

鉄道車両の風洞実験

井門 敦志*

Wind Tunnel Tests of Railway Vehicles

Atsushi Ido

1. はじめに

鉄道車両の空気力学および空力騒音に関連する課題には、安全に関わる課題、環境・エネルギーに関わる課題をはじめとして様々な課題がある。それらの課題に対し、理論解析、現車試験、模型試験、風洞実験、数値計算等の様々な手段を用いて研究がなされてきている。ここでは、これらの研究手法の中で風洞実験に注目する。

鉄道車両は、スケールが大きくかつ細長いために、実際の車両をそのまま風洞に入れることは難しい。そのため、各々の研究目的に応じて様々な風洞実験が行われてきた。それらの風洞実験は、大まかに、空力騒音、空力、車両周りの流れ、に分けることができる。

本報告では、鉄道に関連する研究のために鉄道総研が建設した大型低騒音風洞と、これを活用した鉄道に関する様々な風洞実験事例を紹介する。なお、研究成果については各々の文献を参考して頂き、ここでは、極力多くの事例を紹介することとする。

2. 大型低騒音風洞

鉄道総合技術研究所では、鉄道車両の空力現象を研究するために、1996年に滋賀県米原市に大型低騒音風洞（以下、米原風洞）を建設した^{1),2)}。米原風洞は以下の特徴を持っている。

- ・空力音の風洞実験を行うために、風洞の暗騒音が十分低い。

- ・測定部が十分長いので、複数編成の鉄道車両模型の実験が可能であり、また、測定部の上流域にスパイアやブロック等を設置し自然風を模擬した風洞実験が可能である。

- ・地面付近の流れを模擬するために、境界層吸込装置(BLS)およびムービングベルト(MB)が装備されている。

米原風洞は、風洞実験の目的に応じて、開放型および密閉型の二種類の測定部が選択可能であり、鉄道分野および他の分野（自動車、航空機、建築物等）の研究に活用されている。ここでは、米原風洞の特徴的な性能についてのみ記すこととし、諸元および詳細な基本性能については、他の文献³⁾を参考されたい。

2.1 開放型測定部

開放型測定部(Fig.1)の大きさは幅3m×高さ2.5m×長さ8mである。パンタグラフのような車両の一部であれば、実物大で実験を行うことが可能である。最高風速は、新幹線の営業速度を上回る400km/h(111m/s)であり、新幹線の空力音の研究開発に余裕をもって対応できる風速性能を有している。

空力騒音の試験は、主として開放型測定部を使用する。供試体は、必要に応じて模型支持台車上に設置することができる。低騒音化されていない風洞では、風を流すために発生する音（暗騒音）が大きく、供試体から発生する空力音とのSN比が十分確保できず、空力音の風洞実験をすることが難しかった。米原風洞の建設においては、風洞の低騒音化のために、風路内への消音器の設置、風路内壁への吸音コンクリートの貼り付け、測定室の無響室化、ノズルおよびコレクタへのムートンの貼り付けなど、様々な技術を導入し、低騒音化を実現した^{4),5)}。

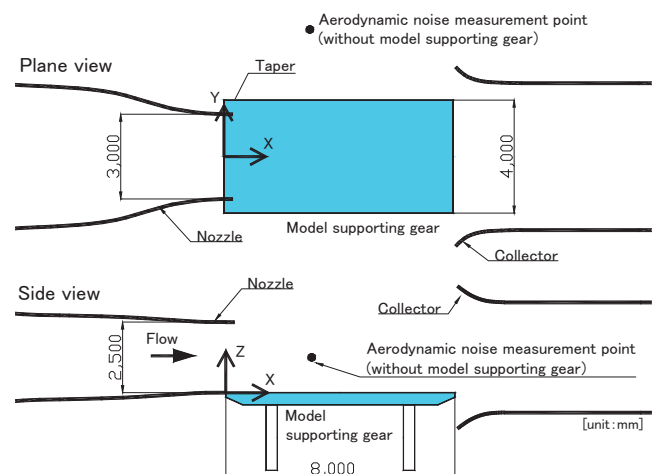


Fig.1 Open type test section.

* (公財) 鉄道総合技術研究所 風洞技術センター
 (〒521-0013 滋賀県米原市梅ヶ原,
 E-mail: ido@rtri.or.jp)

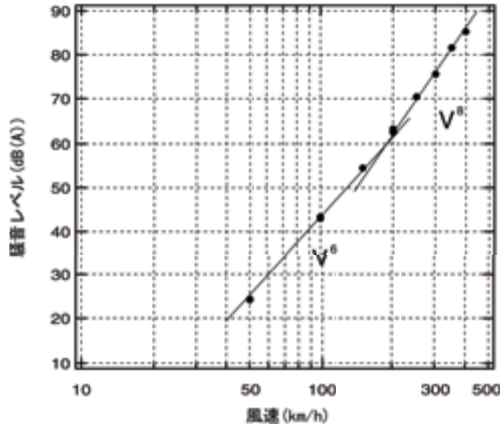


Fig.2 Background noise level.

開放型測定部で模型支持台車無しの条件で、騒音測定を実施し風洞の暗騒音を測定した。Fig.2に暗騒音レベルと風速の関係を示す。暗騒音測定点(Fig.1)は幅 3m(D)、高さ 2.5m の口径のノズル中心から吹出口下流に 1D、側方に 1.5D 離れた点である。200km/h を越えるあたりから、騒音レベルが風速のほぼ 8 乗則に近い依存性で増加している。これは、吹出しノズル部およびコレクタ部で発生する双極子音に比べ、噴流混合部の 4 重極子音が目立ってきていることを示している。上述した様々な低騒音化技術の採用により、風速 300km/h の暗騒音レベルが 75.6dB(A) という低騒音性能を実現した。

2.2 密閉型測定部

密閉型測定部(Fig.3)の大きさは幅 5m×高さ 3m×長さ 20m である。高さに対して非常に長い測定部を持ち、車両編成としての風洞実験が可能である。また、長い測定部を利用して地表面近くの自然風を模擬することができる。最高風速は 300km/h (83m/s) である。

鉄道車両は、地面近くを走行しているため車両下部の流れは地面の影響を受ける。走行している鉄道車両周りの流れを風洞実験で再現するためには、風洞の床面に発達する境界層を排除する必要がある。米原風洞では、境界層吸込装置およびムービングベルトを装備している。

ピラミッド天秤中心およびムービングベルト上での境界層風速分布を、主流を基準とした無次元風速の形で、Fig.4 に示す。ピラミッド天秤中心位置では境界層吸込装置により、100mm 程度の境界層厚さを 40mm 程度に抑えることができる。また、ムービングベルトを作動させると、ベルト上の境界層厚さが 30mm 程度に抑えられるとともに、10mm 高さの風速も主流速近くまで回復する。

3. 空力騒音の風洞実験

日本では、新幹線のような高速車両も住宅密集地を走行する場合があります。新幹線から発生する空力騒音は、重要な環境問題の一つである。そのため、今後の新幹線の更なる高速化のためには、高速車両から発生する空力音の問題を解決する必要がある。

鉄道の低騒音化技術を開発するためには、どこから強

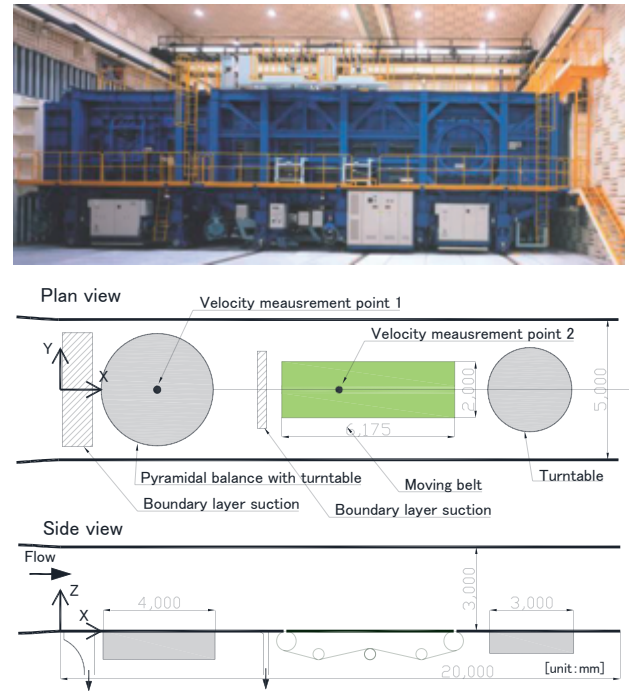
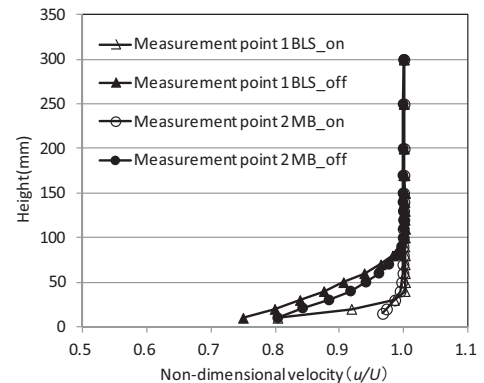


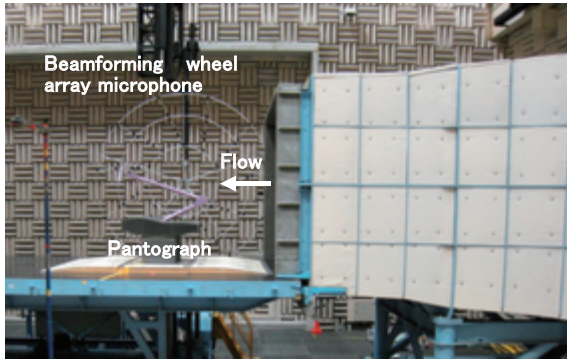
Fig.3 Closed type test section.

Fig.4 Boundary layer velocity profile
(Closed type : $U=55\text{m/s}$).

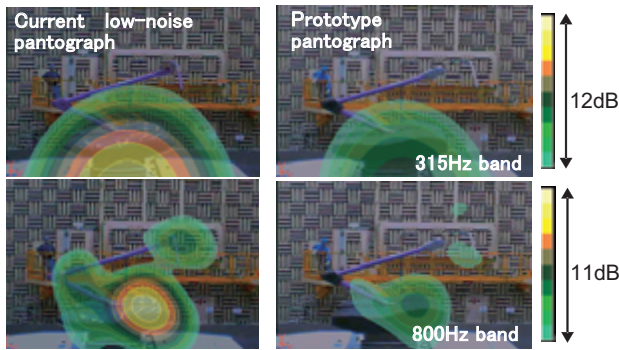
い音が出ているかを知ること(音源探査)が非常に重要である。米原風洞では、開設当初から、音源探査手法を活用しながら空力騒音低減手法の研究開発を行うとともに、音源探査手法そのものについての研究開発も進めてきた。現在では、音源探査のために主として直径 4m および 1m のビームフォーミング式マイクロホンアレイを用いている。ビームフォーミング式マイクロホンアレイはトラバース装置に取り付けられており、容易に任意の場所で空力騒音を測定することができる。

3.1 パンタグラフの音源探査

パンタグラフの音源探査の様子を Fig.5(a)に示す⁶⁾。ビームフォーミング式マイクロホンアレイを用いた測定では、一度の計測で周波数ごとに音源分布をコンタ図として得ることができる。測定結果の一例を Fig.5(b)に示す。音源位置が周波数ごとに明らかになることにより、低騒音化のための技術開発を寄与の大きいものから効率よく進めることが可能となる。



(a) Layout of experimental apparatus.



(b) Noise source distribution map.

Fig.5 Noise source identification by beamforming wheel array microphone.

3.2 車両下部の空力騒音

車両下部、特に台車部から発生する空力騒音を風洞試験で精度よく測定するためには、台車部に流入する流れ場を現車の流れ場と極力一致させることが重要である。

後述するが、車両の空気抵抗測定のための風洞実験においても測定精度の向上のために、車両の床下にスパイアを付けることにより車両下部の流れ場を再現している。しかしながら、空力騒音の試験では、流れ場を再現するためのスパイアが騒音源となるために、騒音測定に適用することはできない。また、車両床下に発達する境界層の影響で、先頭車両と中間車両では、再現する流速分布が異なるが、中間車両台車部の空力騒音を測定する際には、

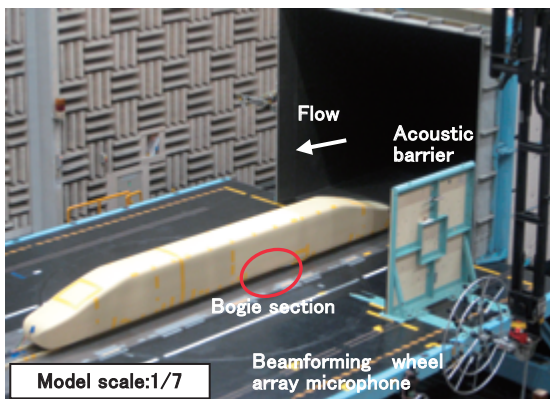


Fig.6 Layout of wind tunnel test.

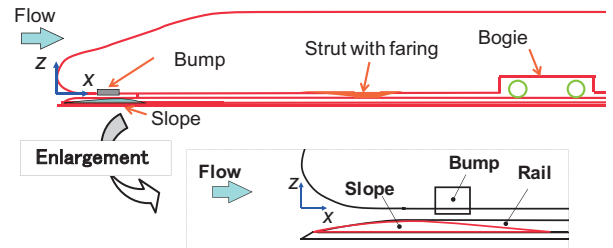


Fig.7 Flow velocity adjustment structure.

台車部の上流域で車両床下に流れ込む流れを柔毛材で覆われたスペーサーを用いて車両側方に偏向させることで流速分布を模擬している⁷⁾(Fig.6, Fig.7)。

4. 空気力の風洞実験

4.1 横風による車両が受ける空気力

鉄道における最重要課題は、安全に関わる問題である。過去において、何度か、強風(突風)による車両の転覆事故が発生している。この問題の研究においては、横風により車両に働く空気力の評価のために、風洞実験が用いられている。

これまでの研究から、横風により、車両に働く空気力は、車両形状はもとより、地上構造物形状および流れ場(自然風などの乱れや風速分布)の影響を受けることがわかっている。風洞実験においても、車両に働く空気力を精度良く求めるために、これらの条件を再現している。すなわち、現在の風洞実験では、測定部の上流側に、バリア、スパイア、ラフネスブロックを設置し、自然風の風速分布を再現した中に、地上構造物模型と車両模型を設置し、車両に働く空気力を評価している⁸⁾。閉塞率の関係で模型の縮尺は1/40としており、レイノルズ数を一致させることは難しいが、実物大模型のフィールド試験⁹⁾を実施し、それと同条件(車両、構造物、流れ場)の縮尺模型による風洞実験を行い、両者の空気力係数が一致することを確認している¹⁰⁾(Fig.8)。

さらに、風洞実験において実際の現象を捉えてより正確に空気力を評価するためには、車両と地面との相対的な運動を考慮することが重要である。そこで、横風を受

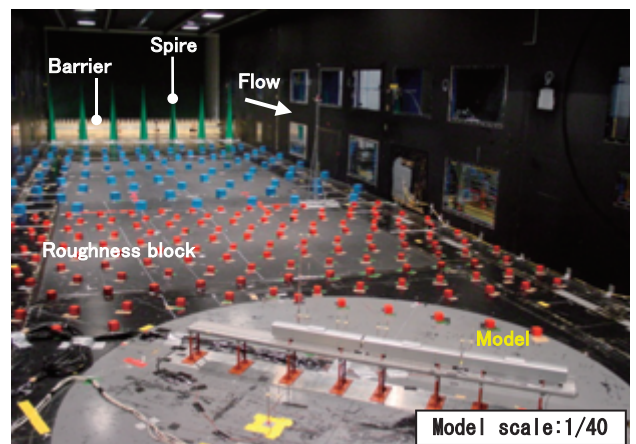


Fig.8 Aerodynamic characteristics measurement in cross wind.

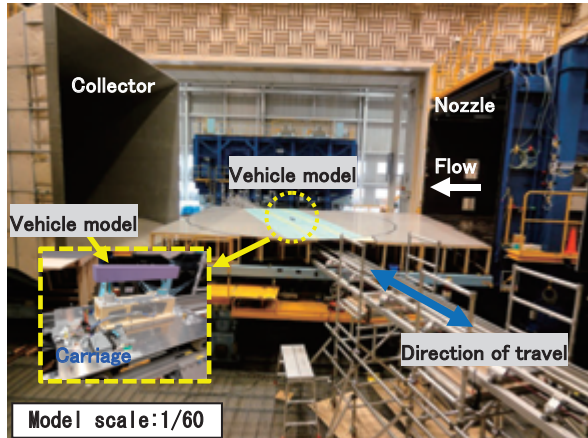


Fig.9 Wind tunnel test using moving model rig.

けて走行する車両の状況を再現した風洞実験を行うために、車両模型走行装置を開発し、風洞と組み合わせて車両模型に働く空気力に及ぼす走行の影響評価の研究を進めている¹¹⁾ (Fig.9).

4.2 車両の空気抵抗

近年の車両の高速化に伴い走行抵抗に占める空気抵抗の割合が大きくなり、新幹線車両ばかりでなく在来線車両を含めて空気抵抗低減のための研究開発の重要度が増している¹²⁾.

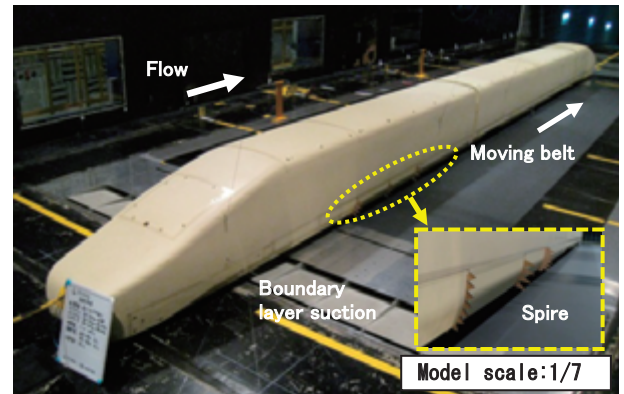
車両の空気抵抗低減の研究開発においては、低減方策の開発および空気抵抗低減効果を精度良く評価することが重要となる。鉄道車両は非常に細長い（例えば、16両編成の新幹線車両では車両の幅および高さは列車長の1%弱である）ため、先頭・後尾部と中間部に分けて各々の空気抵抗低減量を評価している。中間部では、中間車両1両当たりの空気抵抗低減量を求め、それを両数倍することにより、全体の空気抵抗低減量を評価している¹³⁾.

さらに、評価精度を高めるために、各々の部位の風洞実験において、現車の周りの流れ場を風洞実験で再現している。Fig.10に吊線式天秤による空気抵抗測定の様子を示す。車両床下形状改良による空気抵抗低減量の評価においては、境界層吸込装置およびムービングベルトを作動させ、地面境界層を排除している。加えて、中間車両を対象とした測定では、先頭車両の床下にスパイアを取り付け、現車の流速分布を再現している。一方で、屋根上機器（ここではユニットクーラー）改良による空気抵抗低減効果の評価においても、スパイアを用いて屋根上の流れ場を再現した風洞実験を行っている¹⁴⁾.

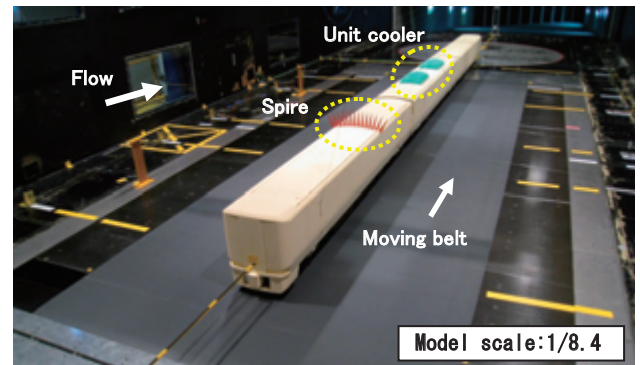
4.3 パンタグラフの揚力

新幹線車両のような高速で走行する車両のパンタグラフには、空力音の低減だけでなく、パンタグラフと架線との安定した接触状態を維持するために、適切な揚力が安定して得られることが要求される。一般的に流線形化は空力音の低減に繋がるが、一方で、揚力特性が過敏となる傾向があり、両者の両立は容易ではない。

米原風洞では、実物のパンタグラフの空力現象を再現することが可能であり、精度の高い揚力測定¹⁵⁾を行う



(a) Underside shape improvement (Shinkansen train).



(b) Unit cooler shape improvement (Meter-gauged train).

Fig.10 Aerodynamic drag measurement of intermediate vehicle.

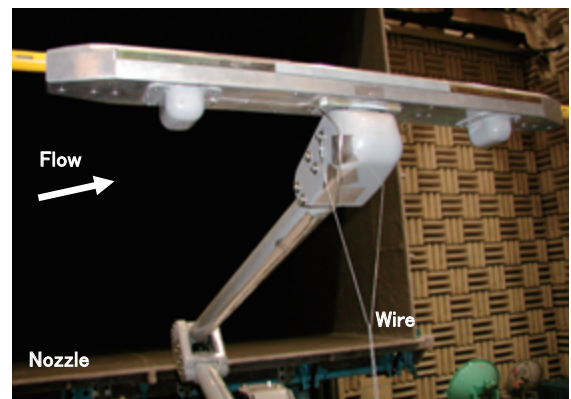


Fig.11 Lift measurement by using wire.

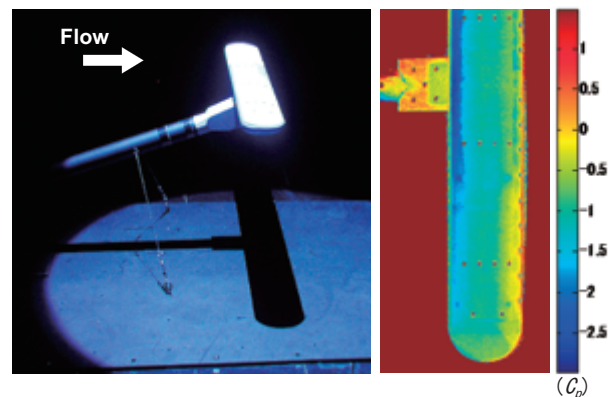


Fig.12 Measurement of surface pressure distribution of pantograph by using PSP.

ことができる(Fig.11). 揚力測定には、ワイヤとロードセルを用いている. また、感圧塗料によるパンタグラフの表面圧力測定¹⁶⁾により、パンタグラフの揚力や空力音の発生要因を視覚的かつ定量的にとらえる実験も行われている(Fig.12).

4.4 空カブレーキ性能

新幹線の安全性が向上する中で、地震等の異常時用の非常ブレーキとして、空カブレーキの検討を行ってきた. 空カブレーキは高速域での非粘着ブレーキとして、その有用性が認識されており、500km/hを超えるリニアモーターカーの試験車両で採用されている. 新幹線車両でも、JR 東日本の高速試験車両 Factech360S に搭載された. 鉄道総研では、さらなるブレーキ力の増加やブレーキ装置の格納スペースの縮小のために、小型分散型の新幹線用の空カブレーキの研究開発を行った. 米原風洞では、中間車両の境界層流速分布を再現した実験を行い、小型分散型の空カブレーキの性能を評価した¹⁷⁾(Fig.13).

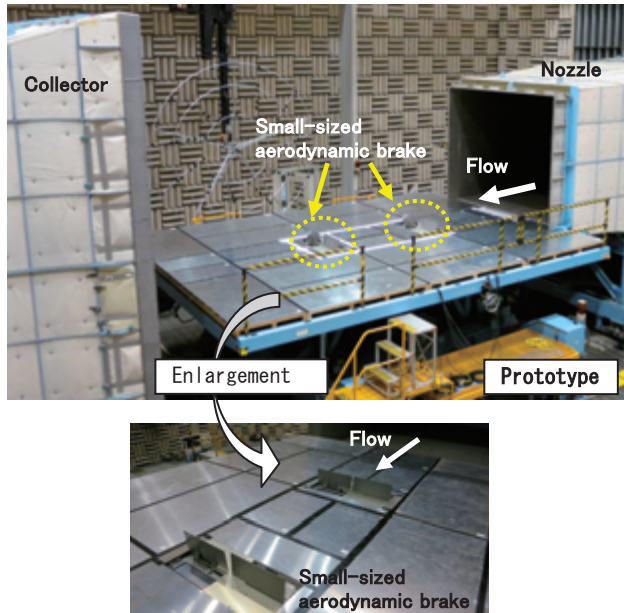


Fig.13 Small-sized aerodynamic brake test.

4.5 風荷重低減型防音壁

鉄道の高架橋では車両の高速化や沿線の高層建築物の増加から、防音壁を大幅に高くする必要性が生じている. 防音壁が高くなると、防音壁が受ける風荷重が増大し、その結果、構造物本体の補強工事等の大規模な工事が必要となる. そこで、通常時には防音板が閉じて高い騒音低減性能を有する一方で、構造物の設計限界値を上回ることが懸念される強風時に受ける風で防音壁が開くことにより構造物への負荷を低減する、風荷重低減型防音板の研究開発を行った. 米原風洞では、実用サイズの試験品を用いた実験を行い、所定の風速で防音板が開き、強風時の負荷を抑えることができることを確認した¹⁸⁾(Fig.14).

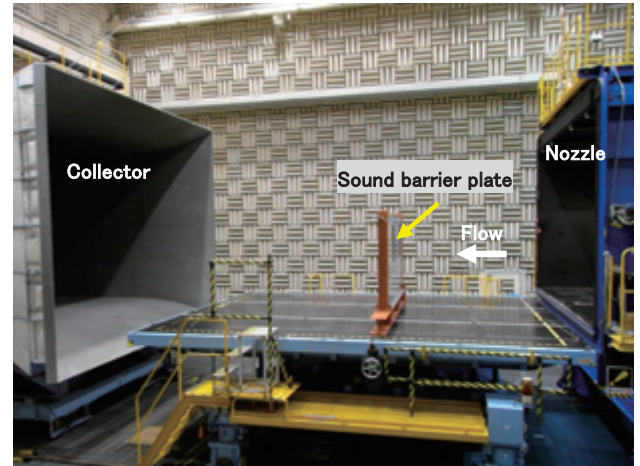


Fig.14 Layout of wind tunnel test.

5. 車両周りの流れの風洞実験

5.1 車両先頭部周りの流れ

切妻型先頭部を持つ車両が単線の狭小トンネルに突入する場合、先頭部付近の大きなはく離による見かけの断面積の増加のために、トンネル内圧縮波の振幅および圧力勾配が増大する. そこで、先頭部付近での流れのはく離の抑制方法について検討した.

先頭部端部の断面形状の改良（角部の丸み付けやフィンの取り付け）によるはく離抑制の効果を、米原風洞を用いた風洞実験により確認した. 先頭部付近でははく離の抑制は、空気抵抗の低減にも繋がることから、気流糸を用いた可視化に加え空気抵抗も測定した. その結果、先頭部端部の断面形状の改良によるはく離抑制および空気抵抗低減の効果を確認した¹⁹⁾(Fig.15).

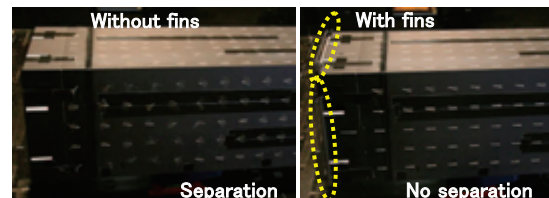
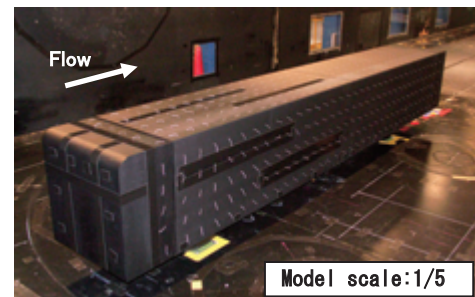


Fig.15 Flow visualization around the front end.

5.2 車両通過に伴う車両周りの流れ

鉄道車両が走行に伴い生じる流れ場は、バラスト飛散、床下部への雪の付着、ホーム上の旅客や保守作業員への風等の原因となる. 米原風洞では、これらの車両の外部の流れ場の研究開発も行っている. 風洞実験の一例とし

て、バラスト表面上の流れの風洞実験の様子を示す (Fig.16).

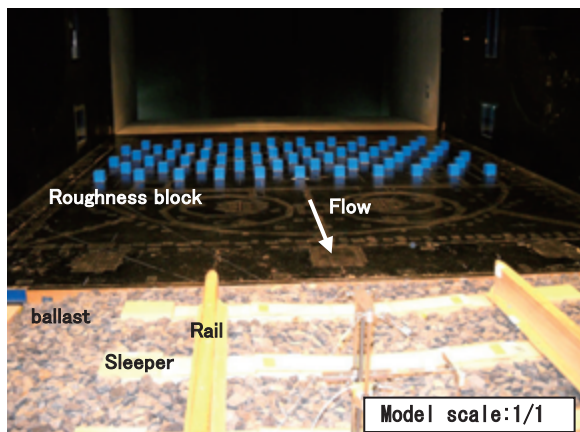


Fig.16 Velocity distribution measurement above ballasted track.

6. おわりに

鉄道に関わる風洞実験は、安全や環境に関わる課題をはじめ、非常に多岐にわたっている。鉄道総研では、鉄道車両の空力現象の研究のために建設した「大型」で「低騒音」の米原風洞の完成以降、その特徴を生かして、風洞実験方法の開発を含めて様々な鉄道の空力現象の研究課題に取り組んできた。研究開発の目的に応じて様々な風洞実験方法の開発が行われているが、その大きな流れとしては、風洞実験での評価精度を高めるために、自然風のような現実の環境下での流れ場や車両が走行する影響を風洞実験で再現するという方向に進んでいる。今後、米原風洞が鉄道車両の空気力学や空力騒音に関連する課題の研究開発に活用されるよう、新規の計測技術の導入や研究目的に即した風洞実験方法の開発を進めていきたい。

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 (1996) pp. 11-16.
- 2) 西村正治，工藤敏文，中川敬三，丸岡昭，善田康雄，西岡通男：大型低騒音風洞の開発，日本機械学会第74期全国大会講演論文集(III)，(1996) pp. 725-726.
- 3) 井門敦志，善田康雄，近藤善彦，松村豪，鈴木実，北川敏樹：大型低騒音風洞の基本性能，鉄道総研報告，Vol.13, No.12 (1999) pp. 5-10.
- 4) 善田康雄，西村正治，森藤良夫，工藤敏文：開放型風洞の低騒音化技術，鉄道連合シンポジウム(J-RAIL'96)講演論文集，(1996) pp. 109-112.
- 5) 井門敦志：鉄道総研大型低騒音風洞，可視化情報，Vol.23, No.124 (2012) pp. 26-31.
- 6) 池田充，末木健之，光用剛：部材間干渉緩和と多孔質材によるパンタグラフ空力音低減，鉄道総研報告，Vol.24, No.4 (2010) pp. 43-48.
- 7) Yamazaki, N., Ido, A.: Evaluation Methods for Aerodynamic Noise From a High-Speed Train Bogie in a Wind Tunnel Test, Proc. of Inter-noise 2011, CD-R, (2011).
- 8) 鈴木実，種本勝二，斉藤寛之，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 (2003) pp. 47-52.
- 9) 日比野有，今井俊昭，種本勝二：自然風下の実物大車両模型に働く空気力の観測，鉄道総研報告，Vol.18, No.9 (2004) pp. 11-16.
- 10) 鈴木実，種本勝二：横風に対する車両の空力特性に関する実物大試験と風洞試験，鉄道技術連合シンポジウム(J-RAIL2007)，講演論文集，(2007) pp. 231-234.
- 11) 鈴木実：模型走行装置を用いた鉄道車両の横風風洞試験，日本機械学会2012年度年次大会，DVD論文集，(2012).
- 12) 井門敦志，小濱泰昭：鉄道車両の床下形状平滑化による空気抵抗低減についての研究，機械学会論文集B編，Vol.71, No.703, B (2005) pp. 817-824.
- 13) 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, B (2003) pp. 2037-2043.
- 14) 井門敦志，宮地徳蔵，井上達哉，蝦名弘太，岩崎誠：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，鉄道総研報告，Vo27, No.1 (2013) pp. 41-46.
- 15) 池田充，末木健之，小山達弥：パンタグラフに関する風洞試験，RRR (2006) pp. 24-27.
- 16) 池田充，小山達弥，鈴木昌弘，高岩利充，満尾和徳，中北和之：感圧塗料を用いたパンタグラフの舟体・枠組間における空力干渉の影響評価，可視化情報シンポジウム講演論文集，Vol.1, Suppl.No.1 (2005) pp. 321-324.
- 17) 高見創：小型分散方式による新幹線用空気抵抗ブレーキ装置の開発，機械学会論文集B編，Vol.79, No.803, B (2013) pp. 1254-1263.
- 18) 半坂征則，佐藤大悟，谷口望，間々田祥吾：風荷重低減型防音板の力学解析と実用試験品による検証，鉄道総研報告，Vo26, No.12 (2012) pp. 17-22.
- 19) 佐久間豊，井門敦志，林太郎：切妻型車両のトンネル突入時に発生する圧縮波(第2報，車両側低減対策法)，機械学会論文集C編，Vol.76, No.770, C (2010) pp. 2480-2486.