

在来線車両の形状改良による空気抵抗低減と 省エネルギー効果の評価

井門 敦志* 宮地 徳蔵* 井上 達哉*
蝦名 弘太** 岩崎 誠*

Estimation of Aerodynamic Drag Reduction and Energy Saving of
Meter-gauged Railway Vehicles

Atsushi IDO Tokuzo MIYACHI Tatsuya INOUE
Kota EBINA Makoto IWASAKI

Measures to reduce aerodynamic drag have been hardly applied to most of meter-gauged railway vehicles because their speed is much lower than that of Shinkansen vehicles. Therefore, we can have ample possibility for reducing the aerodynamic drag of the meter-gauged railway vehicles. In this study, we proposed improvement of upper-roof and under-floor shape to reduce it and carried out wind tunnel tests to estimate their reducing effect. Furthermore, we calculated the saved amount of energy consumption for running. We found out that the improvement of upper-roof and under-floor shape could reduce the aerodynamic drag by 22% and the energy consumption by 5.4%.

キーワード：空気抵抗，在来線車両，屋根上機器，床下機器，車両周りの流れ

1. はじめに

車両の走行により消費されるエネルギーの一つに、走行抵抗により消費されるエネルギーがある。車両の走行抵抗の低減は、走行により消費されるエネルギーの減少に繋がる。車両の走行抵抗は、機械抵抗と空気抵抗とから成り、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。そのため、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。一方で、新幹線と比較すると速度の低い在来線では、これまで空気抵抗の寄与度が大きくないと考えられ、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。しかしながら、在来線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、車両の軽量化などによる機械抵抗の低減が進み、相対的に走行抵抗に占める空気抵抗の割合が増大している。その結果、空気抵抗低減による省エネルギー化の可能性が大きくなっている。

高速で走行する新幹線車両の形状と比較すると、在来線車両は凹凸の目立つ形状である。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おり、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対策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、それによる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、在来線車両の屋根上部、床下部に注目し、形状改良による空気抵抗低減効果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。

2. 鉄道車両の空気抵抗の評価方法

鉄道車両の空気抵抗の評価手法としては、実際の車両を用いた実験（現車試験）、風洞実験、数値計算等が考えられる。これまでの研究では、現車の1編成の空気抵抗を風洞実験と現車試験を組み合わせで求めている¹⁾。すなわち、車両の空気抵抗を先頭・後尾部の空気抵抗（圧力抵抗）と中間部の空気抵抗（広義の摩擦抵抗）に分け

* 環境工学研究部 車両空力特性研究室

** 環境工学研究部 車両空力特性研究室
(現：東海旅客鉄道株式会社)

特集：環境技術

て考え、中間部の空気抵抗係数を現車試験によって評価し、風洞実験で得られた先頭・後尾部の空気抵抗係数とあわせて、現車1編成の空気抵抗係数を求めている。しかしながら、車両の形状を変更した場合の空気抵抗低減効果を現車試験で評価するには多くの費用が必要となる。一方で、近年発達をめざましい数値計算でも、床下や台車のような複雑な形状を持ち、高レイノルズ数の鉄道車両の空気抵抗を精度良く評価することは難しい。従って、費用や精度を考慮すると、鉄道車両の空気抵抗低減に関する研究では、風洞実験が最も現実的な手法である。

鉄道総研は、1996年に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）を建設した。鉄道車両は非常に大きくかつ細長いため、米原風洞のような大型風洞を用いても、実機（本物の車両）による風洞実験は現実的には不可能であり、車両の空気抵抗を直接求めることは難しい。そこで、空気抵抗の低減量の評価に目し、その評価方法を提案する。

本研究の対象である在来線車両の屋根上部、床下部は、形状改良による空気抵抗低減の余地が大きい。ここでは、各車両に設置される屋根上のユニットクーラー、床下機器の空気抵抗低減を考える。

風洞実験で車両の空気抵抗を直接求めることが難しい大きな理由は、風洞実験では現車と比較してレイノルズ数が小さくなることおよび車両周りの流速分布が異なることである。これらの課題についての考え方を以下に記す。

①レイノルズ数

上述したとおり、現実の鉄道車両は非常に大きいため、風洞実験では縮尺模型を使用しなければならず、レイノ

ルズ数を一致させることは現実的には不可能である。しかしながら、ユニットクーラーや床下機器は、角部のある形状であり、物体の下流側での剥離位置が固定されるために、空気抵抗係数がレイノルズ数の影響を受けにくく、それらの機器の空気抵抗係数は、風洞実験で得られる縮尺模型の空気抵抗係数と一致すると考えられる。

②流速分布

走行する車両の周りには境界層が発達し、屋根上の流れは乱流境界層流れ、床下の流れは地面の影響を受けた乱流クエット流れになる。縮尺模型による風洞実験では、車両模型表面での境界層の発達が十分ではなく、現車での車両周りとは異なる流速分布（風洞実験の流速が高い）となる。そこで、風洞実験において車両模型にスパイアを取り付けることにより現車の車両周りの流速分布を再現する。

また、車両周りの境界層は先頭から後尾にかけて徐々に発達するため、車両周りの流速分布は、編成位置により異なる。このことが、さらに編成全体の評価を難しくしている。屋根上のユニットクーラー高さ範囲の流速分布に注目すると、その範囲での流速分布は、ある程度まで発達した後（編成の中間部以降）はほぼ同じ流速分布となる^{2), 3)}。一方で、床下の流速分布は、2,3号車以降ではほぼ同一となる⁴⁾。そこで、流速分布が同じとなる中間車両1両分の空気抵抗係数を C_{Di} とすれば、 n 両編成の空気抵抗係数は、 $n \times C_{Di}$ と表される。厳密には、先頭に近い車両では境界層の発達が不十分なため、車両まわりの流速が速くなっており、この方法による編成としての空気抵抗は、多少、過小評価となっていると考えられる。その結果、空気抵抗低減効果も過小評価となる可能性がある。

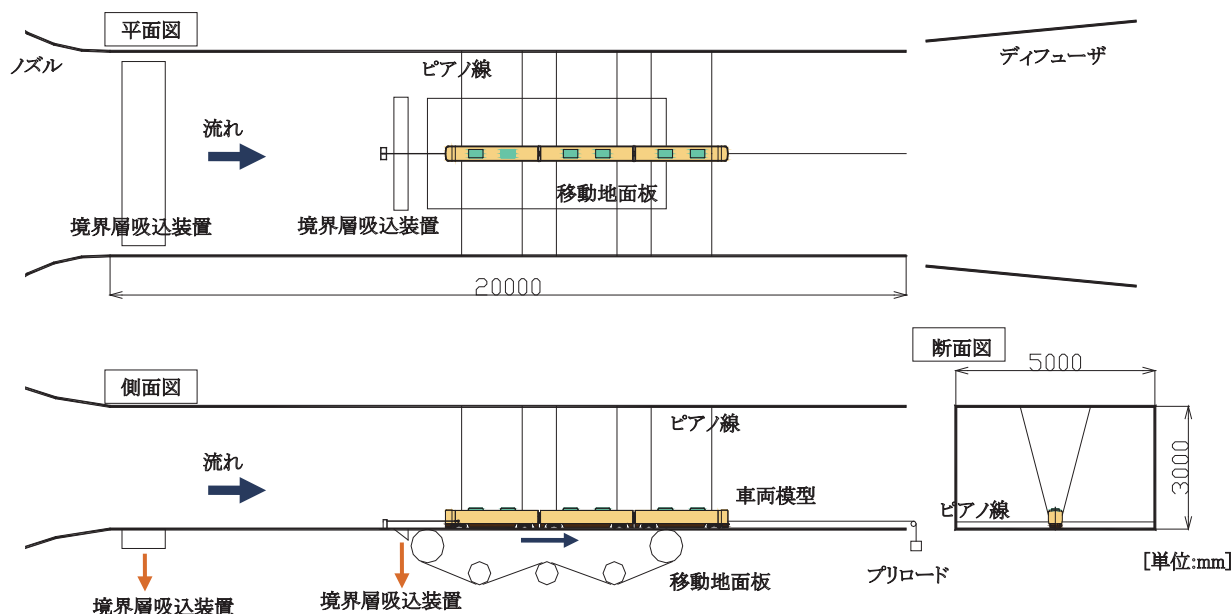


図1 風洞実験概要（密閉型測定部）

3. 風洞実験

3.1 大型低騒音風洞

風洞実験は、米原風洞の密閉型測定部を用いて実施した。測定部の大きさは、幅 5m × 高さ 3m × 長さ 20m、最高風速は、83m/s である。地面模擬のために、測定部の上流部に境界層吸込装置、中央部に境界層吸込装置および移動地面板が設置されている。上流部および中央部の境界層吸込装置により、風洞底面に沿って発達してきた境界層を排除し、さらに、中央部の境界層吸込装置の下流側に移動地面板を設置することにより、移動地面板上で境界層の影響のない流れを実現している。両方の境界層吸込装置は、主流風速に応じて吸込量を調節している。移動地面板の大きさは、幅 2.0m × 長さ 6.0m、最高速度は 60m/s である。また、移動地面板の速度は、主流風速と同じである。図 1 に風洞実験概要を示す。車両模型は 3 両編成で、模型の縮尺は 1/8.4 である。模型はピアノ線（直径 1mm）を用いて吊り上げ、浮いた状態で移動地面板上に設置した。以下に述べる風洞実験の風速は 50m/s である。

3.2 ユニットクーラーの空気抵抗低減

3.2.1 風洞実験概要

図 2 にユニットクーラーの空気抵抗測定状況を示す。先頭車両の屋根上にスパイアを取り付け、ユニットクーラーの空気抵抗を評価する中間車両位置において、流速分布を模擬する。流速分布は屋根上に取り付けた楕円形総圧管の総圧と屋根表面の静圧を模型に搭載した多点圧力計（スキヤニバルブ社製：DSA-3217）で測定した。また、先頭車に内蔵したロードセル（昭和測器社製：DP100N）で、中間車両全体に働く空気力を測定した。ユニットクーラーの形状改良による空気抵抗低減効果を通常のユニットクーラーが搭載された場合の空気抵抗と形状を改良した場合の空気抵抗の差として求めた。

3.2.2 屋根上の空気抵抗低減策

在来線車両の屋根上には、様々なユニットクーラーが搭載されているが、ここでは、図 3 に示すような 1 車両に 2 台搭載されているものを選定し、ユニットクーラーの形状改良による空気抵抗低減効果を調べた。ユニットクーラーの空気抵抗低減策として、前後へのフェアリングの取り付けおよびユニットクーラーの連結を提案する。

3.2.3 屋根上流速分布測定結果

図 4 に流速分布測定結果を、風洞実験の主流で無次元化した形で示す。比較のため現車屋根上の流速分布をあわせて示す。現車試験の流速分布は、走行速度で無次元化した。風洞実験では、模型周りの境界層の発達が不十分であり、現車より流速が高くなる。そのために、上流側にスパイアを取り付けることにより、流速分布の形を調整し、更に、主流風速を読み替えることにより、無次元流速分布を現車試験に合うように補正する。

$u_m / (\alpha U_m)$: 無次元流速（風洞実験）

u_r / U_r : 無次元流速（現車試験）

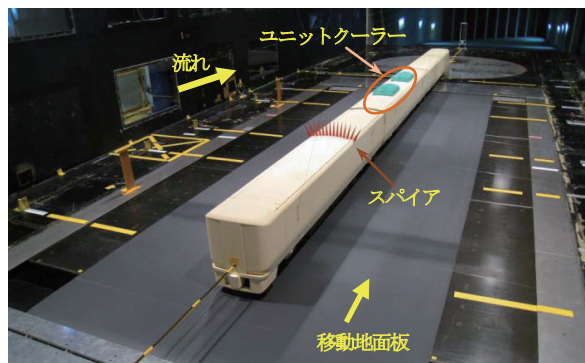


図 2 空気抵抗測定状況（ユニットクーラー改良）

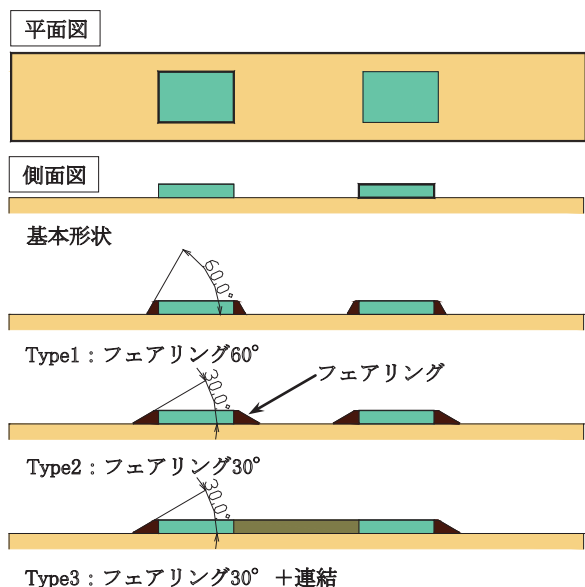


図 3 ユニットクーラーの空気抵抗低減策

ここで、

α : 調整係数

u_m : 風洞実験での流速 (m/s)

U_m : 風洞実験の主流速度 (m/s)

u_r : 現車試験での流速 (m/s)

U_r : 現車の走行速度 (m/s)

風洞実験における主流風速は U_m であるが、主流風速を読み替えるために、調整係数 α を用いて、流速分布を無次元化する場合の主流風速を αU_m （以下、調整主流）と読み替える。その結果、模型屋根上の無次元流速分布は、 $u_m / (\alpha U_m)$ となる。 $\alpha=1$ 以外の数値を取る場合、境界層外端の無次元流速は 1 とならず現車試験結果に一致しないが、ここでは、ユニットクーラー高さ程度までの無次元流速分布が現車のそれに一致すればよいので、 α に 1 以外の数値を入れて、屋根上からユニットクーラー高さまでの分布を模擬できれば十分である。図 4 には、調整主流で無次元化した流速分布を併せて示す。 $u_m / (\alpha U_m)$

特集：環境技術

を現車試験に合わせる場合の調整係数は、 $\alpha=0.91$ となる。

3.2.4 空気抵抗測定結果

風洞実験で測定される空気力は、通常、主流風速 U_m で無次元化されるが、ここでは、主流の読み替えを行っているので αU_m で無次元化する。

$$C_D = D / (1/2\rho (\alpha U_m)^2 S)$$

C_D : 空気抵抗係数

ここで、

D : 空気抵抗 (N) (風洞の主流風速 = U_m)

ρ : 空気密度 (kg/m^3)

S : 代表面積 (m^2) (車両幅×車両高さ)

風洞実験で得られた空気抵抗係数は、あくまでも風洞実験モデルの空気抵抗係数であり、現車のそれとは同一ではないことに注意が必要である。

車両の空気抵抗をユニットクーラーとそれ以外に分離すると、

$$C_{Dm} = C_{Dmu} + C_{Dmo}$$

$$C_{Dr} = C_{Dru} + C_{Dro}$$

ここで、

C_{Dm} : 模型の中間車両の空気抵抗係数

C_{Dmu} : 模型のユニットクーラーの空気抵抗係数

C_{Dmo} : 模型のユニットクーラー以外の空気抵抗係数

C_{Dr} : 現車の中間車両の空気抵抗係数

C_{Dru} : 現車のユニットクーラーの空気抵抗係数

C_{Dro} : 現車のユニットクーラー以外の空気抵抗係数

以下、添え字 i で模型タイプ (図3における Type の数字) を示すこととする。

模型形状が $i=1$ から 2 に改良された場合の空気抵抗係数の低減量は、

$$\Delta C_{Dm(1-2)} = C_{Dm1} - C_{Dm2} = (C_{Dmu1} + C_{Dmo1}) - (C_{Dmu2} + C_{Dmo2})$$

$$\Delta C_{Dr(1-2)} = C_{Dr1} - C_{Dr2} = (C_{Dru1} + C_{Dro1}) - (C_{Dru2} + C_{Dro2})$$

ここで、模型ユニットクーラー以外の空気抵抗係数は、ユニットクーラーの形状が変化しても同じであると考えられるので、 $C_{Dmo1} = C_{Dmo2}$ 、 $C_{Dro1} = C_{Dro2}$ となり、

$$\Delta C_{Dm(1-2)} = C_{Dmu1} - C_{Dmu2}$$

$$\Delta C_{Dr(1-2)} = C_{Dru1} - C_{Dru2}$$

上述したとおり、ユニットクーラーの空気抵抗係数は、現車と模型とで同じであると考えられるので、 $C_{Dmu1} = C_{Dru1}$ となる。したがって、

$$\Delta C_{Dr(1-2)} = \Delta C_{Dm(1-2)}$$

となり、風洞実験結果 (中間車両の空気抵抗係数の差) から、現車の空気抵抗係数の低減量を評価することができる。

図5に、基本形状からの空気抵抗係数低減量を示す。ユニットクーラーへのフェアリングの取り付けにより、空気抵抗係数が低減する。フェアリングの角度が小さいほど、空気抵抗の低減効果は大きく、ユニットクーラーを連結するとさらなる空気抵抗低減が可能となる。

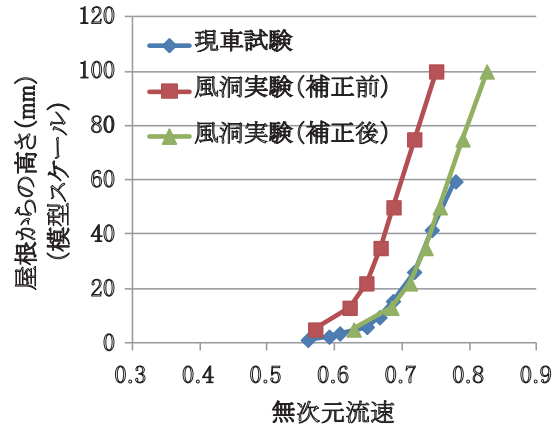


図4 屋根上の流速分布

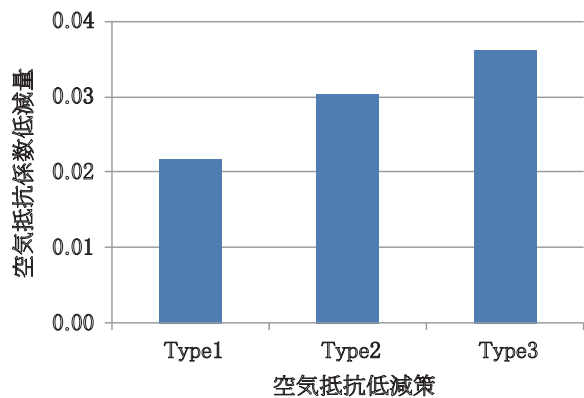


図5 ユニットクーラーの空気抵抗係数低減量

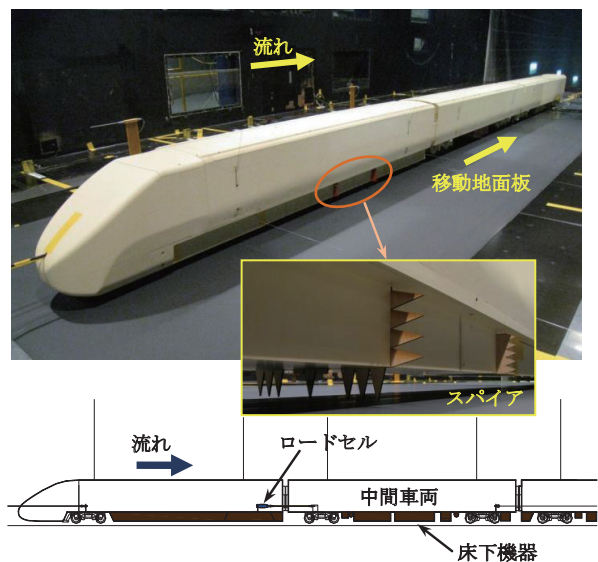


図6 空気抵抗測定状況 (床下形状改良)

3.3 床下機器の空気抵抗低減

3.3.1 風洞実験概要

図6に床下機器の空気抵抗測定状況を示す。中間部の床下機器の空気抵抗を評価するため、先頭車両の床下にスパイアを取り付け、中間車両の流れ方向中央位置での流速分布を測定する。測定には、ユニットクーラーの測定の場合と同じ機器を用いた。楕形総圧管の総圧と床下

表面の静圧を模型に搭載した多点圧力計で測定し、流速分布を求めた。また、先頭車に内蔵したロードセルで、中間車両に働く空気力を測定し、車両床下機器の形状改良による空気抵抗低減効果を標準形状の中間車両との空気抵抗の差として求めた。

3.3.2 床下の空気抵抗低減策

在来線車両の床下機器は様々であるが、ここでは図7に示すような床下機器の車両（基本形状）を選定し、床下機器の形状改良による空気抵抗低減効果を調べた。在来線車両においても、新幹線車両の床下形状のように、全体をカバーすることが最も有効であるが、在来線車両の床下にカバーをつけることは、コストやメンテナンスを考慮すると現実的ではない。ここでは、現実的な対策として、床下機器形状の断面を統一することにより、空気抵抗の低減を図ることを提案する。床下には、様々な機器箱が取り付けられている。これらの機器箱は、大きさや取り付け位置が統一されていないため凸凹を生じ、そのことが空気抵抗増大の原因となっている。そこで、機器箱の断面を統一し、その中に、機器を納める構造を提案する。この時、機器箱の長さは必ずしも統一する必要はない。本研究では、断面の統一された断面形状を持つ機器箱を直線的に配置すること（図7参照）による空気抵抗低減量を評価した。

3.3.3 床下流速分布測定結果

車両の床下の幅方向の中心付近は、車両の底面と軌道面に囲まれた二次元クエット流れになっていると考えられるが、車両の側面に近くなると、車両外部の流れも床下流れに影響する。そのため、風洞実験において車両の床下流れを再現するためには、幅方向の中心位置だけでなく、断面全体の分布を再現することが必要となる。

過去の現車試験において、車両の幅方向の中心で中間部分の車両床下の流速分布を測定した⁵⁾。更に、模型走行試験を実施し、車両の幅方向の中心で中間部分の車両床下の流速分布が、現車試験結果と一致する事を確認し、模型走行試験で断面全体の流速分布を得た⁶⁾。この分布は、現車の断面全体の流速分布を再現していると考えられるので、風洞実験において、模型走行試験で推定された現車の断面全体の流速分布を再現するように、床下スパイアを取り付けた（図6）。

図8に流速分布測定位置および結果を示す。スパイアを取り付けることにより、断面全体の分布を概ね、再現できていることがわかる。

3.3.4 空気抵抗測定結果

風洞実験で得られた空気抵抗を $(1/2\rho U_m^2 S)$ で無次元化する。ユニットクーラーの場合と同様に、中間車両の空気抵抗係数の差から、空気抵抗係数の低減量を評価した。図9に機器箱の大きさと空気抵抗係数の増減量の関係を示す。短い機器箱の場合には、台車、機器箱ともに速い流れが当たり、かえって空気抵抗が増大することがわかる。一方、機器箱が長い場合には空気抵抗が低減す

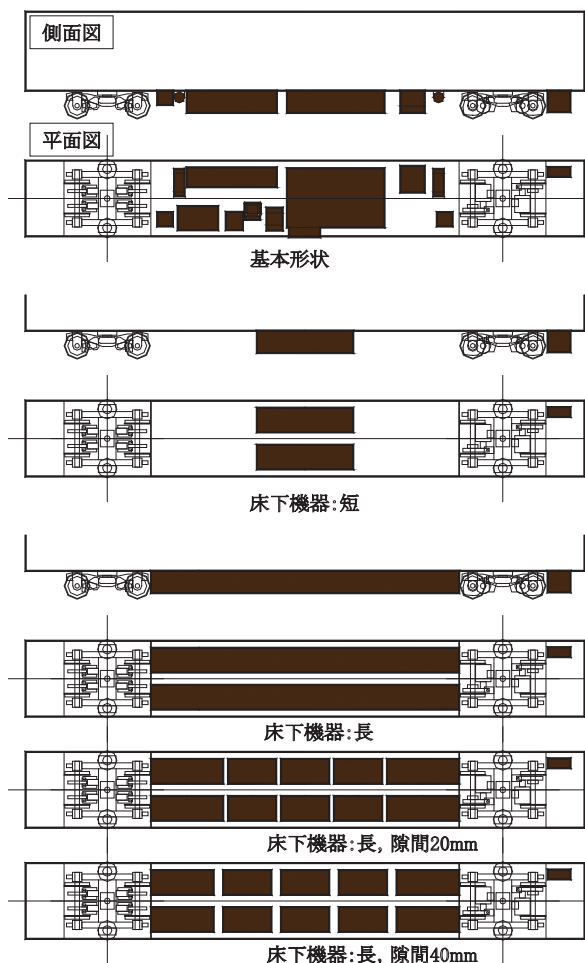


図7 床下機器および空気抵抗低減策

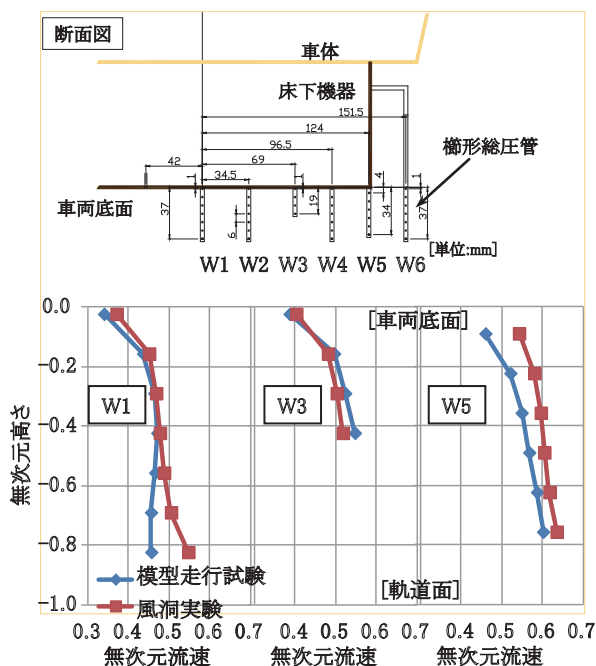


図8 床下の流速分布

る。これは、機器箱が台車の下流側にあるときには、台車が機器箱に当たる流速を緩和し、逆の配置の場合には、機器箱が台車に当たる流れを緩和するためである。機器

特集：環境技術

箱の断面形状を統一し、空隙を小さくするように配置することにより、空気抵抗が小さくなることわかる。ここでは、メンテナンスを考慮し、機器箱を2列になるように配置している。しかし、流れ方向に垂直な面の空隙が必要な機器もあることから、流れ方向の空隙を確保した形状についても、空気抵抗の評価を行った。空隙が大きくなるほど、空気抵抗の低減効果は小さくなるが、それでも、基本形状よりは空気抵抗が小さいことがわかる。

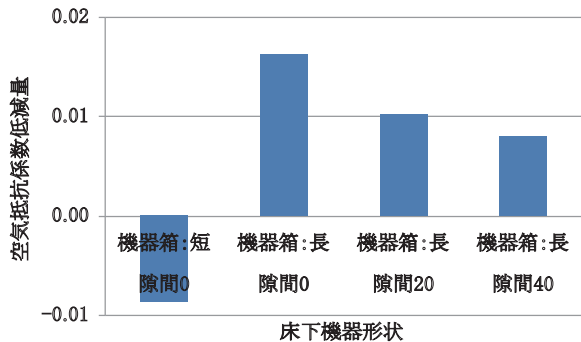


図9 床下機器の空気抵抗係数低減量

4. 編成の空気抵抗低減効果

省エネルギー効果を評価するためには、編成としての空気抵抗の低減率を求める必要がある。3.2節、3.3節で評価したのは、1両分の空気抵抗低減量である。前述した通り、これを車両数倍すれば、編成全体の空気抵抗係数の低減量が評価できる。一方で、現車の編成全体の空気抵抗係数は、上述の通り、現車試験により求めた中間部分の空気抵抗（広義の摩擦抵抗）と先頭・後尾部の風洞実験結果から求められる。

現在の先頭・後尾部形状は、多少、角部が丸められている。ここでは、先頭・後尾部の角部が、車両幅の17%の半径で丸められた先頭・後尾形状を持つ、8両編成の車両について考える。1編成空気抵抗係数は、過去の研究^{1), 7)}から、 $C_D=C_{Dp}+lC_{Dl}=1.87$ （編成長さ $l=160m$ 、先頭・後尾部の空気抵抗係数 $C_{Dp}=0.61$ 、中間部の単位長さあたりの空気抵抗係数 $C_{Dl}=0.0079$ ）と推定される。

一方、上述の風洞実験結果から、屋根上機器と床下機器形状で最も効果の大きかった形状での空気抵抗係数低減量は、各々、0.036、0.016であり、その和は、0.052となる。8両編成全体では、0.42（ $=0.0052 \times 8$ ）となり、編成としての空気抵抗低減量は22%となる。

5. 空気抵抗低減による省エネルギー効果

風洞実験により得られた、車両の形状改良による空気抵抗低減効果から、省エネルギー効果を試算する。上述したとおり、走行抵抗は機械抵抗と空気抵抗の和であるが、機械抵抗が列車速度の一次式で表されるのに対し、

空気抵抗は列車速度の2乗に比例する。つまり、列車速度が低ければ空気抵抗の占める割合が小さいが、列車速度が高くなると空気抵抗の占める割合が大きくなる。このことは、走行パターンにより空気抵抗の占める割合が異なり、省エネルギー効果が異なることを意味する。

車両の走行により消費されるエネルギーの試算には、鉄道総研が開発した運転曲線作成システム Speedy⁸⁾を用いる。ここでは、走行距離200km、最高速度130km/hの営業線を想定した区間の走行パターンにおいて、8両編成の列車が走行した場合の消費エネルギーを試算する。試算に用いた車両の走行抵抗を表す式中の速度の2乗の項が、おおよそ空気抵抗を示していると考え、この係数を4章で得られた22%減として消費エネルギーを計算する。上述のパターンで走行した場合、空気抵抗が22%低減すると消費エネルギーが5.4%低減すると試算される。

6. まとめ

本研究では、在来線の屋根上および床下の形状改良による空気抵抗低減策を提案し、風洞実験により空気抵抗の低減効果の評価した。さらに、運転曲線作成システム Speedy を用いて、走行のためのエネルギー消費の削減効果を計算例として示した。その結果、屋根上および床下形状の改良により、空気抵抗が22%低減し、走行による消費エネルギーが5.4%削減できることがわかった。

文献

- 1) 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，591，1967
- 2) Crespi P., Gregorio R., Vinsion P., Laser Doppler Velocimetry Measurements and Boundary Layer Survey On-Board the TGV High Speed Train, Proceeding of the World Congress on Railway Research, 1994.
- 3) 井門敦志：鉄道車両の空気抵抗低減に関する研究，東北大学博士論文，第4章，pp.79-91, 2003
- 4) 井門敦志：鉄道車両の空気抵抗低減の評価方法，日本機械学会論文集，Vol.69, No.685, pp.2037-2043, 2003
- 5) 井門敦志，他：LDVによる車両床下流速分布の測定，第16回鉄道技術連合シンポジウム講演論文集，pp.199-200, 2009
- 6) 井門敦志，吉岡修哉：車両模型走行装置による車両床下流れの解明，第18回鉄道技術・政策連合シンポジウム講演論文集，pp.131-134, 2011
- 7) 井門敦志：鉄道車両の空気抵抗低減に関する研究，東北大学博士論文，第5章，pp.93-105, 2003
- 8) 中村英夫，近藤稔，村上浩一，小川知行，熊澤一将，山下修：ディーゼルハイブリッド車両用運転シミュレータの開発，鉄道総研報告，Vol.25, No.1, pp37-42, 2011