

# トンネル内車両動揺の車両形状変更による低減方法

鈴木 昌弘\* 中出 孝次\* 井門 敦志\*

## Countermeasures Against Flow-Induced Vibration of Train in Tunnel by Use of Modifications of Train Shapes

Masahiro SUZUKI Koji NAKADE Atsushi IDO

As the maximum speed of high-speed trains increases, flow-induced vibration of trains in tunnels has become a subject of discussion in Japan. In this paper, we report the result of a study on use of modifications of train shapes as a countermeasure for reducing an unsteady aerodynamic force by running tests and a wind tunnel test. First, we conducted a statistical analysis of running test data to identify exterior parts of a train which cause the unsteady aerodynamic force. Next, we developed a wind tunnel test to measure the unsteady aerodynamic force acting on a train in a tunnel and examined train shapes with a particular emphasis on the exterior parts identified by the statistical analysis. The wind tunnel test showed that fins under the car body are effective to reduce the unsteady aerodynamic force. Finally, we tested the fins by a running test and confirmed its effectiveness.

キーワード：新幹線，空気力，トンネル内動揺，走行試験，風洞試験

### 1. はじめに

近年，新幹線の速度向上に伴い，乗り心地の面から，空気力によるトンネル走行中の車両の左右動揺（特にヨー成分）が問題になりつつある。これまで多くの列車において，車体に働く空気力の測定が行われてきており，以下のような現象の特徴がわかってきている<sup>1)</sup>。

- (1) トンネル壁に面した列車側面で大きな圧力変動が発生する。トンネル内で車体に働く空気力は，主にこの圧力変動に起因する。
- (2) 圧力変動は，相対流速（列車に対する気流速度）の二乗に比例して大きくなる。
- (3) 列車側面で観察される圧力波形は，一定のパターンを維持しながら，先頭から後尾に向かって移動していく。
- (4) 編成全体でみた場合，列車側面での圧力変動の大きさは，先頭から6～8両目程度まで増大し，その後，後尾車両までほぼ一定のまま推移し，最後に最後尾で急激に大きくなる。

このような圧力変動に対して，著者らは数値シミュレーションによる検討を行ってきた。編成全体の圧力変動の発生要因として，車体底面からの渦の発生とその移動が示唆された<sup>1)</sup>。また，最後尾部の急激な圧力変動は，流れの剥離に起因するものであることも明らかにした<sup>2)</sup>。

現在，空気力によるトンネル内走行中の車両動揺対策

としては，アクティブサスペンション<sup>3)</sup>や車体間ヨーダンパー<sup>4)</sup>による方法が採用され効果を挙げている。しかし，これらは対症療法であり，今後の速度向上時には根本的な原因である空気力そのものを低減する方策も併せて考える必要がある。

空気力を低減させるには，車両形状を工夫する必要がある。そこで，本研究では，空気力を低減させる車両形状を現車試験，風洞試験により探った。まず，現車試験データを統計解析することにより，空気力発生に影響を与える形状箇所を推定した。続いて，風洞試験において非定常空気力を精密に測定する方法を開発し，現車試験データの統計解析で空気力発生要因としてあげられた箇所を参考に形状を検討した。さらに，風洞試験で空気力低減に効果があった形状について，現車試験を実施した。

### 2. 統計的手法による空気力に影響を与える箇所の推定

#### 2.1 使用データと解析方法

トンネル内で発生する空気力について調べるために，様々な列車について現車試験が行われてきている。しかし，列車によって先頭部や屋根，床下等の形状が違い，また測定号車も異なっていた。したがって，これら異なった列車の現車試験データから，空気力に影響を与える箇所を推定するのはパラメータが多すぎて困難であった。

そこで，同一の列車で細部の形状を変更した現車試験の事例がないか探したところ，6両編成の試験列車の先

\* 環境工学研究部（空気力学）

特集：環境技術

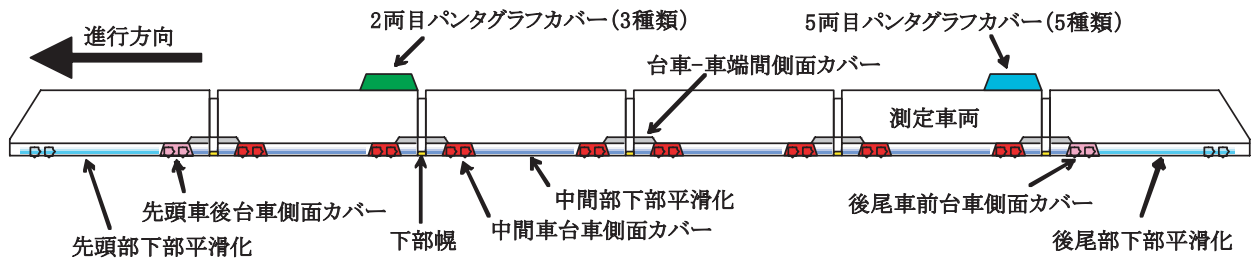


図1 形状変更を行っていた部分

頭から5両目の車両において、長期（2年間）にわたり、車両左右側面の圧力（合計8点）を測定していた。この試験車両はパンタグラフや碍子のカバー（以降、パンタグラフカバーと総称する。）、台車カバー等の形状を様々に変更していた（図1）。

この測定データを用いて、空気力を発生させている箇所（箇所の寄与を）を求めようとした。列車先頭部が高速でトンネルに突入すると、列車前方の空気が圧縮され、圧縮波が生じる。また、後尾部が突入すると膨張波が生じる。トンネル内を音速で伝播する膨張波が列車を追い越した後、先頭部による圧力波が反対側のトンネル坑口で反射して戻り列車と遭遇するまでの間、列車周りの空気の流れはほぼ定常な状態が続く。この区間を解析区間として、列車に加わる空気力を求めた。

車体左右側面に4個ずつ設けた圧力測定点の値から、空気力のヨーイングモーメントを算出する。車両側面を4つに分割し、その各面積部分に加わる圧力をその中央付近に貼り付けた圧力センサーの測定値で代表させる。それらの左右側面の圧力の差に各部の面積と車両中心（前後台車間の中間位置）からの距離（モーメントの腕の長さ）をかけて、空気力のヨーイング成分を求める。圧力測定点数が少ないため、この方法では厳密な空気力の算出は困難であるが、大まかな推定は可能である。なお、列車がトンネル内で対向列車に遭遇しない場合、空気力は列車速度のほぼ二乗に比例すること<sup>1)</sup>から、この関係を用いて列車速度250 km/h以上の測定データを列車速度270 km/hに換算して用いた。全データ数は110である。

形状の変更は他の試験目的のために行われたものが多く、複数の箇所の変更が様々な組み合わせ（表1）で行われていた。したがって、個々の要素の空気力に対する寄与を直接求めることは難しい。そこで、統計的な解析（数量化分析I類<sup>5)</sup>）により、5両目の車両に加わる空気力に及ぼす寄与の大きい要素を近似的に求めることにした。数量化分析I類は、質的なデータを数値化して、重回帰式を求めるものである。目的変数（空気力）に対して、複数の説明変数（車両形状の要素）を組み合わせ、最良の重回帰式を求める。

2.2 結果

説明変数として「5両目パンタグラフカバー」、「中間車台車側面カバー」、「下部幌」、「台車-車端間側面カバー」を用いた重回帰式により高い相関が得られることが明らかになった（図2）。このときの自由度修正済み決定係数<sup>5)</sup>は0.95であった。

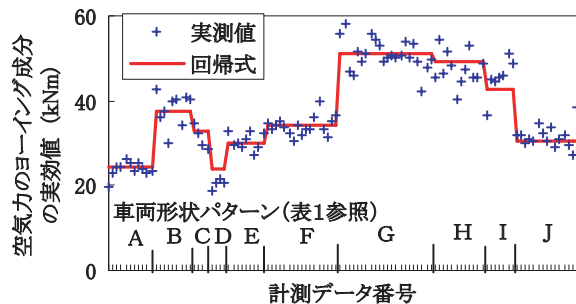


図2 実測値と回帰式（270 km/h換算）

表1 形状変更の組み合わせ（a～gはパンタグラフカバーの形状種類を示す。）

車両形状パターン	下部平滑化			台車側面カバー			パンタグラフ部カバー		台車-車端間側面カバー	下部幌
	先頭部	中間部	後尾部	先頭車後部	中間車	後尾車前部	2両目	5両目		
A	有	有	有	有	有	有	a	d	有	有
B	無	無	無	無	無	無	a	d	有	無
C	有	無	有	有	無	有	a	c	有	無
D	有	有	有	有	有	有	a	c	有	無
E	有	有	有	無	無	無	b	e	有	有
F	有	有	有	無	無	無	b	e	有	無
G	有	有	有	無	無	無	c	f	無	無
H	有	有	有	無	無	無	c	g	無	無
I	有	有	有	無	無	無	c	c	無	無
J	有	有	有	有	有	有	c	g	有	無

### 3. 風洞試験

#### 3.1 試験方法

現車試験において車両に加わる空気力のヨーイング成分は前述のように圧力測定値から推定している<sup>1)</sup>。従来、風洞試験においても同様に空気力は圧力測定値から推定していた<sup>6)</sup>。この方法による空気力算定は、局所的な圧力変動が比較的少ないと思われる中間車両の空気力の推定には有効なもの、流れ場の複雑な最後尾部や細部の形状変更の空気力評価を行うのに用いるのは難しい。そこで、風洞試験においてロードセルによる非定常空気力の直接測定を試みた。

5両編成からなる新幹線列車と複線トンネルを40分の1に縮小した模型を製作した。図3に概略図を示す。測定車両は、4両目および5両目とした。車体は、トンネル床に固定された台車の上にベアリングを介して載せられている。各車体内に前後2台のロードセル（ミネベア株式会社製 U3C-5K-B、定格容量49.03 N、固有振動数157 Hz）を搭載する。ロードセルの検知部は台車側に固定し、車体に加わる左右方向（まくらぎ方向）の力を計測できる。空気力のヨーイングモーメント  $F_{yo}$  は  $(L_{前} - L_{後}) \times d$  として求められる。ここで  $L_{前}$  は前台車位置のロードセル測定値、 $L_{後}$  は後台車位置でのロードセル測定値、 $d$  は前後台車中心間距離の半分である。

また、4両目の車体の左右側面に4点ずつ、合計8点の圧力測定孔を設け、模型車両内に設置された圧力センサー（Scanivalve製 ZOC23B）によって圧力測定を行う。

模型は、車体底面部、後尾部、パンタグラフカバー等の付け替えが可能になっている。先頭・後尾形状は3次元長型（3.2節（6）参照）、底面部形状は角型（3.2節（4）参照）とし、パンタグラフカバー、幌、台車カバーはついていないものを基準形状とした。

風速は、トンネル入り口部の上方に設置したピトー管により測定して、30 m/sに設定した。風速と列車高さを基準にしたレイノルズ数は、 $1.6 \times 10^5$  となる。

なお、通常現車で観察される程度の左右振動加速度（全振幅4 m/s<sup>2</sup>以下）では、車体自体の動揺は空気力発生

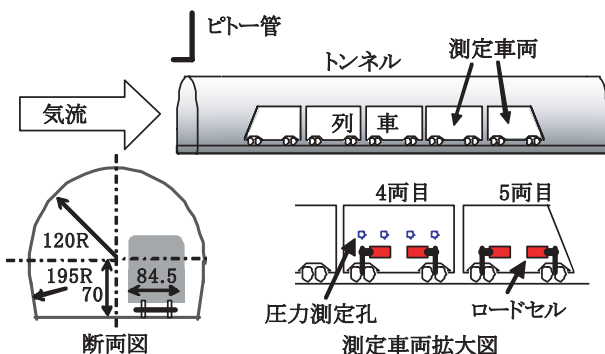


図3 風洞試験装置概略（単位:mm）

に影響しないことが判明している<sup>6)</sup>ので、この模型では車体は動揺せず静止している。また、現車ではトンネル壁と列車間が相対的に運動しているが、風洞試験では相対運動はない。このような差異はあるが、風洞試験でも現車で観察される現象をほぼ再現できることが確認されている<sup>6)</sup>。

#### 3.2 結果と考察

ロードセルを用いた測定システムでは、模型の車体、台車およびロードセル取り付け部品の固有振動数が、測定対象である空気力のピーク周波数と近くなり、正確な非定常力の測定を妨げる恐れがあった。そこで、まず、ロードセルにより非定常力を捉えることができることを確認するために、測定車両として中間の4号車を選び、圧力測定値から算定した空気力とロードセルにより直接測定した空気力を比較した（図4）。両者は、ほぼ一致しており、ロードセルによって非定常空気力を捉えられることが確認できた。

次に、車体形状の影響について、前章で空気力発生要因として挙げられた要素を参考に調べた。以降では、ロードセルにより測定した空気力を示す。

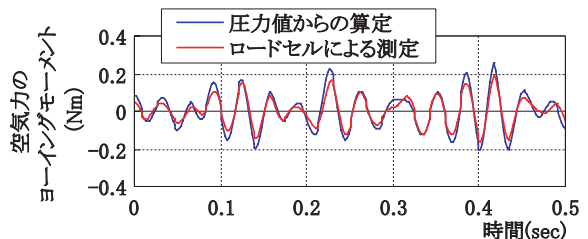


図4 圧力値から求めた空気力とロードセルから求めた空気力の比較（4両目）

##### (1) パンタグラフカバー

2章において、パンタグラフカバーの空気力発生への影響が大きいことがわかった。そこで、箱型、2次元型、3次元型の3種類のカバー（図5）を用意し、その影響を調べた。3次元型は、2次元型の側面を前後で絞り込んでいる。2次元型と3次元型には、両側に板状の側壁を併設することができ、2両目と4両目に搭載される（図6）。箱型は、4、5両目に分割して搭載される。なお、パンタグラフ本体は省略した。

まず、パンタグラフカバーの影響がどの位下流まで及ぶのかを調べるために、側壁を併設した2次元型を2両



図5 パンタグラフカバー

特集：環境技術



図6 パンタグラフカバー搭載位置

目だけ、4両目だけ、2両目と4両目の両方に搭載した場合の、4両目の車体に加わる空気力を計測した(図7)。2両目だけに搭載した場合、4両目への影響はほとんどなく、カバーを搭載しなかった場合とほとんど変わらない。カバーの影響は、搭載車両近辺に限定されることがわかる。また、2、4両目の両方に搭載した場合にも、4両目だけに搭載した場合に比べ、空気力は大きくならない。これは2両目のカバーがあるために、4両目のカバーに当たる気流速度が減速されたためと推測される。

次に、パンタグラフカバー形状の影響を調べるために、4両目のみに箱型、2次元型、3次元型の3種類のカバーを搭載して、4両目の車体に加わる空気力を測定した。なお、箱型の一部は、5両目の車両の前面に分割されて搭載される。また、2次元型、3次元型では、側壁をつけた場合、つけない場合および側壁だけをつけた場合についても測定している。図8に測定結果を示す。最も空気力が大きかったのは、箱型である。側壁を併設させた2次元型と3次元型も箱型について大きくなっている。また、パンタグラフカバー本体をつけずに、側壁だけをつけた場合もこれと同様に大きな空気力を生じていることから、側壁が空気力を増大させる要因となっていることがわかる。

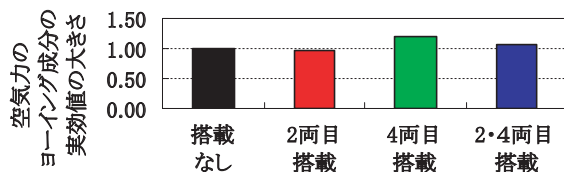


図7 パンタグラフカバー搭載位置による違い  
(縦軸は、「搭載なし」を1とした場合の値)

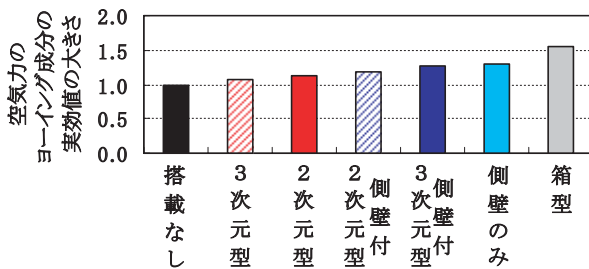


図8 パンタグラフカバー形状による違い  
(縦軸は「搭載なし」を1とした場合の値)

(2) 台車カバー

2章で、空気力発生への影響が大きかった、台車カバーの効果を確認するため、すべての車両の台車側面にカバーをつけた場合とつけない場合の4両目の車体に加わる空気力を測定した(図9)。台車カバーの効果が認められる。

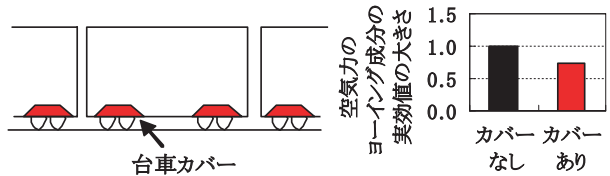


図9 台車カバーの効果  
(縦軸は「カバーなし」を1とした場合の値)

(3) 幌

現車試験において、車両間の連結部で大きな圧力変動が観察されている<sup>7)</sup>。この圧力変動を抑制するには、幌(外幌)が効果的と考えられ、2章においても下部幌の効果が認められている。そこで、風洞試験において、5両編成の車両間すべてに幌を模したビニール製フィルムの覆いをかけて、その影響を調べた。幌は、風洞模型への取り付けの容易さから車両側面のみに取りつけた。図10に4両目の車両に加わる空気力の測定結果を示す。空気力は幌の効果により減少している。

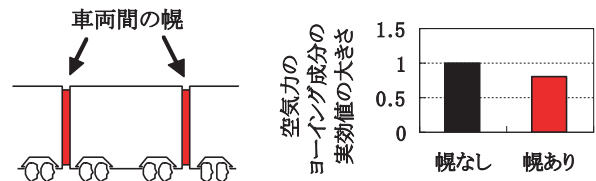


図10 幌の効果(縦軸は「幌なし」を1とした場合の値)

(4) 車体底面角部の丸み

数値シミュレーション結果より、編成全体の空気力の発生要因として、車体底面の流れの速度分布とその外側の流れの速度分布が違うために、流れが不安定になり渦が発生するというメカニズムが示唆されている<sup>1)</sup>。これより、車体底面の流れとその外側の流れが、その境界部でゆるやかに接するようにすれば、渦の発生が弱まると予想される。そこで、車体底面角部を丸くして、その効果を調べた。曲率半径の大きさは、現車換算で400mm(R小)と800mm(R大)である。5両編成の全車両に同一の底面形状を取りつけたときの4両目の車両に加わる空気力を比較した(図11)。Rの大きさに応じて空気力のヨーイング成分は減少している。

(5) フィン

前項で述べたように、異なった速度分布をもつ車体底面の流れとその外側の流れが接する境界部での気流の混

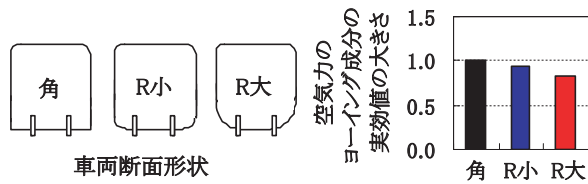


図11 車体底面角部の丸みの影響  
(縦軸は「角」を1とした場合の値)

じり合いを抑制することが、空気力の減少に効果的である。そこで、ここでは、この境界部に仕切り板(フィン)を入れ、両流れを分離することにより、渦の発生を抑制することを考えた。すべての車両において台車部も含め車両側面全域にわたりフィンを取りつけたもの(全体フィン)と、台車部を除いてフィンを取りつけたもの(部分フィン)と、フィンを取りつけないものの3種類について、4両目の車体に加わる空気力を測定した(図12)。フィンの鉛直方向長さは、車両限界を侵さない最大の長さ(現車換算165mm)とした。全体フィンについては、大きな効果が認められた。また、部分フィンについても、全体フィンほどではないが、空気力が減少している。

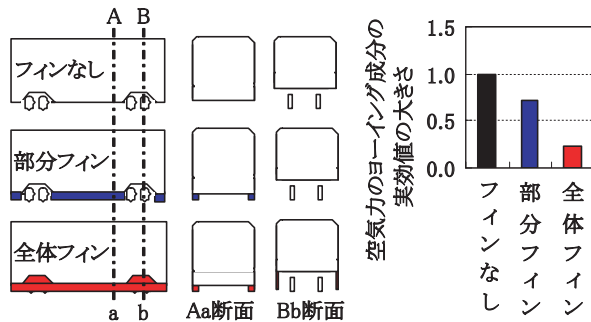


図12 フィンの効果(縦軸は「フィンなし」を1とした場合の値)

(6) 後尾部

現車試験において、最後尾部では編成全体で最大の圧力変動が生じることが観察されている<sup>1)</sup>。これは、数値シミュレーションによって、流れの剥離に起因するものであり、形状に依存することが明らかにされている<sup>2)</sup>。そこで、後尾部の形状を変化させて、その影響を検討した。

まず、後尾形状として、比較の基準とするため形状変化部が全くない切妻型、切妻型の上部を斜めに切り落とした2次元型、2次元型の側面を先端に向かって絞り込んだ3次元型の三つの形状を考えた。さらに、2次元型と3次元型は、形状変化部の長さが長いもの(2次元長型、3次元長型)と短いもの(2次元短型、3次元短型)を用意した。短型の形状変化部の長さ(現車換算3.5m)は長型(現車換算7m)の半分になっている。以上の5種類の後尾形状を取りつけたときの後尾車両に加わる空気

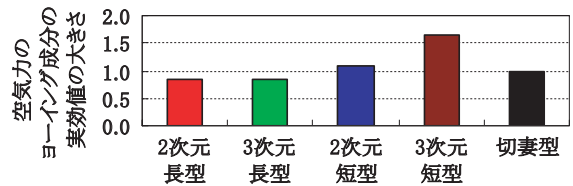
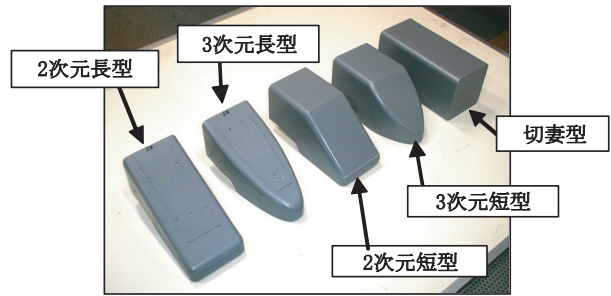


図13 後尾形状の影響(縦軸は「切妻型」を1とした場合の値)

力を測定した(図13)。3次元短型の大きな空気力が際立っている。数値シミュレーションによる解析<sup>2)</sup>では、側面からの非定常剥離が空気力発生の原因であることが示唆されており、側面からの剥離を抑える2次元型が推奨されているが、本結果はこれを裏付けるものである。長型では、剥離に伴う圧力変動が小さくなるため、2次元型と3次元型の差は小さくなっている。

4. 現車によるフィンの効果確認

前章の風洞試験で特に空気力低減に効果が認められたフィンについて、実際に現車に取りつけてその効果を調べた。

4.1 試験方法

16両編成の新幹線列車の先頭車から4両目までの車体側面下部に取りつけたフィンの有無により空気力に違いがでるかを調べた。前章の風洞試験によってフィンは台車カバーと併用し、車体の両側面全体を覆うように取りつけると大きな空気力低減効果があることが示されている。しかし、メンテナンス性等を考慮すると、台車部を覆うことは好ましくないため、今回は台車部を除いた車体側面(3.2節(5)の「部分フィン」に相当)に取りつけた。鉛直方向へのフィンの長さは長いほどその効果が大きいと考えられるが、空気バネが万が一潰れた場合でも車両限界を侵さないようにその長さ(90mm)を決定した。空気力は、4両目の車体の左右両側面に貼り付けた片側4点、合計8点の圧力センサーから算定した。また、同時に4両目の車体の台車上床面で左右振動加速度も測定した。図14にフィンと圧力センサー、加速度センサーの取り付け位置を示す。

特集：環境技術

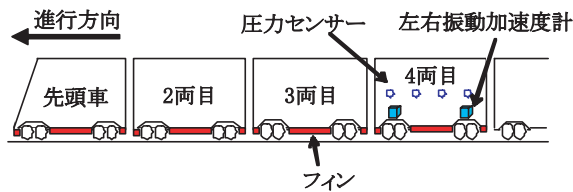


図14 フィンの効果確認のための走行試験概要  
(5両目以降の車両にフィンの設定なし。)

4.2 結果と考察

フィンを取りつけた車両が先頭側になったときのトンネル走行中のデータを解析した。空気力の実効値と代表的なパワースペクトルの例を図15に示す。フィンを取りつけることにより、空気力は小さくなることが確認できる。車体振動の実効値とパワースペクトルの例を図16に示す。車体振動の実効値において、フィンの有無による明確な差は見られない。これは以下の理由によると考えられる。4両目では空気力のピーク周波数が3～5Hzに分布しているのに対して、車体振動のピーク周波数は1～2Hzに分布している。そのため、フィンの空気力低減効果が認められた3～5Hzの領域では、車体振動にはもともと小さなパワーしか存在していないのでその効果があらわれにくいと考えられる。過去の走行試験データ<sup>1)</sup>

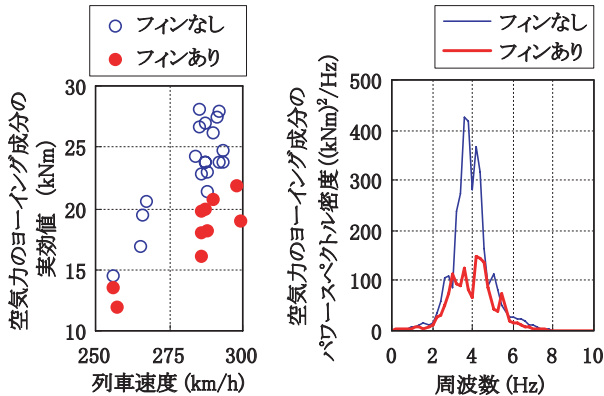


図15 空気力の実効値とパワースペクトル密度

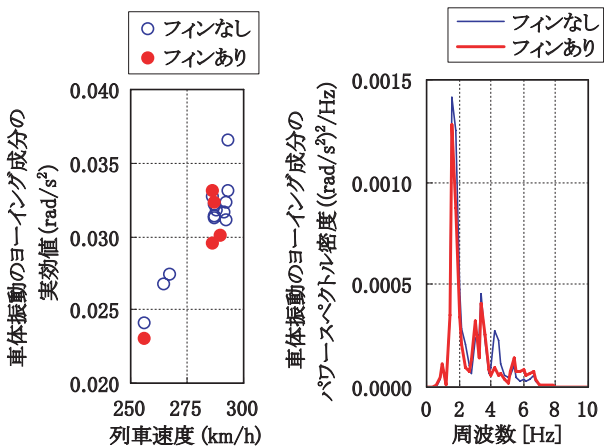


図16 車体振動加速度の実効値とパワースペクトル密度

から、3両目以降（1、2両目には、明確なピークが観察されない）の空気力のピーク周波数は、3両目から6～8両目ぐらいにかけて周波数が下がってきて、その後、一定（300km/h走行時、約2Hz）のまま推移する。したがって、およそ6～8両目以降の車両で、空気力と車体振動のピーク周波数が近くなる。よって、今後、車体振動に対するフィンの効果を調べるためには、少なくとも8両分以上のフィンの設置が必要であると思われる。

5. まとめ

空気力を低減させる車両形状を現車試験、風洞試験により探った。まず、車両形状を様々に変化させた現車試験データを統計解析し、空気力発生に影響を与える箇所としてパンタカバーや台車カバー、幌等を特定した。次に、風洞試験において非定常空気力を直接測定する方法を開発し、空気力発生要因としてあげられた箇所と底面形状、後尾形状を検討した。さらに、風洞試験で空気力低減に特に効果があったフィンについて、現車試験を実施し、空気力が低減していることを確認した。

謝辞

現車試験の実施およびデータの提供にご協力頂いた西日本旅客鉄道株式会社に感謝します。

文献

- 1) 鈴木昌弘：トンネル内走行時の車両に加わる空気力，鉄道総研報告，Vol. 14, No. 9, pp. 37-42, 2000
- 2) 鈴木昌弘，前田達夫，新井紀夫：列車まわりの流れの数値シミュレーション（第2報，後尾車両に加わる非定常空気力），日本機械学会論文集B編，Vol. 62, No. 595, pp. 1061-1067, 1996
- 3) 佐々木君章，鴨下庄吾，下村隆行：鉄道車両用セミアクティブサスペンション，鉄道総研報告，Vol. 10, No. 5, pp. 25-30, 1996
- 4) 藤本裕，宮本昌幸，島本洋一：新幹線電車の左右振動とその振動対策，鉄道総研報告，Vol. 9, No. 1, pp. 19-24, 1995
- 5) 河口至商：多変量解析入門，森北出版，1973
- 6) 鈴木昌弘，中出孝次，藤本裕：トンネル内の高速車両の動揺と空気力の相互作用，鉄道総研報告，Vol. 15, No. 5, pp. 19-24, 2001
- 7) Ishihara T., et al.: An investigation of lateral vibration caused by aerodynamic continuous force on high-speed train running within tunnels, Proceedings of World Congress on Railway Research E, pp. 531-538, 1997.