

国鉄新幹線電车用連続換気装置の開発

Development of Ventilating Equipment for Shinkansen Train

200km/h程度の高速車両がトンネル内を走行するとき、トンネル内の気圧変動により乗客の耳に強い刺激を与える。東海道新幹線電車では、この現象を防止するため車体を気密構造にするとともに、換気口をトンネル中では密閉している。しかし、この方式では、トンネル区間が長くなると車内換気が不十分となるため、どうしても新しい連続換気方式の開発が必要とされ、研究が続けられてきた。

その結果、圧力変化に対して風量変化の小さい特性をもつ高圧ファンを採用することが連続換気方式として適していることが分かり、モータ直結駆動、低騒音及び小形軽量化を目的として、モータ直結形高圧シロッコファンによる連続換気装置の開発を行なった。結果は、現車試験の成績も良好で、耳ツン特性、換気、騒音などの点で十分な性能をもつことが確認され、国鉄新幹線電车用連続換気装置として採用されることになった。

岡 幸男* Yukio Oka
奥本剛直* Yoshinao Okumoto
田辺耕一** Kôichi Tanabe
吉崎政宣*** Masanobu Yoshizaki
松田紀元**** Toshiharu Matsuda
柏原順之介***** Junnosuke Kashiwabara

1 緒言

列車がトンネルを通過する際、トンネル内における車外圧力が変動することが分かっており、16両編成の東海道新幹線では、時速200km/hにおいてトンネル内ですれ違いがない場合は最大+160~-300mmAq、すれ違いがある場合は最大+350~-540mmAqに達すると理論計算されている¹⁾。この圧力変動が車内に波及すると乗客の耳に不快な強い刺激を与える(耳ツン現象)ため、東海道新幹線電車では車体を気密構造にするとともに、列車がトンネル内を通過中は換気装置の通風路を締切弁でしゃ断していた。

ところがこの方式では、山陽新幹線のように全線の長さに対してトンネル区間の長さの割合が大きくなると、換気量が不足することになるので、日本国有鉄道(以下、国鉄と略す)では新幹線開業後から、トンネル内でも耳ツン現象を防止し、しかも連続的に換気できる新しい換気方式の開発に力を注いできた。

日立製作所では、当初からこの開発に参画して種々の試作試験を重ねた結果、高圧特殊シロッコファン及びボルテックスプロワによる連続換気装置を開発し、国鉄に対し昭和47年10月に試作機2両分を納入し現車試験の結果、良好な性能を確認したので引き続き第14次新幹線電車以降新車用及び旧車改造用として現在量産納入中である。

この論文は、換気装置の仕様・構造、試作機の現車試験結果及び事前検討に用いたトンネル内通過時の車内圧力変動のシミュレーション計算の実測値との対比について述べる。

2 換気装置の仕様と構造

2.1 連続換気方式の概要

連続換気方式は、給気側と排気側に同一性能をもつファンを設置し強制通風を行なうものであり、車外圧力が急激に変化しても、それによる風量の変化が小さければ車内圧力の変化は緩やかなものになることを利用したものである。このためには、風量-風圧曲線のこう配が急な特性をもつファンが必要である。

また、圧力変化の人間の耳に与える影響については当初か

ら研究され、実験の結果耳ツン現象は圧力の絶対値と圧力の変化速度の影響によることが分かり、**図1**に示す関係を一応の目安とした。同図は、圧力の絶対値が小さいときは比較的大きな圧力変化速度まで許容できるが、圧力の絶対値が大きくなるにつれて圧力変化速度は小さい値にならなければならないことを示すものである。

2.2 高圧シロッコファンの仕様と構造

高圧シロッコファンの開発に先立ち、昭和42年にベルト駆動形ターボファンが試作された。これを東海道新幹線電車及び山陽新幹線951形試験電車に搭載し、種々の試験を行なった結果、換気量、対耳ツン現象特性を満足することは確認されたが、量産化を前提として諸性能の見直しを実施した結果、次の性能が必要となり、これらを満足する新ファンとして高圧シロッコファンを開発した。

(1) ファンモータ直結化

ベルト駆動は保守上問題があるので、モータ直結形ファンとすること。

(2) 低騒音化

このターボファンは増速された高速回転であるため、騒音が大き。基本的に低騒音のファン、消音器の消音効果の大きなものとする。

(3) 小形・軽量化

在来(東海道)新幹線電車への改造取付が必要な情勢となり、締切弁形ファンとの置換を考えたスペースに収まるように、小形・軽量化を図ること。

(4) 急傾斜性能曲線

後述の車内圧力変動シミュレーション計算を用いて、検討した結果、ファン特性としては試作ターボファンと同等か、又はそれ以上の急傾斜性能であること。

表1は、高圧シロッコファンの仕様を、**図2**は、空力性能曲線を示すものである。併記したターボファンの性能と比較すると、風量20m³/min以上において曲線こう配が急になっており、車外圧力変動に対する風量の変化が小さいことが分かる。**図3**は、高圧シロッコファンの外観を示すものである。

*日立製作所笠戸工場

**日立製作所土浦工場

***日立製作所習志野工場

****日立製作所日立研究所

*****日立製作所交通技術本部

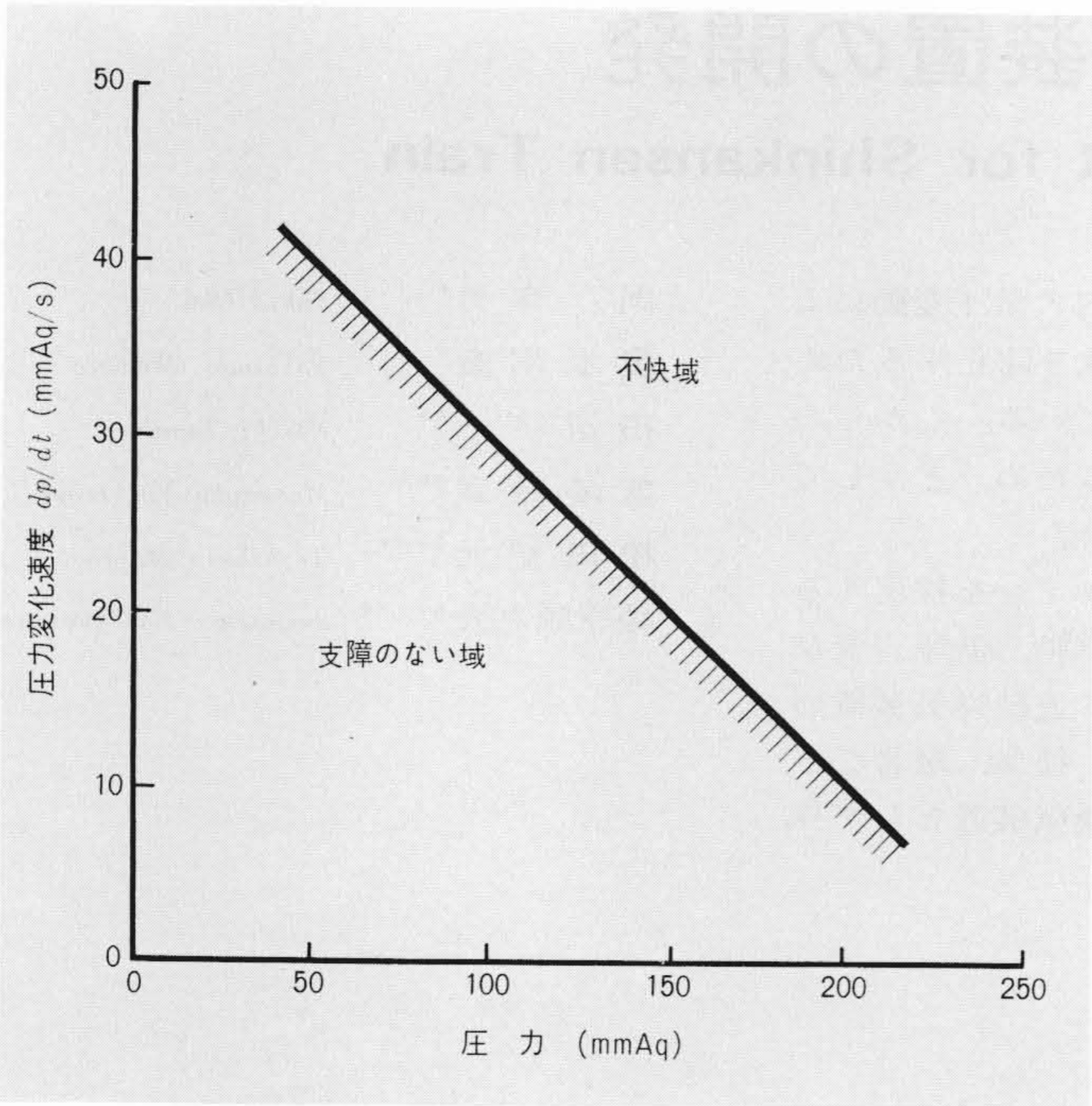


図1 耳ツン現象に影響を及ぼす因子 耳ツン現象に影響を及ぼすのは、圧力変化速度のみならず、圧力の大小による影響も大きい。

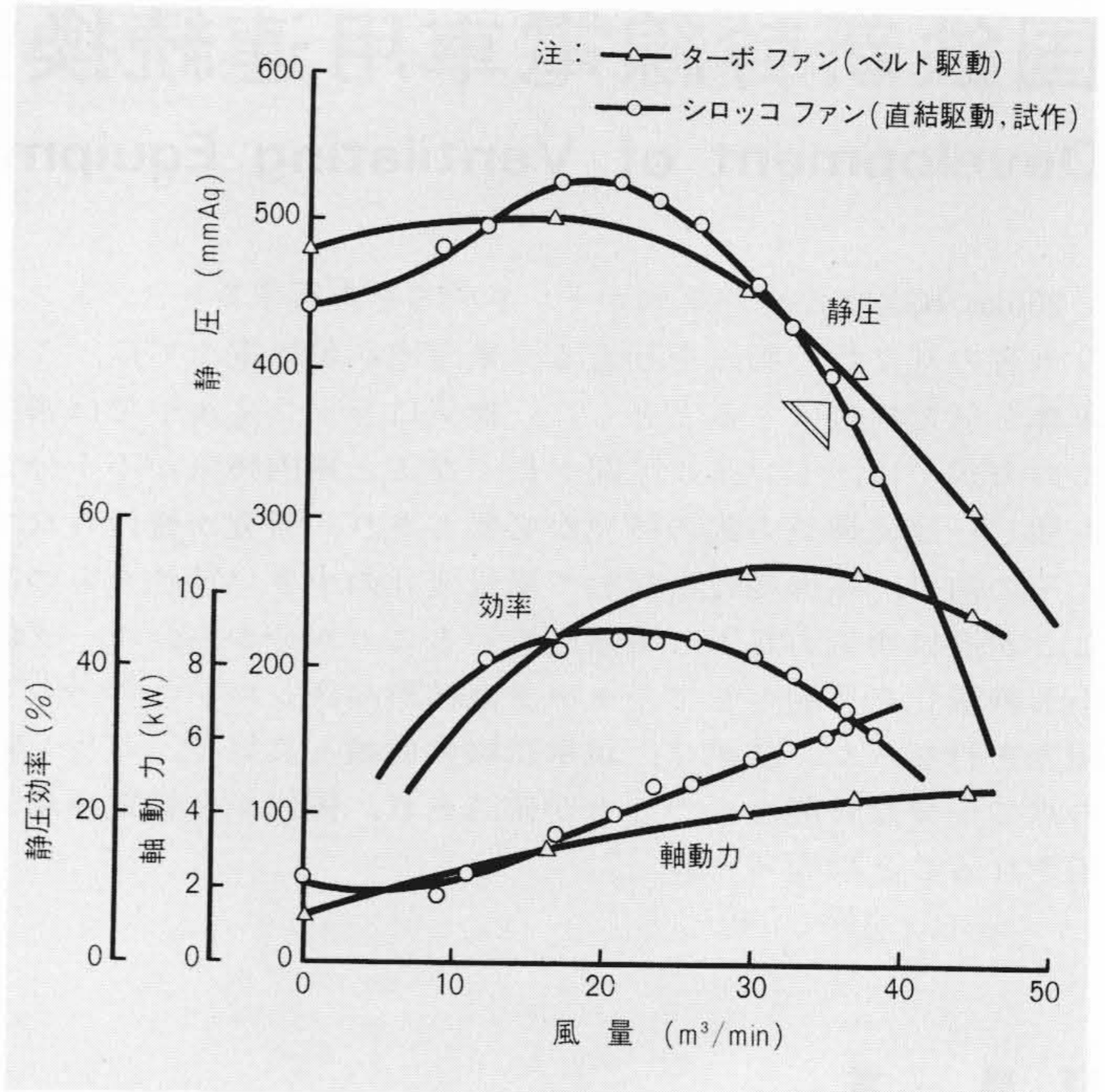


図2 高圧シロッコファンの特性曲線 このシロッコファンは、ターボファンに比較して圧力曲線が急になっており、車外圧力変動に対する風量の変化が小さい。

従来の技術レベルでは、二段羽根車の採用となるところを、前向羽根の単段シロッコファンの開発を進め、従来のものより3~4倍の周速(約70m/s)で用いる小形軽量のシロッコファンとなっている。更に、ファンの吸込口、吐出し口を向流偏平として軸方向の長さを短縮した。また電動機は、単相60Hz、174~286Vの広い電圧変動範囲で使用するコンデンサラン方式の誘導電動機である。

以上の開発によって、在来新幹線電車の締切弁形ファン装置との置換えも容易に行なえることになった。

2.3 ボルテックスブロウの仕様と構造

ボルテックスブロウは車内便所専用排気ファンとして使用されるもので、汎用ボルテックスブロウを新幹線電車搭載用に改造したものである。表2はその仕様を、図4は空力性能曲線を示すものである。また、外観については図5に示すとおりである。

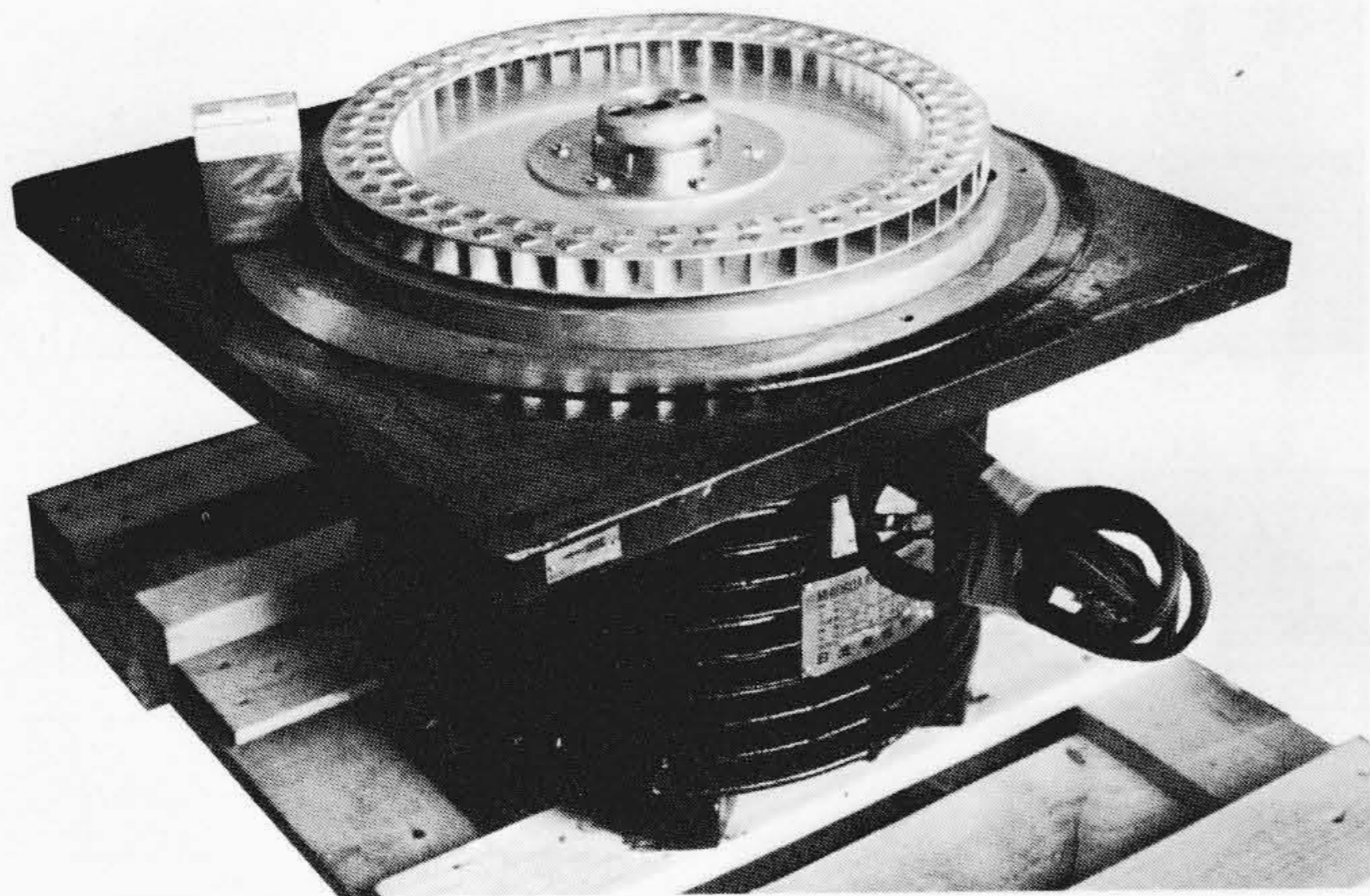
2.4 換気系統図

車両としての連続換気の系統図は図6に示すとおりで、新鮮外気は屋根上中央部に設置された給気装置によって取り入れられ、室内還気と混合されて各空気調和ユニットを経て客室内へ送風される。この給気装置は主として高圧シロッコファン、消音器及びそれらを結ぶたわみ管から成り、図7のようにコンパクトに装備されている。一方、客室内汚染空気は、客室両側下部の風道を経て、床下中央部に設置された排気装置によって車外へ放出される。排気装置は高圧シロッコファン、消音器及びダクトを図8に示すような姿にまとめ、床下にコンパクトに装備されている。また、便所への給気は廊下天井にある空調ユニットから送風され、排気は大便所、小便所の屋根上に設置されたボルテックスブロウにより放出される(図9)。

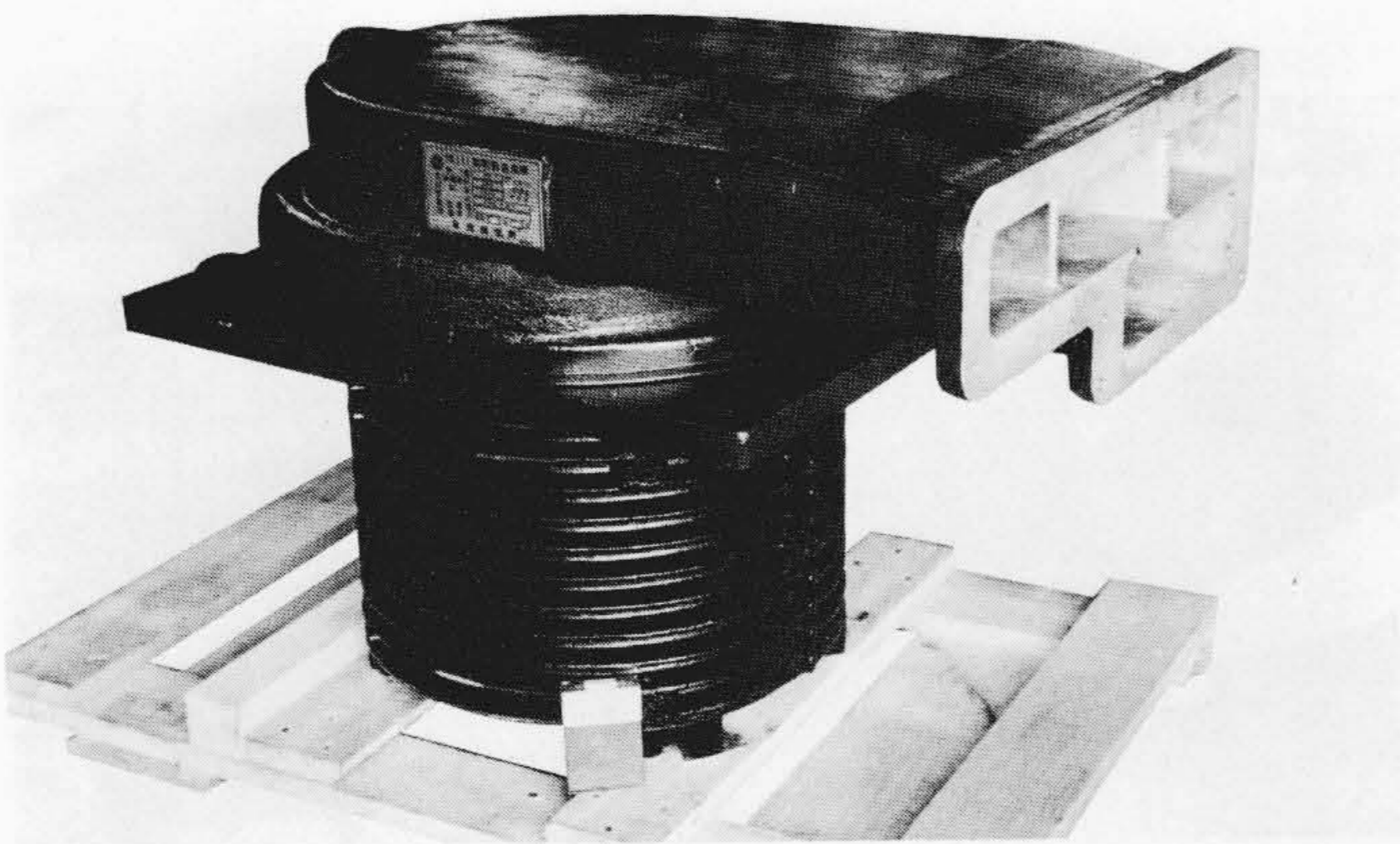
各設定風量については給気側は35m³/min、客室排気側は30

表1 高圧シロッコファンの仕様 客室換気用として使用されるシロッコファンと直結電動機の主要仕様を示すものである。

電 動 機			送 風 機	
形 式	MH 1060		形 式	FK III
方 式	かご形コンデンサ電動機		方 式	遠心形多翼ファン
外被・冷却方式	全閉外扇形		送風機静圧(mmAq)	380
相 数	1		風 量(m³/min)	35
極 数	2		規定回転数(rpm)	3,520
定 格	種 類	連 続		
	出 力(kW)	6.3		
	電 圧(V)	220		
	電 流(A)	37		
	周 波 数(Hz)	60		
	回 転 数(rpm)	3,520		
	絶 縁 種 別	F 種		
	コンデンサ容量(μF)	300		
	重 量(kg)			約250



(a)



(b)

図3 電動機直結形のシロッコ ファン (a)はファンケースをとった状態を、(b)はファンケースを取り付けた状態を示すものである。

m^3/min となっており、奇数号車ごとにある便所排気側は $10m^3/min$ ($5m^3/min \times 2$) となっていて、2両ユニットごとに給排気量のバランスを保っている。

3 連続換気装置の現車試験

昭和47年10月、試作装置2両分を東海道新幹線電車「ひかり」編成H15の13、14号車に改造取付を行ない、国鉄関係者

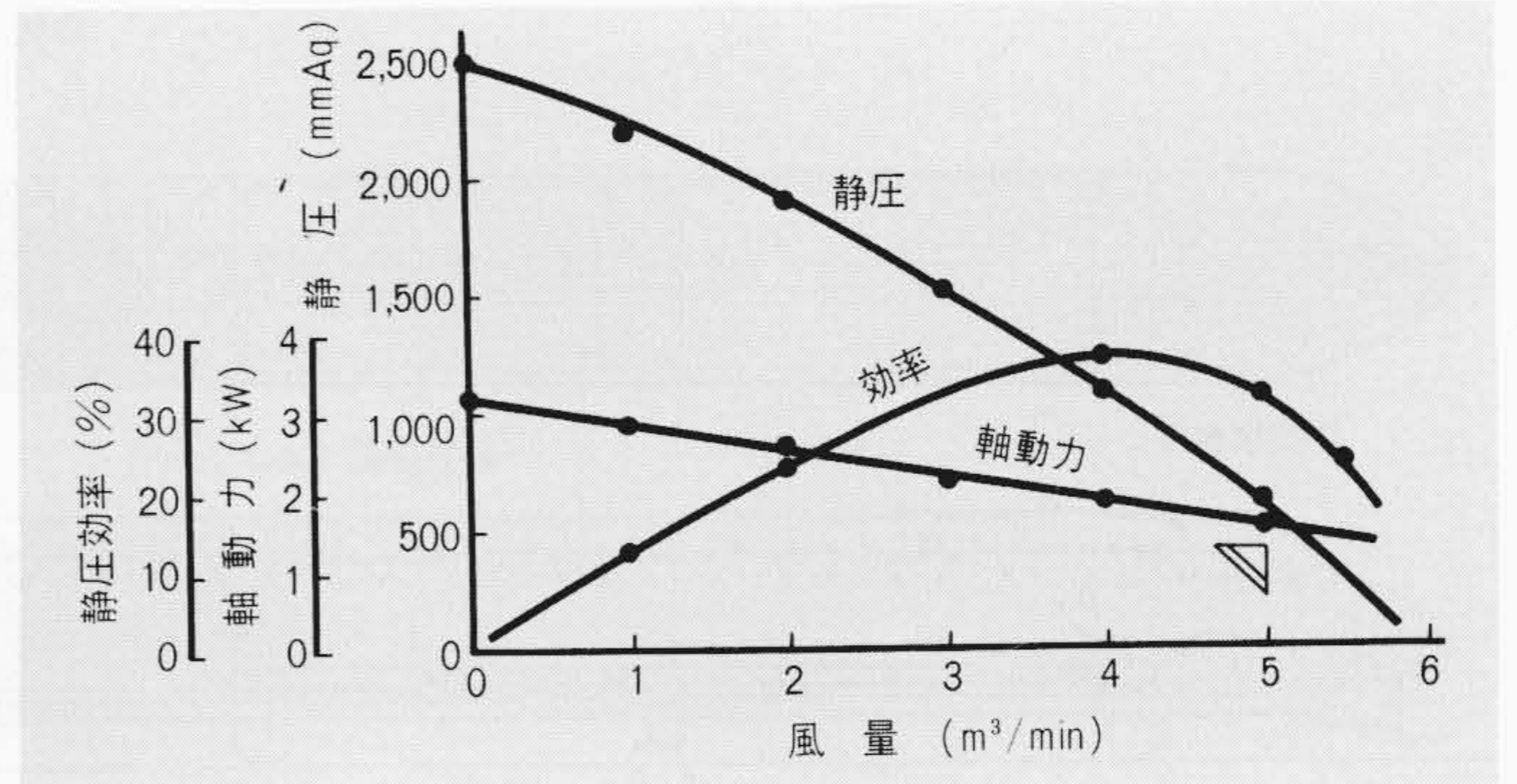


図4 ボルテックスブロワの特性曲線 小風量ながらも高風圧である特性をもっている。

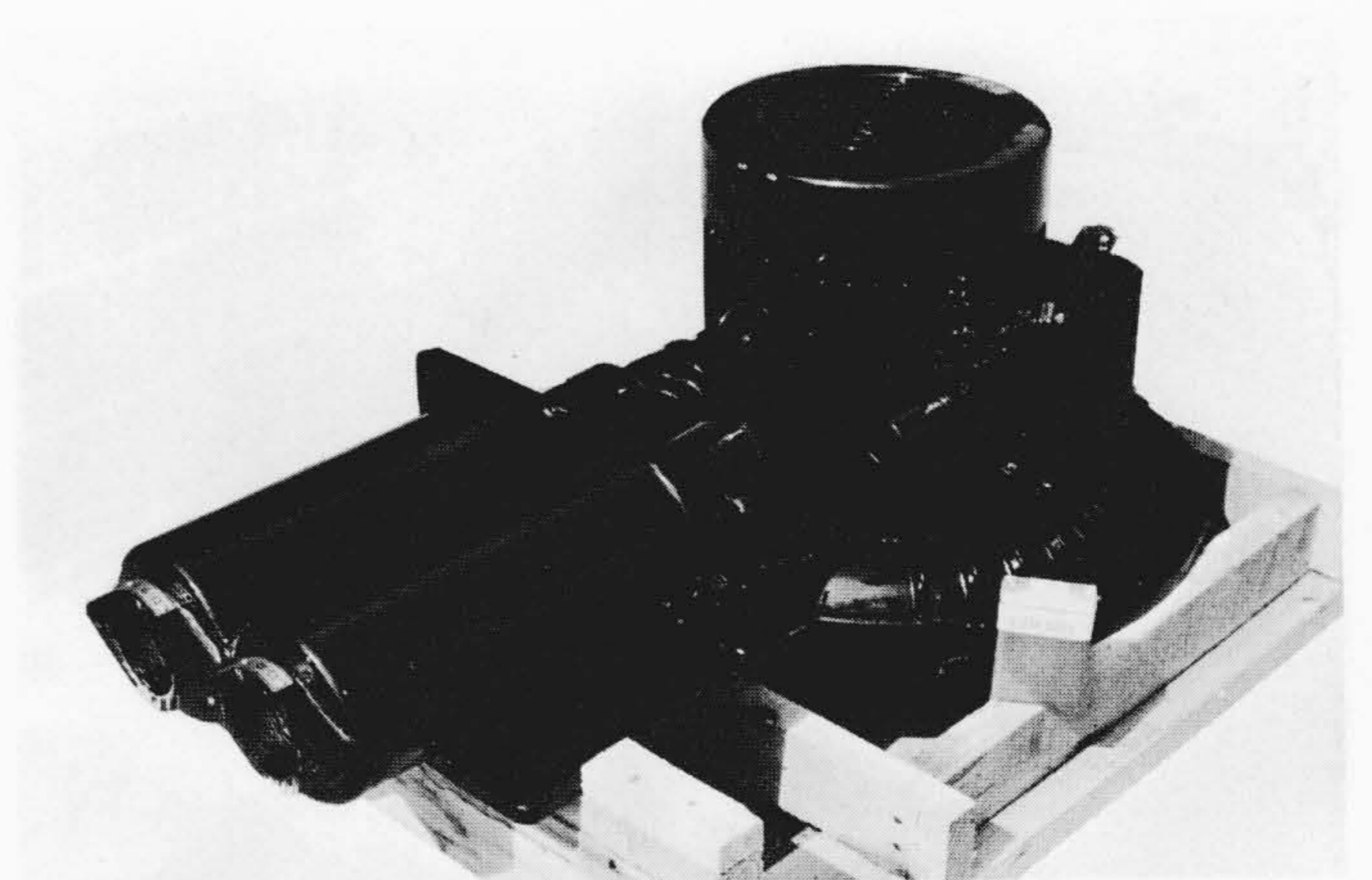


図5 ボルテックスブロワ 電動機直結形のボルテックスブロワの外観を示す。

立会により換気性能に関する現車試験（定置試験及び浜松～名古屋間、名古屋～東京間の走行試験）が行なわれた。

(1) 車内換気量

前記13、14号車を2両ユニットに独立させ、炭酸ガス減衰法により車内換気量を求めた。その結果は、換気量・換気回数ともほぼ所期の目標を満足した。

表2 ボルテックスブロワの仕様 便所専用排気ファンとして使用されるボルテックスブロワの主要仕様を示すものである。

電 動 機			送 風 機	
形 式		MH 1061	形 式	FK 112
方 式		かご形コンデンサ電動機	方 式	渦流形
外被・冷却方式		全閉外扇形	送風機静圧差 (mmAq)	400
相 数		1	風 量 (m^3/min)	5
極 数		2	規定回転数 (rpm)	3,500
定 格	種 類	連 続	—	—
	出 力 (kW)	1.5	—	—
	電 圧 (V)	220	—	—
	電 流 (A)	10	—	—
	周 波 数 (Hz)	60	—	—
	回 転 数 (rpm)	3,500	—	—
絶 縁 種 別		F 種	—	—
コンデンサ容量 (μF)		80	—	—
重 量 (kg)		約 8.5	—	—

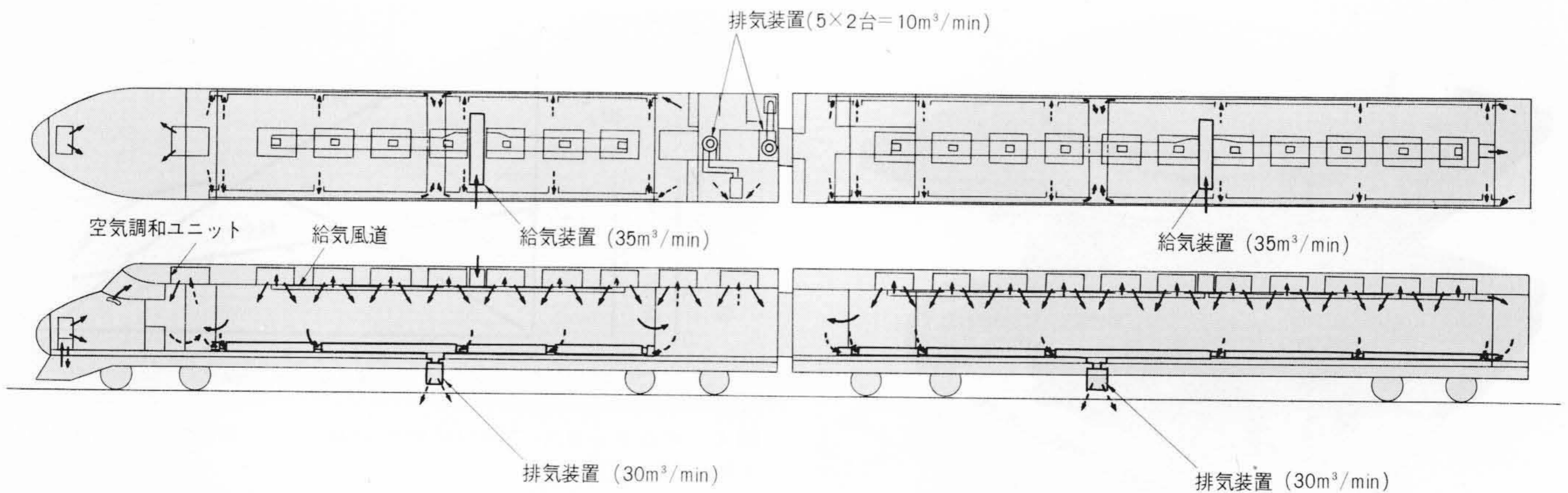


図6 新幹線電車の換気系統図 実線矢印で示す方向が給気を示し、破線矢印で示す方向が排気を示す。

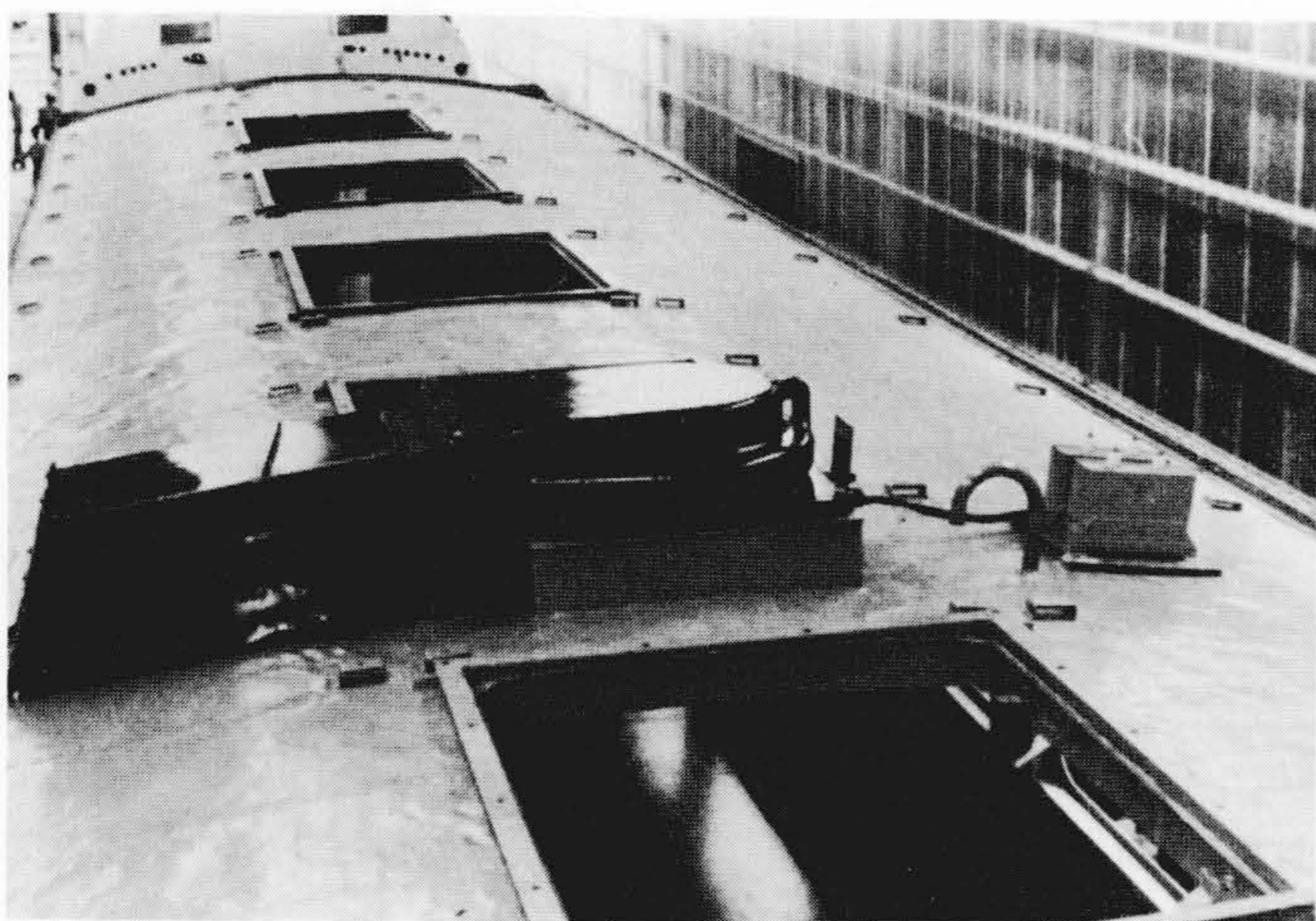


図7 給気装置 シロッコ ファン、たわみ管及び消音器が車体下屋根上部にコンパクトに装備されている。

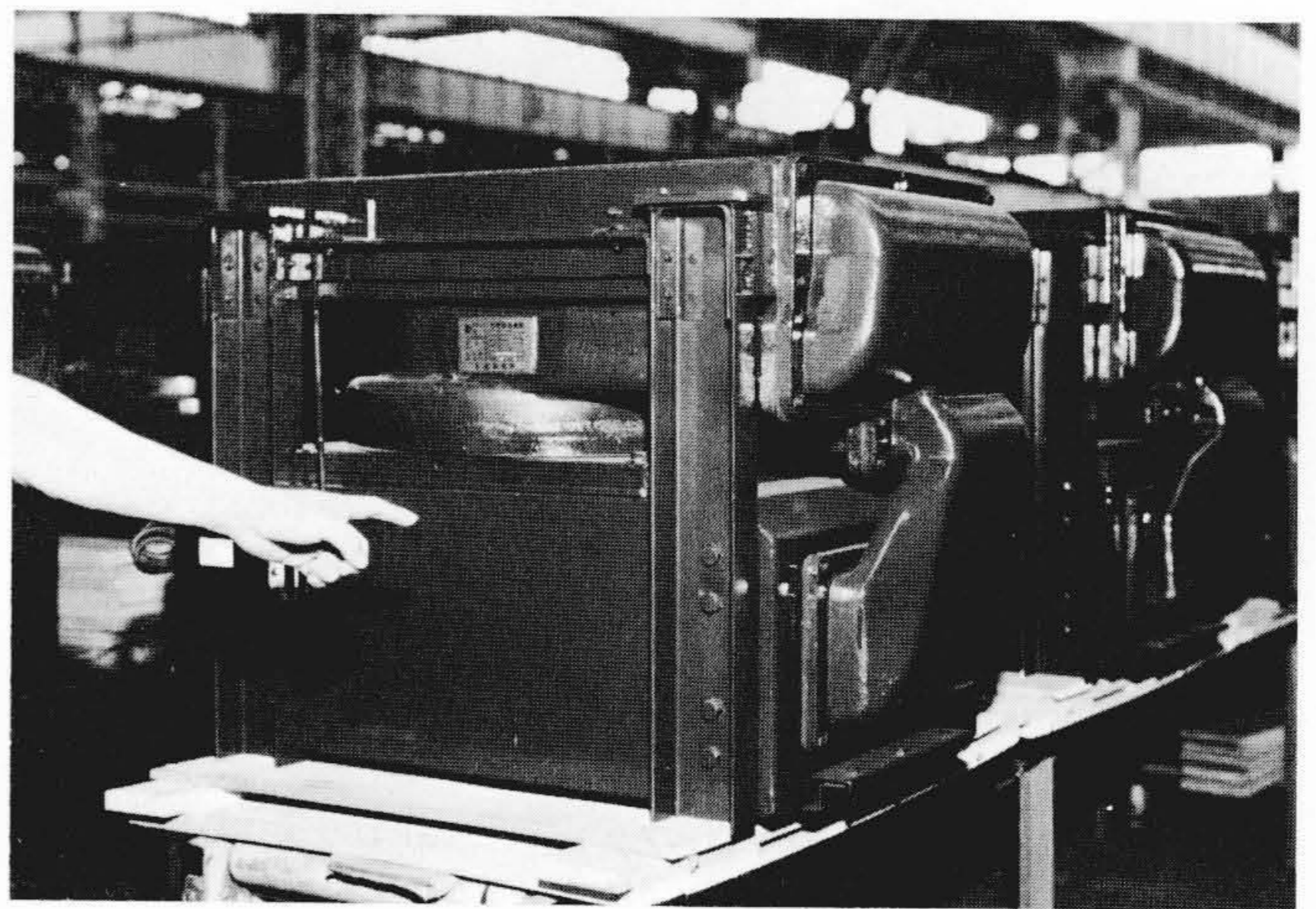


図8 排気装置 シロッコ ファン、ダクト及び消音器を一体形にまとめつり足を使って床下に装備される。

(2) 車内圧力変動試験

坂野坂トンネル内での車内圧力は最小 -130mmAq であったが、そのときの圧力変化速度(dp/dt)は -2.3mmAq/s であり、全体的に図1の限界を超えることはなく問題はなかった。

また故障時を想定して、13、14号車のユニット状態を解き、16両通しの状態において2両の換気ファンを止めてみたが、車内圧力低下が小さく(最小 -80mmAq)耳ツン現象は感じられず、問題にならないことが分かった。

(3) 車内騒音

客室内中央(床上 1.5m)において騒音測定したところ、在来幹線車のその値とほぼ同等ないしは若干良い値を得た。一方、便所内については在来車のその平均値より若干高い値となった。そのため、便所内排気ダクトに軟質ポリウレタンフォームを内ばりし、在来車と同程度の騒音にまで下げた。

(4) 振動加速度と応力

シロッコ ファン、ボルテックス プロワにかかる振動加速度、応力を測定し、トンネル内通過時、すれ違いなどの諸状態下で測定し強度上問題のないことを確認した。

4 車内圧力変動に関するシミュレーション

換気装置の設計に際してファンの特性を決定するためには、トンネル内通過時の車内圧力変動をあらかじめ計算により推定することが必要である。これを簡単な逐次計算により推定

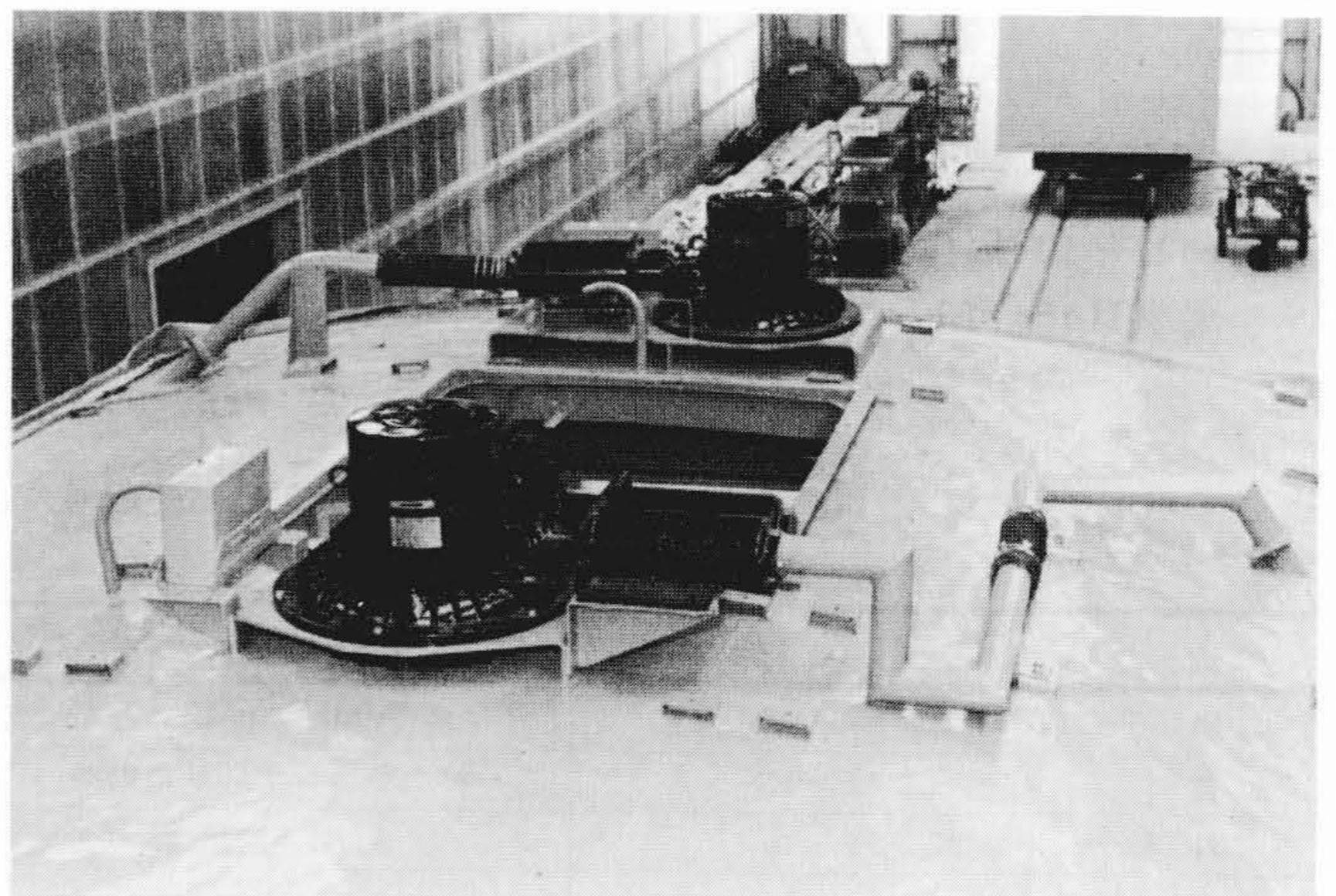


図9 便所排気装置 屋根上部に搭載された2台のボルテックス プロワにより、大便所、小便所のそれぞれから排気される。

する方法を求め、ターボ ファンによる換気装置を取り付けた現車での試験データと対比して計算方法の妥当性を調べ、シロッコ ファン設計の際にあらかじめトンネル内通過時の車内圧力変動を推定した。

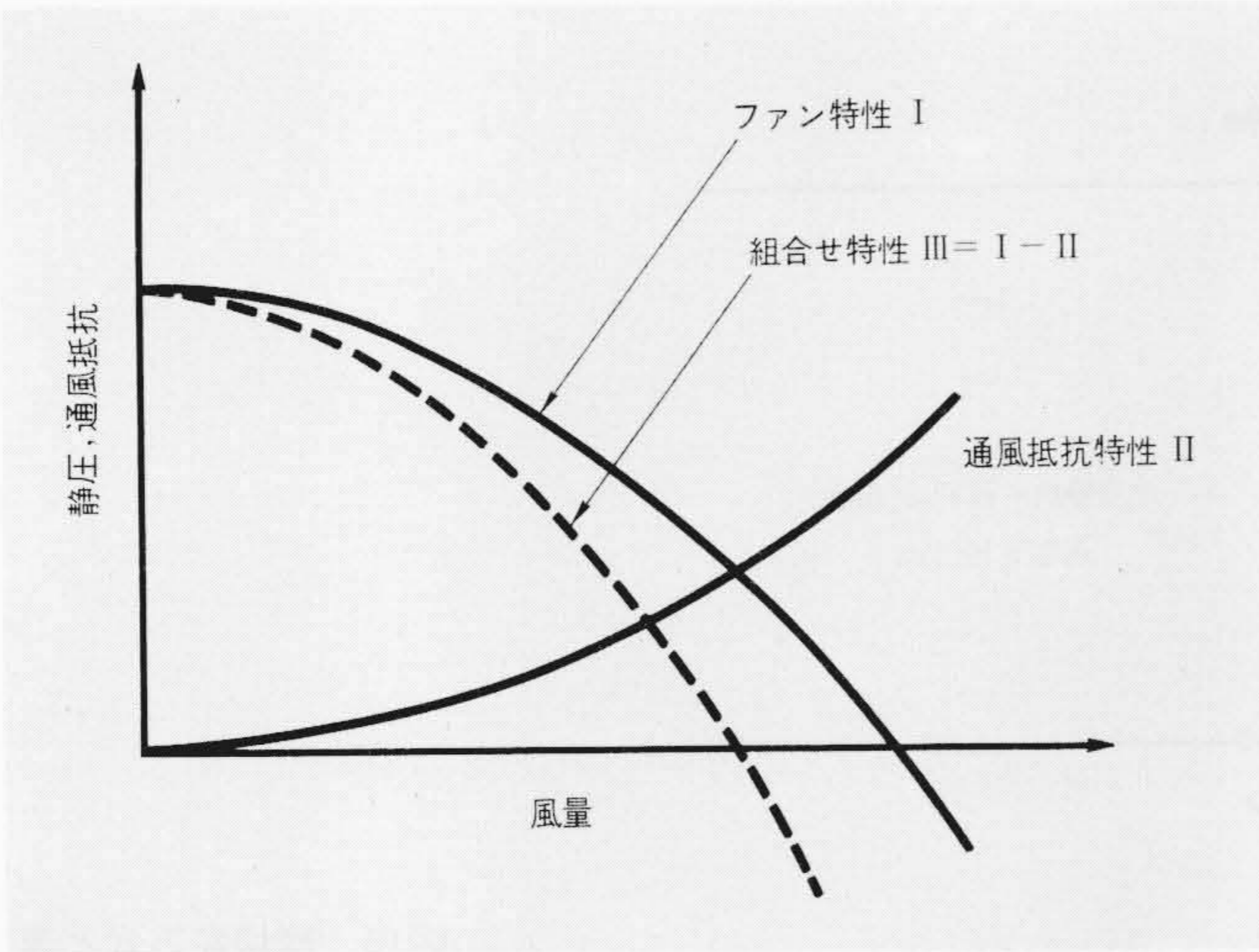


図10 ファン特性と通風抵抗特性 ファン特性と通風抵抗特性を近似二次曲線で表わした。

4.1 計算方法

ファンの風量-圧力特性及び通風抵抗特性を図10に示す近似二次曲線で表わすと次の(1), (2)式が得られる。

$$P = AQ^2 + BQ + C \dots\dots\dots(1)$$

$$P_R = A_R Q^2 \dots\dots\dots(2)$$

ここに、 P : ファン静圧 (mmAq)
 P_R : 通風抵抗 (mmAq)
 Q : 風量 (m^3/min)

A, B, C はファン特性によって決まる定数, A_R は通風抵抗特性によって決まる定数である。これより給気風量と排気風量は(1), (2)式から次のようになる。

$$Q_s, Q_d = \frac{-B - \sqrt{B^2 - 4(A - A_R)(C - \Delta P)}}{2(A - A_R)} \dots(3)$$

ここに、 Q_s : 給気風量 (m^3/min)
 Q_d : 排気風量 (m^3/min)
 ΔP : 車内外圧力差 (mmAq)

(3)式から求められる給気風量, 排気風量と, 車体が完全気密でないための車内外への漏れ風量 Q_L (m^3/min) とから, 車内空気重量の変動を求めることにより, 車外圧力変動が与えられれば逐次計算によって車内圧力変動を推定することができる。図11は, 計算フローチャートを示すものである。

4.2 計算結果と実測値の比較

計算の妥当性を調べるためにターボファン式換気装置及びシロッコファン式換気装置を取り付けた現車試験での実測デ

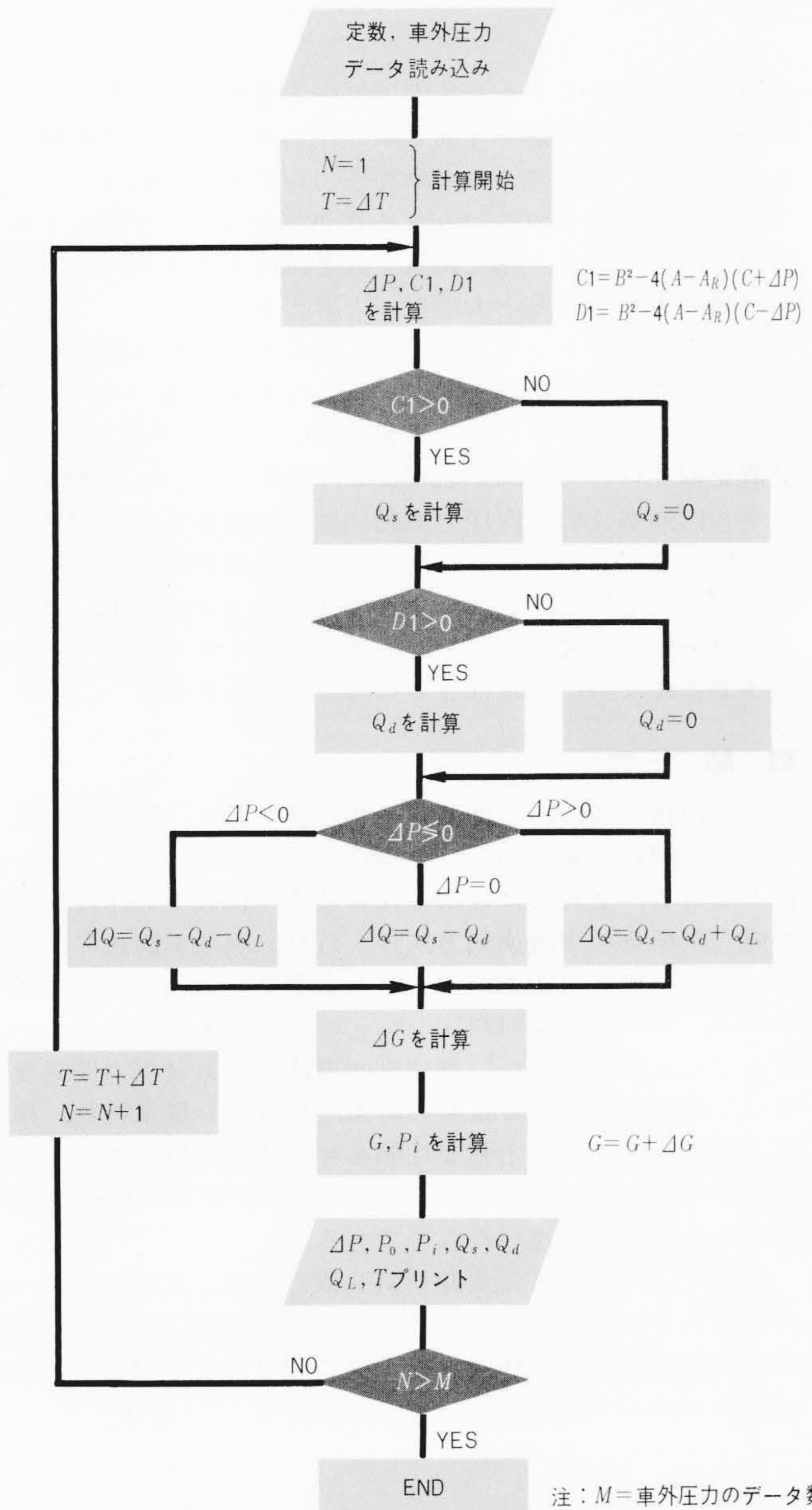


図11 車内圧力変動計算フローチャート 車内圧力変動を逐次計算法により計算する流れを示すものである。

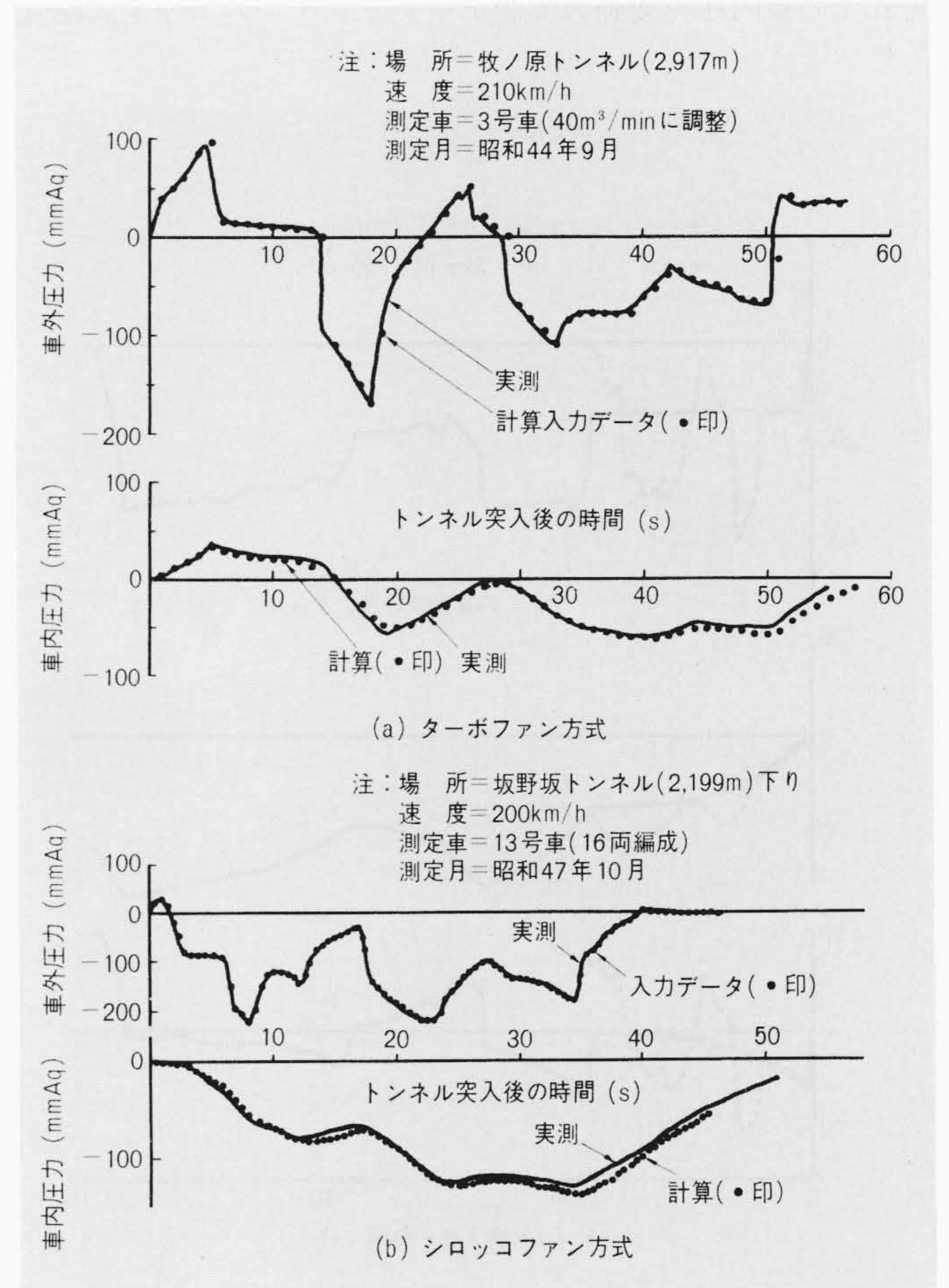


図12 車内圧力変動の計算値と実測データとの比較 逐次計算法による計算結果と実測データは, 比較的よく一致している。(a)の例はターボファン方式換気装置での場合を示し, (b)の例はシロッコファン方式換気装置での場合を示す。

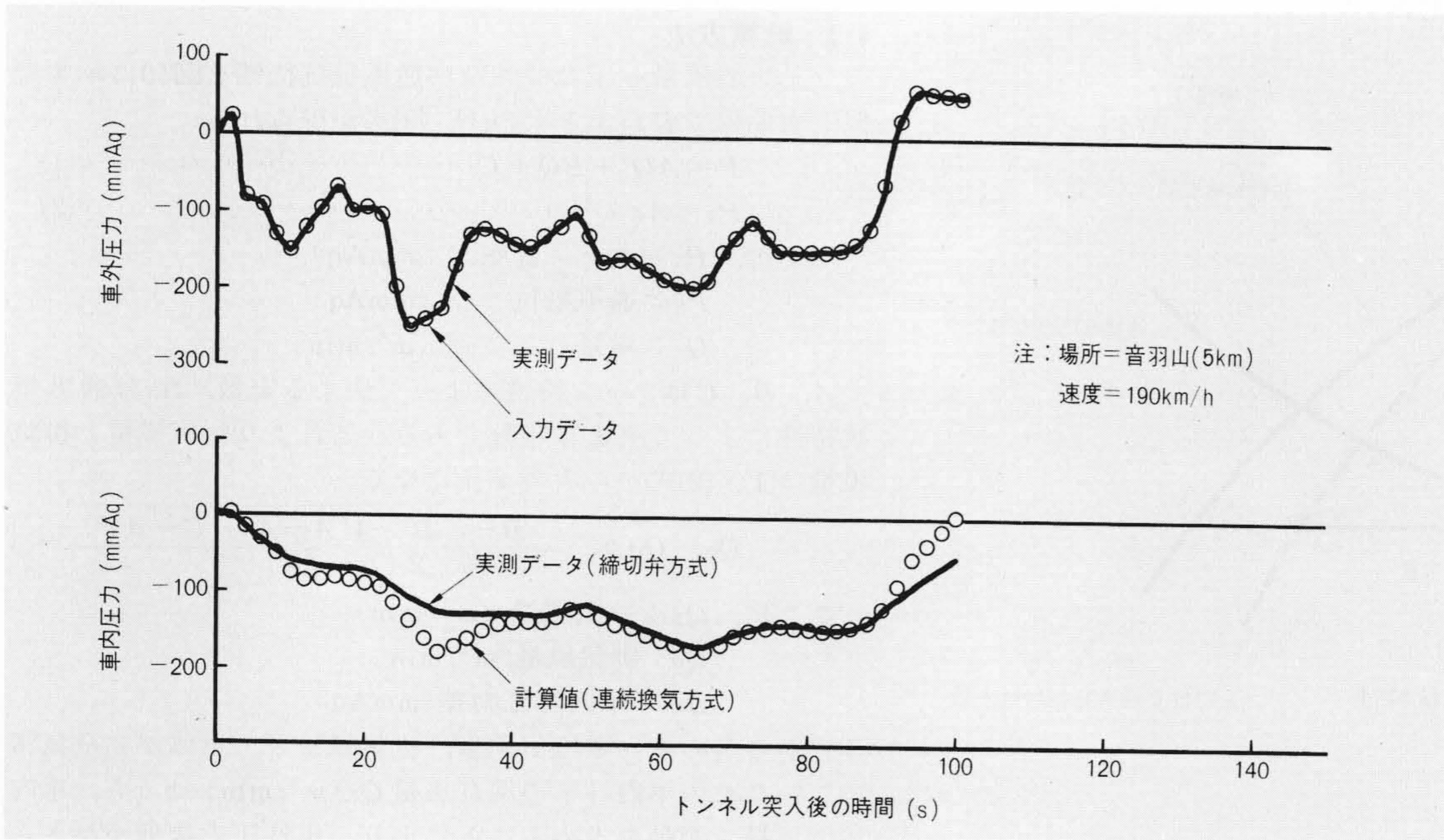


図13 締切弁方式と連続換気方式の比較
車内圧力変動は、締切弁方式の場合と連続換気方式の場合との間にはほとんど差がないことを示している。

ータと各の場合の計算結果とを比較した。図12はその比較例を示すものである。これらから計算値と実測データは比較的よく一致しており、上記の簡単な逐次計算でも実用に供し得ることが分かる。

また、別の例として図13は、東海道新幹線における締切弁方式での車内圧力変動の実測データとシロッコファン式換気

装置を取り付けてトンネル内通過中も連続換気したときの車内圧力変動の計算値とを同じ車外圧力変動のもとで比較したものである。これによると車外圧力が急激に変動するところでは両方式で若干の差がみられるが、全体としてはよく似た傾向を示しており、連続換気方式を採用しても車内圧力変動は締切弁方式の場合と大差ないと考えられる。

次に上記例はトンネル長さが5km以下で、車速210km/h以下であったが、将来、長大トンネル内を更に速い速度で通過することもあり得ることを予想し、シロッコファン方式換気装置を取り付けた車両が250km/hの車速で、3km、10kmのトンネル内通過時の車内圧力変動について試算した。図14は、その例を示すものである。同図から車内圧力変化速度は最大20mmAq/s程度で、そのときの車内圧力は約-200mmAqであり、全体的に図1に示した限界を満足しているので、この程度であれば特に問題はないものと考えられる。

5 結 言

全国的に鉄道需要の伸展が予想されており、山陽新幹線をはじめ全国新幹線網の計画が本格化され、既に一部工事が進行中である。これらに使用される電車の長大トンネル区間を考慮した場合の車内換気方式は、耳ツン現象を防止し、しかも連続的に換気可能であることが必要である。これに対処するため、モータ直結形高压シロッコファン及びボルテックスブロワによる、類のない高速車両用連続換気装置の開発を行ない、更に現車による試験の結果、対耳ツン現象特性、換気量、騒音などの点で十分な性能をもつことが確認され、新幹線電車に採用された。この論文は連続換気装置の性能に重点を置きその概略を述べたものである。

終わりに臨み、この連続換気装置の開発、試験に当たって終始多大な御指導をいただいた日本国有鉄道車両設計事務所、同鉄道技術研究所及び同浜松工場の関係各位に対し、深く感謝の意を表わす次第である。

参考文献

- (1) 山本「新幹線トンネルの圧力変動・空気抵抗・トンネル換気」鉄道技術研究報告 871 (1973-10)

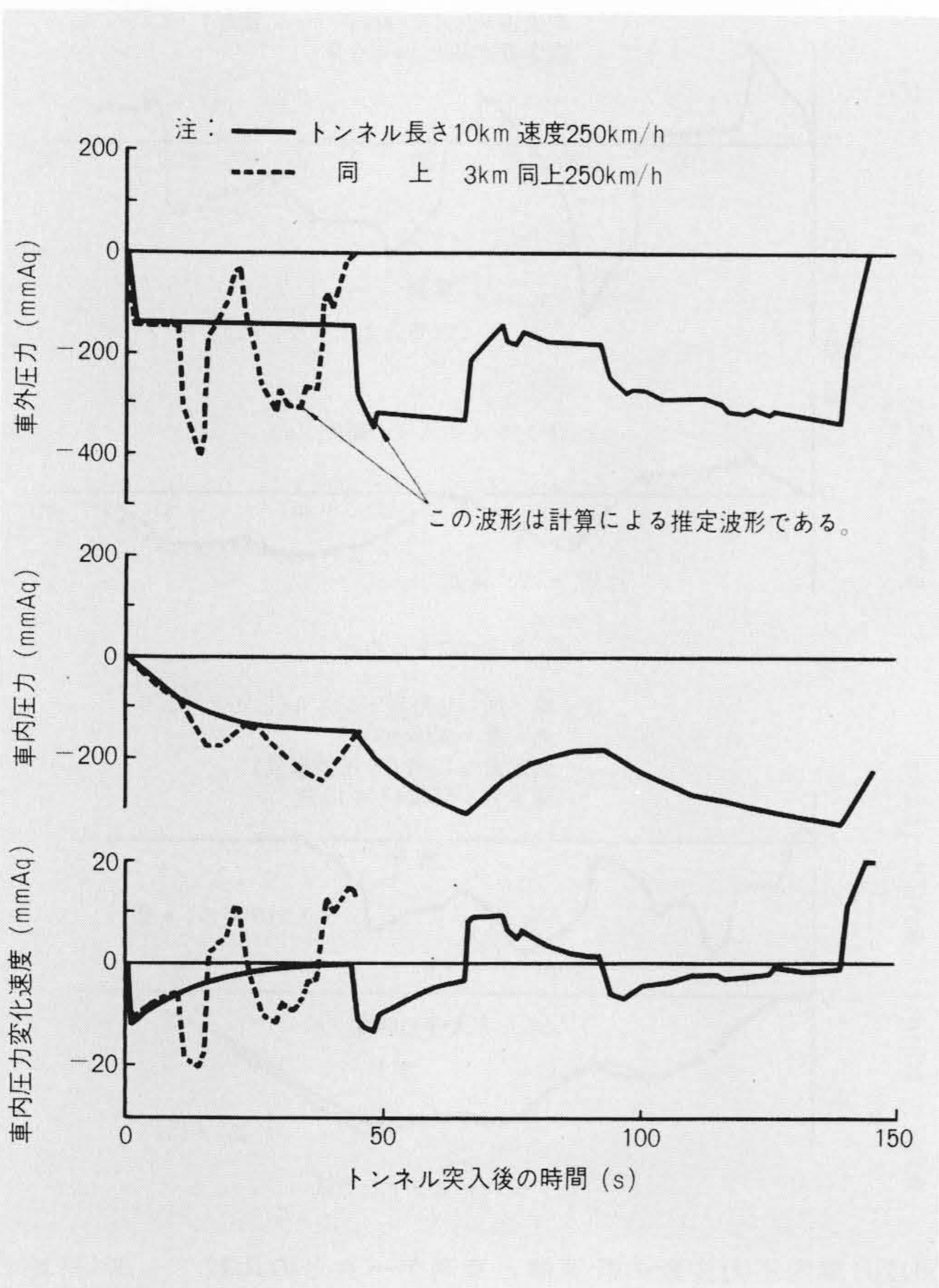


図14 車内圧力変動の試算例(250km/h) 車速250km/hでの車内圧力変動を試算したものである。