

車両の空力特性に関する最近の研究開発

長倉 清*

Recent Studies on Aerodynamic Characteristics of Railway Vehicles

Kiyoshi NAGAKURA

Aerodynamic phenomena concerning railway vehicles relate to various problems on railways. The improvement of aerodynamic characteristics of railway vehicles could increase the value of railway from the view point of safety, convenience, harmony with the environment, cost reduction, etc. This paper describes the outlines of the recent studies on aerodynamic characteristics of railway vehicles made by Railway Technical Research Institute such as stability against cross wind, air resistance, lateral motion in tunnel and aerodynamic noise.

キーワード：空気力学，横風，空気抵抗，車両動揺，空力音

1. 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（低周波音を含む）、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挙げられる。これらの鉄道車両に関わる空気力学的諸問題は、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、その解決は鉄道の価値を高めることにつながる。

本稿では、車両の空力特性に関わる問題として、横風に対する車両の空力特性、空気抵抗、トンネル内の車両動揺、明かり区間における空力音・低周波音を取り上げ、それらに関する最近の主な取り組みを紹介する。

2. 横風に対する車両の空力特性

強風による車両の転覆事故については、日本国内において現在までに50件を上回る記録が残されている¹⁾。車両転覆への対策としては、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ある。これらを適切に組み合わせて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。従来の風洞試験には空間的に一様な風（一様流）の気流場が用いられていたが、北海道島牧村での実物大車両・高架橋模型を用いた自然風及び空気力の観測試験などを通じて、現在では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²⁾。この気流場において、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）を用いた風洞実験を実施し、得られた空気力係数を一覧表にまとめた³⁾。これにより、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が可能となった。最近、海岸部によく見られる片切片盛地形⁴⁾や高欄のある構造物⁵⁾など、これまでに実施した代表的な構造物に当てはまらないケースにおける空気力係数に関する研究や、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⁶⁾などに取り組んでいる。

一方、風洞試験だけで車両の空気力係数について必要な条件をすべて確認することは困難なため、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。風洞試験を再現する場合、計算対象は乱流境界層生成装置を含めた広い領域となり、計算負荷が大きくなるが、乱流境界層の計算と車両周りの流れの計算を分離することにより、計算時間の短縮を実現した（図1）⁷⁾。開発したシミュレーション手法を用いて高架橋上および築堤上の車両を対象とした計算を実施したところ、風洞試験で得られた空気力係数を最大誤差20%程度以内で良好に再現できることが確認された。開発し

* 環境工学研究部 部長

特集：空気力学・騒音

たシミュレーション手法は、試験条件の絞り込みなど効率的な風洞試験実施のツールとして活用予定である。

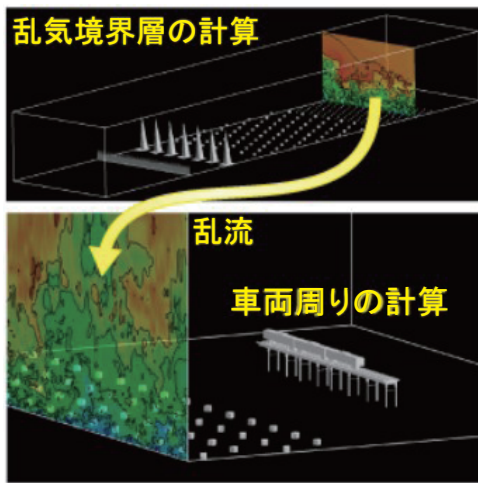


図1 横風風洞試験を再現可能な数値シミュレーションにおける計算領域の分離

3. 車両の空気抵抗

新幹線のような高速車両では、走行抵抗の大部分を空気抵抗が占めるため、省エネルギー化のためには、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いる。そこで、中間車両部を対象に風洞試験を実施し(図2)、過去の現車試験結果を組み合わせることにより車両部位ごとの空気抵抗を推定した。その結果、車両の平滑化が進んだ現在の新幹線車両では、車両表面の摩擦抵抗が50%程度、台車部空間の圧力抵抗が20%弱、車端部圧力抵抗が30%弱を占めていることが明らかになった。また、空気抵抗低減策として、台車底面カバー(図3)および車端部幌の下部への延長(全周化,図4)を提案し、風洞試験により効果を検証した。台車底面カバーについては、底面を覆う面積が増えるほど低減効果が大きくなり、台車の底面を25%程度覆うと中間車両の空気抵抗が10%程度低減されること、車端部の幌の延長については、中間車両の空気抵抗に対して20%を超える低減効果が得られることが示された⁸⁾。

さらなる空気抵抗の低減を目指すため、車両床下塞ぎ

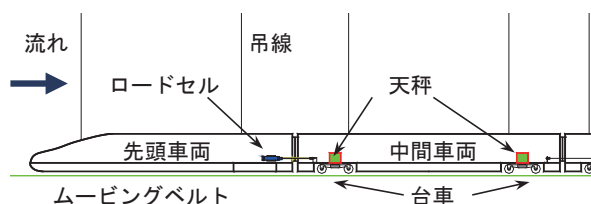


図2 風洞試験における空気抵抗測定状況



図3 台車底面カバー(網掛け部:カバー領域)

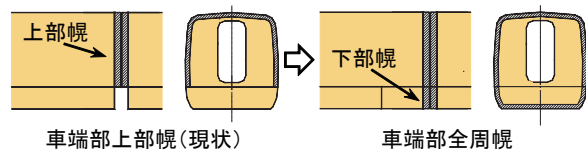


図4 車端部幌の全周化

板や車両側面の窓や引き戸など、より小さな凹凸の空気抵抗への影響についても定量的な評価を進めている。

4. トンネル内車両動揺

鉄道車両が走行すると、車両周りに生じる非定常な空気流れにより変動空気力を受け、乗り心地に関わる車両動揺を引き起こす場合がある。この影響は速度の上昇とともに大きくなり、明かり区間に比べるとトンネル内において大きくなる。トンネル内車両動揺を低減し快適な乗り心地を確保するため、これまでに現象解明および低減対策に関する研究開発が実施されてきた。

現地試験を通して、トンネル内を走行する車両に加わる変動空気力の性質が明らかになるとともに⁹⁾、走行模型装置や風洞を用いた試験による車両側面の圧力測定により車両に作用する変動空気力の現象解明が進んだ。さらに、実験では把握することが困難な車両周りの流れ場について数値シミュレーションによる検討が行われた。その結果、車両床下付近で発生した渦がトンネル壁と干渉し、先頭から後尾車両に向かうにしたがい車両側面全体に拡がっていく様子が示され、この渦の移流にともない車両に変動空気力が発生するという変動空気力発生要因の仮説が提案された⁹⁾。

数値シミュレーションによる検討は、最近のスーパーコンピュータを用いた大規模数値流体解析によって深度化が進められ、上記の仮説が導かれたときのシミュレーションと比較して、より詳細な流れ場が観察できるようになった。これにより、明かり区間走行時には車両床下で左右方向に蛇行流れが生じること、トンネル内走行時には車両床下の蛇行流れが車両側面(トンネル壁に近い側)にまで拡がること、そして、この蛇行流れによ

て圧力変動が生じることが明らかになった(図5)¹⁰⁾。また、流体シミュレーションによって示唆された車両床下の蛇行流れの存在は、移動地面板を用いた風洞実験によって検証された¹¹⁾。

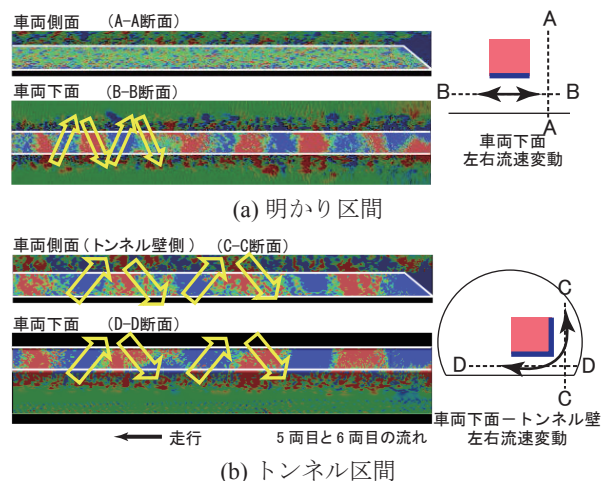


図5 大規模流れシミュレーションによる車両床下及び側面の流速分布(青色が走行方向を向いて左から右、赤色が右から左の流れを表す)

5. 明かり区間における空力音・低周波音

新幹線鉄道騒音については環境基準が定められており、基準達成に向けた取り組みが進められている。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が、近年の研究結果から、速度300km/h以上の速度域で走行する車両から発生する騒音においては、空力音の占める割合が50%を超えていること、空力音源の中でも台車部等、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^{12) 13)}。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。

台車部空力音については、実車で床下流れを再現した風洞試験で台車部空力音を定量的に評価する手法を開発し、同評価手法での結果に基づいて台車を構成する各パーツからの空力音の寄与率を明らかにした(図6)¹⁴⁾¹⁵⁾。これらの成果をもとに台車部空力音の低減策の開発を進めている。集電系空力音については、舟体・舟支え部や舟体・ホーンの接合部の形状改良、形状改良が困難な部材への多孔質材貼付、流れ場制御技術を用いた新しい対策などに関する研究を行っており^{16) 17) 18)}、これらの要素技術を組み合わせ、さらに改良を加えることにより、実機に適用可能な低減策の開発を進めている。

一方、可聴域の周波数(20Hz～)よりも低い周波数域の音については、環境基準が対象とする騒音の成分に

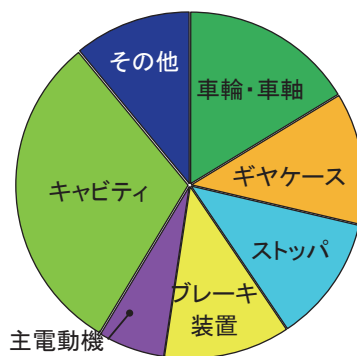


図6 風洞試験で得られた台車部構成部位の音源寄与率

は含まれないが、状況によっては建具などがたつきを引き起こす場合もあり、その低減策が求められている。先行研究により、低周波数域の音は空気力学的な現象に起因して車両から発生する成分と構造物振動に起因する成分に分けられること、空気力学的な成分は、先頭・後尾部の圧力場が誘起する変動及び先頭・後尾部以外の中間車両から連続的に放射される圧力変動で構成されることがわかっている(図7)¹⁹⁾。ただし、後者の発生源やメカニズムに関しては、現地試験による構造物音との分離が難しいこと、低周波数音は波長が長いため音源の空間的同定が難しいこと、音波の周期が長いため列車通過の短い時間での平均化処理が困難であること等の理由により、知見が不十分であった。

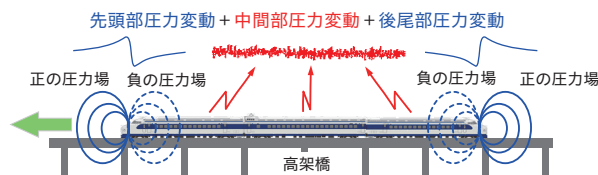


図7 車両から発生する圧力変動の模式図

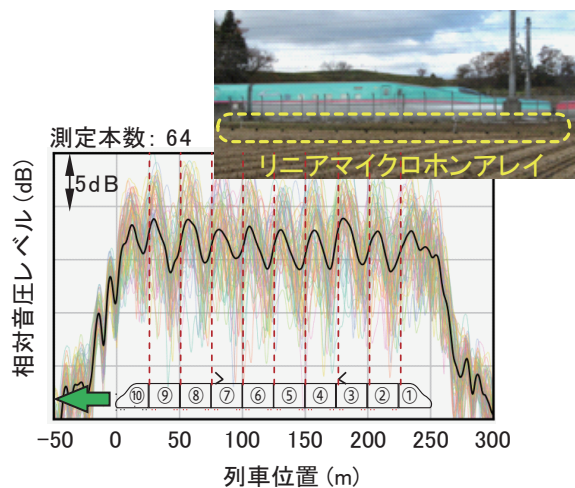


図8 車体から放射される低周波空力音の測定評価(16Hz帯、現地試験)

特集：空気力学・騒音

そこで、中間車両から連続的に放射されている圧力変動の発生源やメカニズムを明らかにするため、構造物音の影響のない平地区間において全長 28m のリニアマイクロホンアレイを用いた現地試験を実施した。本測定手法において列車本数がある程度確保して平均化処理を行うことにより、音源分離が可能になるとともに空間的な同定精度も上がることが確認された^{20) 21)}。また、低周波空力音の発生源は車両の台車部付近に局在することが明らかになった(図 8)。今後は、これらの知見をもとに、低周波空力音の低減対策についても検討を進めていく予定である。

6. おわりに

鉄道で問題となっている空気力学的現象は多岐にわたっており、その影響は走行速度が高くなるほど大きく現れるため、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。鉄道総研では、現車試験、実験室内試験、数値シミュレーションなどの手法を用いて、これらの現象の発生メカニズムの解明、予測・評価、低減対策に関する研究開発を進めている。今後も関係各位のご支援、ご協力をお願いしたい。

文 献

- 1) 今井俊昭, 荒木啓司, 福原隆彰: 規制区間で列車が強風に遭遇する確率の評価方法, 鉄道総研報告, Vol.23, No.3, pp.5-10, 2009
- 2) 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
- 3) 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
- 4) 井澤信明, 鈴木実: 海岸地形上の鉄道車両に作用する空気力の検討, 日本機械学会 2015 年度年次大会講演論文集, 2015
- 5) 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
- 6) 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
- 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) 井門敦志, 岩崎誠: 新幹線車両の空気抵抗低減の研究, J-RAIL2014 講演論文集, 2014
- 9) 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
- 10) 中出孝次, 佐久間豊: トンネル内を走行する鉄道車両周りの流れの LES, 日本流体力学会年会講演論文集, 2014
- 11) 中出孝次, 井門敦志: 鉄道車両床下の非定常流れに関する風洞実験, 日本機械学会年次大会講演論文集, 2015
- 12) 飯田雅宣: 高速化のための沿線環境の評価・対策, RRR, Vol.72, No.7, pp.44-47, 2015
- 13) 北川敏樹ほか: 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
- 14) 山崎展博, 長倉清, 北川敏樹, 宇田東樹, 若林雄介: 風洞試験を用いた新幹線車両下部から発生する空力音の評価手法, 鉄道総研報告, Vol.29, No.5, pp.17-22, 2015
- 15) 山崎展博, 宇田東樹, 北川敏樹: 新幹線の台車構成機器が台車部空力音に及ぼす影響, 環境工学総合シンポジウム 2016 講演論文集 (130), 2016
- 16) 池田充, 末木健之, 光用剛: 部材間干渉緩和と多孔質貼付によるパンタグラフ空力音低減, 鉄道総研報告, Vol.24, No.4, pp.43-48, 2010
- 17) 光用剛, 佐藤祐一, 池田充, 山崎展博, 末木健之, 深湯康二: 流れ場制御によるパンタグラフ舟体の空力音低減手法の検討, 鉄道総研報告, Vol.28, No.12, pp.11-16, 2014
- 18) 光用剛, 臼田隆之, 唐津卓哉, 宇田東樹, 若林雄介: パンタグラフ舟体の空力音に対してホーンが及ぼす影響について, 環境工学総合シンポジウム 2017 講演論文集 (107), 2017
- 19) 高見創, 菊地勝浩: 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
- 20) 宇田東樹, 北川敏樹, 斎藤実俊, 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
- 21) 宇田東樹, 澤村陽一, 北川敏樹, 斎藤実俊, 若林雄介: 高速鉄道における低周波の空力音源と低減対策の検討, 環境工学総合シンポジウム 2017 講演論文集 (123), 2017