

小特集

プラズマアクチュエータの動向

Research Trend of Plasma Actuator

1. はじめに

1. Introduction

野々村 拓¹⁾, 瀬川 武彦²⁾, 深潟 康二³⁾, 松野 隆⁴⁾, 清水 一男⁵⁾, 白石 裕之⁶⁾

NONOMURA Taku¹⁾, SEGAWA Takehiko²⁾, FUKAGATA Koji³⁾,
MATSUNO Takashi⁴⁾, SHIMIZU Kazuo⁵⁾ and SHIRAISHI Hiroyuki⁶⁾

¹⁾宇宙航空研究開発機構, ²⁾産業技術総合研究所, ³⁾慶應義塾大学, ⁴⁾鳥取大学, ⁵⁾静岡大学, ⁶⁾大同大学

(原稿受付: 2015年7月10日)

本小特集では、ここ10年でマイクロ流体制御デバイスとして注目を集め、活発的に研究が行われているプラズマアクチュエータに関する成果を紹介する。本章では背景、歴史、原理、国内外の動向、本小特集の内容を示す。背景として、従来型の制御デバイスと比較した際の利点を紹介し、着目されてきた理由を示す。歴史に関してはキーとなる論文を紹介し、プラズマアクチュエータの研究の流れを示す。原理に関してはプラズマアクチュエータの構成を示し、そのメカニズムも短く説明する。最後に、国内外での最新の研究動向に触れながら2-5章で議論される、1)推力・駆動力基本特性、2)基礎流れへの適用、3)計測法、4)産業応用に関する研究の現状を簡単に紹介し、以降の章での詳細な解説に繋げる。

Keywords:

flow control, plasma actuator, airfoil, flat plate, circular cylinder, boundary layer, experiment, numerical simulation

1.1 プラズマアクチュエータ研究の背景

流体分野において、様々な条件で流体を制御することが求められる。これまでに流体の制御方法として、翼に取り付けた舵面の利用や吹き出しジェットなどの方法が考えられてきた。これらの方法は、1)応答性が悪い、2)制御のために強い制御入力が必要である、3)制御のための機器の大掛かりな設計変更が必要である、などの欠点がある。それに対して、近年注目を集めているマイクロ流体制御デバイスの一つである、本小特集で扱うプラズマアクチュエータは、作動流体が気体である場合に、発生させたプラズマを利用して誘起流れを発生させ流体制御につなげる(図1)もので、1)電気回路で制御されるため応答性がよい、2)少ない入力での流体制御ができる、3)流体機器に電極と誘電体を貼り付けるだけでよい、などの利点があり、ここ10年ほどよく研究されてきた。プラズマアクチュエータと記した場合は、より広い範囲での流体制御デバイスを指すことがあるが、本小特集では研究が重点的に行わ

れている誘電体バリア放電(Dielectric Barrier Discharge, DBD)プラズマアクチュエータの研究[1-10]を紹介する。以後ではDBDプラズマアクチュエータをプラズマアクチュエータと記す。合わせて、本デバイスは作動流体が気体である時に利用できることから以降では「流体」は「気体」とであるとして進める。

流体制御研究は古くから行われてきたが、プラズマアク

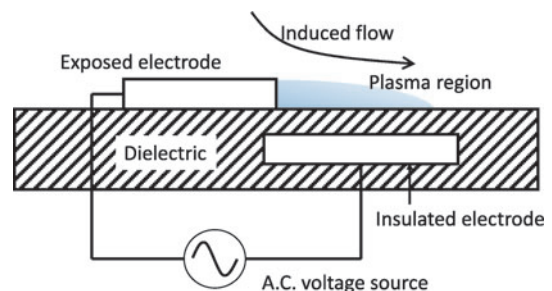


図1 プラズマアクチュエータの模式図。

チュエータによる流体制御の歴史は比較的短く、最初のプラズマアクチュエータによる流体制御の報告は、1998年にRothがこれを境界層制御に利用したところに端を発する[11]。彼らの研究報告の後、アメリカ空軍研究所、Corkeらなどの研究グループによる実験的な研究[12-14]を得て、アメリカ航空宇宙学会の講演会等を通じて幅広い分野で研究されるようになった。2006、2007年頃からは、Moreauらの研究グループなどヨーロッパでの研究成果も多く報告されるようになった[15-17]。その後、アメリカ航空宇宙学会の関連学会において、プラズマアクチュエータによる流体制御のセッションが複数設けられ、基礎から応用まで精力的に研究成果が発表されている。研究を主なカテゴリー別に分けると、1)推力駆動力に関する研究、2)基礎流れに関する研究、3)応用的研究に大別され、これらの研究が進むにつれて物理量の計測方法が発展してきている。2000年代には、1)と2)に関する研究が主体であったが、2010年代に入り3)の応用的研究が増えてきたように見受けられる。ここ4-5年の間でレビュー論文[1-10]が多数発行されており、更なる情報はこれらの論文も合わせて参照されることをお薦めしたい。国内での研究動向に関しては本小特集の各章で触れるため詳細は割愛するが、機械系、航空系の流体工学のコミュニティにより研究が進められている。

1.2 プラズマアクチュエータの原理・性能

前述したようにプラズマアクチュエータは誘電体バリア放電を利用している。ここでは、簡単なプラズマアクチュエータのセットアップおよび原理を説明する。詳細は2章でのプラズマ物理からの説明に譲る。プラズマアクチュエータは図1に示すように誘電体を電極で挟みこの電極間に交流高電圧をかけて放電（ストリーマ放電およびグロー放電）を起こし電荷（イオン分布）の不均一を発生させ、それが電場によって力を受けることで誘起流れを誘導する。

誘電体にはカプトン、テフロン、セラミックなどの素材が用いられており、交流のPeak-to-peak電圧としては3-20 kVpp（電圧）が用いられる。薄い誘電体に高電圧をかけると絶縁破壊が起こるため、誘電体の素材、薄さに応じて適切な電圧をかける必要がある。電圧、周波数、電圧波形、素材などに対する誘起速度の大きさ等の基本特性は系統的に調べられており、これらは2章でより詳細に説明される。実験装置としては、高電圧用のアンプが必要となる。

このプラズマアクチュエータの性能は、単体で数キロボルトの電圧をかけた時に0.1-10 m/s程度の誘起速度が発生することが知られている。電圧や交流周波数が大きくなるに連れ誘起速度も大きくなるが、ある程度小さな電圧ではプラズマが発生しないことや大きな電圧では異なるプラズマ形態へ遷移するために効率が下がること、誘電体が絶縁破壊を起こすことに注意が必要である。

1.3 以降の章でのスコープ

最後に、本小特集の以降の章での解説事項にそれぞれ触れる。前述のように大きく3つの研究分野とそれを支える

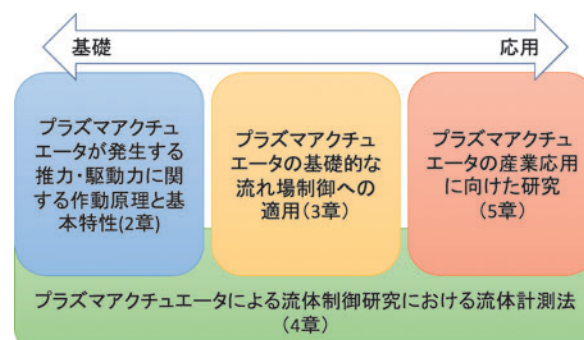


図2 プラズマアクチュエータ研究の分野と本小特集の関係。

計測方法の進歩があり、これらをそれぞれ1章ずつ割り当てて解説した。全体像を図2に示す。

2章では、プラズマアクチュエータが発生する推力・駆動力に関する作動原理と基本特性を紹介する。作動原理に関しては、流体モデルによる大気圧下のプラズマ運動による定式化からの説明を行い、プラズマの基本特性理解につながる放電構造の概略を数値シミュレーションで示す。合わせて、実験結果から基本特性を説明する。

3章では、プラズマアクチュエータを基礎的な流れ場の制御に適用した研究例を紹介する。具体的には翼型周り流れの剥離制御に関する大規模数値シミュレーション、平板翼交流の剥離制御に関する実験的研究、円柱周り流れの渦放出抑制の実験的研究、乱流境界層の摩擦低減制御への可能性を示した研究を紹介する。

4章では、プラズマアクチュエータによる流体制御研究における流体計測法を紹介する。プラズマアクチュエータが適用される流れ場の計測では放電により生成されるイオンの存在などが問題とならない非接触計測法である、粒子画像流速測定法（PIV, Particle Image Velocimetry）および、流体の密度変化を利用したシュリーレン法を紹介する。また直接的な流体速度計測として熱線流速計を用いた放電部近傍の流体の速度変動計測について紹介する。

5章では、上記研究を発展させ、産業応用に向けた研究を紹介する。具体的には、1)多電極マイクロプラズマアクチュエータを用いた流体制御技術、2)風力発電の高出力化、3)パンタグラフにおける騒音低減、4)タービン動翼先端流れ抑制によるターボ機械の効率改善を紹介する。

最後に6章では、5章までで取り上げきれなかったプラズマアクチュエータの研究の概要を示しながら、今後のプラズマアクチュエータの可能性や期待される適用先、進めべき研究内容を述べる。合わせて、これまでの研究の問題点にプラズマアクチュエータやその測定法が共通化されていないことが挙げられるが、これらを解決するために現在行っているプラズマアクチュエータモデルの標準化や標準的な測定法の提案など、著者らが進めている活動の紹介を行いながら将来展望を示す。

参考文献

- [1] 佐宗章弘：日本機械学会誌 110, 310 (2007).
- [2] 藤井孝藏，松野隆：日本機械学会流体工学部門ニュー

ズレター2007年12月号 (2007).

- [3] 深湯康二他：ながれ **29**, 243 (2010).
- [4] T.C. Corke *et al.*, Prog. Aerosp. Sci. **43**, 193 (2007).
- [5] E. Moreau, J. Phys. D: Appl. Phys. **40**, 605 (2007).
- [6] T.C. Corke *et al.*, Exp. Fluids **46**, 1 (2009).
- [7] T.C. Corke *et al.*, Ann. Rev. Fluid Mech. **42**, 505 (2010).
- [8] J.J. Wang *et al.*, Prog. Aeosp. Sci. **62**, 52 (2013).
- [9] N. Benald and E. Moreau, Exp. Fluids **55**, 1846 (2014).
- [10] K. Fujii, Phil. Trans. R. Soc. A. 2014 372 (2014).
- [11] J.R. Roth *et al.*, AIAA Paper, Paper 98-0328 (1998).
- [12] C. L. Enloe *et al.*, AIAA J. **42**, 595 (2004).
- [13] M.L. Post and T.C. Corke, AIAA J. **42**, 2177 (2004).
- [14] C. L. Enloe *et al.*, AIAA J. **44**, 1127 (2006).
- [15] M. Forte *et al.*, J. Electrostatics **63**, 929 (2005).
- [16] N. Benard *et al.*, Exp. Fluid **43**, 603 (2007).
- [17] T.N. Jukes and K.S. Choi. Phys. Fluids **21**, 094106 (2009).