

# 1515 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

正 [機] ○光用 剛 (鉄道総研)

正 [機] 高石 武久 (鉄道総研)

正 [機] 佐藤 祐一 (鉄道総研)

学 [機] 瀧浪 遼 (慶應大院)

学 [機] 梶島 治彦 (慶應大)

正 [機] 深淵 康二 (慶應大)

## A study on flow control method of pantograph panhead with plasma actuator

Takeshi MITSUMOJI, Takehisa TAKAISHI, Yuichi SATO, Railway Technical Research Institute. 2-8-38, Hikaricho, Kokubunji City

Ryo TAKINAMI, Graduate School of Keio University.

Haruhiko GEJIMA, Koji FUKAGATA, Keio University.

Reduction of aerodynamic noise emitted from a pantograph panhead is a very important subject for the speed-up of Shinkansen trains because of the environmental preservation. In this study, control of flow around a panhead using a plasma actuator was studied. The results of the wind tunnel test suggest that the plasma actuator can change the flow separation from the panhead surface or entrain the shear layers toward the panhead surface. By these effects, the plasma actuator can control the generation of Karman vortices and reduce the aerodynamic noise from a panhead.

*Keywords* : plasma actuator, pantograph, panhead, flow control, Karman vortices, aerodynamic noise

### 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、特に空力音の低減が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<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とが知られている。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。

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まま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)を用いた流れ場制御手法の検討結果について報告する。PAとは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流体中に運動量を供給し、物体表面に沿う方向に流れを誘起するデバイスである。PAは図2に示すように誘電体を電極で挟んだ構造をしており、電極間に数kV-数kHzの交流電圧を印加することによってプラズマ

を発生させる。PAの動作には特殊な電源装置が必要となえ、誘起できる流速も数m/s程度と小さく、PA自体をパンタグラフ舟体に適用するには課題が多い。しかし、PAは薄く可動部を持たないうえ、電極や誘電体として市販の銅箔テープやカプトンテープなどを使用して容易に構成することができるなど、流れ場制御に関する基礎研究を行ううえで大きな利点がある。

PAを流れ場制御に用いる研究は数多く行われており、例えば文献<sup>3)4)</sup>では翼や円柱の表面にPAを適用することで、剥離や後流での渦の生成を抑制した事例が紹介されている。そこで、PAをパンタグラフ舟体まわりの流れの剥離やカルマン渦の抑制に利用する事ができれば、空力音低減手法へ活用できる知見が得られると期待される。

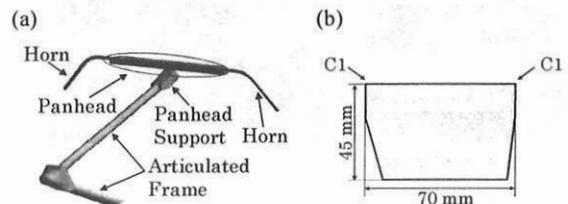


Fig. 1 Configuration of Shinkansen pantograph and panhead. (a) Pantograph; (b) Cross section of panhead.

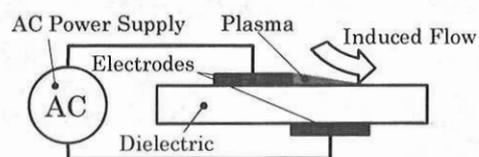


Fig. 2 Configuration of plasma actuator.

しかしながら、プラズマアクチュエータを舟体のような矩形に近い物体に適用した場合の流れ場制御効果については未知の部分も多い。そこで、本研究では舟体に PA を適用した場合の流れ場制御効果について、風洞試験において確認を行った。

## 2. 試験方法

### 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 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 である。試験装置概要図を図 3 に、試験時の様子を図 4 に示す。本試験における座標系は、図 3 に示すように模型中心を原点にとり、主流方向に  $x$  軸、模型のスパン方向(鉛直下方を正)に  $z$  軸、それらの軸に垂直で、舟体模型の上面側(すり板側)が正となるように  $y$  軸をとることとする。

風路内に PA を組み込んだ供試体を設置し、PIV(粒子画像速度計, Particle Image Velocimetry)による流速分布測定を実施した。なお、PIV とは以下のように画像によって流速分布を計測する方法である。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。2 枚の画像を比較し、微小な粒子群の移動量を求めることで流速ベクトルを算出する。本試験では、画像ペアを 200 組取得し、得られた流速分布のアンサンブル平均により流れ場を評価した。

### 2.2 供試体

本試験では円柱と舟体模型の 2 種類のアクリル製供試体を試験に使用した。図 5 に供試体の写真を示す。各供試体のスパン長は風路寸法に合わせて 600 mm とした。このうち、PA を適用する部位は、PA の電源装置の出力

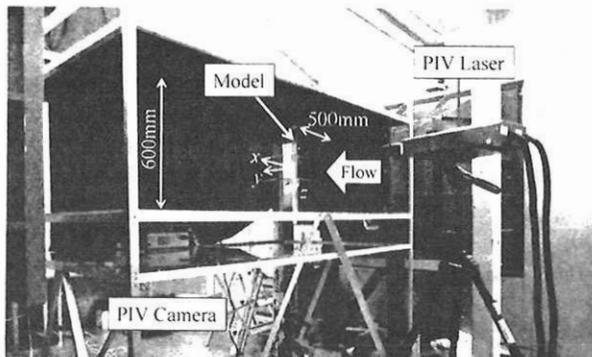


Fig. 3 Set up of wind tunnel test and coordinate system.

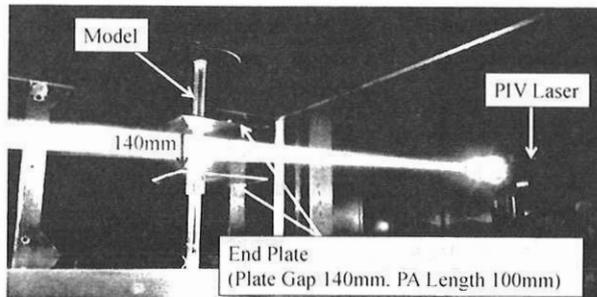


Fig. 4 PIV measurement (viewed from downstream).

を考慮して中央部の 100 mm の領域とした。さらに、PA を適用した部位から上下に 20 mm の位置には端板を取り付け、PA を適用した部位と適用していない部位の流れ場が干渉する事を防いだ。なお、端板は円柱模型については直径 250 mm の円盤としたが、PIV 画像の視野に影響を与える事がわかったため、舟体模型については後部を延長し、視野に影響を与えないよう改良している。

円柱や舟体などの柱状部材まわりの流れについては、二次元的な流れ場が再現できるよう、断面の大きさに対して十分な長さのスパ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 適用部位のスパン長を 100 mm としたため、模型の断面の大きさを調整して断面の大きさに対して十分なスパン長が確保できるように選定した。具体的には、断面の大きさに対して 4 倍程度のスパン長が得られるよう、円柱については直径 25 mm、舟体模型については図 1(b) に示した断面形状の舟体を 1/2 倍に縮小した寸法とした。

### 2.3 PA の構成

PA は市販の銅箔テープ(厚さ 0.035 mm)とカプトンテープ(厚さ 0.05 mm)を用いて製作した。供試体表面をカプトンテープで絶縁した後に、下部電極(銅箔テープ)、誘電体(カプトンテープを複数枚)、上部電極(銅箔テープ)を順に貼りつけることで PA を構成した。誘電体として使用したカプトンテープは円柱については 2 枚、舟体については 5 枚重ねて使用した。

構成した PA に対して疑似矩形波の交流電力を印加し、PA を動作させた。印加電圧は 8 kV、周波数は 4 kHz である。図 6 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 1 m/s 程度の誘起流が生じていたものと推測される。

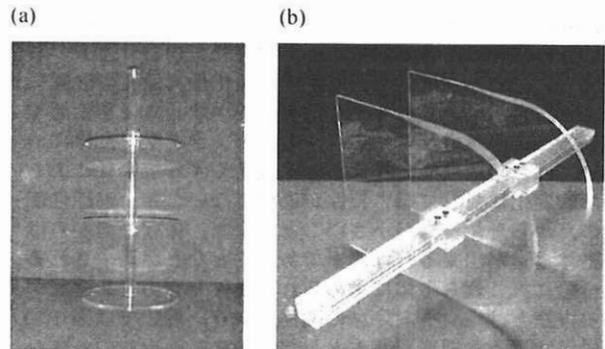


Fig. 5 Test models. (a) Cylinder: (b) 1/2 Scaled panhead.

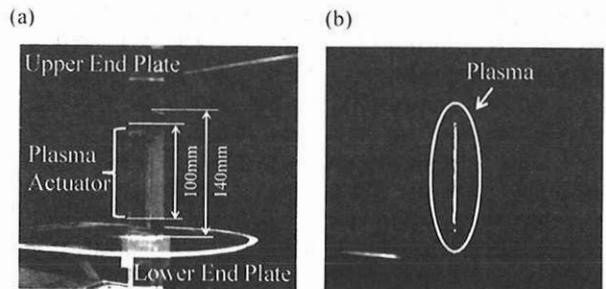


Fig. 6 Plasma actuator on the panhead model. (a) Overall view: (b) Plasma actuator driven by 8 kV - 4 kHz.

### 3. 円柱の試験結果

はじめに、円柱に PA を適用した場合の流れ場制御効果の確認を実施した。円柱直径に基づいたレイノルズ数  $Re$  は約 7,700 であり、円柱周りの流れ場は層流剥離を伴う流れ場であると考えられる。層流剥離の場合、剥離点がよどみ点から  $\pm 85^\circ$  の位置近傍を中心に周期的に変化する流れ場である事が知られている。また、円柱については、剥離点近傍に PA を適用した場合に大きな流れ場制御効果が得られる事が過去の研究事例から報告されている。そこで、本試験では図 7 に示すように、PA を剥離点の少し上流側である  $\pm 80^\circ$  の位置に取り付けた場合 (図 7(b))、および剥離点の少し下流側である  $\pm 90^\circ$  の位置に取り付けた場合 (図 7(c)) について試験を実施し、PA を適用しない場合の流れ場と比較した。

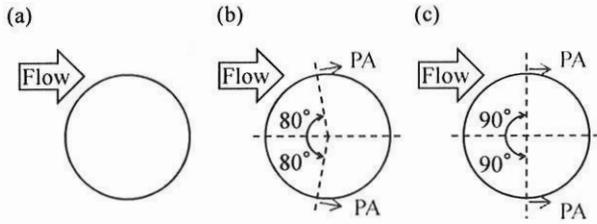


Fig. 7 Test conditions for cylinder. (a) Without PA; (b) With PA ( $\pm 80^\circ$ ); (c) With PA ( $\pm 90^\circ$ ).

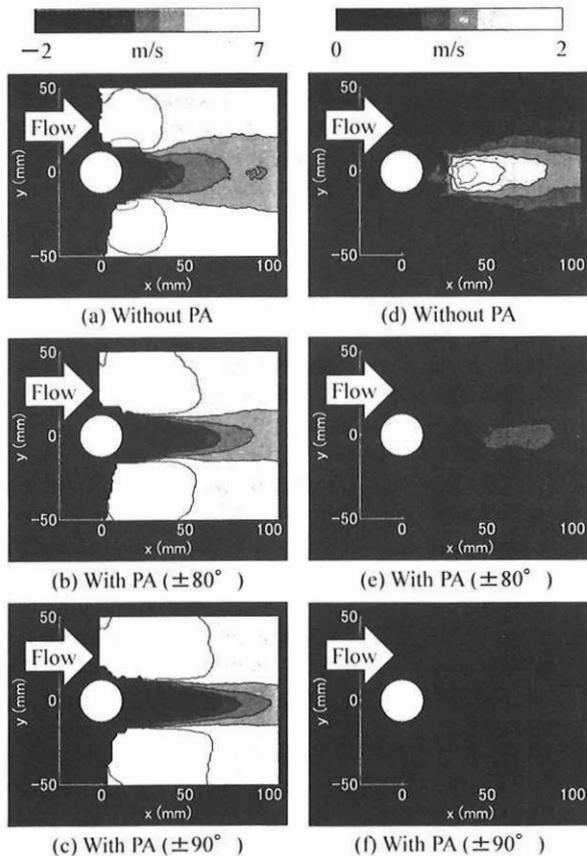


Fig. 8 Flow field around cylinder measured by PIV ( $Re = 7,700$ ): (a)-(c), averaged streamwise velocity  $\bar{U}$ ; (d)-(f), RMS y-component of velocity  $v_{RMS}$ .

図 8 は PIV によって得られた、主流方向平均流速  $\bar{U}$  と、 $y$  方向の流速の標準偏差  $v_{RMS}$  を描画したものである。PA を適用していない場合については、円柱背後に生じる逆流領域、すなわち流速  $\bar{U}$  が負となる領域が円柱近傍に限られており (図 8(a))、その少し下流側で乱れ  $v_{RMS}$  が大きくなっている様子がわかる (図 8(d))。このことから、円柱から剥離したせん断層が、円柱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と考えられる。一方、PA を適用した場合には、カルマン渦による拡散作用が弱くなって円柱背後に生じる逆流領域が狭まるとともに下流側まで伸びている (図 8(b)(c))。また、それに伴い乱れ  $v_{RMS}$  の大きな領域も下流側へ移動し、乱れの大きさ自体も低減されている (図 8(e)(f))。

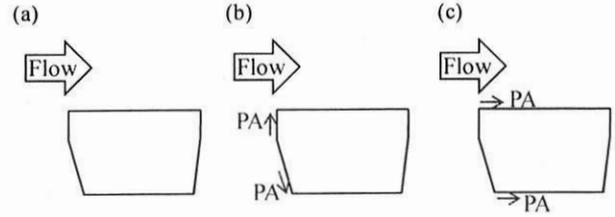


Fig. 9 Test conditions for panhead model. (a) Without PA; (b) With PA (Case 1); (c) With PA (Case 2).

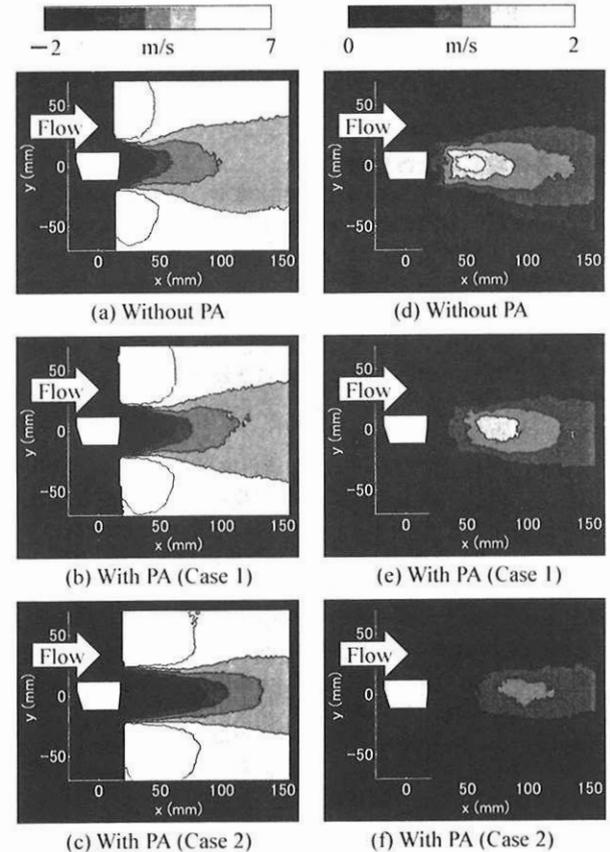


Fig. 10 Flow field around panhead model measured by PIV ( $Re = 6,900$ ): (a)-(c), averaged streamwise velocity  $\bar{U}$ ; (d)-(f), RMS y-component of velocity  $v_{RMS}$ .

PA の適用位置の違いによる流れ場への影響に着目すると、時間平均的な剥離点 ( $\pm 85^\circ$  近傍) よりも下流側 ( $\pm 90^\circ$  位置) に PA を適用した場合の方が、上流側 ( $\pm 80^\circ$  位置) に PA を適用した場合よりも円柱背後の逆流領域の変化と乱れの低減がより顕著であることがわかる。

PA が流れ場に与える影響については以下のように考えられる。本試験条件では、主流速 4.6 m/s に対して PA からの誘起流速が 1 m/s 程度と小さいため、誘起流そのものが流れ場と干渉して後流の様子が変化したとは考えにくい。例えば以下のような流れ場制御メカニズムが考えられる。剥離点よりも上流側に PA が位置する場合には、境界層内に PA から運動量が供給されたことで、剥離の要因となる逆圧力勾配が緩和され、剥離点が下流側に移動するなどして当該部位での剥離が抑制されたと推察される。一方、剥離点よりも下流側に PA が位置する場合には、剥離したせん断層の内部に 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) からせん断層が円柱表面に引き寄せられるなどしてその挙動が変化し、後流のカルマン渦の生成に影響を与えたと考えられる。

本試験のレイノルズ数領域においては、先述のように剥離点がよどみ点から  $\pm 85^\circ$  の位置近傍を中心に周期的に変化する。そのため、時間的な頻度で考えると、PA 近傍を流下する流れは、図 7(b) の場合には剥離する前の流れ、図 7(c) の場合には剥離した後の流れである比率が大きい。本試験結果からは、 $\pm 90^\circ$  位置に PA を適用した場合のほうが顕著な流れ場制御効果が得られたため、剥離を抑制する作用よりも剥離後のせん断層を引き寄せる作用を利用した方が流れ場制御効率が良いことが推察される。

#### 4. 舟体模型の試験結果

円柱の試験結果を参考に、舟体模型に PA を適用した場合の流れ場制御効果の確認を実施した。舟体厚さに基づくレイノルズ数  $Re$  は約 6,900 である。舟体など矩形に近い物体まわりの流れ場については、上流側の上下角部において流れが剥離し、円柱と同様に後流でせん断層が巻込み、カルマン渦を生成する事が知られている。舟体の場合は角部において部体形状が急峻に変化するため、円柱のように剥離点が時々刻々変化せず、角部に固定されている点が大きな特徴である。

図 9 に舟体模型における PA 適用位置を示す。PA 適用位置は、円柱の場合の試験結果を参考に、剥離点より上流側に適用した Case 1 と、下流側に適用した Case 2 の 2 条件とし、PA を適用しない場合の流れ場と比較した。

図 10 は舟体模型周りの流れ場測定結果である。表示している物理量とカラーレンジは図 8 に合わせて描画している。図 10 より、舟体模型に PA を適用した場合にも、円柱の場合と同様、舟体背後の逆流領域が狭まるとともに長さが拡大し、乱れが低減されている様子が確認できる。ただし、流れ場の変化は円柱の場合ほど顕著ではない。また、PA 適用位置による流れ場への影響に着目すると、円柱の場合と同様、剥離点の上流側よりも下流側に PA を適用した場合に、より顕著な流れ場の変化がみられる事がわかる。したがって、舟体の場合にも剥離点の下流側に PA を適用した場合の方が流れ場制御効率が良いと考えられる。

舟体に PA を適用した場合の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。剥離点よりも上流

側に PA を適用した Case 1 については、境界層内部に PA から運動量を供給する点は円柱の場合と同じであるが、角部に剥離点が固定されているため、剥離点が下流側に移動するといった効果は得難いと考えられる。したがって、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せん断層の流速分布、流下方向などに影響が及び、後流の様子が変化したのではないかと考えられる。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、円柱の場合と同様にせん断層を引き寄せる作用が働いたものと考えられるが、舟体は角部において形状が急峻に変化し、剥離点が固定されているため、円柱の場合ほどせん断層の挙動を変化させる効果が得られなかったと推察される。

#### 5. まとめ

本試験では、円柱と舟体模型に対して PA を適用し、その流れ場制御効果を確認した。その結果、以下の事がわかった。

- (1) 円柱と舟体模型ともに、剥離点近傍に PA を適用することで、背後の逆流領域が狭まるとともに長さが拡大し、乱れが低減される。
- (2) 円柱と舟体模型ともに、剥離点の上流側よりも下流側に PA を適用した場合に、より顕著な流れ場制御効果が得られる。
- (3) 舟体模型の場合には、円柱の場合ほど顕著な流れ場制御効果が得られない。これは、剥離点近傍の角部において形状が急峻に変化し、剥離点が固定されていることに起因すると考えられる。

今後は、PA の流れ場制御メカニズムの解明を行うとともに、PA の流れ場制御メカニズムを利用した、より実用的な流れ場制御手法の検討を行い、新しいパンタグラフ舟体の空力音低減手法を提案したいと考えている。

#### 参考文献

- 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) 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.
- 4) 深淵, 山田 ほか, "プラズマアクチュエーターの基礎と研究動向", 日本流体力学会「ながれ」第29巻第4号, 2010.8.
- 5) 瀧浪, 深淵 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ーの特性評価", 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.
- 6) 光用, 高石 ほか, "プラズマアクチュエーター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.
- 7) 瀧浪, 深淵 ほか, "平板型プラズマアクチュエーターの特性評価および新幹線パンタグラフ舟体への適用のための基礎検討", 日本機械学会年次大会, 2012.9.