

多孔質材によるパンタグラフ碍子覆いの低騒音化

○ [機] 宇田 東樹 [機] 末木 健之 [機] 高石 武久 (鉄道総合技術研究所)

Noise Reduction of a Pantograph Shield by Porous Material

○Touki Uda, Takeshi Sueki,

Takehisa Takaishi (Railway Technical Research Institute)

To reduce the aeroacoustic sound generated by a pantograph shield, porous material is affixed to the surface of the slope of the pantograph shield. In the large-scale wind tunnel at RTRI, the effect of porous material is examined by using newly introduced particle image velocimetry for flow field and by measuring the radiated sound. Through comparison with the normal case without porous material, it is found that porous material applied to the pantograph shield suppresses spatial fluctuation of velocity and vorticity along the flow direction. The measurement of aeroacoustic noise also showed the effectiveness of porous material.

キーワード：粒子画像流速計測法，風洞，空力音，碍子覆い，多孔質材

Key Words：PIV, Wind tunnel, Aeroacoustic sound, Pantograph shield, Porous material

1. はじめに

高速鉄道から発生する騒音は，レールと車輪の接触・振動による転動音や車両周りの空気の乱れによる空力音などからなる．このうち，空力音のパワーは列車速度の6乗に比例して増大する¹⁾ことが知られており，今後ますますの高速化が予想される中，空力音の一層の低減が求められている．

沿線で観測される騒音は，無数の音源から発生する音波の反射・減衰・回折・干渉などといった現象の複雑な組み合わせの結果として得られる全体的な放射音である．一方，空力音の低減を進める研究開発としてのアプローチにおいては，音の発生源の把握と低減対策の構築という2つのプロセスも重要となる．これまで，こういった空力音源の評価手法としては，種々の最適化を施されたアレイマイクロホンや指向性收音装置による測定²⁾が盛んに行われてきた．その成果により，近年ではパンタグラフや車体先頭形状・車間部から発生する空力音は着実に低減したが，今後さらなる低騒音化を進めるためには騒音の発生源そのものである「流れ場」と「渦」を捉える³⁾ことが重要になる．

空力音の低減対策で考えられる代表的な方法は，形状変更によるものである．しかし近年，物体の表面を変質させることで大きなスケールを持つ渦の生成を抑制し，空力音の低減を図れたということもわかってきている⁴⁾．

そこで本研究では，流れ場の測定方法として近年急速に発展を遂げている計測技術である粒子画像計測法 (Particle Image Velocimetry: PIV) を用いて，1/3.15スケールの碍子覆い周りの流れ場と騒音を，風洞試験により測定した．また，碍子覆い表面に多孔質材を適用し，それにより流れ場がどのような変化し，騒音レベルに寄与するのかを調べた．

2. 風洞試験の概要

風洞試験は，滋賀県米原市にある(財)鉄道総合技術研究所の大型低騒音風洞を用いて行った．試験に用いた模型は図1に示すような実物の1/3.15スケールの碍子覆い模型である．碍子覆いは上流側スロープ，側壁部，下流側スロープの3つからなり，それぞれの長さは921mm, 1300mm, 921mm，最大高さは200mm，幅は530mmである．本研

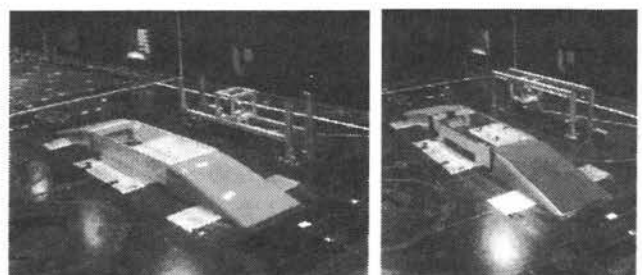


図1 1/3.15 碍子覆い模型 (右は多孔質材貼付)

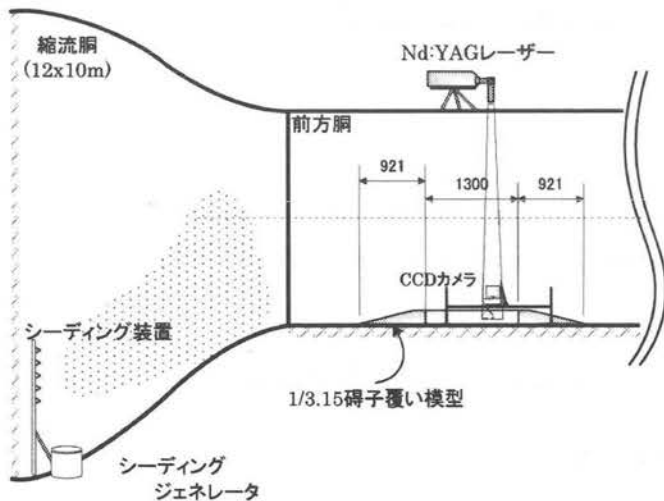


図 2 PIV 試験時の測定機器配置概略図

究では、PIVにより碍子覆い内部のキャビティ領域の流れ場も捉えるために、側壁部は透過性の高いアクリル板にて代用し、風洞試験を実施した。騒音測定を実施する際には開放型、PIV計測によって流れ場を測定する際には光学機器の設置が容易な密閉型の風洞形態をそれぞれ使用した。

3. 測定手法

3.1 騒音測定

無指向性マイクロホンを碍子覆い中心側方 5000mm の位置および碍子中心上方 5000mm の位置に設置し、空力音のスペクトル解析を行った。風速は 150, 300km/h の 2 風速である。解析にあたっては、Narrow バンドで収録したデータを 1/3 オクターブバンドに束ね、A 特性補正を加えた。

3.2 PIVによる流れ場測定

(1) PIVの測定原理

風洞の気流の中に流れに対する追従性の高い微細な粒子(トレーサ粒子)を混入させ、シート状にした Nd:YAG レーザーを測定対象にごく短い時間に 2 回照射する。この 2 時刻の粒子の散乱光を CCD カメラにて記録し、一対のペア画像を得る。それらの画像間で粒子の濃淡分布の相関係数を求め、濃淡の軌跡を追跡することで速度ベクトルを決定する。従来の熱線流速計やピトー管を利用した方法と異なり、PIV法を用いることで空間的な流れ場状態を一度の測定で得られる。

(2) シーディング方法

大型風洞における PIV 測定においては、最適なトレーサ粒子の供給方法(シーディング)を見つけることが非常に重要である。シーディング方法としては大きく分けて、①風路全体にトレーサ粒子を充満させる方式、②測定領域のみに局所的にトレーサ粒子を供給する方式、の 2 つが考えられる。本研究では、風洞の低騒音性能への影響を最小限にするために、後者の方式を採用した。この場合、測定部の前方からシーディングしなければならないが、気流を乱さないよう、流れが縮流する前にトレーサ粒子を供給する

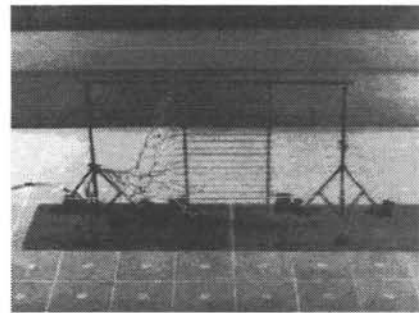


図 3 縮流部に設置したトレーサ粒子供給装置

表 1 PIV 測定機器および計測条件

計測方法	2次元、光シートの面内の速度 2 成分
最大風速	30m/s
画像記録	CCD カメラ, 2048×2048pixel×12bit, サンプル周波数 15Hz, レンズ: 50mm
レーザー	Nd:YAG レーザ, 200mJ/pulse, 15Hz

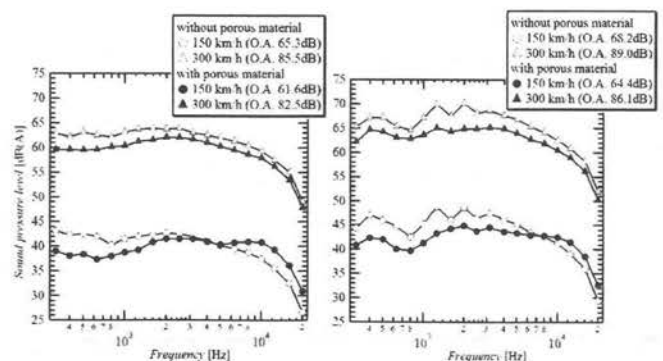
必要がある(図 2 参照)。さらに、測定領域に一樣で十分な濃度のトレーサ粒子を供給するために、図 3 に示すような装置を使用した。なお、トレーサ粒子には DEHS(DOS)とよばれる弱い揮発性をもつオイルを使用した。

(3) レーザーおよびカメラ光学系

レーザーは、密閉胴の天井から床面に向けて設置した。CCD カメラは風洞内に設置し、主流が直接当たることによる振動を抑えるため、風除けのボックス内に設置した。PIV 測定機器および計測条件は表 1 に示す。

4. 無指向性マイクロホンによる騒音測定結果

図 4 に風速 150, 300km/h での騒音測定結果を供試体側方・上方それぞれのマイクロホンごとに多孔質材の有無で比較した結果を示す。横軸は、1/3 オクターブバンド中心周波数、縦軸は各周波数での音圧レベルである。図からいずれの風速段においても多孔質材を貼付すると、風速 300km/h において側方マイク・上方マイクともに約 3.0dB オーバーオール騒音レベルが下がることが確かめられる。また、上方マイクで周波数 1.2kHz, 2.0kHz で見られるピーク音は、碍子覆いのキャビティによる共鳴音と推察されるが、多孔質材を貼付することによって大きく低減している。



(a) 供試体側方 (b) 供試体上方
図 4 多孔質材の貼付による騒音レベルの比較

5. PIVによる流れ場測定結果

PIVの解析条件は、検査領域 $32 \times 32 \text{ px}$ 、相関法は格子サイズ変更による再帰的相関法、サブピクセル解析は3点ガウス法を用いた。得られた総ベクトル数は $126 \times 126 = 15876$ 点である。また、後処理において、補間やフィルター操作は加えず、取得した200ペアの画像をアンサンブル平均した。測定範囲は、図5で測定領域A-1～C-2の計6面で面の大きさは $261 \times 261 \text{ mm}$ である。なお、紙面に垂直なy方向座標はいずれも碇子中心の $y=0$ とした。

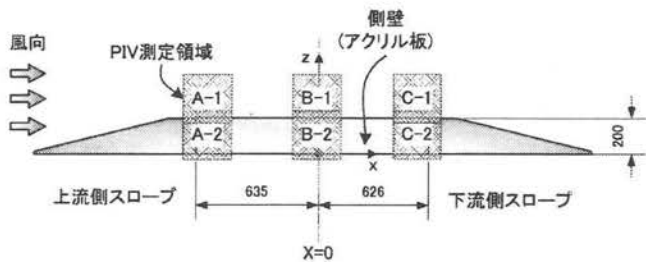


図5 PIV測定面の位置関係概略図

図6には、測定領域A-1における速度ベクトルとその大きさのコンターマップを示す。測定領域A-1は、上流側スロープ後端に位置しており、大きな乱れが生じる領域であるが、多孔質材ありの(b)では速度せん断層分布の変化が小さく、安定している様子がわかる。また、図7には側壁内部の逆流領域B-2、C-2を捉えた速度ベクトルを示す。ただし、主流に比べると逆流成分は弱いため、ここでのベクトル表示はすべての点で同一の大きさにスケールしている。これより、測定領域B-2では明確な逆流が認められ、測定領域C-2では、流れが下流側スロープを境に渦巻いていることがわかる。

5.1 鉛直方向の流速分布

上流側スロープ下端 ($x=-600, y=0$) の流速分布を主流速度 30 m/s で無次元化した結果を図8(a)に示す。図8の $Z < 250$ の領域では、上側測定領域のデータを白抜き、下側測定領域のデータを黒抜きで示してある。なお、多孔質材を貼付すると供試体の厚みが 10 mm 増えるため、より正確な比較となるように多孔質材ありの結果については測定データをZ方向に $+10 \text{ mm}$ オフセットして表示している。図より、多孔質材を貼付するとせん断層の速度分布が

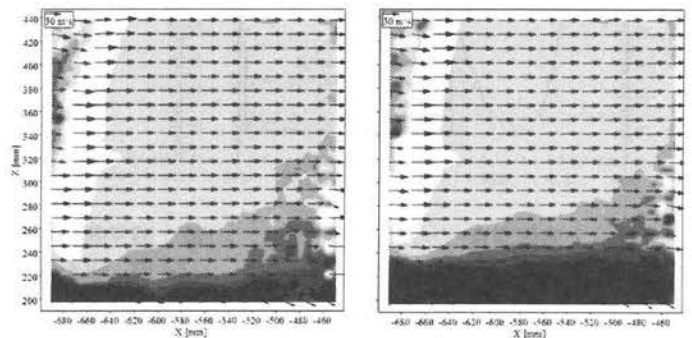
やや緩やかになることがわかる。また、上流側スロープに沿う流れの影響で $Z > 300$ では主流速度より 10% 程度増速している。

次に、碇子覆い内部 ($x=0, y=0$) の流速分布を図8(b)に示す。 $Z > 140$ では、上流側測点と同様の傾向だが、側壁内部のキャビティ領域である $Z < 140$ は流れが逆流しており、多孔質材を貼付した方が逆流が弱くなっている様子がわかる。これは、多孔質材の存在によって境界層の流れが変化し、碇子覆い内部の逆流を駆動する流体力が小さくなったためと考えられる。

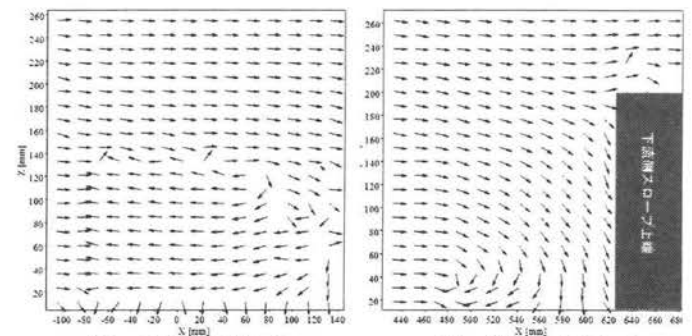
図8(c)には下流側スロープ上端 ($x=600, y=0$) の流速分布を示す。上流側測点・碇子覆い内部測点に比べ、多孔質材の影響がより小さくなっていることが確かめられる。

5.2 流れ方向の流速分布

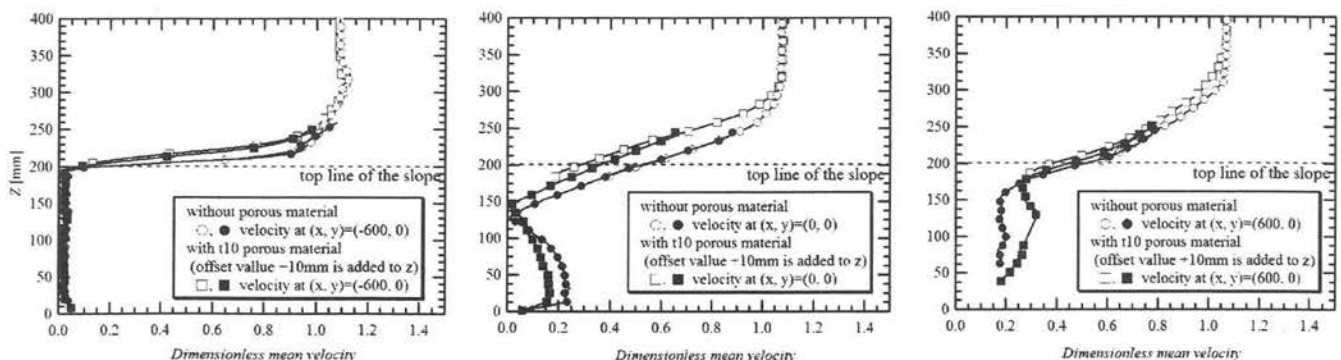
図9(a)～(c)は、流れ方向x軸の速度成分uおよび鉛直方向z軸の速度成分wについて、x軸に沿った方向でプロッ



(a) 測定領域A-1 (b) 測定領域A-1
図6 多孔質材の有無の比較 (左: なし, 右: あり)



(a) 測定領域B-2 (b) 測定領域C-2
図7 側壁内の逆流 (多孔質材なし)



(a) 上流側測点 ($x=-600, y=0$) (b) 碇子覆い内部測点 ($x=0, y=0$) (c) 下流側測点 ($x=600, y=0$)

図8 碇子模型の鉛直方向速度分布 (主流速度 30 m/s で無次元化)

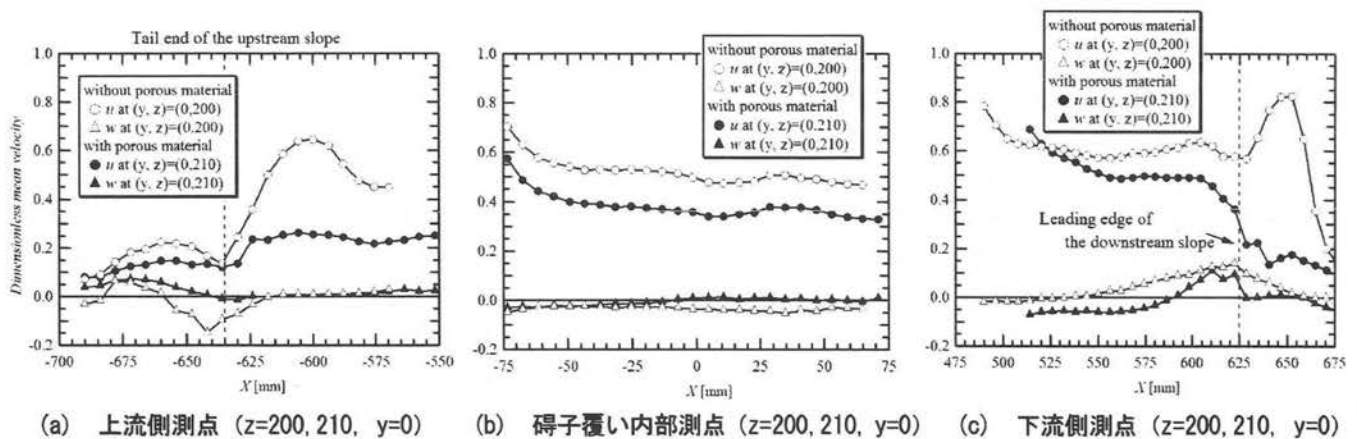


図9 碍子模型の流れ方向速度分布 (主流速度 30m/s で無次元化)

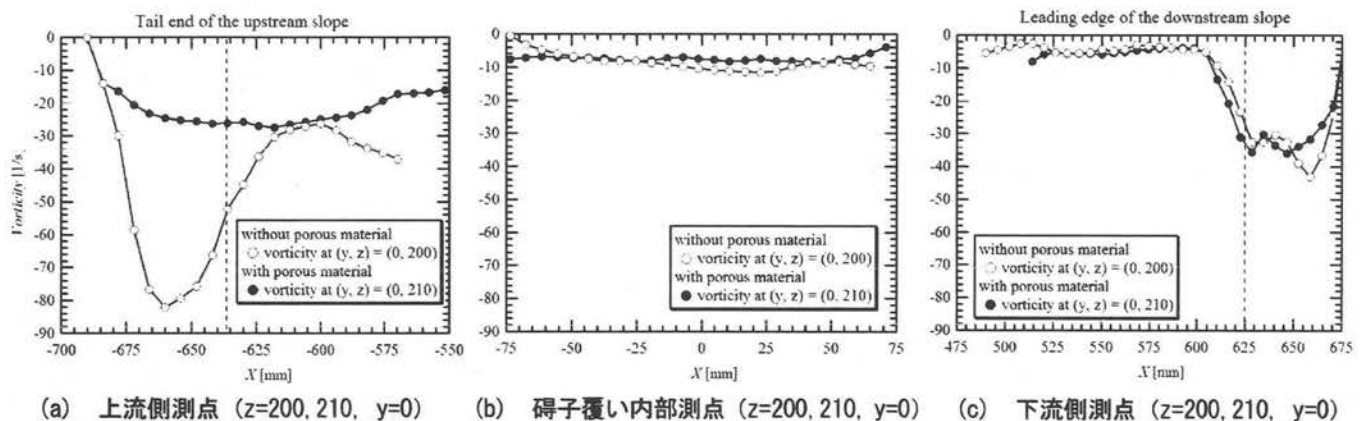


図10 碍子模型の流れ方向渦度分布

トしたものである。多孔質材ありの際の z 位置は 210mm、なしのときの z 位置は 200mm とした。図 9(a)より、多孔質材の有無に関わらず、上流側スロープの終端部 ($x=-635$ mm) では流れ方向の速度 u が増加することがわかる。多孔質材の影響としては、側壁部の開始位置以降の u 分布の変化が非常に小さくなっている点が特徴である。また、図 9(c)から多孔質材なしの場合には、流れが下流側スロープに衝突して速度分布の大きな変化を生じているのに対し、多孔質材ありの場合はこの影響が小さく、下流側スロープに貼付した多孔質材の有効性が認められる。

図 10 は、流れ方向の渦度の分布である。下流側測点では多孔質材の有無による差異は小さいが、上流側測点の結果(a)において、多孔質材による渦度の低減効果が出ている。渦の時間変動が空力音源となるため、渦度が小さくなったからといって必ずしも騒音が低減したとは言いきれないが、多孔質材を貼付したことで流れ場の渦度変化も抑えられていると考えられる。

以上から、5.1 節で示した鉛直方向の速度分布と合わせて考えると、本研究において適用した多孔質材の効果が顕著に表れたのは、主に流れ方向の速度分布変化の抑制効果であった。上流側スロープに貼付した多孔質材は、上流側スロープ下端で発生する強い渦度の生成を抑え、下流側スロープに貼付した多孔質材は、下流側スロープ先端付近の渦の変動を抑制する効果があり、これらの作用が空力音低減の一因になったと考えられる。

6. おわりに

風洞試験により、1/3.15 スケール碍子覆い模型周りの PIV 測定および騒音測定を実施し、以下の知見を得た。

- (1) 碍子覆い上流側スロープの後端からの乱れを伴った流れはせん断層を形成するが、多孔質材をスロープに貼付すると、このせん断層内の速度分布が安定する。
- (2) 碍子覆い内部は、上記のせん断流れによって逆流が生じることを実験的に確認した。
- (3) PIV を用いた流れの測定より、碍子覆い模型のスロープ表面に多孔質材を適用すると、上流側スロープ下端で発生する強い渦度の生成を抑えられることがわかった。また、下流側スロープに貼付した多孔質材も下流側スロープ先端付近の渦の変動を抑制する効果があり、これらが碍子覆いから発生する空力音を下げる一因になったと考えられる。

参考文献

- 1) Goldstein, M. E. : 流体音響学, p.135, 共立出版, 1991.
- 2) Nagakura, K. : Localization of aerodynamic source of Shinkansen trains, Journal of Sound and Vibration, Vol. 293, No.3-5, pp.473-1104, 2006.
- 3) Howe, M. S. : Theory of Vortex Sound, CAMBRIDGE UNIVERSITY PRESS, 2003.
- 4) 末木, 池田, 高石 : 金属製多孔質材の適用による高速用パンタグラフの低空力音化, J-RAIL2007, S1-4-5, pp.447-450, 2007.