

- 鉄道一般
- 車両
- 施設
- 電気
- 運転・輸送
- 防災
- 環境
- 人間科学
- 浮上式鉄道

# 鉄道の空気力学に関する取り組み



長倉 清  
Kiyoshi Nagakura  
環境工学研究部長

車両が地上付近を高速で走行する鉄道において、空気力学的な現象の影響は多岐にわたります。空気抵抗の大きさは速度の2乗に、空力音の大きさは速度の6乗に比例するため、速度の向上にともなって空気力学的現象の影響は顕著になります。また、トンネル区間においては、自動車と比べて高速であること、車両とトンネルの断面積比が大きいことなどの理由から、鉄道固有のさまざまな空気力学的現象が生じます。鉄道の安全性、利便性・快適性、環境との調和性を向上させ、その価値を高めていくためには、これらの現象に起因する問題の解決が重要な課題となります。ここでは鉄道における空気力学的問題を、安全性の向上、沿線環境との調和、利便性・快適性の向上、低コスト・省エネルギーの4つの研究目的別に分類し、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します。

## はじめに

鉄道車両が大気中を走行すると、車両と空気の相互作用により、車両は空気力を受けると同時に、周囲の空気に作用して沿線に空気力学的な現象を引き起こします。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、沿線側への影響に関する現

象としては、空力音、トンネル微気圧波などのような環境問題に関わる現象、列車通過時の圧力変動、バラスト飛散、着氷雪、ホーム上での列車風などのように線路に近接する構造物や人に影響を及ぼす現象があげられます。また、トンネル区間においては、トンネル内の気圧変動、温度変化や火災時の煙流動などの現象も加わります。鉄道において問題となる空気力学的現象を図1

にまとめます。この図からもわかるとおり、これらの現象は、安全性、利便性・快適性、環境との調和、低コスト化など、鉄道の基本特性に関わる多くの項目と関連しており、その解決が求められています。

## 安全性の向上に関わる研究開発

### 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

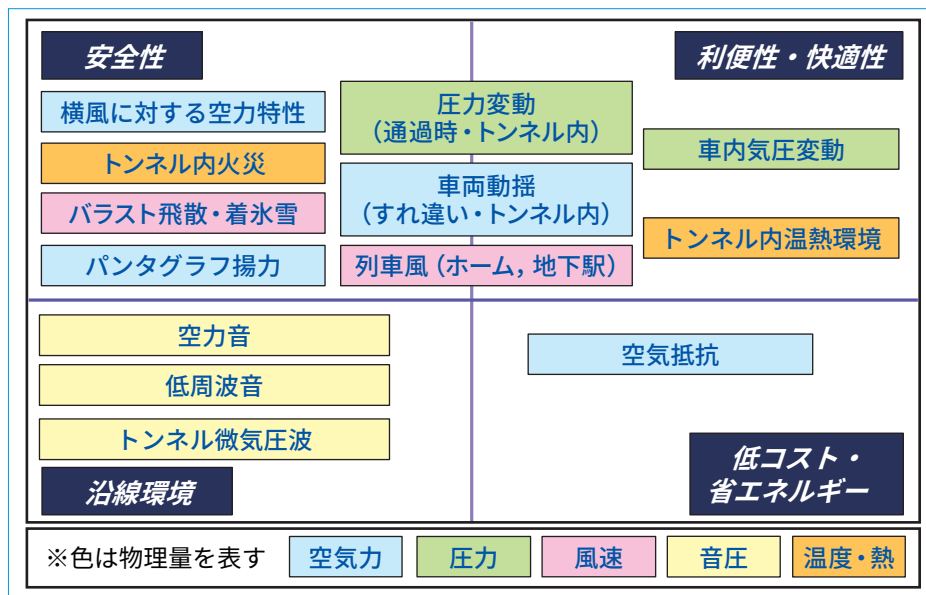


図1 鉄道における空気力学的諸問題

するために、防風柵の設置や車両諸元の変更などのハード対策、運転規制などによるソフト対策が行われていますが、これらの対策を適切に実施するためには、沿線における自然風の特徴、車両の運動力学的な特性と合わせて、強風時に車両に働く空気力の特性を把握する必要があります。

強風により車両に働く空気力の評価は、おもに風洞試験に基づいて行われています。これまでに在来線における代表的な車両形状、線路構造物形状に関する風洞試験が実施されており<sup>1)</sup>、その結果は車両の強風に対する耐力指標である転覆限界風速（車両転覆を開始する可能性のある風速）の概略評価に活用されています。

一方、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ます。計算時間の短縮のため、地面付近の自然風（乱流境界層）を模擬する計算と車両周りの空気の流れの計算を別々に行う手法を開発し（図2）、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ました<sup>2)</sup>。

### トンネル内火災時の空気流動

一般の山岳鉄道トンネルには換気設備が整備されていないため、万が一トンネル内で車両火災が発生すると、熱気流（煙や有毒ガスを含んだ高温の燃焼ガス）を制御できずに危険な状況になることが想定されます。そのような状況下での熱気流の性状を把握し予測することは、乗務員が旅客を適切に避難誘導するうえで非常に重要です。そこで、トンネル火災時の熱気流について数値シミュレーションによる予測手法の開発を行うとともに、その妥当性を評価するための模型実験を実施しています（詳細は本特集内記事「鉄道ト

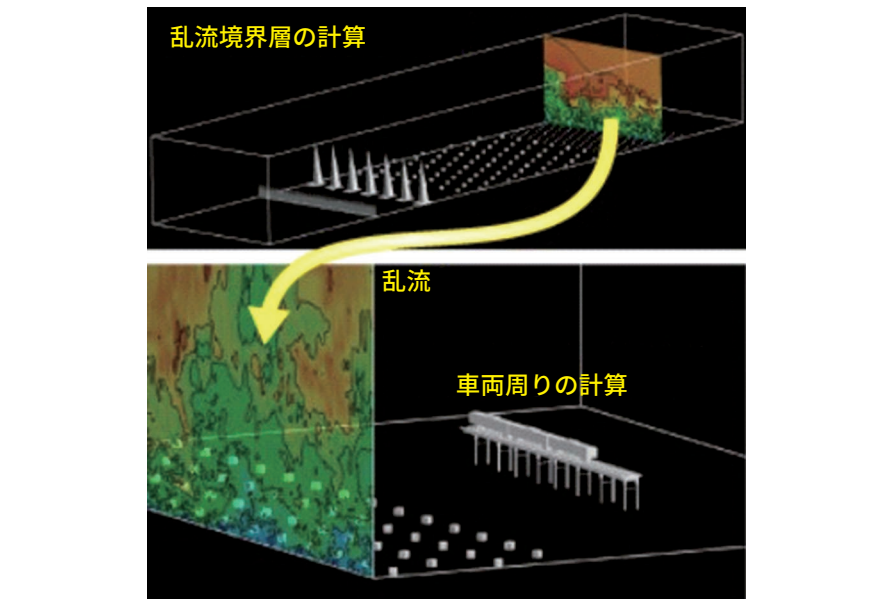


図2 横風風洞試験を再現可能な数値シミュレーション

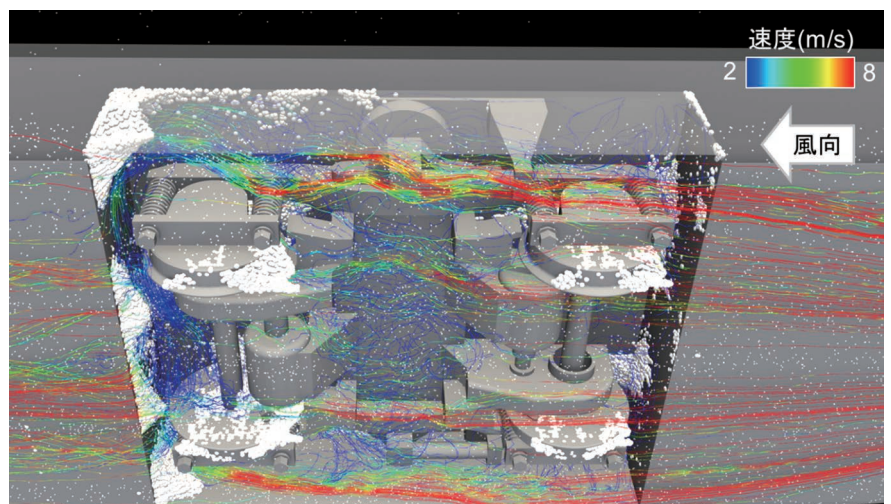


図3 台車周りの空気流・着雪解析

ンネル火災時の煙の流れを知る」を参照）。

### 台車への着雪

鉄道車両が降雪地帯を走行すると、線路上の雪が舞い上がり、鉄道車両の床下や台車に雪が付着・成長します。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ります。そこで、着雪メカニズムを解明し、着雪しにくい鉄道車両形状を開発することを目標に、

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ます<sup>3)</sup>。

開発した手法は、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ます。シミュレーション手法の精度検証のため、台車模型を用いた降雪風洞実験を模擬した解析を行い（図3）、台車付近全体の着雪状況が実験と解析でよく一致することを確認しました。

## 沿線環境との調和に関わる研究開発<sup>4)</sup>

### 空力音

高速で走行する車両周りの空気の流れに起因して発生する空力音は、速度の向上とともに急激に増加（列車速度の約6乗に比例）するため、高速鉄道の速度向上においてその低減が大きな課題となります。現地試験データを用いた解析結果から、空力音の中でも台車部やパンタグラフからの音がとくに大きいことが明らかになっているため、これらの音源についての現象解明および低減策に関する研究開発を進めています。

台車部空力音については、台車収納部の前後に車両床下流れの方向を変える跳ね上げ材を取り付ける対策、主電動機や駆動装置の設置位置を上方に移す対策、台車カバー下面を車体内側への折り込む対策を提案するとともに、低周波数域の空力音を低減する対策として台車収納部空間の隅部を丸める対策（図4）を提案し、その効果を風洞試験により確認しました。パンタグラフ空力音については、空力音の低減と揚力特性の安定化を両立する多分割平滑化舟体、舟体位置を上流側に移設する改良舟支え、頂点カバーへの多孔質材の適用などの対策を提案しました（詳細は本特集内記事「高速列車のパンタグラフの形状と空気の流れを探る」を参照）。

### トンネル微気圧波

列車がトンネルに突入するとトンネル内に圧縮波が形成され、これが出口に到達すると外部へパルス状の圧力波が放射されます。このパルス波はトンネル微気圧波とよばれ、坑口付近において発破音や家屋の建具のがたつきなどの環境問題を引き起こすことがあります。

微気圧波の地上側対策としてトンネル緩衝工（トンネル断面よりもひとまわり大きいフード状構造物）の設置が

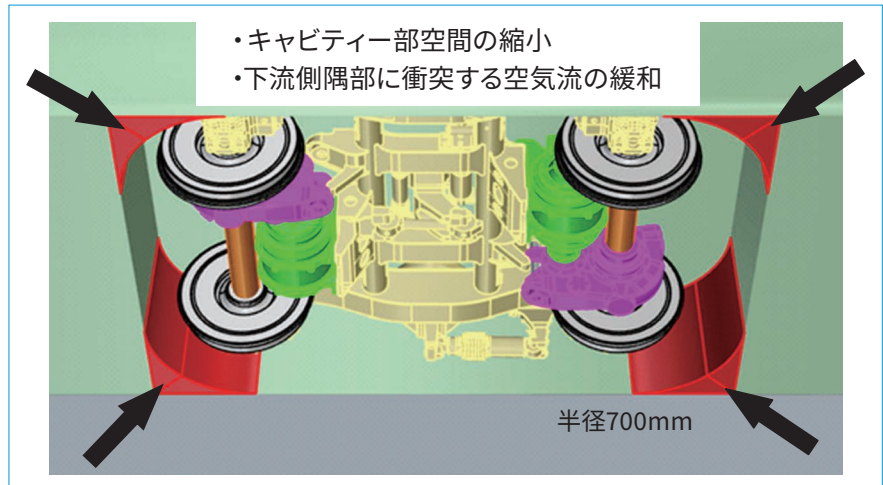


図4 台車収納空間の隅部丸み付け対策

広く実施されています。今後の列車速度向上に対応するため、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や、緩衝工側面の新たな開口部調整法（スリット型開口部の高さを変更する方法）などの研究開発に取り組んでいます。

車両側対策については、理論解析、数値解析、模型実験などの手法を用いて、新しい最適先頭部形状の設計指針を検討しました。検討結果をもとに図5に示す3段型先頭部形状を提案し、従来の先頭部形状に比べて微気圧波が低減されることを模型実験により確認しました。

## 利便性・快適性の向上に関わる研究開発

### トンネル内温熱環境<sup>5)</sup>

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ります。温熱環境対策として換気設備の設計を行う際には、トンネルにより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ります。

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、高速鉄道に対応可能な予測手法として、トンネル内圧力変動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た手法の開発を進めてきました。

シミュレーションの精度向上のため、解析的に求めた値との比較、あるいは縮尺トンネル模型試験（図6）により得られた実験値との比較による検証を進めるとともに、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の検証を進めています。

## 低コスト・省エネルギーに関わる研究開発

### 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、走行エネルギーをより少なくするためには、空気抵抗の低減が重要とな

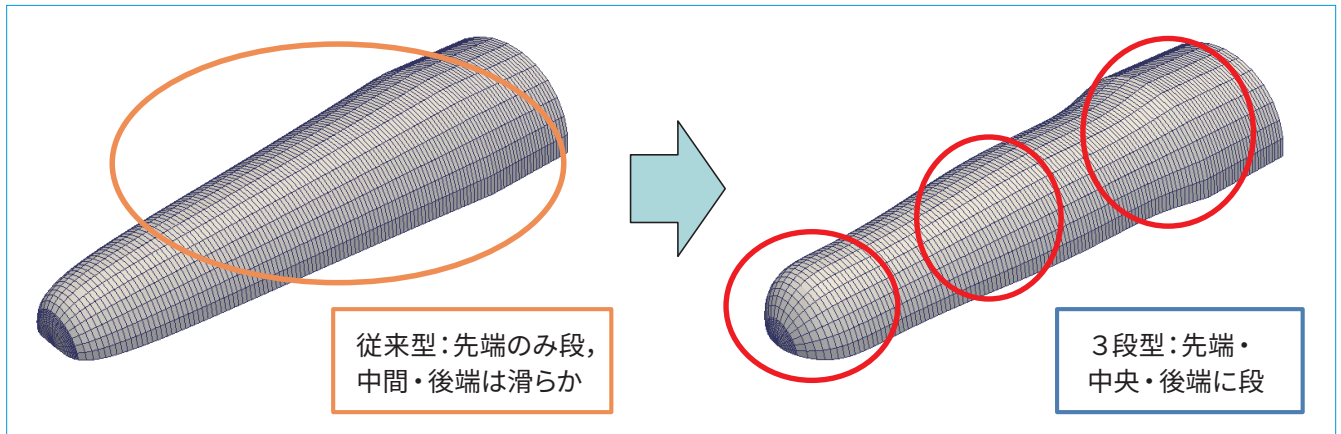


図5 微気圧波低減のための3段階先頭部形状

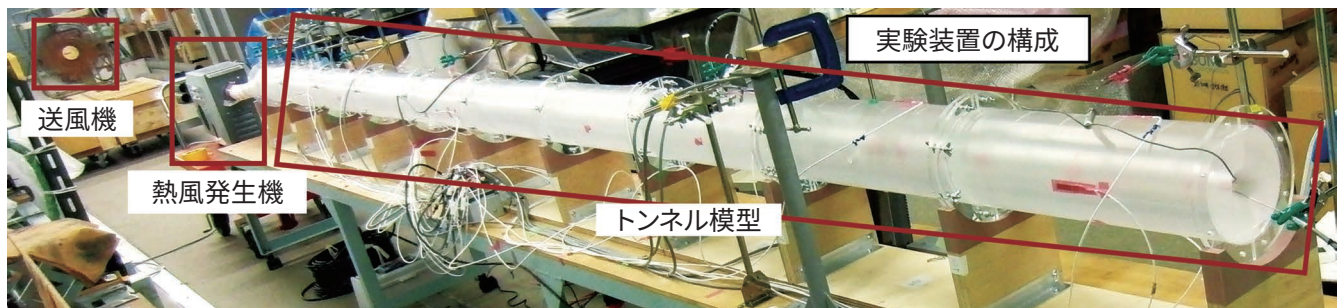


図6 トンネル内温熱環境模型実験装置

ります。近年の新幹線車両は先頭・後尾部の流線形化に加え、騒音低減などの目的から屋根上や床下の平滑化、車端部幌<sup>ほろ</sup>の天井部への拡張、台車側面カバーの設置などが進められており、これらの対策は空気抵抗の低減にも寄与しています。

今後の速度向上に向けて、さらなる空気抵抗低減の可能性を探るため、車端部幌の下部への延長や台車底面カバーを提案し、風洞試験により効果を検証しました。また、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、これらの空気抵抗への影響を定量的に評価しました（詳細は本特集内記事「高速車両の窓やドアの空気抵抗を減らす」を参照）。

一方、空気抵抗を地震発生時などの緊急時におけるブレーキ力として積極的に活用するための研究開発も実施し

ています（詳細は本特集内記事「空気抵抗を利用して高速列車を減速する」を参照）。

### 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ます。問題解決のためには、高度な実験・数値解析手法を活用することに加え、精度の高い現車試験データが不可欠です。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、あるいはほかの物理現象への影響評価など、さまざまな検討が必要です。今後も鉄道事業者の皆様と議論を重ねながら、空気力学的な現象の解明と対策技術の実用化を進めていきます。[RRR]

### 文献

- 1) 野口雄平, 中出孝次: 横風空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
- 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) 室谷浩平, 中出孝次, 鎌田慈, 高橋大介: 高速車両の台車周りの着雪を予測する, RRR, Vol.77, No.4, pp.20-23, 2020
- 4) 長倉清: 新幹線速度向上時の沿線環境負荷の低減, RRR, Vol.77, No.7, pp.32-35, 2020
- 5) 斎藤寛之, 梶山博司, 斉藤実俊: 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