

# プラズマアクチュエータのエネルギー損失要因解明と性能革新

東京農工大学 大学院工学研究院 先端機械システム部門  
教授 西田 浩之

## 1. はじめに

誘電体バリア放電プラズマアクチュエータ (PA) は、薄型軽量で高い応答性を持つ流体制御デバイスである。PA は図 1(a)に示すような誘電体とそれを挟み込む複数の電極で構成され、電極間に交流高電圧を印加すると、放電プラズマの発生と運動に伴う誘起流 (イオン風) が生じる。高い汎用性から、様々な流体機械の性能を向上可能だが、低いイオン風生成効率 (1%以下) が実用化を阻んでいる。例えば、車両の空気抵抗低減に有効であることが示されているが<sup>1)</sup>、燃費・電費として利得を得るためには、従来と比して PA の電力効率 (推力電力比) を 10 倍近く改善する必要があると見積られる。ここで推力とは、PA のイオン風の運動量流量に相当する。これまで、PA の推力電力費を改善する先行研究が、数多く行われてきた。上部電極の形状は推力電力費に大きなインパクトがあり、電極端を鋸歯状に加工することで 40%以上の改善<sup>2)</sup>、ワイヤー状にすることで 30%以上の改善効果が得られることが示されている<sup>3)</sup>。また、印加する電圧波形の最適化も重要である。我々は過去の研究で、緩勾配と急勾配を組み合わせた電圧波形で、40%以上の改善を得ることに成功している<sup>4)</sup>。近年、注目されているアプローチは、裏面電極を離散化 (図 1 (b)) することである。推力電力比が約 30%向上することが報告されており、さらに、離散化した電極をワイヤー状にすることで、約 3 倍という飛躍的な向上が得られることが示されている<sup>5)</sup>。いずれの手法でも、従来と比して 10 倍の改善効果は得られていないが、複数の向上手法を組み合わせ、相乗効果を得ることができれば、飛躍的な性能向上を期待できる。そのためには、エネルギー効率の改善メカニズムをよく理解することが必要である。

本研究では、大きな改善効果が報告されているものの、その改善メカニズムが不明な裏面電極の離散化に特に着目する。まず、放電プラズマの数値シミュレーションにより、改善メカニズム、すなわちエネルギーロス改善の要因を考察する。その知見に基づき、露出電極の形状変更と裏面電極離散化を組み合わせたパラメトリックな実験により、高エネルギー効率 (推力電力比) な PA の構造を示すことを目的とする。

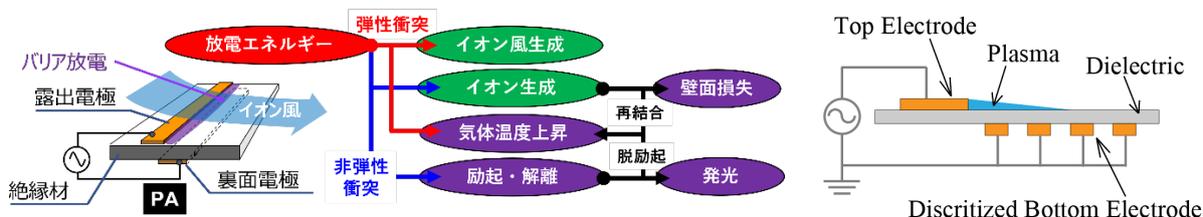


図 1 プラズマアクチュエータ (PA)

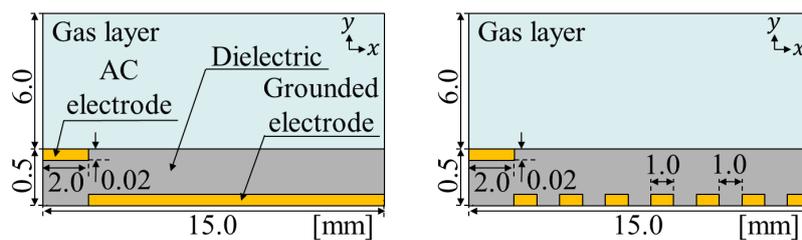
## 2. プラズマ流体シミュレーション

### 2-1. 計算手法及び計算条件

放電プラズマのシミュレーションモデルにおいては、大気空気中における PA の駆動を模擬するため、雰囲気ガス圧は大気圧であるとし、それぞれ 80%と 20%の窒素および酸素により構成されているものとした。プラズマ粒子種としては電子・一価の正イオン・一価の負イオンを考慮し、プラズマ反応として電子衝突による直接電離と電子付着、加えて電子-正イオン間、正イオン-負イオン間の再結合を考慮した。支配方程式として、プラズマの粒子種それぞれについての粒子数保存の式である Drift-diffusion 方程式および電場に関する Poisson 方程式を連立して用いた。また、各粒子種の流速を求めるうえでドリフト拡散近似を適用しており、スウォームパラメータは局所電界近似を用いて BOLSIG+ソフトウェアにより計算した。

Drift-Diffusion 方程式は有限体積法により時間発展的に解く。ドリフト項の数値流束は MUSCL 法によって空間高次精度化された風上差分で評価し、拡散項は 2 次精度中心差分を用いて評価した。また、電場の Poisson 方程式は半陰解法を用いた SOR 法により解き、時間積分には近似 LU-ADI 法に基づく陰解法を用いた。

計算領域を図 2 に示す。平板 2 電極 PA (通常型の PA) のケース (図 2 (a)) と、裏面電極を 1 mm 幅のギャップを設けて離散化したケース (図 2 (b)) についてシミュレーションした。印加電圧波形は正弦波とし、振幅 10 kV、周波数 10 kHz とした。



(a) 2 電極型 PA

(b) 離散電極 PA

図 2 シミュレーション領域の設定

### 2-2. シミュレーション結果

2 電極 PA と裏面電極を離散化した PA の放電をプラズマシミュレーションした結果を示す。まず図 3 に、(a) 電気流体力生成量、(b) 消費電力、および(c) 電気流体力生成量と消費電力の比を交流電圧 5 周期の間に時間平均した値を示す。ここで、電気流体力とは、放電により生成されるイオン風を誘起する力 (体積力) であり、電気流体力生成量と消費電力の比は、PA の推力電力比 (エネルギー効率) に相当する。また、交流放電ゆえに放電の極性が入れ替わるため、負極放電時と正極放電時、全時間で分けて時間平均した値を示した。図 3 より、それぞれの放電について、裏面電極を離散化することで体積力生成量が 19~20%改善し、特に負極放電においては 31%向上した。また、同じく電気流体力生成量/消費電力比も改善しており、先行研究での推力電力比が改善した結果と一致する傾向が確認できた。

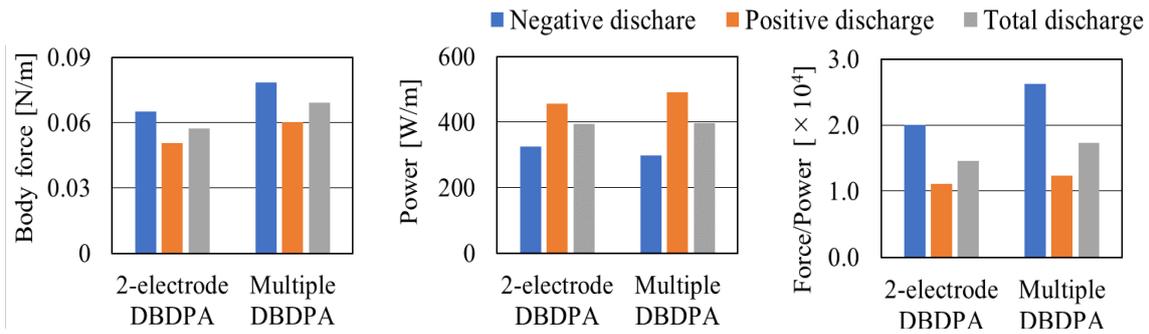


図3 電気流体力（体積力）生成量，消費電力，エネルギー効率の比較

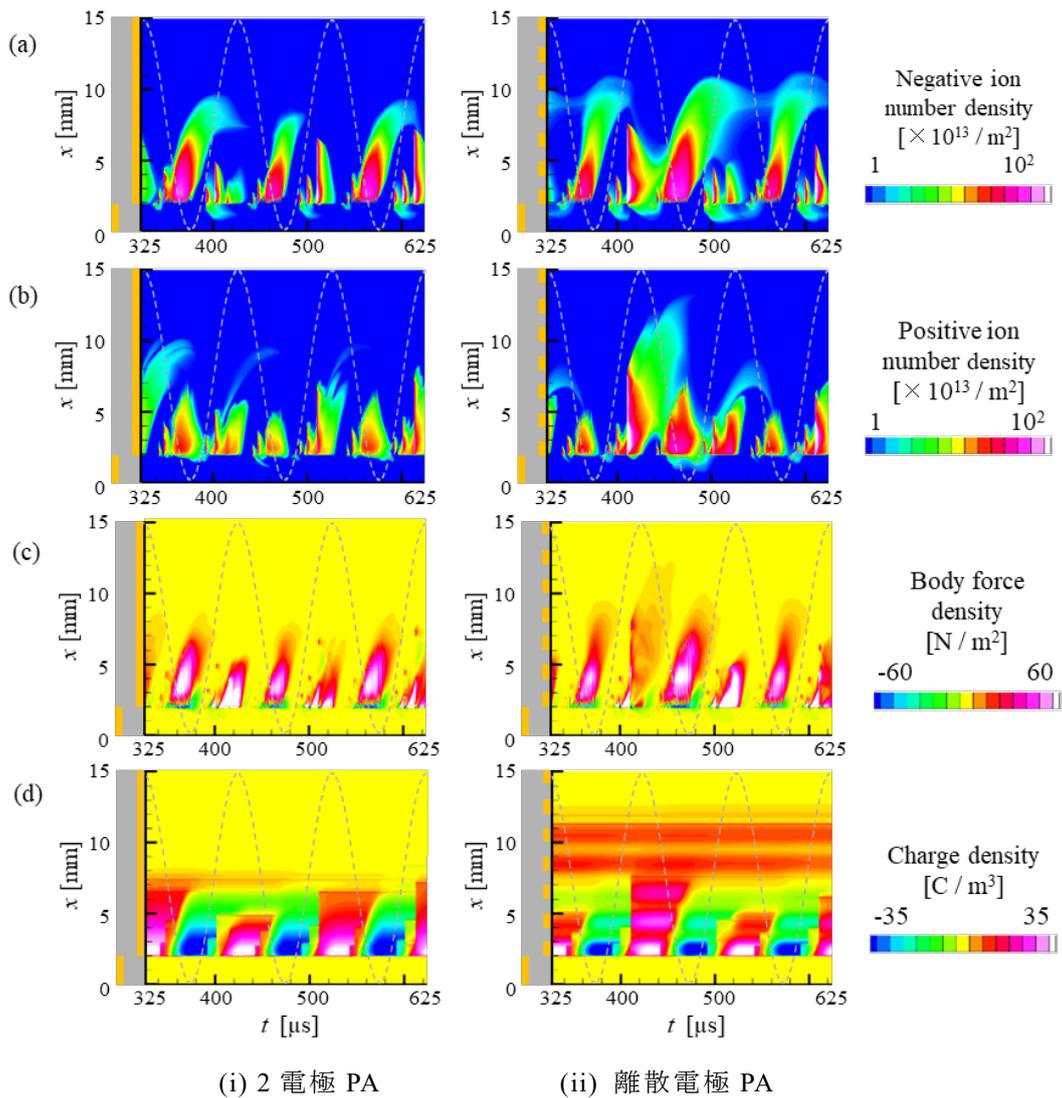


図4 (a)負イオン，(b)正イオン，(c)電気流体力，(d)表面帯電の時空間変化

次に，裏面電極分散化が電気流体力生成に与える影響を，プラズマの運動の観点から考察する．図4左に通常の2電極PA（図4(i)）と右に離散電極PA（図4(ii)）のそれぞれについて，3周期間のプラズマと電気流体力の時空間変化を示す．横軸に時刻  $t$ ，縦軸に  $x$  座標をとり，コンターは高さ方向に積分した(a) 負イオン数密度，(b) 正イオン数密度，(c)電気流体力，および(d) 誘電体表面の帯電量を示す．図4(a)，(b)，(c)より，2電極PAと分散化PAを比較す

ると、離散電極 PA の方がより広範囲にプラズマが広がり、電気流体力についてもより広範囲に生成している。そして図 4 (d)から、離散電極 PA では裏面電極のない領域で帯電量が減り、縞のある分布となっていることが分かる。帯電は電極が形成する電場を打ち消すため、帯電の局所的な減少は電場を局所的に強化し、プラズマ加速が強化されることでより広い範囲で体積力が生成された可能性がある。また、放電(プラズマ生成)に消費されたエネルギーの多くは、誘電体表面でのプラズマ損失によると考えられる(図 1(a))。帯電量の減少は、プラズマの表面ロス減少を意味するため、これがエネルギー効率の改善につながった可能性がある。

以上の考察に基づくと、局所的な電場強化とプラズマの表面ロス低減を促す裏面電極離散化は、電場強化によるプラズマ生成促進効果を持つ露出電極端の鋸歯化と組み合わせることで、エネルギー効率改善の相乗効果を得られる可能性が高いと考えられる。

### 3. 性能評価実験

プラズマの流体シミュレーションから得た考察に基づき、実際に鋸歯化した露出電極と離散化した裏面電極を組み合わせた PA を製作し、性能評価実験によりその効果を検証した。

#### 3-1. 実験方法と条件

図 5 に、性能評価実験を行った PA の電極構成を示す。露出電極には、通常の平板型と電極端を鋸歯状(1mm の幅と高さ)に加工した鋸歯電極の 2 タイプを用い、比較した。裏面電極には、通常の平板型と、1.5 mm 幅の電極を 1 mm のギャップを設けて配置した離散電極を用いて比較した。電極には 70  $\mu\text{m}$  厚の銅テープを使用し、誘電体は 0.5 mm 厚と 1 mm 厚の PMMA である。印加電圧波形は正弦波とし、電圧は 8~18 kV<sub>pp</sub> で変化させ、周波数は 5 kHz とした。

性能評価のため、推力と消費電力を計測した。推力は、PA を電子天秤上のスタンドに誘起流が上向きに発生するよう固定、駆動することで、荷重の増分として計測した。消費電力は V-Q リサージュ法により測定した。

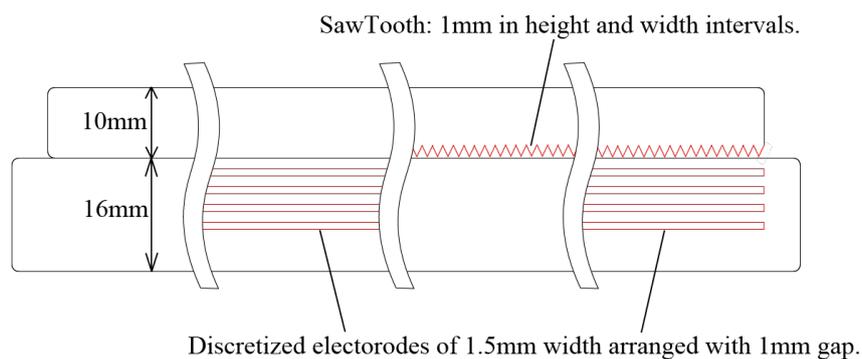


図 5 離散電極型 PA の電極構造

#### 3-2. 実験結果

図 6 に、推力電力比の計測結果を示す。横軸は印加電圧である。図 6 より、いずれのケースにおいても、印加電圧が大きくなるにつれ推力電力比は上昇し、誘電体が厚いほど推力電力比は高くなる。これは、一般的に知られた傾向である<sup>2)</sup>。露出電極端を鋸歯化することで大きな推力電力費の向上が見られ、特に低印加電圧において大きな改善率が得られる。一方、裏面電

極を離散化することでも推力電力比の改善がみられるが、その改善率は数十%にとどまった。また、離散化による改善効果は、誘電体が薄い方が高い傾向があることが分かる。加えて、裏面電極の離散化と鋸歯電極化は相乗効果があり、双方の手法を併せて使うことが有効であることが分かった。

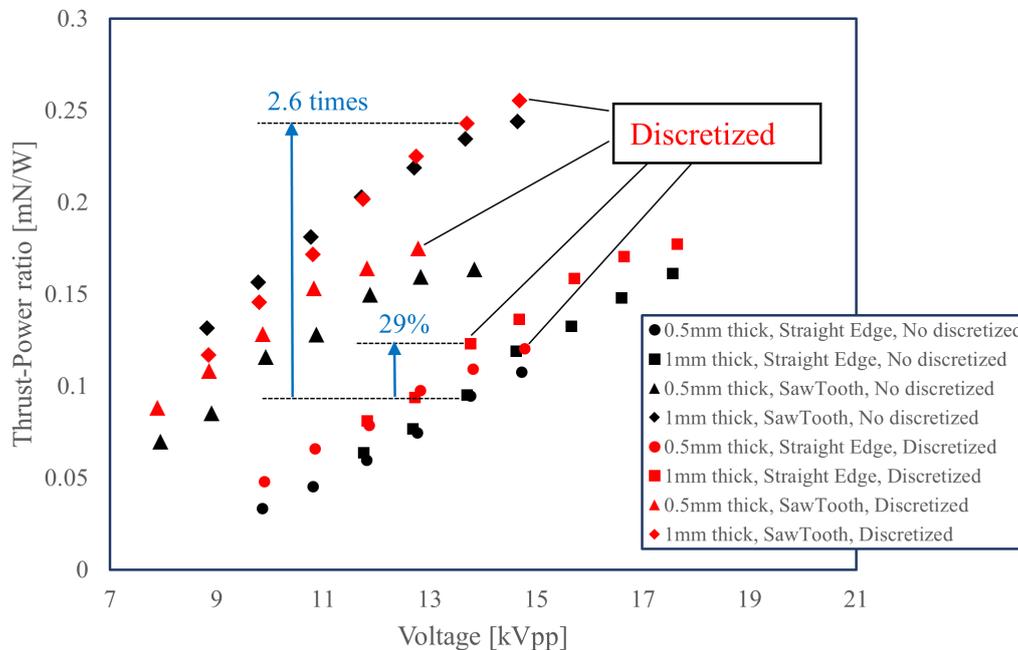


図6 PAの推力電力比特性

#### 4. まとめ

本研究では、大気圧プラズマを利用した流体制御デバイスであるプラズマアクチュエータの高性能化に有効な電極構造を提案することを目的に、プラズマシミュレーションと性能評価実験による研究を行った。特に、露出電極の鋸歯化と裏面電極の離散化に着目した。結果、プラズマシミュレーションから、裏面電極の離散化は誘電体表面におけるプラズマロスを低減し、エネルギー効率を改善する効果があることが推測された。性能評価実験から、鋸歯電極化と離散電極化、双方が性能向上に効果があり、また、相乗効果があることも確認できた。以上から、鋸歯電極と離散裏面電極を有した構造が、PAの高効率化に有効であることを示した。

#### 謝辞

本研究を遂行するにあたり、公益財団法人天野工業技術研究所から多大な支援をいただきました。ここに記して謝意を表します。

#### 参考文献

- 1) Shimizu, K., Nakashima, T., Sekimoto, S., Fujii, K., Hiraoka, T., Nakamura, Y., Nouzawa, T., Ikeda, J., Tsubokura, M., "Aerodynamic drag reduction of a simplified vehicle model by promoting flow separation using plasma actuator," *Mechanical Engineering Letters*, Vol. 5, 19-00354, 2019.
- 2) Benard, N., Moreau, E., "Electrical and mechanical characteristics of surface AC dielectric barrier discharge plasma actuators applied to airflow control," *Experiments in Fluids*, Vol. 55, 1846, 2014.
- 3) Moreau, E., J. Cazour, and N. Benard, "Influence of the Air-Exposed Active Electrode Shape on the Electrical, Optical and Mechanical Characteristics of a Surface Dielectric Barrier Discharge Plasma Actuator." *Journal of Electrostatics* 93, pp.146-53, 2018.

- 4) Nakano, A., Nishida, H., "The effect of the voltage waveform on performance of dielectric barrier discharge plasma actuator," *Journal of applied physics*, Vol. 126, 173303, 2019.
- 5) Shima, Y., Imai, R., Ishikawa, H., Segawa, T., "Mechanism of Thrust–Power Ratio Improvement Using Plasma Actuator with Discretized Encapsulated Electrodes," *Actuators*, Vol. 11, 296, 2022.