

小特集 プラズマアクチュエータの動向

6.まとめ

6. Summary

野々村 拓¹⁾, 瀬川 武彦²⁾, 深瀬 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されているプラズマアクチュエータに関する研究成果を紹介してきた。本章ではこれまで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、今後進めるべき研究内容を述べる。併せて、これまでの研究の問題点の一つである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点を解決するために、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推奨など、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描く。

Keywords:

flow control, plasma actuator, standard actuator model, V-QLissajousmethod

6.1 その他のプラズマアクチュエータ研究

これまで紹介してきたように、プラズマアクチュエータ研究は基礎から応用まで広く進められてきている。ここでは世界的な動向とともに、2-5章で説明しきれなかった点を示していく。2章で述べたプラズマアクチュエータの誘起する速度を大きくする研究は、材料・電圧波形の観点から大きく進められてきたことを述べたが、さらなる流体制御効果向上に関する研究が行われている。例えばDBDプラズマアクチュエータの発展形として、電気回路に直流成分を入れ込んだ3電極プラズマアクチュエータ（スライディングプラズマアクチュエータ）などがあり、大幅な誘起速度の向上が報告されている[1, 2]（4章で一部可視化結果を紹介）。また、電圧波形を数百ナノ秒単位のパルスとしたナノ秒パルスプラズマアクチュエータ[3, 4]は、従来のプラズマアクチュエータでは難しいといわれてきた高速流れへの適用が可能という報告もあり、期待がもたれている（こちらも4章で一部可視化結果を紹介）。加えて、3章で述べた単純化された物体周りや境界層周りへの研究も精力的に進められている。3章で述べられなかった研究として、層流境界層の乱流遷移を促す流体中の不安定波を打ち消すようにプラズマアクチュエータを駆動させ乱流遷移を遅らせる研究[5]や、プラズマアクチュエータの露出電極を波型とすることで3次元的な誘起流れ場を作り出し乱流混合を強め制御効果を向上させる研究[6-7]がある。また、3章で使われたバースト駆動などプラズマアクチュエータでよく用いられる特徴的な駆動方式を、静止場で用いた場合に得られる速度変動スペクトルなどに関する基礎的な研究[8]が進んでおり、そのメカニズムの理解につ

ながっている。4章で様々な測定法を示したが、静止流中でプラズマアクチュエータを駆動させた場合に得られるPIV結果から2章で議論した体積力の分布を逆算する研究が精力的に行われてきており、様々な方法が提案されている。一般に速度場から体積力を再構築する場合には1つ以上の未定数が残るため、これらをどのように近似するかがそれぞれの手法の違い[9-10]となる。5章では応用例を示したが、他にも自動車やトラックのサイドミラーに適用した研究[11]、空調機や熱交換器の各種流体の輸送管を意識した流路の研究[12]、小型飛行機に載せた研究[13, 14]、プラズマアクチュエータをガーニーフラップの代わり[15, 16]として利用する研究などが報告されている。また応用事例ではないが、これらのような複雑な流れ場を制御するために、フィードバックループ[17, 18]に関する研究が進められてきている。

6.2 今後進めるべき研究

ここまでに示してきたように多くの研究が実施されているが、今後進めるべき研究を簡単に述べたい。まず、様々な流体場への適用が報告されているが、成功例が比較的低レイノルズ数、高運動量係数（流れ場がもつ運動量に対するプラズマアクチュエータが作る運動量の比）の場合に限られていることを挙げたい。今後、より実用的な流れ場での利用が期待されるが、実用的な流れでよく見られる高レイノルズ数、低運動量係数での条件で、流体制御を可能にするためには、2章で示したプラズマ物理をより深く理解し誘起速度を大きくする研究、3章で示した様々な流体制御メカニズムのうち、高レイノルズ数領域で有効な流

体制御メカニズムの同定とそれを強める方法を明らかにする研究が特に重要と考えられる。また次節で説明するが、これまでの研究ではプラズマアクチュエータの電極部はそれぞれの研究チームが独自に作成したものを利用することが多く、電源などの電気回路も異なるため再現性の観点で疑問が残っている。次節以降でこれを一部クリアする標準モデルの提案を紹介する。今後は研究成果の再現性を高めるための本質的な研究が期待される。

6.3 プラズマアクチュエータの標準化に向けた動き

前述したように、これまでのプラズマアクチュエータ研究の一つの問題点として、各研究チームが独自に作成したプラズマアクチュエータ、電気回路を利用することが多いために、再現性が十分に担保されないことが挙げられる。様々な試験で全く同一のプラズマアクチュエータ、電気回路の利用は不可能に近いが、少なくとも事前に標準的な絶縁材料および電極から構成されるプラズマアクチュエータとそれが作成したプラズマアクチュエータの静止流体中での誘起速度の比較から、作成したプラズマアクチュエータの性能を理解することや、標準的なプラズマアクチュエータを利用した他グループの試験結果との比較からそれぞれの電源装置から出力される電圧波形の相違による性能への影響把握などを行うことが重要と考える。

上記のような使い方を想定して、本小特集の著書らが日本機械学会流体工学部門、プラズマアクチュエータ研究会でプラズマアクチュエータの標準モデルを提案しようとしている。図1に標準モデルの候補を示す。これらはポリイミドやテフロンを絶縁層とする両面銅張積層板の両面エッチングにより作成したもので、再現性の高い電極部が作成可能であり、上記のような用途に十分耐えうるものと考えている。またこの他に、プラズマアクチュエータを利用する際の電源の標準化(図2)も同時に進めている。さらに、プラズマアクチュエータの消費電力量は、V-Qリサーデュ法を用いた評価が標準になりつつある[19]。図3に示す測

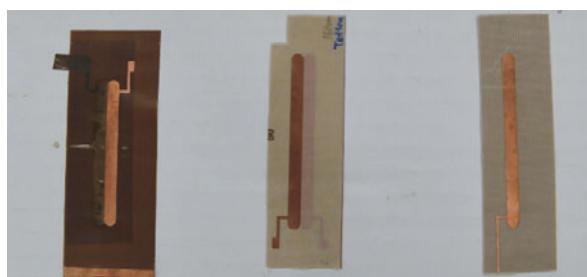


図1 標準プラズマアクチュエータモデル。



図2 PSI社製高電圧電源。

定回路を用いて取得したプラズマアクチュエータに印加される電圧(1周期)と電荷の関係を図4に例示する。これらのノウハウを共有することにより、プラズマアクチュエータの消費電力の定量比較が進むことを狙っている。

6.4 最後に

本小特集ではプラズマアクチュエータの研究動向を紹介した。ここで示したように、プラズマアクチュエータによる流体制御はプラズマ物理から流体力学まで多岐に渡る研究分野での研究が行われてきており、流体制御の可能性がみえてきた。今後実用化に向けてさらなる進展が必要と考えられる。読者の皆様に、現状を理解していただくとともに、本分野での研究を検討していただくきっかけになれば幸いである。

参考文献

- [1] R. Sosa *et al.*, IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul. **16**, 305 (2009)
- [2] T. Matsuno *et al.*, AIAA paper 2012-3238 (2012).
- [3] J. Little *et al.*, AIAA J. **50**, 350 (2012).
- [4] S. Sekimoto *et al.*, AIAA paper 2014-0767 (2014).
- [5] S. Grundmann and C. Tropea, Exp. Fluids **44**, 795 (2008).
- [6] C-C. Wang *et al.*, J. of Appl. Phys **109**, 083305 (2011).
- [7] R. J Durscher and S. Roy, J. Phys. D **45** (2012).
- [8] M. Kotsonis and L. Veldhuis, J. Appl. Phys, **108**, 113304 (2010).
- [9] M. Kotsonis *et al.*, J. Phys. D, **44**, 045204 (2011).

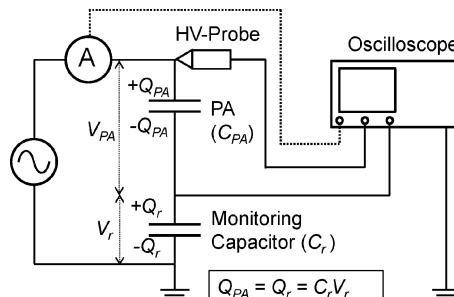


図3 V-Qリサーデュ法の測定回路図[16]。

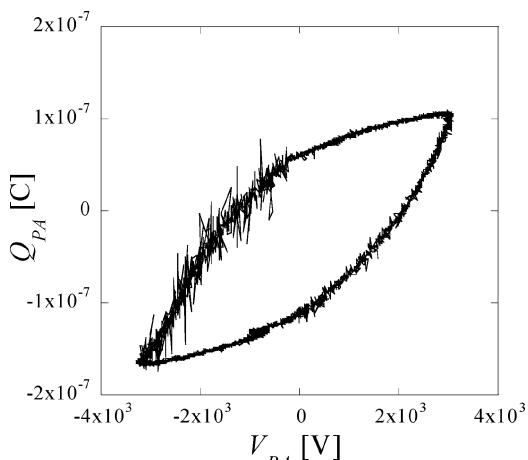


図4 V-Qリサーデュ法の測定イメージ(囲まれた面積と周波数の積が消費電力になる)。

- [10] N. Benard *et al.*, *J. Phys. D* **46**, 245201 (2013).
- [11] T. Michelis, M. Kotsonis, *J. Fluid Eng.*, to appear (2015).
- [12] 佐野正利他：*機論* **81**, 821 (2015).
- [13] A. Duchmann *et al.*, *AIAA Paper 2013-0900* (2013).
- [14] A. Kurz *et al.*, *AIAA Paper 2014-1249* (2014).
- [15] I. Feng *et al.*, *Exp. Fluids* **52**, 1533 (2012).
- [16] 鈴木大樹他：*機論* **81**, 826 (2015).
- [17] N. Benard *et al.*, *Phys. Fluids* **23**, 083601 (2011).
- [18] A.J. Lombardi *et al.*, *AIAA J.* **51**, 1130 (2013).
- [19] D.E. Ashpis *et al.*, *AIAA Paper 2012-0823* (2012).