

多孔質材の表面貼付による空力音低減効果と 集電装置への応用

末木 健之* 池田 充** 高石 武久*

The Aerodynamic Noise Reduction by Porous Materials and Application to a Current Collector

Takeshi SUEKI Mitsuru IKEDA Takehisa TAKAISHI

Reduction of wayside-noise along railway lines is essential to realize further speed-up of high-speed trains. Especially, aerodynamic noise is a main noise source therefore it has become increasingly important to reduce the aerodynamic noise. A new aerodynamic noise reduction method which covers an object surface with a certain porous material has been developed recently. Wind tunnel test with a cylinder and a pantograph shows this method is effective to reduce aerodynamic noise. This paper shows experimental results of the wind tunnel test.

キーワード：高速鉄道，空力音，集電装置，パンタグラフ，多孔質材

1. はじめに

高速鉄道のさらなる高速化に際し、沿線騒音の増加抑制は避けることが出来ない非常に重要な課題である。沿線騒音は音源別に空力音、転動音、ギア音、構造物音と分類可能であるが¹⁾、その中でも空力音の音響パワーは列車速度の6乗に比例するため、高速鉄道の場合は沿線騒音に対する空力音の寄与が大きい。そのため、沿線騒音の増加を抑制するためには、空力音のより一層の低減が重要な課題となる。

空力音低減手法としては、かつての新幹線車両で採用されていた菱形パンタグラフをシングルアーム形パンタグラフへ変更した例のように、形状を見直す方法が挙げられる。また、柔毛材の貼付²⁾のように、空力音発生源である渦を抑制する手法も提案され実用化されている。しかしながら、鉄道車両の空力音低減において、形状を見直す方法は、機能的な制約により困難を伴う場合や大幅な設計変更を必要とする場合が多いという問題点がある。また、鉄道車両は屋外での長期使用が前提であるため、柔毛材のように柔らかい状態を維持する必要がある材料の使用は困難である。

そこで、空力音の低減と同時に鉄道車両への適用を考慮した方法として、物体表面へ多孔質材を貼付することにより空力音を低減することを試みた。

本報告では、多孔質材の表面貼付による空力音低減効果について、円柱供試体を用いた風洞試験の結果を報告

する。さらに、高速鉄道車両において特に大きな空力音源となっているパンタグラフ³⁾へ多孔質材を応用した結果についても報告する。

2. 多孔質材の種類と選定

産業用に使用される材料は、気孔の無い緻密な材料が通常であるのに対し、自然界では多数の気孔を材料内に持つ多孔質材が多く見られる⁴⁾。

人工的に作られる多孔質材は製造方法や素材により構造が異なり、多種多様な種類が存在する⁴⁾。そのため、多孔質材はそれぞれの特性に応じた使用がなされている。

多孔質材を大きく分類すると、クローズドセルタイプとオープンセルタイプに分けられる。クローズドセルタイプは気孔同士が独立であり連通していない。一方、オープンセルタイプは気孔同士が連通している。今回は、図1に示すような三次元骨格網状構造を有し、97%の高い空隙率を有するオープンセルタイプの多孔質材を選定した。空力音を低減するために多孔質材を選定した理由は、多孔質材を通過した流れが緩やかな速度勾配を持つことにより、空力音の発生源である非定常な渦が緩和されると推測したためである(ただし、実際には非定常な渦の運動そのものが抑制されることが別途行った実験により判明している⁵⁾)。また、オープンセルタイプを選定した理由は、気孔中へ空気が入り込まないクローズドセルタイプでは空力音低減効果が見込めないと推測したためである。

多孔質材の目の粗さは3種類を用いた。ここで、目の粗さを表す指標として、#8、#13、#20を用いる。これは、

* 環境工学研究部 (騒音解析)

** 鉄道力学研究部 (集電力学)

特集：環境技術

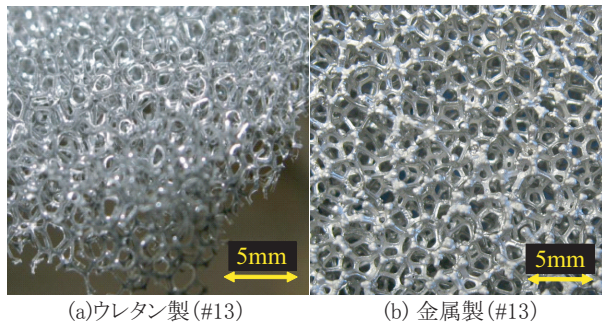


図1 多孔質材

25.4mm (1インチ) の線分上にセルがそれぞれ平均8個、13個、20個存在するという意味である。したがって、数字が大きければ大きいほど目の粗さは細くなる。なお、セルの数は厳密ではなく、例えば #13 であれば 25.4mm あたり 11 個～15 個程度とばらつきを持つ。

また、本研究では多孔質材の素材としてウレタン製および金属製を用いた。図1にウレタン製多孔質材と金属製多孔質材をそれぞれ示す。これらは全く同じ構造を有している。ウレタン製多孔質材は安価で入手しやすく、軟質であるため加工し易いが、劣化する問題があり鉄道車両へは不向きである。一方、金属製多孔質材はウレタン製多孔質材よりは高価であり、硬質であるため加工はし難いが、劣化しにくく鉄道車両への適用が可能である。

3. 円柱供試体を用いた空力音低減効果の検証

3.1 円柱供試体と試験条件

図2に示す円柱を用いて風洞試験を行い、多孔質材の貼付による空力音低減効果を検証した。供試体は表1および図3に示す7種類を使用した。多孔質材は、前述したウレタン製多孔質材 (#8, #13, #20) と金属製多孔質材 (#13) を使用し、柔毛材は繊維直径約 10 μ m、面密度約 50000 本/cm²のもの²⁾を使用した。これらは全て厚さ 10mm を使用し、直径 25mm の円柱へ貼付した。また、直径 45mm の円柱は、空力音低減効果が外形状の変化による効果ではないことを確認するために用意し、多孔質材または柔毛材を貼付した状態と外径が同じとなるようにした。

3.2 風洞試験による空力音低減効果の検証

風洞試験は鉄道総研が所有する大型低騒音風洞(滋賀県米原市、ノズル吹出し口 3m × 2.5m) の開放型測定部で行い、風速 300km/h における空力音を測定した。なお、円柱供試体の上側には地面板が存在しないため、流れの2次元性は保たれていない。図4にその様子を示す。

空力音の測定は、図4に示すように、円柱供試体の半径方向かつ流れに対し直角方向へ円柱供試体中心から

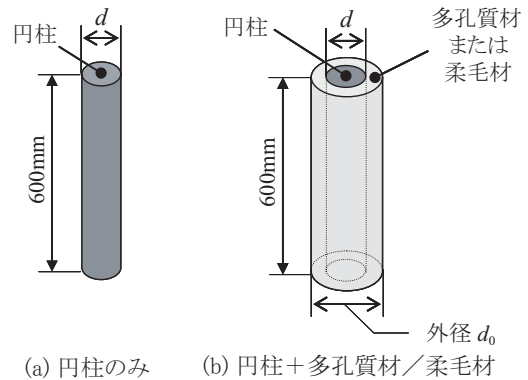


図2 円柱供試体概略図

表1 円柱供試体の試験条件

条件	円柱直径 d	多孔質材/柔毛材	外径 d_0
①	25mm	無し	—
②	45mm	無し	—
③	25mm	ウレタン製 (#20)	45mm
④	25mm	ウレタン製 (#13)	45mm
⑤	25mm	ウレタン製 (#8)	45mm
⑥	25mm	金属製 (#13)	45mm
⑦	25mm	柔毛材	45mm
⑧	円柱無し (風洞暗騒音)		

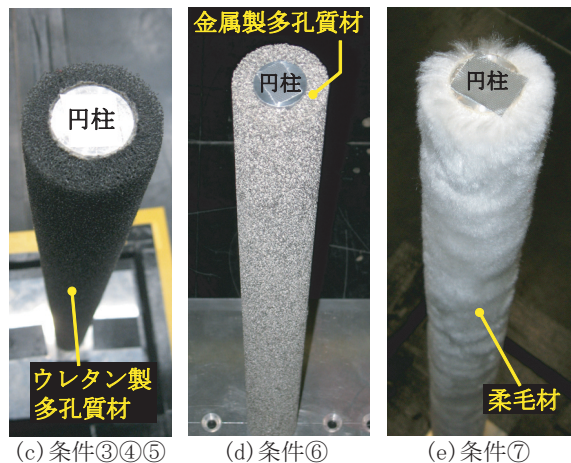
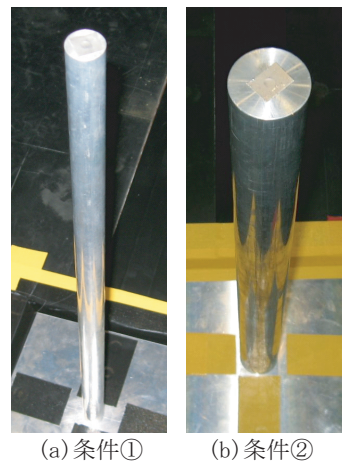


図3 円柱供試体の様子

5m離れた位置に無指向性マイクロホンを設置して行った。得られた音圧信号の1/3オクターブバンド分析を行い、周波数重み付け特性Aを施した。

図5にウレタン製多孔質材を円柱供試体に貼付した際の空力音測定結果を示す。直径25mmの円柱と比較すると、いずれの条件でも広帯域にわたり空力音が低減している。また、直径45mmの円柱と比較してもその違いは明らかであり、空力音低減効果が外形状の影響によるものではないことがわかる。

また、多孔質材の目の粗さについて注目すると、目が粗くなるにつれて高周波数側で騒音レベルが上昇することがわかる。これは多孔質材の線材から発生する空力音であると考えられる。ただし、全体としての騒音への寄与は少ない。一方、高周波数側の騒音レベルが低い#20は、5kHzバンド以下において#8、#13より騒音レベルがわずかに高く、全体としての騒音が増加する傾向にある。したがって、空力音低減効果が優れているのは#8、#13であるが、前述のように目が粗いほど高周波数側で騒音レベルが増加することも考慮すると、今回検討を行った条件では#13が総合的に最も優れた結果であると考えられる。そこで、以降では#13の多孔質材について検討を進めていく。

図6にウレタン製多孔質材と金属製多孔質材、柔毛材を比較した結果を示す。まず、ウレタン製多孔質材と金属製多孔質材のスペクトルが一致していることがわかる。もちろん、直径25mmの円柱供試体や直径45mmの円柱供試体に比べると両者とも大幅に騒音レベルが低減している。これは特筆すべき点であり、今回選定した多孔質材の場合は、多孔質材の硬軟によらず同じ空力音低減効果を持ち、鉄道車両での使用に際して、金属のような劣化しにくい素材も選択可能となる。また、多孔質材の空力音低減効果は、柔毛材と同等以上の性能を持つことが判明した。

4. パンタグラフへの応用

4.1 高速用パンタグラフと多孔質材貼付位置

多孔質材を貼付する高速用パンタグラフを図7に示す。前章の結果から、多孔質材の貼付により円柱から発生する空力音の低減が可能であり、また、第2章でも述べたようにその原理として、空力音の原因である非定常渦の運動そのものが抑制されることが判明している。パンタグラフへの貼付については制約も多いため、本パンタグラフでは、比較的容易に多孔質材を貼付することが可能であり、取り外しも可能な台枠・主軸・中間ヒンジ・舟支えを覆うFRP製のカバー(図7)および台枠の底面へ多孔質材を貼付することとした。また、実用化を考慮し、多孔質材は金属製を選定した。金属製多孔質材は構造用

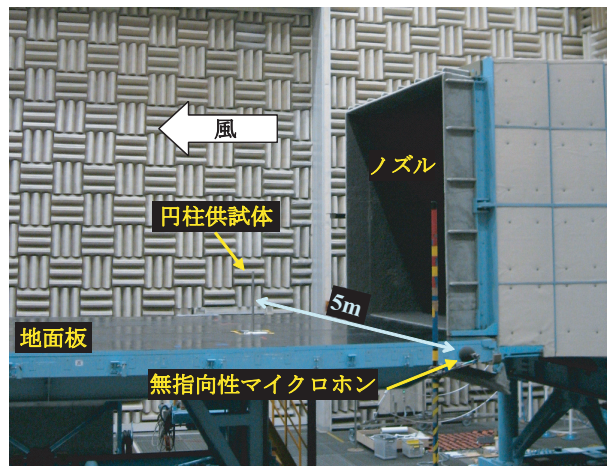


図4 風洞試験の様子(円柱供試体)

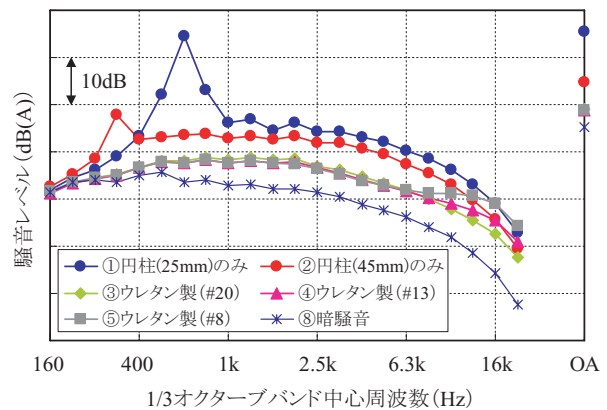


図5 円柱供試体の空力音測定結果その1(300km/h)

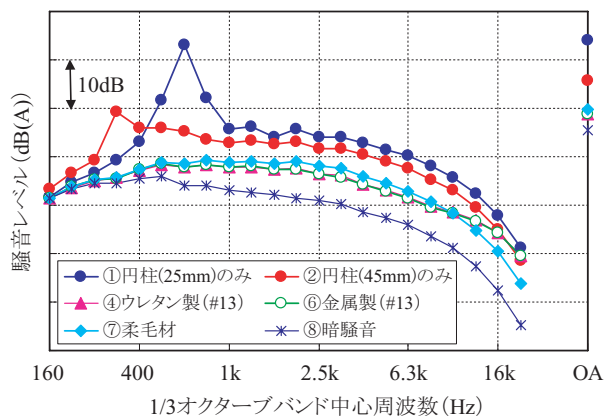


図6 円柱供試体の空力音測定結果その2(300km/h)

接着剤により各位置に貼付され、補助としてリベットを併用した。金属製多孔質材の貼付位置を以下に示す。

- (1) 台枠カバー(図8(a))
金属製多孔質材の厚み10mm、全面へ貼付
- (2) 台枠底面(図8(b))
金属製多孔質材の厚み10mm、全面へ貼付
- (3) 主軸カバー(図8(c))
金属製多孔質材の厚み5mm、全面へ貼付

特集：環境技術

(4) 中間ヒンジカバー (図8(d))

金属製多孔質材の厚み5mm, 全面へ貼付

(5) 舟支えカバー (図8(e))

金属製多孔質材の厚み5mm, 全面へ貼付

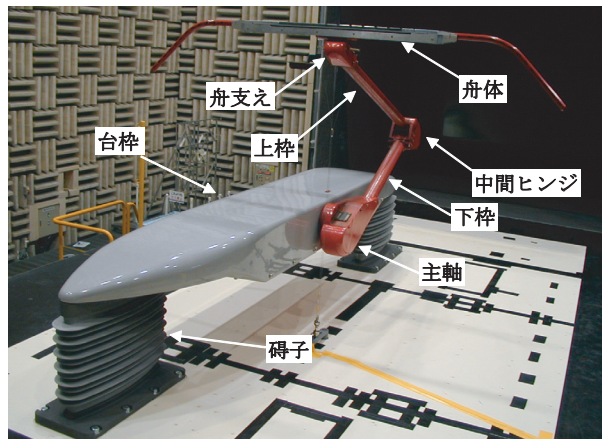
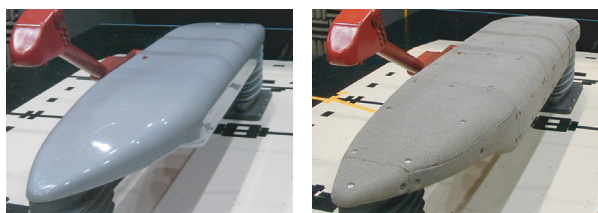


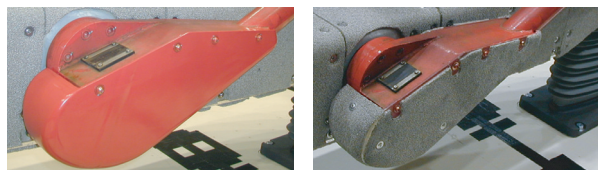
図7 高速用パンタグラフ



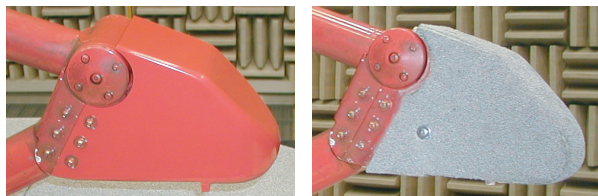
(a) 台枠カバー



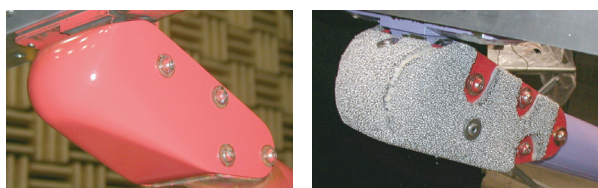
(b) 台枠底面



(c) 主軸カバー



(d) 中間ヒンジカバー



(e) 舟支えカバー

左側：標準状態 右側：金属製多孔質材貼付後

図8 金属製多孔質材の貼付位置

4.2 風洞試験による空力音低減効果の検証

4.2.1 試験条件

金属製多孔質材貼付の効果を検証するため、風洞試験を行った。風洞試験は鉄道総研の所有する大型低騒音風洞(滋賀県米原市, ノズル吹出し口3m×2.5m)にて行った。開放型測定部を用い、風速360km/hにおける空力音を測定した。測定は無指向性マイクロホンによる測定とマイクロホンアレイによる音源分布測定を行った。図9にその様子を示す。

金属製多孔質材の試験条件は以下の通りである。

- ・Case1：金属製多孔質材の貼付無し
- ・Case2：4.1節の(1)と(2)のみ
- ・Case3：4.1節の(1)～(5)の全て

以上の条件をなびき方向, 反なびき方向それぞれについて風洞試験を行った。なお, 本パンタグラフを搭載する高速車両では, なびき方向ではパンタグラフを上昇させ集電走行を行い, 反なびき方向ではパンタグラフを降下させ集電走行を行わない運用を行っている。風洞試験においても実態に即した試験とするため, 反なびき方向についてはパンタグラフを降下した状態で風洞試験を行った。

4.2.2 無指向性マイクロホンによる測定

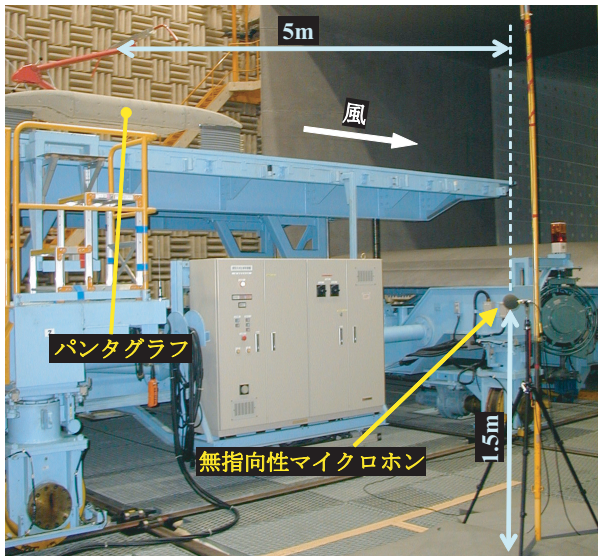
図9(a)に示したように, パンタグラフから側方に5m離れた位置に無指向性マイクロホンを設置した。風洞床面からの高さは1.5mとした。マイクロホンの設置位置・高さはなびき方向, 反なびき方向で共通とした。図10になびき方向, 図11に反なびき方向の無指向性マイクロホン測定結果を示す。

なびき方向の結果を示す図10では, 金属製多孔質材を貼付していないCase1に比べ, 台枠カバーと台枠底面に貼付したCase2はオーバーオール値(以下, OA値)で0.4dBの空力音低減効果が認められた。スペクトルをみると, 315Hzバンドの騒音レベルが低下している。315Hzバンドの騒音は碍子からの音であり, 金属製多孔質材を貼付したことにより碍子へ当たる流れが変化し, 碍子自身の空力音や, 碍子と台枠の干渉により発生する空力音が低減したものと考えられる。

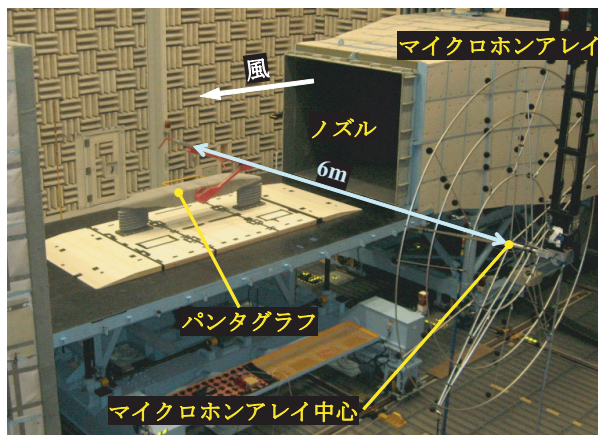
台枠カバーと台枠底面に加え, 主軸カバー・中間ヒンジカバー・舟支えカバーにも金属製多孔質材を貼付したCase3では, Case2よりさらにOA値で0.4dBの低減が認められ, Case1に対して0.8dBの空力音低減となった。スペクトルをCase2と比較すると1k～10kHzバンドにおいて騒音レベルが低減していることがわかる。

反なびき方向の結果を示す図11では, 金属製多孔質材を貼付していないCase1に比べ, 台枠カバーと台枠底面に貼付したCase2はOA値で1.5dBの空力音低減効果が認められた。スペクトルをみると, 広い周波数帯にわたり騒音レベルが低下している。

台枠カバーと台枠底面に加え, 主軸カバー・中間ヒ



(a) 無指向性マイクロホン設置側



(b) マイクロホンアレイ設置側

図9 風洞試験の様子（パンタグラフ：なびき方向）

ジカバー・舟支えカバーにも金属製多孔質材を貼付した Case3では、Case2よりさらにOA値で0.4dBの低減効果が認められ、Case1に対して1.9dBの空力音低減となった。スペクトルをCase2と比較すると500～4kHzバンドにおいて騒音レベルが低減していることがわかる。

詳細は次項で述べるが、反なびき方向での騒音レベルが大きく低減されたのは、金属製多孔質材の効果により315Hzバンドにピークを持つ碍子の空力音が低下したことに加え、舟体付近や中間ヒンジ付近から発生する空力音が大幅に低減したためである。

4.2.3 マイクロホンアレイによる音源分布測定

騒音の音源を調べる手法の1つにマイクロホンアレイを用いた方法がある。これは、多数の無指向性マイクロホンを並べて同時に測定を行い、各マイクロホンに到達する音波の遅延時間等を計算し、信号処理することで、測定対象のどの部位からどの程度の音が発せられているかを求めるものである。本試験では、鉄道総研の所有する直径4mのWheel Array⁶⁾を使用し、金属製多孔質材

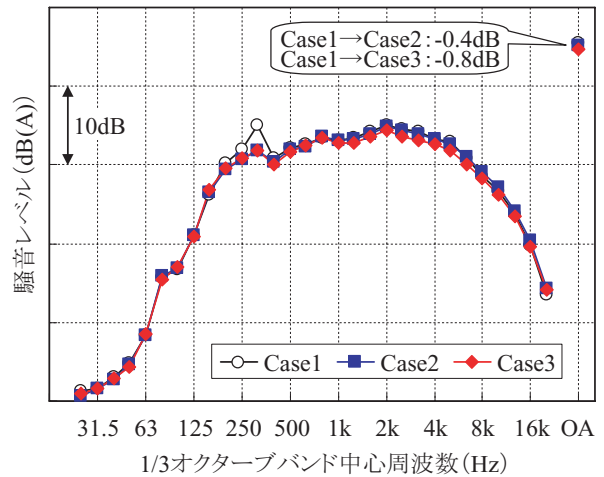


図10 パンタグラフの空力音測定結果（360km/h、なびき方向）

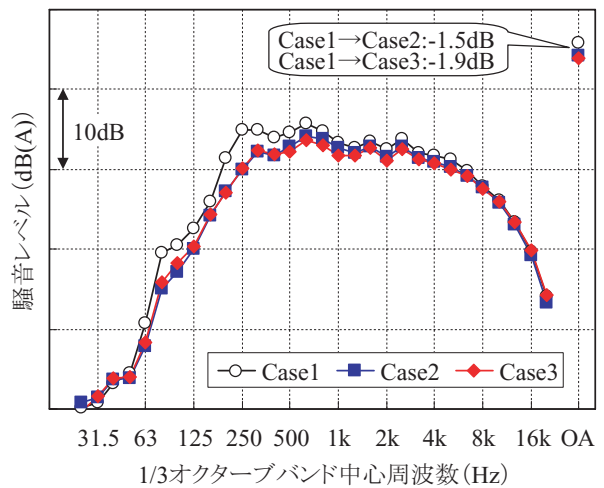


図11 パンタグラフの空力音測定結果（360km/h、反なびき方向）

の貼付により音源分布がどのように変化するか検証した。

図9(b)に示したようにマイクロホンアレイをパンタグラフから側方に6m離れた位置へ設置した。マイクロホンアレイの設置位置はなびき方向、反なびき方向で共通とし、マイクロホンアレイの中心高さを、なびき方向時（パンタグラフを上昇させている状態）における舟体すり板上面高さとした。

図12になびき方向、図13に反なびき方向のマイクロホンアレイによる測定結果の比較を示す。なお、マイクロホンアレイの結果は1/3オクターブバンド毎に表示されるが、全ての結果を記載すると膨大な量となるため、一例としてCase1とCase3の1k～1.25kHzバンドの結果を示す。

図12より、なびき方向では金属製多孔質材を貼付していないCase1に比べ、全てに金属製多孔質材を貼付したCase3の方が舟体付近と主軸カバー付近の音圧レベルが低下していることがわかる。特に主軸カバー付近では金属製多孔質材の貼付により大幅に音圧レベルが低下して

特集：環境技術

いる。しかしながら、中間ヒンジ付近についてはわずかに音圧レベルが上昇する結果となった。

図13より、反なびき方向では金属製多孔質材を貼付していないCase1に比べ、全てに金属製多孔質材を貼付したCase3の方が舟体付近と中間ヒンジ付近の音圧レベルが大幅に低減されていることがわかる。反なびき方向の場合、パンタグラフを降下させているため、舟体や中間ヒンジは台枠カバーと近接した状態となる。そのため、強い空力干渉が発生して大きな空力音を誘起するが、金

属製多孔質材を貼付すると、このような空力干渉が効果的に抑制されるものと考えられる。空力音の低減量がなびき方向に比べて大きいのはこのためである。

5. まとめ

本報告では、空力音低減と鉄道車両への適用を目的に、物体表面に多孔質材を貼付することによる空力音の低減を試みた。

円柱供試体を用いた風洞試験結果から、多孔質材の貼付により、空力音の大幅低減が可能であることが判明し、今回検討を行った条件では25.4mmあたりのセルの数が13個程度のものが最も効果的であった。また、金属製多孔質材とウレタン製多孔質材はほぼ同等の空力音低減効果を持つことが判明した。

さらにパンタグラフへ金属製多孔質材を貼付し、風洞試験を行った結果、特に空力干渉に起因すると考えられる空力音に対して大きな効果が認められ、パンタグラフについても空力音低減が可能であることを示すことができた。

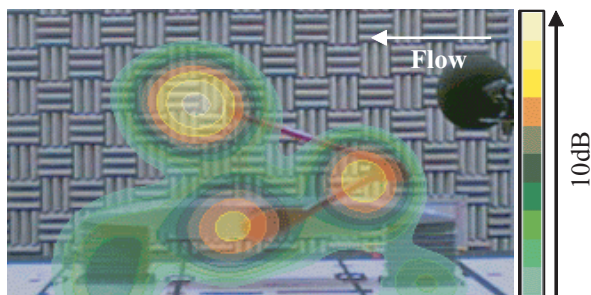
この方法は形状を大きく変更することなく適用可能であり、また、鉄道車両への適用も可能であるため、新しい方法として幅広い活用が出来るものと考えている。

謝辞

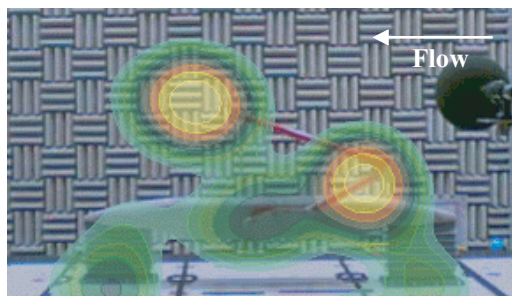
本研究を行うにあたり、JR東日本研究開発センター 先端鉄道システム開発センター 環境技術グループ 栗田課長、山田様の多大なるご協力を頂いた。この場をお借りして厚く御礼申し上げます。

文献

- 1) 森藤良夫：鉄道騒音の音源解析と対策の動向，鉄道総研報告，Vol.10, No.2, pp.1-4, 1996
- 2) 西岡通男：柔毛を用いた空力騒音の抑制手法，日本航空宇宙学会誌，Vol.48, No.554, pp.175-179, 2000
- 3) 佐川明朗，長倉清，池田充：車体空力騒音の音源探査手法と対策指針，鉄道総研報告，Vol.20, No.1, pp.17-22, 2006
- 4) 財団法人機械システム振興協会：システム技術開発調査研究17-R-4 ポーラス金属の利用技術の可能性に関する調査研究報告書 一 要旨一，2006年3月
- 5) 高石武久，末木健之，池田充：物体表面への多孔質材適用による空力音低減手法（第2報：後流と吸音特性の測定結果），日本機械学会流体工学部門講演会講演論文集，No.104, 2007
- 6) 宇田東樹，高石武久，末木健之：多孔質材を用いた車外および車室内騒音の低減，2007年自動車技術会秋季大会学術講演会前刷集，No.125-07, pp.17-20, 2007

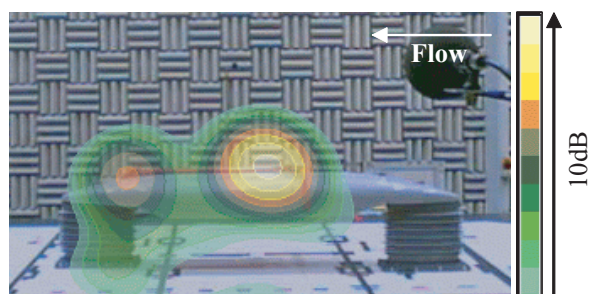


(a) Case1 (金属製多孔質材無し)

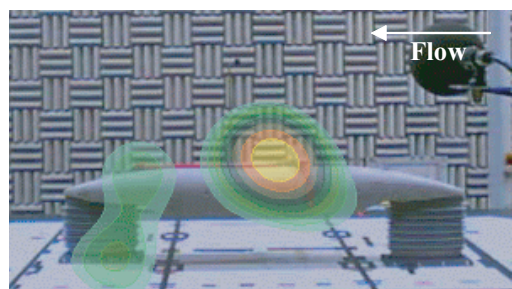


(b) Case3 (全てに金属製多孔質材)

図12 パンタグラフの音源分布図
(なびき方向, 360km/h, 1k ~ 1.25kHz バンド)



(a) Case1 (金属製多孔質材無し)



(b) Case3 (全てに金属製多孔質材)

図13 パンタグラフの音源分布図
(反なびき方向, 360km/h, 1k ~ 1.25kHz バンド)