

# 鉄道の空気力学に関する最近の研究開発

飯田 雅宣\*

## Current Status of Research and Development on Railway Aerodynamics

Masanobu IIDA

Aerodynamic phenomena in railways range widely, related to almost every aspect of the fundamentals of railways: safety, environment, energy-saving and comfort. Aerodynamics particularly has a great impact on high-speed railways like Shinkansen. This article reviews recent research activities on railway aerodynamics at RTRI: (1) vehicle aerodynamic characteristics such as cross-wind stability and resistance, (2) the effects of train slip stream, pressure variations, under-floor flow, etc. on nearby people and ground structures, (3) wayside environment impacts by tunnel micro-pressure wave and infrasound.

キーワード：Aerodynamics, Cross-wind stability, Micro-pressure wave

### 1. はじめに

鉄道車両は、大気中を地上構造物（地面、トンネル等）に近接して走行する。この車両、地上構造物、空気の三者の相対運動により時間的・空間的に変化する流れ場が引き起こされ、走行車両が空気力を受けると同時に、他の列車、地上設備、車内・駅の乗客・乗員・作業員、沿線の住環境など、様々な対象に影響が及ぶ。空気力学的現象の大きさは、三者の相対速度に依存するため、一般に走行速度が高いほどその影響が大きく現れる。

鉄道で問題となる空気力学的現象は多岐に渡る。表1に主な空力現象と関連する鉄道システムの要素を示す。車両が明かり区間（トンネル外）を走行する時と、トンネル区間を走行する時では、自然風の状況、車両まわりの空気の流れ、影響を受ける対象が大きく異なるため、考慮すべき現象の種類も異なってくる。この表からわかるように、空力現象は、安全性、環境調和性、省エネルギー性、快適性など、鉄道の基本的特性のほとんど全てに関係している。

本稿では、空力現象に関わる最近数年間の鉄道総研の研究成果を紹介する。なお、パンタグラフの風切り音に代表される可聴域の空力騒音<sup>1)</sup>は、沿線環境に関わる空力現象の中で最重要課題の一つであるが、鉄道騒音全体の中で位置づけて、転動音などの他の音源と合わせて解説するのが適当と考えられるので、本稿では省略する。

### 2. 安全性に関わる研究

#### 2.1 横風時の空力特性

横風時の空力特性は、安全に関わる空力現象の中でも

特に重要な項目の一つである。横風時の走行安全性の評価は、車両、気象、空気力学の三分野での評価を総合して行われる。その中で、空気力学分野の役割は、横風を受けた時に車両に作用する空気力を定量的に評価することである。現在、車両に働く空気力の定量的評価は、他の交通機関や土木建築構造物の場合と同様、主として縮尺模型を用いる風洞試験によって行われている。したがって、風洞試験の信頼性を高めることが重要な研究課題である。

初期（昭和30年代）の横風転覆に関する検討では、中間車両の断面のみに注目し、真横から定常な一様流が吹くという単純な状況を想定していたが、現在は、幾何学的な相似性についても、気流の相似性についても、より実際の状況に近い条件の下で風洞試験を実施している。車両模型では、先頭車を含む3次元車体形状や床下機器などの付加物をほぼ再現し、地上構造物模型では、橋梁や盛土などを地上高さなども含めて再現している。気流については、特に先頭車の場合に、風向角の影響が大きく現れるため、車両に対する風向角が小さい場合も含めて風洞試験を行っている。さらに、流入気流を一様流ではなく、自然風を近似した乱流境界層とする風洞試験方法を開発し、最近では、主としてこの方法を用いている。

縮尺模型を用いる風洞試験では、力学的相似条件に関わるレイノルズ数の影響が問題になる場合がある。しかし、鉄道車両に横風が当たるといった状況は、角張った物体まわりの流れとみなせることが多く、この場合はレイノルズ数の影響が小さいことが知られている。また、上述のように流入気流として乱流境界層を用いる場合、一様流の場合よりもレイノルズ数の影響が現れにくい傾向がある。これらのレイノルズ数の影響については、自然風の環境中に置いた実物大の橋梁・車両模型での長期観

\* 環境工学研究部 部長

特集：環境技術

表1 鉄道で問題となる主な空力現象と車両・地上設備の関連要素

明かり区間（トンネル外）

物理量	空力現象	関連項目	鉄道システムにおける関連要素	地上設備
空気力	横風に対する空力特性	走行安全	車両断面、先頭部	軌間、構造物種別（橋梁、築堤、トンネル坑口等）、付帯設備（高欄、防風柵、防音壁等）
	空気抵抗	省エネルギー	車両断面、列車長、床下・台車部、屋根上部、車両間隙部、先頭・後尾部、車体側面	
	パンタグラフ揚力	集電安定性	パンタグラフ	架線
圧力	すれ違い時動揺	車内快適性	車両断面、先頭・後尾部	線路中心間隔
	通過時圧力変動	設備安全	先頭・後尾部、床下・台車部	線路近接設備、付帯設備（高欄、防風柵、防音壁等）
風速	バラスト飛散・着氷雪	設備安全	先頭部（排障器・スノーブラウ）、床下・台車部	
	ホーム列車風	駅安全性・快適性	先頭・後尾部、列車長、車両間隙部	ホームドア・ホーム柵
音	空力騒音	沿線環境、車内快適性	パンタグラフ、屋根上部、車両間隙部、先頭部、床下部、車体側面	防音壁、軌道構造（バラスト、スラブ）
	低周波音	沿線環境、車内快適性	先頭・後尾部、床下・台車部、車両間隙部	

トンネル区間・地下鉄道

物理量	空力現象	関連項目	鉄道システムにおける関連要素	地上設備
空気力	(空気抵抗)	省エネルギー	車両断面、列車長、床下・台車部、屋根上部、車両間隙部、先頭・後尾部、車体側面	トンネル断面、トンネル長、立坑・斜坑・横坑
	(パンタグラフ揚力)	集電安定性	パンタグラフ	トンネル坑口、架線
	トンネル内車両動揺	車内快適性	後尾部、床下部、屋根上部、編成連結部	トンネル断面
圧力	(通過時圧力変動)	設備安全	車両断面、列車長、先頭・後尾部、床下・台車部	トンネル断面、トンネル長、立坑・斜坑・横坑、付帯設備（電気・信号設備、側溝等）
	車内気圧変動	車内快適性、車体強度	車両断面、列車長、車体気密度、換気装置	トンネル断面、トンネル長、立坑・斜坑・横坑
風速	地下駅列車風	駅快適性	車両断面、編成長	地下駅構造、トンネル断面、立坑・斜坑・横坑
音	(空力騒音)	沿線環境、車内快適性	パンタグラフ、屋根上部、車両間隙部、先頭部、床下部、車体側面	トンネル坑口、軌道構造（バラスト、スラブ）
	トンネル微気圧波	沿線環境	先頭部、車両断面	トンネル断面、トンネル長、トンネル坑口（緩衝工）、トンネル内軌道構造（バラスト、スラブ）、立坑・斜坑・横坑
温度・湿度	トンネル内火災・気温上昇	設備安全、駅快適性	走行抵抗	トンネル断面、立坑・斜坑・横坑、換気・排煙装置

測と、幾何学的及び運動学的相似条件を可能な限り一致させて実施した40分の1縮尺模型を用いた風洞試験を比較することによる検討し、転覆限界風速の検討に必要な定常空気力の評価値に関して風洞試験と実物大試験の結果がよく一致することを確認している<sup>2)</sup>。

風洞試験に関する現在の主要課題は、走行車両、静止地面（地上構造物）、自然風という三者の相対運動の影響である。通常の風洞試験では、測定部内に固定した車両模型を用いるため、車両と地面の相対運動は再現されていない。この相対運動が、車両まわりの流れや空気力に及ぼす影響について、風洞測定部内で模型車両を走行させる基礎的実験を行って調べている<sup>3)</sup>。

横風時の空力特性に関しては、以上の風洞試験に関わる課題のほか、防風柵の効果に関する研究<sup>4)</sup>、観測用風速計の設置位置検討のための構造物まわりの風速分布に関する研究<sup>5)</sup>、流体数値シミュレーションによる基礎的研究<sup>6)</sup>など、種々の課題に取り組んでいる。

2.2 線路に近接する構造物および人への空力的影響

走行列車の近傍では、走行速度に比例する大きさの風速変動、走行速度の2乗に比例する大きさの圧力変動が発生し、線路に近接して存在する構造物や人などに影響が及んで、問題となることがある。

防音壁などの明かり区間の地上設備の耐風性（強度）を検討する際、通常は強風などの自然風を想定するが、高速鉄道では、走行列車による影響についても検討が必

要な場合がある。一方、トンネル内の設備については、自然風ではなく、走行列車の影響を考慮した検討が必要である。また、全覆い駅やスノーシェルターは、明かり区間とトンネル区間の中間的な状態となっているが（空気の漏れがあるトンネルとみなせる）、このような場合に発生する圧力変動・風速変動の現象について、現地試験、模型実験、数値計算による研究を行っている<sup>7)</sup>。

走行列車による空力的影響として、バラスト（碎石）飛散の問題も重要である。バラスト飛散に関しては、車両下部の着氷雪・落雪が関係する場合と、関係しない場合の二通りのメカニズムがあるが、いずれの場合も、台車や床下機器が存在する車両床下部とバラスト軌道面間に複雑な乱流場が形成されることが主原因となっている。このような床下流れの詳細を調べるために、現車や模型車両の走行試験を行って、車両側および地上側から流速を測定するとともに、移動地面板等を用いた風洞試験を進めている<sup>8)</sup>、<sup>9)</sup>。また、着氷雪が関係する現象の対策として、台車部への着氷雪を低減するデフレクターの開発を行っている<sup>10)</sup>。

空力的影響による身近な安全問題として、乗客が駅のホーム上にいるときに通過列車による風を受ける「ホーム列車風」の現象がある。実際の駅ホームでの測定とともに、大型風洞測定部内での被験者による風速体感試験を行い、風速の最大値だけでなく風の作用時間も考慮した新たなホーム列車風評価方法を検討している<sup>11)</sup>。

### 3. 沿線環境に関わる研究（低周波音）

#### 3.1 トンネル微気圧波

およそ100Hz以下の音を低周波音という。低周波音は、人の耳には聞こえない、あるいは聞こえにくい現象であり、家屋の建具振動などの振動問題の一種として捉えられることも多い。鉄道における沿線低周波音の現象として代表的なものは、トンネル微気圧波である。これは、列車のトンネル突入時に発生する圧縮波がトンネル内を音速で伝播し、トンネル出口に到達した時に、坑口から外へ放射されるパルス状の圧力波のことで、坑口付近で衝撃音が発生したり、民家の建具を揺らすなどの影響を及ぼす。

微気圧波の予測評価に関しては、列車のトンネル突入段階、トンネル内の圧縮波伝播の段階、坑口からの微気圧波の放射の三段階のそれぞれに対して研究を進めている。突入段階に関し、緩衝工突入時の圧縮波形成に関する解析的研究<sup>12)・13)</sup>、三次元形状列車模型発射装置を用いた実験的研究<sup>14)</sup>、伝播段階に関し、斜坑・立坑を有する長大トンネル内の圧縮波伝播過程における波形の変形を高精度かつ効率的に計算できる解析手法の開発<sup>15)</sup>、放射段階に関し、トンネル坑口付近の地形を考慮した微気圧波の予測手法の研究<sup>16)</sup>などを進めている。

低減対策に関しては、既存対策の性能向上に関する研究と従来とは異なる原理に基づく新規の対策に関する研究の両方を進めている。微気圧波低減の代表的な既存対策は、列車先頭部形状の最適化およびトンネル入口緩衝工の設置・延長である。このうち先頭部形状の最適化については、以前のトンネル坑口に緩衝工がない場合を対象とした最適化から、緩衝工がある場合の最適化が行えるように発展させた<sup>17)</sup>。入口緩衝工については、側面開口部の開け方がその性能を左右するが、従来無視していたトンネル内での圧縮波変形の影響を考慮して開口部を決定する新たな手法を開発した<sup>18)</sup>。新規の対策としては、今後大深度地下鉄の普及に伴い増加すると予想される立坑などのトンネル枝坑から発生する微気圧波の低減方法に関する研究を行った<sup>19)</sup>。

#### 3.2 その他の低周波音

高速列車のトンネル突入・退出時には、微気圧波以外にも、突入波・退出波などの類似の圧力波が発生する。これらの圧力波は単独では微気圧波よりも小さいが、種々のタイミングで発生する複数の圧力波が特定の観測点で重なり合って、大きくなる場合があり、このような状況を対象とした研究を行った<sup>20)</sup>。また、トンネル内を列車が走行中に、両坑口から振幅は小さいが継続時間の長い低周波音が発生するという現象があり、車両まわりの非定常流れとの関連に注目した研究を進めている<sup>21)</sup>。

明かり区間についても、速度向上とともに、低周波音が増大する傾向が見られる。明かり区間低周波音の原因には空力的に発生する音と高架橋等の構造物が振動して発生する音があり、現地試験によって実態解明を行った。さらに、空力的低周波音のメカニズム解明のため、現車試験、模型実験による基礎研究を行っている<sup>22)</sup>。

### 4. 省エネルギーに関わる研究（空気抵抗）

新幹線などの高速鉄道では、走行抵抗の過半を空気抵抗が占めており、その低減が重要である。新幹線車両についてみれば、先頭・後尾部は流線形化され、中間車両の側面と屋根上については、騒音対策の必要性などから、かなりの程度の平滑化がすでになされている。したがって、現在は、台車などの車両床下部の空気抵抗の相対的寄与度が大きくなっており、車両床下流れと空気抵抗の関係の解明が研究課題である。この課題は、前述のバラスト飛散の問題や、台車部等からの空力騒音とも関連するため、移動地面板を用いた風洞試験や模型走行実験などの手法を用いて包括的に研究を進めている<sup>23)</sup>。

一方、在来線についても空気抵抗低減の必要性が増しつつある。特に切妻車両の先頭部では、流れが大きく剥離し、空気抵抗や圧力変動・列車風が増大する傾向にあるため、この剥離現象の対策に関する研究を、風洞試験や現車試験などにより進めている<sup>24)</sup>。研究成果の一部は最近の在来線車両の設計に反映されている。

### 5. 快適性に関わる研究

#### 5.1 トンネル内圧力変動

列車が高速でトンネルを通過する際にトンネル内に発生する圧力変動が車内に浸透すると、車内の乗客が耳に不快感を感じる。対策としては車体を気密構造化することであるが、車体構造や換気装置の設計のため、圧力変動の大きさを事前に予測することが必要になる。この目的のためには、トンネル内の一次元非定常圧縮性流れに基づく数値計算が有効であり、400km/h以上の高速域に対応する計算手法<sup>25)</sup> および立坑部の機械換気装置に対応した計算手法<sup>26)</sup>の開発を行った。また、類似の問題として、緩衝工のない長大スラブ軌道トンネル内を列車が走行中に、対向列車の突入時に発生した急峻な波面を有する圧縮波と遭遇することにより、車内で突然衝撃音が聞こえるという現象（本質的には微気圧波と同一の現象）があり、実態解明と対策の検討を行った<sup>27)</sup>。

#### 5.2 トンネル内車両動揺

走行速度が同じでも、トンネル内では明かり区間よりも列車に相対的な流速が高くなる傾向があるため、車両

特集：環境技術

やパンタグラフが受ける空気力は、一般に明かり区間よりもトンネル内の方が大きい。その結果、種々の影響が現れるが、その一つに乗り心地に関わるトンネル内の車両動揺の問題がある。これは、車両まわりの非定常流れに起因して発生する変動空気力により車体が左右に加振されるとい現象で、現車試験、数値シミュレーション、理論解析により、検討を進めている<sup>28), 29), 30)</sup>。

6. おわりに

鉄道の空気力学という言葉から一般の方が連想するのは、流線形先頭部で空気抵抗を低減するというようなことではないだろうか。もちろん、それも代表的な事項の一つではあるが、本稿で述べたように、鉄道、特に高速鉄道では、他にも空力現象に起因する様々な問題が存在する。日本は、世界に先駆けて新幹線という高速鉄道システムを実用化することで、トンネル内圧力変動、微気圧波、空力騒音など、いくつもの新たな空力問題に直面した。しかし、その度に、車両、施設など分野の境界を越えた関係者の努力により、問題の解決を図ってきた。今後も、鉄道の高速度化や海外展開に伴い、空気力学に関するだけでも多くの課題の解決が迫られることになると予想されるが、期待に応えられるよう全力で取り組んでいきたいと考えている。

文 献

1) 高石武久：鉄道車両の空力音について，日本風工学会誌，Vol.36, No.3, 2011  
 2) 鈴木実ほか：横風に対する車両の空力特性に関する実物大試験と風洞試験，J-RAIL，2007，pp.231-234  
 3) 鈴木実：模型走行装置を用いた横風に対する鉄道車両の風洞試験，日本風工学会誌，Vol.36, No.3, 2011  
 4) 種本勝二ほか：風洞実験による橋梁上の防風柵まわりの風速測定，土木学会 65 回年次学術講演会，2010，pp.639-640  
 5) 荒木啓司ほか：構造物周りの風速計位置が観測値に及ぼす影響の評価，鉄道総研報告，Vol.25, No.7, 2011，pp.43-48  
 6) 中出孝次ほか：横風を受ける盛土上の流れの数値シミュレーション，鉄道総研報告，Vol.24, No.9, 2010，pp.51-56  
 7) 武居泰ほか：駅における高速列車通過時の圧力変動と部材への影響評価法，鉄道総研報告，Vol.21, No.8, 2007，pp.53-58  
 8) 井門敦志：車上側および地上側からの計測による車両床下流れの評価，鉄道総研報告，Vol.23, No.7, 2009，pp.39-44  
 9) Ido, A., et al.: Development of a model running facility for a study on under-floor flow, JSME J. Mech. Sys. Trans. Log., Vol.3, No.1, 2010, pp.294-304.  
 10) 宍戸真也ほか：鉄道車両台車部の着氷雪低減デフレクターの開発，鉄道総研報告，Vol.23, No.3, 2009，pp.29-34  
 11) 小美濃幸司ほか：駅ホームにおける列車風評価法，人間工学，Vol.47, No.3, 2011，pp.79-89

12) Howe, M.S., et al.: Rapid calculation of the compression wave generated by a train entering a tunnel with a vented hood, J. Sound Vib., No.297, 2006, pp.267-292.  
 13) Iida, M., et al.: Compression wave generated by a high-speed train entering a tunnel fitted with a hood with a long slit window, J. Low Freq. Noise, Vib. Act. Ctrl. Vol.26, No.4, 2007, pp.227-247.  
 14) Fukuda, T., et al.: Model Experiments on the Tunnel Compression Wave Using an Axisymmetric and Three-dimensional Train Model, IWRN10, 2010, pp.419-426.  
 15) Miyachi, T., et al.: A Simple Scheme for Calculating Distortion of Compression Wave Propagating Through a Tunnel with Slab Tracks, 28th Int. Symp. on Shock Waves, 2011.  
 16) 宮地徳蔵：トンネル坑口周りの地形を考慮した微気圧波放射モデル，鉄道総研報告，Vol.24, No.9, 2010，pp.23-28  
 17) Kikuchi, K., et al.: Optimization of train nose shape for reducing micro-pressure wave radiated from tunnel exit, J. Low Freq. Noise, Vib. Act. Ctrl. Vol.30, No.1, 2011，pp.1-19.  
 18) 宮地徳蔵ほか：長大スラブ軌道トンネルの緩衝工開口部の最適化，日本流体力学会年会，2008  
 19) 斎藤実俊ほか：トンネル枝坑坑口からの微気圧波の低減方法，鉄道総研報告，Vol.24, No.1, 2010，pp.41-44  
 20) Takami, H., et al.: Experimentation and analysis of pressure waves generated when a high-speed train passes through a short tunnel, INTER-NOISE, 2011.  
 21) Kikuchi, K., et al.: Continuous pressure waves generated by a train running in a tunnel, J. Low Freq. Noise, Vib. Act. Ctrl. Vol.28, No.2, 2009，pp.117-132.  
 22) 高見創ほか：明かり区間走行時に生じる高速列車の低周波音分析，鉄道総研報告，Vol.23, No.7, 2009，pp.5-10  
 23) 井門敦志：鉄道車両の空気抵抗低減に関する実験的研究，日本機械学会 2007 年度年次大会，2007  
 24) 佐久間豊ほか：切妻型車両のトンネル突入時に発生する圧縮波(第1報, 第2報)，日本機械学会論文集，Vol.76, No.770, 2010，pp.120-127, pp.128-134  
 25) 斎藤実俊ほか：鉄道トンネル内における 1 次元非定常圧縮性流れの数値シミュレーション，日本機械学会論文集，Vol.75, No.760, 2009  
 26) 梶山博司ほか：機械換気を行う高速鉄道トンネル内の流れに関する数値シミュレーションの試み，日本機械学会 2009 年度年次大会，2009  
 27) Fukuda, T., et al.: Interior explosive sound caused when a train encounters a compression wave inside a long slab-tracked tunnel, 14th Int. Symp. on Aero. Vent. Tunnels, 2011, pp.213-225.  
 28) Suzuki, M., et al.: Full-scale measurement and numerical simulation of flow around high-speed train in tunnel, JSME J. Mech. Sys. Trans. Log. Vol.1, No.3, 2008, pp.281-292.  
 29) Sakuma, Y., et al.: Dynamics of trains and train-like articulated systems travelling in confined fluid - Part1 and Part2, J. Fluids Struct., Vol.24, No.7, 2008, pp.932-953, pp.954-976.  
 30) 鈴木昌弘ほか：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, 2008，pp.45-50