



## 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<sup>1)</sup>, 瀬川武彦<sup>2)</sup>, 深潟康二<sup>3)</sup>, 松野 隆<sup>4)</sup>, 清水一男<sup>5)</sup>, 白石裕之<sup>6)</sup>  
 NONOMURA Taku<sup>1)</sup>, SEGAWA Takehiko<sup>2)</sup>, FUKAGATA Koji<sup>3)</sup>, MATSUNO Takashi<sup>4)</sup>,  
 SHIMIZU Kazuo<sup>5)</sup> and SHIRAIISHI Hiroyuki<sup>6)</sup>

<sup>1)</sup>宇宙航空研究開発機構, <sup>2)</sup>産業技術総合研究所, <sup>3)</sup>慶應義塾大学, <sup>4)</sup>鳥取大学, <sup>5)</sup>静岡大学, <sup>6)</sup>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きたい。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章で述べき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章で使われたパルス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しても基礎的な研究[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ぞ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 リサージ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

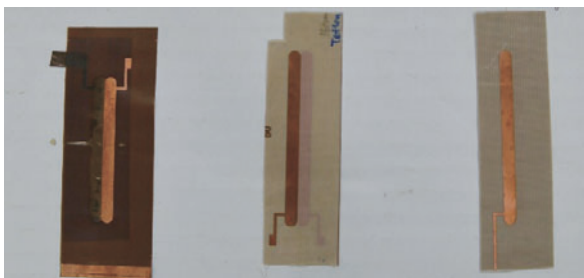


図1 標準プラズマアクチュエータモデル。



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).

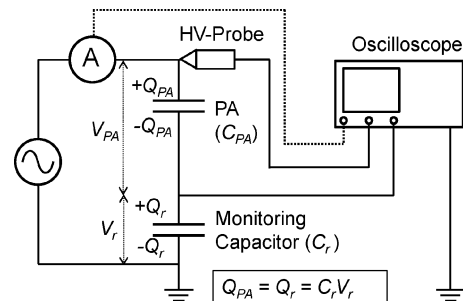


図3 V-Q リサージュ法の測定回路図[16].

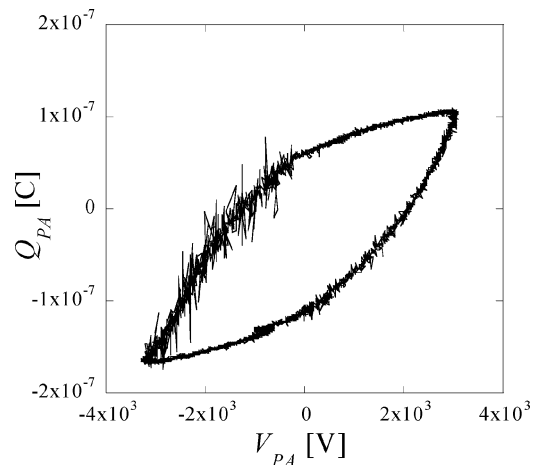


図4 V-Q リサージュ法の測定イメージ(囲まれた面積と周波数の積が消費電力になる)。

- [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* (2015).
- [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).

## 小特集執筆紹介



の の むら たく  
野々村 拓

宇宙航空研究開発機構宇宙科学研究所宇宙飛翔工学研究系助教。2008年東京大学大学院航空宇宙工学専攻博士課程修了。専門は高速流体力学を中心に流体力学全般。好きなこと／もの：PCのキーボードの美しい運指、新しいギター弦、先の読めない小説や映画のプロット、前向きな姿勢。



せ がわ たけ ひこ  
瀬川 武彦

産業技術総合研究所 省エネルギー研究部門 熱流体システムグループ 主任研究員。1998年に東北大学大学院情報科学研究科博士課程を修了して博士(情報科学)を取得後、旧通産省工業技術院機械技術研究所に入所。大学院時代は熱乱流、就職してからは流体制御を主テーマに研究してきました。2004年に英国ノッティンガム大学で客員研究員(JSPS特定国派遣研究者)として滞在中にプラズマアクチュエータと出会い、ターボ機械への実装をめざして活動しています。最近では実験中に大学生・大学院生との体力差を痛感しています。



ふか がた こう じ  
深 濁 康 二

慶應義塾大学理工学部機械工学科教授。2000年スウェーデン王立工科大学よりTeknD、東京大学より博士(工学)を取得。2007年度日本流体力学会竜門賞、2012年度同論文賞、2013年度日本機械学会流体工学部門フロンティア表彰を受賞。専門は流れの制御に関する理論的・数値的研究。趣味は娘と遊ぶこと。ここ何年もショパンのパラードを練習していますが、苦戦しています。



まつ の たかし  
松野 隆

鳥取大学大学院工学研究科機械宇宙工学専攻講師。2004年名古屋大学大学院航空宇宙工学専攻修了。博士(工学)。米国ノートルダム大学を経て現職。航空機に関する応用空気力学を出発点として、流体制御について機械工学分野他にも研究対象を広げています。プラズマ物理は門外漢でしたが現在勉強中。最近では溪流釣り・キャンプやシュノーケリングを通じて流体现象への理解を日々深めています。



し みず かず お  
清 水 一 男

1969年生まれ。静岡大学イノベーション社会連携推進機構准教授。人文系学問は国立大学に必要な、という現在の議論には疑問を覚えています。プラズマや核融合などに関する分野でもビッグサイエンスには倫理に関する議論など人文科学系も必須と考えています。必要なのは人文科学系を理工学系と異なった尺度で評価するための評価指標なのですが、今後的人文系学問を組み込んだ学際的な研究分野の発展を祈念しています。



しら いし ひろ ゆき  
白石 裕之

大同大学工学部教授。1992年京都大学大学院機械工学専攻修了、三菱重工業(株)、文部教官(名古屋大学)などを経て現職。博士(工学)。専門は数値流体力学であり、超音速輸送機・宇宙エンジン・人工心臓を対象とした研究を遂行。航空マニュアルの翻訳なども。趣味は歴史散策、音楽(エレクトーン)および語学。語学に関しては、文部科学省後援・日本語検定1級を始め、6か国語の検定級を持つ。日本漢字能力検定協会上級(ネットワーク)会員でもある。



にし だ ひろ ゆき  
西田 浩之

東京農工大学 大学院工学研究院 先端機械システム部門 准教授。2008年東京大学大学院博士課程修了・博士(工学)。主な研究テーマは、先進プラズマ推進、プラズマを使った流体制御技術、大迎角剥離流れの制御など。プラズマ流から空気の流れまで、“流れの能動的なコントロール”をキーワードに研究に取り組んでいます。



あ べ たか し  
安部 隆 士

宇宙航空研究開発機構名誉教授、1978年東京大学大学院博士課程修了、工学博士、東京工業大学助手、宇宙科学研究所助教、教授、宇宙航空研究開発機構教授(組織改正)を経て、2015年退職。専門は、流体力学、高速流体力学、特に再突入機に係わる気体力学、現在は、神経・脳科学研究を趣味とする。



お がた さとし  
小方 聡

首都大学東京 大学院理工学研究科機械工学専攻 准教授、1971年生まれ、1999年 東京都立大学博士課程修了・博士(工学)、主な研究分野は、流れの抵抗低減、流れの制御、ナノ・マイクロ流体、非ニュートン流体など。流体流動における摩擦を小さくするために、日々研究をしています。流体に限らず色々な摩擦が減ればよいと考えています。



あお の ひかる  
青野 光

東京理科大学工学部第一部機械工学科嘱託助教。2008年千葉大学大学院自然科学研究科にて博士(工学)を取得。米国ミシガン大学博士研究員、JAXA宇宙科学研究所招聘研究員を経て2015年より現職。主な専門は羽ばたき、小型飛行機に関する力学および数値流体力学。趣味は週1回のサッカーと家族とのショッピング。



ふじい こうぞう  
藤井 孝藏

1980年東京大学大学院博士課程修了。NASA エイムス研究所、航空宇宙技術研究所、長きにわたる宇宙科学研究所（現JAXA）生活を経て、2015年4月より東京理科大学工学部教授。JAXA 宇宙科学研究所名誉教授、客員教授も兼務。専門は航空宇宙工学、流体力学、計算工学。冬眠のため冬は仕事をしないとされている。



やま だ しゅんすけ  
山田 俊輔

防衛大学校システム工学群機械工学科講師。1978年生まれ、2008年、東京理科大学大学院工学研究科機械工学専攻博士（工学）。主な研究分野は流体工学における流れの受動・能動制御に関する研究、並びに伝熱工学における強制対流熱伝達に関する熱・流体の同時測定に着手しています。今年の夏からテニスを始めて、ストレスを発散しています。



いし かわ ひとし  
石川 仁

東京理科大学工学部第一部機械工学科教授。1997年北海道大学大学院工学研究科博士課程修了。主な研究分野は流れの制御、乱流渦構造の研究。最近では乱流の物質輸送の特性を活かした食物の成長促進の研究にも取り組んでいる。



ほん あ み しんじ  
本阿弥 眞治

1974年慶応義塾大学工学博士。同年東京理科大学工学部講師、1987年教授、2012年定年退職、同年名誉教授。この間、1979年スタンフォード大学熱流体科学部門客員研究員、1987年から航空宇宙技術研究所原動機部客員研究官。実験流体力学、特に、剥離流れの制御に取り組む。旅の折、水彩画を楽しむ。



せき もと さと し  
関本 諭志

2014年東京大学大学院工学系研究科博士課程修了。研究分野は低レイノルズ数の流体制御。汗をかいてしまうため腕時計をそこらかしこで外してしまう癖があり、懐中時計の購入を検討中。



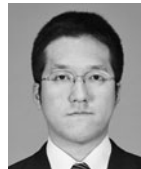
い い だ あ き よ し  
飯田 明由

豊橋技術科学大学機械工学系教授。1988年豊橋技術科学大学大学院工学研究科修士課程修了。1997年博士（工学）。専門は流体力学と流体工学であり、特に、空力音響と乱流現象の解明に関する研究を主なテーマとしている。乱流現象を理解するため、風洞実験と数値シミュレーションを実施している。研究は、流体力学の基礎分野だけでなく、産業界における研究開発（例えば低騒音高速車両の開発など）も行っている。



まつ だ ひさし  
松田 寿

(株)東芝 電力・社会システム技術開発センター 回転機器開発部 主査。1961年札幌生まれ。1989年北海道大学大学院工学研究科より工学博士取得。平成元年に東芝入社。高速エレベータやガスタービンなど種々の流体機械の研究開発に従事。2006年よりプラズマ気流制御研究に取り組む。プラズマ風車の実用化を目指した研究を進めている。仕事のほかバドミントンとスキーにまじめに取り組む運動家です。



みつ もと たけし  
光用 剛

(公財)鉄道総合技術研究所 鉄道力学研究部 集電力学 副主任研究員。新幹線用パンタグラフの空力音低減・揚力特性の安定化に関する研究を行っている。パンタグラフは車両部材の中でも重要部材の一つであり、様々な制約条件を満たしつつ、空力音の低減と揚力特性の安定化という相反する事柄をいかにして両立させるかに頭を悩ませながら日々研究に取り組んでいる



まつ ぬま たか ゆき  
松沼 孝幸

産業技術総合研究所省エネルギー研究部門 ターボマシングループ主任研究員。旧通産省工技院機械技術研究所に入所後、タービン翼列の空力実験やマイクロガスタービンの性能試験に従事。LDV や PIV によるレーザー計測、5孔ピトー管や熱線流速計によるプローブ計測を用いて、ターボ機械の翼先端漏れ流れや動翼・静翼干渉による非定常流れを研究している。