

スピーカー駆動型シンセティックジェットによる パンタグラフ舟体の空力音低減

佐藤 祐一* 池田 充* 光用 剛*

**Reduction of Aerodynamic Noise Generated by a Pantograph Head
By using Speaker-driven Synthetic Jet Actuators**

Yuichi SATO Mitsuru IKEDA Takeshi MITSUMOJI

With increase of the maximum speed of Shinkansen trains, it has become more and more important to resolve aerodynamic and aeroacoustic problems related to pantographs. This study attempted to control the flow around a pantograph head by using speaker-driven synthetic jet actuators in order to reduce aerodynamic noise. The results of numerical and experimental tests indicate that the synthetic jets can stabilize the flow around the bluff-shaped pantograph head, thus resulting in reduction of aerodynamic noise.

キーワード：スピーカー，シンセティックジェット，パンタグラフ，舟体，空力音

1. はじめに

今日、新幹線の最高営業速度は300km/hであるが、間もなく320km/hの営業走行も開始されようとしている。しかしながら、さらなる速度向上を実現するためには、沿線環境保全などの面からパンタグラフの空力音のさらなる低減が求められるが、従来手法の延長だけでは、空力音の大幅な低減は難しい状況にある。そこで、鉄道総研では、流れ場自体を制御することによって空力音を低減する手法として、多孔質材をパンタグラフの部材表面に適用する手法¹⁾を提案しているが、より能動的にパンタグラフ部材まわりの流れ場制御を行う手法として、剥離点近傍の流れ場に攪乱を与えることのできるシンセティックジェットアクチュエータに着目した。これを新幹線用パンタグラフの主要な音源部位である舟体に組み込むことによって、舟体から発生する空力音の低減を実現する手法を提案し、その基礎的な検討を行ったのでここに報告する。

2. シンセティックジェットの原理

シンセティックジェットアクチュエータとは、図1に示すように、キャビティ底面の振動板を鉛直方向に変位させることにより、キャビティ上面に設けたオリフィスから流体の吹出しと吸込みを交互に行うことのできるデバイスのことである。オリフィスから流出する正味の流量の時間平均はゼロであるが、オリフィスから流れ場に

向かう向きの運動量を生成させることができる。シンセティックジェットは外部から流体を供給するといった複雑な装置を必要としないため、構造を簡略化できる。また、交流電源を用いることにより、電圧を変えることで振幅を、周波数を変えることで振動数を変化させることができるため、流れ場に擾乱を効率的に与える能動的な制御が可能である。なお、本研究では、振動板として、市販のスピーカーを用いている。

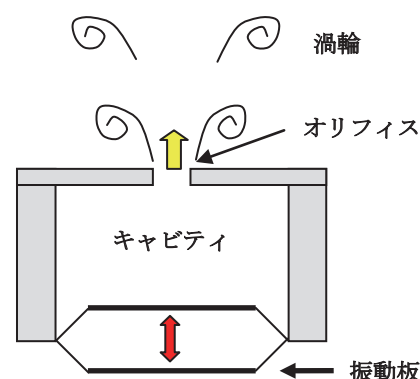


図1 シンセティックジェットの原理

3. CFD解析による舟体周りの流れ場解析

現用パンタグラフにシンセティックジェットを適用する際、どの位置に組み込むと最も効果的に流れ場を制御可能であるか確認するため、まず、CFD解析 (Computational Fluid Dynamics: 数値流体解析) による検討²⁾を行った。なお、CFD解析対象はパンタグラフの下枠以上とし、シンセティックジェットの有無が流れ場に与える影響について解析を行った。

* 鉄道力学研究部 集電力学研究室

3.1 CFD 解析の概要

CFD 解析は汎用解析ソルバー FLUENT6.2.36 を使用して実施した。数値計算は標準 Smagorinsky モデルを用いた LES (Large Eddy Simulation) により行い、Realizable k-ε モデルで得た定常計算の結果を初期値として、非圧縮非定常計算を行った。ただし、初期値として与えた k-ε モデルの解は十分に収束したものをを用いた。計算格子を図 2 に示す。パンタグラフモデルは、新幹線の現用シングルアームパンタグラフを基本とし、舟体、上枠、下枠で構成されるものとして、台枠以下は省略した。計算格子全体での格子点数は約 660 万点である。

境界条件は、流入境界で一様流速 41.7 m/s を与え、流出境界では散逸流速を 0 と与えている。また、左右側面及び、上下面の境界条件はスリップ境界とした。流れ場の物理量のデータサンプリングは、流れ場が十分に発達したタイムステップ以降のものに対して行っている。本計算のタイムステップは、 1.0×10^{-4} s であり、データサンプリング数は 500 ステップである。

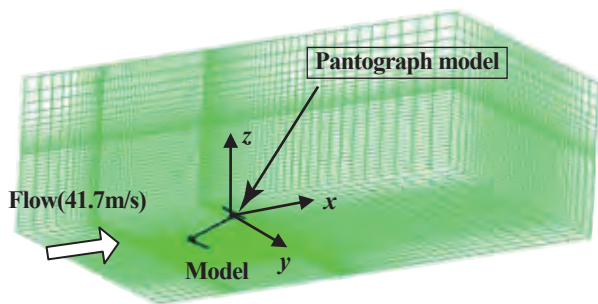


図 2 CFD 解析に用いた解析格子

3.2 現用パンタグラフの CFD 解析と実験結果との比較

現用パンタグラフの CFD 解析を行った。また、その解析結果を検証するために、PIV (Particle Image Velocimetry) による流速測定を行った。両者の結果を図 3 に示す。これは、 $x = 0.1$ 及び 0.15 (舟体中心から下流側に 0.1m 及び 0.15m)、 $z = -0.07$ (舟体上端から下に 0.07m) 位置での y 方向に対する主流方向流速分布の比較を示している。計算結果は実験値とおおむね合致している。なお、若干の差が見られるのは数値拡散が原因として考えられる。このように、物体近傍の流れ場の解析精度については十分であると言いが、計算機リソースの制約により、格子点をこれ以上増やす事が難しいことに加え、比較的スケールの大きな流れ場については概ね再現できていると判断できることから、シンセティックジェットによる流れ場制御効果を CFD 解析により検討することは可能であると判断した。

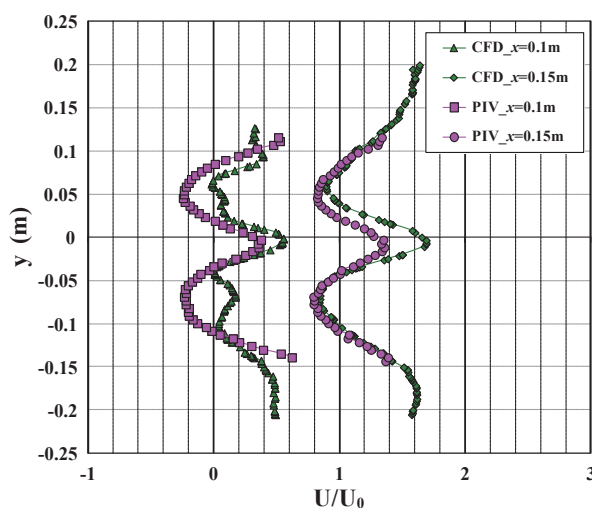


図 3 主流方向速度分布
(CFD 解析結果と PIV 解析結果の比較, $U_0=41.7\text{m/s}$)

3.3 シンセティックジェットを適用した場合の CFD 解析結果

現用パンタグラフの舟体に能動的な流れ場制御を適用した場合の効果を CFD 解析により検討した。現用舟体に対するシンセティックジェットの適用部位としては、以下の 4 つのケースを考えた。すなわち、Case (1)：すり板上面の最上流部、Case (2)：舟体上流側側面の最上部、Case (3)：舟体上流側側面の最下部、Case (4)：舟体底面の最上流部を選定した。これらの箇所の境界条件を変更することによって、シンセティックジェットの機能を模擬した。それぞれの噴出位置を図 4 に示す。シンセティックジェットの噴出口は、主流方向に対する幅 (x 軸方向の幅) は約 4mm 、まくらぎ方向 (y 軸方向) の長さは 0.9m (舟体中心より左右 0.45m) とした。また、噴出帯は約 4mm の幅を持ち、スパン方向には舟体中心からまくらぎ方向に左右約 0.45m の長さとした。シンセティックジェットの噴出方向は各面に垂直な方向とし、最大振幅 10m/s の正弦波を、速度流入境界条件として与えた。正弦波の周波数は 1000Hz とした。CFD 解析により得られた流れ場の計算結果を図 5～図 6 に示す。図 5 は舟体中心からスパン方向に 0.3m 離れた x - z 断面において、流速の RMS 値を表している。また、静圧等値面 ($C_p = -1.0$ 瞬時値) で表現した空間的な渦構造を図 6 に示す。なお、舟体中心から 0.3m 離れた位置で評価しているのは、流れ場への舟支えの影響を極力排除して評価したためである。これらの結果より、Case (3) の噴出帯よりシンセティックジェットを出力した場合、流速の RMS 値の最大値が小さくなっていることが分かる。また、流速の RMS 値が最大となる位置は流れ場制御なしの場合に比べて舟体から遠ざかっていることがわかる。渦構造についても、流れ場制御を行うと、渦の崩

壊が進んでいることが分かる。流れ場の非定常な運動が空力音の音源となり、しかも、その音源が物体に近いほど空力音の放射効率が高くなる事を考えると Case (3) の噴出帯よりシンセティックジェットを出力すれば空力音低減にかなり効果的であると考えられる。一方、Case (1)、Case (2)、Case (4) の噴出帯よりシンセティックジェットを出力した場合は、流速の RMS 値の最大値は制御なしの場合と比べて小さくなっているものの、(3) の場合より効果が小さい。また、図 6 の渦構造をみても、カルマン渦を大幅に崩壊させるまでには至っていない。従って、シンセティックジェットの噴出位置としては、舟体上流側側面の最下部が適切であるといえる。

4. 現用舟体模型を用いた風洞試験

前章に述べた通り、CFD 解析によりシンセティックジェットを用いた流れ場制御の効果について確認できた。そこで、実際にシンセティックジェットアクチュエータを試作し、現用の 2 次元舟体模型に搭載して風洞試験³⁾を行った。

4.1 シンセティックジェット搭載舟体模型

舟体模型に搭載可能なシンセティックジェットアクチュエータを試作した。アクチュエータの概観図を図 7 に示す。駆動力にはスピーカユニットを用い、一つのアクチュエータにつきジェット噴出孔を 2 つ設けている。この試作シンセティックジェットアクチュエータ 10 個を実スケールの 2 次元舟体模型に組み込み、舟体前面の最下部に $\phi 4\text{mm}$ のジェット噴出孔を設けて、各

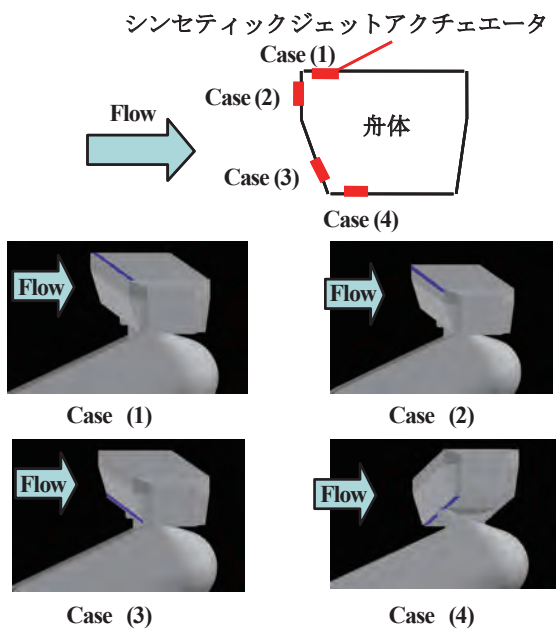


図 4 舟体に対するシンセティックジェットアクチュエータの設置位置

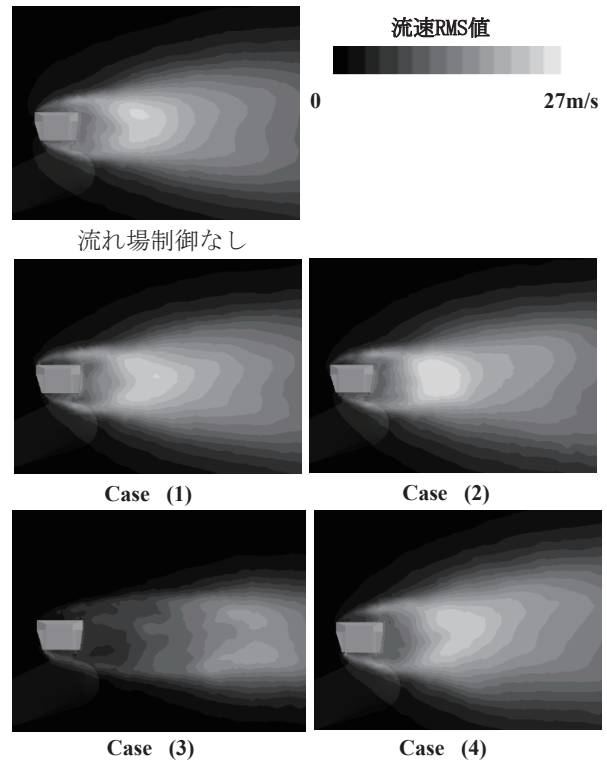


図 5 シンセティックジェットアクチュエータによる流れ場制御効果
($y=0.3\text{m}$ における z 方向流速成分の RMS 値分布)

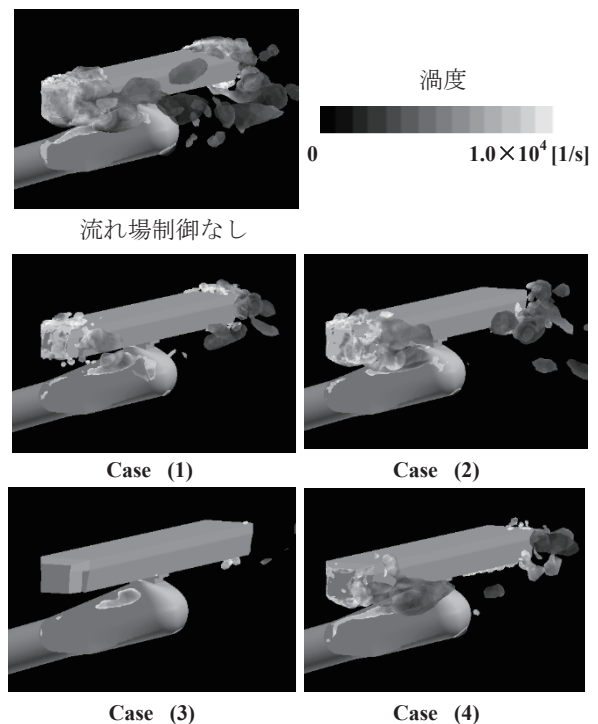


図 6 シンセティックジェットアクチュエータによる流れ場制御効果
($C_p=-1.0$ の等圧面上の渦度分布)

特集：鉄道力学

アクチュエータのジェット噴出孔とエアチューブで接続した。この舟体模型はCFD解析に供したパンタグラフモデルの舟体と同じ断面形状であるが、舟支え以下を省略した、スパン方向に一樣断面を持つ2次元模型である。スパン長は600mmであり、ジェット噴出孔の間隔は30mmである。図8のように、このシンセティックジェットアクチュエータを舟体模型内部に搭載し、舟体前面の噴出孔よりシンセティックジェットを出力した。風速0の条件でシンセティックジェットアクチュエータを駆

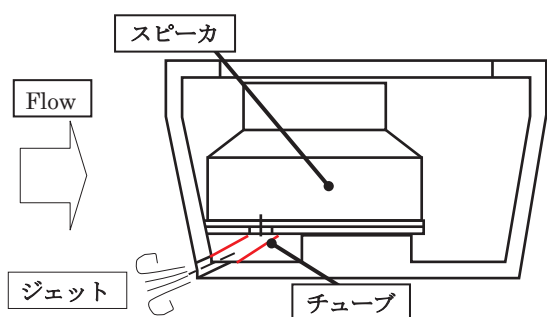


図7 スピーカ駆動型シンセティックジェット

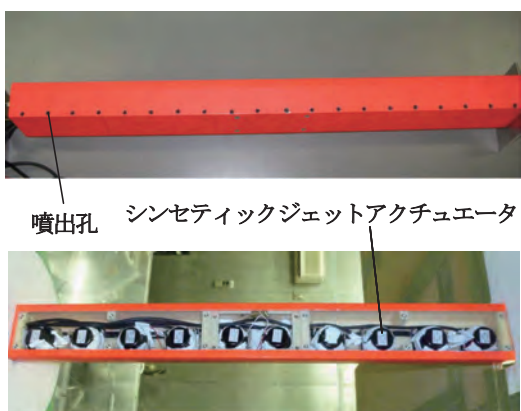


図8 内部に埋め込んだ様子

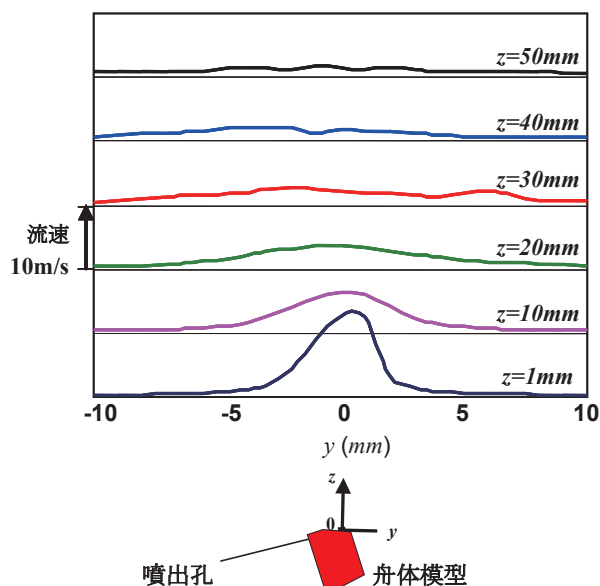


図9 シンセティックジェットの流速分布

動させ、舟体模型から噴出するシンセティックジェットの流速分布を熱線流速計（I型プローブ）により測定した。駆動周波数200Hzにおいて $\Delta z=10\text{mm}$ 毎に流速分布を計測した結果を図9に示す。ただし、シンセティックジェットは吹出し、吸込みを繰り返すため、I型プローブを用いて測定したジェットの風速波形は交流波形に対して全波整流を施したような波形となる。そのため、図9では流速測定結果のRMS値を示している。これより、噴出孔近傍では10m/sを超える流速でジェットが噴き出し、あるいは吸い込みを行っていることがわかる。これは、前節で述べたシミュレーションで与えたシンセティックジェットの流速と同程度である。CFD解析で流れ場制御の効果が見られたのは実効値7.7m/sであり、それ以上の出力を発生可能なことが確認された。

4.2 空力音測定試験

試作したシンセティックジェット搭載舟体模型から放射される空力音を、精密騒音計で測定した。なお、シンセティックジェットは200Hzで駆動させた。この周波数はCFD解析と異なるが、これは作成したアクチュエータが1000Hzにて大きな流量を出力できないためである。図10に実験装置の外観図を示す。実験は鉄道総研所有の小型低騒音風洞にて、90km/hの風速で行った。図11に舟体中心から側方に2m離れた位置に設置したマイクロホンにおいて測定した風速90km/hにおける空力音測定結果を示す。この図では、シンセティックジェットアクチュエータを駆動させた場合と、駆動させていない場合の空力音測定結果を比較している。これより、シンセティックジェットを駆動させることによって60～70Hz付近に見られるエオルス音が10dB程度低減することを確認しており、シンセティックジェットを用いた流れ場制御の有効性を確認できた。しかし、200Hz以上の周波数域では離散的な大きなピークが見られる。これはスピーカー自体の動作音である。

次に、同じく主流風速90km/hにおいて、シンセティックジェットアクチュエータから噴出される風速を常に一

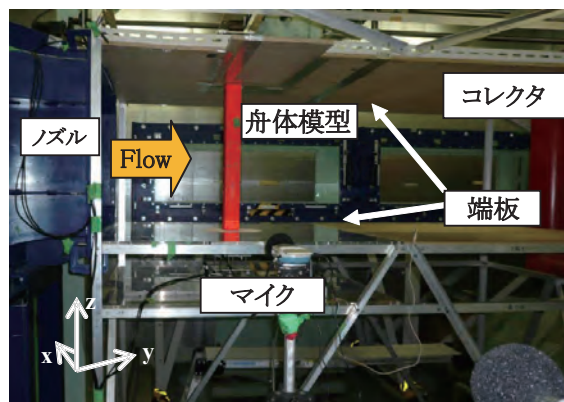


図10 風洞実験の様子

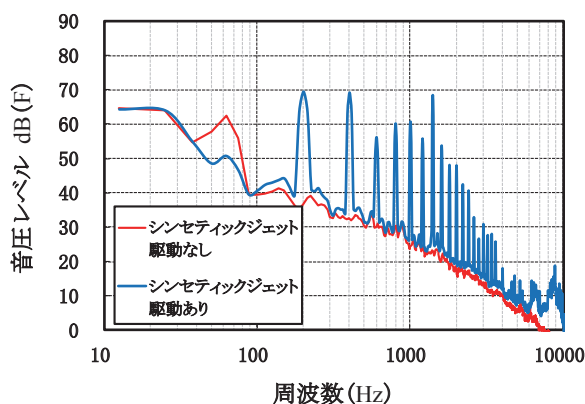


図 11 2次元舟体模型の空力音測定結果
(風速 90km/h, 駆動周波数 200Hz)

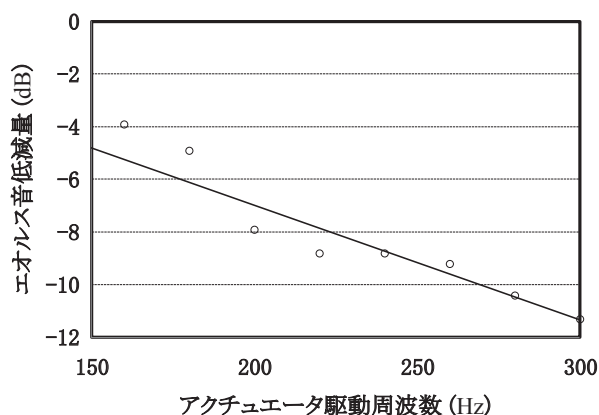


図 12 シンセティックジェットアクチュエータ駆動周波数と舟体エオルス音の低減効果

定としながら駆動周波数を変え、エオルス音低減効果の比較を行った。その結果を図 12 に示す。図 12 より、アクチュエータの駆動周波数が高いほどエオルス音の低減量が増加する傾向があることが確認できる。これは、周波数が高いほどシンセティックジェットにより誘起される渦の持つ運動量が増加するためであると思われる。

5. 舟体まわり流れ場の PIV 測定試験

上述のようにシンセティックジェットを駆動させるとエオルス音が低減することを確認した。しかし、この低減はあくまで流れ場が変化した結果として生じたものであり、シンセティックジェットを駆動させることにより流れ場自体がどのように変化したのかを確認することは重要である。そこで、PIV システムを用いて舟体後流の流れ場測定⁴⁾を行った。

5.1 試験装置及び測定方法

舟体まわり流れ場の PIV 測定の概要を図 13 に示す。図 13 に示すように、レーザーシートを供試体斜め下流側から水平に照射し、模型下方に設置した CCD カメラで

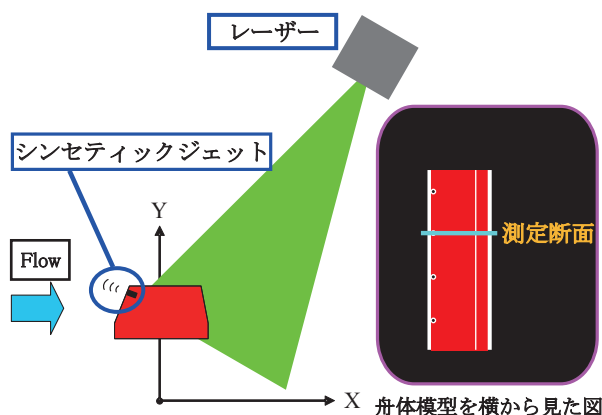


図 13 PIV 測定実験の概要

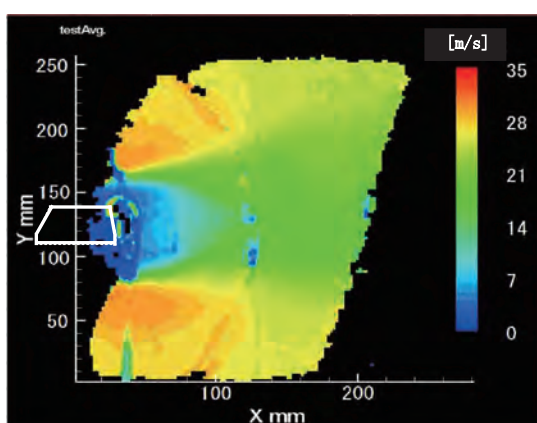
舟体スパン中心の断面(図 13 の右側)における舟体後流の流れ場を撮影した。ここで、図 13 の左側は模型下面から見た図を示しており、図 4 及び図 7 で示した断面図と上下逆になっている。また、オイルシードの放出は、風路内を回流させる方法を用いた。なお、主流方向を x 軸、主流直角水平方向を y 軸とした。シンセティックジェットアクチュエータを周波数 300Hz で動作させ、主流流速 90km/h の条件下でシンセティックジェットアクチュエータを動作させた際に形成される流れ場の変化を観察した。

5.2 PIV 測定結果

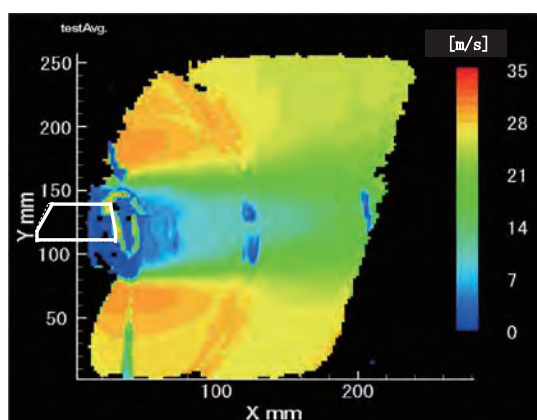
PIV 測定によって求めた、主流流速 90km/h における舟体後方の平均流速のコンター図を図 14 に示す。流れの向きは、いずれも図中の x 軸の正の方向が下流側である。図 14 より、シンセティックジェットアクチュエータを動作させると舟体後方の速度欠損領域がより後方まで伸び、また、ウェーク幅が小さくなっていることから、シンセティックジェットにより剥離せん断層の拡散が抑制されることがわかる。すなわち、シンセティックジェットアクチュエータによってせん断層が安定化し、舟体後流におけるカルマン渦の形成が抑制されていることが確認できた。

5.3 シンセティックジェットアクチュエータ動作音の低減

前章で述べたように、シンセティックジェットアクチュエータによって舟体のエオルス音を 10dB 低減することが可能であるが、その一方で、全周波数領域にわたって合算した騒音レベルはシンセティックジェットアクチュエータの動作音により増大するという問題点があった。そこで、動作音の低減策として、個々のアクチュエータからの出力波に位相差を与え、隣り合うアクチュエータ同士で動作音を打ち消し合う方法を試みた。各アクチュエータの設置間隔により生じる、それぞれのアクチュエータから騒音測定点までの経路差は、動作音の基本波である周波数 300 Hz の音波の波長に対して十分小



シンセティックジェット駆動なし



シンセティックジェット駆動あり

図 14 舟体後流の平均流速分布 (PIV 解析結果)

さいため、与える位相差は 180° とした。また、前章で示した風洞実験とは異なり、精度のよい空力音測定を行うために、風洞測定部の端板として音響透過板を用いた。主流流速 90km/h においてマイク位置 1.5m にて計測した空力騒音測定結果を図 15 に示す。位相差付与により、アクチュエータの動作周波数およびその高調波周波数におけるピーク値が大幅に低減していることがわかる。また、位相差を付与しても、エオルス音の低減効果が低下していない。以上から、隣り合うアクチュエータの出力波形に位相差を付与することで、エオルス音低減効果を損なうことなくアクチュエータの動作音を低減させることが可能であることが分かった。なお、図 11 と図 15 において、エオルス音のピーク値が異なるのは、周波数分解能の違いによるものと、マイクの計測位置の違いによるものが考えられる。

6. まとめ

スピーカー駆動型シンセティックジェットを舟体に適用して、舟体から発生する空力音の低減効果について、CFD 解析と風洞実験により検証を行った。CFD 解析の結果、カルマン渦抑制に最も効果が高いのは、舟体の上

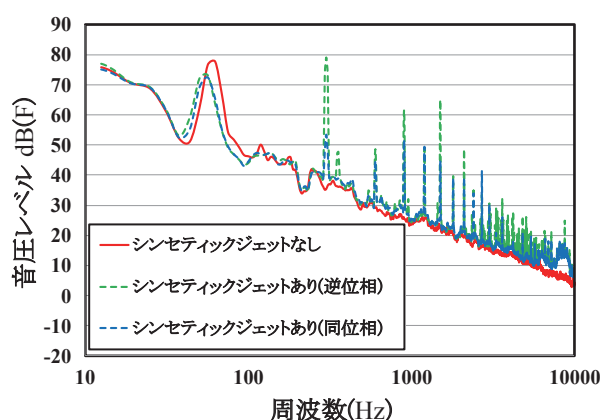


図 15 空力音測定結果

(風速 90km/h , 駆動周波数 300Hz)

流側側面の最下部位置からシンセティックジェットを出力した場合であることが分かった。そこで、この部位に噴出孔を設けてスピーカー駆動型シンセティックジェットアクチュエータを埋め込んだ舟体模型を製作し、風洞実験を行ったところ、風速 90km/h において、エオルス音が約 10dB 低減することを確認した。さらに、舟体後流の流れ場の PIV 測定により、シンセティックジェットにより舟体後流に形成されるカルマン渦の巻き込みが抑制されていることを確認した。また、スピーカーを逆位相に駆動させることで、エオルス音低減効果を維持したまま、駆動音を低減させることができた。今後は、より大きなジェット流速が実現可能なシンセティックジェットアクチュエータを検討していく予定である。

謝 辞

東京農工大学の岸下裕亮氏 (現 川崎重工業) 及び高野靖士氏 (現 修士 1 年) には多大なるご助力を頂いた。末尾ながら感謝の意を表す。

文 献

- 1) 末木健之, 池田充, 高石武久: 多孔質材の表面貼付による空力音低減効果と集電装置への応用, 鉄道総研報告, Vol.22, No.5, pp.11-16, 2008
- 2) 岸下, 美濃部, 池田, 鈴木: シンセティックジェットの適用による鈍頭形状断面を有するパンタグラフ舟体の空力音低減, 電気学会論文誌 D, Vol. 132, No.2, pp.204-210, 2011
- 3) 池田, 佐藤, 岸下, 美濃部: スピーカー型シンセティックジェットによるパンタグラフ舟体のエオルス音低減手法, 第 21 回環境工学総合シンポジウム講演論文集, No.11-8, 2011
- 4) 高野, 光用, 佐藤, 池田, 新井: PIV を用いたシンセティックジェットによるパンタグラフ舟体まわりの流れ場制御効果の検討, pp.573-576 (S3-2-4), J-RAIL2011