

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

空気抵抗に関する 試験に活用する

空気抵抗とは、鉄道車両が走行するときに空気から受ける進行方向と逆向きの力のことです。この力は、走行のためには小さくしたい力ですが、一方で、車両を停止させるためのブレーキ力にもなります。ここでは、これまでの20年間に大型低騒音風洞を活用して実施してきた鉄道車両の空気抵抗に関する研究開発のなかで、鉄道車両の空気抵抗を減らす研究開発と空気抵抗をブレーキ力として利用する2つの研究開発について紹介します。



井門 敦志
Atsushi Ido
研究開発推進部
風洞技術センター
所長
【専門分野】 空気力学、
風洞実験



高見 創
Hajime Takami
車両制御技術研究部
ブレーキ制御研究室
室長
【専門分野】 ブレーキ装
置、流体力学

はじめに

鉄道車両は静止している空気をかき分けながら進んでいきますが、その際、鉄道車両は空気から、進行方向と逆向きの力を受けます。その力が「空気抵抗」です。

鉄道車両ばかりでなく、近年、燃費競争が激化している自動車や、さらに高速な航空機においても、空気抵抗の研究がなされています。この場合、「空気抵抗」は「悪者」であり、空気抵抗をいかにして低減するのが研究開発の主眼となっています。鉄道においても空気抵抗の低減は研究開発の大きな目的ですが、一方で、高速走行時における空気抵抗をブレーキ力（空力ブレーキ）に活用する研究開発も進められています。鉄道総研では大型低騒音風洞（以下、米原風洞）を活用して、空気抵抗を「低減する」あるいは「利用する」ための研究開発が行われてきました。

空気抵抗を低減する

(1) 空気抵抗低減の目的

鉄道車両が走行するためには、車両が走行する際に受ける走行抵抗に打ち勝つだけの推進力（進行方向に進もう

とする力）が必要です。そのため、電車にはモーターが装備されており、鉄道車両が走行する際のモーターでは電気エネルギーが消費されます。走行抵抗が大きくなると、それだけ多くの電気エネルギーが必要となります。逆に、走行抵抗を小さくすれば、消費する電気エネルギーを低減することができます。走行抵抗は機械抵抗と空気抵抗からなり、機械抵抗が列車速度の1次式で表されるのに対し、空気抵抗は列車速度の2乗に比例します。新幹線のように高速で走行する列車では、走行抵抗の大部分を空気抵抗が占めるために、空気抵抗の低減が走行抵抗の低減、ひいては、省エネルギーに大きく寄与します。近年の研究¹⁾では、在来線車両の一部においても、空気抵抗の低減による省エネ効果があると推定されていますが、ここでは、新幹線車両の研究開発における空気抵抗の低減について紹介します。

最新の新幹線車両といえども、航空機と比較すると、台車部や車間部に大きな凹凸が残っています。台車部や車間部の凹凸を塞ぎ平滑化することにより空気抵抗を低減することが可能です。

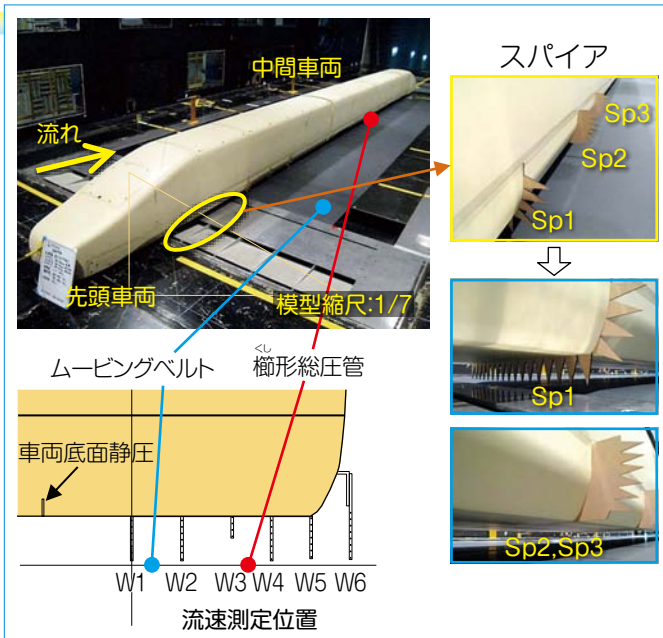


図1 流れ場の模擬

現車への適用を考える場合には、空気抵抗の低減によるメリット（省エネ効果）とデメリット（製造コストやメンテナンスコストの増加）を比較検討することが非常に重要です。したがって、空気抵抗低減の研究では、低減効果を精度よく評価することが必要となります。低減効果の評価手法としては、現車試験、数値計算などでも可能ですが、費用や評価精度を考慮すると、風洞試験が最も適しているといえます。

(2) 鉄道車両の風洞試験

風洞試験とは、動いている物体を風洞の測定部に固定し、物体が動く代わりに空気を流すことで物体が動いている状況を再現する試験です。したがって、風洞試験が現実の現象をどの程度再現できているかについては十分に検討する必要があります。流体力学的には、流れの相似則（ $[\text{流速} \times \text{長さ} / \text{動粘性係数}]$ が同じ）を満足させる必要がありますが、新幹線のような長大編成の車両（16両編成：400m）の風洞試験

では、流れの相似則を満足させることができません。しかしながら、鉄道車両の凹凸部の空気抵抗は、流れの相似則を満足しなくとも空気抵抗の推定が可能です。これを流れの相似則の緩和といいます。過去の研究²⁾において、新幹線車両の台車部や車間部のような大きな凹凸の平滑化による空気抵抗の低減量は、米原風洞で精度よく評価されることが示されていることから、空気抵抗の「低減」に注目しています。また、長大編成への対応としては編成の部位ごとの空気抵抗の低減量を測定し、編成全体の低減量を評価します。

(3) 風洞試験での測定精度向上

新幹線車両のような長大編成の空気抵抗は先頭および後尾部と、中間部にそれぞれ分けて考えます。新幹線車両は非常に細長く、編成全体の空気抵抗の大部分は中間部が占めています。一方で、先頭と後尾部の空気抵抗の占める割合は小さく、形状の改良による空気抵抗の低減は、ほとんど期待できません（参照）。新幹線車両の空気抵

先頭および後尾部の空気抵抗低減の可能性

16両編成の新幹線は全長400m、車両高さ3.65mで、車両高さは全長の1%以下です。現実の新幹線は下図のような縦横比であり、流線形の先頭と後尾部形状を改良しても、編成全体の空気抵抗の低減効果がほとんどありません。

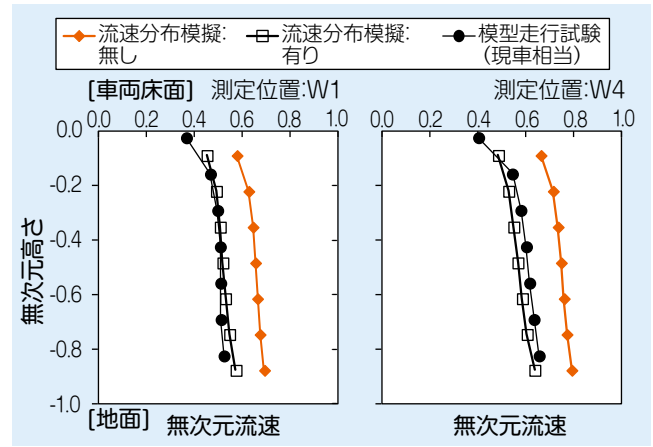
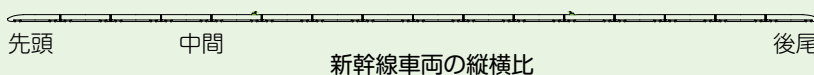


図2 床下流速分布

では、流れの相似則を満足させることができません。

抗を低減させるためには、中間部の空気抵抗を低減させる必要があります。

風洞試験では、縮尺1/7の3両編成の模型を用いて、中間車両の空気抵抗の低減量を測定しました。米原風洞では、車両床下の流れを再現するために境界層吸い込み装置およびムービングベルト（参照）を装備しています。空気抵抗低減の研究開発の初期段階では、上記装置のみを用いた床下の流れの再現を行いました。その後、編成全体としての空気抵抗の低減量の評価精度を向上させるため、現車での流れ場を考慮して、風洞試験を行う必要が生じてきました。風洞試験では、3両編成模型の中間車両は先頭から2両目となり、現車の中間部を模擬する場合には車両周りの境界層の発達が不十分であり、風洞試験では現車の中間部よりも流速が高くなっていると考えられます。そこで、上記装置に加えて先頭車両下部にスパイアと呼ばれる突起物を取り付けることにより、床下の流れを減速させ現車の中間部の流れ場を風洞試験で模擬しました（図1）。

境界層吸い込み装置

風洞の壁面に発達する流れの遅い領域（境界層）を排除する装置。

ムービングベルト

風洞壁面を模擬したベルトを流速と同じ速度で移動させ、壁面の境界層を発達させないようにする装置。

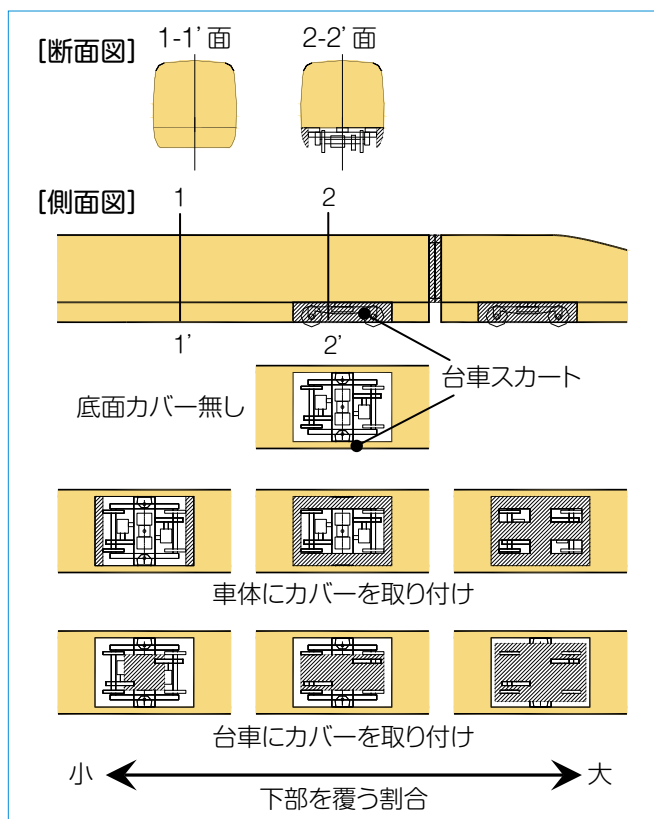


図3 台車底面カバーの例

図2に床下流速分布を示します。スパイア無し(流速分布模擬:無し)では、模型走行試験と比べて高めの流速分布となっていますが、スパイアを取り付けること(流速分布模擬:有り)により、風洞試験において現車の流速分布をおおむね模擬できることがわかります。車両床下の流速分布を現車に合わせた状態で空気抵抗の測定を行うことにより、測定精度の高い風洞試験が可能になります。

(4) 編成の空気抵抗低減効果

新幹線車両では、台車部や車間部のような大きな凹凸を平滑化することで空気抵抗が低減できますが、ここでは、台車部の空気抵抗の低減対策と風洞試験を用いた空気抵抗の低減量の評価について示します。

最新の新幹線の台車部には、台車スカートが装備されていますが、台車部下面からは空気が流入し、台車の端部塞ぎ板にあたり空気抵抗の原因となり

ます。そこで、台車部へ流れが入り込まないようにするために、取り付け方の異なる台車底面カバーを提案しました。車体にカバーを取り付ける方法と台車に直接カバーを取り付ける方法です(図3)。各々の対策法について、空気抵抗の低減効果を測定しました。

図4に台車底面の開口面積を基準として、台車底面を覆う面積の割合と空気抵抗の低減効果の関係を示します。取り付け方法を比較すると、車体に取り付けたカバーのほうが、空気抵抗の低減効果が多少大きくなることがわかります。また、取り付け方法によらず、底面を覆う面積が20%~80%の範囲では、覆う面積が大きいくほど、おおむね直線的に空気抵抗の低減効果が大きくなることがわかります。たとえば、台車底面カバーを車体に取り付ける場合には、台車の底面を25%程度覆うと10%程度の空気抵抗の低減効果が見込まれます。ここで、得られた結果

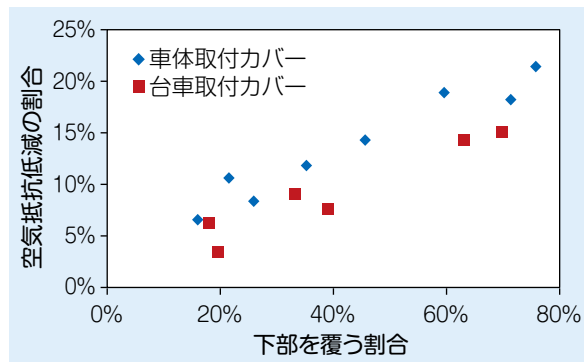


図4 空気抵抗の低減効果

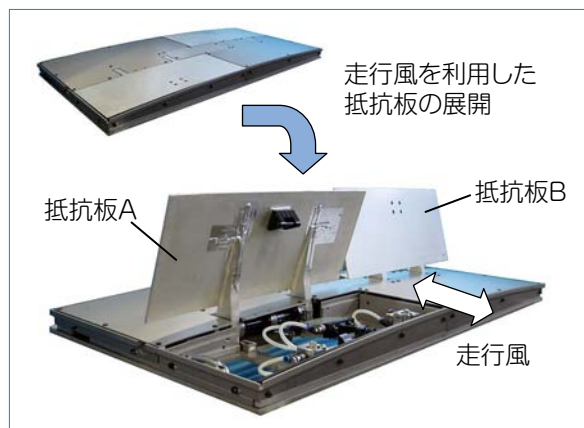


図5 空力ブレーキ装置の試作機

は、中間車両1両分の結果ですが、この効果は、全ての車両に同様の対策を行えば、編成全体の間中部の空気抵抗が10%程度低減します。さらに、新幹線車両では、空気抵抗の大部分を中間部が占めていますので、編成全体としても、10%近い空気抵抗の低減が期待されます。このように、風洞試験を活用して編成全体の空気抵抗の低減効果を評価することができます。

空気抵抗を減速に利用する

(1) 空力ブレーキ

列車が速く走るためには「悪者」の空気抵抗ですが、いざ止まるときには列車を押し止める味方となります。

この作用を積極的に利用するのが、「空力ブレーキ」です。「空気抵抗ブレーキ」や「空気抵抗増加装置」とも呼ばれ、通常は流線形をしている列車の表面から抵抗板を外に出し、板に作用する空気抵抗によって列車を直

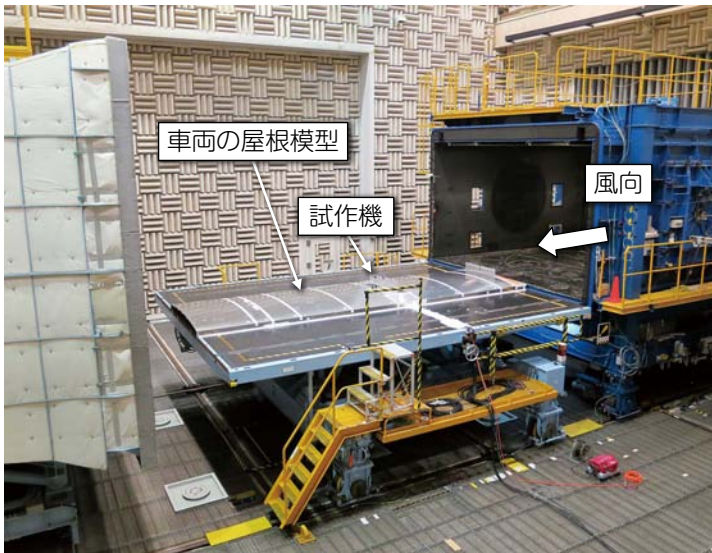


図6 風洞試験の様子

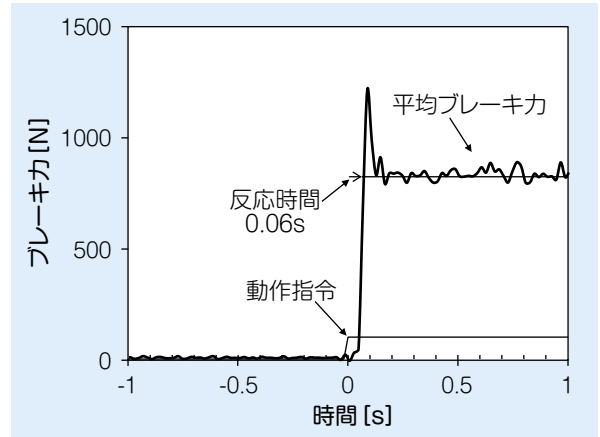


図7 空力ブレーキの挙動例

接減速させます。

車輪を使った通常のブレーキと比べて、雨や雪などのときも車輪がレール上を滑ることなく、無動力で安定した減速をできることが利点です。使用時は空力音を生じるため、鉄道の営業列車に採用された例はありませんが、緊急時のブレーキ装置としては、超電導リニア車両やJR東日本の新幹線試験車両に搭載実績があります。

(2) 小型の空力ブレーキ装置の開発

鉄道総研では、最高速度が360km/hを超える将来の新幹線を想定し、小型の空力ブレーキ装置を開発しています。

緊急時にしか使わない空力ブレーキを鉄道車両に搭載する際の欠点は、装置質量と客室容積への影響です。このため、抵抗板は2枚1組で構成し、走行風を利用して自立させる仕組みによって、装置の大幅な小型・軽量化を行っています(図5)。

ここで、2枚の抵抗板が正常に開き、全開の状態に保持されるためには、それぞれの抵抗板に働く抗力係数を適切に設計する必要があります。これには、抵抗板からはく離れた流れや、2枚の抵抗板の相互作用が影響しており、数値解析や縮尺実験では十分な精度で予測することができません。

このため、米原風洞の大型で高速での試験が可能な設備を活用して、400km/hで走行する列車の屋根上流れを模擬し、その流れ場中に空力ブレーキ試作機を設置して、性能検証を行っています(図6)。

一般的に、風洞試験の供試体は固定され動かない状態で試験が行われます。しかし、本試験では実際に空力ブレーキ装置が展開動作を行い、急激に流れ場と力を変化させるのが特徴です。

空力ブレーキ動作時の挙動例を図7に示します。動作指令の投入後、速やかに抵抗板が展開し、慣性力による著大値が生じた後、車両のブレーキ力となる抗力が正常に得られています。本試験によって、平均的な抗力の大きさだけではなく、過渡的に生じる衝撃力の大きさや、指令の投入からブレーキ力を生じるまでの空走時間などを正確に把握することができました。

また、複数台の空力ブレーキ装置を列車の長手方向へ配置した場合、前方で乱された流れが後方の装置へ作用するため、得られるブレーキ力は低くなります。これを模擬するため、米原風洞の計測区間長さを活用して、長手方向に3列分配置して試験を行いました。これによって、装置を複数台設置した

場合の影響や全体で得られる抗力を見積もり、適切な搭載数の検証を行っています。

さらに、米原風洞の低騒音性能を活用して、360km/hの流れ場において、格納時の試作機は騒音源とならないことを実証しました。

おわりに

鉄道総研では、米原の大型低騒音風洞を活用し、鉄道の空気抵抗に関する研究開発においてさまざまな成果をあげてきました。今後も、引き続き、鉄道車両の空気抵抗低減および小型ブレーキ装置の研究開発を進めていきます。**RRR**

文献

- 1) 井門敦志, 岩崎誠, 宮地徳蔵, 井上達哉, 蝦名弘太: 在来線車両の空気抵抗低減策とその効果, 第19回鉄道技術連合シンポジウム講演論文集, No.1513, 2012
- 2) 井門敦志: 鉄道車両の空気抵抗低減量の評価方法, 日本機械学会論文集(B編), Vol.69, No.685, pp.2037-2043, 2003
- 3) 高見創, 須山哲宏, 井上達哉: 高速鉄道用小型空気抵抗ブレーキ装置の開発, 鉄道総研報告, Vol.27, No.12, pp.35-40, 2013
- 4) 高見創: 空力ブレーキで高速鉄道の緊急停止距離を短縮する, RRR, Vol.71, No.8, pp.12-15, 2014