

流れ場制御を用いたパンタグラフ舟体の空力音低減手法

鉄道力学研究部 集電力学研究室
副主任研究員 光用 剛

1. はじめに

新幹線車両から発生する空力音の低減は、沿線環境負荷低減において重要な課題となっており、なかでもパンタグラフから放射される空力音については沿線騒音への寄与が大きいことが知られている。パンタグラフから放射される空力音は、主として物体表面で剥離した流れによって生じる渦の非定常運動によって発生する。鉄道総研ではこれまでに、最適化手法を用いた形状平滑化や多孔質材の適用といった空力音低減手法を提案してきた。これらの手法は、物体形状を平滑化することで剥離自体を抑制する、あるいは、多孔質材によって物体周りの流れを変化させ、後流における流れを安定化させるといったメカニズムによるものであり、どちらも受動的な手法に分類される。一方、今後さらなる空力音低減を実現するためには、流れ場をより積極的に制御する、すなわち能動的に制御することも必要になってくると考えられる。

そこで、本研究ではパンタグラフの主要な空力音源である舟体（図 1）を対象として、流れ場制御による空力音低減手法の検討を行った。流れ場制御手法としては、物体表面で剥離を制御する手法と流体中に能動的に擾乱を付与して流れを制御する手法の2つの手法について検討を行った。具体的な制御デバイスには、前者についてはプラズマアクチュエータ（以下、PA）を、後者についてはシンセティックジェットアクチュエータ（SJA）をそれぞれ採用し、検討を行った。

2. プラズマアクチュエータ（PA）

PA とは物体表面近傍で流れを制御するデバイスの一種であり、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とともに周囲の流体を引き寄せる作用を生じるデバイスである。図 2 に代表的な PA の構成例を示す。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 の交流電力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。PA は出力の面などから直ちに産業分野に適用するにはまだ課題が多いものの、薄く可動部を持たない、など流れの制御デバイスとして優れた利点を有しており、近年、翼や円柱周りの剥離抑制に利用した研究結果が数多く報告されている。

そこで、パンタグラフ舟体まわりの流れの剥離を抑制し、空力音の原因となるカルマン渦の生成を抑制する手法として PA を適用する検討を行った⁽¹⁾。なお、本研究は慶應義塾大学理工学部深淵研究室との共同研究として実施した。はじめに、低風速域において風洞試験により PA による剥離抑制効果を確認し、次に、CFD 解析により流れ場制御メカニズムの解明と空力音低減効果

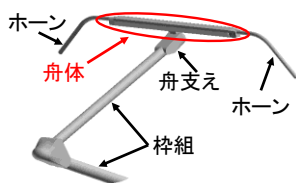


図1 新幹線パンタグラフ

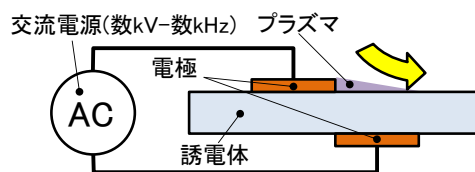


図2 PA の構造

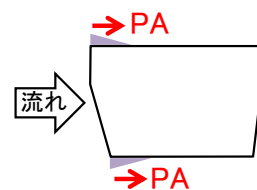


図3 舟体への PA 適用位置

の予測を行った。

まず、風洞試験結果について報告する。図3に示す断面形状の舟体に対して、剥離点となる上流側の角部近傍にPAを設置し、PIV(粒子画像速度計)により舟体後流の流速分布測定を行った。風洞試験は鉄道総研の小型低騒音風洞(開放型計測部, 吹出口 720 mm×600 mm, 最大風速 42 m/s)において実施した。試験風速は 4.6 m/s, 模型縮尺は 1/2 であり, 舟体模型のまくらぎ方向長さ(スパン長) 600 mm のうちの中央部 100mm の領域に PA を構成した。PA の印加電圧および周波数はそれぞれ 8 kV, 4 kHz であり, 別途実施した PA からの誘起流測定結果から, 本動作条件においては PA から 1 m/s 程度の誘起流が生じる事を確認している。図4は PIV によって測定した流速変動の結果である。図4より, PA を動作させることで, 後流の乱れが低減されており, 舟体背後に生じるカルマン渦の巻き込みが弱まったことが推測される。

次に, CFD 解析結果について報告する。CFD 解析においては, スパン長 150 mm の実物大舟体モデルに対して, 風洞試験と同様の位置(図4)に PA を適用し, 主流速 36.1 m/s (130 km/h) において LES による非定常流れ場解析を実施した。PA の作用はプラズマ発生領域内の流体に対して定常的な体積力を付加することでモデル化した。PA の出力については, 十分大きな出力が得られる PA を適用した場合の流れ場制御効果が確認できるよう, PA から主流速の 1.7 倍の誘起流が得られる条件と設定した。図5に CFD 解析によって得られた流れ場の様子(渦度の瞬時場)を, 図6にコンパクト近似した Curle の式により算出した空力音の予測結果を示す。図5より, PA を動作させることで舟体表面から剥離した流れが引き寄せられ, 後流におけるカルマン渦の巻き込みが弱まっている様子が確認できる。また, 空力音の計算結果からは, カルマン渦に起因する 80Hz 付近の狭帯域音(エオルス音)が顕著に低減されることが予測される。

以上より, 舟体の剥離点近傍に PA を適用することによって流れの剥離が抑制され, カルマン渦の巻き込みが弱まることが確認できた。また, 十分大きな出力が得られる PA を適用する事ができれば, 舟体から発生する狭帯域音の低減が可能であることが予測された。現在は, 高風速域で PA と同等の流れ場制御メカニズムを実現する手法の検討を進めている。

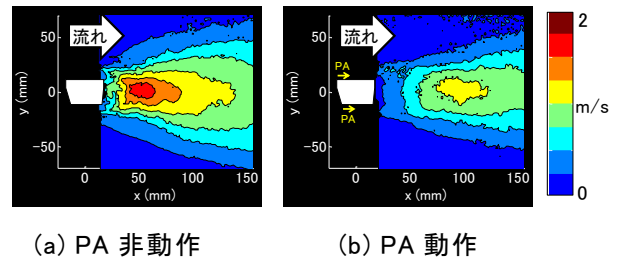


図4 PIVによる流速変動測定結果
(主流直角方向流速の標準偏差, 風速 4.6m/s)

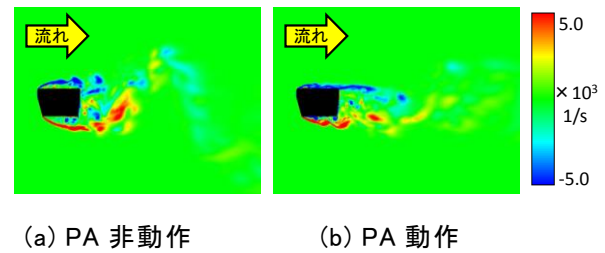


図5 CFD 解析結果
(渦度のスパン方向成分の瞬時場, 風速 36.1m/s)

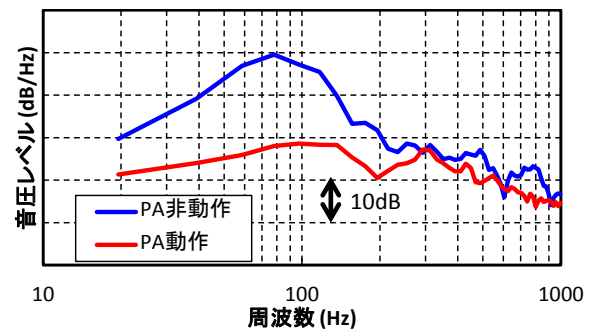


図6 CFD 解析による空力音の予測結果
(風速 36.1m/s)

3. シンセティックジェットアクチュエータ (SJA)

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、高い周波数での動作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。しかしながら、SJA の動作音が大きく全体音は増加してしまうことや、風速が大きくなると相対的に SJA の出力が小さくなり、エオルス音低減効果が得られなくといった点が課題として残されている。本研究では小さな SJA 出力でも空力音低減効果を得る事を目的として、噴出口形状の改良による流れ場制御効率の向上、および SJA による舟体周りの流れ場制御メカニズムについて検討を行った結果について報告する。

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。そこで、SJA の噴出口のアスペクト比を変更することで SJA により生成される渦輪の特性を調整することが可能であると考え、検討を行った。図 7 に 3 種類のアスペクト比の矩形噴出口を有する SJA 噴出口から生じる渦輪の挙動について CFD 解析を行った結果（渦度の等値面に流速の大きさを着色して描画したもの）を示す。噴出口のアスペクト比によって渦輪の広がり方や移流距離が変化するなど、渦輪の特性が変化することが確認できる。この結果から、制御する流れ場に応じた最適な渦輪の挙動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。

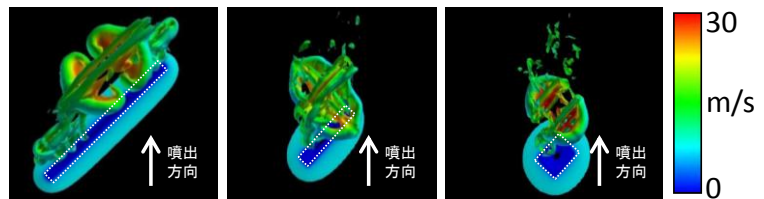
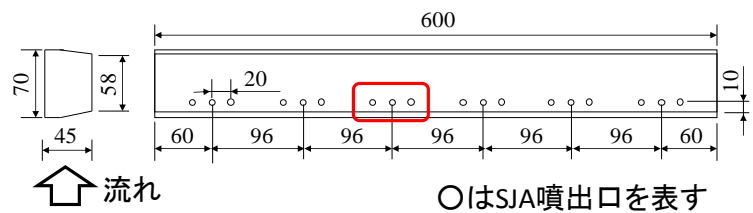
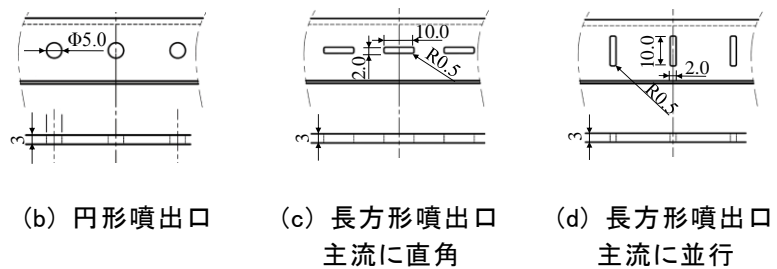


図 7 噴出口アスペクト比による渦輪の挙動の変化
(左から、アスペクト比 20, 5, 1.25)

以上の結果に基づき、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向上する検討を行った。図 8 に示すように、舟体模型の底面上流側に、開口部面積が等しい 3 種類の噴出口形状（円形、長方形（主流に平行）、長方形（主流に直角））を有するスピーカ駆動型 SJA を配置し、それぞれ同程度の出力で動作させた場合に舟体模型から放射される空力音の測定を実施した。風速 25m/s における空力音測定結果を図 9 に示す。この図に示すように、噴出口形状によってエオルス音のピークレベルの低減量が異



(a) SJA 搭載舟体模型概要図



(b) 円形噴出口 (c) 長方形噴出口 主流に直角 (d) 長方形噴出口 主流に並行

図 8 SJA 搭載舟体模型概要と噴出口形状

(各図の数値の単位は mm, (b)~(d)は(a)の赤枠部分拡大図)

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条件（図 8(d)）において、最もエオルス音のピークレベルが低減することがわかった。以上より、SJA の噴出口形状を調整することで、流れ場制御効率を向上できることが確認された。

最後に、図 8(d)の噴出口形状（長方形（主流に並行））に基づき、CFD 解析を用いて舟体周りの流れ場制御メカニズムについての検討を行った。SJA は噴出口を一樣な速度流入境界とし、その流速を周期的に変化させることで簡易的にモデル化した。CFD 解析によって得られた風速 25m/s における渦度のスパン方向成分の瞬時場を図 10 に示す。図 10 より、舟体底面に SJA を適用した場合、舟体底面側のせん断層が SJA から生じた渦輪と干渉して乱され、舟体底面側からのカルマン渦の巻込みおよび上下せん断層の相互作用が弱まり、後流におけるカルマン渦の巻込みが抑制されるといったメカニズムで流れ場が制御されたものと考えられる。

以上より、噴出口アスペクト比を変更し、SJA から生じる渦輪の特性を変化させることで、舟体まわりの流れ場制御効率を向上できることが確認された。また、SJA による流れ場制御効果は主としてせん断層と渦輪との干渉作用によって得られると考えられることがわかった。

4. まとめ

本研究ではパンタグラフの主要な空力音源である舟体を対象として、PA および SJA を適用した流れ場制御による空力音低減手法の検討を行った。PA については、舟体の剥離点近傍に適用することによって流れの剥離が抑制され、カルマン渦の巻込みが弱まることを確認できた。また、CFD 解析結果からは、PA によって狭帯域音を低減することが可能であることが予測された。SJA については噴出口アスペクト比を変更し、SJA から生じる渦輪の特性を変化させることで、舟体まわりの流れ場制御効率を向上できること、また、流れ場制御効果が主としてせん断層と渦輪との干渉作用によって得られると考えられることがわかった。現在、高風速域でも十分な空力音低減効果を得ることを目指し、引き続き流れ場制御効率向上の検討を進めている。

参考文献

- 1) 光用剛, 他 5 名 : 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, (2013)
- 2) 佐藤祐一, 他 2 名 : 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, (2012)

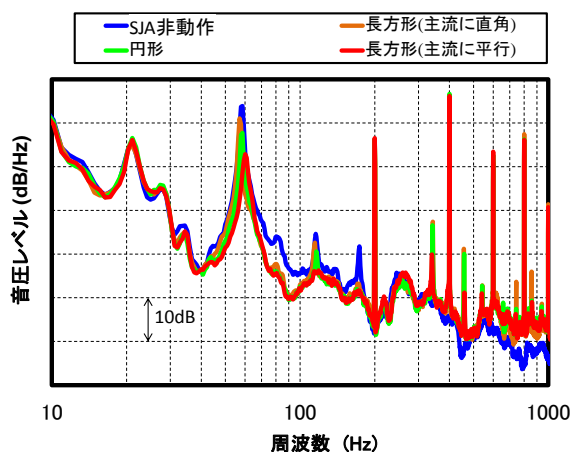
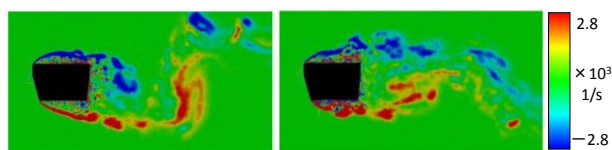


図 9 風洞試験における空力音測定結果(風速 25m/s)



(a) SJA 非動作 (b) SJA 動作

図 10 CFD 解析結果

(渦度のスパン方向成分の瞬時場, 風速 25m/s)