

数値流体解析による舟体・枠組間の空力干渉の検討

光用 剛* 池田 充*

A Study on Aerodynamic Interference between a Panhead and an Articulated Frame by Applying CFD Technique

Takeshi MITSUMOJI Mitsuru IKEDA

To reduce aerodynamic noise generated by a pantograph, it is necessary not only to improve a panhead shape, but also to reduce interference between a panhead and an articulated frame. However, a detailed mechanism of the interference between them has not been clarified completely. Therefore, reduction of aerodynamic noise generated by the pantograph is still difficult. This paper clarifies vortex structures around the panhead and the articulated frame, and their interference mechanism by applying CFD technique.

キーワード：パンタグラフ，舟体，舟支え，枠組，騒音，空力音，空力干渉，CFD

1. はじめに

近年の新幹線の高速化に伴い、沿線騒音の低減がますます重要な課題となっている。新幹線車両から発生する騒音のうち、空力音についてはそのパワーが列車速度の6～8乗に比例するため¹⁾、高速走行時には転動音などの騒音に比べて空力音が卓越する。したがって、新幹線の高速化においては、車両から発生する空力音の低減が必須の課題となっている。新幹線車両の主要な空力音源のなかでも、パンタグラフについてはその寄与が大きく、今後より一層の空力音低減が望まれている。

現在、パンタグラフから発生する空力音は、主として舟体と呼ばれる架線と摺動する部材（図1）から発生していることが、風洞試験における音源探査結果などからわかっている²⁾。したがって、パンタグラフの空力音低減には、舟体の空力音低減が必要不可欠である。しかしながら、舟体は低騒音であるだけでなく、集電性能の要請から揚力特性の安定化（迎角変化やすり板摩耗による形状変化に対して揚力変化が小さいこと）もまた必須の要件である。一般に、空力音低減と揚力特性安定化はトレードオフの関係にあることが多く、両者の両立は容易ではない。そこで、鉄道総研では数値流体解析（CFD解析）と最適化手法を組み合わせた設計手法により、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を提案した³⁾。現用舟体と上記設計手法により得られた舟体（以下、改良舟体と呼ぶ）の断面形状を図2に示す。この改良舟体については、これまでに風洞模型を用いた各種風洞試験が実施され次の事柄が明らかとなっている。

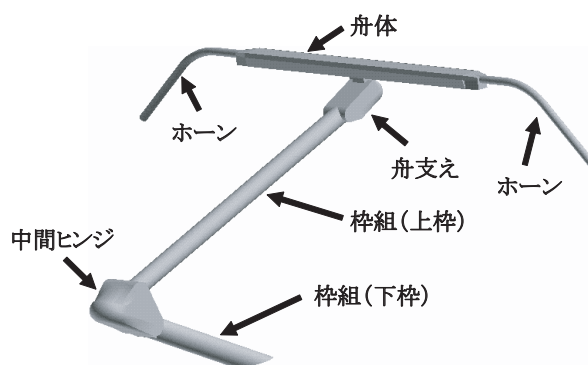


図1 パンタグラフ各部の名称

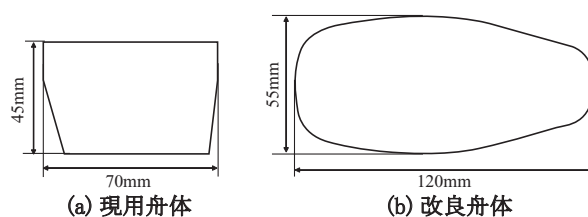


図2 現用舟体と改良舟体の断面形状

- (1) 改良舟体は現用舟体に比べ、舟体単体での空力音低減効果は大きい。
- (2) 改良舟体を実機パンタグラフに搭載した場合、舟体単体の試験ほどは空力音低減効果が得られない。

このなかで、特に(2)の原因については、主として舟体と舟支え（上枠に舟体を取り付ける部材）の接合部近傍における流れの干渉が原因であり、舟体と舟支えとの距離を離して流れの干渉を緩和することで空力音の低減が可能であることが示されている⁴⁾。しかしながら、舟体と舟支えの接合部近傍における流れの干渉の詳細なメカニズムについては未だ不明な点も多い。そこで、本稿

* 鉄道力学研究部（集電力学）

特集：鉄道力学

では数値流体解析 (CFD 解析) によりパンタグラフまわりの流れ場解析を実施し、舟体と舟支えの接合部近傍における流れの干渉のメカニズムの解明を行った。

2. 風洞試験による空力音測定結果

舟体や舟支えの形状改良により、空力音低減効果がどの程度得られるかを確認するため、風洞試験により空力音測定を実施した。風洞試験は、新幹線用実機シングルアーム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 (滋賀県米原市、回流型、開放型計測部、最高風速 400km/h、吹出口寸法：3m × 2.5m) において実施した。風洞試験の様子を図3に示す。供試体のうち、舟体については図2の現用舟体と改良舟体の2種類を、舟支えについては現用舟支えに加え、舟支え自体の形状を平滑化し、かつ舟体との距離を離れた形状の舟支え (以下、改良舟支えと呼ぶ) の2種類をそれぞれ組み合わせで試験に供した。図4に舟体と舟支えの組み合わせ図を示す。なお、改良舟体については騒音低減用の貫通孔³⁾を設けた条件で試験に供している。

風洞試験により得られた空力音のナローバンド分析結果を図5に示す。ただし、後述のCFD解析結果との比較のため、試験条件は風速 150km/h、パンタグラフ向きはなびき方向 (舟体に対して中間ヒンジが上流側に位置する向き) である。空力音の測定は舟体上方 5m の位置に設置した無指向性マイクで行った。

試験結果より、空力音のスペクトルは舟体種別により大きく異なっていることがわかる。現用舟体の場合、90Hz 近傍に舟体のエオルス音と思われるピークが存在しているのに対し、改良舟体 (ただし、貫通孔あり) の場合は明確なエオルス音は観測されていない。また、エオルス音以外の広い周波数帯についても、現用舟体に比べ改良舟体の方が音圧レベルが小さい。

各舟体形状について、舟支えの変更による騒音スペク

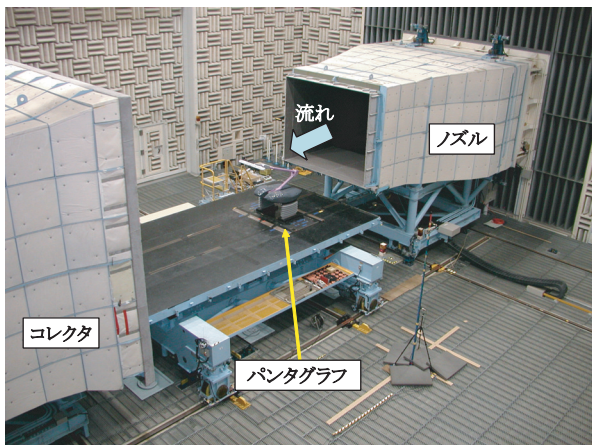


図3 風洞試験の様子

トルの変化をみると、次のようになる。現用舟体の場合、舟支えを現用舟支えから改良舟支えへと変更すると、舟体エオルス音やそれに近い周波数帯において音圧レベルがやや増加している。一方、改良舟体の場合、舟支えを現用舟支えから改良舟支えへと変更すると、400Hz から 2kHz の範囲の音圧レベルが減少している。以上のことから、舟支えの改良により現行舟体についてはエオルス音がより卓越し、改良舟体については 400Hz から 2kHz 程度の広帯域音が低減されることがわかる。なお、これらの傾向は 300km/h 程度の高風速になるほどより顕著に現れることが、風洞試験結果から分かっている。

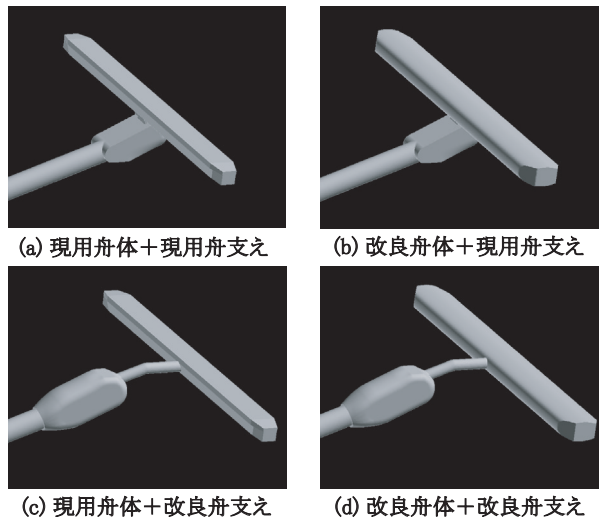


図4 舟体と舟支えの組み合わせ図

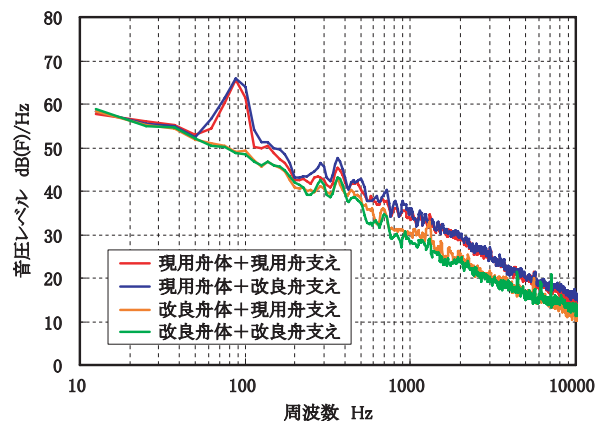


図5 空力音のナローバンド分析結果 (風洞試験)

3. CFD 解析による流れ場解析

上述の風洞試験結果をうけ、CFD解析によるパンタグラフまわりの流れ場解析を実施した。CFD解析を行った舟体と舟支えの組み合わせは図4に示した4通りであり、パンタグラフ向きはいずれもなびき方向とした。

流れ場の計算は汎用の流体解析ソルバである Fluent ver.6.3 を用いて、非圧縮粘性流体の支配方程式を有限体

積法で解くことにより実施した。本解析では、舟体と舟支えの接合部近傍の流れ場の解析を目的としたため、パンタグラフは枠組、舟支え、舟体のみで構成し、台枠やホーンは省略した。なお、改良舟体については貫通孔は設けていない。計算格子は、パンタグラフ近傍など形状が複雑な部分については格子生成が容易な四面体要素で、パンタグラフから離れた部分については少ない要素数で構成できる六面体要素で構成し、パンタグラフ近傍や後流領域に細かい計算要素を集中させることで計算精度と計算コストの両立を図った。本解析の計算要素数は、舟体と舟支えの組み合わせにより異なるが、約520万～750万要素である。

境界条件は、上流側境界については入口速度境界条件（流速150km/h）、下流側境界については出口圧力境界条件（ゲージ圧0Pa）、物体表面は滑りなし境界条件をそれぞれ適用し、それ以外の境界については対称境界（すべり境界）とした。図6に本解析の境界条件を示す。

流れ場の計算は、始めにRANS（乱流モデルはRealizable $k-\epsilon$ モデルを用いた）により定常流れ場を求め、次にそれを初期値としてLESにより非定常計算を実施した。LESにおけるSubgrid Scaleの渦粘性はSmagorinsky-Lillyモデルにより評価した。離散化精度は、時間、空間ともに二次精度とし、時間刻みは 1.0×10^{-4} sとした。なお、十分に乱流場となった流れ場の情報が得られるよう、LESにより得られた流れ場（2024ステップ）のうち最初の1000ステップを除いた流れ場に対して、瞬時場や統計量を抽出して各種検討を行った。

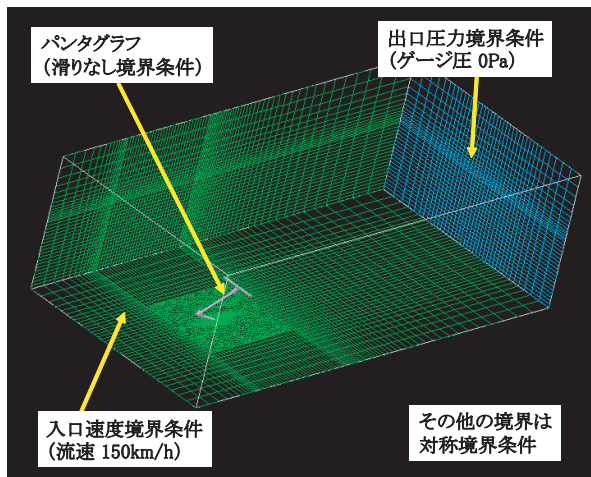


図6 CFD解析の境界条件

4. CFD解析結果と実験結果の比較

4.1 パンタグラフ後流の流速分布の比較

空力音は物体近傍における渦運動により生じるため、パンタグラフ近傍の流れ場のCFD解析結果が実験結果と符合する結果であるかを確認することは重要である。

そこで、CFD解析と風洞試験で得られたパンタグラフ後流の流速分布の比較を行った。舟体中心から200mm下流位置における、主流方向の時間平均流速（ただし、時間平均流速を主流速で無次元化している）と乱れ度（流速の標準偏差を主流速で無次元化したもの）の比較を図7、図8に示す。これらの図において、舟体と舟支えの組み合わせは現行舟体+現行舟支えである。また、風洞試験結果は鉄道総研大型低騒音風洞において、パンタグラフ後流の流速を熱線流速計により測定した結果である。

比較結果より、CFD解析結果と風洞試験結果は定量的には一致しない箇所もあるものの、流れの分布の様子は両者で概ね一致していると言える。したがって、本CFD解析結果は、風洞試験結果と定性的な傾向が一致した結果であることがわかる。

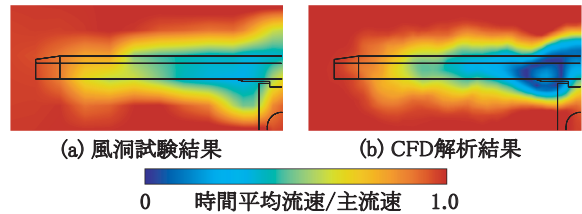


図7 パンタグラフ後流の時間平均流速の比較

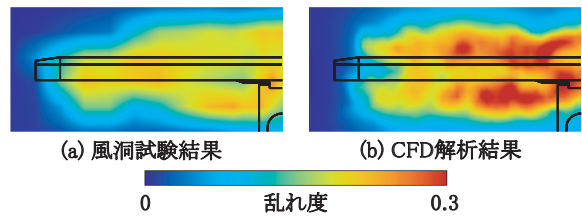


図8 パンタグラフ後流の乱れ度の比較

4.2 空力音の比較

LESにより得られた流れ場の情報から、パンタグラフから放射される空力音を計算し、ナローバンド周波数分析を実施した。空力音（二重極音）は、以下の式

$$p_a(\mathbf{x}, t) = \frac{1}{4\pi c_0} \cdot \frac{x_i}{|\mathbf{x}|^2} \int_S \frac{\partial p}{\partial t}(y, t - |\mathbf{x}|/c_0) n_i dy \quad (1)$$

により算出した。ここで、各記号はそれぞれ以下の物理量を表している。

- \mathbf{x} : 受音点の位置ベクトル
- \mathbf{y} : 音源領域の位置ベクトル
- t : 時刻
- p_a : 遠方場における音圧
- p : 圧力
- c_0 : 音速
- n_i : 物体表面の単位法線ベクトル
- S : 物体表面

式(1)はCurlの式⁵⁾を、音源領域が空力音の波長に比べて十分小さく（コンパクト）、かつ音源から受音点までの距離が空力音の波長に比べて十分大きいという二つ

特集：鉄道力学

の仮定のもとで近似して得られた式である。また、式(1)は無限に広い流体中に存在する物体から放射される空力音を表す式であり、本解析のように物体（下枠基部）が境界面（対称境界）と接している場合への適用には注意が必要である。ただし、本解析においては物体と接している境界は対称境界であり、境界面に対して鏡像となる仮想的な物体および流体領域を含めれば、流体中に存在する物体として解釈することが可能であると考えられる。したがって、本解析モデルから式(1)により計算された空力音は、鏡像物体から放射される空力音、すなわち対称境界面での音の反射を考慮せず、物体から放射される空力音のみを評価するものであると解釈される。

CFD解析から得られた空力音のナローバンド分析結果を図9に示す。空力音の受信点は、先述の風洞試験と同じく、舟体上方5mとした。また、ナローバンド周波数分析は、LESによる1024ステップ分の解析結果をオーバーラップを許容し512点ずつの8つのデータセットに分割し、それらのFFT処理結果をパワー平均することで算出した。

CFD解析結果（図9）を風洞試験結果（図5）と比較すると、以下のことがわかる。まず、舟体種別による空力音の傾向であるが、現用舟体については90Hz付近にエオルス音のピークが生じているなどスペクトル上の特徴が概ね一致している。改良舟体については、CFD解析結果は250Hz付近にエオルス音のピークが存在しているのに対し、風洞試験結果（図5）は明確なエオルス音のピークが存在していない。これは、騒音低減用の貫通孔の有無による影響であると考えらる。貫通孔が無い場合の改良舟体の空力音特性については、文献3)で舟体単体の風洞試験が実施されており、本CFD解析結果は文献3)の結果と同様の傾向を示していることを確認している。

次に、舟支え種別による空力音の傾向であるが、現用舟体搭載の場合、舟支えの改良によりエオルス音のピーク周波数やその近傍の周波数帯において音圧レベルが増加しており、風洞試験結果と同様の傾向が見られる。一

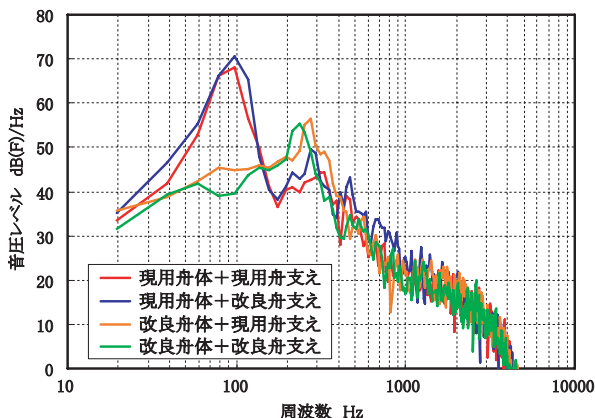


図9 空力音のナローバンド分析結果（CFD解析）

方、改良舟体搭載の場合は、舟支えの変更により風洞試験結果で見られたような400Hzから2kHzの音圧レベルの差異がCFD解析結果からは見られない。これは、400Hz以上の周波数帯では、空力音の波長がパンタグラフの大きさ（1m程度）よりも小さく、式(1)を導出する際のコンパクトの仮定が成り立たない領域であるためと考えられる。

以上の結果から、空力音の評価方法に起因する差異は生じたものの、空力音のスペクトルの傾向は、CFD解析結果と風洞試験結果とで概ね一致していると考えられる。

5. 渦構造の可視化

舟体と舟支えの接合部近傍の渦の構造について考察する。一般に、舟体後流に生じるカルマン渦などの大規模な渦については、渦の中心は流体に作用する遠心力とつりあうよう圧力が低くなっている。したがって、パンタグラフ近傍において負圧の等値面を描画することにより、渦の構造を可視化することができると考えられる。図10はLES解析で得られた瞬時場に対して圧力係数 $C_p = -0.8$ の等値面を描画したものである。また、等値面の色は乱れ度（LESにより得られた流れ場を統計処理して算出）を表しており、渦構造のなかで乱れ度が大きい部分は、非定常な渦であることを表している。

はじめに、舟体種別の影響が顕著にあらわれる改良舟支えの場合について、各舟体の渦構造について考察する。現用舟体については、舟体スパン方向に構造を持ったカルマン渦が顕著に生じている様子が確認できる（図10(c)）。一方、改良舟体（ただし、貫通孔は設けていない）については現用舟体のような強い渦構造は見られない（図10(d)）。実際には改良舟体後流にも渦構造が存在しているものの、渦の強度が現用舟体よりも弱いため、 $C_p = -0.8$ の閾値では渦が描画されていない。以上のことから、改良舟支えについては舟体単体の渦構造が顕著に現れるため、空力音についても舟体単体の特性が顕著に現れることが推察される。

次に、現用舟支えの場合の渦構造について考察する。まず、現用舟体については、舟体から生じたカルマン渦が、舟支えから生じた渦と干渉し、その後舟支え後流へと引き込まれることでカルマン渦のスパン方向の構造が崩壊している。したがって、現用舟体+現用舟支えの組み合わせにおいては、現用舟体+改良舟支えの場合に比べカルマン渦の成長が妨げられ、舟体から生じるエオルス音が低減されると推察される。一方、改良舟体については、舟体から生じるカルマン渦の強度が弱まったかわりに、舟支えから生じた渦が後流領域に広がっている。したがって、改良舟体+現用舟支えの組み合わせにおいては、舟支えから生じた細かい渦そのものが音源となり、

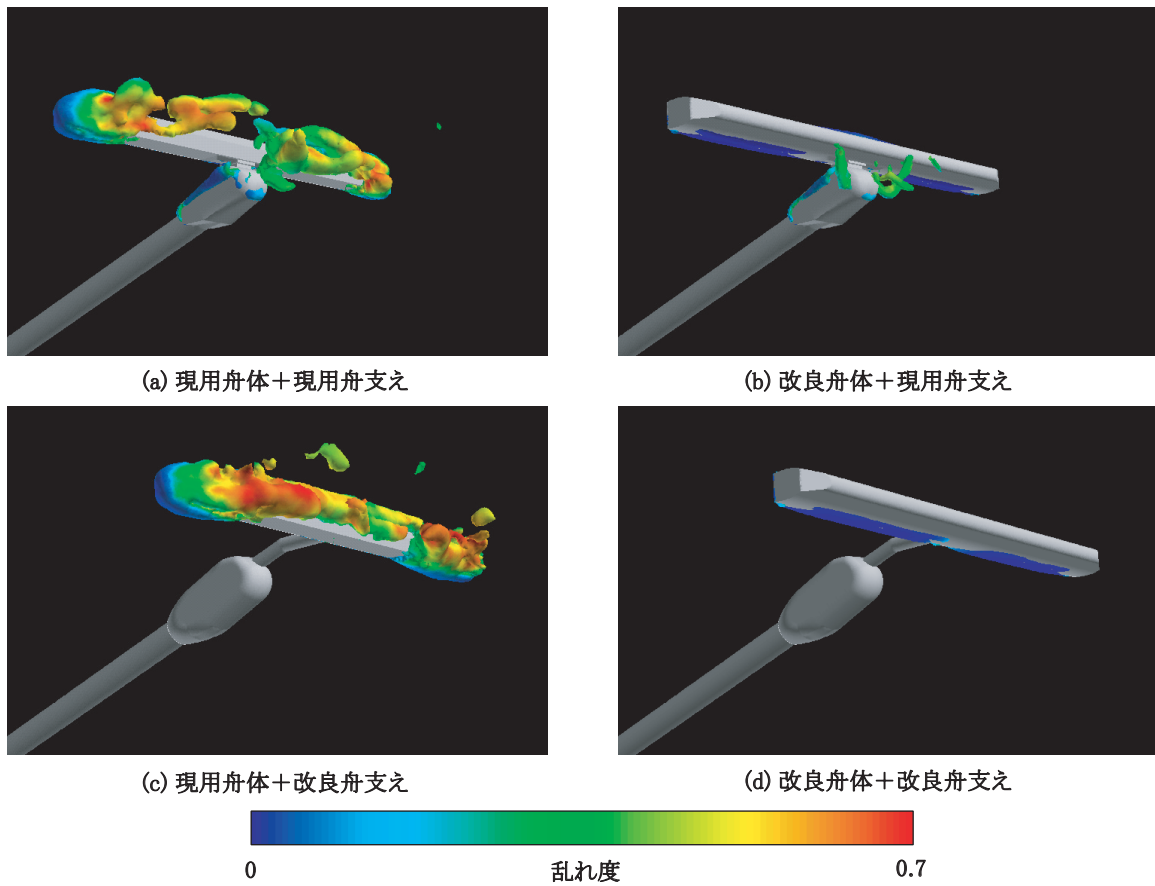


図10 パンタグラフ後流の渦構造（瞬時場）

比較的高い周波数帯の騒音源になっていると推察される。

6. 音源構造の可視化

舟体後流の音源構造について考察する。本解析では、音源としてPowellの音源項を用いて評価を行うこととする。Powellの音源項は、非圧縮粘性流体の支配方程式（連続の式とNavier-Stokes方程式）を、高レイノルズ数かつ低マッハ数のもとで近似してして導出した音波の波動方程式⁶⁾

$$\left(\frac{1}{c_0} \frac{\partial^2}{\partial t^2} - \nabla^2 \right) \left(\frac{p_a}{\rho_0} \right) = \text{div}(\boldsymbol{\omega} \times \boldsymbol{u}) \quad (2)$$

の右辺に現れる項である。ここで、 ρ_0 は静止状態の空気密度、 \boldsymbol{u} は流速、 $\boldsymbol{\omega}$ は渦度である。Powellの音源項は波動方程式の音源項を表すものであり、遠方場へ伝播する音との直接的な関係を示すものではない。しかしながら、音源の空間的な分布を捉えるには有効な手段であると考えられる。

まず、舟体種別による音源構造の違いを見るため、舟体中心から枕木方向に250mm離れた位置における音源分布を図11に示す。両者ともに、舟体表面から下流にかけて正と負の音源が分布しているが、空力音として伝搬するのはその非定常な成分である。図11より、現用舟体

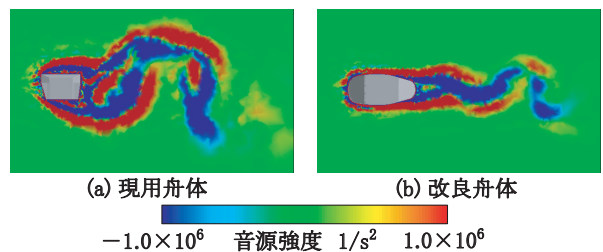


図11 舟体まわりの音源構造（Powellの音源項の瞬時場）

に比べ改良舟体の方が下流側での音源の揺らぎが小さく、非定常な変動が小さいことがわかる。

次に、舟支えの違いによる音源構造への影響を見るため、舟体後縁部から50mm下流位置における音源分布を上流側から見た図を図12に示す。舟支え近傍の音源構造に注目すると、改良舟支えの場合には、舟支え近傍における音源構造の変化が小さい。一方、現用舟支えの場合には、舟支え近傍でスパン方向の音源構造が崩れている。現用舟体+現用舟支えの組み合わせについては、スパン方向の音源構造が崩れることで、舟体のエオルス音が低減されることが推察される。改良舟体+現用舟支えの組み合わせについては、スパン方向の音源構造が崩れるだけでなく、舟体から生じた音源構造とは異なる音源構造が舟支え近傍に現れており、舟支えそのものから空

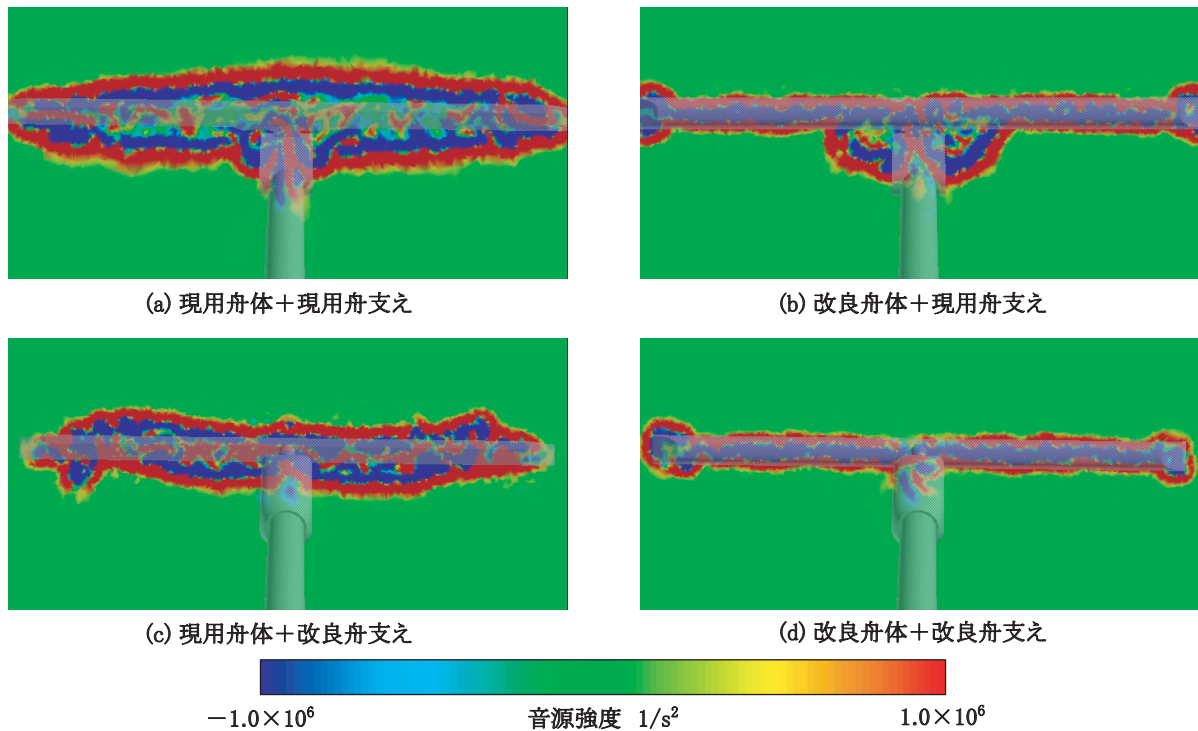


図 12 パンタグラフ後流の音源構造 (Powell の音源項の瞬時場)

力音が生じていることが推察される。

7. まとめ

本論文ではCFD解析により、舟体と舟支え接合部近傍における渦構造および音源構造を解析した。その結果、次のことが明らかとなった。

- (1) 現用舟支えについては、舟支えから渦が生じ舟体後流と干渉する。この渦が舟体後流へ及ぼす影響は搭載舟体により異なる。
- (2) 現用舟体+現用舟支えの場合、舟支えから生じた渦が舟体後流のカルマン渦と干渉し、カルマン渦を舟支え背後へと引き込むことで、カルマン渦のスパン方向の渦構造が崩壊しエオルス音が低減される。
- (3) 改良舟体+現用舟支えの場合、舟体後流のカルマン渦の強度が弱まる代わりに、舟支えから生じる渦が後流領域に顕著に広がり、この渦自体が空力音源となる。
- (4) 改良舟支えの場合、舟支えから生じる渦が低減されるとともに舟体との距離が離れるため、現用舟体については舟体から生じるカルマン渦が卓越し、改良舟体については強い渦構造が生じなくなる。

謝 辞

本研究の実施にあたり、元 東京農工大学修士2年の花房裕吾氏 (現 ダイハツ工業株式会社) の多大なご助力を頂いた。ここに謝意を表す。

文 献

- 1) Lighthill, M.J., "On sound generated aerodynamically. 1 General Theory," Proc. Roy. Soc., A211, pp.546-587, 1952.
- 2) 山崎, 長倉, 池田: 2次元マイクロホンをを用いたパンタグラフの音源探査, 鉄道総研報告, Vol.17, No.11, pp.1-6, 2003
- 3) 吉田, 鈴木, 池田: 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
- 4) 池田, 小山, 鈴木: 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
- 5) Curle, N., "The influence of solid boundaries upon aerodynamic sound," Proc. Roy. Soc., A231, pp505-514, 1955.
- 6) Howe, M. S.: Theory of Vortex Sound, Cambridge University Press, 2003.
- 7) 花房, 池田, 鈴木: 高速用パンタグラフにおける空力干渉部の流れ場のCFD解析, 第13回 鉄道技術連合シンポジウム 2006