

# 鉄道における空気力学・騒音に関する最近の研究開発

長倉 清\*

## Recent Studies on Railway Aerodynamics and Noise

Kiyoshi NAGAKURA

Aerodynamic phenomena cause various problems on railways. The improvement of aerodynamic characteristics of railway vehicles and infrastructures can increase the value of railway from the view point of safety, convenience, harmony with the environment, cost reduction, etc. This paper introduces the outlines of the recent studies on railway aerodynamics and noise made by the Railway Technical Research Institute.

キーワード：空気力学，横風，空気抵抗，着雪，トンネル火災，トンネル内温熱環境，騒音，トンネル微気圧波

### 1. はじめに

大気中を車両が走行する鉄道において、空気力学的な現象に伴う問題は多岐に渡る。車両側への影響に関する現象としては、強風による車両の転覆、車両の空気抵抗、変動空気力による車両動揺、パンタグラフの揚力変動などが、線路に近接する構造物や人に影響を及ぼす現象としては、列車通過時の圧力変動、バラスト飛散、着冰雪、ホーム上での列車風などがある。空力音（低周波音を含む）、トンネル微気圧波などの現象は鉄道沿線の空間に影響を及ぼす環境問題となる。また、トンネル区間においては、トンネル内の温熱環境や火災時の熱気流の流動も重要な課題となる。

本稿では、これらの鉄道の空気力学・騒音に関する諸問題を車両に作用する空気力、台車への着雪、トンネル内の空気流動、沿線環境の各分野に分類し、それぞれの分野における鉄道総研の最近の研究開発を紹介する。

### 2. 車両に作用する空気力に関する研究

#### 2.1 横風に対する車両の空力特性

強風時における列車の安全性を確保するために、防風柵の設置や車両諸元の変更等のハード対策、運転規制等によるソフト対策が行われている。これらを適切に組み合わせることで車両転覆のリスクを軽減するためには、沿線における強風の特長、車両の運動力学的特性と合わせて、強風時における車両の空気力学的特性を把握し、それらを統合して安全性を評価する必要がある。

強風により車両に働く空気力の評価は、主に風洞試験

に基づいて行われている。初期の検討では、平地上にある中間車両に真横から一様な風が吹くという単純な状況を想定していた。これに対して、現在は先頭車両を含む3次元車体形状と橋梁や盛土などの地上構造物を模擬し、気流についても自然風の平均風速や乱れ度の分布を模擬した気流場（乱流境界層）が用いられている<sup>1)</sup>。

この手法を用いた在来線における代表的な車両形状(5種類)、線路構造物形状(7種類)に関する風洞試験から空気力係数の一覧表が作成され<sup>2)</sup>、車両の強風に対する耐力指標である転覆限界風速の概略評価に活用されている。さらに、海岸部によく見られる片切片盛地形<sup>3)</sup>や高欄や防風柵がある構造物<sup>4)</sup>、など、上記代表的構造物には当てはまらないケースにおける空気力係数を評価する研究も進めている。

一方、車両を静止させた状況で実施している風洞試験と実際に走行している車両とは、厳密には乱流境界層中の鉛直方向の風向・風速分布が異なるため、車両模型走行装置を用いた、より現実に近い条件での風洞試験に関する研究を進めている<sup>5)</sup>。これまでの試験結果より、単純化した通勤型車両が盛土や平地を走行する場合においては、車両転覆に最も影響の大きい横力係数に関して走行条件と静止条件で差が小さいことが確認された<sup>5)6)</sup>。

以上に述べた実験的手法に加えて、風洞試験を効率的に実施するための支援ツールとして、風洞試験を再現可能な数値シミュレーション手法の開発についても取り組んでいる。計算負荷の低減のため、乱流境界層の計算と車両周りの流れの計算を分離したシミュレーション手法を開発し、高架橋上および築堤上の車両を対象とした計算では風洞試験を良好に再現できることを確認した<sup>7)</sup>。開発したシミュレーション手法を防風壁の空気力低減効果評価に適用する方法について、現在検討を進めている。

\* 環境工学研究部長

## 特集：空気力学・騒音

## 2.2 空気抵抗

高速で走行する新幹線車両では、走行抵抗の大部分を空気抵抗が占めるため、走行エネルギー低減のためには、空気抵抗の低減が重要となる。新幹線車両においては、長大編成であること、先頭・後尾部が流線形化されていることから、空気抵抗の大部分は中間車両部が占めており、その低減のためには車両各部の平滑化が有効である。

最近の新幹線車両で主に騒音低減のために設置されている台車側面カバーや車両連結部全周幌などは、結果的に空気抵抗の低減にも寄与していると考えられ、さらなる空気抵抗低減のためには、これまであまり着目されてこなかった車両表面の細かな凹凸が空気抵抗に及ぼす影響を評価する必要があると考えられる。

そこで、車両表面の細かな凹凸のうち、車両側面の窓や引戸の凹部に着目した風洞試験を実施し、空気抵抗への影響を定量的に評価した<sup>8)</sup>。その結果、現行タイプの引戸と窓を比べると1個あたりの空気抵抗は引戸の方が20倍程度大きいこと、中間車1両について引戸4個、窓40個の条件で評価した場合、引戸と窓の凹部をすべて解消して車両側面を平滑化すれば、この空気抵抗を約2.6%低減可能であることが示された。

2.3 空力ブレーキ<sup>9)</sup>

新幹線の速度向上においては、安全性能の確保が大前提となる。安全性能には地震発生時などの緊急時における制動性能を含んでおり、現行以上の高速域から現行と同等以下の距離で停止することが一つの性能目標になる。緊急時の制動方法として、車輪の回転を摩擦力で機械的に止めるディスクブレーキの性能向上が進んでいるが、さらに高速域の性能を安定化するため、空気抵抗を利用した空力ブレーキ装置の開発に取り組んでいる。

営業車両に空力ブレーキを搭載する際には、旅客定員を確保するため搭載機器を小型化しつつ、高速域における減速性能を向上することが求められる。そこで、装置を車体の屋根上に搭載可能なように薄型・小型化したうえで、列車全体に装置を分散させる方式を考案した。

開発した装置は2枚1組の抵抗板に掛かる空気圧力の差を利用して走行風で展開する機構を組み込んでおり、これにより装置厚さ65mm、装置質量36kgの小型・軽量の構成を実現した。試作機を用いた風洞試験によりブレーキ力や動作時間について性能確認を行うとともに、装置の屋根上への配置を風洞試験と数値解析から検討し、装置を複数台搭載する際には左右方向に交互配置とするのが抗力の向上に有効であることを示した。また、装置の強度や耐久性、耐低温性能、鳥などの異物衝突時の飛散防止性能などを各種試験により検証し、それぞれ問題がないことを確認した。

今後は装置の実用化に向けて、実車両搭載時における

抗力特性や、屋外での長期使用にともなう装置各部の汚損や劣化、日射によるヒートサイクルの影響についての検証等を進める予定である。

## 3. 台車への着雪に関する研究

鉄道車両が降雪地帯を走行すると、線路上の雪が無い上り、鉄道車両の床下や台車に雪が付着・成長する。この着雪の塊が走行時の振動や分岐器を通過するときの衝撃で落下すると、線路のバラストが飛び散り、鉄道車両や鉄道設備、沿線家屋への被害が発生する可能性がある。また、分岐器のレールの隙間に挟まると、分岐器の転換を行うことができなくなることもある。着雪問題を解決するために様々な研究が行われているが、観測や実験、簡易式を用いたアプローチが多く、着雪メカニズムを解明するには至っていない。そこで、着雪しにくい鉄道車両形状の開発を目標に、着雪成長プロセスを再現できるシミュレーション手法の開発に取り組んでいる<sup>10)</sup>。

開発したシミュレーション手法は、空気流の計算、飛雪粒子の軌跡の計算、着雪判定の計算から構成され、それぞれを双方向に連成させた解析となっている。着雪現象については理論的な原理が確立されていないため、降雪風洞において立方体形状の模型に着雪させる実験を実施し、その着雪形状をもとに飛雪の速度と衝突角度から着雪するかどうかを判定するアルゴリズムを開発した。また、鉄道車両の台車周りの着雪状況を再現できることを確認するために、台車模型を用いた降雪風洞実験を模擬した解析を行い、台車付近全体の着雪状況が実験と解析で良く一致することを確認した。

今後は、現車での着雪状況との比較によりシミュレーションの精度向上を行うとともに、現車試験や模型試験と合わせて本シミュレーションを活用することにより、着雪しにくい車両形状の開発を進める予定である。

## 4. トンネル内の空気流動に関する研究

## 4.1 トンネル火災における煙流動

1972年に北陸トンネルで発生した列車火災は、死者30名、負傷者714名という大事故となった。旧国鉄ではこの事故を受けて様々な火災試験を実施し、それらの試験結果を踏まえて1975年に制定された「トンネル内列車火災時の取扱方」では、車両火災が発生した場合には列車をトンネル内で停止させず、トンネルを走り抜けてから停止させ避難を行うこととなっている。しかし、2011年に北海道の石勝線で発生したトンネル内での脱線事故では、列車停止後に火災が発生し、結果的にトンネル内で火災車両が停止するという事態に至った。

トンネル火災時の避難における最大の危険要因は火災

時に発生する煙や有毒ガスを含んだ高温の燃焼ガス（以下、熱気流）である。一般の山岳トンネルには換気設備や排煙設備が整備されておらず、適切な避難誘導方法を検討するためには、熱気流の温度上昇量や伝播速度などの性状を正確に把握することが重要である。そこで、トンネル内火災時の熱気流について、数値シミュレーション（CFD）による予測手法の開発を行うとともに、シミュレーションの妥当性評価のための模型実験を実施している。これまでに単線鉄道トンネルの約 1/10 縮尺相当の矩形トンネルについて、トンネル内が無風で車両がトンネル内に無い条件において、模型実験と数値シミュレーションによる温度上昇量や気流速度などの物理量が概ね一致することを確認した<sup>11)</sup>。また、より実トンネルに近い馬蹄形トンネルについても模型実験による検証を進めている<sup>12)</sup>。今後は、トンネル内の列車風やトンネル内に残留している車体の影響についても検討を進め、シミュレーションの精度向上を図る予定である。

#### 4.2 トンネル内温熱環境

地下鉄や海底トンネルにおいては、列車がトンネル内を走行する際に発生する熱による空気温度の上昇が問題となる場合がある。温熱環境対策としてはトンネル用の換気設備の設置が挙げられるが、換気設備に必要とされる容量を正確に見積もるためには、トンネルに接続される大規模な地下空間を対象として、年単位の長期的な温度変化を予測することが必要になる。地下鉄を対象としたトンネル内の温度予測手法としてはアメリカ運輸省を中心に開発された SES（Subway Environmental Simulation）などがあるが、これらの汎用プログラムでは列車の高速化に伴う圧縮波の伝播現象を扱うことができない。日本では青函トンネル内の新幹線走行などに関連して、高速鉄道におけるトンネル内温熱環境予測に関するニーズがあったことから、鉄道総研では圧縮波の影響を考慮したトンネル内圧力変動のシミュレーションとトンネル内の熱移動に関するシミュレーションを組み合わせ、高速鉄道にも対応可能なトンネル内温熱環境シミュレーション<sup>13)</sup>の開発を進めてきた。

この精度検証の取り組みの一環として、シミュレーションによる計算値と計算に使用される主要な基礎方程式から近似的に求めた解析解との比較、あるいは縮尺トンネル模型試験により得られた実験値との比較による検証を進めている<sup>14) 15)</sup>。

今後は、実際の鉄道トンネルにおける温熱環境予測で重要となるトンネル内およびトンネル周囲の水分の影響について、さらに検証を進める予定である。

#### 4.3 車両屋根上流速の解析

車両がトンネルに突入すると、車両に対する空気の流

速が明かり区間よりも大きくなるため、車両に働く空気力の影響も大きくなる傾向にある。その結果種々の影響が現れるが、その一つにパンタグラフに働く揚力への影響が挙げられる。高速で走行する車両が高い集電性能を有するためには、パンタグラフ舟体に作用する揚力が安定している必要があるが、揚力の大きさは舟体に対する流速の二乗に比例するため、流速の大きさは揚力への影響を評価するにあたって重要なパラメータとなる。

これまでにトンネル内での舟体位置の流速を現車試験で測定した事例はあるが<sup>16)</sup>、様々な車両やトンネルの条件に対して、トンネル走行時の舟体に対する流速を試験により精度よく予測するのは困難である。そこで、RANS（Reynolds Averaged Navier-Stokes Simulation）による三次元数値流体解析により、車両表面やトンネル壁面に発達する境界層および碍子覆いがトンネル内流速分布に与える影響を評価した<sup>17)</sup>。また、パソコンで実行できる簡易なトンネル内流速計算手法を提案した<sup>17)</sup>。

### 5. 沿線環境に関わる研究

#### 5.1 空力音

新幹線沿線で観測される騒音は、転動音、構造物音、空力音などから構成される。転動音や構造物音のような固体振動に起因する音の音響パワーは速度の 2-3 乗に比例するのに対し、空力音の音響パワーは速度の 6 乗以上という高い速度依存性を持つため、速度が上がるほど空力音の沿線騒音に占める割合は大きくなる。現地試験の結果などから、近年の 300km/h 以上の速度域で走行する車両においては空力音の占める割合が 50% を超え、その中でも台車部等、車両下部から発生する音が最も大きく、集電系から発生する音がそれに次ぐことなどが明らかになっている<sup>18)</sup>。そこで、これらの音源についての現象解明及び低減策に関する研究開発を進めている<sup>19) 20)</sup>。特に台車部については可聴域以下の低周波数域成分の主要な発生源にもなっているため<sup>21)</sup>、幅広い周波数域に対して効果的な低減策の開発に取り組んでいる。

#### 5.2 トンネル微気圧波

トンネル微気圧波は、列車が高速でトンネルに突入したときに形成される圧縮波がトンネル内を音速で伝播し、反対側の出口から外部へ向かってパルス状の圧力波が放射される現象であり、坑口付近で発破音を発生させたり、家屋の建具等をがたつかせるなどの、沿線の環境問題を引き起こすことがある。微気圧波対策としてトンネル緩衝工の設置が広く実施されているが、今後の列車速度向上に向け、より効果的に微気圧波低減効果を得られる緩衝工構造として、断面積を段階的に拡大する断面積多段型緩衝工<sup>22)</sup>や、緩衝工側面の新たな開口部調整

特集：空気力学・騒音

法（スリット型開口部の高さを変更する方法）<sup>23)</sup> などの研究開発に取り組んでいる。

6. おわりに

空気力学的な現象による影響の多くは、走行速度が高くなるにつれて顕著になるため、今後の鉄道の速度向上において、空気力学的問題の解決はますます重要になってくると考えられる。問題解決のためには、高度な実験・数値解析手法に加え、精度の高い現車試験データが不可欠である。また、提案された対策が実行されるまでには、施工性やコスト、あるいは他の物理現象への影響評価など、様々な検討が必要である。今後、鉄道事業者の皆様と議論を重ねながら、現象の解明と対策技術の実用化を進めていきたいと考えているので、関係各位のご支援、ご協力をお願いしたい。

文献

- 1) 鈴木実, 種本勝二, 斎藤寛之, 今井俊昭: 自然風を模擬した車両に働く空気力に関する風洞試験法, 鉄道総研報告, Vol.17, No.11, pp.47-52, 2003
- 2) 種本勝二, 鈴木実, 斎藤寛之, 井門敦志: 在来線車両の空気力係数に関する風洞試験結果, 鉄道総研報告, Vol.27, No.1, pp.47-50, 2013
- 3) 乙部達志, 立松智紘, 井澤信明, 鈴木実, 野口雄平: 片切片盛地形上の鉄道車両に作用する空気力の評価, 鉄道総研報告, Vol.32, No.11, pp.5-10, 2018
- 4) 乙部達志, 鈴木実, 野口雄平: 強風時の車両に対する高欄等による遮風効果, 鉄道総研報告, Vol.31, No.9, pp.5-10, 2017
- 5) 鈴木実: 車両模型走行装置を用いた横風空気力特性風洞試験手法, 鉄道総研報告, Vol.30, No.7, pp.41-46, 2016
- 6) 鈴木実: 横風下の築堤上を走行する車両模型の風洞試験, 日本機械学会 2018 年度年次大会講演論文集, G0500306, 2018
- 7) 野口雄平, 中出孝次: 横風空気力特性に関する風洞試験を模擬した数値シミュレーション, 鉄道総研報告, Vol.31, No.9, pp.11-16, 2017
- 8) 佐久間豊, 井門敦志, 渡邊耕司, 立松知紘: 新幹線車両側面の窓および引戸の凹部による空気抵抗, 鉄道総研報告, Vol.32, No.11, pp.11-16, 2018
- 9) 高見創: 新幹線速度向上に向けた空力ブレーキ装置の開発, 鉄道総研報告, Vol.34, No.3, pp.5-10, 2020
- 10) 室谷浩平, 中出孝次, 鎌田慈, 高橋大介, 根本征樹: 降雪風洞と連携した着雪シミュレータの開発, 第 24 回計算工学講演会, 2019
- 11) 山内雄記, 齊藤実俊, 斎藤寛之, 梶山博司: トンネル火災時の熱気流の流動特性に関する模型実験と数値計算, 鉄道総研報告, Vol.31, No.9, pp.17-22, 2017
- 12) 山内雄記, 齊藤実俊, 岡泰資: 馬蹄形断面トンネルにおけるトンネル火災時の熱気流の流動特性に関する模型実験, 日本機械学会 2019 年度年次大会講演論文集, S05410, 2019
- 13) 梶山博司: 地下鉄道の温熱環境シミュレーション, 鉄道総研報告, Vol.11, No.10, pp.41-46, 1997
- 14) 斎藤寛之, 梶山博司, 齊藤実俊: 模型実験によるトンネル内温熱環境予測手法の検証, 鉄道総研報告, Vol.30, No.7, pp.23-28, 2016
- 15) 斎藤寛之, 梶山博司, 齊藤実俊: 理論解析と模型実験によるトンネル内温熱環境予測手法の検証, 鉄道総研報告, Vol.34, No.3, pp.17-22, 2020
- 16) 池田充, 光用剛, 山下義隆: 列車走行時のパンタグラフまわりの風向・風速測定, 鉄道総研報告, Vol.25, No.6, pp.11-16, 2011
- 17) 菊地勝浩, 野口雄平, 中出孝次, 眞下伸也: トンネル内を走行する車両屋根上流速の解析, 鉄道総研報告, Vol.30, No.7, pp.29-34, 2016
- 18) 北川敏樹, 長倉清, 栗田健: 高速走行時における車両下部音の音源別寄与度, 鉄道総研報告, Vol.27, No.1, pp.23-28, 2013
- 19) 山崎展博, 宇田東樹, 北川敏樹, 若林雄介: 新幹線の台車構成機器が車両下部空力音に及ぼす影響, 鉄道総研報告, Vol.32, No.11, pp.17-22, 2018
- 20) 光用剛, 佐藤祐一, 臼田隆之, 山崎展博, 宇田東樹, 若林雄介: 舟体・舟支え部の形状改良によるパンタグラフの空力音低減, 鉄道総研報告, Vol.31, No.4, pp.5-10, 2017
- 21) 宇田東樹, 北川敏樹, 齊藤実俊, 若林雄介: 高速走行する新幹線における低周波空力音の特性, 鉄道総研報告, Vol.31, No.9, pp.29-34, 2017
- 22) 福田傑, 齊藤実俊: 断面積多段型緩衝工の微気圧波低減効果に関する模型実験, 日本機械学会第 97 期流体工学部門講演会講演論文集, S5-24, 2019
- 23) 宮地徳蔵, 福田傑: 緩衝工側面開口部高さ最適化に関する模型実験, 日本機械学会流体工学部門講演会講演論文集, GS7-2, 2018