

高速鉄道車両の屋根上流れを再現した風洞試験法

高石 武久* 池田 充**

Experimental Method in Wind Tunnel Tests to Simulate the Turbulent Flow on the Roof of High-speed Trains

Takehisa TAKAISHI Mitsuru IKEDA

Difference of flow conditions between wind tunnel tests and actual trains sometimes brings large errors in the estimation of aerodynamic noise from devices like pantographs on the train roof and also aerodynamic forces acting on them. In this study, turbulent flow conditions around a pantograph of an actual running train are measured first. Next we propose an experimental method of placing obstacles upstream the test section of a wind tunnel in order to simulate the turbulent flow. Finally, aerodynamic noise and force of a pantograph model are evaluated under the condition with or without the obstacles.

キーワード：高速鉄道，風洞試験，乱流境界層，集電装置，空力音，空気力

1. はじめに

高速鉄道では、屋根上に設置された集電装置に対する流体力学的作用を十分に把握しておくことが、安定した集電性能と低騒音化の両立を図る上で重要である。そのための有効な検討手段が風洞試験であり、これまでの車両開発においても、集電装置に関わる空気力や空力音を評価するための風洞試験が数多く実施されてきた。しかしながら、集電装置周りの流れ場は車両周りに形成された境界層の影響を受けるにもかかわらず、従来の風洞試験ではその影響を十分な精度で反映できていなかった。そのため、風洞試験で事前に得られていた空気力や空力音の結果と現車試験の結果とが、合致しないこともあった。

そこで本研究では、新幹線屋根上流れを再現した風洞試験法の開発を行った。最初に、再現すべき流れの様子を把握するために、実際の新幹線の屋根上において、熱線流速計と三孔管を用いて、集電装置周りの流れ場の測定を行った。次に、風洞の開放型測定部において、乱流生成装置の形状や配置を工夫することによって、新幹線

屋根上の風速分布を再現するとともに、乱流生成装置自身から発生する空力音の影響を抑える風洞試験法の開発を行った。最後に、この方法を適用して集電装置模型の風洞試験を行い、パンタグラフに作用する空気力の評価を行った。本稿ではこれらの結果について報告する。

2. 新幹線屋根上の風向・風速測定

新幹線屋根上の風速分布を測定した例としては、森川らが楕形ピトー管を用いて測定した結果¹⁾などがある。当時測定に用いた車両は、空力音低減のために屋根上の凹凸を低減する対策が施されていたが、パンタグラフカバーや車間の間隙など、現在の新しい形式の車両に比べると、屋根上の流れを乱すものが多かった。また、車両屋根上に搭載されたパンタグラフ近傍の流れの測定例は、これまでなかった。そこで本研究では、図1に示すように、新形式の新幹線車両屋根上の風速分布を、熱線流速計を用いて測定するとともに、パンタグラフに三孔管を内蔵した舟体を搭載し、パンタグラフそのものを風

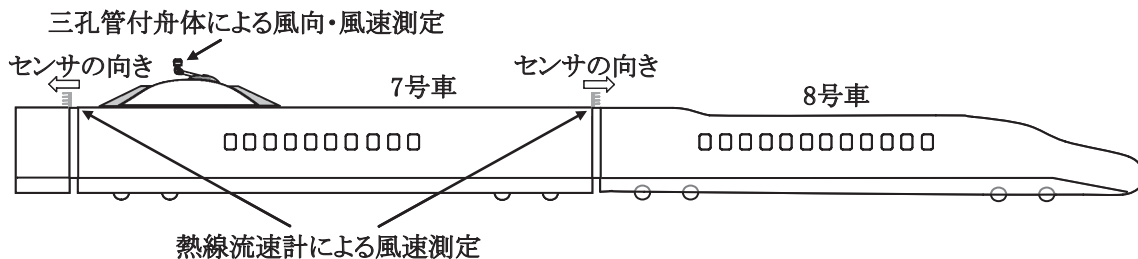


図1 現車（新形式）を用いた風向・風速測定の概略図

* 環境工学研究部 騒音解析研究室

** 鉄道力学研究部 集電力学研究室

特集：環境技術

向・風速測定センサとして用いることによって、舟体に対する相対的な流れ(対向風)の風向・風速測定を行った。

2.1 熱線流速計を用いた風速測定

新幹線屋根上に形成される乱流境界層の様子を調べるために、熱線流速計を用いて風速分布の測定を行った。図2に、現車での測定の様子を示す。櫛形の治具の先端に熱線流速計を取り付けることで、屋根上から100mm, 200mm, 300mm, 400mmの高さの風速を測定した。図1に示すように、7号車に設置された集電装置への流入速度を測定するために、8号車方向へセンサを向けて7-8号車間に櫛形治具を取り付けた場合と、6号車方向へセンサを向けて6-7号車間に櫛形治具を取り付けた場合の、計2条件で測定を行った。列車速度が300km/hまでの範囲で測定を行い、このうち収録を行う8秒間に列車速度が変わらなかったデータを抽出して、列車速度と風速との関係を直線回帰し、その傾きを無次元化後の風速とした。

図3は、その結果である。明かり区間、トンネル区間ともに、過去の測定結果と同様に、先頭に近い測定点ほど平均風速が全体的に大きく、編成の後側になるほど全体的に小さくなっている。このことから、先頭に近いほ

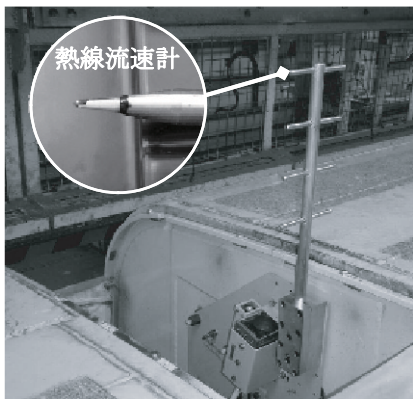


図2 熱線流速計を用いた新幹線屋根上風速測定の様子

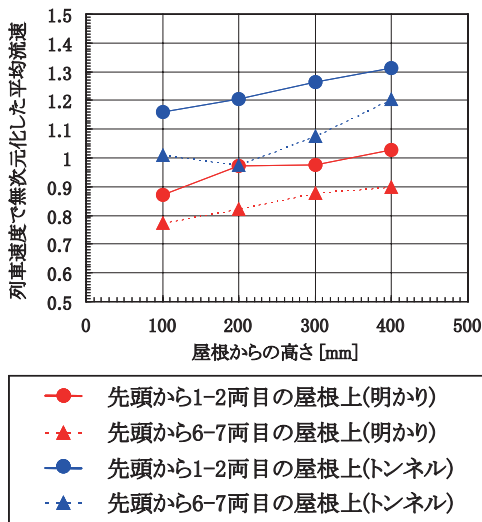


図3 熱線流速計を用いた新幹線屋根上風速測定結果

ど境界層が薄く、編成の後側になるほど境界層が厚くなっていると考えられる。また、トンネル区間の平均風速は、明かり区間に比べて1.2～1.3倍速くなった。

2.2 三孔管を用いた風速測定²⁾

三孔管を内蔵した舟体をパンタグラフに搭載し、パンタグラフ自体を風向風速センサとして利用することによって、パンタグラフの舟体近傍における風向・風速の測定を行った。図4に示すように、構造的に高い強度が期待できるコブラ形三孔管を舟体の前後両側面にそれぞれ1個ずつ取り付け、上流側の三孔管を計測に使用した。三孔管の取り付け位置は、流れ場が比較的2次元的で、なおかつ離線アークの影響を受けにくい箇所が望ましいため、今回は図1に示す7号車のパンタグラフの、図4に示す主すり板の端部付近(主すり板と補助すり板との突き合わせ部付近)の舟体側面とした。三孔管の各圧力孔の圧力をパンタグラフ台枠内に収納した微差圧計により測定し、その出力をテレメータによって車内に伝送し、位置情報や速度情報とともに収録した。

最初に、パンタグラフをワイヤで中腰姿勢とし、舟体上面をレールレベルから4800mm(屋根上から1200mm)の高さで固定した状態で風向・風速測定を行った。その際、ワイヤの張力を測定することによりパンタグラフ揚力の評価も同時に行った。図5は、明かり区間とトンネル区間を含めた全区間での測定結果について、パンタグラフ揚力を列車速度に対してプロットした場合と、舟体近傍の対向風速に対してプロットした場合を比較した結果である。現車のパンタグラフ揚力を列車速度に対してプロットした場合には、その速度依存性は不明確である。これに対し、舟体近傍の対向風速に対してプロットすると、現車のパンタグラフ揚力に速度依存性が明確に表れ、風洞試験結果ともよ

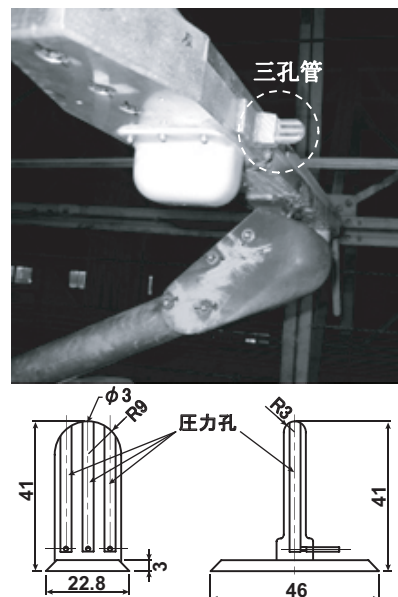


図4 三孔管を用いた風向・風速測定の様子

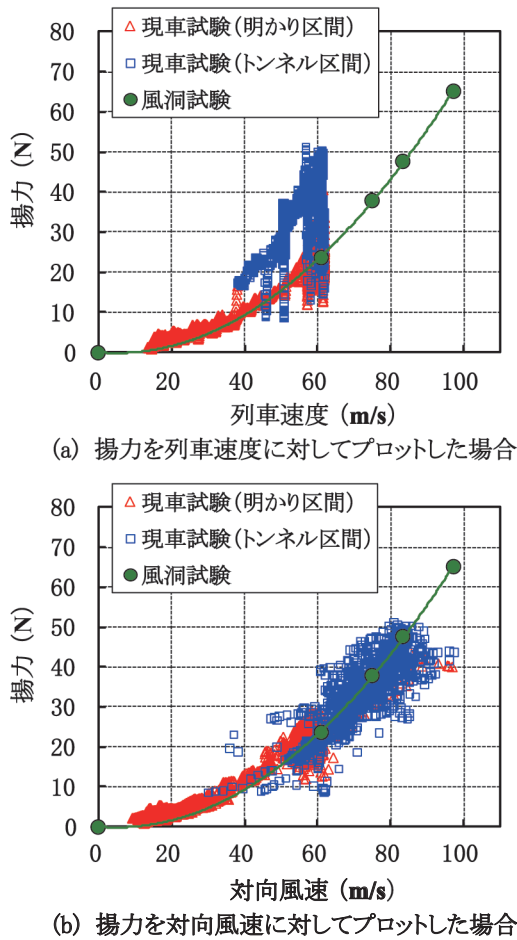


図5 パンタグラフ揚力の速度依存性（反なびき条件）

く一致することがわかる。後出の図6に示すように、明かり区間では舟体に対する対向風の風速は列車速度にほぼ等しくなることから、図5の結果はトンネル内走行時におけるパンタグラフ揚力は、列車速度ではなく舟体近傍の対向風速によって決定づけられることを意味している。

次に、トロッコ線と摺動して集電を行っているパンタグラフの舟体近傍の流れ場を、三孔管を用いて測定した。図6は、トロッコ線と摺動して集電を行っている舟体近傍における対向風速の列車速度に対する比（風速比）、および対向風速の風向測定結果を示したものである。ただし、風速比ならびに風向（迎角）については0.5Hzのローパスフィルタを施した波形である。明かり区間における風速比はほぼ1であり、対向風速は列車速度とほぼ同じとみなしてよいことがわかる。一方、トンネル区間における風速比は明かり区間よりも増加するうえ、トンネル内の走行位置により風速比が変動していることがわかる。風向については、なびき条件と反なびき条件では傾向が異なっており、なびき条件では舟体近傍で若干の吹き上げ、反なびき条件では若干の吹き下ろしとなっている。ただ、風向の値そのものは±1度以内にはほぼ収まる程度である。また、トンネル内走行時の風向は、なびき

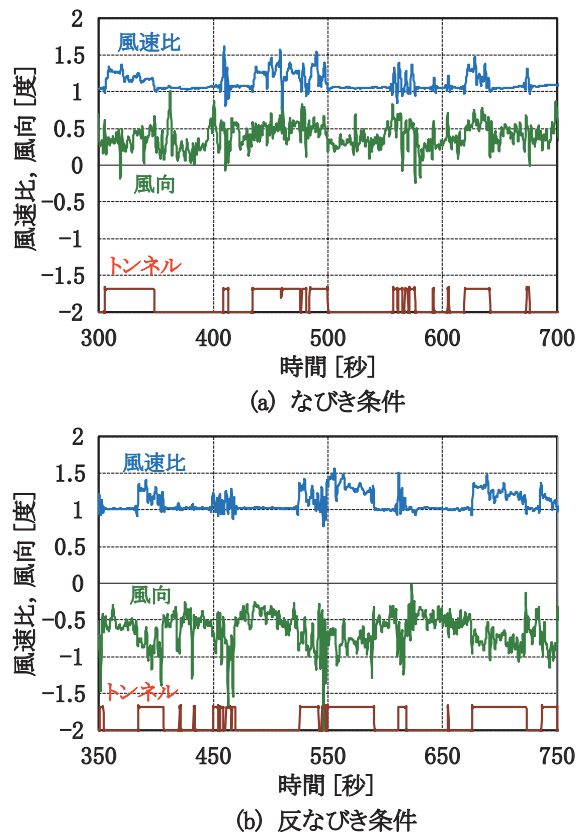


図6 集電走行しているパンタグラフの舟体近傍における対向風速と風向（迎角）

条件では吹き上げが増す方向に、反なびき条件では吹き下ろしが強くなる方向に、それぞれ変化しているが、明かり区間からの変化量自体は0.3度程度と小さい値であった。

3. 新幹線屋根上流れを再現した風洞試験法の開発

高速鉄道の車両開発過程において空力音の低減対策や機器に働く空気力を検討する場合、予備検討手段である風洞試験は、現車周りの流れをできるだけ忠実に再現した状況下で行うのが望ましいが、実際には高速で走行する長い列車周りに発達した乱流境界層が生成されるのに対し、風洞では供試体に当たる流れが一様流であったり、薄い乱流境界層であったりすることが多い。そこで、風洞において発達した乱流境界層を生成して新幹線屋根上流れを再現し、その中に置かれた縮尺模型から放射される空力音や作用する空気力を評価する方法の開発を行った。

乱流境界層の生成方法については、スパイアやラフネスなどを用いて自然風が地表面近くを作る乱流境界層を再現し、車両に働く空気力を評価した例³⁾などがある。ところが、空力音の評価を行う場合には、

特集：環境技術

- (a) 主流速度が大きいため、乱流生成装置自身が十分な強度を持たなければならない。
- (b) 乱流生成装置自身からの音は、供試体からの音に比べて十分小さくなければならない。
- (c) 風洞の暗騒音や乱流生成装置自身からの音との信号雑音比を十分高い値にするためには、空気力測定に比べると縮尺が大きい模型を用いる必要がある、吹出口から供試体設置位置までの距離が相対的に短くなる。

といった点を新たに考慮する必要がある。以下では、これらについての検討結果について述べる。

3.1 風速分布の再現

小型低騒音風洞を用いて予備検討を行ったところ、風洞ノズル吹出口に乱流生成装置を設置し、形状や間隔を調整することで、現車の屋根上に発達する乱流境界層に近い風速分布が得られることがわかった⁴⁾。そこで、鉄道総研が滋賀県米原市に所有する大型低騒音風洞の開放型測定部にて、試験を実施した。図7に、風洞試験の様子を示す。ノズル吹出口の大きさは、幅3m×高さ2.5mである。また、1/3.15縮尺の集電部模型を設置した模型支持台車の大きさは、幅5.5m×長さ7mである。乱流境界層の生成方法については、小型風洞での試験結果を踏まえて製作した正面が二等辺三角形のスパイアや、高さ20mmのLアングルを、ノズル吹出口に設置して用いることにした。低騒音化のため、スパイアの二等辺の角を半径10mmで丸めるとともに、表面に厚さ4mmの不織布を貼付した。表1に、大型風洞試験における乱流生成装置の設置条件と現車での測定条件を示す。

図8は、ピトー管を用いて風速分布を比較した結果である。図の横軸は、車両の屋根または模型支持台車上面からの高さを示しており、このうち①～④の風洞試験結果については、模型の縮尺(1/3.15)の逆数倍して現車換算した後の高さを表している。図の縦軸は、列車速度または測定を行った断面における風洞の一樣流速度(=150km/h)で無次元化した、主流方向の平均風速を示

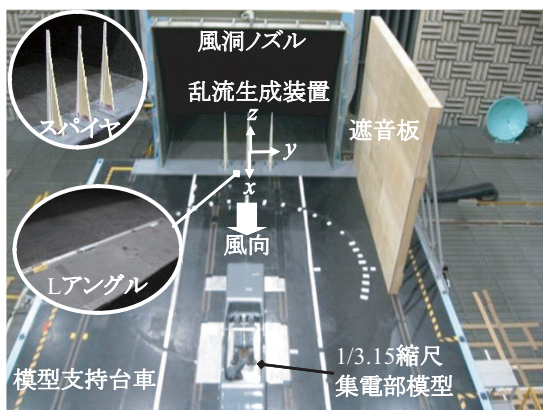


図7 大型低騒音風洞における試験の様子

表1 大型風洞試験における乱流生成装置の設置条件と現車での測定条件

	スパイアの形状 [mm]	スパイアの本数 [本]	スパイアの間隔 [mm]	スパイアの表面状態
①	乱流生成装置なし			
②	H1250 × W100	3	600	不織布貼付
③	H1000 × W60	3	400	不織布貼付
④	H20 × W1593 のLアングル			
Ⓐ	現車(旧形式), 先頭から1両目の屋根上, 明かり区間 ¹⁾			
Ⓑ	現車(旧形式), 先頭から8両目の屋根上, 明かり区間 ¹⁾			
Ⓒ	現車(新形式), 先頭から1-2両目の屋根上, 明かり区間			
Ⓓ	現車(新形式), 先頭から6-7両目の屋根上, 明かり区間			

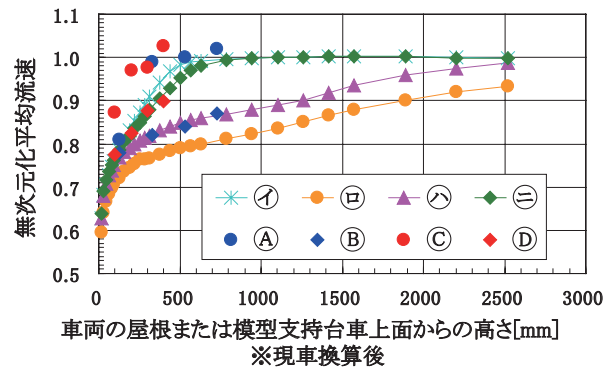


図8 大型風洞における平均風速分布の測定結果 (凡例は表1参照)

している。スパイアが大きいと(図中②), 現車に比べて生成される境界層は厚くなり、模型支持台車上面近くの風速が小さくなる。これに対して、スパイアを一回り小さくすると(図中③), 現車(旧形式)の先頭から8両目(図中Ⓑ)の風速分布とほぼ一致した。一方、新形式の場合の薄い境界層(図中④)は、高さ20mmのLアングルを用いることで(図中④), ほぼ同じ風速分布を再現することができた。

3.2 空力音の評価

次に、現車に近い風速分布を得ることができた乱流生成装置(③, ④)を設置した状態で、集電部の縮尺模型から放射される空力音の評価を行った。1/3.15縮尺の集電部模型は、模型の中心とノズル吹出口との距離が4.5m下流になるように模型支持台車上に設置し、模型の7.9m側方(現車で25m側方に相当)に、1/2インチの無指向性マイクロホンを設置して放射音の測定を行った。乱流生成装置自身から発生する音の影響を抑えるため、スパイアの二等辺の角を丸めたり、スパイア表面に不織布を貼付したりしたが、それでもスパイア自身から発生する音が大きかったため、無指向性マイクロホンを設置した側に、図7中に示すような幅3.5m×高さ2.7mの遮音板を設置した。図9は、風速350km/hにおける放射音を比較した結果である。上述の対策の結果、集電部模型から

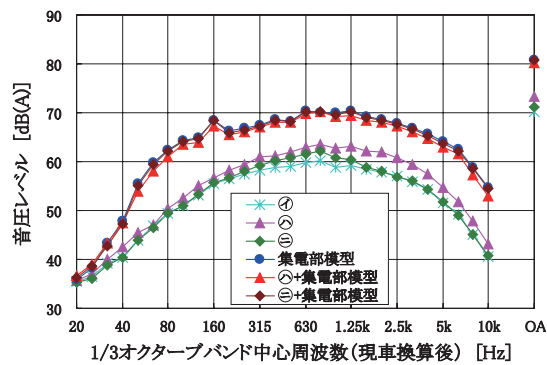


図9 大型風洞における空力音の測定結果
(凡例は表1参照)

発生する音と、乱流生成装置自身から発生する音は、7dB以上の差があり、概ね良好なS/N比を確保できた。一方で、図8に示すように、乱流生成装置を設置しない場合(㊷)でも、模型支持台車上には模型の大きさに比べて厚い乱流境界層が発達しているため、乱流生成装置の有無による集電部模型からの放射音の違いは、小型風洞での試験結果⁴⁾ほど顕著ではなかった。

4. パンタグラフに作用する空気力の評価

前章までの結果を踏まえ、2.2節で述べた三孔管による舟体近傍の風向・風速測定を実施した集電装置の1/3スケール模型を製作し、乱流生成装置と組み合わせてパンタグラフ揚力の評価試験を行った。実機パンタグラフの揚力測定と同じ方法で揚力評価を行うことができるように、パンタグラフ模型には実機と同様の押上機構を備えている。乱流生成装置としては、表1の㊷(乱流生成装置なし)、㊸(正面が二等辺三角形(H1000×W60)のスパイア3本)、および㊹(H20×W1593のLアングル1本)の3条件とした。これらの乱流生成装置により風洞床面に形成される境界層の風速分布については図8に示した通りであり、評価対象とする集電装置が搭載されている車両屋根上の境界層分布を最も良く再現するのは、H20×W1593のLアングル1本を取り付けた場合である。

模型パンタグラフの作用高さを、現車試験で揚力測定を行った条件と同じくレールレベルから4800mmの高さ相当となるように調整し、3種類の乱流生成装置条件におけるパンタグラフ揚力をそれぞれ測定した。その結果を図10に示す。現車試験で測定したパンタグラフ揚力と比較するため、揚力係数をレイノルズ数に対してプロットしている。なお、代表長さは舟体の全長(実機で0.9m、模型で0.3m)、代表風速は列車速度または風洞の主流速度として、現車・風洞ともに速度を変えながら揚力測定を行った。実機パンタグラフ、模型パンタグラフのいずれの場合も、揚力係数にはレイノルズ数依存性(代表長さ一定の条件下では速度依存性)が認められた。ただし、な

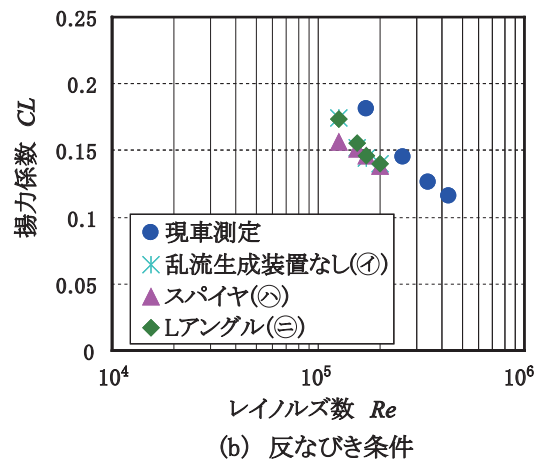
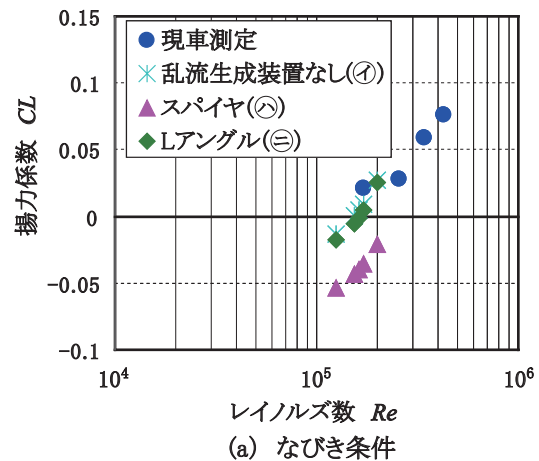


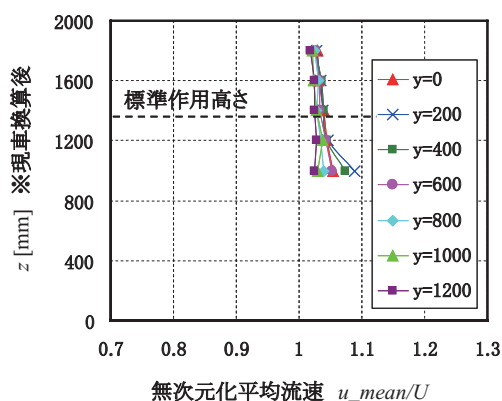
図10 パンタグラフ揚力のレイノルズ数依存性

びき条件、反なびき条件、のいずれの場合でも、揚力係数のレイノルズ数依存性は風洞試験と現車試験とでよく似た傾向を示していることから、パンタグラフ模型を用いて得た揚力測定結果は妥当なものであったと判断される。

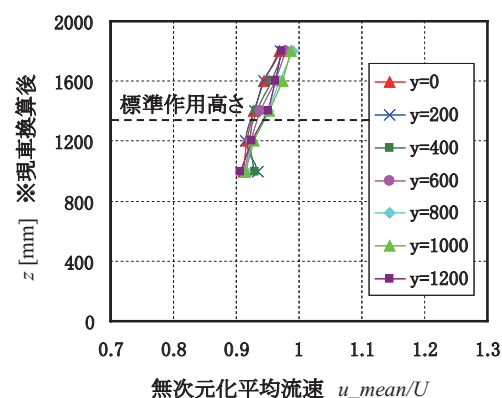
そこでまず、乱流生成装置種別の影響について検討する。乱流生成装置なしの場合(㊷)とLアングルの場合(㊹)を比べると、揚力係数の差異は小さい。これは、両者の風速分布自体の差が小さいためである。これら2つの条件に対し、スパイアを取り付けた場合(㊸)は、なびき条件では揚力係数が大きく低下した。反なびき条件でも同様の傾向が認められるものの、なびき条件のような大きな差異は認められなかった。

次に、現車で得られた揚力測定結果と比べてみると、なびき条件の場合には現車屋根上の境界層分布を再現したLアングルを取り付けた条件(㊹)で得られた揚力係数が、現車試験結果と最も近くなっていることが確認できた。一方、反なびき条件では、現車試験で得られた揚力係数は風洞試験結果よりもやや大きくなった。

以上のように、パンタグラフ揚力は乱流生成装置によって風洞床面に形成される境界層分布の影響を受けることがわかった。これを確認するため、碍子オオイに設置されたパンタグラフの舟体位置における風速分布を改



(a) 乱流生成装置なし(㊷)



(b) スパイヤ(H1000×W60)を3本設置(㊸)

図 11 風速分布測定結果

(なびき条件の舟体中心位置)

めて測定した。ここでは、乱流生成装置の種別によるパンタグラフ揚力の差異が大きかったなびき条件における測定結果について述べる。測定は、碇子オオイ模型内に設置したパンタグラフ模型を折り畳み状態にしたうえで、舟体中心位置における風速分布を高さ方向 (z 方向) に対して測定した。乱流境界層生成装置なし(㊷)、およびスパイヤを取り付けた場合(㊸)について、主流方向の平均風速 u_{mean} を風洞の一樣流速度 U ($=150\text{km/h}$) で無次元化した結果を図11に示す。図中の y はまくらぎ方向座標を示しており、 $y=0$ がパンタグラフ中心である。また、 z は車両の屋根に相当する模型支持台車上面からの高さを示している(座標系の定義は図7参照)。 y 、 z とも模型の縮尺 (1/3) の逆数倍して現車換算した後の値を示している。この図より、スパイヤを取り付けると碇子オオイ上方の境界層厚さが増加し、パンタグラフ近傍の風速が低下するとともに、高さ方向 (z 方向) の速度勾配が変化していることがわかる。このような境界層分布の差により、パンタグラフ揚力に差異が発生したものであると解釈できる。

このようにパンタグラフ揚力は境界層分布の影響を強く受ける。そのため、風洞試験において揚力を精度よく評価するためには、評価対象パンタグラフが搭載されて

いる車両屋根上の境界層分布を見積もり、これが風洞床面の境界層分布と大きく異なる場合には、本研究で提案した方法などにより境界層を風洞床面に再現することが必要である。

5. 結論

本研究では、風洞の開放型測定部に新幹線屋根上流れを再現し、現車により近い状態で集電装置模型に働く空気力や発生する空力音を評価する風洞試験法の開発を行った。現車での風向・風速測定ならびに風洞での試験方法の検討の結果、以下のような主な知見が得られた。

- (1) 熱線流速計を用いて現車の屋根上の風速分布を測定したところ、編成の後ろ側ほど平均風速は全体的に小さくなり、また、トンネル区間では明かり区間の1.2～1.3倍速くなった。
- (2) 三孔管を内蔵したパンタグラフによって舟体近傍の風速・風向測定を行った結果、パンタグラフ揚力は舟体近傍の対向風速と相関があること、なびき条件では舟体近傍で若干の吹き上げ、反なびき条件では若干の吹き下ろしであることなどがわかった。
- (3) 乱れを生成するためのスパイヤやLアングルの形状・間隔を調整することで、風洞の開放型測定部において、実車の屋根上に発達する乱流境界層に近い風速分布を得ることができた。また、乱流生成装置とマイクロホンの間への遮音板の設置などにより、現車を再現した乱流境界層下での集電部模型からの音を評価することができた。
- (4) 舟体に三孔管を内蔵したパンタグラフにより実施した現車走行試験と同条件の集電装置模型を製作し、乱流生成装置を適用してパンタグラフの揚力測定を行った。その結果、乱流生成装置により生成される境界層分布の違いがパンタグラフ揚力に影響を与えていることがわかった。

文献

- 1) 森川武雄, 岩井中篤史: 新幹線トンネル内列車走行時集電系の空力特性, 鉄道総研報告, Vol.15, No.6, pp.27-32, 2001
- 2) 池田充, 光用剛, 山下義隆: 列車走行時のパンタグラフまわりの風向・風速特性, 鉄道総研報告, Vol.25, No.6, pp.11-16, 2011
- 3) 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, 2007
- 4) 高石武久, 末木健之, 宇田東樹: 乱流境界層下での空力音評価法の開発, 日本機械学会2009年度年次大会講演論文集 Vol.2, pp.249-250, 2007