバルゾーン（生存のための空間）を確保することです。

まず、衝突した車両（113系）の変形状況を詳細に計測しました。次に、衝突解析プログラムを用いてコンピュータ上で衝突の再現をし、実際の変形状況に近い衝突条件を求めました。

この結果を基に、衝突解析プログラム上で検討中の先頭構体モデルを同じ条件で衝突させ（図6）、変形量や衝撃加速度を求めて骨組構造や衝撃吸収材の配置、サバイバルゾーン部分の強度などを決定しました。こうしてE217系の先頭部の構造を決定し、E231系の近郊仕様でも同じ構造を踏襲しています。

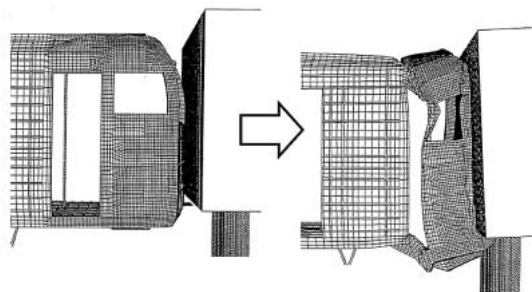


図6：衝突解析の状況

4 主回路の革新

鉄道車両では、走行用の電動機を駆動するための高圧回路を「主回路」と呼んでおり、走行用のモータを「主電動機」と呼んでいます。この主電動機としては、電車の登場以来「直流電動機」が用いられてきましたが、メンテナンスに手間がかかるなどの欠点もあります。昨今のパワーエレクトロニクス的发展とともに、軽量でメンテナンスフリーの交流電動機の採用が可能となり、主回路の構成も大きく変革を遂げています。

4.1 誘導電動機の採用

直流電動機は、起動時に大きなトルクを発生し、しかも速度の制御範囲が広いという鉄道車両に適した特性を持っており、長年、主電動機に使われてきました。しかし、直流電動機には回転する部分（電機子）に電流を流すための整流子とブラシを有しており、ブラシ（カーボン製）の減りと取替、カーボンによる内部の汚れや、これに起因する故障などの問題が避けられません。また、整流子部分は回転力を発生しないので、同じ出力に対してモータの外形が大きくなること、整流子は細い銅板の組み合わせで機械的な弱点となるなど、構造上の問題も抱えていました。

これに対し、交流電動機の一つである誘導電動機は、回転部分への電力供給が不要なこと、回転部分の構造が簡単で、高速回転まで耐えること、回転部分全体が回転力の発生に寄与するために小型化が可能なことなどのメリットがあります。しかし、この誘導電動機を主電動機として使うためには、電動機に加える交流の周波数や電圧を広い範囲で連続して変化させる必要があります。かつて、交流の周波数を変化させるのは難しいことだったのですが、この問題を解決したのが、大電力を半導体で制御するパワーエレクトロニクスの発展です。

4.2 半導体素子の改良

このパワーエレクトロニクスを最初に活用したのは、直流電動機の制御に用いたチョップ制御で、このときに採用したのが「サイリスタ素子」です。この素子は、電流を流すのはゲート信号でできるものの、一度流れ始めた電流を止めるためには素子と並列に設けた「転流回路」を別途設けることが必要でした。

路面電車などの小型の電動機制御であれば、チョップ装置と同様のサイリスタでも交流の周波数を変化させることは可能でしたが、本線用の電車のように大きなトルクを必要とし、しかも広い範囲の速度制御を行うためには、より高速なスイッチング（電流の入り切り）が可能で、しかも転流回路の不要な半導体素子が必要でした。1980年代後半からゲート信号で電流を止めることのできるGTO（ゲートターンオフ）サイリスタ素子が開発され、次第に大きな電流、高い電圧にも耐えるものが開発されました。しかし、まだ1個の素子が高価で、多くの両数を生産する通勤電車に採用するためには制御装置の価格低減が課題でした。



図7：GTO素子（外形・内部のゲート電極）

4.3 インバータ装置の構成検討

901系の開発に先立って、電車に交流電動機を採用するための主回路の開発が進められてきました。交流電動機を制御するVVVFインバータ（可変電圧、可変周波数で、直流から交流に変換する装置）の素子や回路方式などを工夫して、いかにインバータのコストを低減するかが課題でした。この結果、901系では次の3種類の主回路を編成ごとに変えて特性を比較することになりました。（図8）

- ①大容量のトランジスタを使って1台ずつの電動機用に制御回路を構成し、この回路を直列に4組接続する方式
- ②小型のGTOを用いて電動機1台ずつ制御する回路を並列接続する方式
- ③低電圧で電流容量の大きいGTOモジュールで2段階に電圧を変化させるとともに、主電動機4台を一括して制御する方式

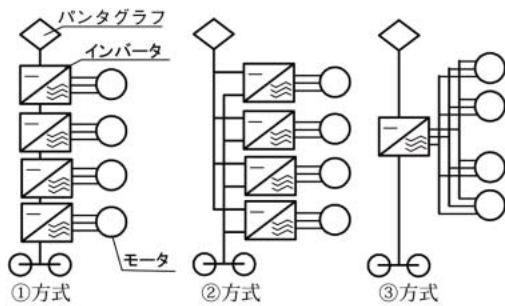


図8：901系3種類の回路構成

性能試験の結果、もっとも安定して動作し、しかも主回路全体の構成が簡素化できる③の方式を選択し、以降の当社の通勤・近郊形電車の基本としました。

4.4 インバータ用素子の変遷

901系の開発当時、VVVFインバータの制御素子としてはGTOが主流でした。GTOはゲート信号で電流を阻止するため、ゲート電極は素子の上部に樹枝状に張り巡らされています。このため、素子の製作に手間がかかることからコストダウンにも限界がありました。

このGTOに変わって最近の主流となっているのがIGBT (Insulated Gate Bipolar Transistor) という素子です (図9)。これは電界効果形トランジスタの一種で、ゲート信号の強弱で電流の制御ができるため、GTOよりもさらに早いスイッチングが可能となりました。これによりVVVFインバータ装置の出力電流はより滑らかなものとなり、また、スイッチング (電流の入り切り) にともなう発生する音の周波数を高くして人間の耳に聞こえにくくすることも可能となりました。このIGBTを使ったインバータはE231系から使用しています。



図9：IGBT素子 (外形)

大きな進歩を遂げ、様々な機能も追加されています。また、指令線の統合により、車両の配線も大幅に減少しています。

5.1 制御指令をデジタルで伝送

従来、車両を加速したり、ブレーキをかけたり、冷房や暖房の入り切り、ドアの開け閉め、機器の状態を表示するランプなどの回路は全て独立した回路構成で、編成内は全て別々の電線を先頭から最後部まで引き通して指令や情報のやり取りを行っていました。このため、車両の機能が向上するにつれて車両間を引き通す電線の数も増え続けていました。

JR発足後最初の新形式として開発した651系 (スーパーひたち) では、機器の状態表示や、冷暖房などのサービス関係の指令をデジタル信号によるシリアル伝送で行う「モニタ装置」を搭載しました。しかし、走行に直接関係する力行・ブレーキ指令や保安上重要なドアの開閉指令は従来どおり1つの指令に対して1本の引き通し線を対応させていました。

901系の開発に際しては、この力行・ブレーキなどの重要な車両制御指令もシリアル伝送を行い、車両間の引き通し線を削減するとともに、機器のモニタ機能をさらに充実したもの (MON8形) としました。信頼性確保のために、制御指令用の伝送線を2組用意し、指令を受ける側では、この2組の指令を比較して合致していることを確認して指令として受け取っています。(図10)

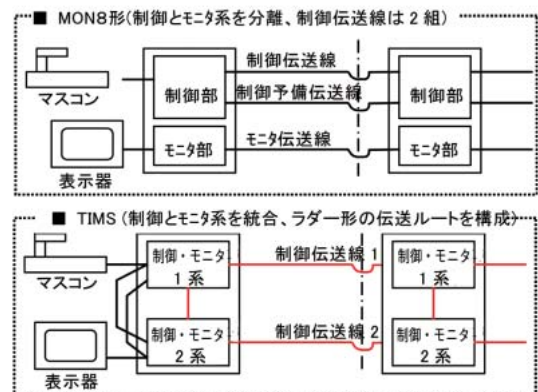


図10：MON8とTIMSの伝送構成比較

5 制御装置の革新

車両のインテリジェント化も昨今の主流ですが、車両の制御システムのインテリジェント化は、お客様への情報提供システムよりも早くから始まりました。国鉄末期に完成した多重伝送による各機器単位のモニタ機能は、マイコンの性能向上やデジタル伝送技術の発展とともに

5.2 TIMSの開発

コンピュータを核とする情報伝送装置の伝送速度や処理速度に関する能力向上は著しく、これを活用して車両内にコンピュータネットワークを構築したのが列車情報管理装置「TIMS」(Train Information Management

System)です。このシステムは1998年に209系950番代に搭載し、機能の確認と制御論理の改善を行った後、E231系で本格的に導入しています。TIMSでは、伝送速度を65倍(384kpbs→25Mbps)と高速化し、各車の伝送装置を独立した2組のノードで構成し、さらにこれらをラダー形の結合とすることで、信頼性の向上、伝送速度の向上、故障時の回避ルートの確保(どちらか1系統が断線しても他の系統で伝送可能)ができるようにしています。また、各車の端末装置からは複数の機器を数珠繋ぎにして指令を伝送することも可能となり、従来の1対1の対応からさらに配線の本数を削減することが可能となりました。

使い勝手の面から見たTIMSの最大の特徴は、車両の運行前の点検(出区点検)を自動化したことで、力行やブレーキの試験、ドアの開け閉めの状態、各車の放送の状態などを一連の点検プログラムで自動的に実行可能としました。また、ブレーキに関しては、209系やE217系では予め決められた電動車と付随車の組み合わせの中で回生ブレーキ力を優先し、不足分を付随車の空気ブレーキで行う方式を採用していますが、TIMSでは編成全体の管理にしました。これにより乗り心地の向上とともに、車両によるブレーキシューの減り具合の違いを無くしています。(詳細後述)

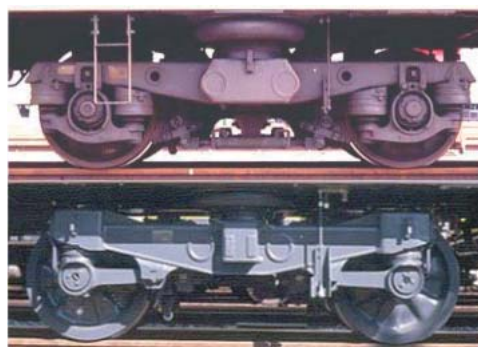
6 台車の構造簡素化

台車は電気回路などと異なり、フェールセーフ構造とすることが難しい機械部品であり、構造の変更は慎重に進めなければなりません。このため、電気回路などに比べると変革の現れにくい部位ですが、それでも改良が進んでいます。最近の最も大きな変革は1980年代の後半から台車枠で直接車体を支える方式の「ボルスタレス台車」の実用化です。台車は車体とレールの間様々な変位に対応するとともに、衝撃を吸収するために多くの可動部分があり、しかも駆動力を伝えたり重量を負担するための摺動部分があって、メンテナンス上のネックとなっていました。この摺動部を無くすることが台車の究極の課題で、ボルスタレス構造の採用もその一環です。国鉄時代の205系で初めてこのボルスタレス構造を採用しました。ボルスタレス構造は横剛性の低い空気ばねにより、カーブで生じる車体と台車の間の回転角に対応する構造ですが、工夫が必要なのは駆動力を伝達する中心ピン部分の構造です。205系では台車の横梁と中心ピンの間に4つの

ゴムブッシュと中間体を設け、中間体の下部を中心ピンに差し込む構造としました。この場合、中心ピン下部にまだ摺動部が残るため、209系のボルスタレス台車では、中心ピンと台車横梁をゴムブッシュ入りのリンクで結ぶ「1本リンク方式」を採用しました。

一方、205系の軸箱支持は、軸箱の左右にゴムばねを配置した構造ですが、ゴムばねの特性が経年劣化で変化すること、高さ調整に手間がかかることから、901系の開発に際して、軸箱支持には軸梁式を採用し、軸ばねに金属のコイルばねを用いて経年変化を抑えるとともに、摺動部の無い構造としています。軸梁式の採用は、台車の横梁の長さも短くでき、軽量化にも効果があります。

空気ばねの取付位置は、車側寄りほど車体がローリングしにくくなりますが、901系では、コストとロール剛性の検討を行った結果、台車の側梁の直上に空気ばねを配置することで台車の構造を簡素化しています。E217系では車体幅を拡大したために、空気ばねの取付位置を広げています。現在のE231系の台車はこのE217系の台車を基本とした構造としています。(図11)



205系の台車
軸箱を左右のゴムばねで支えている。

E231系の台車
軸梁式の軸箱支持
全長が短く、空気ばねの位置は車体内側となる。

図11：205系とE231系の台車比較

7 ブレーキの機能向上

かつて電動車に抵抗器を積んで発電ブレーキを作用させていた時代は、常に一定のブレーキ力が得られるため、電気ブレーキが作用した場合は電動車の空気ブレーキを締め切る制御としていました。その後、チョップ制御などで回生ブレーキが実用化されると、ブレーキ力が負荷状態により常に変動するため、回生ブレーキに空気ブレーキを補足することで必要なブレーキ力を確保するブレンディング制御が行われました。さらに誘導電動機の採用で大きな回生ブレーキ力が得られるとなると、ブレーキ補足の方式も大きく変わりました。

7.1 遅れ込め制御の採用

従来の直流電動機を用いた回生ブレーキ車両（201系や205系など）は、回生ブレーキのみでは電動車が必要とするブレーキ力を得るのが難しいことから、不足分を空気ブレーキで補足していました。一方、交流電動機を用いた901系以降の車両では、回生ブレーキの効率が改善され、電動車で必要とするブレーキ力よりも大きなブレーキ力が得られます。この回生ブレーキ力を有効に活用するため、付随車のブレーキを弱くする制御を採用しました。これを「遅れ込め制御」と言います。209系やE217系では、電動車とペアを組む付随車を予め決めておき、ブレーキ指令は電動車のブレーキ制御装置に送られます。ここで、荷重に応じた最大回生ブレーキ力を演算し、インバータに指令します。次に2両分の必要ブレーキ力から回生ブレーキ力（インバータより信号で返信される）を引き算し、不足分を付随車のブレーキ制御装置に指令するという制御を行っています。

パフォーマンスを大きく高めており、E231系をベースとする民鉄用の車両も数形式誕生していて、通勤形電車のデファクトスタンダードとなりつつあります。

今後も、研究開発部門と運行部門の緊密な連携により、さらに高機能な、人に優しく環境にもやさしい通勤形電車への改良を継続していくのが当社の使命と考えています。

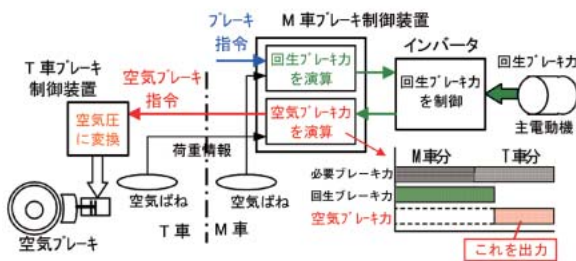


図12：遅れ込め制御概念図

7.2 編成単位制御への発展

TIMSの項でも紹介しましたが、E231系からは、ブレーキ力の編成管理を行うようになりました。各電動車は回生ブレーキにより得られているブレーキ力をTIMS側に送り、TIMSでブレーキ指令と荷重状態から編成全体に必要なブレーキ力を演算し、ここから回生ブレーキ分を差し引き、残りを各付随車に分配する制御を行っています。

8 まとめ

JR東日本としての考え方に基づく通勤形電車の開発からすでに10年が経過しました。この間、更なる改善方策を求めての議論を続けてまいりました。AC Trainの開発もその一環で、ここで得られた様々な成果は、量産を続けているE231系にも順次フィードバックされています。

一方、209系以降、改良を重ねてきたE231系は、コスト