

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 27 年 6 月 15 日現在

機関番号：56203

研究種目：基盤研究(C)

研究期間：2011～2014

課題番号：23560214

研究課題名(和文) DBDプラズマアクチュエータによる平板後縁はく離流れの制御

研究課題名(英文) Separation control of flow over plate trailing edge with DBD Plasma Actuator

研究代表者

上代 良文 (Jodai, Yoshifumi)

香川高等専門学校・機械工学科・准教授

研究者番号：10321499

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 1,400,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、DBDプラズマアクチュエータ(Dielectric Barrier Discharge Plasma Actuator, DBDPAと呼ぶ)によって、平板の後縁付近に発生させた噴流が、速度分布に及ぼす影響を実験的に調べた。DBDPAへの入力電圧・周波数を変化させて誘起噴流の強さを制御した。DBDPAが強く発光する条件のときに、誘起噴流速度が最大となることをピトー管測定で明らかにした。DBDPAにより、後流中心付近の速度欠損を増速制御することが可能であること、それが噴流の向きに強く依存することが示された。

研究成果の概要(英文)：The present research was experimentally conducted with a pair of the dielectric barrier discharge plasma actuator (DBDPA), attached to both sides of the test flat plate near its trailing edge, as an active flow control device. The strength of the double-jet was controlled by varying plasma excitation voltage and frequency applied to the DBDPA. The discharge voltage shows nonlinearity for the input voltage to the DBDPA. The value of the input voltage with maximum output peak corresponds to that with the fastest double-jet flow with strong radiated light of ionized air. It is shown by a Pitot-tube experiment that the mean velocity distribution of the wake changes, strongly depend on the direction of the double-jet. The effect of the DBDPA on the velocity distribution of the wake flow was shown as an acceleration of wake velocity. As a result, DBDPA narrow the wake width with double-jet towards upstream or downstream.

研究分野：流体工学

キーワード：乱流 はく離 DBDPA

1. 研究開始当初の背景

(1) 厚い後縁をもつ細長い物体（全抗力に対する摩擦抗力の寄与が大きい物体）の後縁形状による近傍後流の変化に関して、たとえば古くは水車ランナの渦励振低減策、最近では風車ブレードの騒音低減策として重要視されている。一般に翼形の後縁に有限厚さをもたせることは、加工性、材料力学的強度、熱負荷的強度において優れるほか、遷音速流れや超音速流れにおいては圧力抵抗の低減^①も有効である。一方で、亜音速流れにおける背圧に基づく抵抗（底面抵抗、base drag）低減、騒音抑制あるいは混合促進の観点からは、そのような厚い物体後縁を維持しながら、DBD プラズマアクチュエータ（Dielectric Barrier Discharge Plasma Actuator, 以下 DBDPA と呼ぶ）による壁面噴流によって、はく離直前の境界層の平均速度勾配の増加を抑制することの工学的意義は大きい。ところが、翼形などについて、その後縁におけるはく離が流れ場に及ぼす影響、さらにはその制御に関する研究^①はほとんど見当たらず、鈍頭物体の後流制御に関する研究^②が枚挙にいとまがないこととは対照的である。

(2) そこで、著者はこれまでに、後縁ではく離を伴う長い平板を流れに平行に設置し、主流が零圧力勾配となるように注意深く流路を調整して、はく離が後縁近傍の乱流構造に及ぼす影響（境界層の発達およびはく離渦構造の変化）、ならびに後縁に設置したスプリッター板（Splitter Plate, 以下 SP と呼ぶ）による流れの制御効果を調査した。その結果、後縁近傍境界層の内層における速度超過現象が SP の設置によって緩和（摩擦抵抗低減）されることを明らかにした^③。そして、はく離渦構造が $l/h=1$ (h は物体の厚さ、 l は SP の長さ) を境に大別できるという結果を示した。さらに、 $l/h=0.5$ においては、放出渦の変動速度のパワースペクトル密度が SP なしの場合よりも強いピークを示し、後流の自己保存領域での速度欠損分布に基づく抵抗係数が SP なしの場合と比べてむしろ強まるという流体力学的に重要な効果を見つけた。

(3) その結果として、抵抗低減効果および渦放出の抑制/増強効果が明らかになれば、省エネルギー化の観点から、工学的・社会的意義が大きい。

(4) 最近のターボファン・ナセルで実用研究の進むノイズ低減用シェブロンは、鈍い後縁の周期的切り欠きによる底面抵抗低減^①や各種三次元突起による鈍頭物体の圧力抵抗低減のような、三次元制御^②の応用例と見ることができる。一方、本流れ場の SP や DBDPA は、主として横渦の二次元制御を試みるものであり、全スパンに渡る抵抗低減や乱流混合促進などへの応用が期待される。

2. 研究の目的

(1) 本研究の目的は、はく離前の境界層の横渦の強度変化を伴う、流れ制御に着目して、SP の代わりに DBDPA を設置することによって、はく離流れの制御を行うものである。本研究の特色は、物体の上流側の縮流効果ならびに境界層の発達途上の影響を排除し得る十分長い平板を用いる点にある。即ち、後縁ではく離のみが、境界層および後流の発達に及ぼす影響を調査する点が本研究の独創性であり、著者が知る限り同様の研究は皆無である。

(2) 従来の、後流のみに着目した鈍頭物体の制御に関する研究とは異なり、はく離流れの初期条件となるはく離点よりも上流側の境界層特性の変化を明らかにした上で、はく離渦構造と後流の発達を解明する。そのため、従来他で研究のなされていない摩擦抗力の寄与が大きく現れる長平板を対象として、流れ場の二次元性が確保された流路で、SP 同様に二次元制御を行うために、DBDPA を全スパンに渡って配置する。

(3) 本流れ場は、主流が零圧力勾配でありながら、後縁ではく離の影響を受けて、境界層の内層が順圧力勾配となっており、縮小流れのような単純な加速流れとの差異を明らかにする点において流体力学的意義も大きい。

3. 研究の方法

(1) 本研究では、DBDPA によって、長い平板の後縁付近に発生させたダブルジェットが、後流の速度分布に及ぼす影響を風洞実験により調べることを目的とする。著者はこれまでに、摩擦抗力が支配的な長平板について、乱流境界層の発達の受動制御を研究してきたが、これはそれを発展させた、後流の能動制御である。

(2) 図 1 に、DBDPA の概要を示す。露出電極と埋没電極の間に誘電体が挟まれており、電極間に高周波高圧の交流電圧を印加することによって発生するプラズマの作用で、露出電極側から埋没電極側に向かう噴流が誘起される。(a) は誘起される流れが一つの、典型的な Single-DBDPA^{④⑤}、(b) は誘起される流れが二つの Double-DBDPA である。

(3) 図 2 に、流れ場の概要および座標系を示す。長い平板の後縁に設置する (a) 従来の各種流路分割板による受動制御^③と (b) 本報告の DBDPA による能動制御とがある。

(4) 図 3 に、長い測定用平板の後流制御のために、平板後縁に取り付けるダブルジェット型 DBDPA の向きを示す。(a) は上流向きに噴流を発生させる Upwind jets 配置、(b) は下流向きに噴流を発生させる Downwind jets 配

置である。主流速度は $U_\infty = 3.5 \text{ m/s}$ とする。

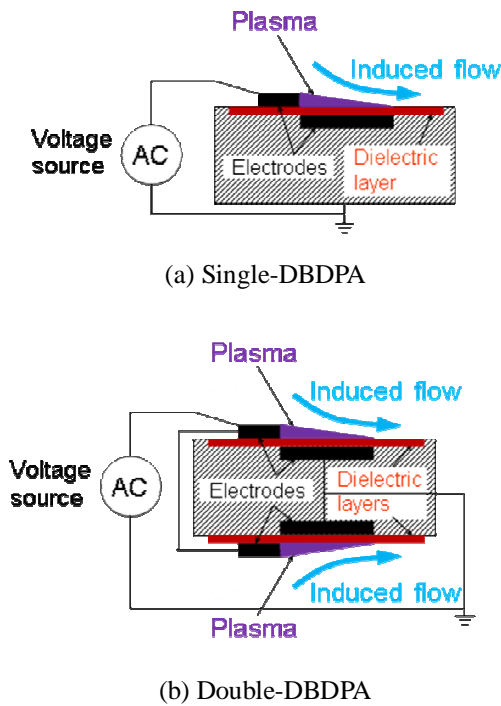


図1 DBDPAの概要

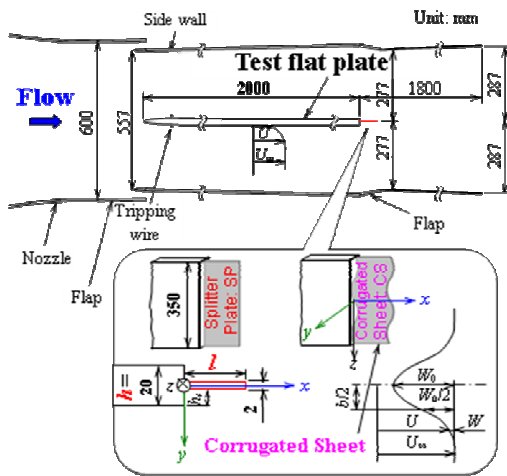


図2 流れ場の概要および座標系

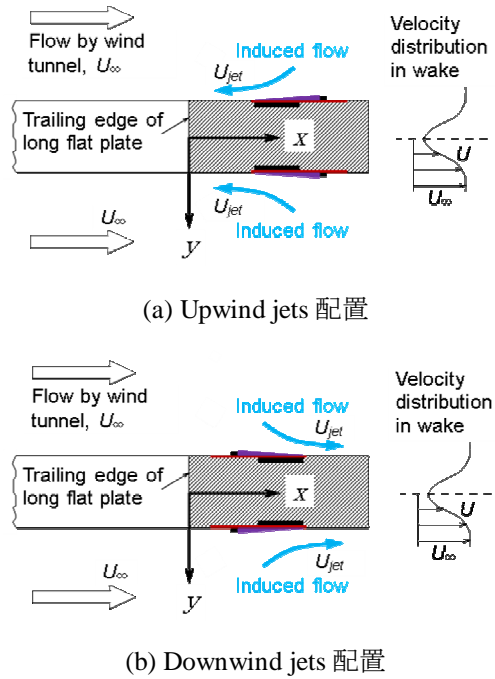


図3 長い平板後縁に設置されたDBDPA

4. 研究成果

(1) スパン 150mm の試作 DBDPA への印加電圧・周波数を変化させ、誘起壁面噴流の最適条件を把握した。本 DBDPA は、平板側に埋没された電極と気流側に露出した電極との間に誘電体を挟んだ構造である。高電圧高周波パルス電源を DBDPA に接続し、入力電圧・周波数をそれぞれ $3 \sim 10 \text{ kV} \cdot 4 \sim 40 \text{ kHz}$ の間で変化させて、DBDPA によって発生する壁面噴流速度を、絶縁性の高いポリイミド製の自作ピトー全圧管によって測定し、噴流の最適条件を決定した。噴流速度の印加電圧依存性(周波数を 10 kHz に固定)については、 6 kV 以上で噴流速度の増加傾向が頭打ちし、 6.5 kV において 2.6 m/s の噴流を得た。また、噴流速度の印加周波数依存性(電圧を 4 kV に固定)については、 $15 \sim 25 \text{ kHz}$ において強いプラズマの発光とともに 2.8 m/s の噴流が得られるが、 6 kHz 以下と 30 kHz 以上とでは十分な噴流は得られない。

(2) 風洞実験流路内の測定平板の後縁近傍の両側にスパン 240 mm の DBDPA を貼り付け、電極間に 2.6 kV 以上の、 10 kHz の交流電圧を印加することにより、DBDPA 近傍に強い発光を伴う平板と平行なダブルジェットが生成される。

(3) 図 4 に、シャント抵抗計測法による DBDPA 回路の電圧値 V_{ilde} およびポリイミド製のピトー全圧管による誘起噴流の流速 U_{jet} を示す。交流電圧 $E = 2.6 \text{ kV}$ のときに、いずれも最大値 $V_{ilde} = 3.8 \text{ V}$ および $U_{jet} = 2.2 \text{ m/s}$ を生ずる。 $E = 2.6 \text{ kV}$ のとき、発光写真の輝度も高かった。全圧管は、誘電体表面の上

0.5 mm, 誘電体下流端から下流 5 mm の位置に設置した。1.5~2.5 m/s での, 供試全圧管の速度係数は 0.9924 である。

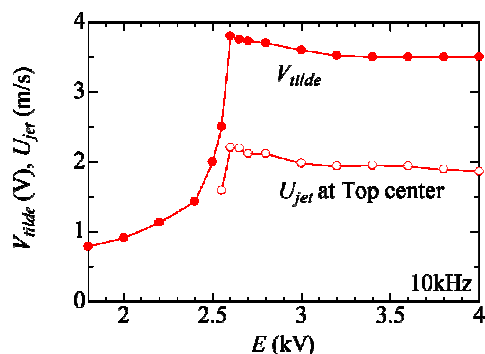


図 4 DBDPA 回路の電圧と誘起噴流の流速

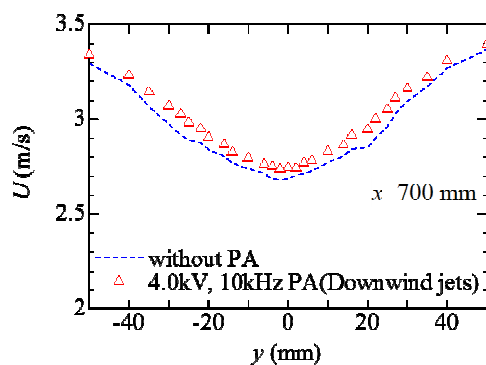


図 5 後流速度分布の DBDPA による制御

(4) 生成されたダブルジェットによって, 後流中心付近の速度欠損が回復 (増速) する。図 5 に, 測定平板後縁からの距離 $x=700$ mm における, 後流の速度分布を示す。後流の流速測定には, 速度係数 0.9951 の自作ピトー管 (全圧管・静圧管の直径 1.06 mm, 静圧孔 0.3 mm) を用いた。DBDPA による増速効果は, 下流に行くほど, 流れに直交する y 方向に広がるのが明らかとなった。特に, ダブルジェットを下流向きに発生させると, 増速領域が著しく広がる。

謝辞 プラズマアクチュエータの製作に関して, 鳥取大学松野隆講師, 川添博光教授にご教示いただいた。また, ポリイミド製ピトー管の製作に関して, 千葉工業大学佐野正利教授にご教示いただいた。さらに, 本実験は香川高専風洞実験室において, 専攻科特別研究生大西翔氏, 登家章氏, 森上泰行氏および本科卒業研究生津村碧依氏, 丸橋創史郎氏, 宮武利樹氏の協力を得て行われた。また, 電気的安全性については香川高専漆原史朗准教授にご確認いただいた。記して深甚なる謝意を表す。

<引用文献>

①Tanner, M., A Method for Reducing the Base Drag of Wings with Blunt Trailing Edge, *Aeronautical Quarterly*, Vol. 23 (1972), pp. 15-23.

②Choi, H., Jeon, W. P. and Kim, J., Control of Flow Over a Bluff Body, *Annual Review of Fluid Mechanics*, Vol. 40 (2008), pp. 113-139.

③Jodai, Y., Takahashi, Y., Ichimiya, M. and Osaka, H., The Effects of Splitter Plates on Turbulent Boundary Layer on a Long Flat Plate Near the Trailing Edge, *Transactions of the ASME-Journal of Fluids Engineering*, Vol. 130, No. 5 (2008), CIDs 051103 (7 pages).

④T. C. Corke, C. L. Enloe and S. P. Wilkinson, Dielectric Barrier Discharge Plasma Actuators for Flow Control, *Annual Review of Fluid Mechanics*, 42(2010), 505-529.

⑤松野隆, プラズマアクチュエータによる空力制御: 航空宇宙分野における研究動向, 日本航空宇宙学会誌, 62-11(2014), 365-370.

5. 主な発表論文等

[学会発表] (計 1 件)

① 上代良文, プラズマアクチュエータによる後流制御実験, 香川大学第 10 回先端工学研究発表会, 2015.2.2, 香川大学 (香川県・高松市)

6. 研究組織

(1)研究代表者

上代 良文 (JODAI, Yoshifumi)

香川高等専門学校・機械工学科・准教授

研究者番号: 10321499