

# 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

光用 剛\* 高石 武久\*\* 佐藤 祐一\*  
池田 充\* 末木 健之\*\*\* 深潟 康二#

## A Basic Study of Aerodynamic Noise Reduction Method of a Pantograph Head using Plasma Actuators

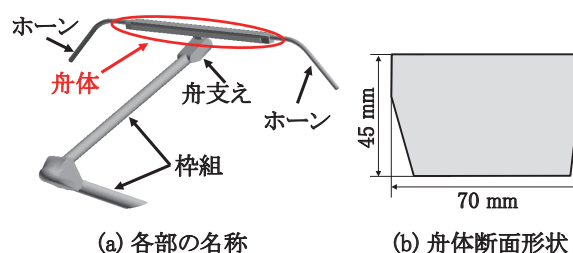
Takeshi MITSUMOJI Takehisa TAKAISHI Yuichi SATO  
Mitsuru IKEDA Takeshi SUEKI Koji FUKAGATA

Reduction of aerodynamic noise emitted from a pantograph head is a very important subject for the speed-up of Shinkansen trains for the purpose of the environmental preservation. In this study, control of flow around the pantograph head using plasma actuators is studied. The results of the wind tunnel tests show that the plasma actuator can prevent the flow separation from the pantograph head surface and weaken the Karman vortices. In addition, CFD results suggest that the plasma actuator can reduce aerodynamic noise emitted from the pantograph head.

キーワード：パンタグラフ、舟体、空力音、プラズマアクチュエータ、流れ場制御、CFD

### 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、なかでも架線としゅう動する舟体（図1）についてはその寄与が大きいことがわかっている<sup>1)</sup>。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、乱流境界層により生じる広帯域音の複合した音である。このうち、前者は卓越した狭帯域音であるため、その発生抑制は重要である。過去の研究<sup>2)</sup>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。一方、パンタグラフ舟体については、集電性能の要件から、迎角やすり板摩擦による形状変化に対して揚力特性が過敏でないこと、追従性能の点から舟体質量が小さいこと、また、保守の面からは舟体構造が出来るだけ簡素であることなどが要求される。一般に、これら舟体に求められる要件と空力音を低減する方法とはトレードオフの関係にあり、現状では図1(b)に示すような矩形を基本とした鈍頭な断面形状の舟体が採用されている。



(a) 各部の名称 (b) 舟体断面形状

図1 新幹線用パンタグラフの例

これらの事柄を踏まえ、著者らは現在、矩形の舟体形状を維持したうえで流れ場制御手法を用いて空力音の低減を実現する手法の検討を行っている。本稿では、物体表面近傍の流れを制御する手法として取り組んでいるプラズマアクチュエータ（以下、PAと略記する）を用いた空力音低減手法に関する研究結果について報告する。PAとは、近年注目を集めている流れ場制御デバイスであり、アクチュエータ表面にプラズマを発生させ、プラズマの作用によって物体表面に沿う方向に流れを誘起するものである。図2に代表的なPAの構成を示す。PAはオフセットさせて配置した電極で誘電体を挟む構造をしており、電極間に数kV-数kHzの交流電圧を印加することによって放電を起こしプラズマを発生させる。このとき、プラズマに作用する電磁力によって流体中に運動量が供給され、物体表面に沿う方向に流れが誘起されるとともに周囲の流体が引き寄せられる。

現時点では、PAは出力の面などから産業分野に適用

\* 鉄道力学研究部 集電力学研究室  
\*\* 元 環境工学研究部 騒音解析研究室  
\*\*\* 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

するにはまだ課題が多い。しかし、PAは薄く可動部を持たないうえ、安価な材料で製作可能などの利点があり、近年、流れ場制御の基礎研究に盛んに用いられている。例えば文献3) 4) では翼や円柱の表面にPAを適用することで剥離点が下流側へ移動し、後流での渦の生成が抑制される事例などが紹介されている。したがって、PAをパンタグラフ舟体まわりの流れの剥離制御やカルマン渦の生成抑制に利用することができれば、新しい空力音低減手法につながる知見が得られると期待される。しかしながら、舟体は円柱や翼などの曲線的な形状の部材とは異なり、角部を有する直線的な断面形状を有する部材である。そのため、舟体まわりの流れ場は角部において剥離点が固定されている場合が多く、円柱や翼の場合のようにPA等のアクチュエータにより剥離点が下流側へ移動する効果は見込めないなど、PAによる流れ場制御効果については未知の部分が多い。

そこで本研究では、PAを舟体に適用した場合の流れ場制御効果について、風洞試験とCFD(Computational Fluid Dynamics)解析による基礎検討を行った。風洞試験では、低速域でPIV(粒子画像速度計, Particle Image Velocimetry)による流速分布測定を実施し、PAが後流の流れ場に及ぼす影響を確認した。高速域での流れ場制御効果と空力音低減効果についてはCFD解析による検討を行った。

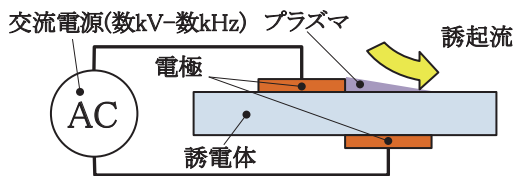


図2 プラズマアクチュエータ (PA)

2. 風洞試験による流れ場制御効果の確認

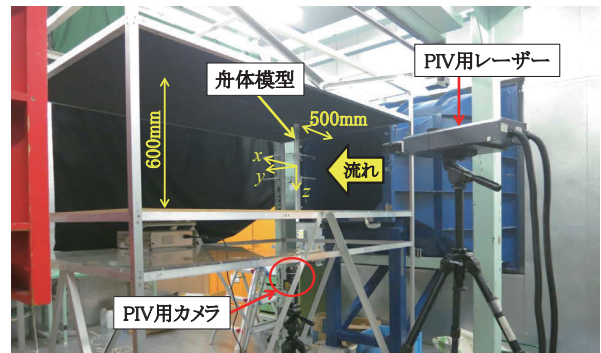
2.1 風洞試験概要

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。図3に風洞試験の様子を示す。供試体は後述する舟体模型とし、舟体模型のスペン方向軸が鉛直方向軸となるよう風路内に設置して舟体後流の流速分布測定を実施した。

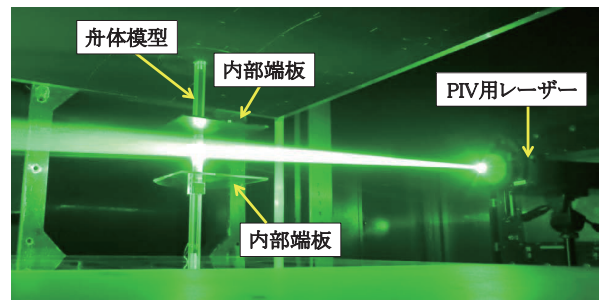
試験風速はPAの出力を考慮し、風洞の最低風速である4.6m/sとした。また、風洞試験における座標系は、図3(a)に示すように模型中心を原点にとり、主流方向をx軸、模型のスペン方向(鉛直下方を正)をz軸、それらの軸に垂直で、舟体模型の上面側(すり板側)が正となる向きをy軸とした。

舟体後流の流速分布測定はPIVを用いて実施した。PIVとは画像によって特定の平面内の流速分布を計測す

る手法であり、その方法および原理は以下のようなものである。まず、気流中に微小な粒子を放出し、シートレーザーを照射して短い時間間隔で2枚の画像を撮影する(図3(b))。撮影した2枚の画像の粒子分布を比較演算し、微小な粒子群の移動量と撮影時間間隔から撮影画像内における流速ベクトルを算出する。以上により、撮影画像内における瞬時流速分布を得ることができる。本試験では、各条件について瞬時流速分布を200回取得し、得られた流速分布のアンサンブル平均によって流れ場の評価を行った。



(a) 試験装置全体図



(b) PIVの画像撮影時の様子(下流側から撮影)

図3 風洞試験の様子

2.2 供試体

供試体は図1(b)の断面形状を1/2に縮小した舟体模型を使用した。舟体模型供試体のスペン長は風路寸法に合わせて600mmとし、このうち、PAを適用する部位は、PAを動作させる電源装置の出力を考慮して中央部の100mmの領域とした。さらに、PAの端部より外方20mmの位置には流れを仕切るための端板を取り付け、PAを適用した部位と適用していない部位の流れ場が相互に干渉することを防いだ(図3(b), 図5(a))。

次に、模型の縮尺について説明する。一般に、舟体など柱状部材まわりの流れを風洞で再現する場合には、後流のカルマン渦のスペン方向の構造が再現できるよう、断面の大きさに対して十分なスペン長が確保できる事が望ましい。しかし、本試験では上述のようにPA適用部位のスペン長を100mmに固定したため、図1(b)の実寸大の断面を採用した場合、PA適用部位のスペン長を

断面の大きさに対して2倍程度しか確保できない。そこで、断面の大きさを1/2に縮小し、PA適用部位のスペン長を断面の大きさに対して4倍程度確保した。

### 2.3 PAの適用

文献3)などによると、円柱など鈍頭部材まわりの流れ場に対しては、剥離点近傍から下流側に向かって流れを誘起するようにPAを適用した場合に、顕著な流れ場制御効果が得られることが報告されている。この知見を参考に、舟体に対するPA適用位置を図4のように決定した。舟体まわりの流れの剥離点は、図4(a)に示す上流側上下角部であり、Case1は剥離点の直前、Case2は剥離点の直後に、それぞれ流れに沿う方向にPAを適用した条件である。

PAの製作は市販の銅箔テープ(厚さ35 $\mu$ m)とカプトンテープ(厚さ50 $\mu$ m)を用いて行った。供試体表面をカプトンテープで絶縁した後に、下部電極として銅箔テープを、誘電体としてカプトンテープを、上部電極として銅箔テープをそれぞれ順に貼りつけることでPAを構成した。

PAの動作は疑似矩形波の交流電力を印加することで行った。印加電圧は8kV、周波数は4kHzである。図5に舟体模型上に構成したPAとその動作時の様子を示す。なお、別途実施したPAの誘起流速測定結果<sup>5)</sup>から、本動作条件においては、PAから1m/s程度の誘起流が生じることを確認している。

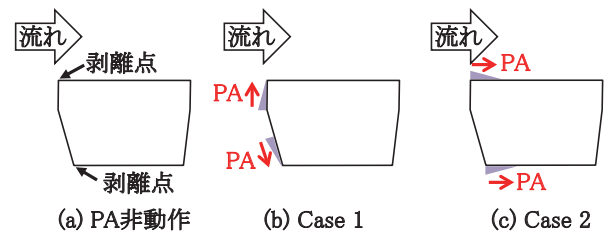


図4 PA適用位置(三角形はPAのプラズマ領域を、矢印は誘起流の方向を表している)

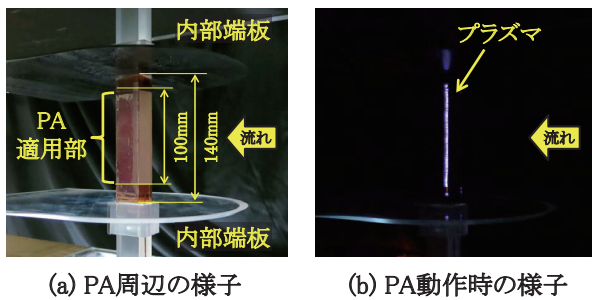


図5 舟体模型上に構成したPAの様子

### 2.4 風洞試験結果

主流速4.6m/sにおける流速分布測定結果を図6に示す。舟体厚さに基づくレイノルズ数は約6,900である。

図6のうち、(a)～(c)はx方向(主流方向)流速の平均値を、(d)～(f)はy方向(主流直角方向)流速の標準偏差を表している。PAが非動作の場合については、舟体背後に後流領域、すなわち流速が主流速よりも小さい領域が広がり(図6(a))、舟体の少し下流側で乱れが大きくなっている様子がわかる(図6(d))。このことから、舟体の上流側上下角部から生じた剥離せん断層が、舟体背後に近い領域で巻込みを生じ、強いカルマン渦を生成していることが推察される。一方、PAを適用したCase1およびCase2では、舟体背後の後流領域が狭まるとともに(図6(b)(c))、乱れの大きな領域が下流側へ移動し、乱れの大きさ自体も低減されている(図6(e)(f))。PA適用位置による流れ場への影響に着目すると、剥離点の下流側にPAを適用したCase2のほうが、上流側に適用したCase1よりも流れ場の変化が顕著であり、流れ場制御効率が良いことが伺える。

PAによる流れ場制御メカニズムについては、以下のように考えられる。本試験では、主流速4.6m/sに対してPAからの誘起流速が1m/s程度と小さいため、誘起

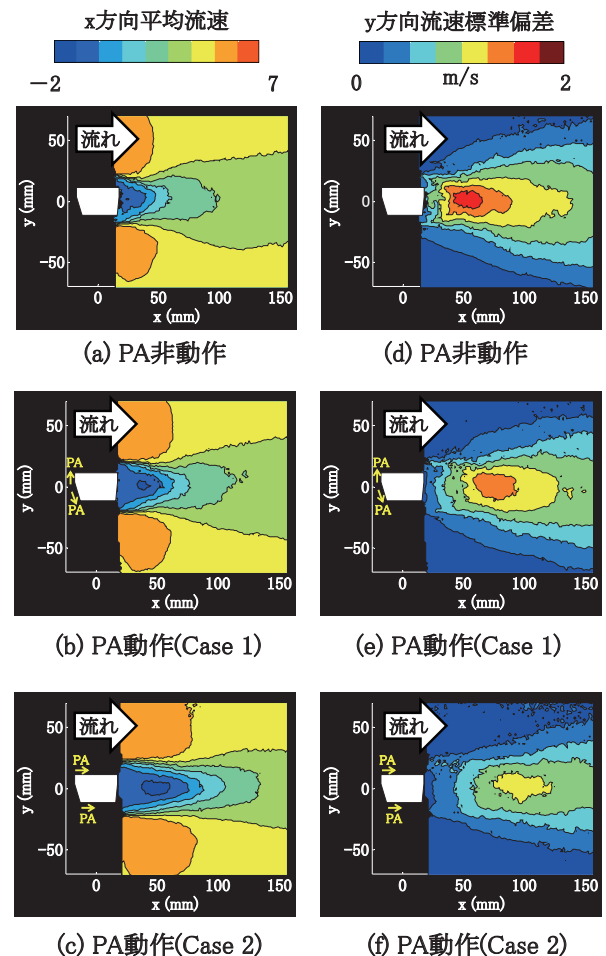


図6 PIVによる流速分布測定結果((a)～(c)はx方向平均流速、(d)～(f)はy方向流速標準偏差である)

特集：鉄道力学

流そのものが後流領域と干渉して流れ場の様子に変化したとは考えにくい。そのため、流れ場の変化はPAによる運動量の供給によって生じたと推察される。剥離点よりも上流側にPAを適用したCase 1については、舟体前面に発達した境界層内部にPAから運動量が供給され、境界層内の流速分布が変化したことで、角部における剥離の様子や剥離せん断層の流速分布とその流下方向などに影響が及び、後流の様子に変化したと考えられる。一方、剥離点よりも下流側にPAを適用したCase 2については、剥離せん断層の内部にPAから運動量が供給されたことにより、流量の収支の関係（連続の式）から剥離せん断層が舟体表面に引き寄せられたと考えられる。

以上より、舟体のように剥離点が固定された物体に対しても、剥離点近傍にPAを適用することで後流の乱れを低減できる事が確認された。

### 3. CFD解析による流れ場制御効果と空力音の予測

#### 3.1 CFD解析概要

風洞試験より、PAを剥離点近傍に適用することで、後流の乱れを低減できる事が確認された。しかしながら、これらの結果は風速4.6m/sの低風速域における流れ場の評価結果であり、高風速域における流れ場制御効果や空力音低減効果については別途評価を行う必要がある。そこで、本研究ではCFD解析による検討を行った。

CFD解析には汎用流体解析ソフトFluent 13を用い、Large Eddy Simulation (LES)による非定常流れ場解析を実施した。LESとは計算要素よりも小さな渦によるエネルギーの散逸をモデル化し、計算要素サイズの渦の挙動のみから乱流の流れ場を解析する手法である。

CFD解析の対象とする舟体は、風洞試験と同様、図1(b)に示す新幹線パンタグラフ舟体とした。ただし、断面の縮尺は実寸大、スパン長は150mmとした。本CFD解析の計算要素および境界条件を図7に示す。計算要素数は約143万要素であり、最小要素サイズは0.01mm(舟体近傍)である。また、座標系は2章の風洞試験と一致するよう決定した。

CFD解析における主流速は36.1m/s(130km/h)、時間方向の刻み幅は $\Delta t = 1.0 \times 10^{-4}$ sとした。CFD解析では、十分に発達した乱流場を評価するために以下の手順により流れ場の解析対象を選定した。はじめに定常流れ場解析によって得られた流れ場を初期値として、統計的定常状態を得るために0.05sの計算を実施した。その後、さらに0.4sの計算を実施し、0.05sから0.45s間のデータを流れ場の解析対象とした。

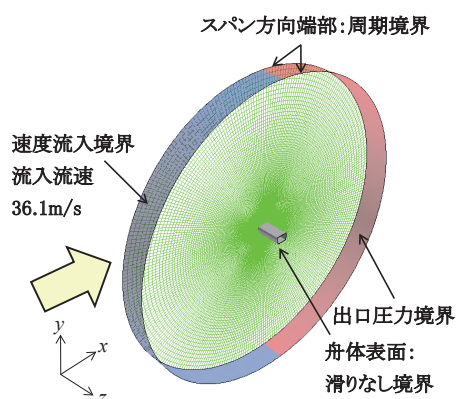


図7 CFD解析の計算要素および境界条件

#### 3.2 PAのモデル化

PAの放電現象は流体の運動に比べて小さい時間スケールを持つ非常に複雑な現象であり、LES解析の中でそれらを厳密に再現する事は難しい。そこで、本CFD解析ではShyy<sup>6)</sup>によって考案された定常体積力モデルを簡略化して用いることでPAの作用をモデル化することとした。Shyyのモデルでは放電現象によって生じた電離気体(プラズマ)が、印加電圧によって生じた電界からの電磁力によって運動するとし、Navier-Stokes方程式に定常的な体積力項を付与することでPAの作用をモデル化している。具体的には、PAによって生じる体積力は、図8に示す三角形OBAのプラズマ領域内で点Aから点Bへ向かう方向に生じ、その大きさは原点Oで最大で、大気とプラズマの境界である斜辺ABに向かって線型に減衰するとしている。

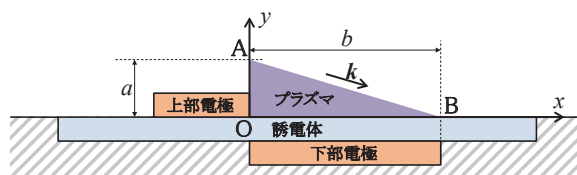


図8 ShyyによるPAの定常体積力モデルの概要図

本LES解析では、Shyyによるモデルをさらに簡略化し、斜辺ABにおける電界の大きさは、原点O近傍に生じる電界の大きさに比べて十分小さいと仮定して、PAによる体積力ベクトル $F$ を次式でモデル化した。

$$F = F_0 \left( 1 - \frac{x}{b} - \frac{y}{a} \right) k \quad (1)$$

ここで、 $k$ は点Aから点Bへ向かう単位方向ベクトル、 $F_0$ は体積力の大きさを表すパラメータである。なお、式(1)は図8の三角形OAB内でのみ適用される。本来、 $F_0$ は印加電圧やプラズマ領域の電荷密度などによって決まるパラメータであり、PAの動作条件などから推定する必要がある。しかし、本LES解析は実験結果の検証ではなく、流れ場の予測を目的としているため、理論的に

F0 の値を推定して用いるのではなく、F0 の値そのものを任意に与えることで PA の出力を調整することとした。

### 3.3 舟体への PA 適用位置と PA からの誘起流解析結果

舟体への PA 適用位置は、2章の風洞試験における Case 2 と同じ位置とした。CFD 解析における PA 適用領域を図 9 に示す。本 CFD 解析では、プラズマ領域の大きさは厚さ  $a = 1\text{mm}$ 、幅  $b = 20\text{mm}$  とした。

流れ場の計算において、式 (1) の定常体積力モデルにより PA の作用が正しく模擬されている事を確認するため、主流速  $0\text{ m/s}$  において式 (1) の体積力を作用させ、舟体表面上に流れが誘起されるかを確認した。体積力の付与は、Fluent 13 に外部ルーチンプログラムを組み込むことで行った。舟体上面側の体積力作用領域近傍で、CFD 解析により得られた誘起流の瞬時場を図 10 に示す。図 10 における体積力の大きさは  $F_0 = 8.0 \times 10^5\text{ N/m}^3$  である。図 10 より、体積力の作用により周囲の流体が体積力作用領域に引きこまれ、舟体表面に平行な方向に流れが誘起されている様子が確認できる。したがって、式 (1) による定常体積力モデルによって、PA から誘起される流れを正しく再現できることが確認できた。

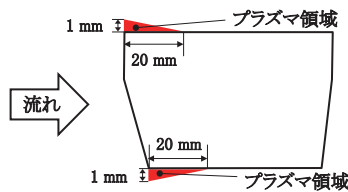


図 9 CFD 解析における PA 適用領域

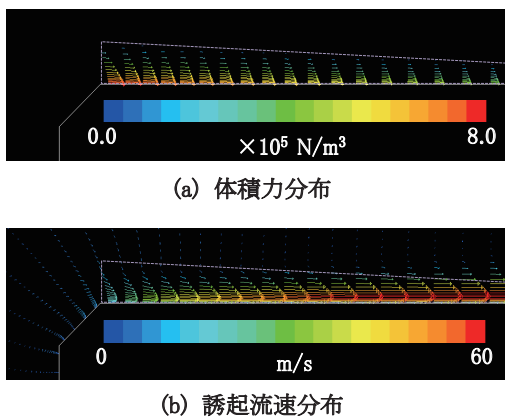


図 10 定常体積力モデルによる体積力と誘起流（点線は体積力作用領域を表す）

### 3.4 PA を適用した舟体の CFD 解析結果

舟体に PA を適用した場合の CFD 解析結果を図 11 ~ 図 13 に示す。本 CFD 解析における体積力の大きさは 3.3 節と同じ  $F_0 = 8.0 \times 10^5\text{ N/m}^3$  とした。本条件における誘起流速の最大値は  $61\text{ m/s}$  であり、主流速 ( $36.1\text{ m/s}$ ) のおよそ 1.7 倍である。

$x$  方向平均流速 (図 11) および  $y$  方向流速標準偏差 (図 12) に着目すると、2章の風洞試験結果と同様に後流領域が狭まるとともに、乱れの大きな領域が下流側へ移動し、乱れの大きさ自体も小さくなっている様子がわかる。図 13 は  $z$  方向の渦度の瞬時場を描画したものであり、渦度の絶対値の大きな領域が剥離せん断層やカルマン渦など、スパン方向 ( $z$  方向) に軸を持つ渦に対応する。図 13 より、PA の適用により、剥離せん断層が舟体表面に引き寄せられ、舟体前縁部における剥離が抑制された流れ場となっている様子がわかる。これにより、舟体後流における剥離せん断層の巻き込みが弱まり、カルマン渦が弱まって後流領域における乱れが低減したと考えられる。これら CFD 解析結果は 2章の風洞試験結果と符合するものであり、PA からの出力が十分であれば、高風速域においても流れ場制御効果が得られることが確認できた。

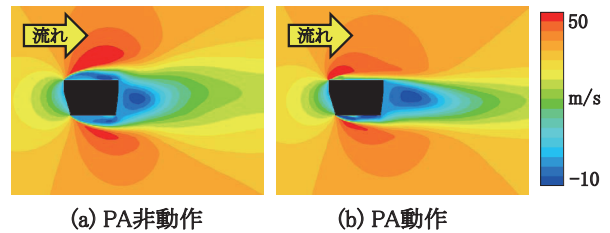


図 11 CFD 解析により得られた  $x$  方向平均流速

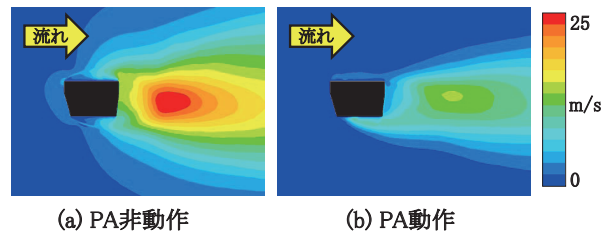


図 12 CFD 解析により得られた  $y$  方向流速標準偏差

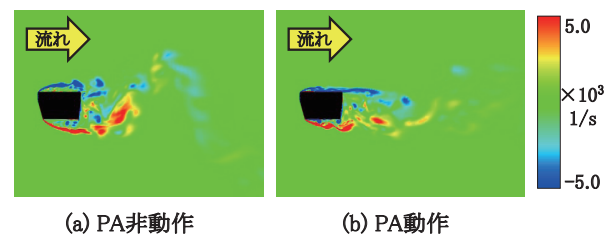


図 13 CFD 解析により得られた  $z$  方向渦度 (瞬時場)

### 3.5 空力音の予測結果

3.4 節で示した 2 条件について、遠方に放射される空力音 (二重極音) を予測するため、Lighthill 方程式のコンパクト近似により導かれる Curle<sup>7)</sup> の式

$$p_a(\mathbf{x}, t) = \frac{1}{4\pi c_0} \frac{x_i}{|\mathbf{x}|^2} \int_S \frac{\partial}{\partial t} p(\mathbf{y}, t - |\mathbf{x}|/c_0) n_i dS \quad (2)$$

を用いて空力音の計算を行った。ここで、 $p_a(\mathbf{x}, t)$  は時刻  $t$ 、観測点  $\mathbf{x}$  における空力音の音圧であり、 $c_0$  は音速、 $p(\mathbf{y}, t)$  は時刻  $t$ 、音減領域  $\mathbf{y}$  における圧力、 $S$  は計算領域内の舟

特集：鉄道力学

体表面,  $n_i$  は舟体表面から流体領域に向かう単位法線ベクトルをそれぞれ表している。ただし, 観測点  $x$  は十分に遠方場とみなすことのできる位置とする。式 (2) によって評価できる空力音の周波数は式 (2) を導出する際のコンパクト近似条件によって見積もる事ができる。本 CFD 解析においては, 空力音の波長が舟体の大きさよりも十分大きくなる周波数帯となり, およそ 1kHz 以下である。

3.4 節の CFD 解析結果から, 式 (2) によって得られた空力音の音圧レベルを図 14 に示す。図 14 における観測点  $x$  は舟体上方 5m 位置であり, 式 (2) で評価が可能な 1kHz 以下の周波数帯のみを描画している。図 14 より, PA 非動作の場合には, 80Hz 付近に顕著な狭帯域音が生じている。主流速と舟体厚さに基づいて狭帯域音のストローハル数を算出すると 0.14 となり, この狭帯域音はカルマン渦に起因するエオルス音と考えられる。一方, PA を動作させた場合には 80Hz 付近の狭帯域音のレベルが顕著に減少している事がわかる。3.4 節の結果を踏まえると, 舟体の剥離点直後に PA を適用することで, 流れの剥離を抑制してカルマン渦を弱める効果が得られ, それにともなって, エオルス音が低減するとともに, 200Hz 以上の広帯域音も減少したものと考えられる。したがって, PA から十分大きな出力を得ることができれば, 舟体からの空力音低減手法として利用可能であると考えられる。

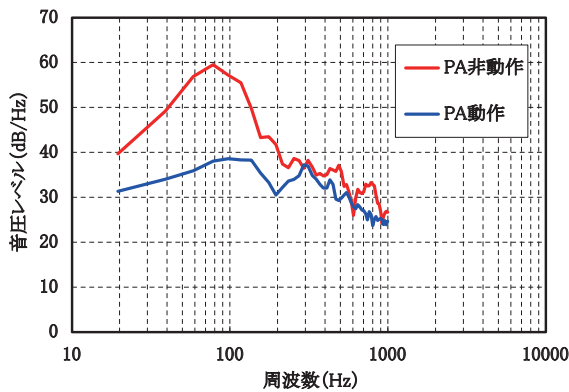


図 14 Curle の式によって得られた空力音の予測結果

4. まとめ

本研究では, 物体表面で流れを制御する手法として PA に着目し, PA を舟体に適用した場合の流れ場制御効果を風洞試験により確認した。また, 高風速域における流れ場制御効果と空力音低減効果については, CFD 解析による検討を行った。その結果, 以下のことがわかった。

- (1) 舟体の剥離点近傍に PA を適用することにより, 流れの剥離の様子が変化し, 後流の乱れを低減することができる。
- (2) PA の適用位置は, 剥離点の上流側直近よりも, 剥離点の下流側直近の方が, 顕著な流れ場制御効果が

得られる。

- (3) PA による流れ場制御効果は, 主としてせん断層を引き寄せて剥離を抑制することによって得られると考えられる。その結果, 後流領域における剥離せん断層の巻き込みが弱まり, カルマン渦が弱まって後流領域における乱れが低減する。
- (4) PA の適用により, 舟体から放射されるエオルス音を低減することが可能であると予測される。

今後は, PA による流れ場制御メカニズムの解明を深度化し, PA による流れ場制御メカニズム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

本研究の実施にあたり, 慶應義塾大学大学院生の瀧浪遼氏, 梶島治彦氏には多大なるご助力を頂いた。末筆ながらここに感謝の意を表す。

文 献

- 1) 山崎, 長倉 ほか, “2次元マイクロホンを用いたパンタグラフの音源探査”, 鉄道総研報告, Vol. 17, No. 11, pp.1-6, 2003.11
- 2) 吉田, 鈴木 ほか, “揚力特性および低騒音性を考慮した舟体形状最適化の基礎検討”, 鉄道総研報告, Vol. 19, No. 9, pp.23-28, 2005.9
- 3) 深瀧, 山田 ほか, “プラズマアクチュエータの基礎と研究動向”, 日本流体力学会「ながれ」第 29 巻第 4 号, 2010.8
- 4) 藤井, 松野, “DBD プラズマアクチュエーターバリア放電を利用した新しい流体制御技術”, 日本機械学会流体工学部門ニューズレター「流れ」2007 年 12 月号
- 5) 瀧浪, 深瀧 ほか, “新幹線パンタグラフ騒音低減のためのプラズマアクチュエータの特性評価”, 日本機械学会関東学生会第 51 回学生員卒業研究発表講演会, pp.507-509, 2012.3
- 6) Shyy, W., Jayaraman, B., and Anderson, A., “Modeling of glow discharge induced fluid dynamics”, J.Appl. Phys., Vol. 92, pp.6434-6443, 2002.
- 7) Curle, N., “The influence of solid boundaries upon aerodynamic sound,” Proc. Roy. Soc. A, Vol. 231, pp.505-514, 1955.
- 8) 光用, 高石 ほか, “プラズマアクチュエータを用いたパンタグラフ舟体周りの流れ場制御手法の LES による検討”, 第 22 回環境工学総合シンポジウム, pp.93-96, 2012.7
- 9) 光用, 高石 ほか, “プラズマアクチュエータを用いたパンタグラフ舟体まわりの流れ場制御手法の検討”, 第 19 回鉄道技術連合シンポジウム (J-Rail 2012), 2012.12