

流れのバイパス手法による パンタグラフ舟支え部の空力音低減

光用 剛* 天野 佑基* 阿久津 真理子**
長尾 恭平* 真柄 勇*** 若林 雄介#

Aerodynamic Noise Reduction of Pantograph Head Support by Applying Flow Bypass Technique

Takeshi MITSUMOJI Yuki AMANO Mariko AKUTSU

Kyohei NAGAO Isamu MAKARA Yusuke WAKABAYASHI

Reduction of aerodynamic noise emitted by a pantograph is an important challenge to reduce environmental impact and increase the speed of high-speed trains. In previous studies, a method for reducing aerodynamic noise has been proposed by applying porous material to pantograph head support covers. In this study, a new practical method is proposed to achieve the same aerodynamic noise reduction effect as using porous material. On the basis of a wind tunnel test result, it is clarified that the new method can reduce aerodynamic noise to almost the same extent as using porous material.

キーワード：パンタグラフ，舟支え部，空力音，多孔質材，流路，流れのバイパス手法

1. はじめに

新幹線の更なる高速化を実現するうえで、沿線騒音の低減、特に列車速度の6乗から8乗に比例して増加する空力音の低減が重要な課題となっている。新幹線車両の構成機器のうち、パンタグラフは主要な空力音源のひとつとなっており、特に舟体・舟支え部（図1）についてはその寄与が大きいことがわかっている。

このうち、架線とのしゅう動を担う舟体は、空力音の低減だけでなく揚力特性の安定化、すなわち対向風の風向変化やすり板摩擦に起因する形状変化に対して揚力特性が大きく変化しないこともまた必須の要件となっており、現在では主に後者の要件から図2（a）に示すような矩形を基本とした形状（以下、現用舟体と記す）が舟体の断面形状として用いられている。これらの事柄を踏まえ、過去の研究ではCFD解析と形状最適化手法を組み合わせた手法を用い、一方向走行を前提として空力音の低減と揚力特性の安定化を両立する舟体断面形状¹⁾が提案されているほか、その断面形状を基本として追従機構を実装した多分割平滑化舟体が開発されている^{2) 3)}（図2（b）、図3）。

また、舟体・舟支え部の空力音低減においては、舟体と舟支え部の流れの干渉を制御することも重要であり、

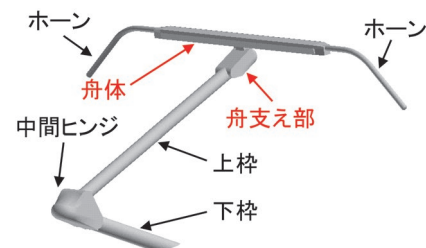
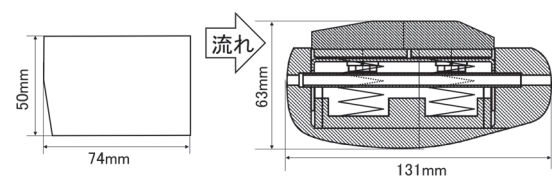


図1 新幹線パンタグラフの構成



(a) 現用舟体の例 (b) 多分割平滑化舟体

図2 舟体断面形状

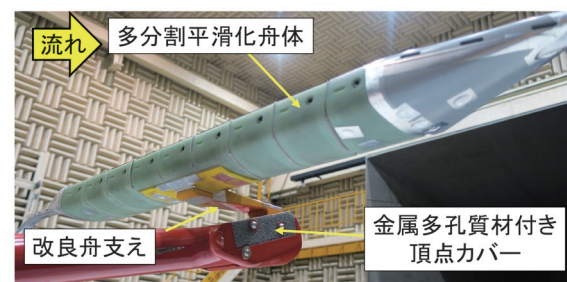


図3 舟体・舟支え部の空力音低減策

* 鉄道力学研究部 集電力学研究室

** 環境工学研究部 騒音解析研究室

*** 元 鉄道力学研究部 集電力学研究室

東日本旅客鉄道株式会社

過去の研究においては、なびき方向での走行を前提としたうえで、舟体の設置位置を上流側にオフセットさせることで流れの干渉を緩和する改良舟支えや、舟支え部の頂点カバーに多孔質材を適用する空力音低減策が提案されている³⁾ (図3)。これらの空力音低減策のうち、多孔質材の適用については、部材の形状や構造を大きく変更することなく部材の表面性状のみを変更する対策であることから、適用が容易な対策であると言える。また、多孔質材はその構造の特徴から接着取付が必要となるが、現車適用に際しては、その取り付け強度に問題が無いことも確認がなされており⁴⁾、実用化に向けて一定の目途が立った技術であると考えられる。しかしながら、多孔質材は、飛来物が衝撃した際に多孔質構造が潰れるなどの変形を生じる場合があり、接着取付のため多孔質部分のみの交換を行うことも困難であるといった課題がある。そのため、多孔質材に代表される部材表面性状の改良による空力音低減手法の実用化を推進するうえでは、部材強度や保守性の向上が必須であり、場合によっては多孔質材によらない新たな手法も必要となると考えられる。そこで、本研究では、多孔質材と同様の原理による空力音低減作用を実現し、かつ、部材強度や保守性などを向上可能な実用的な代替手法として流れのバイパス手法を提案し、風洞試験において空力音低減効果の確認を行った。

2. 多孔質材の代替手法

多孔質材とは、図4に示すような無数の気孔を有する部材であり、空力音低減においては隣接する気孔同士が連通した構造のものを適用する必要があることがわかっている。また、多孔質材による空力音低減効果は、吸音などの音響的な作用ではなく、多孔質材表面において生じる自然な流れの流入・流出に伴って流れ場が安定化する流体力学的な作用によって得られることが解明されている⁵⁾。そのため、多孔質材の作用を別の手法で実現するためには、部材表面の圧力差に応じて自然な流れの流入・流出が生じるような構造を設けることが重要となる。

本研究では、図3に示した金属多孔質材付き頂点カバーのような舟支え部への適用を想定し、多孔質材の代替手法として、舟支え部の上面側稜角部に流路を設けて流れを上から側面へとバイパスさせる手法を提案した。図5(a)に本手法の概要図を示す。本手法では、舟支え部の上面側稜角部のうち、流れがよどんで圧力が上昇する上面側と、流れが剥離して圧力が低下する側面側とを流路で接続し、上面側から側面側への自然な流入・流出を生じさせることを狙っている。

供試体には、現用の頂点カバーをまくらぎ方向に10mmずつ拡張したうえで、稜角部に流路を設けた部材

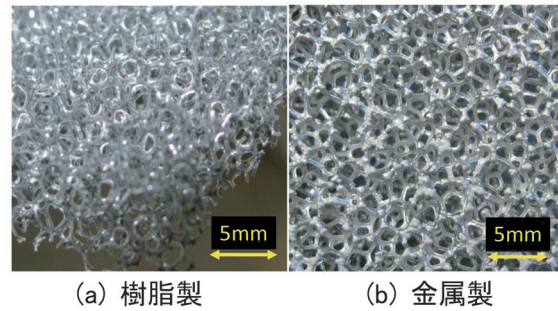
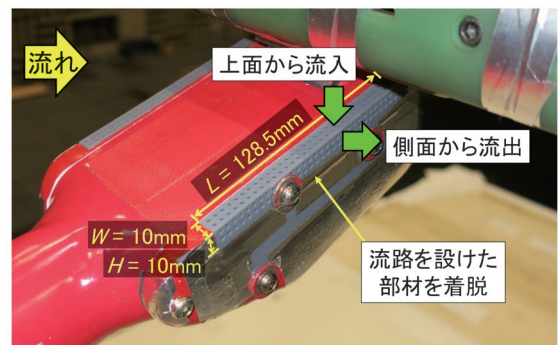
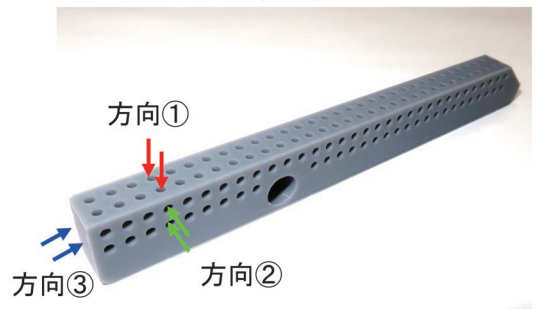


図4 多孔質材



(a) 全体概要



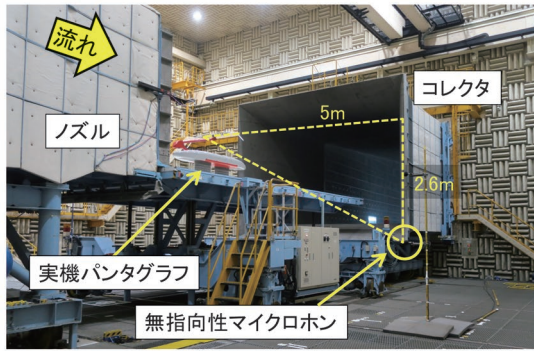
(b) 流路を設けた部材

図5 舟支え部への流路の適用

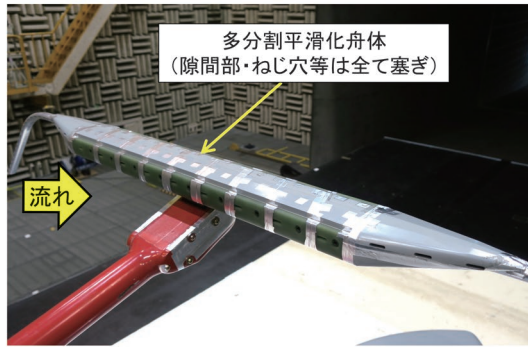
を着脱可能な構造の頂点カバーを使用した。流路を適用する領域は、幅 $W=10\text{mm}$ 、高さ $H=10\text{mm}$ 、稜線方向の長さ $L=128.5\text{mm}$ を基本とした。流路は、図5(b)に示すように、稜角部の上面に垂直な「方向①」と側面に垂直な「方向②」の2方向に設けることを基本とし、一部の試験では稜線に平行な「方向③」の流路を追加した。

3. 風洞試験の概要

風洞試験は、新幹線用実機パンタグラフを供試体として、鉄道総研の大型低騒音風洞（開放型計測部、吹出口 $3\text{m} \times 2.5\text{m}$ 、最大風速 111m/s ）において実施した。風洞試験の実施状況を図6に示す。舟体には図2(b)および図3に示した多分割平滑化舟体^{2) 3)}を搭載し、パンタグラフの設置方向はなびき方向とした。試験風速は 100m/s (360km/h) であり、試験時のレイノルズ数は舟



(a) 全体概要



(b) 舟体・舟支え部

図6 風洞試験の実施状況

支え部の左右方向幅を代表長さとして算出すると 6.5×10^5 である。なお、本試験では舟支え部の空力音評価を主目的としており、それ以外の部位からの放射音は極力小さいことが望ましいことから、多分割平滑化舟体のねじ穴や可動用の隙間部は全て塞いだ状態で試験を実施することを基本とした(図6(b))。

空力音測定はパンタグラフ全体が気流にさらされる条件下で実施し、パンタグラフの側方斜め下位置に設置した無指向性マイクロホンにより空力音を評価した。ここで、無指向性マイクロホンの設置位置は、流れ方向については舟体中心位置から356mm上流側、左右方向については舟体中心位置から5m側方、高さ方向については舟体上面から2.6m下方位置に設定した。騒音レベルは空力音測定波形に対して1/3オクターブバンド周波数分析を実施し、A特性補正を施して算出した。オーバーオール値については、舟支え部の寄与が支配的となる周波数帯として400Hz以上の周波数帯から算出したパーシャルオーバーオール値(以下、POA値)で評価することを基本とした。また、暗騒音に相当する条件として、舟体・舟支え部との流れの干渉の影響が生じないよう舟体を取り外した条件での試験を実施しており、必要に応じて空力音測定結果にその結果を併記する。



図7 舟支え部の試験条件

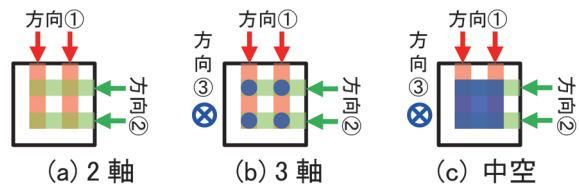


図8 流路の設置方向(断面図)

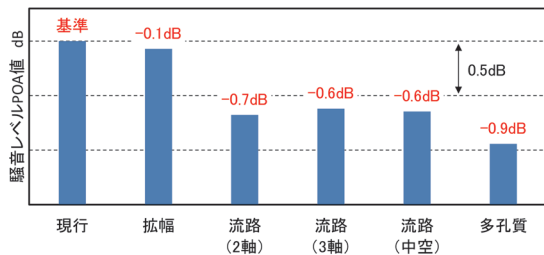
4. 風洞試験結果

4.1 流路の適用効果と内部流路の構成の影響

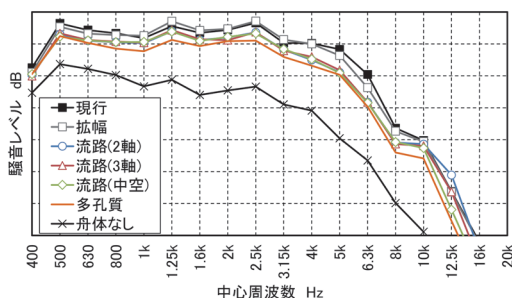
はじめに、図7に示す4種類の舟支え部の試験条件を設定し、流路の適用効果および内部流路の構成の影響を確認した⁶⁾。本検討では、現行の舟支え部の頂点カバー(図7(a)、以下「現行」)に対して、頂点カバーを左右方向に10mmずつ拡幅した状態(図7(b)、以下「拡幅」)および、「拡幅」に対して稜角部に流路を設けた状態(図7(c)、以下「流路」)に加え、空力音低減効果の比較対象として、「拡幅」に対して稜角部に樹脂製多孔質材(イノアック社製モルトフィルタMF-13)を適用した条件(図7(d)、以下「多孔質」)の空力音測定を実施した。ここで、「流路」については、直径2mmの円形流路を中心間距離4mmピッチで配置したが、流路の設置方向は図8に示す3通りの条件を設定した。具体的には、流路の設置方向を方向①と方向②の2方向とした「2軸」(図8(a))と、「2軸」に対して方向③の流路を追加した「3軸」(図8(b))、および方向③の流路を6mm×6mmの矩形断面とした「中空」(図8(c))の3条件を設定した。いずれの流路条件についても、流路を設けた部材は3Dプリンタにより製作したものを使用した。また、多孔質材の外形寸法は、稜角部を構成するパーツの分割の制約により、流路の適用領域よりもやや大きい $W=10\text{mm}$, $H=16.7\text{mm}$, $L=139.1\text{mm}$ (各記号の部位は図5(a)参照)とした。

本検討の空力音測定結果を図9に示す。POA値の比較図(図9(a))を参照すると、「現行」と「拡幅」の頂点カバーのPOA値はほぼ同等であり、頂点カバーを拡幅したことによる空力音への影響は小さいことが確認できる。これを踏まえて、「現行」を基準として各種流路を適用した場合のPOA値を比較すると、0.6~0.7dBの空力音低減効果が認められ、内部流路の構成による空力音の差異も小さいことが確認できる。しかしながら、「多孔質」の場合にはPOA値が0.9dB低減していることから、流路を適用したことによる空力音低減効果は多孔質材を適用した場合と比べると若干小さいことがわかる。

次に、空力音のスペクトルの比較図(図9(b))に着目すると、「現行」に対して各種流路を適用した条件では、400Hz~8kHzにかけての広い周波数帯にわたって騒音レベルが低減しているものの、各周波数帯における空力音低減効果は「多孔質」と比べると若干小さいことが確認できる。なお、POA値に大きな影響を及ぼすレベルではないものの、12.5kHz帯に着目すると、内部流路の構成によって差異が見られ、方向③の流路を省略した「2軸」では若干のピーク音が認められる一方で、方向③の流路を追加した「3軸」や「中空」ではピーク音が発生していないことが確認できる。「2軸」の場合に発生した12.5kHzの弱いピーク音は、その発生周波数に風速依存性がないことを別途確認しており、音波の波長の1/4(6.8mm)が流路の深さ8mmと概ね一致することから、流路の深さを1/4波長とする気柱共鳴音であると考えられる。また、このピーク音は方向③の流路を設けることで低減可能であることも推察される。



(a) POA 値の比較



(b) 空力音のスペクトルの比較

図9 流路の設置方向による空力音の比較(風洞試験, 360km/h)

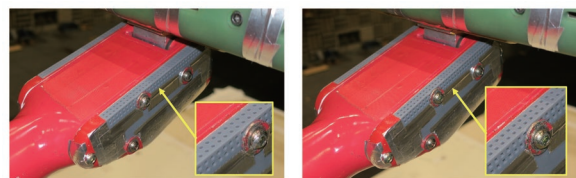
4.2 流路の形状および開口率の影響

前節の検討結果から、頂点カバーの稜角部に流路を設けることで空力音を低減可能であるものの、空力音の低減量は多孔質材を適用した場合と比べると小さいことを確認した。その要因として、舟支え部上面から側面への流れの流入出の流量が十分ではないことが考えられる。そこで、流入出の流量を増加させることを目的として、流路の断面形状や大きさを変更した場合の空力音低減効果について調査を行った⁷⁾。

図10に流路の開口条件を示す。本検討では、内部流路の構成を前節の「3軸」(図8(b))と同一としたうえで、流路の中心間距離を4mmに固定し、前節に記載した直径2mmの円形流路(図10(a), 以下「円形(2mm)」)に対して、流路の断面積を1辺2mmの正方形とした場合(図10(b), 以下「正方形(2mm)」)および、これら流路の直径および1辺を3mmに拡大した場合(図10(c)(d), 以下「円形(3mm)」および「正方形(3mm)」)の計4条件を設定して試験を実施した。いずれの流路条件についても、流路を設けた部材は3Dプリンタにより製作したものを使用した。なお、比較対象とした「現行」および「多孔質」については、前節と同一条件とした。

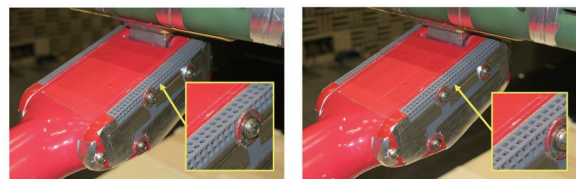
空力音測定結果を図11に示す。図11(a)は流路の開口率に対してPOA値をプロットしたものであり、開口率は稜角部上面の流路の適用領域(10mm×128.5mm)に対する流路の総開口面積により算出している。本図より、流路の開口率が大きくなるほどPOA値が減少する傾向が認められ、本検討で評価したなかでは、開口率を35%程度とすることで多孔質材を適用した場合と同程度の空力音低減効果が得られることが確認できる。

空力音のスペクトルの比較図(図11(b))を参照すると、前節と同様に流路の適用によって400Hz~8kHzにかけての広い周波数帯にわたって騒音レベルが低減し



(a) 円形(2mm)

(b) 正方形(2mm)



(c) 円形(3mm)

(d) 正方形(3mm)

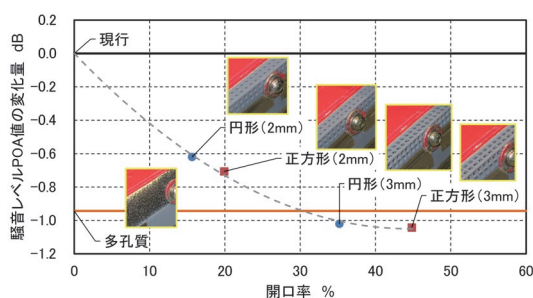
図10 流路の開口パターン

ており、開口率が大きい「円形 (3mm)」および「正方形 (3mm)」では「多孔質」とほぼ同等の空力音低減効果が得られることが確認できる。

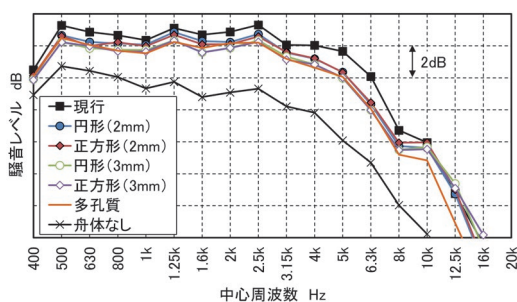
なお、同程度の断面寸法の円形流路と正方形流路とでは、開口率の違いに伴って POA 値や空力音のスペクトルに若干の差異が認められる以外は大きな違いはなく、空力音低減効果は流路の断面形状には大きくは依存しないと考えられる。

4.3 実機仕様の試作機の空力音低減効果

前節までの検討結果を踏まえ、実機仕様の空力音低減デバイスとして、図 12 に示すデバイスを製作し、その空力音低減効果を確認した⁸⁾。本デバイスは、部材強度を考慮して厚さ 10mm のアルミ製の板材に流路を設けることで構成しており、流路の設置領域は前節までの検討と同様に幅 $W=10\text{mm}$ 、高さ $H=10\text{mm}$ としているが、稜線方向の長さについては加工上の制約から $L=121.5\text{mm}$



(a) POA 値の比較



(b) 空力音のスペクトルの比較

図 11 流路の開口パターンによる空力音の比較 (風洞試験, 360km/h)

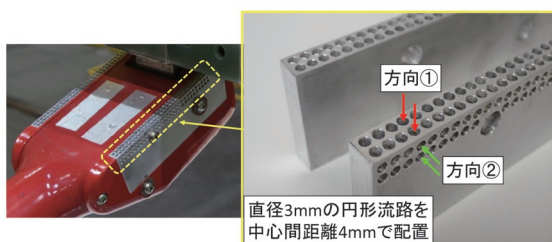


図 12 実機仕様の空力音低減デバイス

と若干縮小している。流路の設置方向は、4.1 節の結果から空力音低減効果に大きな影響を与えないことを確認していることから、部材の加工性を考慮して「方向①」と「方向②」の 2 方向のみから流路を設置する 2 軸タイプを選定した。また、流路の大きさ・形状は、4.2 節の結果から 35% 程度の開口率を確保する必要があることから、直径 3mm の円形流路を中心間距離 4mm ピッチで配置した。本デバイスは頂点カバーに共締めすることで設置できる構造となっており、検修時等には当該デバイスのみを取り外して検査・交換等が行えるため、接着取付が必要な多孔質材と比べて保守性も向上している。また、質量は左右合わせて約 300g であり、上枠の等価質量に対して十分小さく、集電性能には大きな影響を及ぼさないと考えられる。

空力音低減効果の評価においては、3 種類の舟体・舟支え部条件に対して本手法を適用し、その空力音低減効果を過去の研究で開発した金属多孔質材付き頂点カバー³⁾ (図 3, 多孔質材の設置領域は幅 $W=10\text{mm}$ 、高さ $H=40\text{mm}$ 、稜線方向の長さ $L=140.3\text{mm}$) と比較した。舟体・舟支え部の条件は、舟体・舟支え部がともに現用品である「条件 1」, 「条件 1」に対して舟体のみを多分割平滑化舟体に変更した「条件 2」, 「条件 2」に対して改良舟支えを適用した「条件 3」の 3 条件とした。いずれの条件についても、頂点カバーの基本条件は現行の頂点カバーとした。なお、多分割平滑化舟体および改良舟支えは過去に提案されたもの (図 3) から外形形状等を若干変更した改良品⁹⁾を使用した。また、本節では、実走行時のパンタグラフの空力音を評価することを目的として、多分割平滑化舟体の舟体要素間の隙間部については、可動性を考慮してアルミテープではなく柔毛材³⁾を適用して塞いだ条件としたほか、全体音は POA 値ではなく OA 値により評価した。これらにより、前節までの検討結果と比べて空力音低減効果は若干小さい値となる。

空力音測定結果を図 13 に示す。本図より、いずれの舟体・舟支え部条件に対しても、提案したデバイス (流路) を適用することで 630Hz 以上の広い周波数帯にわたって空力音が低減している様子が確認できる。本デバイスによる OA 値の低減量は 0.3~0.4dB であり、多孔質材の空力音低減効果 0.4~0.5dB よりも若干小さいものの、ほぼ同等の空力音低減効果が得られると言える。なお、OA 値に与える影響は小さいものの、12.5kHz 帯において本デバイスの適用により弱いピーク音が発生している様子も確認できる。このピーク音は 4.1 節において確認された 2 軸タイプの流路構成特有の気柱共鳴音であると推測され、4.1 節の検討よりも流路の開口率を増加させた本節の検討においては、流路を通過する流量が増加したことに伴ってピーク音が顕著に発生したものと考えられる。

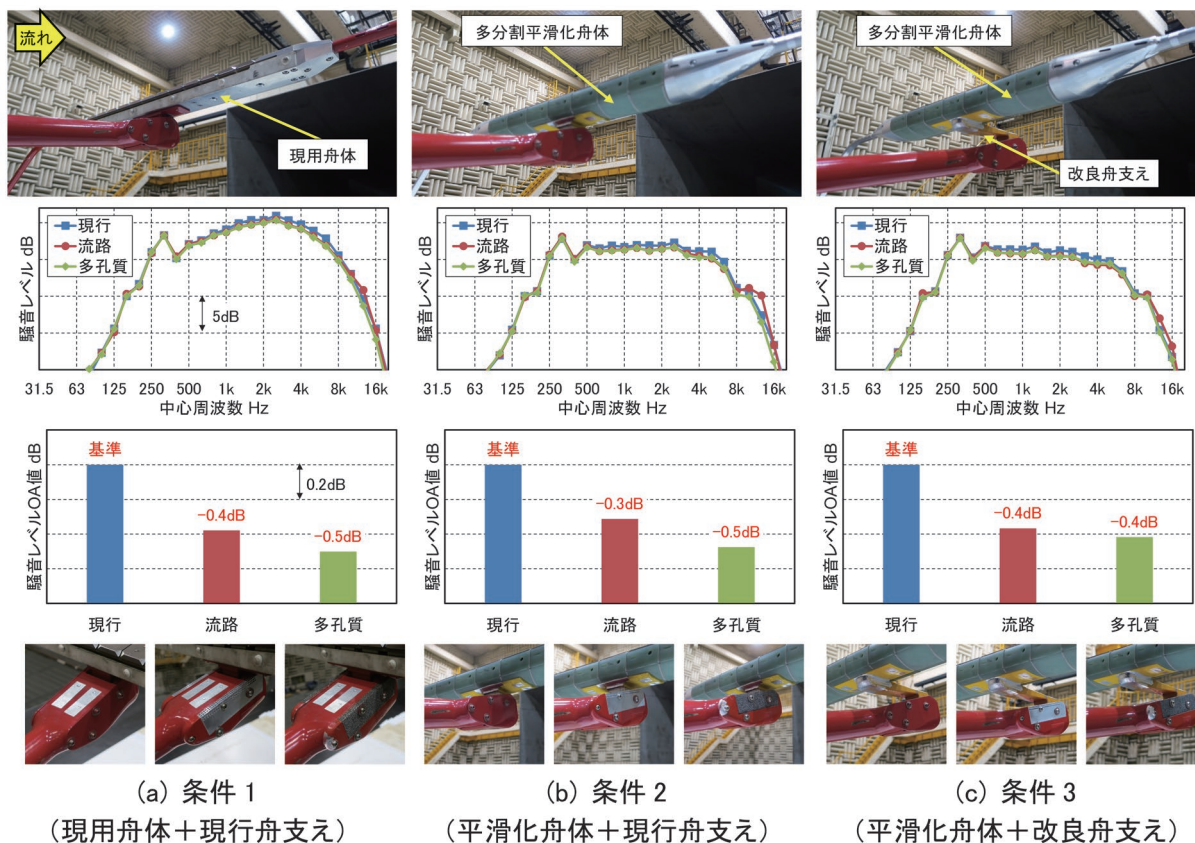


図 13 実機仕様の空力音低減デバイスによる空力音低減効果 (風洞試験, 360km/h)

以上より、提案したデバイスは、12.5kHz帯に弱いピーク音が発生するものの、様々な舟体・舟支え部条件に対して多孔質材を適用した場合とほぼ同等の空力音低減効果が得られることを確認した。

5. まとめ

本研究では、多孔質材の空力音低減メカニズムに基づき、その作用を実現したうえで、部材強度や保守性を向上させた実用的な代替手法として、部材の稜角部に流路を設ける手法を提案し、その空力音低減効果を風洞試験において確認した。その結果、以下のことがわかった。

- (1) 舟支え部の上面と側面を接続するように流路を設けることで空力音が低減する。
- (2) 流路の設置方向については、上面と側面にそれぞれ垂直な方向に流路を設ける2軸タイプと、稜線方向の流路を追加した3軸タイプとで空力音低減効果に大きな差がないことを確認した。ただし、2軸タイプについては、流路の深さ方向の寸法に関係した気柱共鳴音と推測される弱いピーク音が発生する。
- (3) 流路の開口率については、本研究で評価したなかでは、開口率を35%程度とすることで多孔質材と

概ね同等の空力音低減効果が得られる。

- (4) 実機仕様の空力音低減デバイスとしてアルミ板に流路を設けたデバイスを開発し、その空力音低減効果を評価した結果、代表的な3種類の舟体・舟支え部条件に対して、多孔質材と概ね同等の0.3~0.4dBの空力音低減効果が得られることを確認した。本手法は多孔質材に替わる実用的な空力音低減策として、パンタグラフ以外にも様々な器機や部材にも適用可能な手法であると考えている。

文献

- 1) 吉田和重, 鈴木昌弘, 池田充: 揚力特性および低騒音性を考慮した舟体形状最適化の基礎検討, 鉄道総研報告, Vol.19, No.9, pp.23-28, 2005
- 2) 白田隆之, 小林樹幸, 山下義隆, 光用剛, 長尾恭平, 若林雄介: 多分割舟体の追従機構と揚力補償手法, 鉄道総研報告, Vol.34, No.8, pp.5-10, 2020
- 3) 光用剛, 白田隆之, 平川裕雅, 磯野達志, 長尾恭平, 若林雄介: 平滑化舟体と舟支え部の改良によるパンタグラフの空力音低減, 鉄道総研報告, Vol.34, No.8, pp.11-16, 2020
- 4) 平川裕雅, 光用剛, 白田隆之, 嵯峨信一: パンタグラフの

- 低騒音化に向けた金属製多孔質材の氷塊衝撃試験, 第26回鉄道技術連合シンポジウム (J-RAIL2019), 2019
- 5) 高石武久, 末木健之: 多孔質材貼付による空力音低減に関する数値解析, 日本機械学会論文集, Vol.77, No.773, pp.33-42, 2011
- 6) 光用剛, 平川裕雅, 阿久津真理子, 小林樹幸, 若林雄介: パンタグラフ舟支え部の空力音低減を目的とした多孔質材の代替手法の検討, 第31回環境工学総合シンポジウム 2021, 2021
- 7) 光用剛, 天野佑基, 阿久津真理子, 小林樹幸, 若林雄介: 多孔質材の代替手法によるパンタグラフ舟支え部の空力音低減効果に関する検討, 第32回環境工学総合シンポジウム 2022, 2022
- 8) 光用剛, 天野佑基, 阿久津真理子, 長尾恭平, 真柄勇, 若林雄介: Reduction of aerodynamic noise from pantograph head support by applying flow bypass technique to replace porous materials, International Workshop on Environmental Engineering 2023 (IWEE 2023), 2023.
- 9) 光用剛, 天野佑基, 阿部巧: 静かなパンタグラフを実現する, RRR, Vol.81, No.2, pp.4-9, 2024