

特集：騒音と空気力学的問題

鉄道における空気力学に関する最近の研究開発

齊藤 実俊*

Recent Studies on Railway Aerodynamics

Sanetoshi SAITO

This paper presents an outline of recent studies on railway aerodynamics conducted in the Railway Technical Research Institute. Train aerodynamic effects increase significantly with the speed of train, and they cause various issues on railways. Since these issues closely affect the safety, convenience, and comfort for train, it is important to investigate the aerodynamic characteristics. The typical studies, such as the effects of cross winds, aerodynamic devices of train vehicle and the effect of flow fields around trains in open section and tunnel, are introduced in this paper.

キーワード：空気力学，横風，空力ブレーキ，着雪，バラスト飛散，列車風，トンネル内圧力変動

1. はじめに

鉄道における空気力学的な現象は多岐にわたり、高速鉄道に限らず多くの問題を引き起こす。車両に関するものとしては、強風による車両の転覆、空気抵抗、変動空気力による車両揺動、パンタグラフの揚力変動、台車部への着雪現象などがあり、これらはいずれも車両の走行安定性や快適性に直接影響を及ぼす重要な事象である。一方、走行する車両によって地上側にも様々な影響が及ぶ。たとえば線路に近接する構造物（防音壁など）や各種設備、あるいは、保守作業員、ホーム上の旅客などに及ぼす事象として、列車通過時の圧力変動、列車風、バラスト飛散などがある。また、空力音やトンネル微気圧波など沿線環境に影響を及ぼす問題も空気力学的な現象に起因する問題といえる。さらに、トンネル内における火災時の熱気流や、トンネル本坑あるいは地下駅の換気など、温熱環境問題も列車走行に伴う流れの影響を受ける。

このようにさまざまな問題を引き起こす鉄道の空気力学的現象のうち、本稿では車両に関するものとして、横風、台車への着雪、空力ブレーキについて、また、地上における空力現象としてバラスト飛散、列車風、トンネル内圧力変動について、鉄道総研で実施している最近の研究開発事例を紹介する。

2. 車両に関する空力現象

2.1 横風に対する車両の空力特性

強風時における車両の安全性確保のために防風柵の設置、車両諸元の変更、運転規制など様々な対策が実施されている。これらの対策効果の評価を行うためには強風

の特性、車両の運動力学的特性、車両の強風に対する空気力学的特性を把握する必要がある。鉄道総研ではそれぞれの特性について総合的に研究開発を行っているが、ここでは空気力学的特性に関する研究開発事例について紹介する。

強風時に作用する空気力については風洞実験や数値シミュレーションによる研究が多くなされている。風洞実験では平地だけでなく、橋梁や盛り土などの地上構造物を模擬し、さらに車両模型に作用する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乱流境界層を用いるなど、実際の状況に近い条件において、代表的な車両に対する実験を実施している^{1)~4)}。最近では、空気力と車両断面形状との関係を調べるために、複数の車両断面形状を模擬した車両模型に対する風洞実験を実施している。さらに、防風柵を設置した複線高架橋など、地上構造物の影響や防風柵の効果についても評価・検討を行っている（図1）。

数値シミュレーションでは車両に作用する空気力の発生原因となる流れ場について、地上構造物や風向角が与

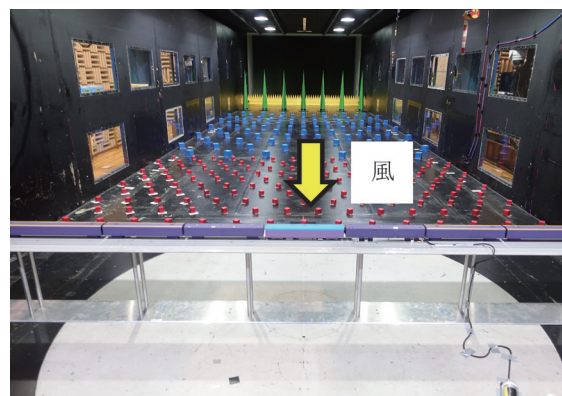


図1 横風に関する風洞実験

* 環境工学研究部長

える影響を系統的に調べるため、形状を簡略化した車両および地上構造物を組み合わせ、一様流条件下での計算を実施した。その計算結果をもとに、地上構造物による空気力の変化の要因を流れ場の観点から明らかにした⁵⁾。

2.2 空力ブレーキ

新幹線の高速化においては安全性能の確保が最重要課題となる。その中でも最も重要な項目のひとつに地震発生時など緊急時における制動性能がある。緊急時の制動方法として、通常の減速に用いる電気ブレーキ以外に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がある。ディスクブレーキは速度向上に伴う吸収熱量の増加に加え、利用できるブレーキ力の上限が電気ブレーキと同様、車輪・レール間の粘着力の制約を受ける。そこで、高速域での制動性能を補完する装置として、走行中の車両に作用する空気抵抗を増加させて制動力を得る鉄道車両用空気抵抗ブレーキ（以下、空力ブレーキ）の開発に取り組んでいる⁶⁾⁷⁾。

開発した空力ブレーキは、車内空間や旅客定員の確保と高速域における十分な減速性能の確保を両立させるべく、車体の屋根上に薄型・小型の空力ブレーキを、車両全体に分散させて配置する方式である（図2）。空力ブレーキ装置は2枚1組の抵抗板にかかる空気力の差を利用して走行風で作動する仕組みで、厚さ65mm、質量36kgと小型・軽量化を実現している（図2）。

製作した試作機を用いた風洞実験によって、ブレーキ力や動作時間などの性能確認を行うとともに、抵抗板の格納状態で沿線騒音に悪影響を及ぼさないことを風洞実験等で確認した。また、風洞実験と数値シミュレーションを併用することで、装置を複数台搭載する際の配置方法について検討し、左右方向に交互配置とするのが有効であることを示した。さらに、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、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

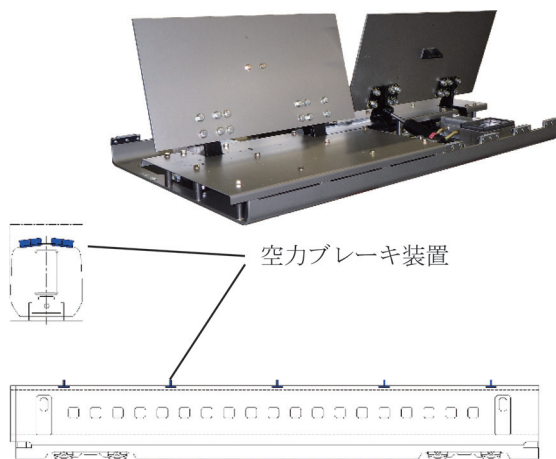


図2 分散配置型空力ブレーキ装置

るヒートサイクルの影響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。

2.3 台車部への着雪対策

車両が降雪地帯を走行すると、線路上の雪が舞い上がり、車両の床下や台車に雪が付着・成長する。この雪の塊が気温の上昇や走行時の振動、分岐器を通過するときの衝撃などで落下すると、線路のバラストが飛び散り、車両や設備、沿線家屋などに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、進路の転換を行うことができなくなることもある。そこで、走行風を使用した台車部の着雪抑制対策の開発に取り組んでいる。具体的には台車端部フサギ板の着雪量抑制を目的に、台車内の流れを制御するための空力デバイスについて、模型実験や数値計算による検討を行っている⁸⁾⁹⁾。着雪状況を再現するために縮尺1/11の車両模型（3.5両編成）を最高速度100km/hで走行させる実験装置を開発し、粒子運動が雪と相似であるクルミ殻を模擬雪として使用した実験を行い、台車部への着雪状況の把握、空力デバイスの仕様決定を行った（図3）。

3. 地上における空力現象

3.1 バラスト飛散

高速鉄道の有道床軌道における安全問題のひとつにバラスト飛散現象がある。その主な要因は前章で述べた冬季降積雪時における車両から着氷と、車体下部における列車風である。飛散したバラストは線路上のみならず駅ホーム上や沿線にまで到達する可能性があり、安全上重要な課題のひとつである。新幹線などにおけるバラスト軌道では、道床表面を被覆するバラストスクリーンやバラストネットの設置、合成樹脂散布によるバラスト固着などの飛散対策が取られる場合がある¹⁰⁾。

これら飛散対策物を設置する場合には対策物自体が列車風や、台風などの強風によって飛ばされないようにすることが必要になる。これら対策物やバラストに対する空気力の評価について、風洞実験による研究を実施して



図3 模擬雪による車両模型走行実験

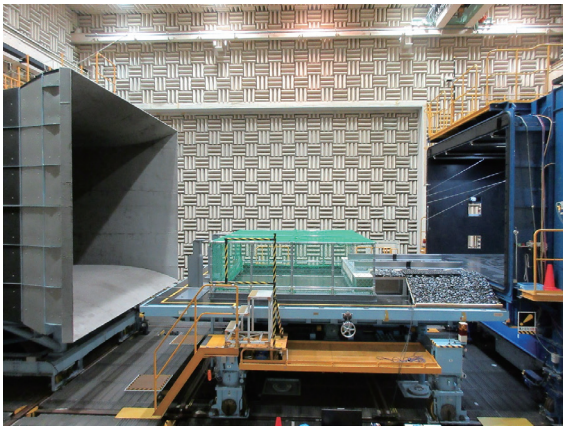


図4 物体の飛散が可能な風洞実験

いる¹¹⁾¹²⁾が、風洞実験によって現象解明を行うためには供試体であるバラストや対策品が実際に飛散する状況を再現することが必要となる。そこで、実物大のバラストや対策品の供試体を使用した、物体の飛散が可能な風洞実験方法の開発を行い（図4）、飛散現象の解明のための基礎実験を行った。

3.2 列車風

列車が走行すると周囲の空気は列車によって引きずられ、風（列車風）が発生する。列車通過時のホーム上での列車風は旅客の安全に直結している。そのため、ホーム上での待避幅や安全柵の検討のために、主に新幹線のホーム上における風速測定によって、列車風の特徴把握の研究が行われてきた¹³⁾¹⁴⁾¹⁵⁾。また、閉鎖空間であるトンネル内で発生する列車風の特徴は明かり区間とは異なり、列車の通過時だけでなくトンネル内に発生する圧力波の影響も受ける。トンネル内列車風は保守作業員やトンネル内設備に作用するので、明かり区間同様、安全上非常に重要な課題である。トンネル内列車風についても現地測定¹²⁾¹³⁾や予測手法に関する研究¹⁶⁾¹⁷⁾、作業員に与える影響に関する研究¹⁸⁾など数多く実施されている。

明かり区間、トンネル区間とも列車周りの流れ場は非常に複雑である。特に列車後尾通過直後の後流領域は後尾車の車両動揺の原因となる変動空気力に大きな影響を及ぼし、また、列車風の最大値も後流位置で発生することから、その現象解明は非常に重要である。現在、模型発射装置による実験や数値シミュレーションによって高速列車における後流の現象解明に関する研究を行っており、車両表面の圧力分布や明かり区間における列車風の基本特性の把握を行った（図5）。

3.3 トンネル内圧力変動

列車先頭部がトンネルに突入・退出するとトンネル内に圧縮波（後尾部の場合は膨脹波）が形成される。これ

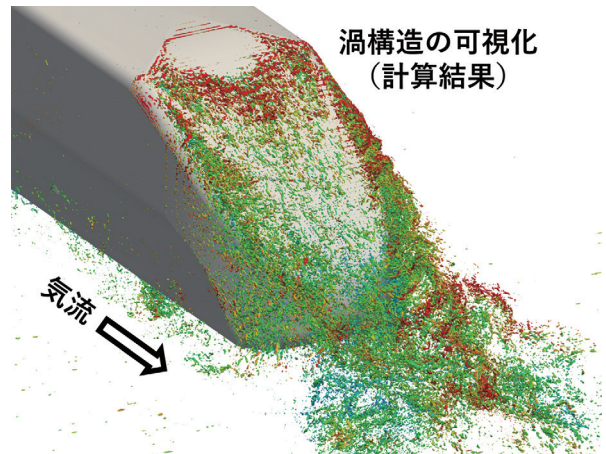


図5 最後尾車両周りの流れの数値シミュレーション

らの圧縮波・膨脹波はほぼ音速でトンネル内を伝播し、トンネル坑口やトンネル内を走行する列車端部において反射する。このため、列車のトンネル内走行時には多数の圧力波がトンネル内を往復することになる。圧縮波が通過すると圧力は上昇し膨脹波が通過すると圧力は降下する。このため、トンネル内の設備や覆工、さらには走行中の列車には圧力変動が作用することになり、トンネル内設備や車体構体の強度設計にはこれらの大きさを予測することが必要となる。トンネル内圧力変動の予測については、3.2節で述べたトンネル内での列車風の予測と同様、数値シミュレーションを用いた予測手法に関する研究が行われている¹⁶⁾¹⁷⁾。

現在ではトンネルに付随した構造物であるトンネル入口緩衝工や隣接トンネルを接続するスノーシェルターの強度検討のために両者に作用する圧力変動を評価する研究を進めている。これらについては過去にも研究事例がある¹⁹⁾²⁰⁾²¹⁾が、近年の新幹線の速度向上に対応すべく、予測精度の向上を目的に列車先頭部形状の影響を考慮した数値シミュレーションの開発や、緩衝工の開閉部やスノーシェルターのスリットの影響を詳細に評価するための模型実験（図6）を実施している。



図6 スノーシェルターに関する模型実験

5. おわりに

鉄道における空気力学的な現象は多岐にわたっており、本稿で紹介した研究事例はその一部である。これらの現象はいずれも列車走行が高速になるにつれ顕著になるため、鉄道の速度向上のためにはますます重要な課題となる。課題解決のためには、模型実験や数値シミュレーション、理論解析を効果的に組み合わせて研究を進める必要があるが、最終的には現地での測定が非常に重要である。また、対策の実用化に向けては施工性やコスト、他への悪影響の有無など、様々な検討が必要である。今後とも関係各所の皆様と議論を重ねながら効果的な対策技術の実用化を目指して研究開発を進めていきたいと考えている。これまでと同様、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, 立松智敏, 井澤信明, 鈴木実, 野口雄平: 片切り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) 野口雄平, 鈴木実, 菊地勝浩: 数値解析による横風下の車両空気力特性に関する研究, 鉄道総研報告, Vol.35, No.6, pp.29-34, 2021
- 6) 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
- 7) 高見創: 小型分散方式による新幹線用空気抵抗ブレーキ装置の開発, 日本機械学会論文集B編, Vol.79, No.803, pp.1254-1263, 2013
- 8) 室谷浩平, 中出孝次, 鎌田慈: 降雪地帯を走行する鉄道車両への着雪を再現する着雪シミュレータの開発, 鉄道総研報告, Vol.36, No.7, pp.59-68, 2022
- 9) 高見創, 新木悠斗, 室谷浩平, 石井秀憲, 鎌田慈: 走行風を利用した新幹線台車周りの着雪対策, 鉄道総研報告, Vol.36, No.9, pp.5-10, 2022
- 10) 吉田真, 内田雅夫, 矢口直幸, 御船直人: 高速走行時のバラスト飛散防止対策, 鉄道総研報告, Vol.6, No.6, pp.27-36, 1992
- 11) Nakano, T., Sakuma, Y., Inoue, T., "Risk assessment of flying of rubber screens installed on railway ballast," STECH2021, 2021.
- 12) 中野高志, 佐久間豊, 井上達哉, 湊卓也, 小林祐太郎, 小俣茂: 軌道面付近に敷設された平板状設置物の風洞試験による風荷重評価, 鉄道総研報告, Vol.35, No.6, pp.35-40, 2021
- 13) 土屋侑, 広田和義: 列車風に関する現地試験, 鉄道技術研究所速報, No.81-68, 1981
- 14) 堀江篤, 杉山友康: 東北新幹線における列車風に関する現地試験, 鉄道技術研究所速報, NO.A-86-155, 1986
- 15) 種本勝二, 梶山博司: 列車通過時のホーム上の列車風と圧力変動, 鉄道総研報告, Vol.17, No.11, pp.53-56, 2003
- 16) 山本彬也: 新幹線トンネルの圧力変動・空気抵抗・トンネル換気, 鉄道技術研究報告, NO.871, 1973
- 17) 梶山博司, 飯田雅宣, 前田達夫: 大深度地下鉄道の空気流動シミュレーション, 鉄道総研報告, Vol.7, No.7, pp.51-58, 1993
- 18) 遠藤広晴, 小美濃幸司, 白戸宏明, 澤貢, 種本勝二, 武居泰: 列車風が保守作業員に及ぼす影響の推定, 鉄道総研報告, Vol.23, No.9, pp.29-34, 2009
- 19) 小沢智, 前田達夫, 種本勝二, 木下真二, 梶山博司: 東北新幹線福島トンネル南口緩衝工, 鉄道技術研究所速報, NO.A-87-52, 1987
- 20) 福田傑, 齊藤実俊, 飯田雅宣, 栗田健, 小澤智: 隣接したトンネルを接続するシェルターのスリットから放射される微気圧波, 日本機械学会流体工学部門講演会講演論文集, 1117, 2013
- 21) Fukuda, T. Saito, S., Iida, M., Kurita, T. and Ozawa, S., "Countermeasure against the micro-pressure wave by a shelter linking neighboring tunnels," Proceedings of the 15th International Symposium on Aerodynamics, Ventilation & Fire in Tunnels, pp.539-552, 2013.