

数値シミュレーションによる次世代高速新幹線用低騒音 パンタグラフの開発

プロジェクト責任者

栗田 健 東日本旅客鉄道株式会社 JR 東日本研究開発センター

著 者

水島 文夫*¹、栗田 健*¹、山出 吉伸*²、加藤 千幸*²、上原 均*³、廣川 雄一*³

* 1 東日本旅客鉄道株式会社 JR 東日本研究開発センター

* 2 国立大学法人 東京大学 生産技術研究所

* 3 独立行政法人海洋研究開発機構 計算システム計画・運用部

利用施設： 独立行政法人海洋研究開発機構 地球シミュレータ

利用期間： 平成 20 年 4 月 1 日～平成 21 年 3 月 31 日

アブストラクト

新幹線の主要な音源であるパンタグラフから発生する空力騒音低減のため、主要な音源部位である舟体周りについて、LES による乱流数値シミュレーションを行った。その結果、舟体がつくる乱れた流れと舟支えカバー表面との干渉が騒音発生メカニズムになっていることがわかり、得られた知見から、今後の低騒音化の指針を取得する事ができた。また、パンタグラフ全体の解析も行い、音源部位を特定した。

キーワード： 空力騒音、新幹線、パンタグラフ、LES、テトラメッシュ、大規模解析

1. はじめに

新幹線の高速化実現のためには、速度の約 6 乗に比例して増大する空力騒音の低減が非常に重要な課題である。新幹線の主要な空力音源は、パンタグラフ、車間部、台車部などであるが、その中でもパンタグラフは特に大きい音源である。JR 東日本では、PS9037 型・PS9038 型の 2 種類の低騒音パンタグラフを開発して、新幹線高速試験電車 FASTECH360 で試験・評価を行った [1][2]。新型の低騒音パンタグラフは従来品より低騒音化がなされているが、パンタグラフの空力音は依然として重要な課題であり、更なる騒音低減が求められている。

パンタグラフの低騒音化は、これまで、風洞実験など実験を中心とした開発を行ってきた。しかし、従来の実験や計測による手法は、音の測定はできるが、流体中の音源そのものの解明は困難で、騒音低減は試行錯誤に拠るところが大きい。今後の更なる低騒音化のためのブレイクスルーには、騒音の発生メカニズムそのものを突き止め、解決する必要がある。現在、CFD による非定常乱流の解析が、これらの問題を解決する有効なツールとして期待されている。

2008 年度までの研究では、空力音源の一つである車間部を対象に、Large Eddy Simulation (LES) による非定常乱流の計算を行った。地球シミュレータを使用した 1 億 5000 万格子点規模の解析の結果、

高周波音の音源となる微小な渦の挙動まで解析することができ、大規模 LES 解析による空力騒音源の解析手法の有効性を実証することができた [3][4]。

本年度は、新幹線車両の中で最も強い空力音源であるパンタグラフを対象とし、本手法を適用した空力騒音源の解析を行った。パンタグラフは、車間部よりも複雑形状を有しており、このような複雑形状を対象にした大規模非定常乱流シミュレーションは、あらたな取組みである。

2. 円柱形状による基礎検証

本研究では、複雑な形状を有する多分割すり板を搭載した舟体周りの解析を行うため、2008 年度までの解析で使用していた Front Flow/Blue の 6 面体要素用解析コード les3c ではなく、4 面体要素（テトラメッシュ）を用いた解析が可能な計算コード les3ct を用いる。テトラメッシュは、複雑な形状周りのメッシュ作成がしやすいという利点があるが、6 面体コードよりも空間微分を求める際の精度が劣る特性がある。そのため、計算の安定のために BTD 項を追加するなど、計算スキームの一部を変更している [5]。そこで、テトラメッシュでの解析精度を検討するため、まず、円柱の LES 解析を行った。

2.1 円柱周りの計算条件

解析対象は、円柱および間欠穴あき円柱とした。間欠穴あき円柱は、パンタグラフのホーンに使用されている形状で、カルマン渦によるピーク音が抑制されることが知られている。解析領域と円柱の形状を図 1 に示す。スパン方向は周期境界を与えることにした。計算結果は、高石らの測定した風洞実験（円柱直径 $D=50\text{mm}$ 、流速 $U=150\text{km/h}$ ） [6] の結果と比較検証する。格子解像度は、表面近傍のテトラメッシュの要素サイズを $1/100D$ 程度（ 0.5mm 程度）のスケールとした。

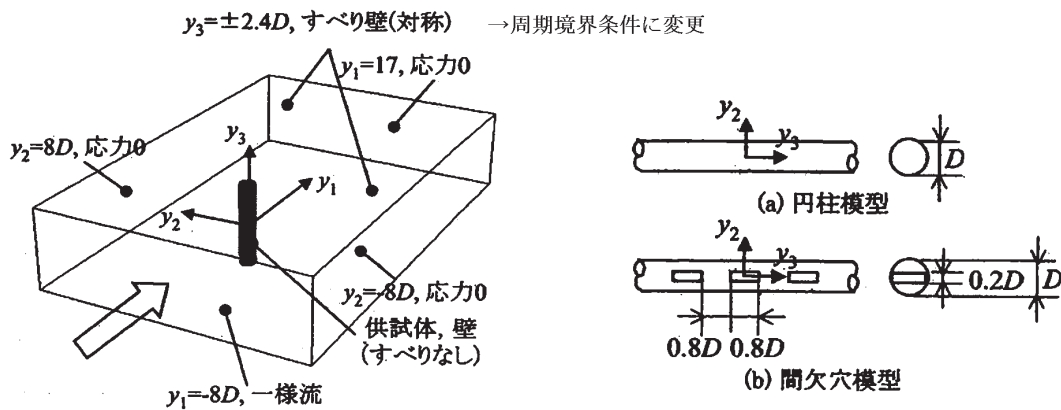


図 1 円柱周りの流れの解析モデル（円柱および間欠穴あき円柱）

解析結果を図 2、図 3 に示す。穴無しの円柱では、カルマン渦の生成により円柱後流に乱れ度の大きい領域ができるが、間欠穴のある円柱では、中心をジェットが吹き抜けることでカルマン渦の生成が抑制される現象が再現されている。円柱表面の静圧を見ると、全体的には実験結果とほぼ一致しているが、Angle 80° 付近は、実験と LES の結果に違いが見られる。これは、流れが層流から乱流に遷移する現象が計算で再現できていないためである。テトラコードは境界層の遷移の解析には適していないが、大きな剥離を伴う現象は解析が可能であるとの見通しを得た。

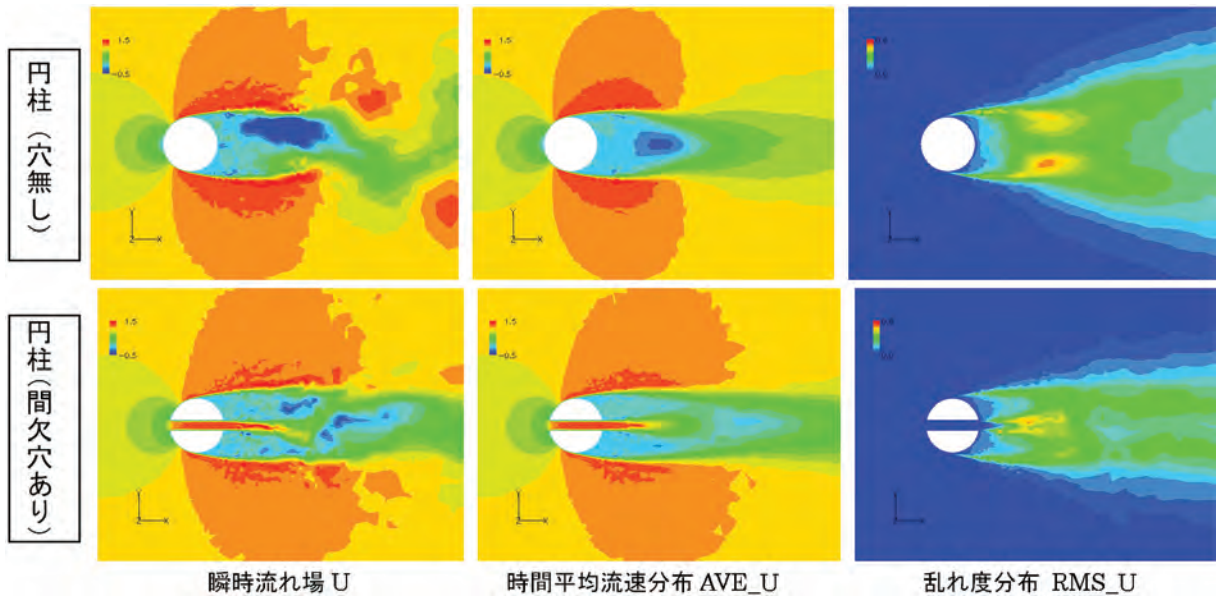


図2 円柱周りの流れの流速分布と乱れ度分布 (左: 穴無し、右: 間欠穴あり)

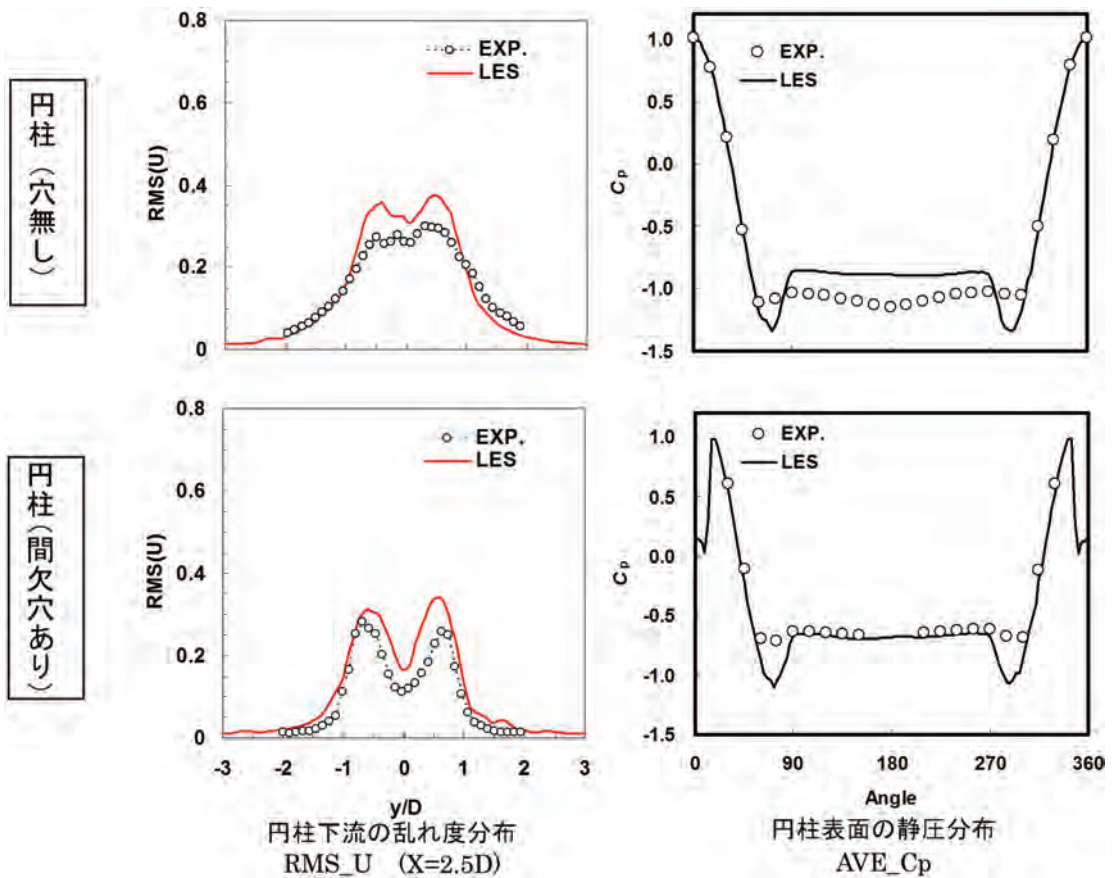


図3 円柱下流の乱れ度 (左) と表面静圧分 (右)

穴有り と穴無しの円柱から発生する騒音のスペクトルを、LES 解析結果から Curle の式で予測した結果と、風洞実験で得られた結果を比較し、図4に示す。計算結果と実験結果を見比べると、ピーク音の発生については、定性的にも定量的にも再現されており、高周波広帯域音のレベルも、500Hz程度までは正しく解析できている。一方、1kHz以上の高い周波数帯については、微細な渦を解像でき

ていないため、計算結果のほうが騒音レベルが小さくなっている。本解析では円柱近傍に 0.5mm 程度のテトラメッシュを用いた。円柱の解析は、実験、計算とも流速を現車の約半分 (150km/h) 円柱直径はパンタグラフホーンの 2 倍としており、同程度の格子解像度の計算を、現車スケールのパンタグラフで行った場合には、周波数解像度は 500Hz の約 4 倍、2000Hz 程度まで現象を再現できるとの見通しを得た。

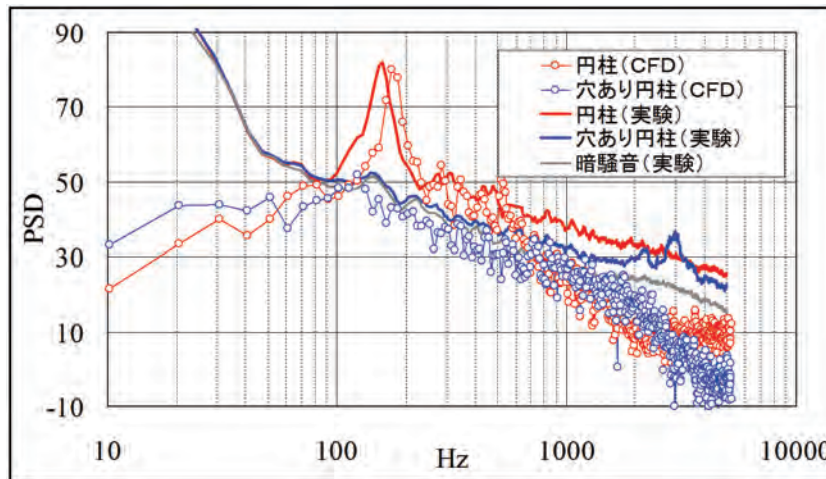


図4 Curle の式で予測した騒音スペクトルと風洞実験結果 (穴あり・無し)

3. 舟体周りの解析

本研究では、FASTECH で用いている多分割すり板を搭載したパンタグラフ舟体周りの流れを対象に解析を行うこととした。多分割すり板は、12 枚のピースに分割したすり板を使用し、架線に対する追随性を良くするため、内部にバネが入った構造となっている。本解析では、この複雑な形状周りの流れをできる限り忠実に再現することにした。

計算モデルは、格子で再現可能な約 2mm 程度のスケールの形状まで計算モデルでも再現させることを念頭に、モデルの簡素化を行った。実際の多分割すり板には、舟とすり板の間にスリット状の穴があり、内部の空洞を流れが通過できる構造になっており、本解析でもその形状を再現した。ただし、内部のバネについては省略した。モデル形状を図 5 に示す。

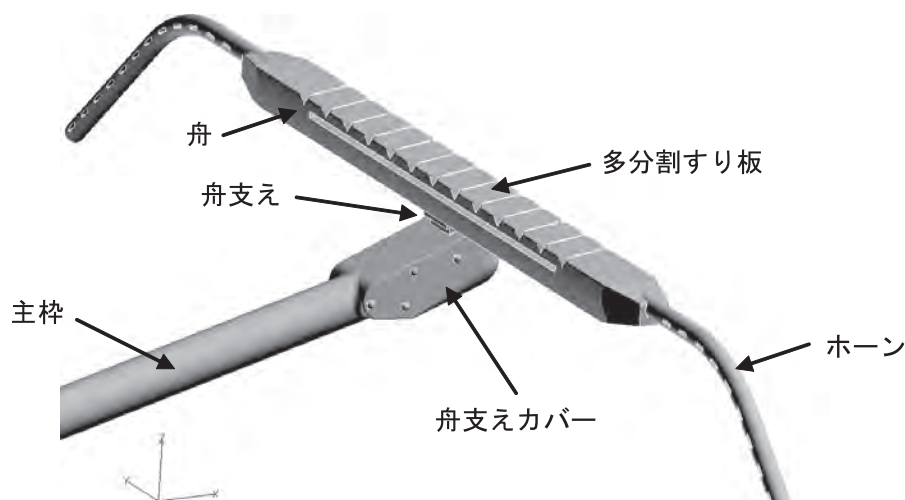


図5 パンタグラフ舟体まわりの形状 (多分割すり板)

3.1 舟体周りの計算条件

本解析の計算モデルとして、主流方向をX、パンタグラフスパン方向をY、鉛直上方をZとした。本モデルの計算領域は6m × 3m × 1.2mとした（図6）。



図6 舟体周りの計算領域

本解析では、現実的な総格子点数とするため、格子スケールを表面近傍1mmとした。穴あき円柱の基礎解析では、0.5mmスケールで現車換算2000Hz程度まで解析できたことから、1mmメッシュでも1000Hz程度までは定量的な解析が可能との見通しのもとに格子を設計した。

舟支え周辺のメッシュ分割の様子を図7に示す。格子は、パンタグラフ表面を1mm、外側を30mmの解像度で分割した。格子生成ソフトGambitを用いた格子生成では、表面から離れるに従い、格子のストレッチの調整が可能であることから、表面の解像度を上げて要素数をそれほど増大させずに格子生成を行えた。格子点数は、要素数約6800万点、接点数約1200万点である。

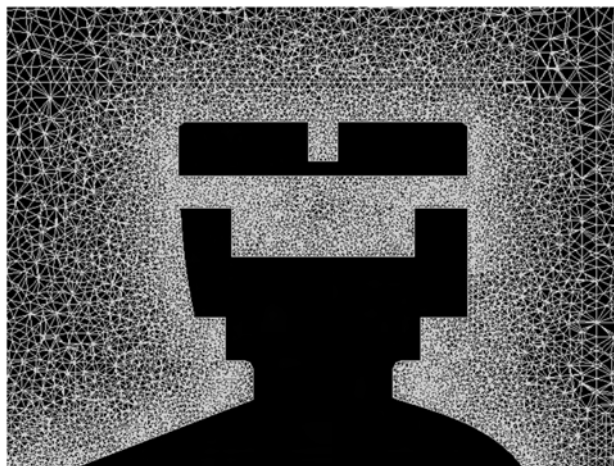


図7 舟支え周辺のメッシュ分割

3.2 舟体周りの解析結果

図8に、Curleの式で予測した騒音のスペクトルを示す。200Hz付近に見られるピークは、角柱形状の舟体によって生じるカルマン渦によるものと推定される。また、騒音として問題となる高周波広帯域音も解析できた。

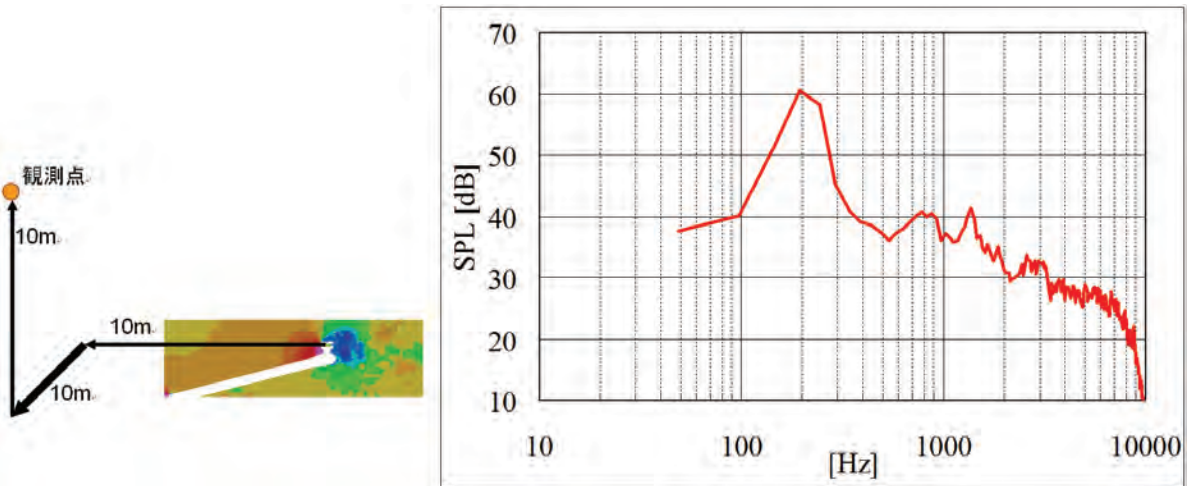


図8 音の観測点と Curle の式で予測した騒音のスペクトル

表面圧力変動分布を図9に示す。解析の結果、舟支えカバーの表面に、音源となる圧力変動の大きい領域が存在する事がわかった。

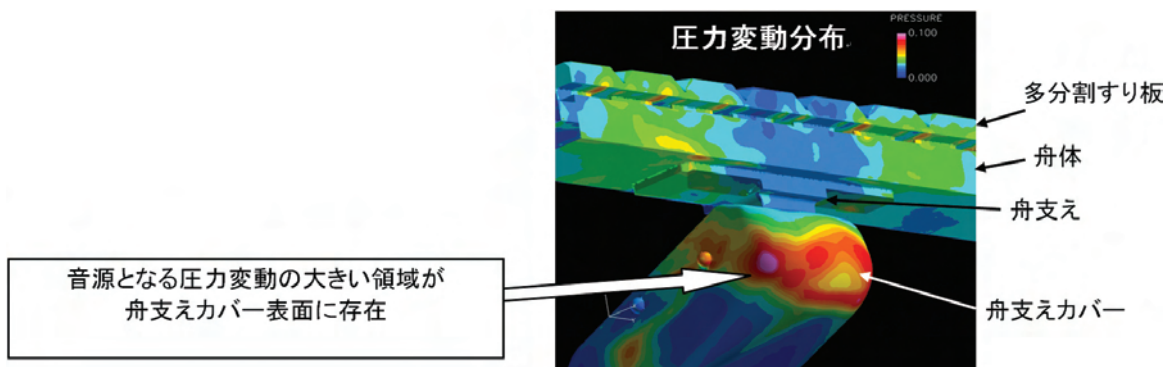


図9 舟体表面の圧力変動分布

舟支えカバー表面に、局所的な大きな圧力変動が発生する原因を調べるため、変動流速分布の解析を行った。変動流速分布を図10に示す。解析の結果、舟体がつくる乱れた流れが舟支えカバー表面と干渉する部位が音源となっていることがわかった。

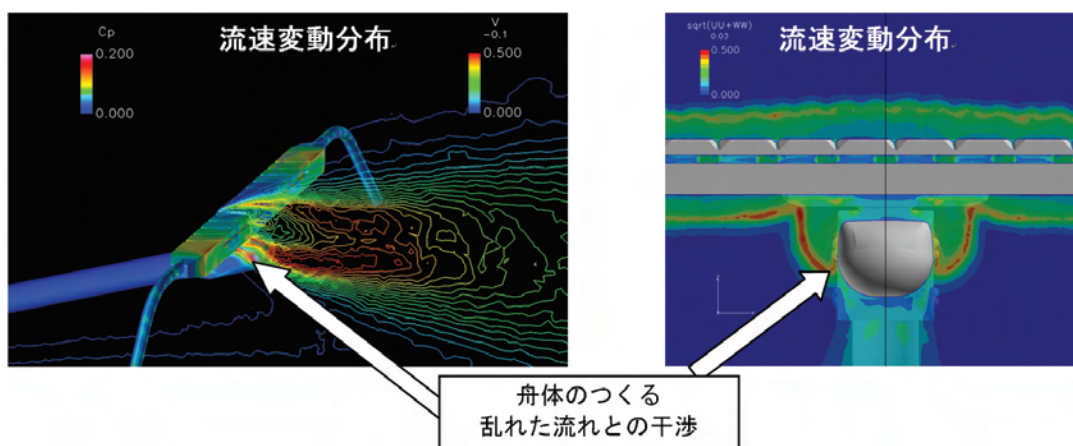


図10 舟体周りの流速変動分布

3.3 騒音低減の指針を得るためのCFD 解析

舟体の存在により形成される渦と、舟支えカバーとが干渉する流れによって、舟支えカバー表面に強い音源が存在していることがわかった。そこで、改善案として、舟支えの長さを伸ばし、舟体と舟支えカバーの距離を離して、舟体の作る剥離流と舟支えカバーとの干渉を避ける方法を試みる。表面圧力変動 (RMS_P) の分布を、図 11 に示す。舟支えの短い通常形状と、舟支えを伸ばした改善形状案を比較すると、舟支えカバーの側面の局所的な圧力変動は緩和されている。

今後は、本研究で示した騒音低減策の方向性をもとに、製品として実用可能な形状に向けて更なる研究を行う。また、騒音の低減量の評価については、別途、音響解析を行う必要がある。流体力の変動を Curle の式の音源とする予測手法では、遠方場の観測点に対する音響回折効果が正しく反映されないため、音響評価手法の確立も今後の課題である。

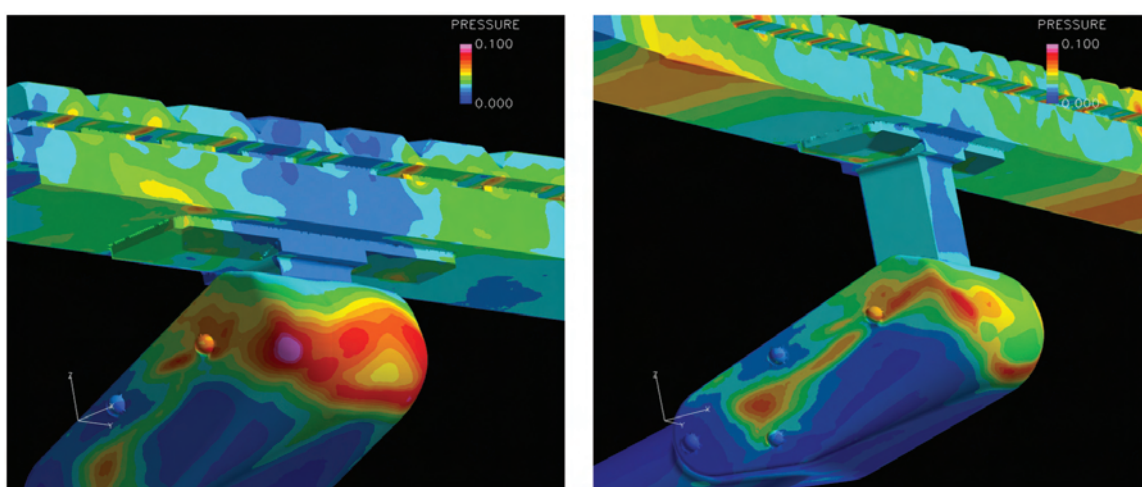


図 11 表面圧力変動 (RMS_Cp) 分布 (左：通常形状 右：舟支えを伸ばした改善案)

4. パンタグラフ全体の解析

舟体周りの解析で、複雑形状を対象とする LES 解析のめどをつけることができた。そこで、パンタグラフ全体の解析を追加して実施することにした。対象とするパンタグラフは現行営業車両で使用している PS207 型パンタグラフと、試験車両に搭載した低騒音パンタグラフである PS9037 型、PS9038 型の、3 型式のパンタグラフである。解析はテトラメッシュを用いて、表面近傍は約 2mm の格子サイズで行った。解析モデルを図 12 に示す。

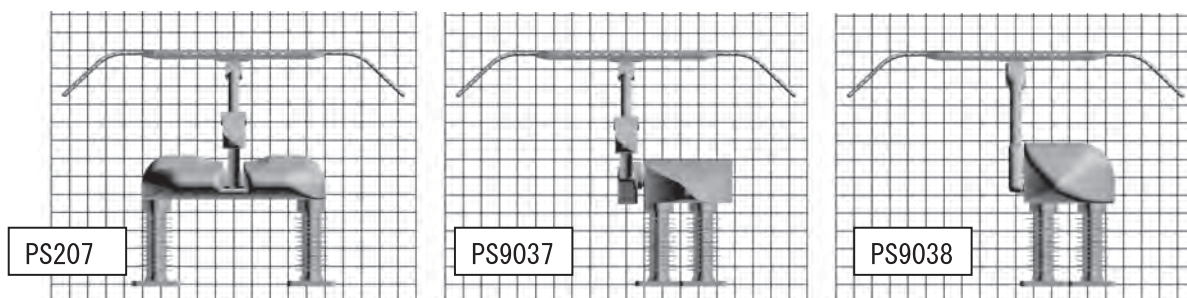


図 12 パンタグラフ全体の解析モデル

4.1 パンタグラフ全体の解析結果

パンタグラフ全体の LES 解析を行った。流れ場が十分発達した後に、サンプリングを行い、時間平均流れ場および変動流れ場と、物体表面圧力変動の時系列データを取得した。

PS207 型パンタグラフの、変動流速分布と表面圧力変動分布を図 13 に示す。解析の結果、乱れの大きい領域は、舟体付近、中間ヒンジカバー付近、および、主樑の付け根部分と風防カバーの後ろ側に存在することがわかった。この 3 箇所の音源部位は、風洞実験による音源部位と一致しており、風洞実験よりも詳細な音源部位の情報を取得できた。

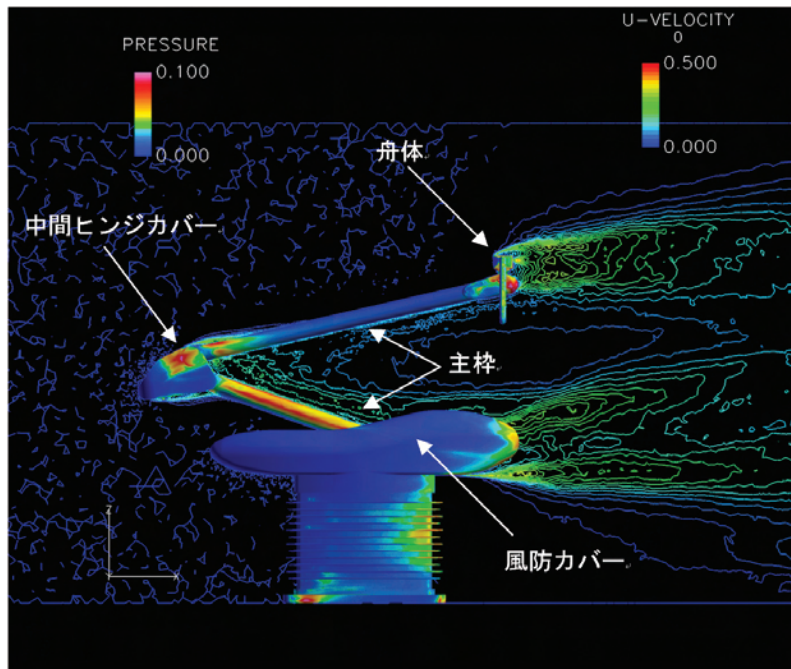


図 13 変動流速分布 (PS207 型パンタグラフ)

3 形式のパンタグラフの、表面圧力変動分布を、図 14 に示す。PS207 型パンタグラフは、風防カバーの後ろ側に圧力変動の大きい部分が存在するが、PS9037・PS9038 型パンタグラフでは風防カバーの形状を変更することで圧力変動が緩和されている。

また、PS207 型・PS9037 型パンタグラフでは中間ヒンジカバー部が音源となっているが、主樑の形状を変更した PS9038 型パンタグラフは、主樑部の音源が解消できていることが確認できた。

今後の更なる低騒音化のためには、舟体周辺や、主樑の付け根部分など、残りの音源部位の対策が必要である。

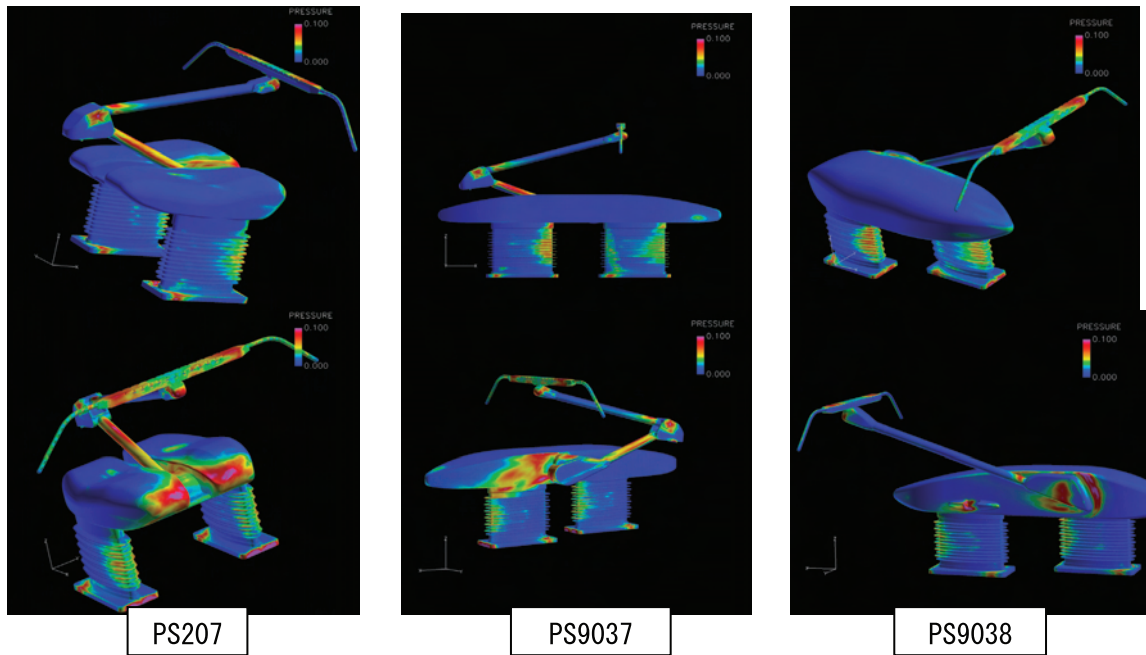


図 14 表面圧力変動分布 (パンタグラフ全体・3形式)

4.2 スペクトルの比較

Curle の式で予測した騒音のスペクトルを、1/3 オクターブバンド処理し、A特性の聴感補正をした結果を図 15 に示す。観測点は舟体中央より、前方 10m、横 10m の位置である。ここでは、PS207 型パンタグラフと、PS9037 型パンタグラフのスペクトルの比較を行っているが、PS9037 型パンタグラフの方が広い周波数帯域での低騒音化されており、オーバーオール (O.A.) 値で比較すると約 2dB の騒音低減効果が得られた。PS9038 型パンタグラフも、ほぼ同様の結果であった。

なお、本研究で用いた音の計算は、物体表面に働く流体力を点音源とし、自由音場を仮定した Curle の式で行っている。そのため、物体形状による回折や遮音効果など音響効果は考慮されていない。今後、より定量的な騒音レベルの検討を行うためには、音響計算が必要である。

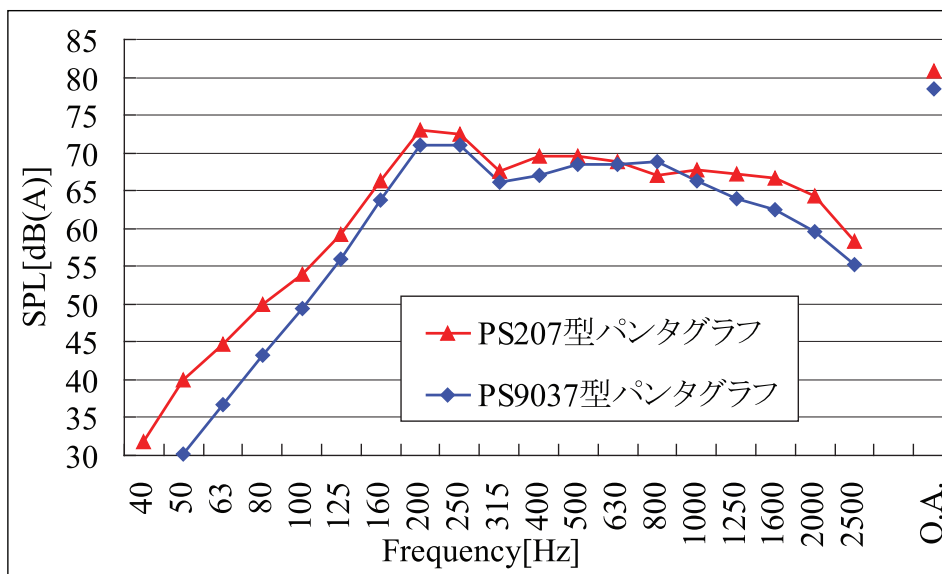


図 15 Curle の式で予測したパンタグラフ全体の騒音 (1/3 オクターブ・A特性)

結 論

パンタグラフから発生する空力騒音の音源解明を目的として、非定常乱流のCFDを行った。

解析対象は、パンタグラフの主要な音源である、舟体周りを対象として解析を行った。パンタグラフの舟体は、多分割すり板を搭載した複雑形状であり、本研究では、複雑な製品形状を対象とした格子作成を考え、四面体要素を用いたLES解析コードを使用した。

まず、円柱の基礎形状を用いた解析で、コードの性能確認と、パラメータ設定のノウハウを確立した。次に、舟体周りのLES解析を行い、音源部位の特定を行った。その結果、舟支えカバー部分に音源が存在することがわかった。この結果は、これまでは理解されていなかった事柄であり、解析の結果、舟体を作る剥離流れの乱れた流れが舟支えカバー部分と干渉して、圧力変動を引き起こしているという現象が確認された。

さらに、騒音低減の試みとして、舟支えを伸ばした解析を行った。解析の結果、舟支えカバー表面の圧力変動の緩和が確認された。得られた指針を元に研究を重ね、製品化可能な形状を検討したい。

また、舟体周りの解析で、複雑形状の解析の見通しが得られたことから、パンタグラフ全体の解析を追加して実施した。対象とするパンタグラフ3体について解析を行った結果、現行営業車に搭載しているPS207型と比較し、試験車両で用いているPS9037・PS9038型パンタグラフでは、風防カバーの形状変更により、風防カバー後ろ側の圧力変動が緩和されていることがわかった。

文 献

- 1) 栗田健, 若林雄介, 山田晴夫, 堀内雅彦, "高速試験車「FASTECH360」における騒音低減の取り組み", JR EAST Technical Review No. 22, (2008)
- 2) 栗田健, 原正明, 堀内雅彦, "集電系音の抑制", JR EAST Technical Review No. 14, (2006)
- 3) 水島文夫, 栗田健, 山出吉伸, 加藤千幸, 上原均, 廣川雄一, "新幹線車両の空力騒音シミュレーション", 平成18年度地球シミュレータ産業利用成果報告書, (2007)
- 4) 水島文夫, 栗田健, 横山博史, 加藤千幸, 上原均, 廣川雄一, "新幹線車両の空力騒音シミュレーション", 平成19年度地球シミュレータ産業利用成果報告書, (2008)
- 5) 山出吉伸, 加藤千幸, 郭陽, 塚本裕一, "四面体要素による乱流解析", 生産研究 59 卷 1 号, (2007)
- 6) 高石武久, 池田充, "数値計算による空力音源分布の評価方法", 鉄道総研報告 Vol. 17, No. 11 (2003)