

在来線車両の空気抵抗低減による省エネルギー効果の評価

環境工学研究部 車両空力特性研究室
主任研究員 井門 敦志

1. はじめに

鉄道は他の交通システムと比較すると環境負荷の少ないエネルギー効率の高い交通システムであるが、今後さらなる省エネルギー化が求められると考えられる。

車両の省エネルギー化方策の一つに走行抵抗の低減がある。走行抵抗は、機械抵抗と空気抵抗に分離できる。機械抵抗が速度の一次式で表されるのに対し、空気抵抗は速度の2乗に比例するため、特に、高速化が進んだ新幹線では、空気抵抗の低減が走行抵抗の低減に大きく寄与する。一方、新幹線と比較すると速度の低い在来線では、空気抵抗を考慮した車両設計が積極的には行われてこなかったが、在来車両においても徐々に高速化が進み、その最高速度は160km/hに達している。さらに、車両の軽量化や電動機の高効率化による機械抵抗の低減が進んだ結果、相対的に走行抵抗に占める空気抵抗の割合が大きくなりつつある。10両編成の通勤型電車が130km/hで走行すると、走行抵抗の70%以上を空気抵抗が占めるという試算もあり、在来線車両の省エネルギー化のために、車両の空気抵抗低減の必要性が高まっている。

高速で走行する新幹線車両の形状と比較すると、在来線車両は凹凸が目立つ形状である。在来線車両では、通勤型電車を筆頭に切妻型の先頭・後尾部形状の車両が多く見られ、また、床下の機器および屋根上の機器はむき出しのまま搭載されている(図1)。在来線車両においても新幹線車両のように先頭部の流線形化や床下にカバー等をかけることにより、新幹線車両と同様に空気抵抗を低減することが可能である。しかしながら、既存の在来線車両の流線形化や平滑化は必ずしも十分ではない。その理由は、先頭部の流線形化は製作費用の増加や客室の縮小につながり、また、床下カバーは製作費用の増加やメンテナンスコストの増加につながるというデメリットを生じるからである。空気抵抗低減によるメリット(省エネルギー効果)を定量的に評価し、デメリットと比較することにより、初めて、在来線車両の空気抵抗低減を進めることができる。そのためには、在来線車両の形状を改良した場合の空気抵抗低減量を精度良く求め、消費エネルギーの低減量を定量的に評価する必要がある。

本報告では、在来線車両の空気抵抗低減の評価方法および低減量を求め、それによる省エネルギー効果の評価例を示す。

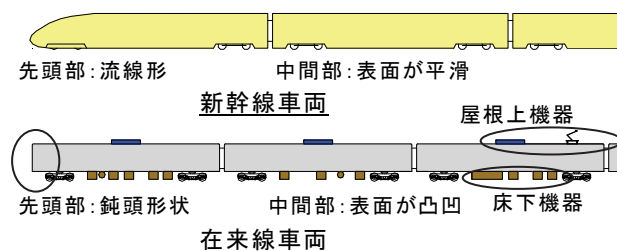


図1 新幹線および在来線車両形状

2. 風洞実験を用いた空気抵抗低減量の評価方法

2.1 風洞実験方法

鉄道車両の空気抵抗低減の評価手法として、実際の車両を用いた実験(現車試験)、風洞実験、数値計算等があるが、費用や精度を考慮すると風洞実験が最も現実的な評価手法と考えられる。鉄道車両は非常に細長いため、空気抵抗を評価するためには、先頭・後尾部と中間部に分けて考

えることが合理的である。さらに、形状の改良による空気抵抗の低減効果が見込まれるのは、先頭・後尾部と中間部の屋根上および床下である（図 1）。そこで、それらの部位ごと（先頭・後尾部、床下部、屋根上部）に分けて風洞実験を実施した。車両側面や表面の摩擦抵抗を含めた中間部の空気抵抗は、風洞実験による評価が難しいこと及び大きな空気抵抗低減効果が期待できないことから、空気抵抗低減効果の評価という対象から外した。縮尺模型を用いる鉄道車両の風洞実験において、床下部や屋根上部の空気抵抗を精度良く評価するためには、実際の流れ（現車の車両周りの流れ）を模擬する必要がある。

(1)車両床下の流れの模擬

車両床下の流れを模擬するために、鉄道総研が所有している鉄道車両用の風洞実験設備（大型低騒音風洞；以下、米原風洞）には、境界層吸込装置およびムービングベルトが装備されている¹⁾。これらの機器を用いた風洞実験により、風洞の床面に発達する境界層の影響を排除し、現車の床下の流れを模擬することができる。現車試験結果と比較することにより、米原風洞での風洞実験により実際の車両床下の流れが再現されていることを確認した。さらに、現車試験により評価した実際の車両床下部を改良した場合の空気抵抗低減量と、現車試験に用いた車両を再現した模型による風洞実験結果から推定した空気抵抗低減量を比較した結果、風洞実験結果は、現車試験結果に一致しており、米原風洞での風洞実験により現車の床下部改良による空気抵抗低減量を精度良く評価できることを確認した²⁾。

(2)車両屋根上の流れの模擬

車両の屋根上機器の空気抵抗を風洞実験により評価する場合にも、現車の周りの流れを再現する必要がある。屋根上機器は車両の表面に発達した境界層の影響を受ける。風洞実験でも模型表面に境界層が発達するが、現車の境界層と比較するとその発達は不十分であり、そのままでは境界層の影響を受ける屋根上機器の空気抵抗を精度良く評価することができない。そこで、模型の上流にスパイアという先の尖った三角形の板を取り付け、現車の屋根上の境界層を再現した。屋根上の流れを模擬することにより、風洞を用いて屋根上機器の空気抵抗を精度良く評価することが可能となる。

2.2 現車の空気抵抗

空気抵抗低減効果による省エネルギー効果を評価するためには、車両全体の空気抵抗の評価が必要となる。しかし、風洞実験では、上述したように先頭・後尾部、床下部、屋根上部というような部位ごとの空気抵抗を評価できるが、車両全体の空気抵抗を風洞実験により精度良く評価することは、車両の大きさを考慮すると現実的には不可能である。一方で、これまでの研究において、現車試験により中間部の空気抵抗が評価されている³⁾。現車試験結果と先頭・後尾部の風洞実験結果を用いることにより、切妻の先頭形状を持つ 10 両編成の通勤型電車の空気抵抗係数は 2.3 と推定される。

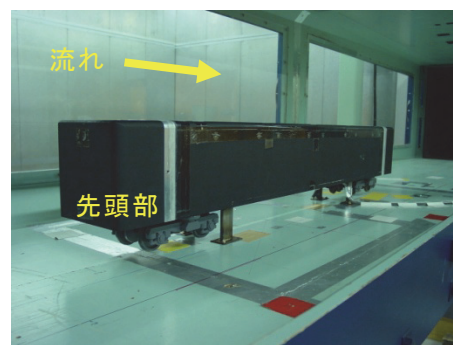


図 2 先頭部の空気抵抗測定

3. 空気抵抗低減量の評価

3.1 先頭・後尾部形状改良

在来線の先頭・後尾部形状は、特急列車に見られる流線形の形状から、通勤電車に見られる切妻型の形状まで様々であるが、ここでは、大きな空気抵抗の低減効果が見込まれる切妻型の先頭・

後尾部を改良することによる空気抵抗低減量を評価した。空気抵抗低減のためには、側面および上面を3次元に絞った流線形の形状が理想であるが、運転席の室内空間や旅客の車内空間や出入り口の確保を考慮して、先頭・後尾部の改良は2次元的な改良（上から見て先端の両側の角を改良）とした。先頭部の空気抵抗は、車両の長さの影響を受けにくいと考えられるので、使用するモデルを1両として風洞実験を行った（図2）。風洞実験結果を図3に示す。形状変化部が長いほど空気抵抗は低減し、空気抵抗係数は切妻型の先頭部と比較して最大で0.6程度減少する。風洞実験結果を現車試験の車両断面積（レール踏面から屋根までの高さ×最大幅）で補正すると、先頭部形状の改良による空気抵抗低減効果は、10両編成の通勤型電車全体の空気抵抗の20%程度と見積もられる。

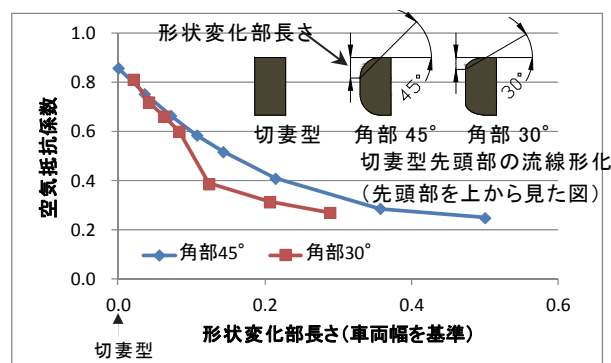


図3 先頭部の空気抵抗低減量

3.2 床下部形状改良

在来線車両の床下機器カバーは、上述した理由から実現が難しいと考えられるため、他の手法およびその効果について検討する。在来線車両の床下には様々な形状の機器が搭載されているため、ここでは床下機器を一つのブロックとして考え、そのブロックの長さを変化させることによる空気抵抗の増減量を評価した

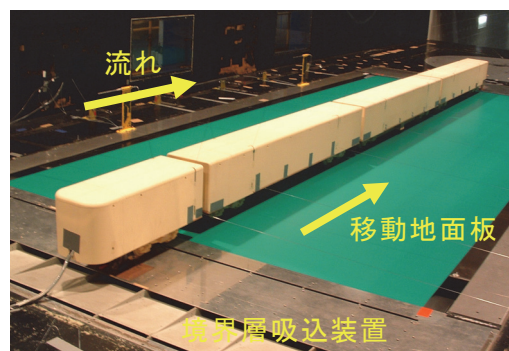


図4 床下機器の空気抵抗測定

（図4）。その結果を図5に示す。台車間に取り付けた床下機器の長さにより、空気抵抗の増減が見られる。床下機器の取り付けにより、その機器分の空気抵抗が付加されるが、床下機器の下流にある台車から見た場合、床下機器により流れが遅くなり（カバーの役割）台車の空気抵抗は低減する。一方、台車の下流にある床下機器から見た場合、台車により流れが遅くなり、床下機器の空気抵抗が低減する。

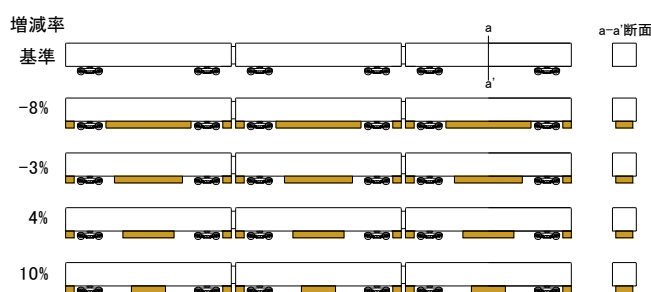


図5 床下機器変更による空気抵抗の増減

風洞実験から、台車間の床下機器を長くするほど、車両の空気抵抗が低減することがわかった。その影響は、床下機器無し形状を基準とすると、10両編成の通勤型電車全体の空気抵抗の±10%に達する。このことは、床下機器の形状や配置を工夫することにより、空気抵抗がこの程度まで低減する可能性があることを示している。

3.3 屋根上部形状改良

在来線車両の主な屋根上機器は、ユニットクーラーとパンタグラフである。ここでは、全車両に搭載され空気抵抗への寄与が大きいユニットクーラーについて検討する。風洞実験により端部が切妻形状となっているユニットクーラーにフェアリングを取り付けた場合の空気抵抗低減効果を評価した。フェアリングは、単純な2次元形状（横から見て上側の角を落とす）とした。風洞実験の様子を図6に示す。屋根上だけを再現した模型を用いて、上流部には、境界層を模擬する

ためのスパイアを取り付けた。スパイアによって、現車の流速分布を風洞実験で再現できていることがわかる（図 7）。単純な形状のフェアリングでも大きな空気抵抗低減効果が認められ、10 両編成の通勤型電車全体の空気抵抗を最大で 9%低減させることがわかった。

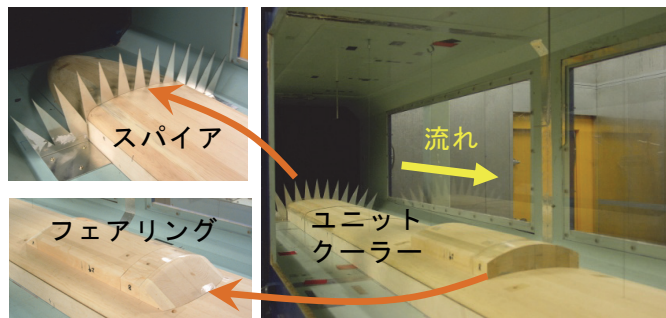


図 6 ユニットクーラーの空気抵抗測定

4. 消費エネルギー低減効果

新幹線の場合には、駅間が長くほとんどの区間を最高速度で走行するために、空気抵抗の低減効果が省エネ効果に直結するが、在来線の場合には、常に最高速度で走行しているわけではなく、駅停車や加減速を考慮する必要があるため、空気抵抗低減効果を消費エネルギーに換算して評価する必要がある。列車を運行するためには、空気抵抗や機械抵抗等により消費されるエネルギー以外にも、主電動機の損失等でエネルギーを消費する。ここでは、一例として、10 両編成の通勤型電車（回生ブレーキ有り）を用いた近郊区間の在来線電車の走行シミュレーション（最高速度 130km/h、駅停車、加減速を考慮してランカーブを設定）から、空気抵抗低減効果が、ある区間（198km）を走行した時に消費したエネルギーの削減に与える効果を評価した。上述した空気抵抗低減策のうち、床下部改良による効果は列車ごとに異なるために、ここでは、屋根上部および先頭・後尾部形状の改良による空気抵抗低減が、消費エネルギー低減に与える効果を評価した。屋根上部および先頭・後尾部形状の改良による空気抵抗低減量は最大で 29%であり、それにより、消費エネルギーを 11%削減できることがわかった（図 8）。

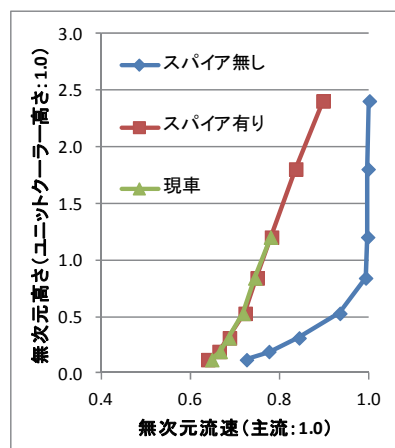


図 7 車両屋根上流れの再現

5. まとめ

在来線車両の省エネルギー化対策として、これまででは、あまり注目されてこなかった車両の空気抵抗の低減効果を風洞実験により精度良く評価した。更に、走行シミュレーションにより、在来線車両の空気抵抗低減が、現実的に在来線車両の省エネルギー化に貢献することを示した。今後は、具体的な車両の設計に役立つような在来線車両の形状の提案を行い、その省エネルギー効果を評価していく予定である。

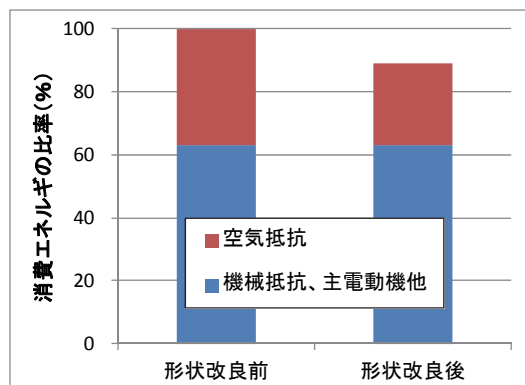


図 8 消費エネルギー低減効果
（屋根上・先頭後尾部形状改良）

参考文献

- (1)丸岡昭：大型低騒音風洞，鉄道総研報告，Vol.10, No.2, pp.11-16, 1996.
- (2)井門敦志：鉄道車両の空気抵抗低減量の評価方法，機械学会論文集 B 編，Vol.69, No.685, pp.2037-2043, 2003.
- (3)原朝茂・大櫛淳・西村弁三，列車の空気抵抗，鉄道技術研究報告，No.591, 1967.