

### 第33回

# 鉄道車両の 空気抵抗

## はじめに

空気抵抗とは、物体が空気中で運動する際に物体が空気から受ける進行方向と反対向きの力で、物体が運動を続けるためには、空気抵抗に打ち勝つだけの力が必要です。鉄道車両が空气中を走行する際にも空気抵抗を受けていますので、その空気抵抗は小さいほど良く、鉄道車両の空気抵抗の研究とは主に低減の研究ということになります。ただし、緊急時の高速車両への適用が研究されている空力ブレーキについては、空気抵抗＝ブレーキ力ですので空気抵抗が大きいことが求められます。

乗り物の空気抵抗低減の研究で真っ先に思い浮かぶのは飛行機だと思います。飛行機を飛ばす（浮かす）ための力を揚力と言いますが、揚力や抗力（空気抵抗）は速度の2乗に比例します。飛ぶために必要な揚力を確保するためには高速での飛行が必要となりますが、速度が高くなれば空気抵抗も増大します。飛行機にとっては、揚力の減少や空気抵抗の増大は、「飛べない」ことにつながる致命的な問題でした。したがって、飛行機の開発においては最初から揚

力と抗力の研究が不可欠でした。一方で、飛行機よりも速度が遅く、空気抵抗が根本的な問題とならない鉄道車両や自動車のような乗り物では、発明段階において、空気抵抗の研究は必ずしも重要ではありませんでした。ただし、現在では、地球環境問題やエネルギー問題の観点から、鉄道車両や自動車においても空気抵抗低減の研究が積極的に行われています。

鉄道車両の空気抵抗低減の研究では、空気抵抗の評価や低減量の評価が非常に重要になります。空気抵抗の評価のためには昔から風洞実験が用いられてきましたが、鉄道車両は非常に細長いことや地表面を走行する状況を再現することが難しいなど、昔の鉄道車両の風洞実験では評価精度を上げることが難しいという現実がありました。そこで、旧国鉄鉄道技術研究所の原は、鉄道車両の空気抵抗を先頭・後尾部と中間部（先頭・後尾部以外の部分）に分けて考え、前者を風洞実験で、後者を現車試験で評価する手法を考案しました<sup>1)</sup>。風洞実験での評価が難しい中間部の空気抵抗を、現車試験で評価する手法は非常に画期的なものでした。この手法を用いて評価した新幹線車両の空気抵抗と機械抵

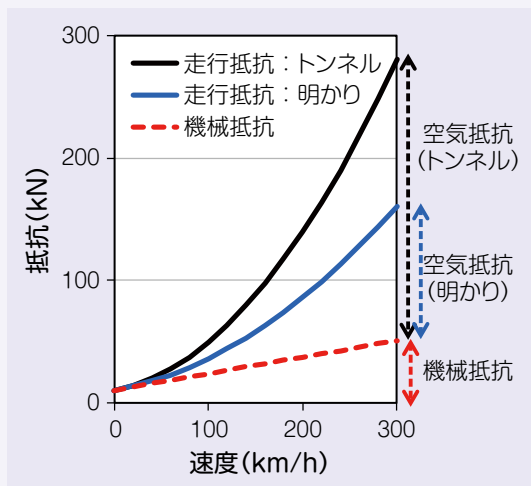


図1 新幹線車両の空気抵抗と機械抵抗 (O系16両編成 試算)<sup>2)</sup>

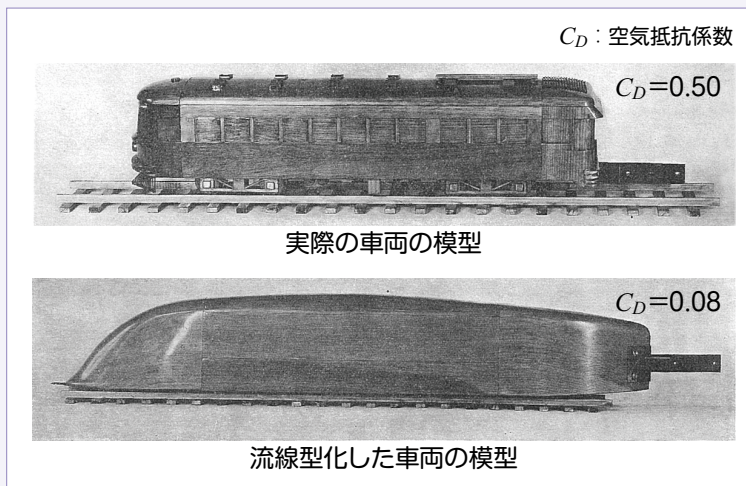


図2 空気抵抗を低減させる車両形状<sup>3)</sup>

出典：O. G. Tietjens, K. C. Ripley: Transactions ASME, Vol. 54, 1932



図3 流線形化した蒸気機関車<sup>4)</sup>

出典：JREA 島秀雄遺稿集－20世紀鉄道史の証言－から「流線型蒸気機関車」、鉄道ファン、No.471、2000.7(写真提供：島隆氏)

抗の関係を図1に示します<sup>2)</sup>。鉄道車両がトンネル内を走行する場合には、トンネルの影響を受けて、さらに、空気抵抗が大きくなります。トンネル内の空気抵抗は、トンネル長さ、対向列車の有無、トンネル内の位置などにより異なります。図1に示したトンネル区間の空気抵抗は、複線トンネルで対向列車がある場合の空気抵抗を示しています。走行抵抗は空気抵抗と機械抵抗の和ですが、速度の1次式で表される機械抵抗に対して空気抵抗は速度の2乗に比例します。明かり区間の空気抵抗と機械抵抗は、130km/hあたりで逆転し、高速域では走行抵抗の大部分を空気抵抗が占めることになり、走行抵抗の低減のためには空気抵抗低減が効果的であることがわかります。

#### 【 鉄道車両の速度と空気抵抗低減 】

新幹線を始めとする高速車両の開発以降、鉄道車両の空気抵抗も注目されるようになっていますが、鉄道車両の空気抵抗低減の研究自体は、高速車両が誕生する以前（およそ1世紀前）から行われています。図2に当時の一般的な鉄道車両と空気抵抗を低減させる形状の比較を示します<sup>3)</sup>。車両形状を流線形化することにより、空気抵抗( $C_D$ :抵抗係数)が大きく低減することがわかります。当時から、直方体のような鉄道車両の前後を丸めれば、空気抵抗が劇的に低減できることは、技術者であれば誰でも知っていたと思われれます。すでに、1930年頃には世界的な「流線形」のブームの到来もあり、流線形化された蒸気機関車(図3)も開発されています<sup>4)</sup>。では、それ以降の全ての鉄道車両が空気抵抗を小さくする形状になったかと言えば、そんなことはありませんでした。図3が掲載されている島秀雄の遺

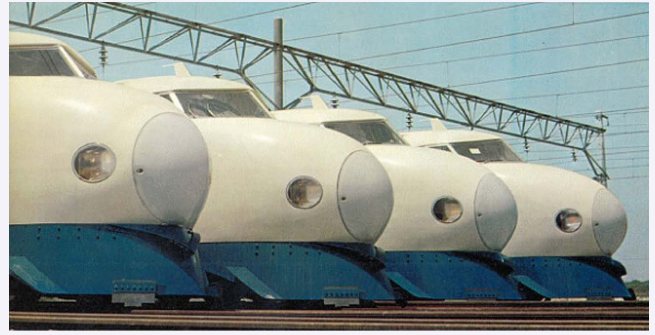


図4 0系新幹線車両

出典：パンフレット「東海道新幹線」の表紙、日本国有鉄道

稿集の中に「第一に列車抵抗を考えると、残念ながら空気抵抗は抵抗全体の一部に過ぎないし、その空気抵抗に最も関係の有る肝心要の列車速度がせいぜい150km/hそこそこ…大した直接的利益を認めがたい…」との記載がありますが、これが重要なポイントです。その頃の鉄道車両の運行速度では、現在の鉄道車両と比較すると、走行抵抗に占める空気抵抗の割合が小さかったのです。もともと占める割合の小さな鉄道車両の空気抵抗を劇的に小さくしたとしても、全体の抵抗を下げる効果は少なく、空気抵抗低減の価値が小さかったのです。さらに、車両形状の流線形化は、製作に余分のコストが必要であることや車体表面のカバーがメンテナンスの邪魔になるなど、デメリットも大きかったのです。結局は、空気抵抗低減というメリットよりも、そのためのデメリットのほうが大きかったために、当時の鉄道車両においては、技術的には既知の空気抵抗低減策が広く用いられることはなかったのです。ところが、鉄道車両の高速化がその状況を一変させます。図1からも明らかですが、高速域では空気抵抗が走行抵抗の大部分を占めることになり、空気抵抗の低減が走行抵抗の低減に直結するのです。

#### 【 高速車両の空気抵抗低減 】

先頭形状の空気抵抗低減のためには、図2に示したように、先頭部の流線形化が効果的です。新幹線開業以前に高速化を目指した鉄道車両でも先頭部形状の流線形化が図られていますし、最初に開発された高速車両である「だんごばな」の0系新幹線車両(図4)の先頭形状も、空気抵抗低減のために先頭形状が流線形化しています。

一方で、鉄道車両は、飛行機や自動車と比較して非常に細長いという特徴を持っています。図5には長さとお高さの比を現実に合わせて、16両編成の新幹線車両を示します。

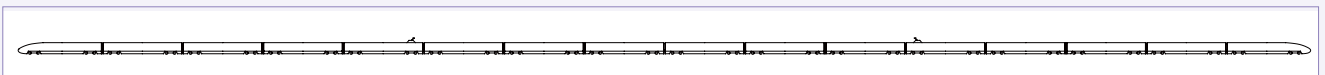


図5 新幹線車両側面図(16両編成)

車両の高さ3.6m程度に対し長さは400mで、高さは長さの1%以下であり、横から見ると「爪楊枝」のような形状になります。このような形状ですでに流線形化されている先頭部形状をさらに改良しても、全体の空気抵抗低減につながるとは考えられません。つまり、大部分を占める中間部の空気抵抗を低減させることが効果的であることが容易に想像されます。実際、先頭・後尾部が既に流線形化されている新幹線車両のような長大編成の列車では、空気抵抗に占める先頭・後尾部の割合は小さく、前田らの報告書<sup>2)</sup>からは、0系、100系の16両編成新幹線車両では、中間部が空気抵抗の9割を占めるという試算ができます。では、空気抵抗の大部分を占める中間部の空気抵抗を低減させるには、どのようにすれば良いのでしょうか？流線形化した先頭部でかき分けられた空気は、鉄道車両の表面に沿って流れますので、中間部の空気抵抗を低減させるには、この車両の表面に沿う流れを乱さないことが重要となります。すなわち、車両表面の凹凸をなくすことにより、空気抵抗を低減することができるのです。

実は、この問題についても昔から研究がされており、中間部の空気抵抗の重要性についても、1930年代には報告がなされています<sup>5)</sup>(図6参照)。ただし、先頭形状ほど、空気抵抗低減のための中間部の改良が積極的に行われてきたとは言えません。初期の中間部の空気抵抗評価は、模型を用いた風洞実験で行われていますが、上述したとおり、風洞実験の評価精度の問題もあり、中間部の空気抵抗低減については、その実用化と同様に研究も積極的に行われてきたわけではありませんでした。その後、高速の鉄道車両が誕生した後の1982年に、J.L.Pertersが、大規模な模型(1/10)を用いて、ムービングベルトで床下流れを模擬した風洞実験により、中間部の平滑化(車両下部や車間部へ

のカバー)の詳細な効果を明らかにしました<sup>6)</sup>。

### 新幹線車両の雪対策、騒音対策

0系新幹線から始まり形状が改良されてきた新幹線車両ですが、他の目的により結果的に空気抵抗が低減された事例もあります。200系新幹線では着雪対策のために、車両の床下がボディマウント化(凸凹した床下機器をカバーで覆う)されました。また、パンタグラフの離線や騒音の対策として新幹線車両の特別高圧線の引き通しを行い、パンタグラフの数を削減しました。さらに、屋根上の空調機器の騒音を低減するために、空調機器を床下に収納し車両高さを低くした結果、車両の表面積と断面積が小さくなりました。これらの改良は、主として別の目的のために行われましたが、結果的に空気抵抗低減につながっています。

### 新幹線車両の現状と今後の展開

もともと鉄道は環境に優しい交通手段であり、他の乗り物と比較してエネルギーの消費は小さく、加えて、新幹線車両のような高速車両では、すでに先頭形状の流線形化や中間部の平滑化が進んでいます。しかしながら、近年の環境問題やエネルギー問題への関心の高まりから、鉄道車両のさらなる空気抵抗低減が求められています。図4の0系新幹線車両は先頭形状が流線形化されています。流線形化された先頭形状であったとしても、形状を改良することによりさらなる空気抵抗低減の可能性が考えられます。しかし、上述した通り、すでに流線形化され空気抵抗全体に占める割合が小さい先頭・後尾部の改良は、空気抵抗低減の観点からは大きな効果は見込めません。ただし、現実には、

0系新幹線車両開発以降多くの新幹線車両の先頭形状が開発され、先頭部長さが徐々に延びています。これは空気抵抗低減を目的としているわけではありません。高速化に伴う沿線環境問題(トンネル微気圧波など)への対策として先頭部が延伸されてきたのです。

1980年代以降は、中間部に注目した空気抵抗低減の研究がなされています。1990年代には、JR各社が高速試験車両を開発しています(図7)が、これらの高速試験車両では、空気抵抗や騒音の低減を目的として、当時の営業列車では実用化されていなかった台車側スカートが取り付けられています。現在では、台車側ス

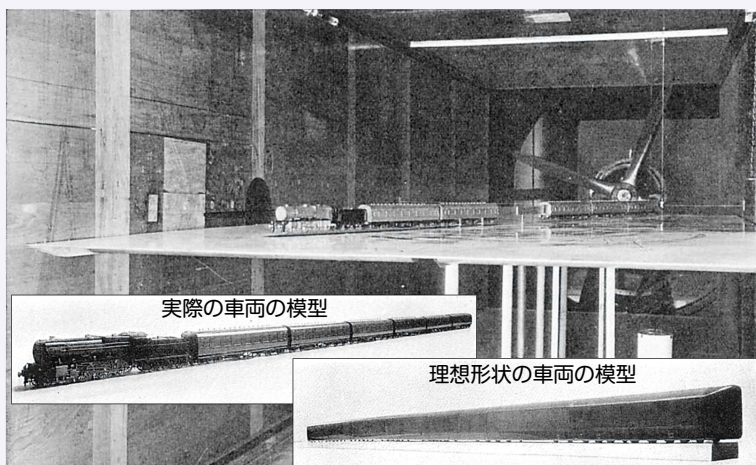


図6 中間部の空気抵抗測定(風洞実験)<sup>5)</sup>

出典：F. C. Johansen：Proc. Inst. Mech. Eng., Vol.134, 1936



図7 1990年代に開発された高速試験車両  
(左から300X(JR東海), STAR21(JR東日本), WIN350(JR西日本))

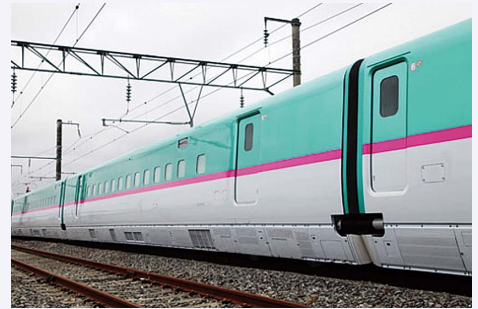


図8 中間部の平滑化が進んだ最新の新幹線車両(E5系)  
出典: JR全車種ハンドブック2010(付録DVD), (株)ネコ・パブリッシング発行

カートに加え、車間の幌<sup>ほろ</sup>が取り付けられた車両も登場しています(図8)。最新の新幹線車両で平滑化ができていないのは、車間部と台車部の下面だけになっています。これらの部位については、構造上の問題やメンテナンスや運行上の都合で完全に覆うことは不可能ですが、まだ空気抵抗低減のための改良の余地は残っており、研究が進められています。このような大きな凹凸の平滑化が完成すれば、次には、ドアや車両底面カバーおよび車両側カバーの段差、ボルト頭のような車体表面の細かな凹凸の平滑化が空気抵抗低減の対象となります。ここまで平滑化が進めば、飛行機の空気抵抗低減対策と同じレベルです。その次の対策は、表面摩擦抵抗の低減が目標となります。鉄道車両の先頭形状の流線形化や中間部の平滑化は既存技術(主に飛行機の技術)の鉄道車両への適用でした。しかし、今後研究対象となる摩擦抵抗の低減については、飛行機分野でも実用化に至っていません。鉄道は飛行機と比較して速度が遅いものの、摩擦抵抗低減を考える場合には、形状が単純(細長く凹凸が少ない)で表面の洗浄が容易であること、摩擦抵抗低減のために車両周りの流れ場を制御した場合にも運行上のリスクがないことなど、飛行機にない利点もあります。これらの利点も考慮して、飛行機にも実用化されていない摩擦抵抗の低減の研究が進むことが期待されます。

在来線車両に適した空気抵抗低減対策を考える必要があります。また、在来線の場合には、新幹線と比較して駅間が短いので空気抵抗低減の効果を考える場合には、単に空気抵抗の低減だけではなく、最終的な省エネ効果まで含めて評価する必要があります。最近の研究から、在来線車両で可能な空気抵抗低減策でも省エネ効果があることがわかってきました。在来線車両については、現実に即した空気抵抗低減策が今後の在来線車両の設計に反映されることが望まれます。

### おわりに

地球環境問題やエネルギー問題から見れば、鉄道車両の空気抵抗は小さいほうが良いのですが、これまでは主に安全問題や沿線環境問題のために車両形状の改良が進められてきました。空気抵抗の低減のためには車両周りの空気をなるべく乱さないように流すことが大事であり、そのことは、空力騒音の低減やバラスト飛散のように車両が誘起する流れが周辺へ与える影響の緩和にもつながります。今後は、これら全ての問題を勘案し、空力的に最適な鉄道車両の開発が行われていくものと考えられます。

(井門敦志/環境工学研究部 車両空力特性研究室)

### 在来線車両の現状と今後の展開

在来線車両は、新幹線車両と比較して速度が遅いため、空気抵抗の問題は忘れられがちですが、現在では車両の高速化や軽量化が進み、走行抵抗に占める空気抵抗の割合が増大しています。一方で、新幹線車両と比較して低速であったために、在来線車両には積極的な空気抵抗低減策がなされていません。空気抵抗低減のためには、新幹線車両のような形状にすれば良いのですが、製作費用やメンテナンスを考慮すると必ずしも同じ対策が採用できるわけではなく、

### 文献

- 1) 原朝茂: 列車の空気抵抗の測定法, 鉄道技術研究報告, No.430, 1964.
- 2) 前田達夫, 木下真夫, 梶山博司, 種本勝二: 新幹線電車(0系, 200系, 100系)の空気抵抗, 鉄道技術研究報告, 1371, 1987
- 3) O. G. Tietjens, K. C. Ripley: Air Resistance of High-Speed Trains and Interurban Cars, Transactions ASME, Vol. 54 (APM-54-23), p.238, 1932
- 4) 島秀雄: 流線型蒸気機関車, JREA島秀雄遺稿集, 2000
- 5) F. C. Johansen: The Air Resistance of Passenger Trains, Proc. Inst. Mech. Eng., Vol.134, pp.91-208, 1936
- 6) Peters J.L.: Optimising aerodynamics to raise IC performance, Railway Gazette International, pp.817-819, 1982