

舟体・舟支え部の形状改良による パンタグラフの空力音低減

光用 剛* 佐藤 祐一* 白田 隆之*
山崎 展博** 宇田 東樹** 若林 雄介***

Aerodynamic Noise Reduction of a Pantograph by Improving the Shape of Pantograph Head and its Support

Takeshi MITSUMOJI Yuichi SATO Takayuki USUDA
Nobuhiro YAMAZAKI Toki UDA Yusuke WAKABAYASHI

Reduction of aerodynamic noise emitted from a pantograph head and its support is one of the important subjects for the speed-up of high speed trains from an environmental point of view. To reduce it, suitable configuration of the pantograph head with a smooth cross section profile has been investigated. As a result, it has been clarified that aerodynamic noise can be reduced by making the pantograph head have a suitable configuration which induces appropriate flow interference between the pantograph head and its support. Furthermore, it has been also clarified that the pantograph horn affects aerodynamic noise properties significantly and shape improvement around the joint area of the pantograph head and the horn is an important factor for the reduction of aerodynamic noise.

キーワード：パンタグラフ，空力音，舟体，舟支え，ホーン，PIV

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、特に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（図1）についてはその寄与が大きいことがわかっている。ここで、厳密には舟体は架線としゅう動するすり板を取り付ける部材のことであるが、本論文では舟体およびすり板を一括して単に舟体と記すこととする。

空力音は物体後流に生じる渦の非定常運動に起因して発生することから、舟体から発生する空力音を低減するためには、舟体に翼型のような流線形断面形状を採用し、舟体周りの流れの剥離を抑制して後流の渦の巻き込みを弱めることが望ましい。一方、舟体には、空力音が小さいことだけでなく、高速走行中に作用する揚力が安定していることもまた重要な特性として求められる。ここで言う安定した揚力とは、揚力が集電系にとって適切な値に維持され、風向変化やすり板摩耗による形状変化に対する変化量が小さいことを意味している。流線形断面の舟体は空力音の発生は小さいが、風向変化やすり板摩耗時の形状変化に対して揚力が敏感に変化する傾向があり、舟体形状を単純に流線形化することは容易ではない。こ

うした制約から、現在、舟体としては図2(a)に示すような鈍頭断面形状のものが用いられることが多い。

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、走行方向を一方に限定したうえで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（図2(b)）が提案されている¹⁾。以下、この断面形状を有する舟体を平滑化舟体と記す。この平滑化舟体については、柱状模型による舟体単体の風洞試験により、安定した揚力特性を具備しつつ、現用の舟体に対して大幅に空力音を低減できること、また、舟体を前後に

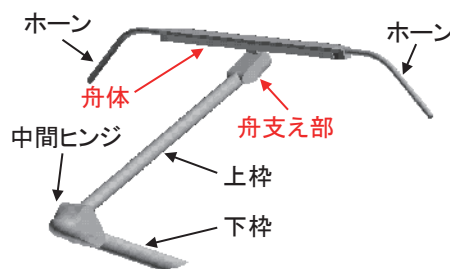
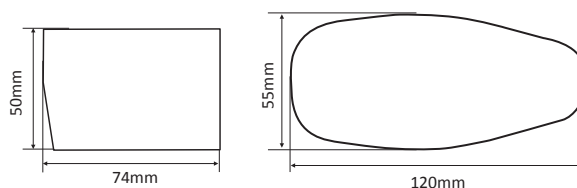


図1 新幹線パンタグラフの構成



(a) 現用舟体の例 (b) 平滑化舟体

図2 舟体断面形状

* 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
*** 東日本旅客鉄道株式会社

特集：鉄道力学

貫通する孔（貫通孔）を設けることで、さらなる空力音の低減が可能であることを確認している。一方、平滑化舟体を実機パンタグラフに搭載した場合には、舟体単体の試験の場合ほど空力音が低減しないことも判明している²⁾。その原因は、主として舟体と舟支え部との流れの干渉によるものであることを解明し³⁾、両者を離して設置することにより、大幅な空力音の低減が可能であることを確認している^{2) 4)}。

以上のように、舟体・舟支え部の空力音低減においては、舟体断面形状の平滑化および貫通孔の設置といった舟体の改良を実施するだけでなく、舟体と舟支え部の位置関係の改良もまた重要であることがわかっている。このうち、舟体と舟支え部の位置関係と空力音低減効果の関係については、詳細な検討は十分には実施されていない。そこで、本研究では、貫通孔を有する平滑化舟体を搭載することを前提として、更なる空力音低減の観点から、舟体・舟支え部の最適な相対位置関係の検討を実施した⁵⁾。まず、縮尺模型を用いた風洞試験により舟体・舟支え部の相対位置と後流の乱れの分布の関係について調査を行った。次に、その結果を活用して、実機スケールの風洞試験により空力音の評価を行った。さらに、空力音測定結果から、ホーン取り付け部の形状が空力音特性に大きな影響を与えることがわかったため、当該部位の空力音低減についての検討も併せて実施した。以上を基に、舟体と舟支え部の位置関係の改良および、ホーン取り付け部の形状改良による空力音低減効果を示した。

2. 舟体・舟支え部後流の流れ場測定

舟体・舟支え部から放射される広帯域空力音は、主として後流に生じる乱れによって発生していると考えられる。本研究では、はじめに舟体と舟支え部の相対位置を変更した場合の後流の乱れの分布の変化について把握するため、新幹線用パンタグラフの1/1.6縮尺部分模型を使用して、粒子画像流速測定法（PIV; Particle Image Velocimetry）による流速分布測定を実施した。

2.1 試験方法と座標系の定義

風洞試験は（公財）鉄道総合技術研究所の小型低騒音風洞（開放型計測部、吹出口720mm×600mm、最大風速42m/s）において実施した。図3に風洞試験の実施状況を示す。供試体として、新幹線用パンタグラフの上枠より上部のみを模擬した1/1.6縮尺模型を使用した。以下、本章においては、供試体の寸法や座標などは全て模型の寸法（実寸の1/1.6）で示すこととする。供試体模型の枠組部分をなびき方向（中間ヒンジが上流側に位置する向き）で風路内に設置し、図2（b）に示した断面形状を有する平滑化舟体の縮尺模型（断面の寸法は図

2（b）の1/1.6、まくらぎ方向長さ515mm）をトラバース装置に取り付け、舟支え部に対する舟体位置を任意に設定できるようにした。このとき、舟支え部と舟体とを接続する金具（舟支え金具）は取り外した状態とした。また、舟支え部の上流側上面には、当該部位の形状を滑らかな凸形状とするフェアリングを取り付けて試験を実施した（図4）。舟体の上下方向中央部には、空力音低減のための貫通孔を設けた。貫通孔の開口寸法は模型寸法で縦3.8mm×横12.6mmの矩形形状とし、中心間距離25.2mmピッチでまくらぎ方向に16箇所配置した（図3）。なお、本試験ではホーンは取り付けしていない。

本試験における座標系を図4に示す。座標原点は、平滑化舟体を現用舟支え部に取り付けた場合の舟体中心位置とし、主流方向をx軸、鉛直方向をz軸、まくらぎ方向をy軸とした。以下、舟体位置を変更する試験では、座標原点からの舟体中心のx、z方向の相対変位量（ Δx , Δz ）を舟体のレール方向幅Lで無次元化した（ $\Delta x/L$, $\Delta z/L$ ）で舟体位置を表すこととする。この定義では、現用舟支え部に平滑化舟体を搭載した場合の舟体位置は（0, 0）となる。

PIVによる流速分布測定の測定断面には、まくらぎ方向中心断面（ $y/L=0$ ）を選定した。試験時には、供試体下方からx-z平面内にシートレーザーを照射して一つの試験条件につき300ペアの画像を取得し、そこから得られた瞬時流速分布を統計処理して乱れ度を算出した。

試験風速はトラバース装置の強度を考慮して10m/sとした。舟支え部のまくらぎ方向幅に基づいて算出した試

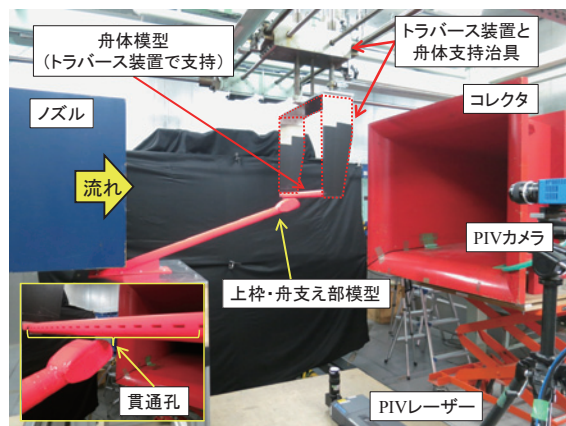


図3 風洞試験の実施状況（PIV）

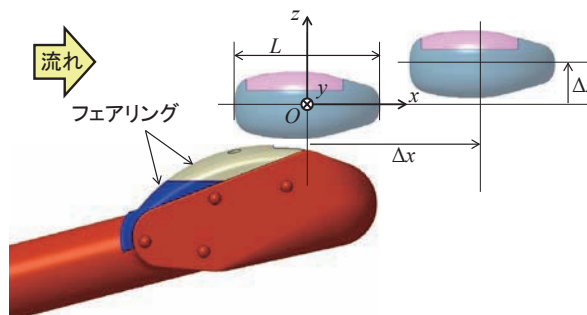


図4 座標系と舟体位置の定義

験時のレイノルズ数は 3.8×10^4 であり、3章の空力音測定におけるレイノルズ数の約 1/18 である。

2.2 PIVによる乱れ度分布測定結果

図5にPIVによって得られた舟体・舟支え部後流の乱れ度分布測定結果を示す。一般に、空力音は物体後流の渦の非定常運動に起因することから、本研究では空力音に関連する流速変動として、鉛直方向流速標準偏差 W_{RMS} に着目した。図5においては W_{RMS} を主流速 U_0 で除した W_{RMS}/U_0 を描画しており、以下、この値を単に乱れ度と呼ぶこととする。また、描画領域左上の赤色の領域は、下方から照射したレーザーが供試体に遮られて陰になり、流速分布が得られていない領域である。

以下、標準の舟体位置 (0, 0) の場合 (図5 (a)) を基準に、舟体位置を変更した場合の乱れ度分布の変化について考察する。舟体を上方にオフセットさせた舟体位置 (0, +0.93) の場合 (図5 (b)) においては、舟体・舟支え部後流の乱れ度は低減しておらず、舟体と舟支え部を単純に離すだけでは、後流の乱れ度を低減する効果は得られないことがわかる。一方、舟体を上流側にオフセットさせた舟体位置 (-1.2, 0) の場合 (図5 (c)) および下流側にオフセットさせた舟体位置 (+1.2, 0) の

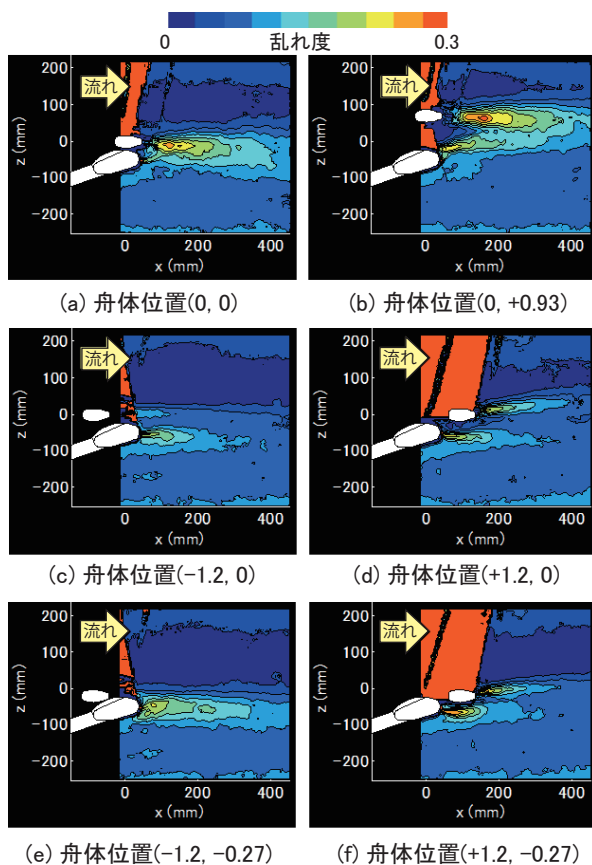


図5 PIVによって得られた乱れ度 W_{RMS}/U_0 の分布 (風速 10m/s, 各図の左上の赤色領域は乱れ度分布が取得できなかった領域)

場合 (図5 (d)) には、舟体・舟支え部の乱れ度の分布が変化し、乱れ度が大きな領域が縮小するとともに、乱れ度の大きさも低減している。一方、これらの状態からそれぞれ舟体を下方にオフセットさせた舟体位置 (-1.2, -0.27) の場合 (図5 (e)) および舟体位置 (+1.2, -0.27) の場合 (図5 (f)) の場合には、下方にオフセットさせていない図5 (c) (d) の場合と比べて乱れ度が大きくなっている。これらの結果から、舟体・舟支え部後流の乱れ度を低減するには、単に舟体と舟支え部とを離して設置するのではなく、図5 (c) (d) のように舟体まわりの流れと舟支え部まわりの流れが適切に干渉し、流れ場が整流されるような位置に舟体を設置することが重要であると推測される。なお、舟体・舟支え部後流の流れは三次元的な非定常流れ場となっていることから、図5に示した測定断面における乱れ度の評価結果のみから空力音低減にとって最適な舟体位置を選定することは適切ではなく、次章に示す空力音測定により舟体位置の検討を行った。

3. 空力音測定

舟体・舟支え部の流れ場測定結果を踏まえ、新幹線用実機パンタグラフおよび実物大平滑化舟体模型を供試体とした空力音測定を実施し、舟体位置変更による空力音低減効果を評価した。以下、試験の詳細について説明する。

3.1 試験方法

風洞試験は(公財)鉄道総合技術研究所の大型低騒音風洞(開放型計測部, 吹出口 $3\text{m} \times 2.5\text{m}$, 最大風速 111 m/s)において実施した。図6に風洞試験の実施状況を示す。供試体として、新幹線用実機パンタグラフをなびき条件で設置し、舟体を移設可能な舟支え金具を介して、平滑化舟体の模型を取り付けて試験に供した。舟体模型のまくらぎ方向長さは 920mm であり、貫通孔の開口寸法は縦 6mm × 横 20mm の矩形形状とし、中心間距離 40mm ピッチでまくらぎ方向に 20 箇所配置した。舟体

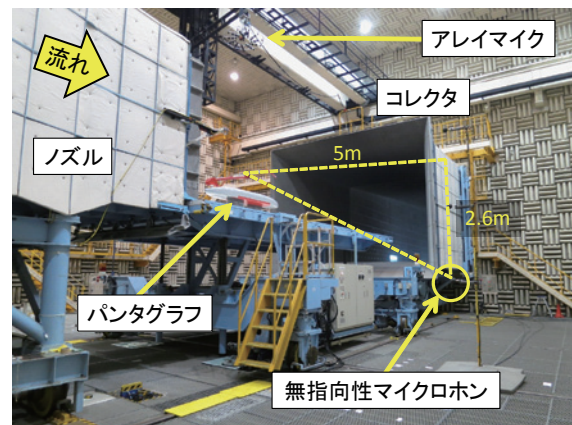


図6 空力音測定試験の実施状況

特集：鉄道力学

端部は後述する図8に示すような円弧形状を基本としたが、端部の形状を変更する試験も実施した。また、舟支え部の上流側上面には、形状を平滑化するフェアリング(図4参照)を取り付けた。試験風速は111m/s(400km/h)であり、舟支え部のまくらぎ方向幅に基づいて算出した試験時のレイノルズ数は 6.7×10^5 である。

空力音測定用無指向性マイクロホンのレール方向位置はパンタグラフの支持碍子のレール方向中心位置、まくらぎ方向位置は舟体中心(風路中心)から5m離れた位置、鉛直方向位置は舟体上面から2.6m下方位置とした(図6)。無指向性マイクロホンで収録した波形に対して1/3オクターブバンド周波数分析を実施し、A特性補正を施して騒音レベルを算出した。また、空力音測定と併せて、パンタグラフ上方からアレイマイクによる音源探査も実施した。ただし、音源探査の実施風速は100m/s(360km/h)とした。

3.2 舟体位置変更による空力音低減(ホーンなし)

はじめに、流れ場測定結果を踏まえて、舟体位置変更による空力音低減効果の把握を行った。図7に、舟体位置を変更した場合の騒音レベルオーバーオール値(以下、OA値と記す)の比較図を示す。なお、図7に示した結果は、次節以降で述べる試験とは、貫通孔も含め同一外形形状であるが別品の平滑化舟体模型を用い、かつ、別時期に実施した試験結果を掲載している。また、舟体・舟支え部からの空力音を評価し易いよう、ホーンは取り付けない状態で試験を実施した結果である。舟体・舟支え部の位置関係、舟支え金具形状については、図7に併記している形状図を参照されたい。

図7より、舟体位置を適切に選定することで、標準の舟体位置(0,0)と比べて空力音を低減できることがわかる。なお、舟体を上流側に移設したグループにおいて最もOA値が低減した条件は舟体位置(-1.2,0)であり、この結果は2章に示した乱れ度分布測定結果と一致する。一方、舟体を下流側に移設したグループにおいて最もOA値が低減した条件は舟体位置(+1.2,-0.27)であり、この結果は乱れ度分布測定結果とは一致しない。この要因としては、2.2節で述べたように舟体・舟支え部

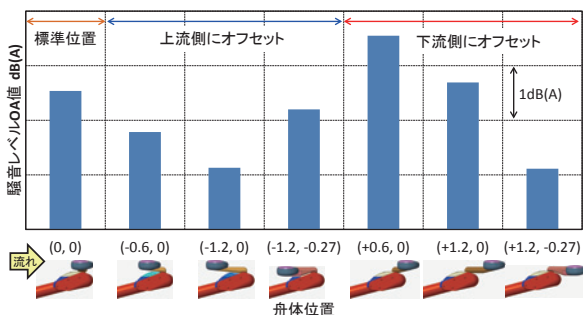


図7 舟体位置変更によるOA値の比較 (風速111m/s, ホーンなし)

後流が三次元的な流れ場であり、特定の測定断面における測定結果のみから評価を行うことが適切ではないことや、試験時のレイノルズ数の違いおよび舟支え金具の存在による影響が考えられる。

3.3 現用舟体・舟支え部との比較(ホーンなし)

前節の結果に基づき、大きな空力音低減効果が得られた舟体位置として舟体位置(-1.2,0)および舟体位置(+1.2,-0.27)を選定し、現用舟体・舟支え部(以下、現用品と記す)に対する空力音低減効果を評価した。図8に空力音の評価を行った試験条件一覧を示す。空力音の評価においては、上記の条件に加え、標準の舟体位置(0,0)(図8(b),以下、標準位置と記す)および標準位置において舟支え部上面から舟体前面部にかけての領域を大規模に平滑化した形状(図8(c),以下、完全平滑化と記す)、および舟体なしの場合(図8(f))についても試験を実施した。なお、本節においても、ホーンは取り付けない条件で試験を実施した。また、現用品および完

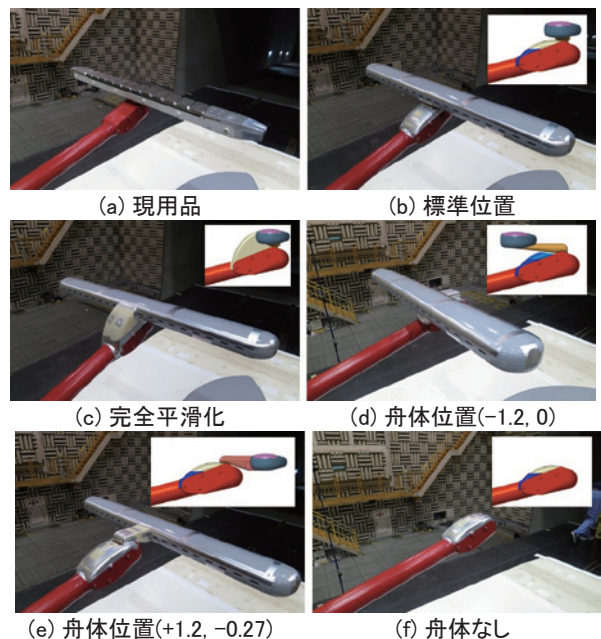


図8 舟体・舟支え部の供試体条件

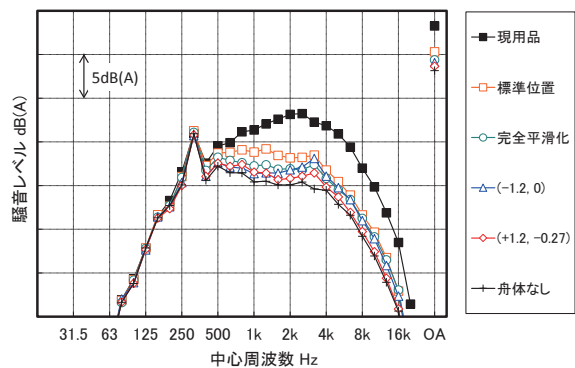


図9 現用品との空力音の比較 (風速111m/s, ホーンなし)

全平滑化以外の条件においては、舟支え部上面に図4に示したフェアリングを取り付けている。

図8に示した供試体条件の空力音の比較図を図9に示す。図9より、平滑化舟体を取り付けた場合（標準位置）には、現用品に対して500Hz以上の周波数帯で騒音レベルが顕著に低減し、OA値が3.0dB(A)減少している。標準位置に対し、完全平滑化、舟体位置(-1.2, 0)および舟体位置(+1.2, -0.27)については、500Hzから1.6kHzにかけての周波数帯において騒音レベルがさらに低減しており、現用品と比べるとOA値がそれぞれ3.9dB(A), 4.2dB(A), 4.6dB(A)減少している。このように、舟体位置を適切に選定することで、空力音を効果的に低減できること、また、舟体位置変更による空力音低減効果は、完全平滑化の場合よりも大きいことが確認できた。

3.4 ホーンの影響

前節に示した結果は全てホーンなしの場合の結果であったが、本試験で検討を進めた結果、平滑化舟体にホーンを取り付けると空力音が顕著に増加することが確認された。代表例として、図10に現用品と平滑化舟体（舟体位置は(+1.2, -0.27)）の2つの供試体条件において、ホーンの有無により空力音を比較した結果を示す。なお、ホー

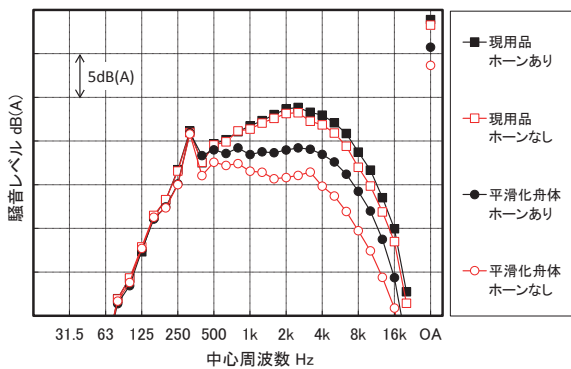


図10 ホーンの有無による空力音の比較
(風速 111m/s, 平滑化舟体の舟体位置 (+1.2, -0.27))

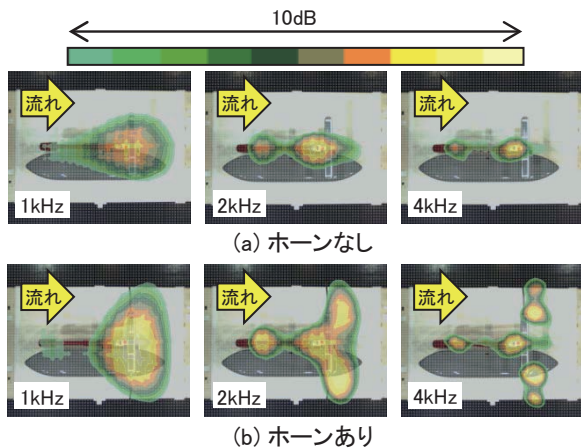


図11 ホーンの有無による音源分布の比較
(風速 100m/s, 平滑化舟体, 舟体位置 (+1.2, -0.27))

ンは貫通孔が設けられた実機のホーンを取り付けている。図10より、現用品については、ホーンを取り付けた場合の騒音レベルの増分が小さく、OA値の増加量も0.6dB(A)に留まっている。一方で、平滑化舟体の場合にはホーン取り付けにより騒音レベルが顕著に増加しており、OA値の増加量も2dB(A)と大きいことがわかる。

以上を踏まえ、図10に示した平滑化舟体の試験時の音源分布を比較した結果を図11に示す。図11より、ホーンを取り付けた場合、1kHz帯においては舟体全体の音源強度が大きくなる、すなわち、舟体端部の境界条件が変化したことで舟体から放射される空力音が増加したことが推測される。また、2kHz帯および4kHz帯においては、舟体とホーンの接合部付近の音源強度が大きくなっていることがわかる。これらの結果から、ホーンを取り付けた場合の空力音の増加要因は、ホーン自体からの放射音の影響だけではなく、ホーン取り付けにより舟体から放射される空力音が変化した影響、および、舟体とホーンの接合部付近から放射される空力音の影響が大きいことがわかった。上記の要因のうちどちらも、舟体端部の形状改良により空力音の増加量を抑制できる可能性が考えられたため、次節において検討を行った。

3.5 舟体端部の形状改良の効果

舟体端部の形状改良案として、図12(b)に示す直線切落し形状と、図12(c)に示す平滑化形状を設定し、これらの形状を再現するアタッチメントを舟体模型に取り付けて空力音測定を行った。舟体位置(+1.2, -0.27)、ホーンありの場合について、舟体端部形状を変更した場合の音源分布の比較を図13に、空力音の比較を図14に示す。なお、図13



図12 舟体端部の改良形状

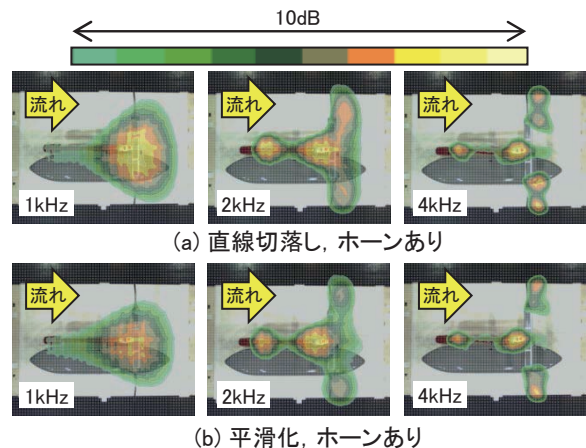


図13 舟体端部形状を変更した場合の音源分布の比較
(風速 100m/s, 平滑化舟体, 舟体位置 (+1.2, -0.27))

特集：鉄道力学

は図 11 と同一のレンジで音源分布を描画しており、舟体端部形状が標準の場合の音源分布は図 11 (b) である。

図 11 (b) および図 13 より、舟体端部形状を改良することで、1kHz 帯において舟体からの放射音が、2kHz 帯および 4kHz 帯においては、舟体とホーンの接合部近傍の音源強度がそれぞれ弱まっており、特に、平滑化形状の場合にその効果が大きいことが確認できる。また、図 14 からは、標準形状と比べて直線切落し形状では、400Hz から 1.6kHz にかけての周波数帯で、平滑化形状では、400Hz 以上の広い周波数帯にわたってそれぞれ騒音レベルが低減していることが確認できる。これらの結果、ホーン無しの場合に対するホーンありの場合の OA 値の増加量が、標準形状の場合は 2.1dB (A) であるのに対し、直線切落し形状では 1.5dB (A)、平滑化形状では 0.9dB (A) まで低減している。

以上より、舟体端部の形状改良により、ホーン取り付け時の空力音の増加を抑制できることを確認した。

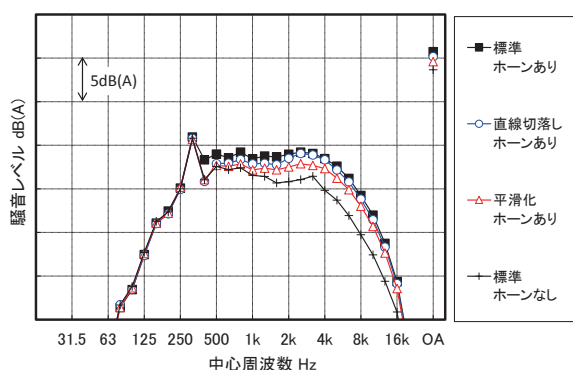


図 14 舟体端部形状を変更した場合の空力音の比較 (風速 111m/s, 平滑化舟体, 舟体位置 (+1.2, -0.27))

3.6 ホーンありの場合の空力音の比較

以上の結果を踏まえ、図 8 (b) ~ (e) に示した試験条件について、ホーン及び舟体端部の条件を、ホーンなし (舟体端部：標準)、ホーンあり (舟体端部：平滑化)、ホーンあり (舟体端部：標準) の 3 条件に変更した場合の OA 値を、現用品および舟体なしの場合とともに比較した結果を図 15 に示す。図 15 より、舟体端部の形状を標準形状から平滑化形状に変更することで、各試験条件におけるホーン取り付け時の OA 値の増加量を約 1dB (A)

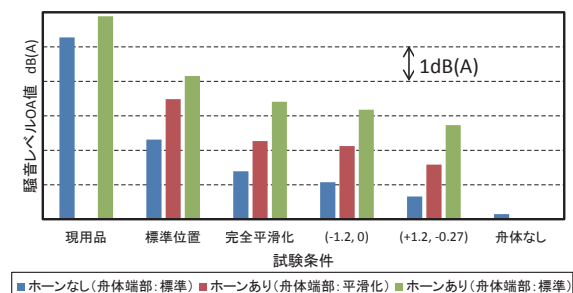


図 15 OA 値の比較図 (風速 111m/s)

低減できることがわかる。また、ホーンあり (舟体端部：平滑化) の条件下においては、現用品 (ホーンあり) に対する完全平滑化、舟体位置 (-1.2, 0) および舟体位置 (+1.2, -0.27) の OA 値の低減量は、それぞれ 3.6dB (A)、3.8dB (A)、4.3dB (A) となり、ホーンなしの場合の OA 値の低減量と同程度の低減量を得られることがわかる。

4. まとめ

本研究では、平滑化舟体を搭載したうえで、舟体・舟支え部の最適な相対位置関係を選定し、更なる空力音低減を実現することを目的として、風洞試験における流れ場測定および空力音測定の両面から検討を行った。その結果、以下のことがわかった。

- (1) 舟体位置を変更する場合、舟体と舟支え部を単に離すのではなく、舟体と舟支え部まわりの流れが適切に干渉する位置に舟体を設置することで、舟体後流の乱れ度が小さくなると推測される。
- (2) 平滑化舟体においては、ホーンを取り付けた場合に空力音が約 2dB 増加するが、舟体端部の形状を改良することで、ホーン取り付け時の空力音の増加量を約 1dB 低減できる。
- (3) 舟体端部の形状改良を行ったうえで、舟体を適切な位置に設置することで、ホーンありの条件下でも現用品と比べて約 4dB の空力音低減が可能である。これは、舟体・舟支え部を完全に平滑化した場合よりも大きな空力音低減効果である。

今後は、舟体位置変更による揚力特性への影響把握およびパンタグラフの機構を考慮した構成について検討を進めるとともに、CFD 解析により舟体位置変更によって空力音が低減するメカニズムの解明を進める予定である。

文献

- 1) 吉田和重, 鈴木昌弘 ほか, “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) 池田充, 小山達弥 ほか, “舟体と舟支えの空力干渉緩和によるパンタグラフ空力音の低減”, 鉄道総研報告, Vol. 20, No. 11, pp. 5-10, 2006
- 3) 光用剛, 池田充 ほか, “数値流体解析による舟体・枠組間の空力干渉の検討”, 鉄道総研報告, Vol. 23, No. 2, pp. 21-26, 2009
- 4) 池田充, 末木健之 ほか, “部材間干渉緩和と多孔質貼付によるパンタグラフ空力音低減”, 鉄道総研報告, Vol. 24, No. 4, pp. 43-48, 2010
- 5) 光用剛, 佐藤祐一 ほか, “舟体と舟支えの相対位置変更によるパンタグラフの空力音低減”, 第 26 回環境工学総合シンポジウム, 2016