

令和 2 年 6 月 11 日現在

機関番号：32660

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2017～2019

課題番号：17K06168

研究課題名(和文) プラズマアクチュエータジェットによるフローモーフィング技術の創発

研究課題名(英文) Flow Morphing Technique by Plasma Actuator Jet

研究代表者

石川 仁 (ISHIKAWA, HITOSHI)

東京理科大学・工学部機械工学科・教授

研究者番号：90311521

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,500,000円

研究成果の概要(和文)：本研究ではプラズマアクチュエータで形成するジェットや、ジェットの衝突で巻き上がる渦を利用して、流れの方向や強さを変えて、物体周囲の流れそのものを鈍い物体のものから流線形物体のそれに变化させることで流体抵抗を低減する、“フローモーフィング技術”を研究した。軸対称物体の代表である円板の抵抗低減に成功し、その低減メカニズムを可視化と数値シミュレーションから考察した。円板のよどみ点付近に対向ジェットにより渦輪状の構造が形成され、周囲の流れが流線型に変化する場合と、円板端にジェットにより渦循環領域が形成され、それによりせん断層の剥離が抑えられる場合の2つの抵抗低減方法を提案した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究で創発したフローモーフィング技術により、例が少ない鈍頭物体の円板の抵抗低減が行えたことは流体工学、とくに流れの制御の分野で学術的に大きな成果である。また鈍頭物体は車両や建築構造物に多く見られるので工学的な応用も広い。当初の目標とした低いレイノルズ数 $Re=5,000$ で抵抗低減の効果が得られたことは、低速走行中の自動車の燃費向上や、自然風によって生じる建築構造物の抵抗低減などにも応用でき、かつアクティブな流れ制御法として期待できる。

研究成果の概要(英文)：The purpose of this study, is to develop a novel drag reduction method in fluid mechanics by using a plasma actuator. The shape morphing technique is a kind of flow control which basically transforms its body shape by the functional or the soft materials. Our “flow morphing” is to directly change the flow around bluff body by using plasma jet or a counter type plasma jet. It is succeeded that drag reduction of a circular disk by two type of vortex structure generated by flow morphing. The reduction mechanics was explained by flow visualization and numerical simulation.

研究分野：流体工学

キーワード：プラズマアクチュエータ 抵抗低減 モーフィング 流れの制御

1. 研究開始当初の背景

流れの中に置かれた物体に作用する抵抗は、機器の効率低下やエネルギーロス、騒音を引き起こす。よってこれまで、ジェット吹出しや誘起縦渦による運動量注入など、様々な流体制御法による抗力低減が試みられてきた。しかしここ数十年に関しては、摩擦抵抗低減については様々な流体制御法が提案されているが、圧力（形状）抵抗を低減させる試みはほとんど行われていなかった。

一方、注目を集めている流体制御デバイスに、プラズマアクチュエータ（以下、PA と呼ぶ）がある。PA の原理は、誘電体を挟んだ2枚の電極に高電圧・高周波数の交流電流を印加すると大気圧プラズマが発生し、それが周囲の流体をイオン化してジェットが誘起する現象を利用するものである。PA は ①構造がシンプルかつ薄型で、それ自体が抵抗を生み出すことがない、②複雑な可動機構を必要とせず応答性が良い、③印加電圧および印加周波数の入力方法によって連続やパルス状など様々なジェットが誘起できる等、流体制御に適した利点があることから、積極的に研究が行われている。

本研究は PA で生成したジェットや対向ジェットの衝突で巻き上がる渦により、物体近傍の流れの方向や強さを変えて、周囲流れを圧力抵抗の大きい鈍い物体のものから、流線形物体のそれに変化させることで圧力抵抗の低減を試みる、フローモーフィング技術を創発することを目標とした。

2. 研究の目的

本研究では圧力抵抗の大きい軸対象物体である円板を供試体とし、流れに垂直においた円板の正圧面側に、同軸対向型のプラズマアクチュエータを設置し円板中心に向かってジェットを吹き出し衝突させて渦循環領域を形成する。それにより、1) 周囲流れを流線形のそれに変化させるフローモーフィング技術によって、圧力抵抗の低減を試みる。2) 広範囲なレイノルズ数領域、とくに $Re=10^4$ 以下の低速領域で抵抗低減できるフローモーフィング技術を創発する。ことを目的とした。併せて抵抗が低減されるメカニズムの詳細や PA の最適な作動条件がわかっていないので、それを調べることにした。

3. 研究の方法

本実験には出口高さ 250 [mm]、幅 250 [mm] の吹き出し型風洞を使用した。円板は直径 50 [mm]、厚さ 5 [mm] のもので、背面側から絶縁性をもつアルミナ棒によって支持した。円板面積と風洞吹き出し口面積に基づくブロックage比は約 3% とし、抗力測定に影響を及ぼさないよう留意した。

PA は上部電極を円形にカットした同軸対向型を使用した。誘電体には厚さ 125 [μm] のポリイミドフィルムを厚さ 80 [μm] の銅箔テープで挟みこみ、電極を円形に切った。上部電極の内径 D_p は、すなわちプラズマジェットが形成される電極であり、 $D_p=20, 30$ 、および 40 [mm] の3種類のものを用いた。高電圧高周波パルス電源により電圧 5.0, 6.0, 7.0、および 8.0 [kV_{pp}]、周波数 6.0, 7.0, 8.0, 9.0、および 10.0 [kHz] の交流電流を印加した。以下、これを本研究での PA の駆動条件とした。

最初に PA 電極、および PA で生成するジェットの基礎特性を調べるため、静止流体中でのプラズマジェットの可視化実験を行った。撮影には高速度カメラを使用した。フレームレートは 1,000 [fps] に設定し、ジェット発生の様子を PA の壁面に対して横方向から撮影した。トレーサ粒子にはグリコール系溶剤と水の混合液を霧化して使用し、可視化用光源にはレーザーを使用し

た。直接相互相関法を用いて 1,000 枚平均で PIV 解析を行い、PA 内径、印加電圧、印加周波数の組み合わせによる円中心軸方向のジェットの流れの違いを調べた。

流体抵抗を調べるための抗力測定は、圧縮型のロードセルを用いて行った。サンプリング周波数を 1.0 [kHz] に設定した。主流流速を $U_\infty = 1.5$ [m/s] に設定し、円板直径と主流流速に基づくレイノルズ数 Re を 5,000 とした。

図 1 に $D_p = 20$, および 40 [mm] の、静止流体中での PA 生成ジェットの可視化結果を示す。このときの印加電圧と印加周波数は、プラズマジェットが比較的安定して生成される最小の 5.0 [kV_{pp}] と 6.0 [kHz] とした。 $D_p = 20$ [mm] の場合では壁面から 20 [mm] 離れた位置で最大速度 0.25 [m/s] を、 $D_p = 40$ [mm] では壁面から 30 [mm] 離れた位置で最大速度 0.24 [m/s] を示した。 $D_p = 20$ [mm] と比較して、 $D_p = 40$ [mm] の方が広範囲で高い速度を保持しており、ジェットの幅も広いことから、大きな抵抗低減が期待される結果となった。

ここで電極径が抵抗低減に与える影響について述べる。小さいプラズマ電極径である $D_p = 20$ [mm] では、低減効果は小さかった。これは円板正圧面において、形成される渦が小さく安定的な周囲流れの流線型形状への変化が行われず、抗力値の変動も大きかったためであると考えられる。一方、大きいプラズマ電極径 $D_p = 30, 40$ [mm] の場合は高い抵抗低減効果を示した。

抵抗低減効果の大きかった $D_p = 40$ [mm] について、各印加電圧、印加周波数での抗力低減値を図 2 に示す。高印加電圧、高印加周波数を与えた際に高い抵抗低減効果を得られることがわかった。これは、高電圧高周波を印加するとプラズマジェットの流速も大きくなり、安定的に渦が形成され、はく離の規模が抑制されたためと考えられる。図 3 に $D_p = 40$ [mm] , 8.0 [kV_{pp}] で駆動した時の抗力係数 C_d を示す。エラーバーは 5 回測定の実標準偏差である。高周波の場合に抵抗低減効果が高いことがわかった。

次に抵抗低減効果とフローモーフィングにより形成される渦の関係を調べるため、スモークワイヤー法により非制御時と制御時の円板正圧面の流れの様子を可視化した。撮影には高速度カメラを使用し、フレームレートは 2,000 [fps] に設定した。光源にはメタルハライドランプを用い、風洞出口上部から光を当て、横方向から撮影した。

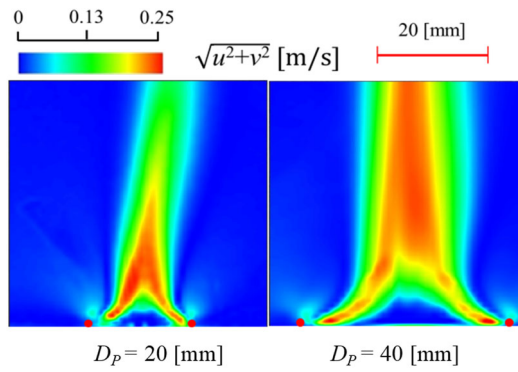


Fig.1 Plasma jet velocity in quiescent air

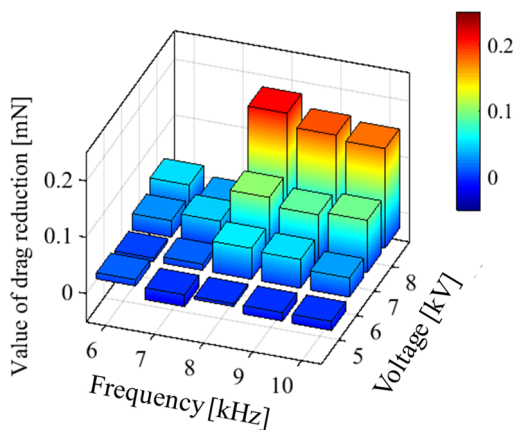


Fig.2 Drag reduction by flow morphing ($D_p = 40$ [mm])

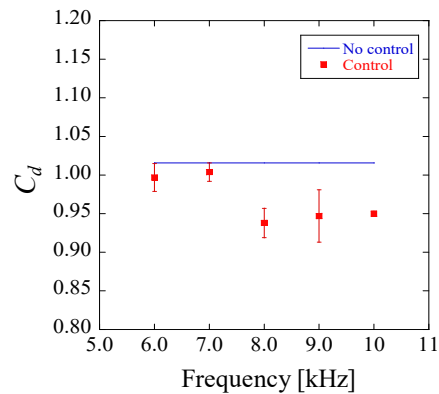


Fig.3 Flow morphing effect on drag coefficient C_d ($D_p = 40$ [mm], 8.0 [kV_{pp}])

図4に印加電圧 8.0 [kV_{pp}], 印加周波数 8.0 [kHz] の条件で, 電極径を変えた場合の円板正圧面の流れの様子を示す. フローモーフィング非制御時 (No-control) には流れは正圧面に沿い, 円板端ではく離する様子が確認できた. フローモーフィング制御時の $D_p=20$, および 30 [mm] では発生した渦輪状の構造により円板中心付近で流線型に変化する様子がわる. $D_p=40$ [mm] では円板端に安定的に渦循環領域が形成され, 非制御時にはく離していた流れが抑えられ, 後流幅が狭まる様子も確認できた.

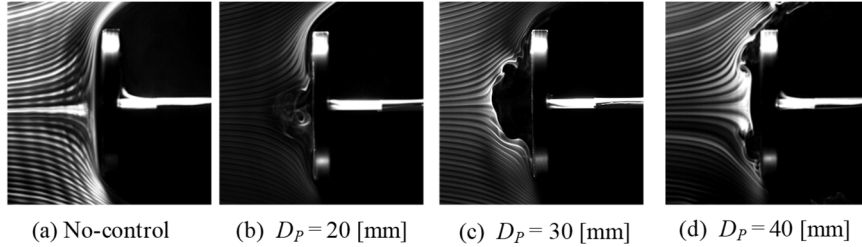


Fig.4 Flow visualization of flow morphing (8.0[KV_{pp}], 8[kHz])

次にフローモーフィングによる抵抗低減効果を数値シミュレーションにより検証した. 解析は, 実験とおなじ直径 $D=50$ [mm] と厚さ 5 [mm] の円板に対して行った. D を代表長さ一様流速 U_∞ と代表速度としたレイノルズ数も実験と同じ 5,000 とした. 支配方程式は 3次元圧縮性ナビエ・ストークス方程式にプラズマアクチュエータからの体積力項を含んだものを適用した. 体積力項は Suzen らによりモデル化された 2次元のプラズマアクチュエータ体積力分布 (Suzen et. al, 2005) を, 円板の中心まわりに 1 回転させ 3次元の同軸対向型プラズマアクチュエータの体積力分布を構築した. 体積力の大きさ, すなわちプラズマジェットの数値に相当する量を表すパラメータとして D_c を以下に定義する.

$$D_c = \frac{QED}{\rho_\infty U_\infty^2}$$

ここで, Q_c と E は電荷と電場ベクトルである. 以下, 数値シミュレーションの結果は, このパラメータ D_c を用いて整理する. また D_p ($/D$) = 0.4 が実験の $D_p=20$ [mm] に, D_p ($/D$) = 0.8 が実験の $D_p=40$ [mm] に相当する.

図5に抗力係数 C_d の平均値とその標準偏差の比較を示す. フローモーフィングによる制御を行った全てのケースで C_d の低減が確認できた. 最大は 2.3% の抗力低減があった. ただし $D_c=0.025$ のケースについて抵抗低減の効果は小さかった. この結果は, 抵抗低減効果を得るためには一定以上のプラズマジェットの速度により, 安定して渦構造を形成することが必要であることを示唆し, 実験と同じ傾向である. また, フローモーフィングによる制御で $D_p/D=0.4$ の結果に着目すると, 平均値は減少するがその標準偏差が増加する. この傾向は, D_c の値が大きくなると強く

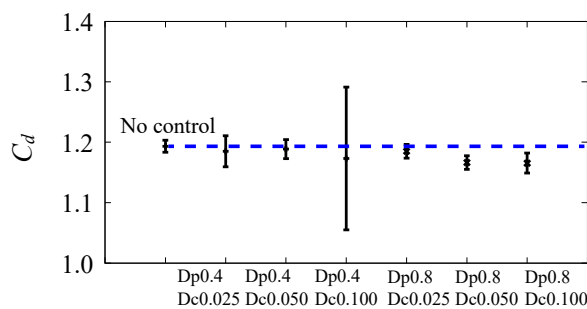


Fig.5 Flow morphing effects on Drag coefficient C_d by numerical simulation

なる。特に、 $D_c=0.100$ の時の標準偏差が極めて大きい。一方、制御有り($D_p/D=0.8$)の結果に着目すると、平均値とその標準偏差ともに減少している。

次に円板周りの流れ場および渦構造と抵抗低減効果について考察する。図6に流線と主流方向速度分布を併せて示す。円板の正圧面側では同軸対向型のプラズマジェットと主流の干渉により渦が生じ、その渦構造の大きさと発生位置が D_p/D に依存すること、円板の背圧面側では、円板端から生じたせん断層の巻き上がりの始まる位置がフローモーフィングにより変化し、それにより後流中の再循環領域の大きさも変化していることがわかる。さらに、円板の正圧面側の流線の分布を注目するとPAの直径に対応して形状が変化していることも確認できる。これは我々が提案したフローモーフィング技術の有効性を示す一つの結果といえる。最後に、図7に、ある時刻の流れ場を速度勾配テンソルの第二不変量の等値面と円板の中心断面上の乱流運動エネルギー(TKE)の等値線を用いて可視化した。初めに、フローモーフィング非制御時(No-control)と制御時($D_p/D=0.8$)を比較すると、円板端より生じたせん断層の様子に若干違いがみられる。フローモーフィングによる制御時($D_p/D=0.4$)の場合では、正圧面側で生じた渦構造が崩壊し移流し、円板端からのせん断層に大きく干渉している。この干渉により後流構造にも変化が起き、図5に示した抗力係数 C_d の変動の要因となっていると考えられる。

4. まとめ

本研究はプラズマアクチュエータのジェットの作用で物体周囲の流れを鈍い物体のものから流線形物体のそれに変化させることで流体抵抗の低減を試みる、フローモーフィング技術を開発した。円板の抵抗低減に成功し、その低減メカニズムを可視化と数値シミュレーションの両方から明らかにした。円板正圧面のよどみ点付近に、PAの対向ジェットにより渦輪状の構造が形成され、それにより、周囲の流れが流線型に変化する場合と、PAジェットにより円板端付近に、渦循環領域が形成され、それによりせん断層の剥離が抑えられる場合の2つがあることがわかった。数値シミュレーションでは、フローモーフィングを行った際、とくに抗力低減の効果が大きいときに、円板正圧面で形成された渦構造と、せん断層および後流の干渉が大きくなることが確かめられた。

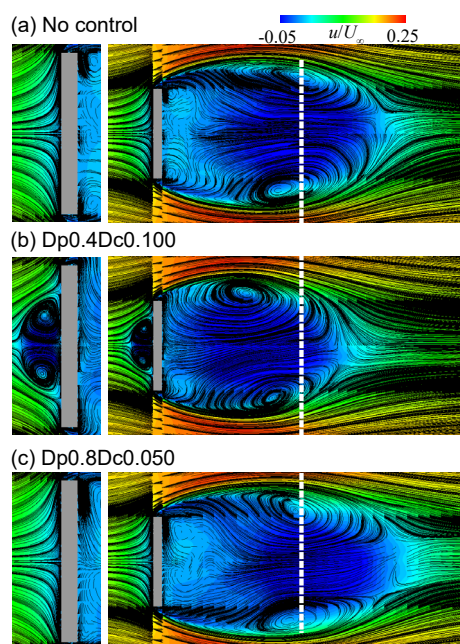


Fig.6 Time mean velocity profile and streamline

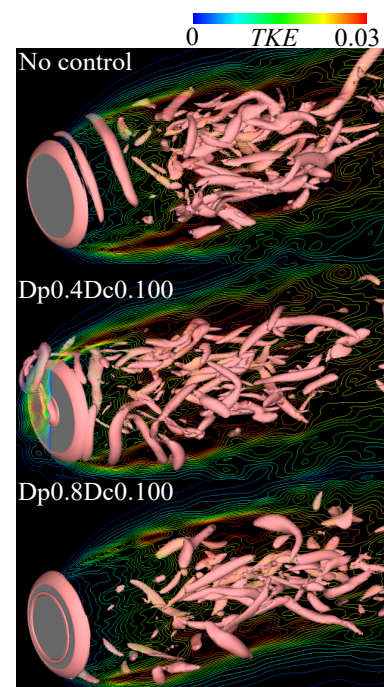


Fig.7 Instantaneous vortex structures

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計2件（うち査読付論文 1件/うち国際共著 0件/うちオープンアクセス 2件）

1. 著者名 青野 光, 本阿弥真治, 石川 仁	4. 巻 37
2. 論文標題 低レイノルズ数流れ同軸型DBDプラズマアクチュエータを用いた円板まわりの流れ制御	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 日本流体力学会誌「ながれ」	6. 最初と最後の頁 520-523
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 Aono Hikaru, Kimura Taiki, Honami Shinji, Ishikawa Hitoshi	4. 巻 52
2. 論文標題 Mechanisms of drag reduction due to flow control around circular disk using coaxial type dielectric barrier discharge plasma actuator at low Reynolds numbers	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Fluid Dynamics Research	6. 最初と最後の頁 015508 ~ 015508
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) https://doi.org/10.1088/1873-7005/ab5a33	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

〔学会発表〕 計2件（うち招待講演 0件/うち国際学会 1件）

1. 発表者名 青野 光, 本阿弥真治, 石川 仁
2. 発表標題 低レイノルズ数流れ同軸型DBDプラズマアクチュエータを用いた円板まわりの流れ制御
3. 学会等名 日本流体力学会年会2018
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 H. Aono, S. Honami and H. Ishikawa
2. 発表標題 A Numerical Study on Flow Control around Circular Disk using Coaxial Type DBD Plasma Actuator at Low Reynolds Number
3. 学会等名 Tenth International Conference on Computational Fluid Dynamics (ICCFD10) (国際学会)
4. 発表年 2019年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究 分担者	青野 光 (Aono Hikaru) (10623712)	東京理科大学・工学部機械工学科・助教 (32660)	
研究 分担者	本阿弥 眞治 (Honami Shinji) (30089312)	東京理科大学・工学部機械工学科・教授 (32660)	
連携 研究者	瀬川 武彦 (Segawa Takehiko) (50357315)	国立研究開発法人産業技術総合研究所・その他の部局等・主任研究員 (82626)	