

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、横山 博史*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 19 年 7 月 11 日～平成 20 年 3 月 31 日

アブストラクト

新幹線の高速化実現のためには、空力騒音の低減が必要不可欠である。車両連結部（車間部）は主要な空力騒音源の一つで、これまでの風洞実験により、ピーク音と、広帯域音が混在していることがわかっている。本研究では、それぞれの音の発生メカニズムを解明するため、非定常流の数値シミュレーションを行った。ピーク音は、音の直接計算（DNS）により、その発生メカニズムと発生する条件を解明した。また、広帯域音は、非圧縮 LES と音響計算の分離解法により、微小な渦の変形から発生する高周波の乱流騒音の発生メカニズムを解明した。

キーワード： 空力騒音、新幹線、DNS、LES、キャビティ、乱流騒音

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必要不可欠である。車両連結部（車間部）は主要な空力騒音源の一つで、騒音低減が求められている。これまでの風洞実験により、車間部に流入する流れは乱流で、発生する騒音は、図 1.1 に示すように、ピーク音と、広帯域音が混在していることがわかっている¹⁾。しかし、実験では音の測定はできるが、空力音の発生メカニズムとなる流体现象の把握は困難で、シミュレーションによる現象解明が期待されている。

本プロジェクトでは、地球シミュレータを用いた大規模シミュレーションを行うことで、新幹線の車間部から発生する空力騒音の解析に取り組んだ。騒音発生メカニズムを解明するためには、非定常な流体现象の長時間のサンプリングが必要である。また、対象とする現象を再現するためには、乱流が流入する流れ場を再現する必要があり、小さい渦まで解析できる大規模メッシュを用いた 3 次元空間の解析が必要となる。本研究では、地球シミュレータの計算機リソースを用いて、従来は解析困難であった空力音（特に乱流が流入する流れ場から発生する空力騒音）の数値解析を実現した。

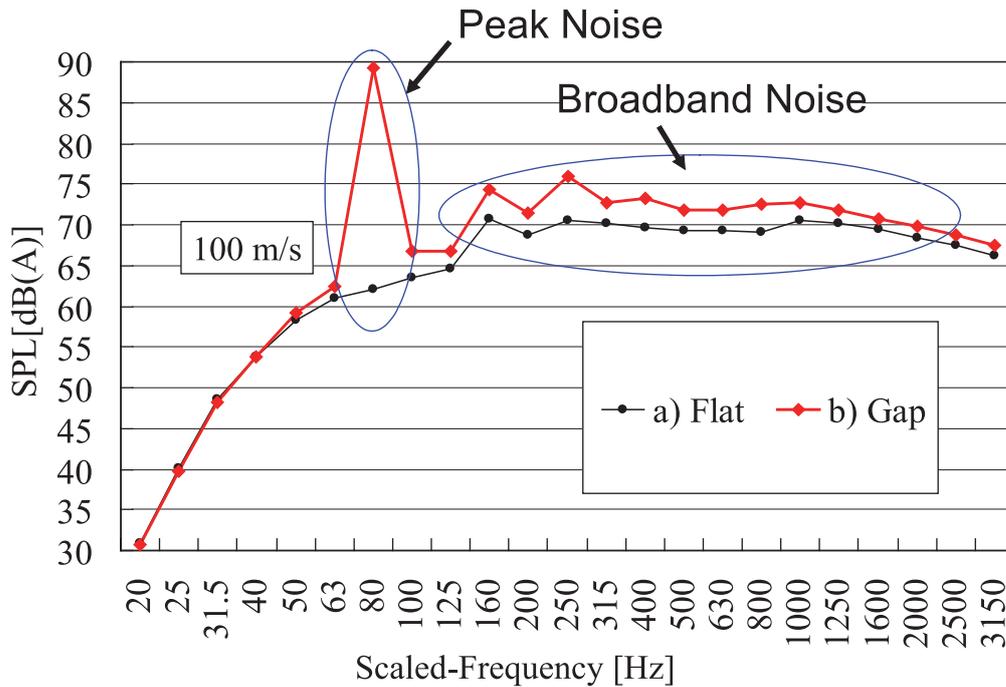


図 1.1 車間部から発生する空力騒音 (1/5 縮尺模型風洞実験) ¹⁾

本プロジェクトでは、対象とする現象を、ピーク音と広帯域音に分けて、それぞれに適した計算手法を用いて解析を行った。ピーク音については、流れと音が連成した現象であり、その解析には圧縮性 Navier-Stokes 方程式を直接計算する必要がある。このアプローチは、直接計算 (DNS : Direct Numerical Simulation) と呼ばれ、音波も含めて一つの方程式で現象を捉えることができるという利点がある。ただし、音は流体現象と比べて桁違いに小さい変動であり、音波の伝播を捉えるためには、空間高次精度のスキームと、非常に小さいタイムステップの解析が必要となる。

一方、音と流れが連成しない現象については、分離解法と呼ばれるアプローチが適応可能である。分離解法は、最初に流れ場の計算のみを行い、次に、流体計算で得られた音源を用いて別途音響計算を行う手法で、流れと音で長さスケールや変動スケールが大きく異なる難しさを回避し、DNS と比べて低コストで解析が行えるメリットがある。車間部から発生する広帯域音については、音波が流れに与える影響は小さいと考えられるので、分離解法を適用する。車間部で発生する高周波広帯域音については、平成 18 年度のプロジェクトにおいて、その基本的な騒音発生メカニズムとなる流体現象の解明を行った。本年度は、18 年度の解析で得られた音源をもとに、音響計算を試みた。

2. 直接計算によるピーク音の解析

ピーク音の発生機構を解明するため、圧縮性 Navier-Stokes を支配方程式とした音の直接計算を行った。本コードは、有限差分法を用いており、空間微係数は 6 次精度コンパクトスキームで評価する。地球シミュレータにおける、ベクトル化率は 95% 程度となっており、主に 16 node を使用して計算をおこなった。音のスペクトルを得るためには、1つの計算に対し 5000 ノード時間程度を必要とする。基本的なピーク音発生機構を解明するため、二次元形状のキャビティ流れを対象とした。また、音響モードがピーク音におよぼす影響を明らかにするため、流れ方向長さに対し、深さ方向長さの方が短い shallow cavity と深さ方向長さの方が長い deep cavity について解析を行った。図 2.1 に各キャビティ

流れにおける渦構造と音波を表す。shallow cavity にくらべ、deep cavity では非常に強いピーク音が発生することがわかる。発生した音波は、キャビティ前縁部において2次元的な上下運動をせん断層に引き起こし、この上下運動はキャビティ後縁部においてふたたび音波の発生を引き起こす。今回の deep cavity のように、せん断層の上下運動と深さ方向の音響モードが連成する場合、特に強い音が発生する。図 2.2 はピーク周波数において位相平均した音波について、半周期 $T/2$ ずれた2つの時刻について示したものである。後縁で発生した音波が深さ方向の音響モードにエネルギーを与え、強い音波がキャビティ外部へ放射されることがわかる。

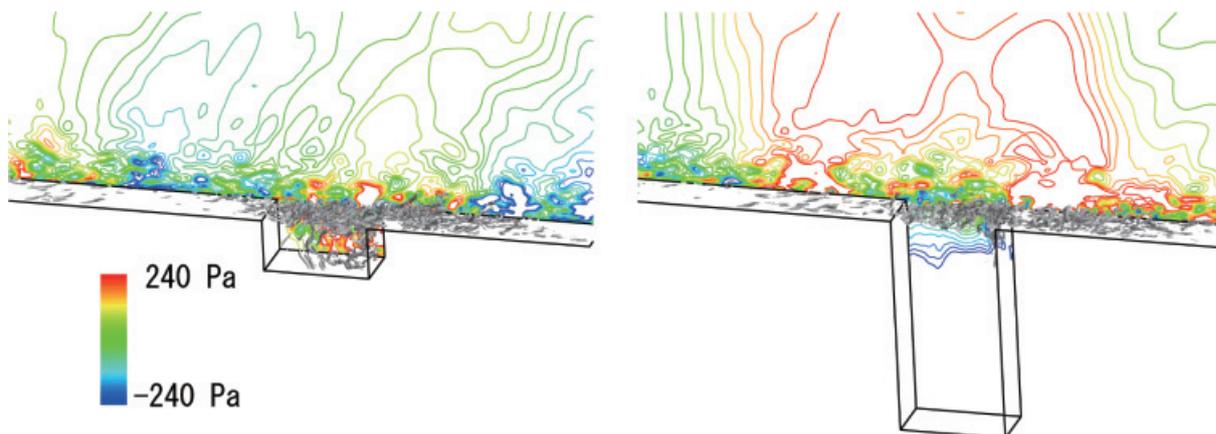


図 2.1 渦構造と音波 (左: shallow cavity、右: deep cavity)

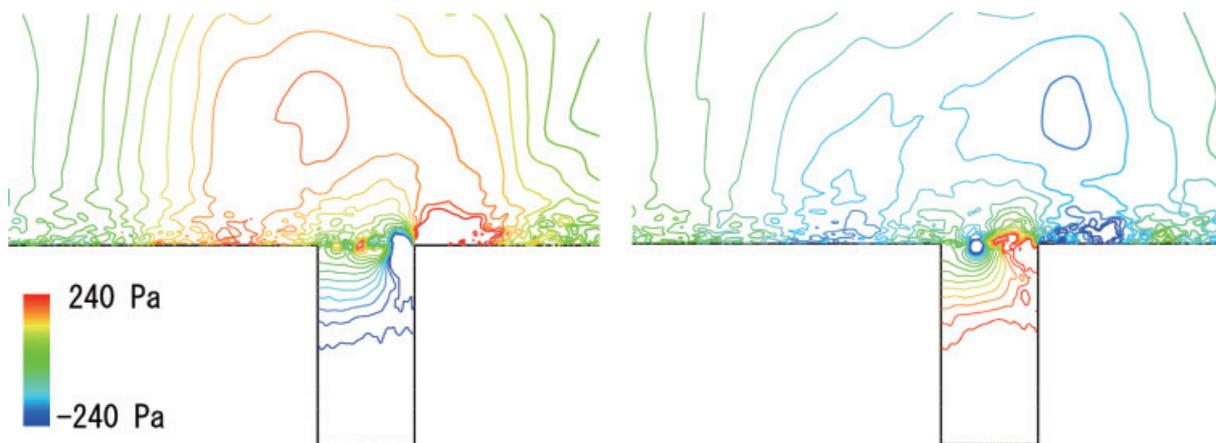


図 2.2 ピーク周波数において位相平均された音波 (左: $t = 0$ 、右: $t = T/2$)

3. 分離解法による広帯域音の解析

広帯域音の解析は分離解法で行い、流体計算は非圧縮の LES (Large Eddy Simulation) で行った。計算コードは FrontFlow/Blue を用いた。昨年度までの解析では、音響計算は Curle の式³⁾を用いていた。Curle の式は、物体表面の圧力変動を音源とし、自由音場を仮定して遠方場音の予測を行う音響解析手法である。流体音の真の音源は、流れ場中の渦変形であり、その渦変形の結果として物体表面に圧力変動を生じさせる。低マッハ数の流れから発生する音は、音の放射効率の良い物体表面の圧力変動に起因する音が支配的であることが知られており、分離解法の音響計算には、表面圧力変動の

みを音源とする Curle の式が用いられることが多い。ただし、非圧縮の LES 解析で得られる表面圧力変動は、必ずしも物理的に正しいものではなく、特に、高周波音については、位相のずれが生じる点に注意が必要である。また、自由音場を仮定しているため、物体形状に起因する音響の影響も無視される。本年度は、表面圧力変動ではなく、より直接的な音源である流体中の渦変形に起因する音源(渦音源)を用いて、物体形状も考慮した音響解析に取り組んだ。

分離解法による空力音計算の基礎式は、(3.1) 式に示す Lighthill 方程式⁴⁾ と呼ばれる式である。

$$\frac{\partial^2 \rho}{\partial t^2} - c_0^2 \frac{\partial^2 \rho}{\partial x_i^2} = \frac{\partial^2 T_{ij}}{\partial x_i \partial x_j} \quad (3.1)$$

これは、流体の基礎式である Navier-Stokes 方程式を波動方程式の形に式変形したもので、左辺は音の伝播を、右辺は音源を意味している。右辺の T_{ij} は Lighthill テンソルと呼ばれ、(3.2) 式で定義される。このうち、第2項と第3項は、高レイノルズ数と低マッハ数を仮定すると、微小であるとして無視できる。

$$T_{ij} \equiv \rho u_j u_i + p_{ij} - c_0^2 \rho \delta_{ij} \quad (3.2)$$

よって、音源は $u_i u_j$ (流速変動) の発散 (空間微分) で与えられることになり、これが渦音源と呼ばれるものである。

本研究では、地球シミュレータを用いた流体解析により、非定常流れ場の解析を行い、得られた流れ場から渦音源を計算し、それを FFT 解析して、周波数領域で音源を求めた。音源項は、テンソルの発散 (3変数のベクトル量) で、周波数領域では、実部・虚部の位相情報を与えるので6変数の情報を持つ。音響計算には、その空間分布を代入して解析を行う必要があり、音源のデータ量は非常に大きい。本研究では、新幹線の車間部の要素形状であるキャビティ形状を対象として、流体計算および音響計算を行った。音響計算には、有限要素法にもとづく音響解析プログラム ACTRAN を使用した。

流れ場の様子を、図 3.1 に示す。流れ場から Lighthill テンソルを計算し FFT 解析して得られた周波数ごとの空力音源の分布を、図 3.2 に示す。

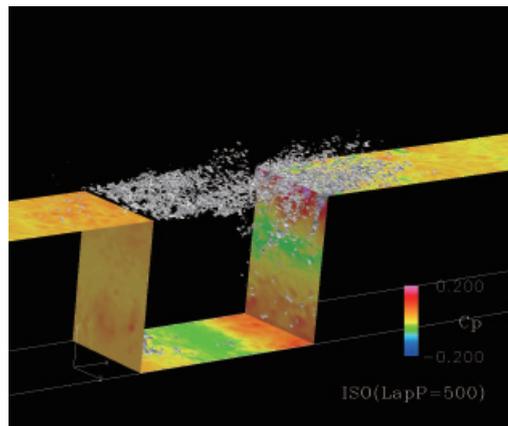


図 3.1 キャビティ形状周りの瞬時の流れ場 (渦の様子) と圧力分布

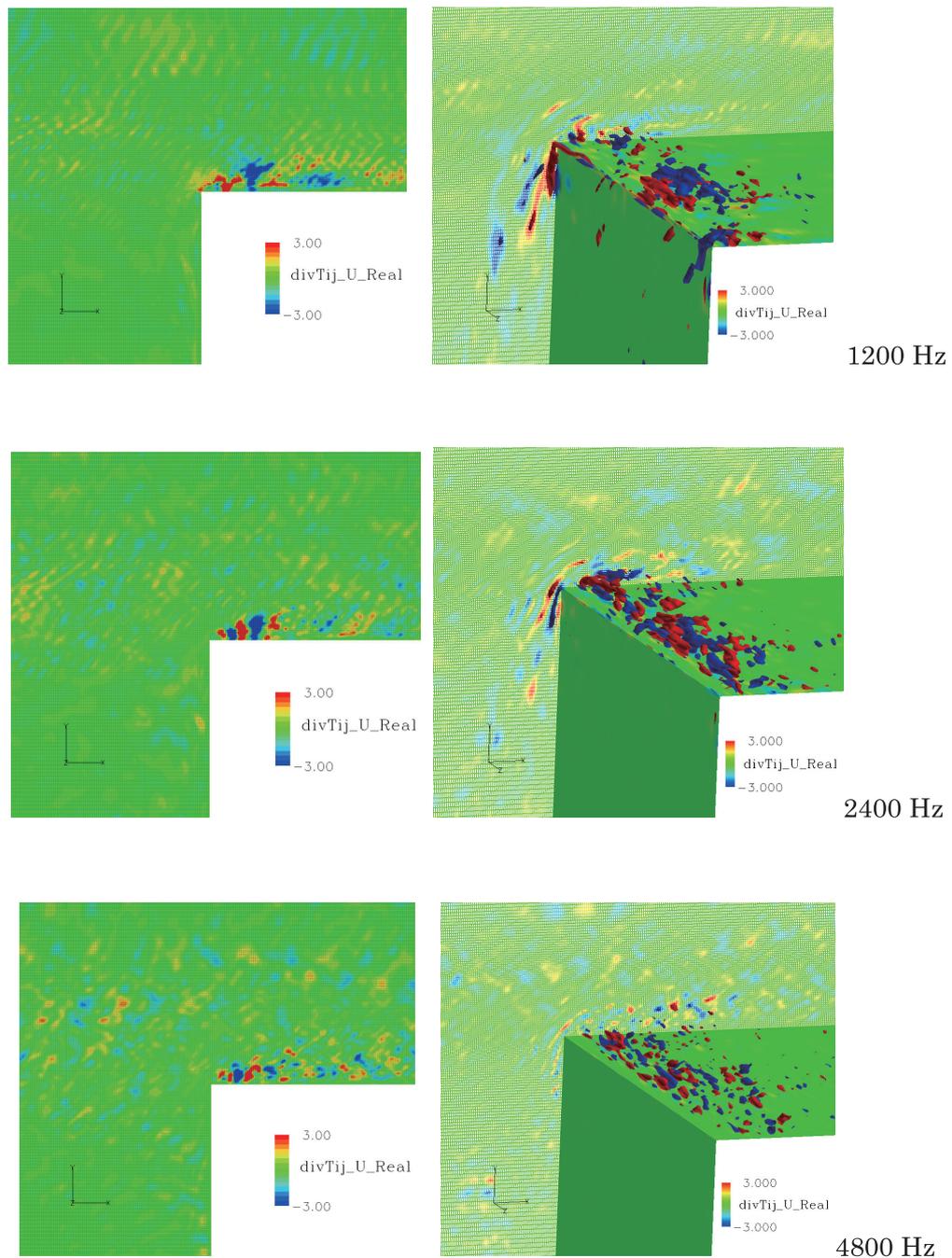


図 3.2 周波数ごとの渦音源分布

図 3.2 では、X 方向（主流方向）の実部の音源を代表例として表示している。図に示すように、渦音源はエッジ上面近傍に分布しており、高周波になるほど細かい音源構造となることがわかる。また、音源の位相はそろっておらず、ランダムに分布しており、プラスマイナス逆位相の音源によるキャンセルングの効果が見込まれる。

渦音源を入力して音響解析を行った結果を、図 3.3 に示す。音響計算は、解析可能な格子規模の制約から、エッジ部近傍の音源のみを入力して行った。ただし、図 3.2 で示したように、乱流騒音の音源構造は非常に細かく、その空間分布の情報が重要であるので、音源領域については流体解析と同等の細かい格子で音源を与えた。

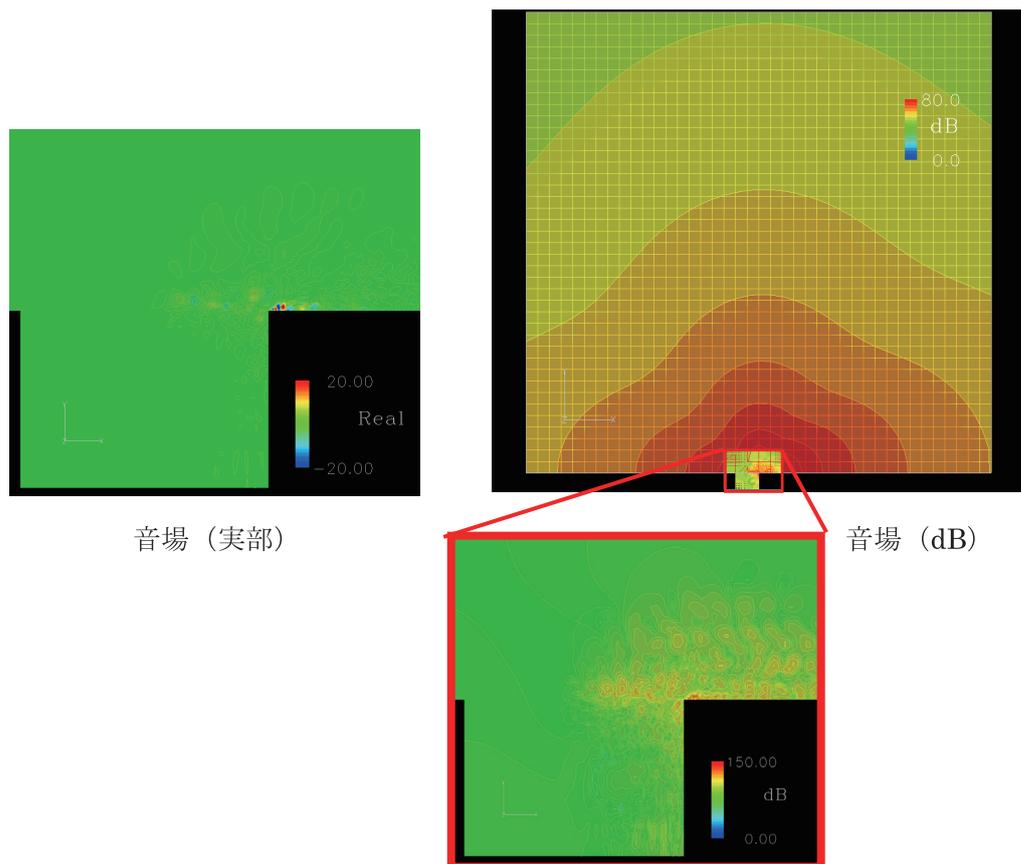


図 3.3 音響解析による遠方音場の予測 (2400 Hz)

解析の結果、音はエッジ上面に存在する音源から、壁面に垂直な上方の指向特性をもって放射されることがわかった。ここでは、代表例として、2400 Hz の解析結果を示しているが、他の周波数帯も、指向性は同じ傾向を示している。また、音源の解像度については、粗い格子にマッピングして解析した場合には正しい音場の予測ができなくなり、細かい音源構造を有する乱流騒音の解析には、音響計算の大規模化が必要であることがわかった。

4. まとめ

本研究では、新幹線の車間部から発生する、ピーク音と広帯域音のそれぞれについて解析を行い、空力騒音の発生メカニズムの解明を行った。ピーク音については、DNS により解析を行い、キャビティの深さ方向の音響モードと周期的な渦生成の連成現象であることを示した。広帯域音については、渦音源を用いた分離解法で解析を行い、エッジ部上面に分布する、細かい音源構造を明らかにし、その音響解析にも取り組んだ。

今後の課題は、分離解法の、音響計算の大規模化である。音響計算は、その計算の特性上、並列計算による大規模化が困難な点がある。流体計算は、大規模並列計算に対応しているが、本研究の結果、乱流騒音の解析には、音響計算も流体計算と同程度の音源解像度が必要であることがわかった。3次元の車両形状を対象として、渦音源を用いた空力音の定量予測を実現するためには、この問題の解決が必要である。

謝 辞

本研究は、平成19年度地球シミュレータ産業戦略利用プログラム「新幹線車両の空力騒音シミュレーション」の一環として行った。

非圧縮LES解析コードは、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」プロジェクトで開発された計算コードFrontFlow/Blueを使用した。

ここに記して、感謝の意を表す。

参考文献

- 1) 水島文夫, 高倉宏幸, 栗田健, 加藤千幸, 飯田明由, “鉄道車両連結部から発生する空力騒音に関する研究 (第1報, 騒音発生機構に関する実験的研究)”, 日本機械学会論文集B編, 72巻720号, pp. 1943-1951, 2006.
- 2) 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, pp. 27-32, 2007.
- 3) Curle, N., “The influence of solid boundaries upon aerodynamic sound”, *Proceedings of the Royal Society, Series A*, 231, pp. 504-514, 1955.
- 4) Lighthill, M. J., “On sound generated aerodynamically I. General Theory”, *Proceedings of the Royal Society, Series A*, 221, pp. 564-587, 1952.