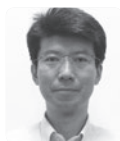


数値シミュレーションを用いたパンタグラフの空力騒音の低減

Reduction of pantograph aerodynamic noise by using numerical simulation



白石 伸夫*



水島 文夫*



若林 雄介*



栗田 健*

We have been working on reducing pantograph aerodynamic noise which is a major noise source of Shinkansen. First, we conducted numerical simulation of pantograph aerodynamic noise using Lattice Boltzmann Method (LBM). As a result, we confirmed that Sound Pressure Levels obtained by numerical simulations were in good agreement with those obtained with wind tunnel tests within a frequency range of 200 Hz to 2k Hz. Next, we worked on reducing noise of upper part of pantograph using this numerical simulation and developed improved shape that embedded pantograph head into pantograph head support.

●キーワード：新幹線、空力騒音、数値シミュレーション、パンタグラフ、格子ボルツマン法

1. はじめに

新幹線の高速化において、沿線騒音の低減は重要な課題である。沿線騒音に対する影響が大きなものとして、転動音や構造物音、空力騒音が挙げられるが、その中でも空力騒音は列車速度の6～8乗に比例して音響パワーが増大する性質を持つため、高速で走行する新幹線の場合は空力騒音の影響が大きくなる。そのため、高速化に伴う沿線騒音の増加を抑制するためには、空力騒音の低減が重要な課題となっている。

空力騒音に対しては、これまで風洞実験や現車走行試験により低騒音化の研究を進めてきた。その結果、突出した空力音源は対策がなされてきたため、現在では同程度の強さを持つ複数の空力音源が分布する傾向となっている¹⁾。今後は、従来の実験による試行錯誤的な騒音対策だけではなく、それぞれの音源の発生機構を把握し、その知見に基づいた騒音低減手法を打ち出していくことが重要と考えられる。また、これまでの研究から空力騒音の発生機構の把握には数値シミュレーションが非常に有効であることが分かっている²⁾。

以上を踏まえ、筆者らは新幹線の代表的な空力騒音源であるパンタグラフについて、数値シミュレーションを活用して、発生メカニズムの解明に基づいた低騒音形状検討を行うことを目的に研究開発を実施した。本稿では、既存のパンタグラフを用いた数値シミュレーションの解析結果と風洞試験の比較による精度の確認と、数値シミュレーションを活用したパンタグラフの低騒音形状の開発について述べる。

2. 数値シミュレーション適用に向けた基礎検討

2.1 解析手法・解析モデル

パンタグラフ開発におけるシミュレーション活用への基礎検討として、数値シミュレーションの解析結果と過去の風洞試験の結果³⁾を比較した。

数値シミュレーションは格子ボルツマン法 (LBM) をベースとする商用の数値シミュレーションソフトウェアPowerFLOWを用いて、圧縮性非定常流体解析を実施した。解析対象はE2系1000番台に搭載されているPS207形パンタグラフ (図1) とした。解析モデルの形状はパンタグラフの設計用CADデータを基に2mm以下の形状を簡略化したものを使用した。格子サイズは最小格子サイズを0.2mmとし、パンタグラフ表面から離れるにつれて0.4mm、0.8mm、1.6mmと順次倍の大きさに設定した。

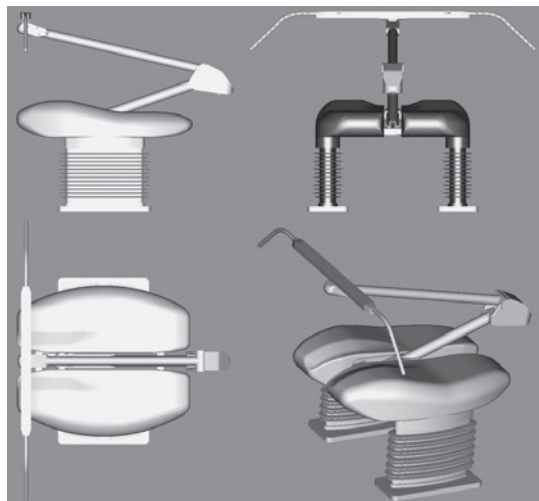


図1 PS207形パンタグラフ

2.2 解析空間及び境界条件

数値シミュレーションは風洞試験を模擬して実施した。表1に主な解析条件を、図2に対象領域を示す。なお、発生した騒音の評価点は図3に示すとおり舟体高さの側方5mの地点とした。

表1 主な解析条件

流速	300 km/h (83.3 m/s)
流体	空気
標準圧力	大気圧
解析時間	0.5 sec
底面境界	すべり無し壁面
寸法縮尺	1: 1
評価対象周波数	200-2000 Hz

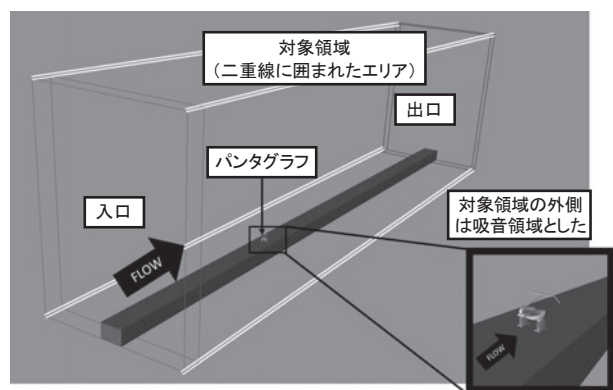


図2 数値シミュレーションの対象領域

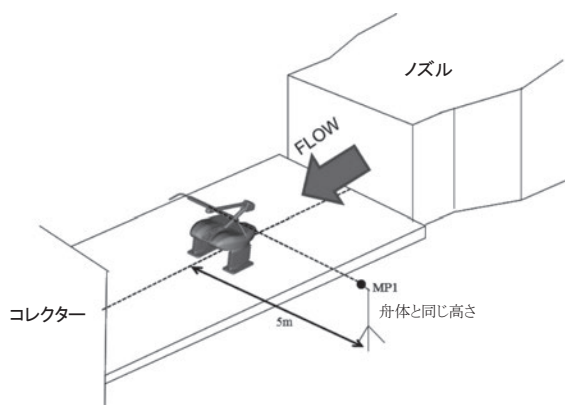


図3 騒音の評価点位置

2.3 計算結果

シミュレーション解析と、過去に実施した風洞試験³⁾から得られた評価点における音圧レベル (SPL) のスペクトルを比較した結果を図4に示す。なお、数値シミュレーションのSPLはパンタグラフ表面の圧力変動からCurleの式⁴⁾で算出した。図4より200Hzから2000Hzの範囲であれば、発生する騒音の周波数の傾向はほぼ一致していることが確認できた。次に、音源の位置について分析を行った。Curleの式によれば、低マッハ数の仮定が成り立つ新幹線の数値域においては、表

面圧力変動が空力騒音の強さを表しているとみなせる。一例として1000Hzの周波数域の表面圧力変動分布を図5に示す。大きな音源が台枠の中央部にあり、それより小さい音源が中間ヒンジ周辺にあることを確認した。この傾向は、過去の風洞試験でのアレイマイクロホンによる音源探査の結果 (図6)と一致している。以上より、200Hzから2000Hzにおいては、本手法で得られるSPLが風洞試験とおおよそ一致し、音源の位置も再現していることが確認できた。

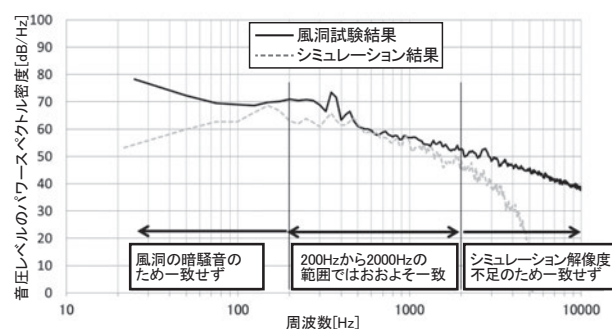


図4 数値シミュレーションと風洞試験のSPLの比較

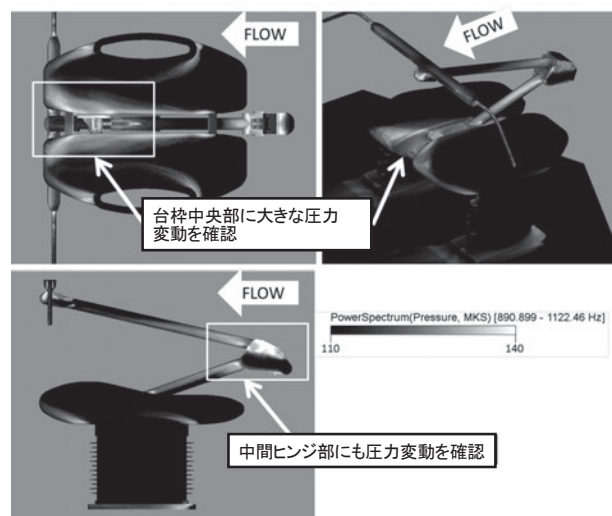


図5 PS207パンタグラフ表面圧力変動分布 (1000Hz帯)

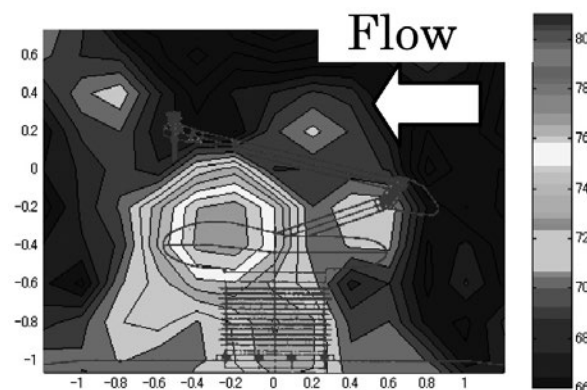


図6 風洞試験で測定した音源分布 (1000Hz帯)

3. 数値シミュレーションによる低騒音形状の検討

3.1 解析対象および計算条件

2章の結果から、格子ボルツマン法を用いたパンタグラフの数値シミュレーションが音源の探索と発生する騒音の評価に有効であることを確認した。そこで、本手法を用いてE5系に搭載されている現行のPS208形パンタグラフについて低騒音形状の検討を実施した。検討は、最初に現行の形状について解析を行い、騒音の発生機構を解明し、その知見をもとに改良形状を考案して、数値シミュレーションにより騒音低減効果を評価した。

解析対象は、パンタグラフのうち遮音板での遮音が難しく、沿線騒音の影響が大きいと考えられるパンタグラフ上部（舟体、舟支え、上枠周辺）とした。対象部位を図7に示す。なお、数値シミュレーションの解析条件は前章と同じとしたが、解析モデルについては計算負荷を低減するためにパンタグラフ上部から上枠を延長し、パンタグラフ本体を省略したモデルとした（図8）。

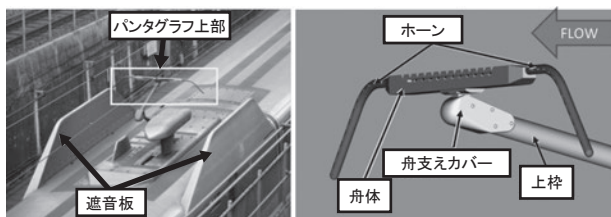


図7 解析対象としたパンタグラフの部位

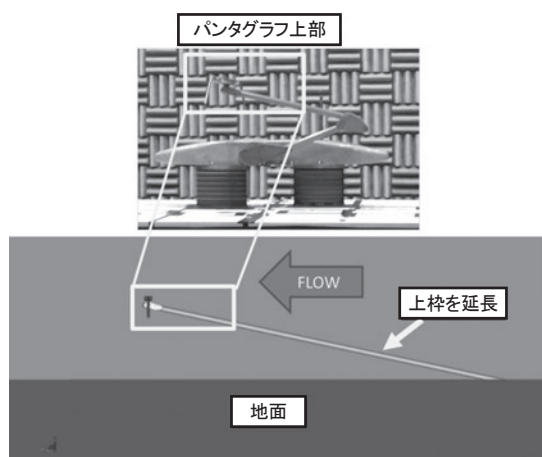


図8 数値シミュレーションのモデル

3.2 現行形状の解析結果

現行の形状について数値シミュレーションを実施し、得られた表面の圧力変動から算出した部位ごとの騒音レベルを図9に示す。なお、パンタグラフ上部全体について200Hzから2000Hzまでの周波数範囲を合計したパーシャルオーバー

オール（以下P.O.A）は78.8dB (A)であった。パンタグラフ上部においては、舟体と舟支えカバーが主要な音源であることが確認できた。本研究では、遮音板による回折減衰効果が少ないと予想される低い周波数において、支配的な音源となっている舟支えカバーに着目した。舟支えカバー周辺の300Hz帯の表面圧力変動分布（図10）から舟支えカバー後端部に大きな音源があることを確認した。この音源について図11の流線で流れを確認した結果、上流側にある舟体が乱した流れが舟支えカバーに干渉することで発生していることが予想された。

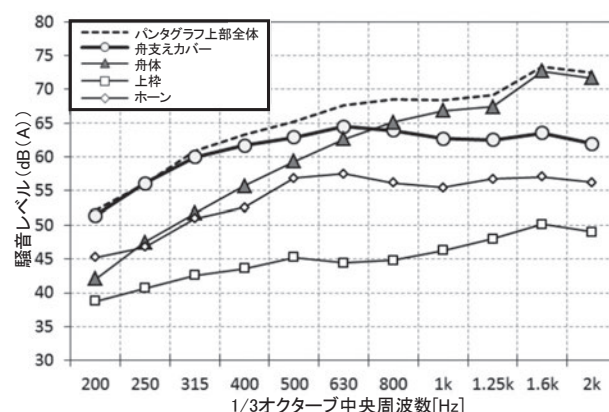


図9 各部位の騒音レベル（現行形状）

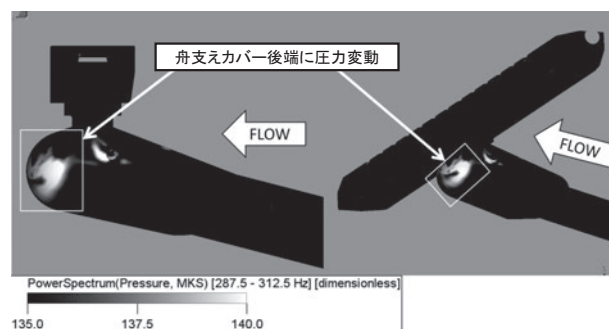


図10 現行形状の表面圧力変動分布（300Hz帯）



図11 舟体・舟支え周辺の流れの様子

3.3 低減対策の検討

現行形状の解析から舟支えカバーの後端に大きな音源が確認でき、その音源は上流の舟体が乱した流れとの干渉で発生していることが予想された。そこで、流れの干渉を低減

するために舟体と舟支えカバーの位置関係に着目し、舟体取り付け位置を大きく変えた「改良形状」(図12)を考案し、数値シミュレーションにより、その騒音低減効果を確認した。

改良形状の適用により、表面圧力変動で舟支えカバー後端に見られた音源が低減し(図13)、舟支えカバー単体から発生する騒音が大きく低減していることを確認した(図14)。さらに部位ごとの騒音レベル(図15)を見ると、低い周波数で支配的であった舟支えカバーの影響が大きく低減し、パンタグラフ上部全体の騒音を低減していることが確認でき、P.O.Aでも改良前に比べて約1dB低減(78.8dB(A)から77.9dB(A))できた。以上より、考案した改良形状が騒音低減に有効であることを確認した。

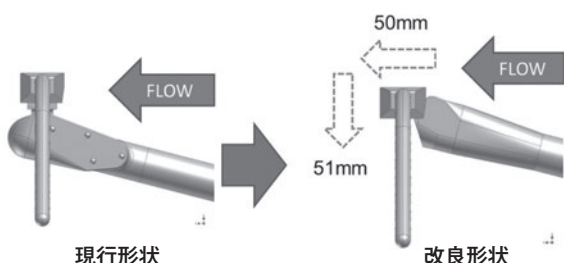


図12 改良形状の概要

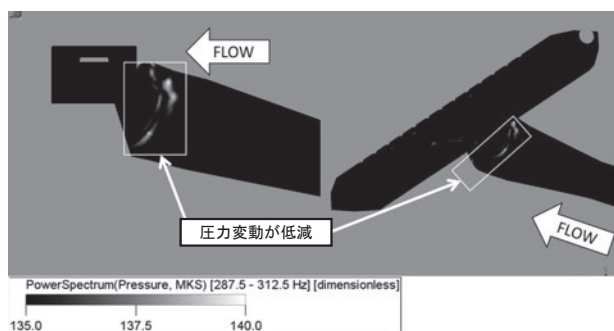


図13 改良形状の表面圧力変動分布(300Hz帯)

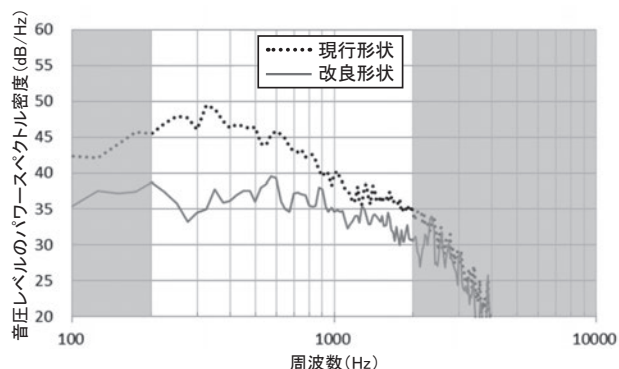


図14 舟支えカバー単体のSPLの比較

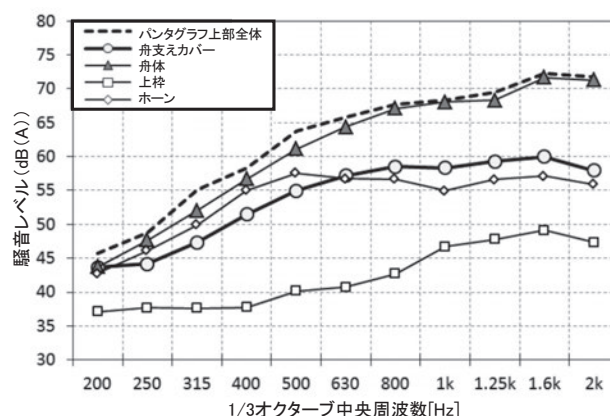


図15 各部位の騒音レベル(改良形状)

4. おわりに

本稿では、格子ボルツマン法を用いた数値シミュレーションによりパンタグラフ全体の解析を行い、過去の風洞試験結果と比較して、その精度を検証した。その結果、発生する騒音は200Hz～2000Hzにおいておおよそ一致すること及び音源位置を再現していることを確認した。次に、上記シミュレーションを用いてパンタグラフ上部について解析を行った。主要な音源となっている舟支えカバー付近について空力騒音の発生機構を解明し、その結果をもとに低騒音形状を提案し、低減効果を確認した。

空力騒音問題は、重点的に研究開発が進められているが、これまでの実験的アプローチで音源の対策がすでに進んでおり、更なる低減のためには発生のメカニズムに基づいた対策の検討が必要になってきている。今後も数値シミュレーションを活用し、引き続き低騒音パンタグラフの形状開発を進めていく予定である。

参考文献

- 1) 栗田健、水島文夫：新幹線高速試験電車FASTECH360における沿線環境対策, JR EAST Technical Review, No.31、2010.
- 2) 宇田東樹、水島文夫、栗田健：数値シミュレーションを用いた空力騒音の発生メカニズムに関する基礎研究, JR EAST Technical Review, No.31, 2012.
- 3) Kurita, T., Hara, M., Yamada, H., Wakabayashi, Y., Mizushima, F., Satoh, H. and Shikama, T. ; Reduction of Pantograph Noise of High-Speed Trains, Journal of Mechanical Systems for Transportation and Logistics, Vol. 3(1), 2010.
- 4) Curle, N.; The influence of solid boundaries upon aerodynamic sound, Proceedings of the Royal Society A, Vol.231, pp.505-514, 1955.