

新幹線車両の空力騒音シミュレーション

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^{*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

新幹線の車間部から発生する空力騒音の発生メカニズムを解明するため、Large Eddy Simulation (LES) を用いた非定常乱流の大規模数値シミュレーションを行った。乱流境界層中の縦渦構造まで解像できる1億5000万格子点の解析を行い、空力音発生メカニズムの解明および空力騒音の定量的な予測を実現した。

非定常流の数値シミュレーションを行うことにより、これまで実験では測定が困難であった3次元の非定常な流れ場と、詳細な音源の位置を把握することができた。LESを用いた非定常乱流シミュレーションによる空力騒音の解析が、基礎研究のみならず、新幹線などの複雑な形状に対しても適応可能で、産業界においても有効に利用ができることがわかった。

キーワード：空力騒音，新幹線，車間部，乱流境界層，LES

1. はじめに

空力騒音は鉄道・航空・自動車などの輸送機械や、ファンなどの流体機械など様々な産業分野で問題となっている。空力音は速度の約6乗に比例して増大するため、高速化のためには騒音の低減は欠かせない。特に、新幹線の騒音は環境基準が厳格に定められており、高速化を実現する上で、騒音の低減が、最も難しい課題として立ちふさがっている。

これまで、現車走行試験による騒音の測定や、低騒音風洞を用いた風洞実験など、測定観測を中心とした開発を行い、低騒音化を行ってきた。しかし、これらの手法では、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らなければならなかった。更なるブレイクスルーのためには、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。

空力騒音は、流体中の渦の変動に起因して発生するため、空力騒音を数値計算で予測するためには、流体中の非定常な渦の挙動を正確に解かなければならない。特に、乱流から発生する広帯域の騒音を予測するためには、音源となる大小様々なスケールの渦を格子解像する事が必要で、高周波音の音源と

なる小さな渦の挙動まで解析するためには、非常に多くの格子点数が必要となる。そのため、これまで、計算リソースの制約から、乱流から発生する騒音の数値シミュレーションは困難であった。2次元翼などの単純な要素形状の解析では、乱流騒音の定量的な予測の事例があるが¹⁾、鉄道車両など複雑な3次元形状に対しては、十分な精度での解析が行われていなかった。

本研究では、新幹線の車両連結間隙部（車間部）を解析対象として、地球シミュレータを用いた大規模数値解析を行った。総格子点数は、約1億5000万点で、乱流境界層中の縦渦構造（ストリーク）を捉えることが可能な格子解像度である。乱流境界層中の最小スケールの渦構造であるストリークの挙動まで捉えられる高解像度の流体解析から、騒音発生メカニズムの解明と、乱流から発生する広帯域の空力騒音の定量的な予測を実現した。

2. 解析対象

本研究で解析対象とした車間部は、新幹線の主要な空力騒音源の一つで、騒音低減が求められている。全周幌を用いた車間部の平滑化が、騒音低減策として試用されているが、コストや耐久性、連結車両の切り離しが困難になることによるメンテナンス性悪化

の問題がある。そのため、全周幌を用いない騒音低減手法の開発が求められている。

空力騒音の低減を実現するためには、まず、その発生メカニズムの解明が重要である。これまでに行った風洞実験²⁾から、以下のことがわかっている。

- (1)車間部からは、高周波広帯域の騒音が発生する。
- (2)高周波音の発生部位は、下流側のエッジ付近である。
- (3)車間部に流入する流れ場は乱流である。

騒音発生部位の大まかな位置はわかっているが、3次元空間の非定常な流れ場の測定は困難であるため、その詳細な流れと音の発生メカニズムについては、十分に解明されてはいなかった。

3. 解析手法

3.1 空力音の解析方法

空力音の解析は、Lighthillの音響学的類推に基づく分離解法を適応した。これは、流体の解析から音源となる非定常変動をとりだし、音の伝播は別途計算する手法で、流れの変動と音の変動が桁違いに異なる低マッハ数の解析に有力な手法である。

流体の計算は、LES (Large Eddy Simulation) による非定常乱流の解析を行った。新幹線のマッハ数は0.3以下であるので、流れは非圧縮とした。

音響解析は、流体解析で得られた車間部近傍の物体表面の圧力変動を音源として与え、Curleの式³⁾で音響予測を行った。音のスペクトルは、対象とする表面にかかる流体力の時系列変動データをFFT解析し、観測点までの距離減衰を考慮して計算した。

3.2 計算コード

流体計算コードは、FrontFlow/Blueを使用した。FrontFlow/Blueは有限要素法を用いたLESによる非定常流解析の汎用コードで、東京大学生産技術研究所で開発され、ソースコードが無償公開されている。

本研究では、運動方程式の解法にクラックニコルソン法を、圧力方程式の解法にはFractional Step法を選択し、時間・空間二次精度の解析を行った。サブグリッドスケールモデルには、ダイナミック・スマゴリンスキー・モデル (DSM) を使用した。

FrontFlow/Blueは、領域分割にもとづく並列計算が可能である。地球シミュレータを用いた解析では、コンパイラによる自動ベクトル化およびノード内自動並列化を利用し、ノード間は領域分割による並列計算を行った。また、一般公開されているバージョンのFFB ver4.1に対して、地球シミュレータ向けのチューニングを行い、実行性能の向上を実現した。最終的なベンチマーク結果では、ベクトル化率98.83%、並列化率99.973%を実現した。

4. 計算格子

車間部を有する車両形状の解析領域を図1に示す。車間部の長さ L を代表長さとする。実際の新幹線車両は $L=500$ mmである。

数値計算の解析領域は、計算領域の境界で反射する非物理的な圧力波の影響が緩和されるよう、乱流計算領域の前後に $10L$ の空間を取り、また、流出境界での逆流を避けるため出口付近では格子をストレッチさせた。物体表面の境界条件はNo Slip Wallとし、流出条件は自由流出境界、流入条件は流速一定で、固体壁近傍は厚さ約 $0.2L$ の層流境界層の流速分布を与えた。

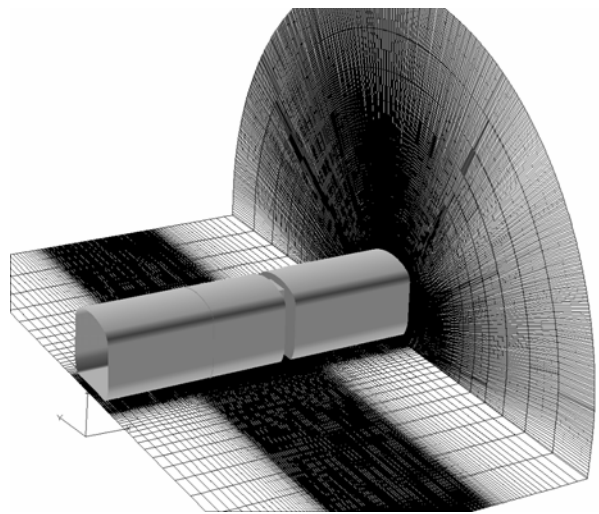


図1 解析メッシュ

車間部に流入する流れは乱流であるので、流れを乱流に遷移させるため、車間部の上流に凸状の突起を設けた。突起の高さは、 $0.02L$ 、幅は $0.02L$ である。

車間部の設置位置は、突起から $7L$ 下流の位置とし、音源として物体表面をサンプリングする領域は車間部の前後 $2L$ の領域とした。これは、突起直後の剥離による強い乱れの影響を避け、発達した乱流境界層が流入する車間部の現象に焦点を絞るためである。

一様流の風速 U_∞ と車間部長さ L を代表値とするレイノルズ数は、風洞実験に合わせて $Re=5.0 \times 10^4$ とした。風洞実験の試験風速は30m/s、模型縮尺は1/20、 $L=25$ mmである。風洞実験のレイノルズ数は、実際の新幹線車両のレイノルズ数と比較し、値が2桁ほど小さいものの、どちらも車間部に流れは発達した乱流境界層になっており、相似な現象が確保されている。なお、レイノルズ数が大きくなると、乱流境界層の渦のスケールは相対的に小さくなるので、数値解析で最小スケールの渦を格子で解像する事は困難なる。流体現象の相似性が確保さ

れる範囲ならば、レイノルズ数は小さい方が数値計算には有利で、本研究の主眼である流体中の最小スケールの渦の解像を実現するため、レイノルズ数は風洞実験の値を採用した。

格子解像度は、2500万点と、1億5000万点の2通りの解析を行った。一般的なレベルの解析では、2500万点規模でも高解像度の解析であるが、ここでは、解像度を区別するため、2500万点のメッシュをCoarse Mesh、1億5000万点の解析をFine Meshと呼ぶことにする。

解析領域は流れ方向に領域分割し、Coarse Meshは13ノード、Fine Meshは53ノードで並列計算を行った。

格子解像度に関する情報を表1に表す。 y^+ は、摩擦速度で無次元化した壁面からの距離である。壁面のごく近傍は粘性底層と呼ばれる、粘性の作用が支配的な領域で、壁面からの無次元距離 $y^+ < 10$ の領域では、この粘性底層の影響を強く受けることが知られている。壁面からの距離が遠くなるに従い、渦粒子は壁面の制約を受けなくなり自由に混合・拡散できるようになる。乱流境界層中のアクティブな渦の挙動を、最小スケールの渦まで格子解像するためには、少なくとも、 $y^+ = 10$ 程度の解像度が必要であると考えられる。

表1 解析メッシュと格子解像度

	Coarse Mesh	Fine Mesh
Number of Grids	25 Million	150 Million
Minimum Length	1/100 L	1/200 L
Resolution y^+	20	10

5. 解析結果

5.1 瞬時の流れ場

流体の解析では、流れ場が時々刻々変化する非定常乱流のシミュレーションを行い、各タイムステップの流れ場をサンプリングした。あるタイムステップの瞬時の流れ場の様子を、図2、3、4に示す。

図2は車両側方の切断面における主流方向の流速分布を示している。図3は $\nabla^2 p = 10$ の等値面による渦構造の可視化結果で、色は圧力分布を表している。図4は、車両表面の圧力分布を示している。

流れは、車間部上流に設置した突起で剥離して乱流に遷移し、目的どおり、車間部には発達した乱流境界層が流入する条件が再現されていることを確認した。図2では、乱流境界層の特徴的な構造である、主流方向に細長い縦渦構造（ストリーク）が確認できる。また、図3および図4では、車間部下流

側の車両端面で圧力上昇がみられ、エッジ直後には圧力低下が見られる事から、車間部に流入した乱流の渦は、車間部の下流側エッジに衝突し、再度、エッジ上面で剥離していることがわかった。

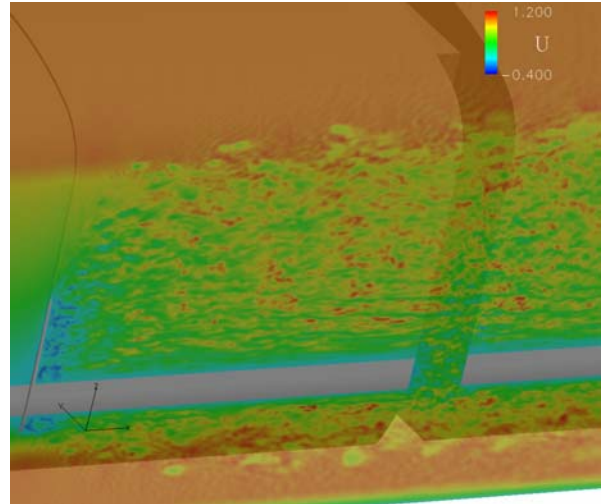


図2 車両側方断面の流速分布（瞬時場）

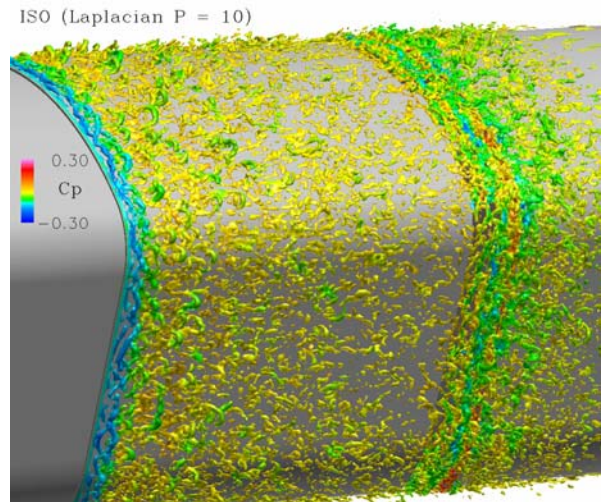


図3 車間部周りの流れの渦構造（瞬時場）

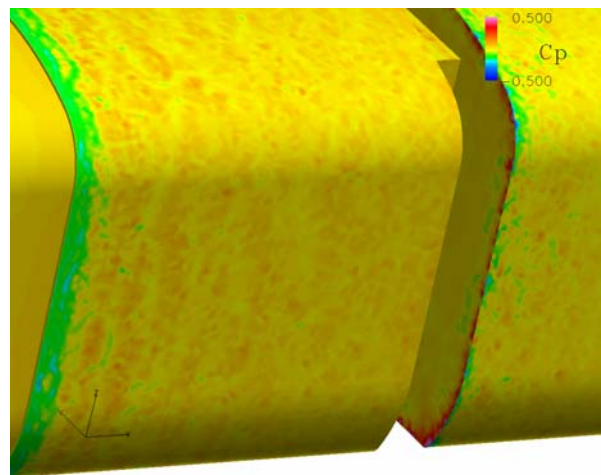
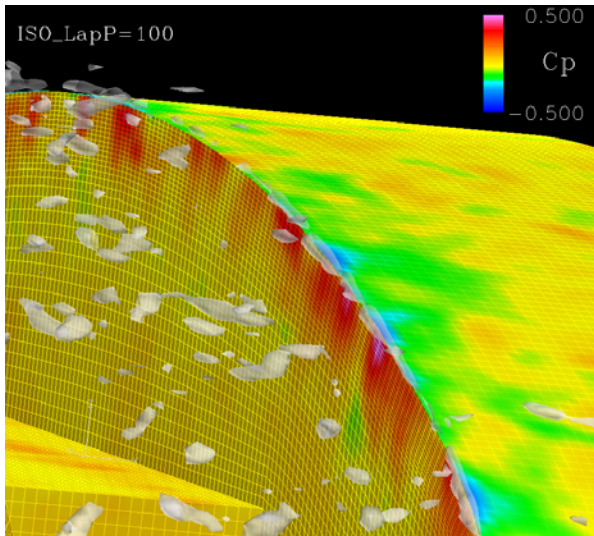


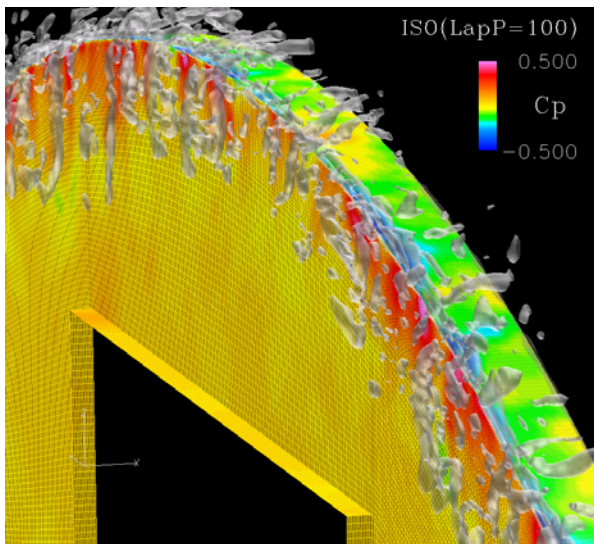
図4 車両表面の圧力（瞬時場）

5. 2 格子解像度の影響

図5に、Coarse Mesh (2500 万点)とFine Mesh (1 億 5000 万点) の解析で捉えられる現象の違いを示す。図は、車間部の下流側エッジの近傍を拡大したもので、流体中の半透明の構造は渦の可視化結果 ($\nabla^2 p=100$ の等値面) を表している。図の比較から明らかのように、Fine Meshの解析では、車両表面で衝突変形する渦の様子が詳細に捉えられている。



(1) Coarse Mesh の解析



(2) Fine Mesh の解析

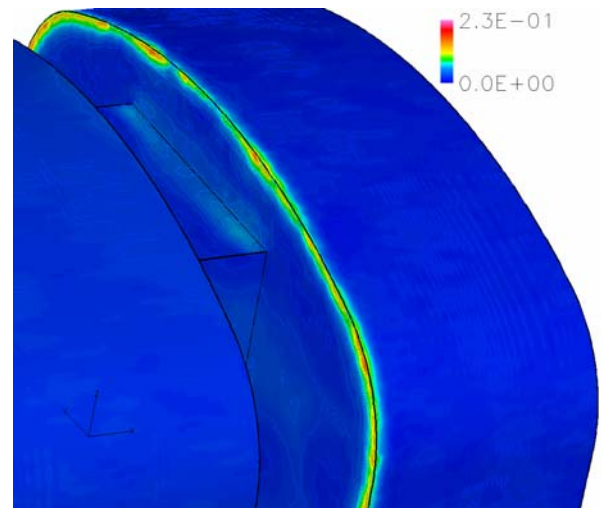
図5 格子解像度と捉えられる現象の比較

5. 3 FFT 解析した車両表面の圧力変動

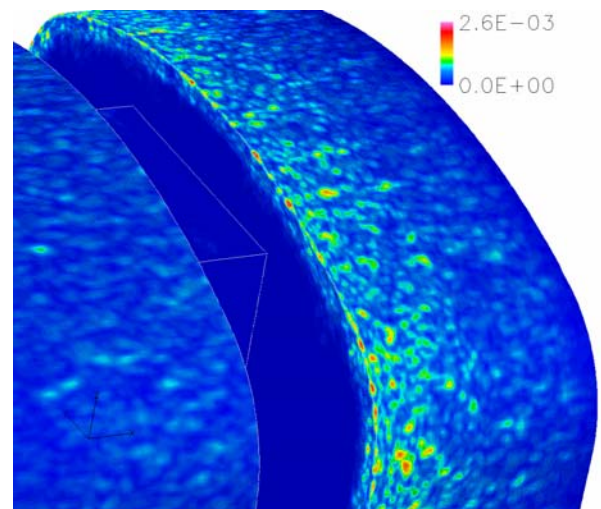
Fine Mesh の解析でえられた車両表面の変動圧力を時系列サンプリングし、FFT 処理して、周波数領域ごと

の変動圧力分布図を作成した。FFT 解析は、サンプリング点数512点、周波数解像度300Hzである。ここでは、低周波と高周波の音源の代表例として、300 Hz と4800 Hz の解析結果を、図6に示す。

特徴的な点として、低周波音は車間部の下流側エッジ部だけに音源があるが、高周波の音源はエッジ部だけではなく、エッジ下流の車両表面にまで分布していることが挙げられる。これは、尖ったエッジに衝突して形状を変化させながら下流側に流れていく渦の、高周波の挙動に拠るものと考えられる。これまでの、実験による音源探査²⁾では、高周波音の音源の位置は、エッジ付近とだけしかわかっていなかったが、今回、数値シミュレーションによって、初めて、詳細な音源分布を把握することができた。



(1) 300 Hz の音源分布



(2) 4800 Hz の音源分布

図6 車両表面の変動圧力分布

5. 4 騒音スペクトルの予測

Curl の式で予測した、遠方観測点での騒音のスペクトルを図7に示す。観測点の位置は、風洞実験のマイクロホン設置位置に合わせて、車間部の側方1.75mに設定した。

風洞実験の結果に見られる、100Hz以下の低周波のスペクトルは、風洞の暗騒音によるもので、今回の解析対象ではない。

Fine Mesh の解析結果は、広帯域に渡って風洞実験結果と定量的にもよく一致する結果が得られている。一方、Coarse Mesh の解析結果では、高周波の音のレベルが非常に小さくなっており、高周波音の音源となる小さいスケールの渦の挙動が解像できていないことが原因であると考えられる。

これまで、LESによる流体解析で空力音を予測した場合に、定性的な流れ場の様子を捉えることはできて、定量的な変動値(スペクトルのデシベル値)は、実験と大きくかけ離れた結果となることがあった。本研究でも、Coarse Mesh の解析結果では予測騒音は実験と定量的に一致しないが、Fine Mesh の解析結果では、高周波広帯域の騒音を非常に精度良く予測できている。これは非常に興味深い結果で、流体中の最小スケールの渦の挙動まで格子解像することで、乱流から発生する高周波広帯域の空力音を定量的な予測が可能であることが示唆される。

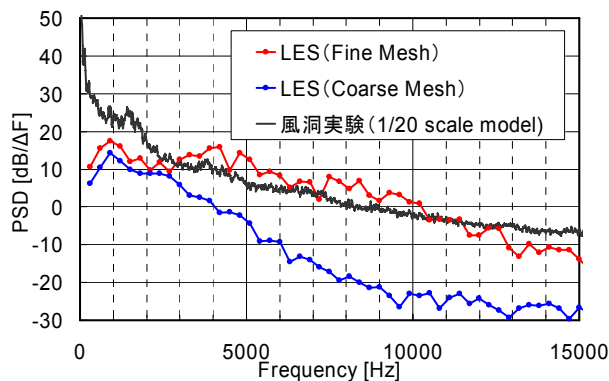


図7 騒音スペクトル (実験とシミュレーション比較)

6. まとめ

新幹線車間部から発生する空力騒音の発生メカニズムを解明するため、地球シミュレータによる大規模LES解析を行い、以下の知見が得られた。

- (1) 車間部から発生する騒音の音源は、車間部の下流側エッジに衝突し変形する渦の挙動源である。
- (2) 高周波音の音源は、エッジ部だけでなく、エッジ下流の車両表面にも渡って分布している。

(3) 乱流から発生する高周波広帯域の騒音を定量的に予測するためには、乱流境界層の縦渦構造を捉えられる程度の格子解像度が必要である。

本研究で得られた、空力騒音発生メカニズムに関する知見と解析ノウハウは、今後の新幹線の騒音低減手法の開発に非常に有用である。これまで、3次元空間の非定常流の測定が難しかったために、空力騒音の低減は、試行錯誤的に行われていた。今後は、車間部以外の空力騒音源についても、数値シミュレーションを活用することで、音源となる流体中の渦構造の解明と、現象理解にもとづく騒音低減手法の開発が、行われるようになると期待される。

謝辞

本研究は、文部科学省平成18年度先端大型研究施設活用プログラム「新幹線車両の空力騒音シミュレーション」の一環として行われた。

計算コードFrontFlow/Blueは文部科学省次世代IT基盤構築のための研究開発「革新的シミュレーションソフトウェアの研究開発」プロジェクトの一環として、東京大学生産技術研究所で開発されたものである。

地球シミュレータの利用に際しては、独立行政法人 海洋研究開発機構 計算システム計画・運用部の平野哲 部長、北脇重宗 調査役、新宮哲 産業利用推進グループリーダーから、ご指導ご協力を頂いた。またプログラムの最適化には、日本電気株式会社の津田義典 氏から貴重なご助言を頂いた。

ここに記して感謝の意を表す。

参考文献

- 1) 宮澤真史ほか、"二次元翼周り非定常流の空力音響解析 (第1報、翼周りにはく離遷移流れのLES解析と精度検証)," 機会学会論文集 B 編、72 巻、721 号、pp.2140-2107、(2006)
- 2) 水島文夫ほか、"鉄道車両連結部から発生する空力騒音に関する研究 (第一報、騒音発生機構に関する実験的研究)," 機械学会論文集 B 編、72 巻 720 号、pp.1943-1951、(2006)
- 3) Curle, N. "The Influence of Solid Boundaries upon Aerodynamic Sound", Proc. Roy. Soc., A231, P505, (1955)