

# 流れ場制御による パンタグラフ舟体の空力音低減手法の検討

光用 剛\* 佐藤 祐一\* 池田 充\*\*  
山崎 展博\*\*\* 末木 健之\*\*\* 深潟 康二#

A Study on Aerodynamic Noise Reduction Method of a Pantograph Head Using Flow Control Techniques

Takeshi MITSUMOJI Yuichi SATO Mitsuru IKEDA  
Nobuhiro YAMAZAKI Takeshi SUEKI Koji FUKAGATA

Reduction of aerodynamic noise emitted from the pantograph head is one of the very important subjects for the speed-up of Shinkansen trains from an environmental point of view. In this study, two kinds of aerodynamic noise reduction methods using flow control techniques are investigated. One is a steady suction method and the other is a flow control method applying synthetic jet actuators. The results of wind tunnel tests show that both techniques can reduce the narrow-band-peak noise emitted from the pantograph head.

キーワード：パンタグラフ，舟体，空力音，流れ場制御，CFD，PIV

## 1. はじめに

新幹線の沿線環境負荷低減や高速化にとって、沿線騒音、特に空力音の低減は重要な課題となっている。新幹線車両の構成要素のうち、パンタグラフは主要な空力音源のひとつとなっており、なかでも舟体（図1）についてはその寄与が大きいことがわかっている。舟体から生じる空力音は、主として舟体背後に生じるカルマン渦に起因するエオルス音と、乱流により生じる広帯域音が複合した音である。このうち、前者は狭帯域音であるが卓越した音であるため、その発生抑制は重要である。過去の研究によると、舟体断面形状の平滑化や貫通孔の設置により、カルマン渦の発生を抑制してエオルス音を低減できることが示されている。これらの手法は短期的な実用化を目指した空力音低減対策であり、流体力学的には受動的に流れを整流する手法に分類される。しかし、さらなる空力音の低減を実現するためには、流れ場を能動的に制御する手法も必要になると考えられる。

そこで、鉄道総研では近年、流体力学分野で注目を集めている流れ場制御手法に着目し、流れ場制御を用いた空力音低減手法をパンタグラフに適用する検討を実施している。過去の報告では、プラズマアクチュエータ<sup>1) 2)</sup>

(以下、PA と略記) やシンセティックジェットアクチュエータ<sup>3) 4)</sup> (以下、SJA と略記) を舟体に適用した基礎検討結果を報告した。本稿でははじめに、PA の流れ場制御メカニズムを高風速域で実現する手法として提案した、定常吸い込み手法に関する検討結果について報告する。次に、SJA の流れ場制御効率向上についての検討結果について報告する。

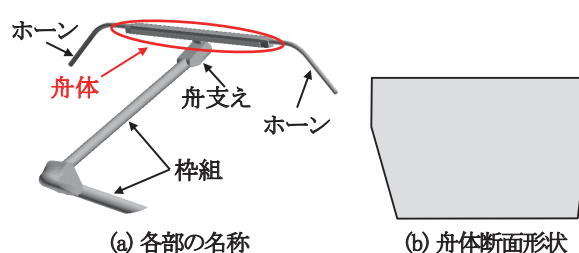


図1 新幹線用パンタグラフの例

## 2. 定常吸い込み手法

### 2.1 PAに関する検討結果

PA とはアクチュエータ表面にプラズマを発生させ、その作用によって物体表面に沿う方向に流れを誘起するとともに周囲の流体を引き寄せる装置である（図2）。図3は1/2スケールの舟体模型の剥離点近傍にPAを適用した場合の、舟体後流の流速分布測定結果である<sup>2)</sup>。試験時の主流速は4.6m/sであり、舟体厚さに基づいて算出したレイノルズ数は約6,900である。また、PAは

\* 鉄道力学研究部 集電力学研究室  
\*\* 鉄道力学研究部  
\*\*\* 環境工学研究部 騒音解析研究室  
# 慶應義塾大学 理工学部機械工学科

特集：鉄道力学

アクチュエータ近傍で 1 m/s 程度の誘起流が得られる条件で動作させている。図 3 を参照すると、PA を適用することによって後流領域の y 方向の幅が狭まるとともに速度欠損領域が下流側へ伸び（図 3 (b) 左図）、かつ、乱れが低減されるとともに乱れの大きさが極大となる領域が下流側へ移動する（図 3 (b) 右図）様子が確認できる。このことから、せん断層が安定して下流側へ下流し、カルマン渦の巻き込み位置が下流側へ移動して巻き込みが弱まったものと推察される。したがって、PA を舟体に適用することによって、エオルス音をはじめとした空力音を低減できることが期待される。しかし、現時点では PA による誘起流速は小さいため、風速 300km/h 程度の高風速域に直ちに適用するにはまだ課題が多い。

そこで、本研究では PA が周囲の流体を引き寄せる作用に着目し、高風速域においてもその作用を実現する流れ場制御手法として、定常吸い込み手法を提案し検討を行った。なお、PA は流体に対して体積力を作用させて周囲の流体を引き寄せるため、周囲の流体に対して流量ではなく運動量を付与して流れを制御するデバイスである。これに対して、定常吸い込み手法では周囲の流体に

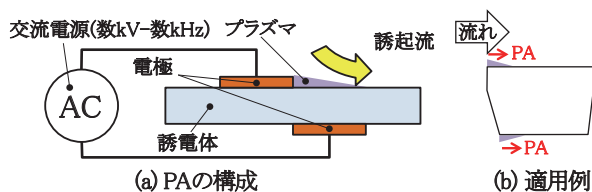


図 2 PA の構成と舟体への適用例 ((b) の三角形領域はプラズマ領域、矢印は誘起流の方向を表す)

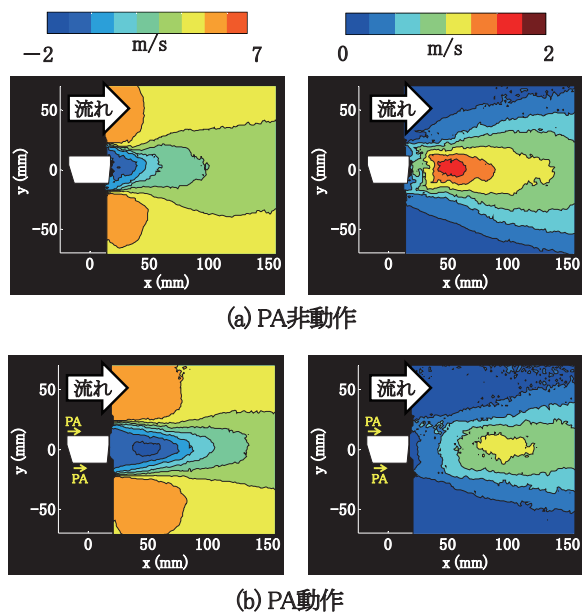


図 3 PA を適用した舟体後流の流速分布測定結果 (風速 4.6m/s, 左図：主流方向の平均流速, 右図：主流直角方向流速の標準偏差)

対して流量そのものを減じることになるため、厳密には流れ場制御原理そのものは PA と同じではない。しかし、周囲の流体を物体表面に引き寄せるといふ点では PA と同等の作用を生じさせることができると推測される。

2.2 定常吸い込み手法の概要

定常吸い込み手法を適用した舟体模型の概要図を図 4 に示す。本手法においては、中空の実物大舟体模型の上下面の剥離点近傍に、舟体表面に対して垂直な方向に流れを吸い込むための小穴 (φ 2 mm の丸穴) を多数設けて、小穴から定常的に吸い込みを行った。小穴の配置は流れ方向、スパン方向ともに 5mm ピッチとし、スパン方向には 1 列あたり 103 点の小穴を設けている。また、小穴の開口パターンは、剥離点に近い位置から順に 1 列のみ開口した条件 (図 4 (a)、以下、1 列開口と呼ぶ)、2 列のみ開口した条件 (図 4 (b)、以下、2 列開口と呼ぶ) および 4 列開口した条件 (図 4 (c)、以下、4 列開口と呼ぶ) の 3 条件を設定し、試験に供した。なお、吸い込み穴の開口条件は、使用しない小穴をテープで塞ぐことで設定した。

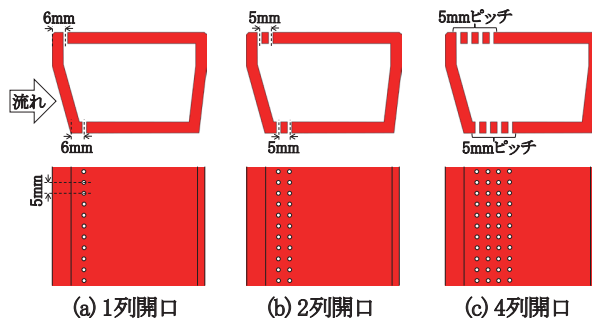


図 4 定常吸い込み手法を適用した舟体模型の概要図 (上段：側面図, 下段：底面図)

2.3 風洞試験概要

本検討においては、風洞試験において PIV (粒子画像速度計) による舟体後流領域の流速分布測定と、無指向性マイクロホンによる空力音測定を実施した。風洞試験は (公財) 鉄道総合技術研究所の小型低騒音風洞 (開放型計測部, 吹出口 720mm × 600mm, 最大風速 42m/s) において実施した。試験風速は 25m/s であり、舟体厚さに基づいて算出した試験時のレイノルズ数は約 74,400 である。図 5 に風洞試験の概要図を示す。風洞試験では風路内に流れの二次元性を確保するための端板を設置し、端板間に舟体模型のスパン方向が鉛直方向と一致するように舟体模型を設置した。舟体模型のスパン方向端部はダクトを用いて送風機に接続し、送風機から強制的に排気を行うことで舟体模型の小穴から吸い込みを行った。吸い込みの強さは送風機の回転数を制御することで調整した。このとき、ダクトの途中に流量計を設置し、

吸い込み時の流量  $Q$  を測定した。また、流量  $Q$  を小穴の総開口面積で除すことで、小穴一か所あたりの断面平均流速  $U_s$  を算出した。以下では吸い込み流量  $Q$  および断面平均流速  $U_s$  を総称して、吸い込み強度と呼ぶこととする。

PIV による流速分布測定では、舟体模型のスパン方向中心を測定断面として流速分布測定を行った。このとき、舟体の中心位置を原点とし、主流方向を  $x$  軸、舟体の厚み方向を  $y$  軸、スパン方向を  $z$  軸と定義した。

無指向性マイクロホンによる空力音測定においては、舟体模型中心から  $-y$  方向に 2m 離れた位置、かつ下部の端板と同じ高さにマイクロホンを設置した。この位置は舟体模型から見ると舟体底面側から 2m 離れた位置に相当する。なお、本試験に用いた端板のうち上部の端板を音響透過性を有する端板とし、底面の端板と同じ高さにマイクロホンを設置することで、端板からの反射音の影響が小さくなるよう配慮した。

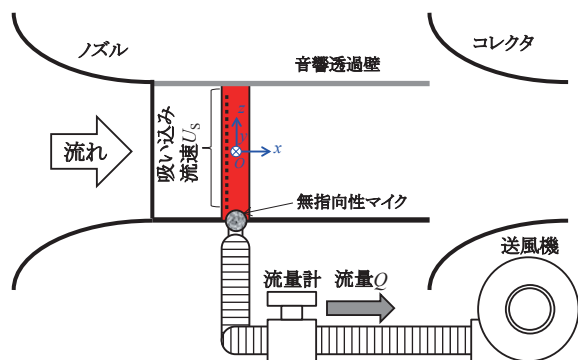


図5 風洞試験概要図

## 2.4 PIV による流速分布測定結果

PIV による流速分布測定結果の代表例として、2列開口条件における測定結果を図6に示す。図6を俯瞰すると、舟体にPAを適用した場合の流れ場の変化(図3)と同様に、吸い込み強度を大きくするほど後流領域の  $y$  方向の幅が狭まり、乱れが低減されている様子が確認できる。ただし、詳細に流れ場の変化を確認すると、図3(b)左図では速度欠損領域が下流側へ伸びているのに対して、図6(b)左図、図6(c)左図では、速度欠損領域の下流への伸びは見られない。また、図3(b)右図では乱れが極大となる領域が下流側へ移動しているのに対して、図6(b)右図、図6(c)右図では、乱れが極大となる位置は変化せず、乱れの大きさのみが低減している。このことから、定常吸い込み手法を適用した場合はせん断層が下流側へ安定的に伸びるのではなく、カルマン渦の巻込み位置は変わらずに巻込みのみが弱まるものと考えられる。この違いは、PAは流体の流量を減じることなく体積力によって流体を引き寄せるのに対し、本手法は流量そのものを減じているといった流れ場制御メカニズムの違いに起因している可能性がある。また、

それ以外にも、試験時のレイノルズ数が、PAに関する試験と定常吸い込み手法に関する試験とで10倍以上異なっていることによる影響も考えられ、今後検討を行う必要がある。

以上、定常吸い込み手法を適用した場合の詳細な流れ場の変化はPAを適用した場合は厳密には異なる点があるものの、定常吸い込み手法を適用することで後流領域の幅が狭まり、乱れが低減するといった点では、PAを適用した場合と類似する流れ場制御効果を得られることが確認できた。なお、図6に示した2列開口条件においては、吸い込み穴から主流速と同程度の流速で吸い込みを行えば、後流の乱れを顕著に低減することができることが確認された(図6(c))。

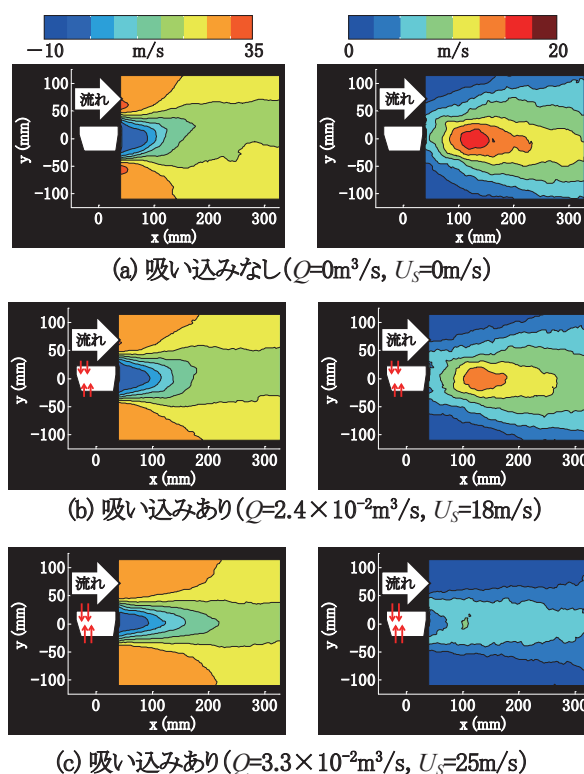


図6 定常吸い込み手法を適用した舟体後流の流速分布測定結果(2列開口、風速 25 m/s、左図：主流方向の平均流速、右図：主流直角方向流速の標準偏差)

## 2.5 空力音測定結果

空力音測定結果の代表例として、図7に2列開口条件における空力音の1/3オクターブバンド周波数分析結果を示す。図7より空力音測定結果の傾向を俯瞰すると、吸い込み強度が大きくなるほど、カルマン渦に起因するエオルス音である63Hzバンド付近のピーク音のレベルが減少する一方、250Hz以上の周波数帯において騒音レベルの増加が見られる。特に、図7の◇のプロットと△のプロットでは、吸い込み強度が僅かに異なるだけで、

特集：鉄道力学

空力音のスペクトルが大きく異なっている様子が確認できる。したがって、吸い込み制御においては、ある一定の吸い込み強度を境に流れ場ならびに空力音が顕著に変化する傾向があると推察される。

次に、吸い込み制御における流れ場制御効果が、吸い込み流量  $Q$  と流速  $U_s$  のどちらに依存するかについて検討を行った。本検討においては、50Hz バンドから 80Hz バンドの空力音のパワー和をエオルス音の騒音レベルと定義し、図 8 に示すように図 4 (a) ~ 図 4 (c) に示した 3 つの開口条件におけるエオルス音の騒音レベルを吸い込み流量  $Q$  および断面平均流速  $U_s$  に対して描画して比較を行った。図 8 を参照すると、図 8 (b) よりは図 8 (a) において 3 つの開口条件のエオルス音の騒音レベルがほぼ同じ曲線状に分布しており、定常吸い込み手法の流れ場制御効果は断面平均流速 (図 8 (b)) よりは吸い込み流量 (図 8 (a)) によって整理される傾向があることがわかる。なお、図 8 (a) からは吸い込み流量が  $3.0 \times 10^{-2} \text{m}^3/\text{s}$  程度のある一定の値を超えると、顕著にエオルス音の騒音レベルが低減する傾向があることがわかる。

最後に、図 4 に示した 3 つの開口条件について、エオルス音の騒音レベルが、図 7 の 2 列開口の  $\Delta$  のプロットと同程度となった吸い込み強度条件を抽出して、空力音のスペクトルを比較した結果を図 9 に示す。先述の議論により、図 9 においては吸い込み流量は概ね同程度の値であるが、断面平均流速は開口条件によって大きく異なっている。図 9 より、定常吸い込み手法を適用した各条件の空力音のスペクトルは、エオルス音の周波数付近の周波数帯だけでなく、250Hz 以上の周波数帯においてもほぼ同じ傾向を示すことがわかる。図 9 の開口条件に

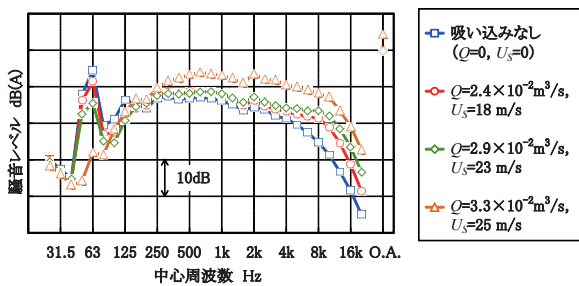


図 7 空力音測定結果 (2 列開口, 25m/s)

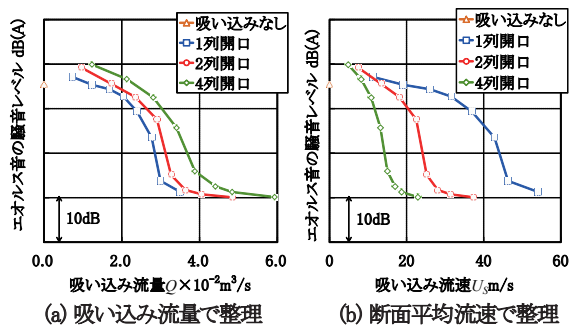


図 8 エオルス音の騒音レベルの比較 (風速 25m/s)

おいては、断面平均流速  $U_s$  が異なることから、250Hz 以上の空力音の増加要因が吸い込み流れ自体による空力音であるとすると、断面平均流速が大きくなものほど騒音レベルが増加することが考えられる。しかし、そう言った傾向が見られるのは 8kHz 以上の周波数帯のみで。また、別途実施した無風時に吸い込みを行った場合の騒音測定結果からは、無風時の各周波数バンドの騒音レベルは、送風時 (図 9) の騒音レベルよりも 5dB (A) ~ 10dB (A) 程度小さいことを確認している。以上のことから、250Hz から 6.3kHz の周波数帯における騒音レベルの増加要因は、吸い込み流れによる空力音ではなく、吸い込み流れと剥離せん断層との干渉によって生じた空力音であると考えられる。今後は、この空力音の増加要因について現象把握を進めると共に、全体音を低減する方法について検討を進める予定である。

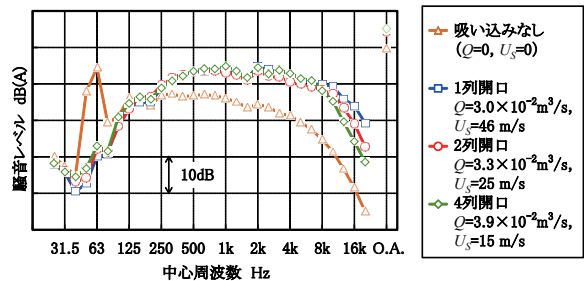


図 9 開口条件による空力音の比較 (25m/s)

3. シンセティックジェットアクチュエータ

3.1 シンセティックジェットアクチュエータの概要

図 10 に SJA の概要図を示す。SJA とは、噴出口を有する容器の容積を周期的に変化させることで、噴出口から交互に吹き出しと吸い込みを行って流体中に断続的に渦輪を生成するデバイスのことである。SJA は外部からの流体の供給が不要なうえ、動作周波数の変更が可能であることから、PA とともに近年流れの制御デバイスとして注目されているものである。

これまでの研究により、スピーカ駆動型 SJA を舟体に適用することで、風速 25 m/s においてエオルス音のピーク音を低減可能であることを確認している<sup>3) 4)</sup>。しかしながら、SJA の動作音が大きく全体音は増加してし

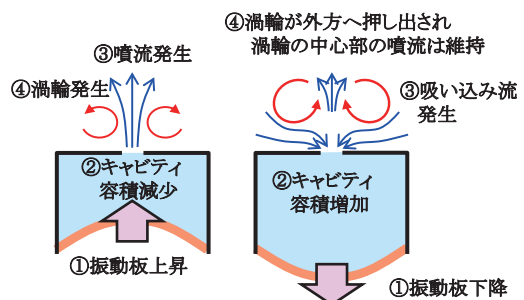


図 10 SJA の概要図

まうことや、風速が高くなると相対的に SJA の出力が小さくなり、エオルス音の低減効果が得られなくなるといった点が課題として残されている。そこで、本研究では小さな SJA 出力で高風速域においても空力音低減効果を得る事を目指して、噴出口形状の改良による流れ場制御効率の向上について検討を行った。

### 3.2 噴出口形状変更による渦輪の特性調整

定常的な噴流については、噴出口を矩形とし、そのアスペクト比（短辺に対する長辺の比）を変更することで噴流の拡散の様子が変化することが知られている<sup>5)</sup>。また、この現象は SJA においても生じることが報告されている<sup>6)</sup>。そこで、CFD（Computational Fluid Dynamics）解析により、SJA の噴出口のアスペクト比の変更による渦輪の特性調整について検討を行った。図 11 に CFD 解析に用いた計算格子を示す。本 CFD 解析では、直径 150mm、高さ 100mm の円筒状の領域の底面中心に、アスペクト比の異なる 3 種類の SJA の噴出口を設定し、LES（Large Eddy Simulation）による非定常流れ場解析を実施した。SJA の噴出口における境界条件は、空間的に一様な速度流入境界とし、時間的には正弦波状に噴出口の流速を変化させることで、簡易的に SJA 噴出口での流れを模擬した。噴出口における流入流速の振幅は 30m/s、周波数は 500Hz である。その他の境界については、円筒底面が滑りなし境界、他の境界は圧力出口境界とし、時間刻みは  $\Delta t = 5.0 \times 10^{-5}$  sec とした。

図 12 は各噴出口形状について、ある同じ時刻の渦の様子を可視化するために、渦度絶対値の等値面上に流速ベクトルの大きさを着色したものである。図 12 より、噴出口のアスペクト比が 1 に近い場合（図 12 (a)）、渦輪は噴出口形状をほぼ保った状態で移流しているのに対し、アスペクト比が大きい場合は渦輪が噴出口形状を保たずに変形している様子が確認できる。図 13 は噴出口中心において、噴出口の長軸（図中の紙面方向）に垂直な断面内の渦度の絶対値の分布を描画したものである。図 13 より、噴出口のアスペクト比が大きいほど、噴出口近傍で端軸方向に渦が拡散する一方、アスペクト比が小さい場合は逆に噴出口から遠方まで大きく拡散するこ

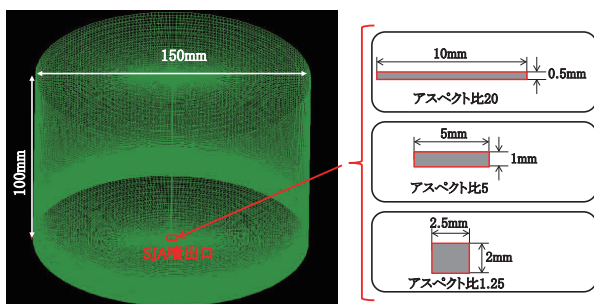


図 11 CFD 解析の計算要素（要素数約 300 万要素）

となく渦が移流する様子が確認できる。これらの結果から、噴出口のアスペクト比を変更することで渦輪の挙動を調整することが可能であり、制御対象とする流れ場に於いて最適な挙動の渦輪が得られるように噴出口のアスペクト比を選定することができれば、流れ場制御効率を向上できる可能性があると考えられる。

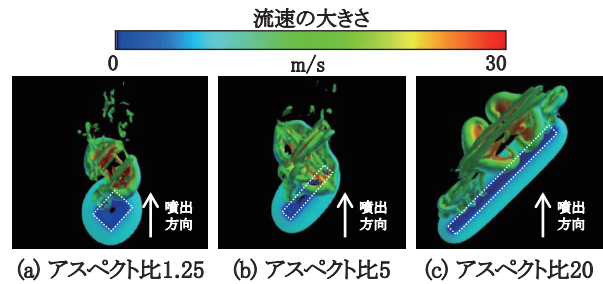


図 12 CFD 解析で得られた渦輪の等値面（瞬時場）

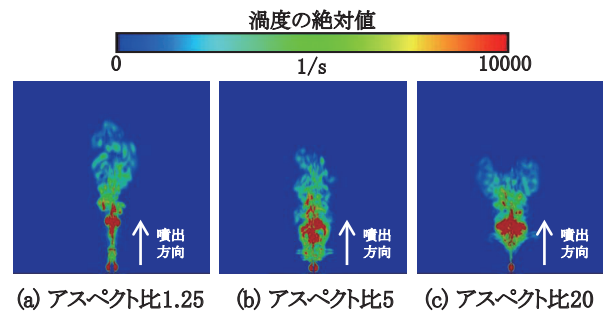


図 13 CFD 解析で得られた渦度分布（瞬時場）

### 3.3 噴出口形状変更による流れ場制御効率向上

CFD 解析の結果に基づき、SJA の噴出口のアスペクト比を変更することで、舟体まわりの流れ場制御効率を実際に向上することが可能であるのか検討を行った。具体的には、風洞試験を実施し、噴出口形状の異なる SJA を実物大舟体模型に適用した場合の空力音低減効果の確認を行った。図 14 に本検討に用いた舟体模型の概要図を示す。舟体模型の底面上流側にスピーカ駆動型 SJA を適用し、SJA の噴出口を開口部面積が等しい 3 種類の形状（円形、長方形（横長）、長方形（縦長））に変更し、同じ動作条件で SJA を動作させて試験を実施した。ここで、長方形（横長）と長方形（縦長）は同じ形状の噴出口の向きを 90° 変えて設置したものであり、前者は噴出口の長軸が主流と直角になるように、後者は長軸が平行になるように設置したものである。また、円形はアスペクト比 1 の矩噴出口の代わりに採用している。風洞試験は鉄道総研小型低騒音風洞で実施した。供試体およびマイクロホンの設置方法は 2.3 節と同じであり、試験風速は 25m/s である。また、SJA からの最大噴出流速は約 43m/s、動作周波数は 200Hz とした。

風速 25m/s における空力音測定結果を図 15 に示す。図 15 より、噴出口形状によって 60 Hz 付近のエオルス

特集：鉄道力学

音のピークレベルの低減量が異なり、長方形の噴出口の長辺を主流と平行な向きに設定した長方形（縦長）が、最もエオルス音のピークレベルを低減することができることがわかった。SJA の動作条件は全て同一であることから、SJA の噴出口形状を調整することで、SJA から生じる渦輪の特性が変化し、その結果、流れ場制御効率が向上したものと考えられる。なお、図 15 においてスピーカ上に生じているピーク音は SJA を動作させているスピーカ自体の動作音およびその高調波成分であり、全体音を低減するためにはさらに流れ場制御効率を向上し、小さなスピーカ出力で流れ場を制御することが必要である。

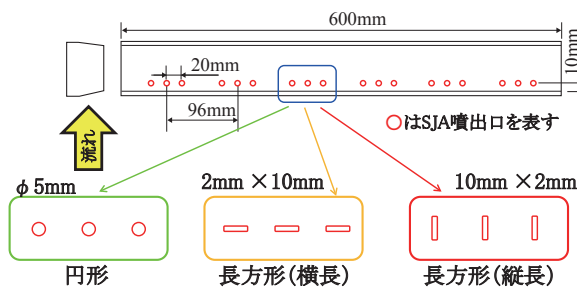


図 14 SJA を適用した舟体模型の概要図

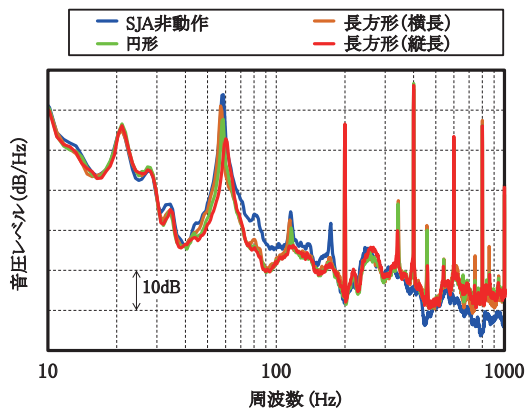


図 15 SJA を適用した舟体模型の空力音測定結果  
(風速 25 m/s)

4. まとめ

本研究では、舟体まわりの流れ場制御手法として、定常吸い込み手法に関する基礎検討および、SJA を適用する手法の流れ場制御効率向上について検討を行った。

定常吸い込み手法に関する基礎検討からは以下のことがわかった。

(1) 舟体の剥離点近傍において定常的に吸い込みを行うことで、カルマン渦の巻込みが弱まり、エオルス音が低減する。

(2) 定常吸い込み手法の流れ場制御効果は、吸い込み口の流速よりも吸い込みの流量によって整理される。

(3) 定常吸い込み手法によって剥離を抑制した場合、広帯域で騒音レベルが増加する。これは、吸い込み流と剥離せん断層の干渉に起因すると考えられる。

SJA による流れ場制御効率向上についての検討結果からは以下のことがわかった。

(4) SJA の噴出口のアスペクト比を変更することで、渦輪の特性調整が可能である。

(5) SJA の噴出口の形状を変更することで、同じ動作条件で SJA を適用した場合でも、エオルス音低減効果を向上することが可能である。

今後は、高風速域で全体音を低減できる空力音低減手法を目指して、流れ場制御効率のより一層の向上に取り組むと共に、これらの手法に基づいた実用的な空力音低減手法の提案を行う予定である。

謝 辞

PA および定常吸い込み手法に関する研究の実施にあたり、元慶應義塾大学大学院生の瀧浪遼氏、慶應義塾大学大学院生の梶島治彦氏に多大なるご助力を頂いた。また、SJA に関する研究の実施においては、元東京農工大学大学院生の高野靖士氏、東京農工大学大学院生の小澤俊史氏に多大なるご尽力を頂いた。末筆ながらここに感謝の意を表す。

文 献

- 1) 深瀉, 山田 ほか: プラズマアクチュエータの基礎と研究動向, ながれ, Vol. 29, pp. 243-250, 2010.8
- 2) 光用, 高石 ほか: プラズマアクチュエータによるパンタグラフ舟体の空力音低減手法の基礎検討, 鉄道総研報告, Vol. 27, No. 10, pp.11-16, 2013
- 3) 岸下, 美濃部 ほか: 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, 2012
- 4) 佐藤, 池田 ほか: 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, 鉄道総研報告, Vol.26, No.8, pp.5-10, 2012
- 5) K. B. M. Q. Zaman, "Axis Switching and Spreading of an Asymmetric Jet-Role of Vorticity Dynamics," AIAA 95-0889 (1995).
- 6) B. R. Ravi, and R. Mittal, "Numerical Study of Large Aspect-Ratio Synthetic Jets," AIAA 2006-0315 (2006).