

# トンネル内走行時の在来線車両動揺に影響する 空気力の評価

鈴木 昌弘\* 佐久間 豊\*

## Estimation of Aerodynamic Force Affecting Vibration of Narrow Gauge Train Running Through Tunnel

Masahiro SUZUKI Yutaka SAKUMA

Although a number of researches have been made over the decade on aerodynamic force acting on Shinkansen trains running through tunnels which affects adversely ride comfort, any studies on the same effects on narrow gauge trains scarcely made. In this paper, we present results of on-track tests for estimating aerodynamic force acting on narrow gauge trains. The results are as follows: (1) The aerodynamic force, which stems from pressure fluctuations on the sides of a car, vibrates the car body running through a tunnel. (2) While the pressure fluctuations appear only on the train side facing the tunnel wall in double-track tunnels, the fluctuations in opposite phase on the both sides in single-track tunnels. By introducing the non-dimensional parameter using the air speed to the train and the train width, the on-track test data of the narrow gauge trains have indicated high coherence with those of the Shinkansen trains, although the non-dimensional peak frequencies of the pressure suggests that the pressure fluctuation develops faster along the narrow gauge trains than the Shinkansen trains.

キーワード：在来線，空気力，トンネル内動揺，走行試験

### 1. はじめに

新幹線の速度向上に伴い、乗り心地の面から、トンネル内走行中の車両の左右動揺が問題になることがある<sup>1)</sup>。この動揺の原因として、空気力の影響が注目され、そのメカニズムを解明するために、多くの新幹線列車において、車両に働く空気力の測定が行われてきた。それにより以下のような現象の特徴がわかってきている<sup>2)</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) 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、そして最後尾部で急激に大きくなる。また、圧力変動のピーク周波数は、3両目から6～8両目程度にかけて低下し、その後、最後尾車両まで、一定のまま推移する。

このような圧力変動が発生する要因として、数値シミュレーションにより、車体底面からの渦の発生とその移流及び最後尾部からの流れの剥離が示唆されている<sup>2)</sup>。

これまで、トンネル内車両動揺の現象は主に新幹線を対象として研究されてきた。しかし、高速化された在来線においても、同様の現象が現れる可能性がある。上に述べたように、トンネル内での圧力変動は、相対流速の二乗に比例して大きくなる。そのため、トンネルに対する列車の断面積比が大きい、単線トンネル内を走行中の在来線列車の相対流速は、複線トンネル内を走行する新幹線列車の相対流速に近くなることがあるからである。しかしながら、トンネル内走行中に在来線列車に加わる空気力についての報告はこれまでほとんどない。そこで、本研究では、在来線列車による現車試験の結果について新幹線列車の場合と比較しながら考察する。

### 2. 現車試験の概要

2種類の在来線車両A、B系について現車試験を行った。A系は5両編成の5号車について、B系は両数の異なる2種類の列車、5両編成の5号車と9両編成の9号車について、車体側面の圧力と振動加速度を測定した。圧力は、左右側面に各4点ずつ貼り付けた圧力センサーにより計測した。また、振動加速度は、前後台車の上に位置する車内通路上に左右振動加速度センサーを取り付けて測定した。図1に圧力センサーと振動加速度センサーの典型的な取り付け例を示す。

\* 環境工学研究部（空気力学）

特集：浮上式鉄道技術とその応用

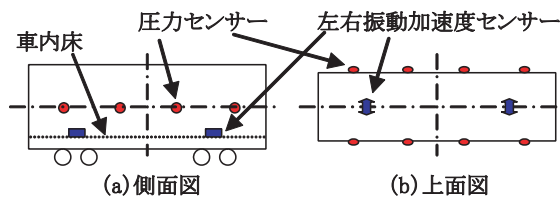


図1 センサー取り付け位置

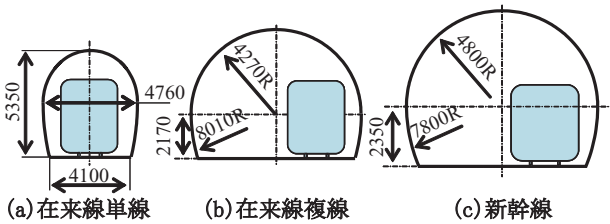


図2 トンネルと車両の断面図（単位：mm）

図2にトンネルと列車との幾何学的な関係を示す。A系は単線トンネルを、B系は複線トンネルを走行する。比較のために、新幹線トンネルも併記しておく。

3. 現車試験結果と考察

3.1 在来線列車に加わる空気力の特徴

最初に、A系の現車試験結果を用いて現象の特徴を述べる。図3に測定車両が後尾車になった場合の、列車が単線トンネルに突入する時の車両側面の圧力の波形例を示す。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。膨張波が列車を追い越していくと、圧力が大きく下がる。その後、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（図3(a)「解析区間」）、列車周りの空気の流れはほぼ定常な状態が続くが、その間も周期的な圧力変動が観察される。新幹線電車では、この圧力変動はトンネル壁に面した列車側面の方が大きい、単線トンネルを走行する在来線では図3(c)に示すように両側面で位相が逆の大きな圧力変動が生じている。（ここでは示さないが、複線トンネルを走行するB系では、新幹線と同様にトンネル壁に面した列車側面でのみ大きな圧力変動が観察された。）左右の車両側面の圧力の差（以降、差圧）が、車両の左右方向に作用する正味の力になる。図3(d)に示すように差圧は、トンネル突入後、しばらくの間大きくなっている。

車体左右側面に4個ずつ設けた圧力測定点の値から、次のようにして、車体に加わる空気力の左右成分とヨーイング成分を推定した。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

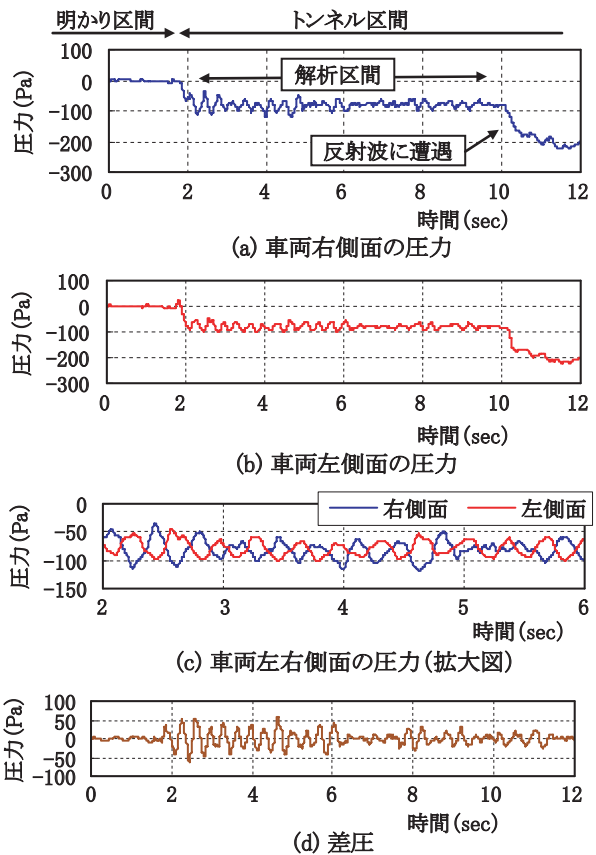


図3 単線トンネル突入前後のA系車両側面に生じる圧力波形の一例（列車速度：126 km/h）

圧力の差に各部分の面積をかけて、空気力の左右成分を、さらに車両中心（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た。ここでサンプリング区間は、図3(a)に示した「解析区間」とした。車両に加わる空気力の実効値を図4に示す。先頭車では、明かり区間とトンネル区間の差はほとんどないが、後尾車両では、トンネル区間で大きな空気力が働いている。

図5に左右振動加速度の実効値を示す。トンネル区間走行中の後尾車両の動揺が大きくなっている。

空気力が車両に対してなす仕事は、空気力に振動速度（振動加速度を積分して求める）をかけたもの（仕事率）を時間積分することで算定できる。図6はある時刻から10秒間の、トンネル区間を走行中の後尾車両に対して空気力がなす仕事を示したものである。空気力は車両に対して仕事をしていることがわかる。すなわち、空気力は車両を動揺させるように働いている。

次に、複線トンネルを走行するB系の結果も用いて、トンネル内走行中の後尾車両に加わる空気力の速度依存性について述べる。図7に列車速度で整理した空気力の実効値を示す。列車速度が増すにつれて、空気力は大きくなる。同じ列車速度で比べると、A系の方がB系より

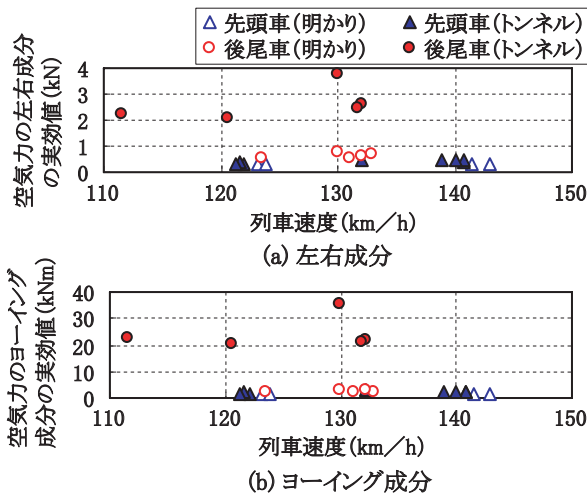


図4 空気力の実効値 (A系5両編成)

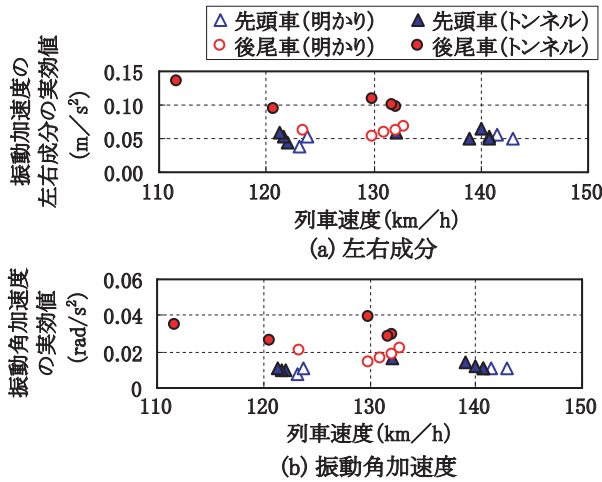


図5 振動加速度の実効値 (A系5両編成)

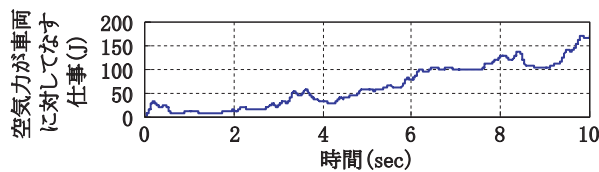


図6 空気力がA系5両編成後尾車両に対してなす仕事の一例 (列車速度：132 km/h)

も、大きな空気力が働いている。この要因としては、車両形状の違いよりも、相対流速の違いが大きい。すなわち、単線トンネルを走行するA系の相対流速が、複線トンネルを走行するB系の相対流速よりも大きくなるため、A系に大きな空気力が働く。相対流速は、特性曲線法による数値シミュレーションから求められる<sup>3)</sup>。相対流速を横軸として整理しなおすと、図8に示すように、単線トンネル、複線トンネルにかかわらず、空気力の大きさは相対流速のほぼ二乗に比例していることがわかる。

### 3.2 新幹線列車との比較

以上より、トンネル内走行中の在来線車両にも新幹線

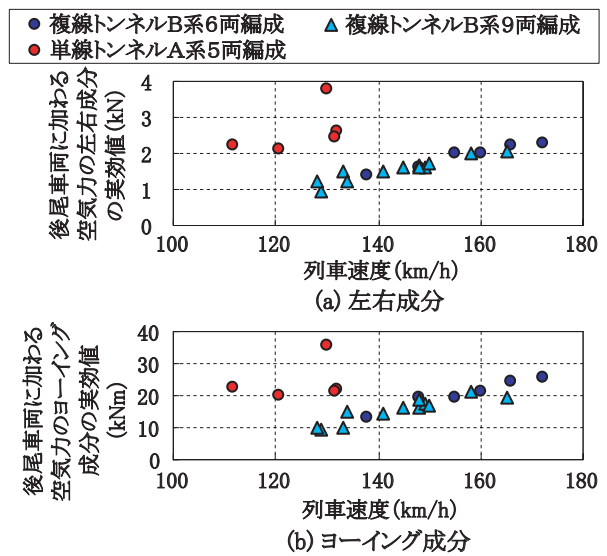


図7 後尾車両に加わる空気力の実効値

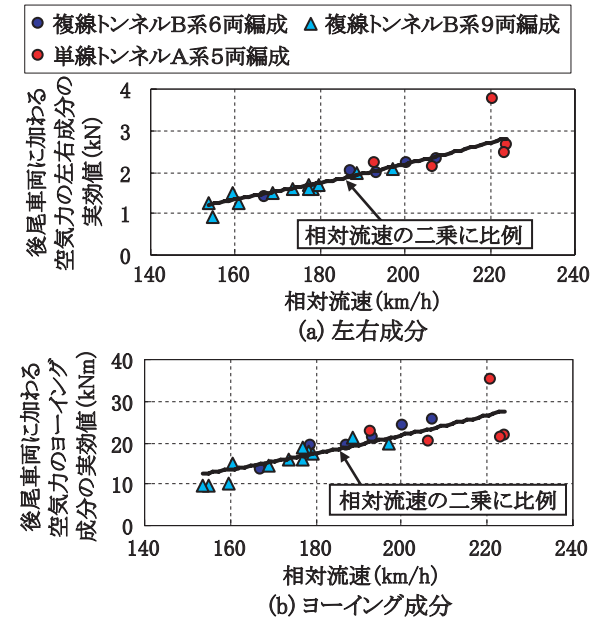


図8 相対流速と空気力の関係

と同じような変動圧力が発生していることがわかった。そこで、次に、無次元数を導入して、列車に沿った差圧変動の発達の様子を過去に行った新幹線の現車試験結果と比較する。

まず、差圧変動の大きさは相対流速の二乗に比例するので、差圧変動を実効値で表し、その大きさを表す係数として以下の無次元数を定義する。

$$\text{差圧変動係数} : (CA_p)_{\text{rms}} = 2 (\Delta_p)_{\text{rms}} / \rho u^2$$

ここで、 $(\Delta_p)_{\text{rms}}$  : 差圧の実効値 (Pa),  $\rho$  : 空気の密度 ( $\text{kg/m}^3$ ),  $u$  : 相対流速 (m/s) である。

次に、差圧変動のピーク周波数は相対流速に比例することが報告<sup>2)</sup>されているので、差圧変動の無次元周波数を以下のように定義する。

特集：浮上式鉄道技術とその応用

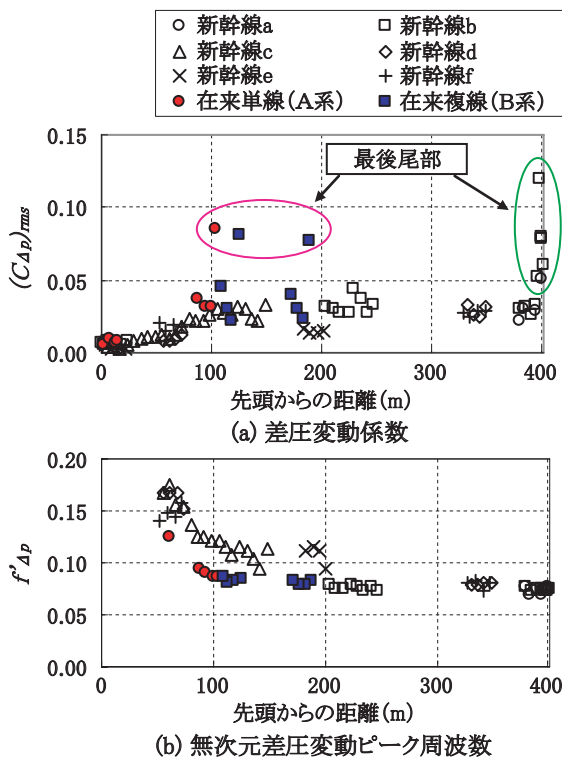


図9 差圧変動係数と無次元差圧変動ピーク周波数

無次元差圧変動ピーク周波数： $f^*_{\Delta p} = f_{\Delta p} d / u$

ここで、 $f_{\Delta p}$ ：差圧変動のピーク周波数 (Hz)、 $d$ ：代表長さ (m) である。ピーク周波数は列車幅に関係することが実験によって示唆されている<sup>4)</sup>ので、代表長さ $d$ として列車幅を用いる。

図9に今回の在来線の結果と過去に報告されている新幹線 (a～f系の6車種) の結果から求めた差圧変動係数と無次元差圧変動ピーク周波数を示す。横軸は、先頭からの距離を示す。まず、差圧変動係数の図を見ると、在来線の単線トンネル (A系) の103m、在来線の複線トンネル (B系) の124m及び188mの値 (図中のピンク色の線で囲った点) が突出しているが、それぞれの最後尾部での値であり、新幹線列車の最後尾部 (図中の緑色の線で囲った点) での剥離による大きな圧力変動に対応している。最後尾部以外の値は、ほぼ、新幹線の値と一致している。在来線の方が若干大きめの値のものがあるが、その理由として車両の平滑化の程度の違いが考えられる。つづいて、無次元差圧変動ピーク周波数の図について述べる。ピーク周波数は1, 2両目では、明確なピークが観察されないので、プロットしていない。在来線の結果は、先頭から距離が長くなるに従い周波数が下がるという新幹線の傾向と一致している。新幹線に比べ周波数の下がり方が早い、これは在来線車両の平滑化が新幹

線ほど行われていない (特に床下機器) ために、圧力変動の発達が促進され、その結果、周波数の下がり方が早くなっていると考えられる。なお、新幹線、在来線にかかわらず圧力変動の実効値が大きくなる最後尾でも、その周波数は列車中間部分と変わらない。これは、中間部分の流れ構造と最後尾部での剥離の間に相互作用があるためと思われるが、その詳細は不明である。

4. まとめ

在来線車両がトンネル内走行中に加わる変動空気力について、現車試験により調べ、新幹線の結果と比較検討した。その結果、以下のことが明らかになった。

- トンネル内を高速で走行中の在来線車両には、変動空気力が加わり動揺が増大する。
- 在来線複線トンネルでは、新幹線と同様に圧力変動がトンネル壁側の車両側面のみで生じるが、在来線単線トンネルでは列車の両側面で圧力変動が生じる。その際、圧力変動の位相は左右側面で逆になっている。
- 列車に沿った差圧変動の発達は、新幹線とほぼ同じ傾向を示すが、在来線の方が新幹線より圧力変動のピーク周波数の下がり方が早い。

なお、在来線に対しても、新幹線と同様の変動空気力低減対策法<sup>5)</sup>が適用できると考えるが、在来線の特性を考慮した対策法の検討は今後の課題である。

謝辞

現車試験にご協力いただいた北海道旅客鉄道株式会社及び西日本旅客鉄道株式会社の関係各位に謝意を示します。

文献

- 1) 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
- 2) 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
- 3) 飯田雅宣, 前田達夫: トンネル内圧力変動シミュレーション, 鉄道総研報告, Vol.14, No.7, pp.54-62, 1990
- 4) Suzuki, M.: Studies of the flow fields around a train in tunnel, Proceedings of Conference on Modelling Fluid Flow, pp.702-703, 2003.
- 5) 鈴木昌弘, 中出孝次, 井門敦志: トンネル内車両動揺の車両形状変更による低減方法, 鉄道総研報告, Vol.22, No.5, pp.45-50, 2008