

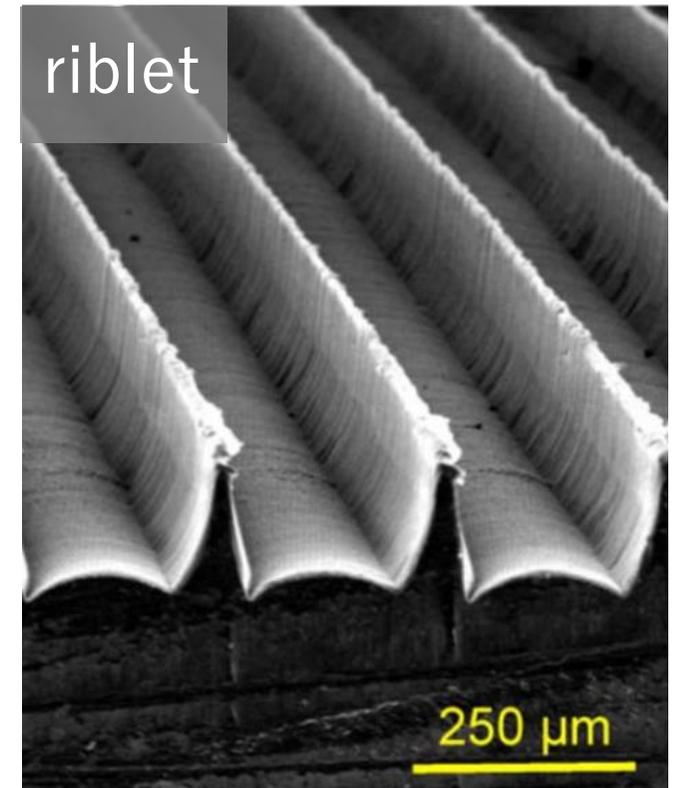
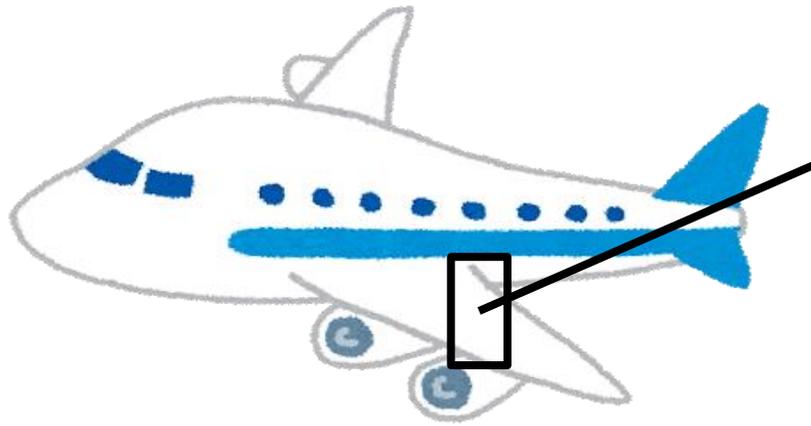
# イオン風による表面流制御デバイスの 高集積化による低電圧駆動技術

---

東北大学 大学院工学研究科  
教授 大西 直文

令和2年7月16日

# 流体機器の表面流制御技術

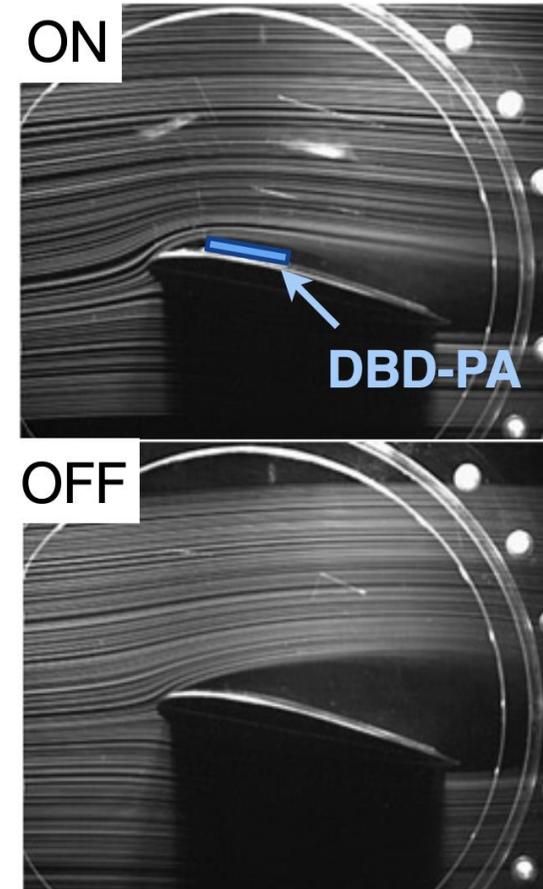
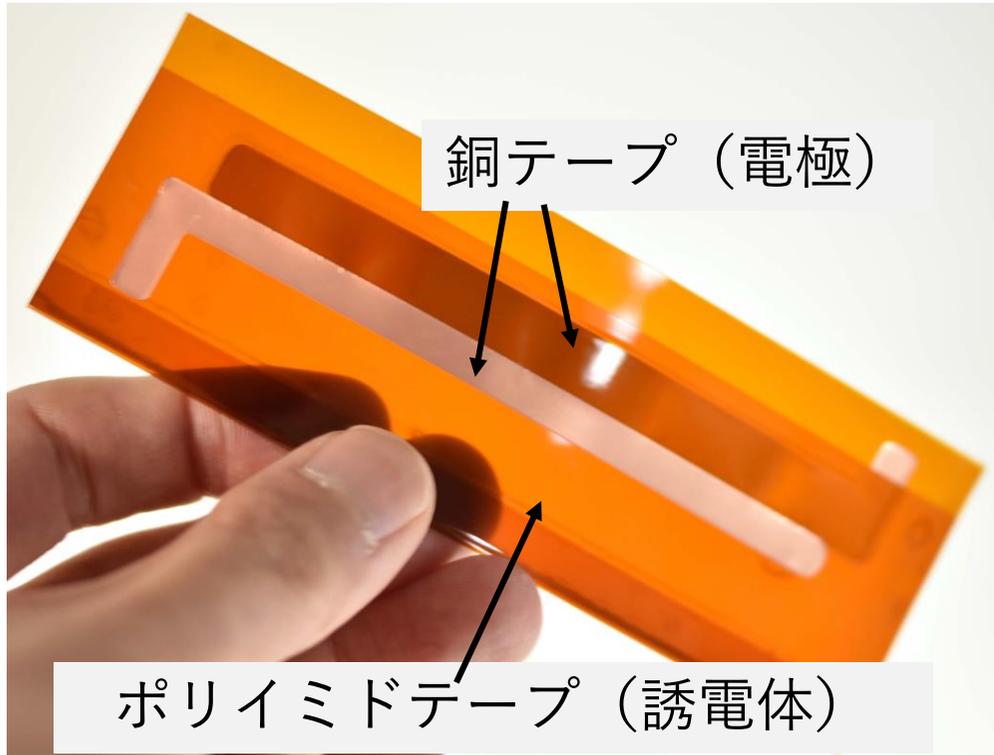


A. Zemaitis et al. (2019)

- 流体機器の表面流れの制御は性能向上のうえで極めて重要
- ボルテックスジェネレータによる乱流遷移の促進
- リブレットによる摩擦抵抗の低減

受動的な制御では設計点から外れた場合, 正常に機能しない可能性

# Dielectric-barrier-discharge (DBD) プラズマアクチュエータ



K. Fujii (2014)

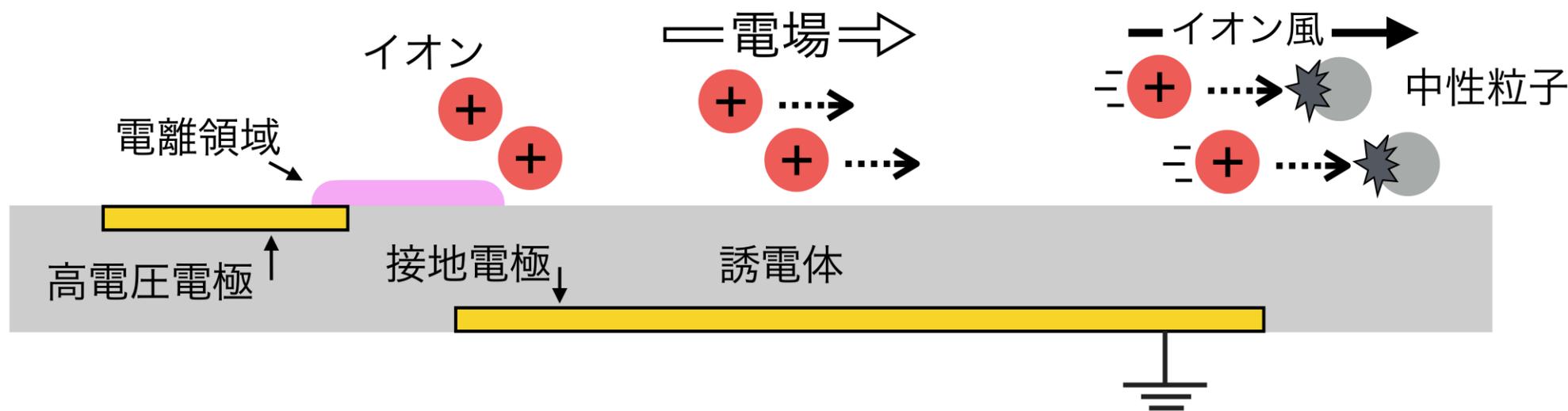
- 電極と誘電体のみで構成される可動部の無いシンプルな構造
- 交流高電圧を印加すると放電が発生し, 気流が誘起 (イオン風)
- 剥離流れを能動的に制御し, 翼性能を向上させる

# DBD プラズマアクチュエータの動作原理

① 放電による  
空気分子のイオン化

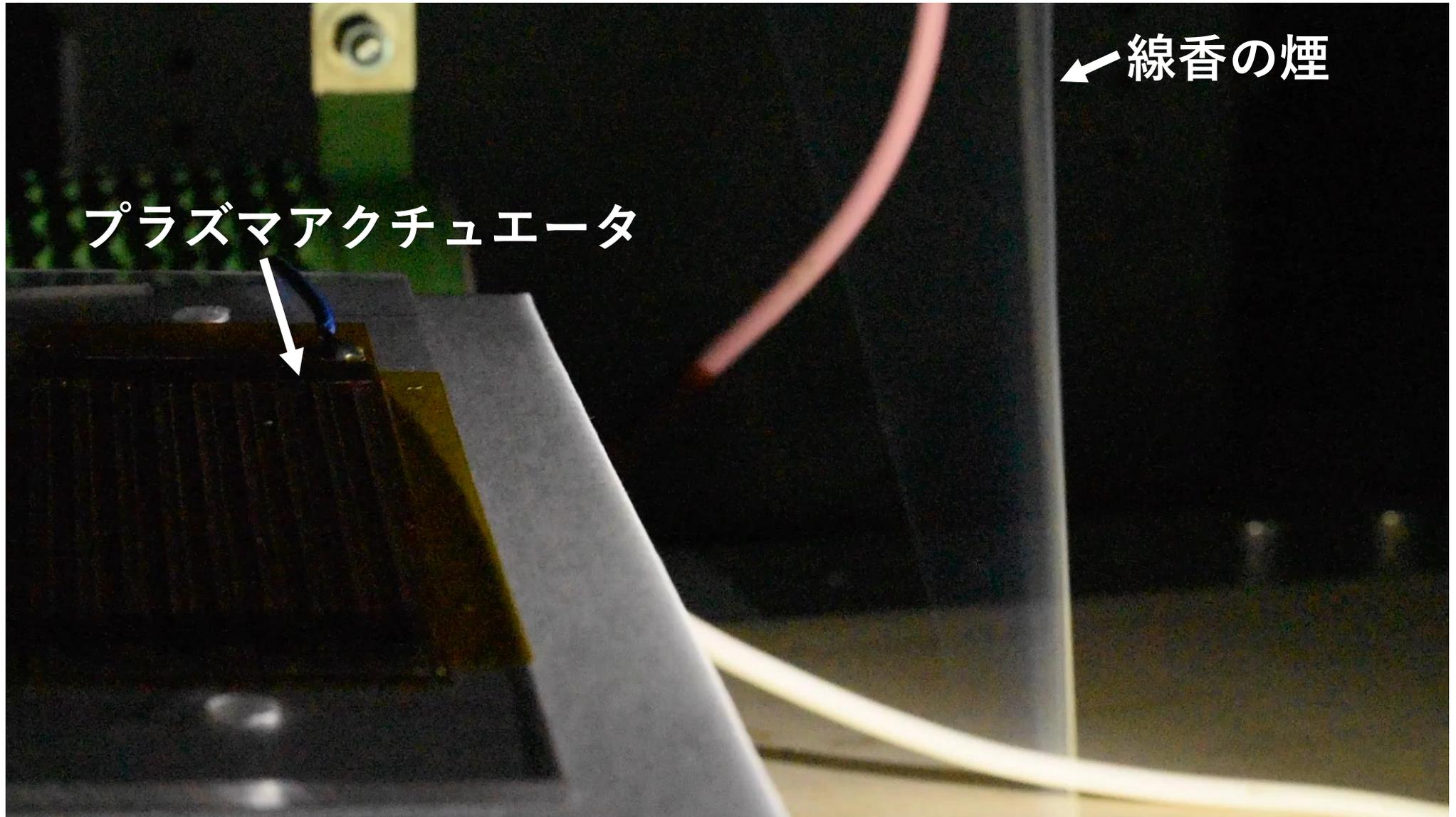
② 電場による  
イオンの加速

③ イオンと空気分子の  
衝突による流れの誘起

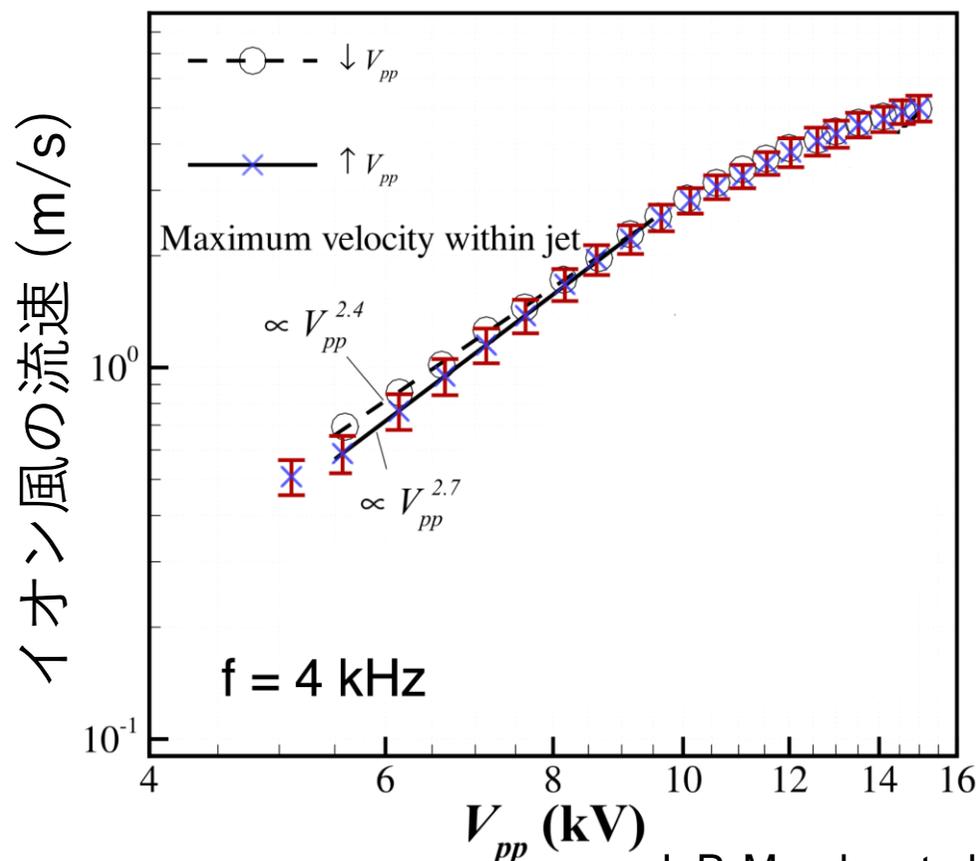


- 電極間に交流電圧を印加することでイオンが発生
- 加速されたイオンが周囲の中性粒子に衝突することで運動量を輸送し、電気流体力によってイオン風が生じる

# イオン風が発生する様子



# 従来の技術とその問題点



現在のプラズマアクチュエータは  
高電圧電源が必須

- ✓ 専用の電源が必要
- ✓ 電子部品の高耐圧化が必要
- ✓ 他デバイスとの絶縁距離が必要

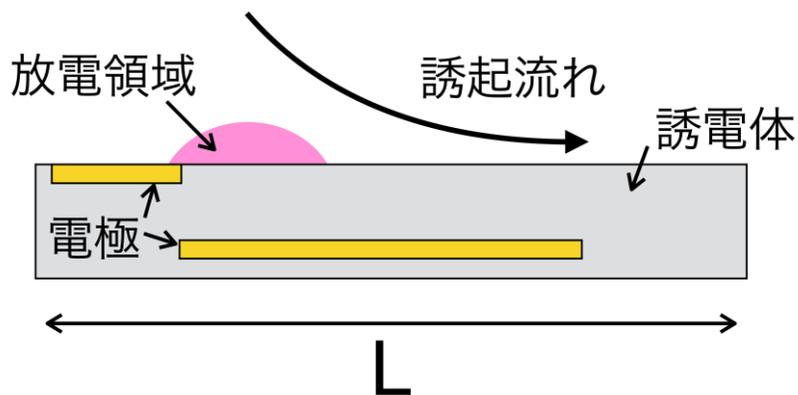
✗ 実用上, 取り扱いが困難

⇒ 駆動電圧の低減が重要

- 高速気流を制御するためには高速のイオン風を誘起する必要
- 高電圧(>10kV)を印加すれば流速を増大させることが可能
- 高出力・高電圧電源の使用は実用化の観点からは好ましくない

# 低電圧化を実現する方策

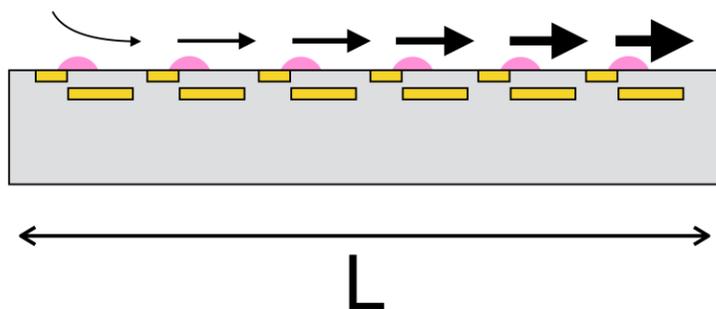
## 従来手法



- 2枚の電極を用いることが一般的
- 気流を制御するためには高電圧 (数十 kV) を印加する必要

**✗ 高出力な高電圧電源が必須**

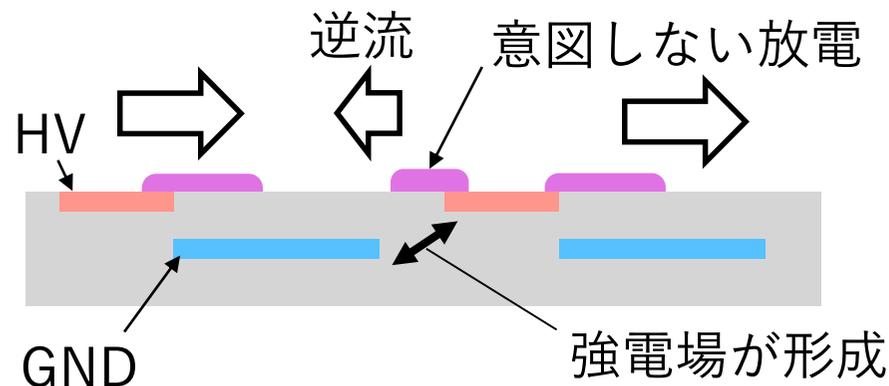
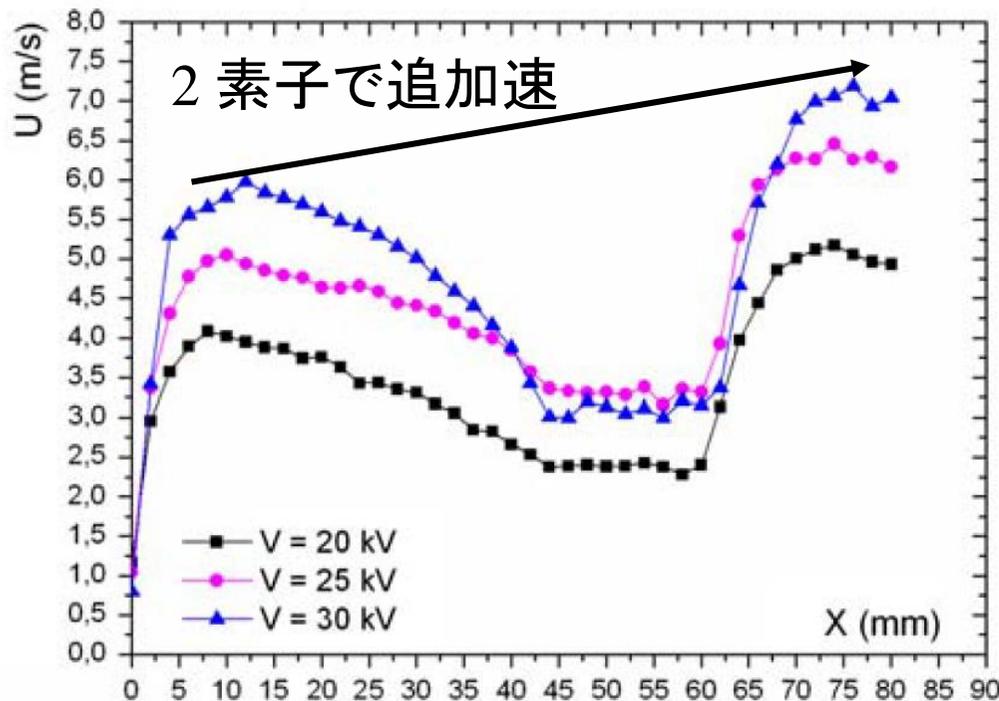
## 本技術のアプローチ



- 素子を小型化し, 作動電圧を低減
- 電圧を上げずに, アクチュエータ素子を多数並べることで性能を向上

**✓ 高電圧電源は不要**

# 従来の多電極プラズマアクチュエータ



20 mm

M. Forte et al. (2007)

- 複数のアクチュエータ素子を用いた研究は過去にも存在
- 素子同士の距離が近づくと、性能が劣化 (cross talk 現象)
- 上流素子の被覆電極と下流素子の露出電極間で放電し、逆流が発生する

**素子を密に配置できないことが課題**

# 本技術の概要

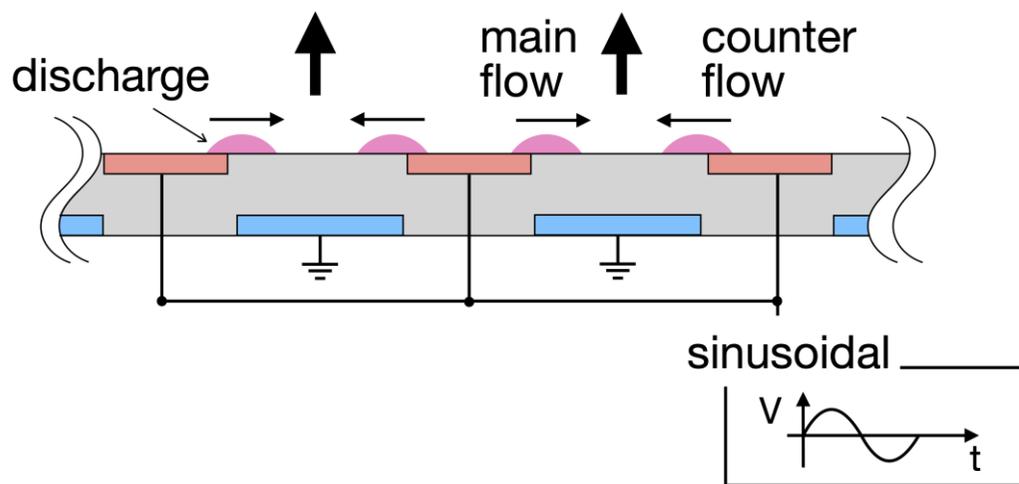
高圧電源を用いずに駆動できる  
高集積プラズマアクチュエータを開発

## 特徴

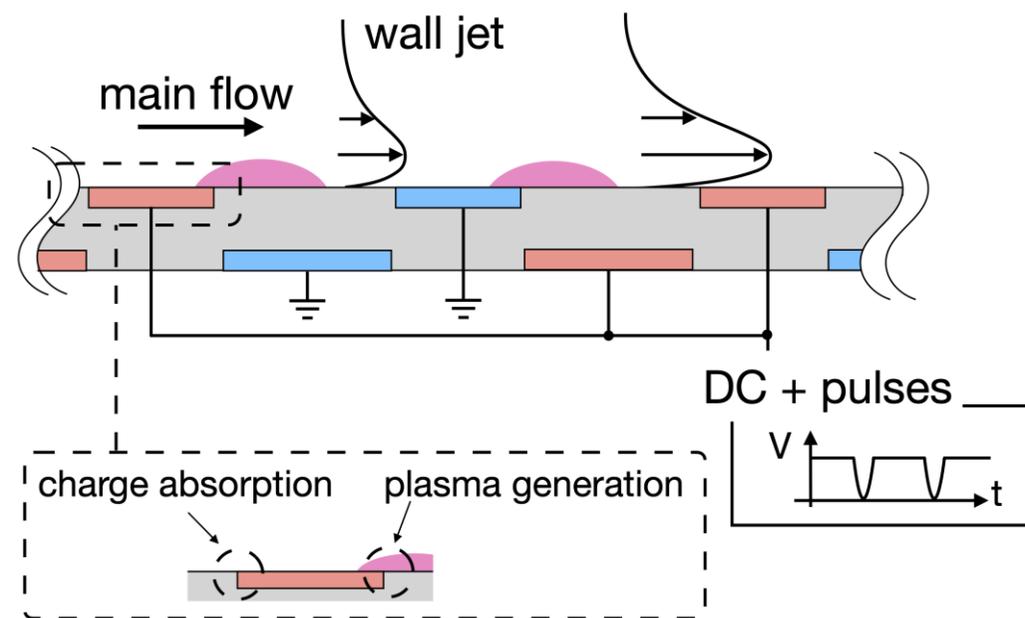
- ✓ 電圧波形・電極配置を工夫し, 素子同士の干渉によってプラズマアクチュエータの性能が向上する
- ✓ AC 電源ではなく, DC 電源とスイッチで構成される簡素な電源系
- ✓ 従来型と比較して, より精緻な気流制御が可能

# 開発した高集積プラズマアクチュエータ

## 従来手法

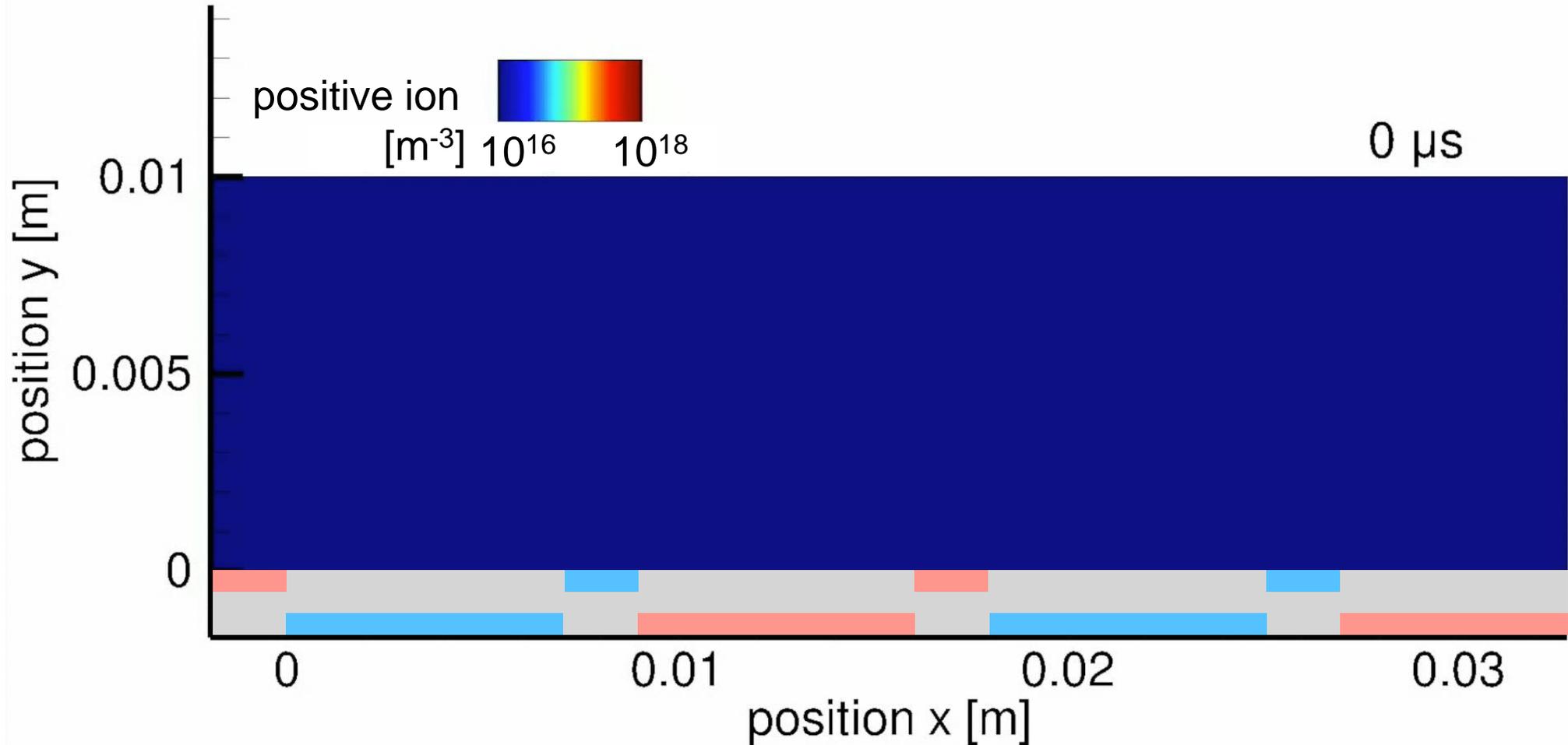


## 本技術



- 電極を高電圧→接地→接地→高電圧→高電圧→・・・のように配置
- 正弦波電圧ではなく DC 電圧重畳された繰り返しパルスを採用
- 本技術では逆流は発生せず, 素子同士が性能を強め合う効果が得られる (S. Sato et al., Sci. Rep. 9, 5813 (2019))

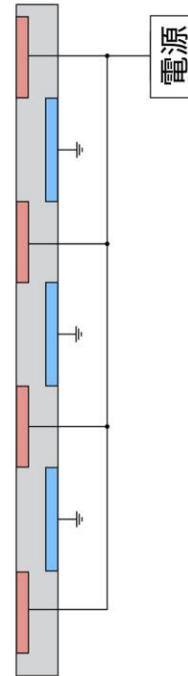
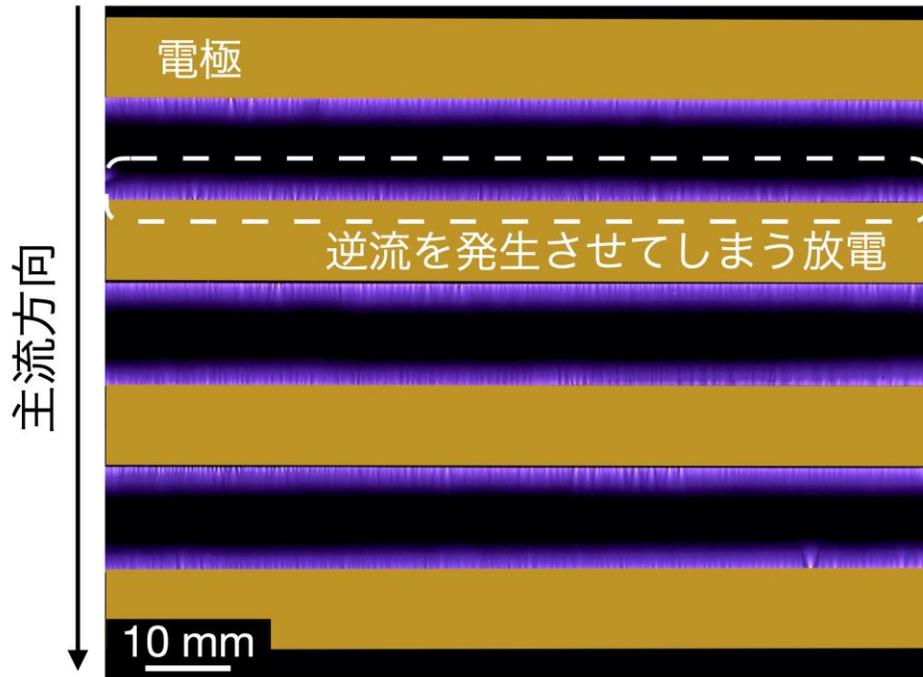
# 数値シミュレーションによる検証 (正イオンの数密度分布)



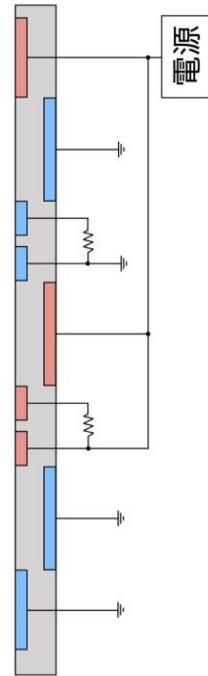
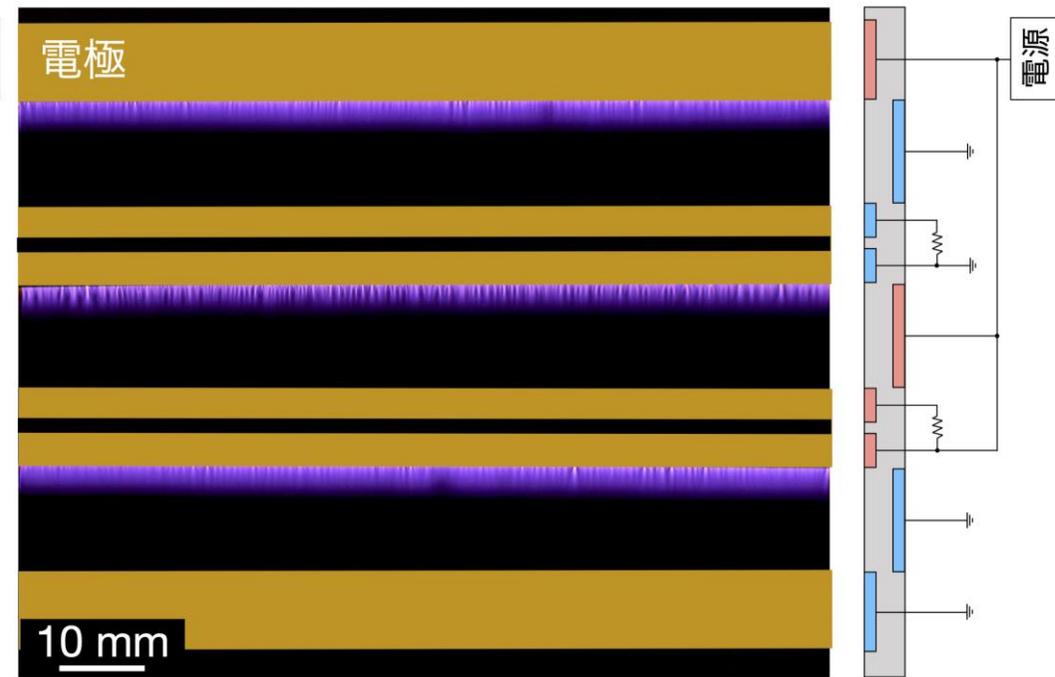
- プラズマ流体モデルを用いて放電過程の数値計算を実施
- パルス電圧を重畳するタイミングで放電が発生
- 逆流の原因である各露出電極の左端からの放電は発生せず

# 原理実証実験

## 従来手法



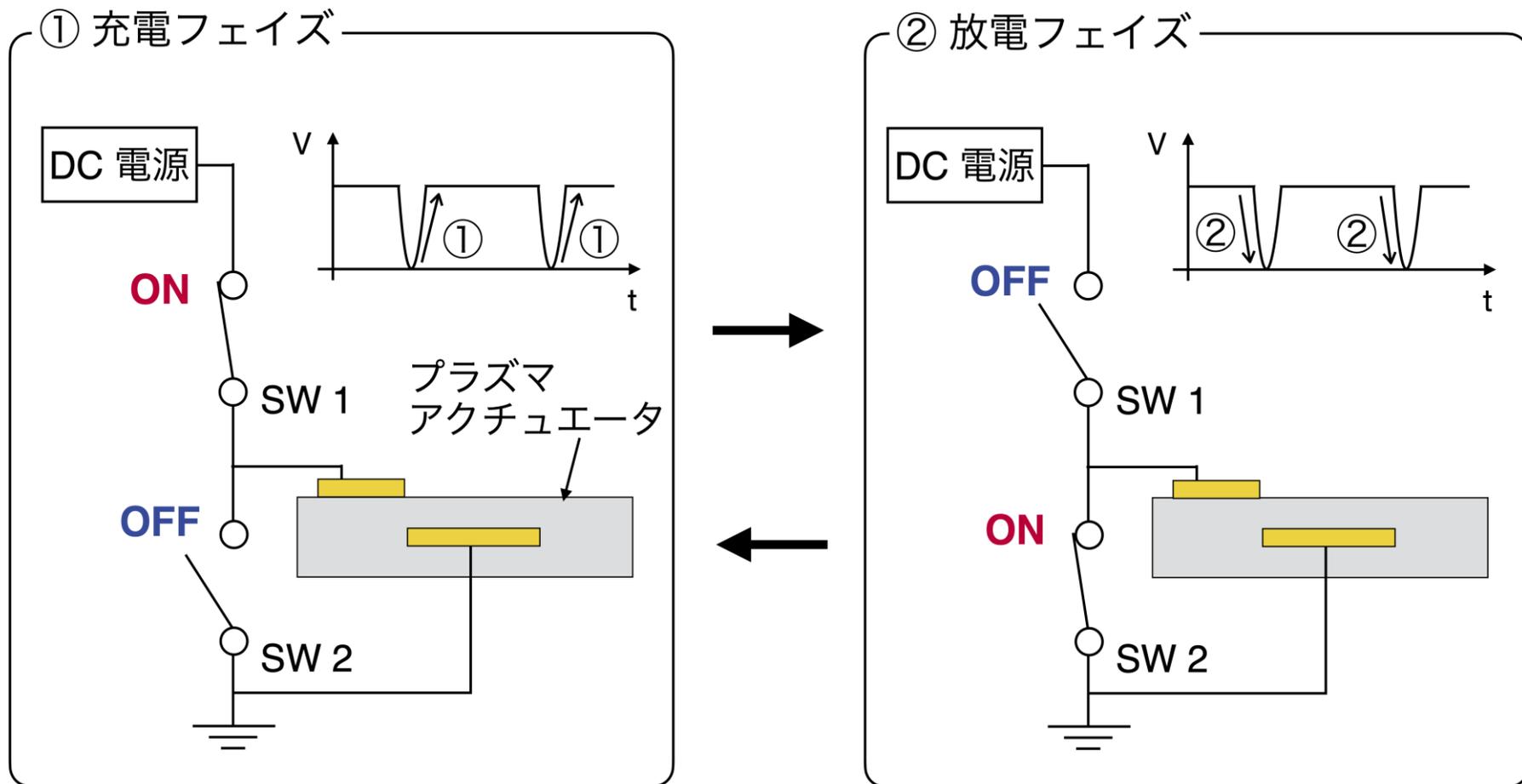
## 本技術



※ 8 kV, 2 kHz のパルスを印加

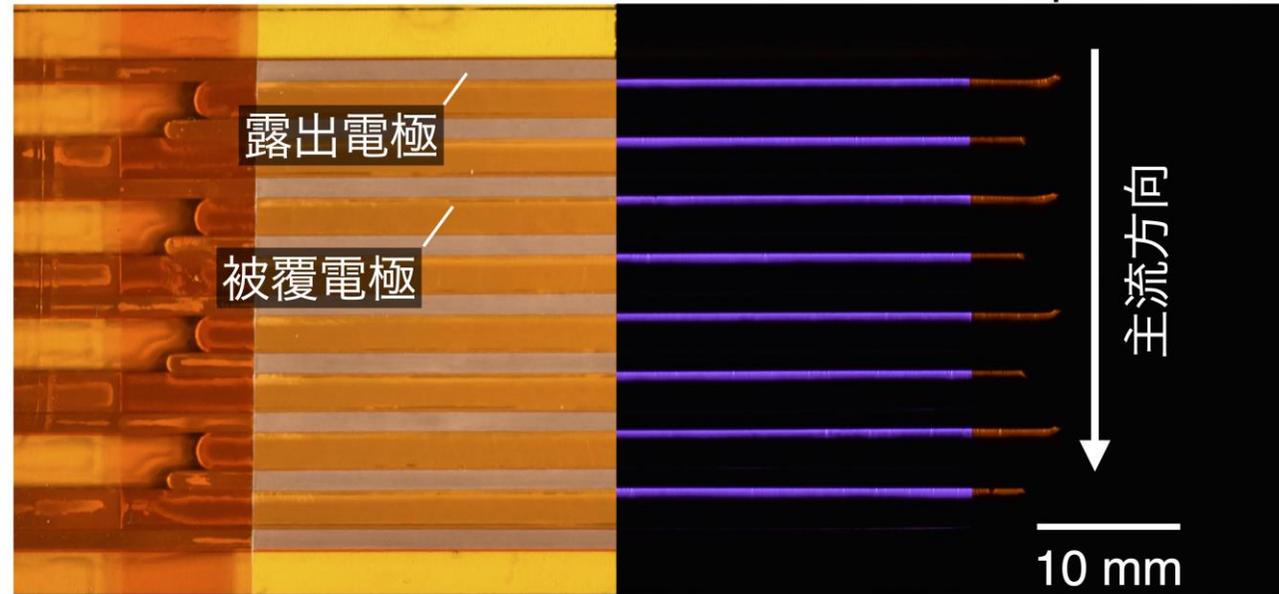
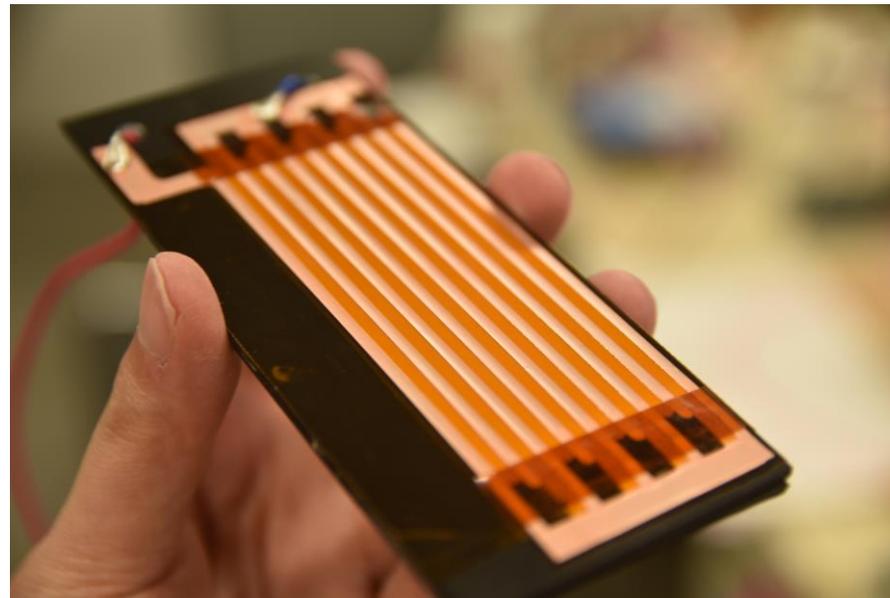
- DC 電源とパルス電源を組み合わせると DC + パルス電圧を生成
- 従来手法では露出電極の両側から放電が発生し、気流も誘起されず
- 本技術では逆流を発生させる放電は生じず、一方向に気流が誘起されることを確認

# SiC-MOSFET を利用した 低電圧駆動手法



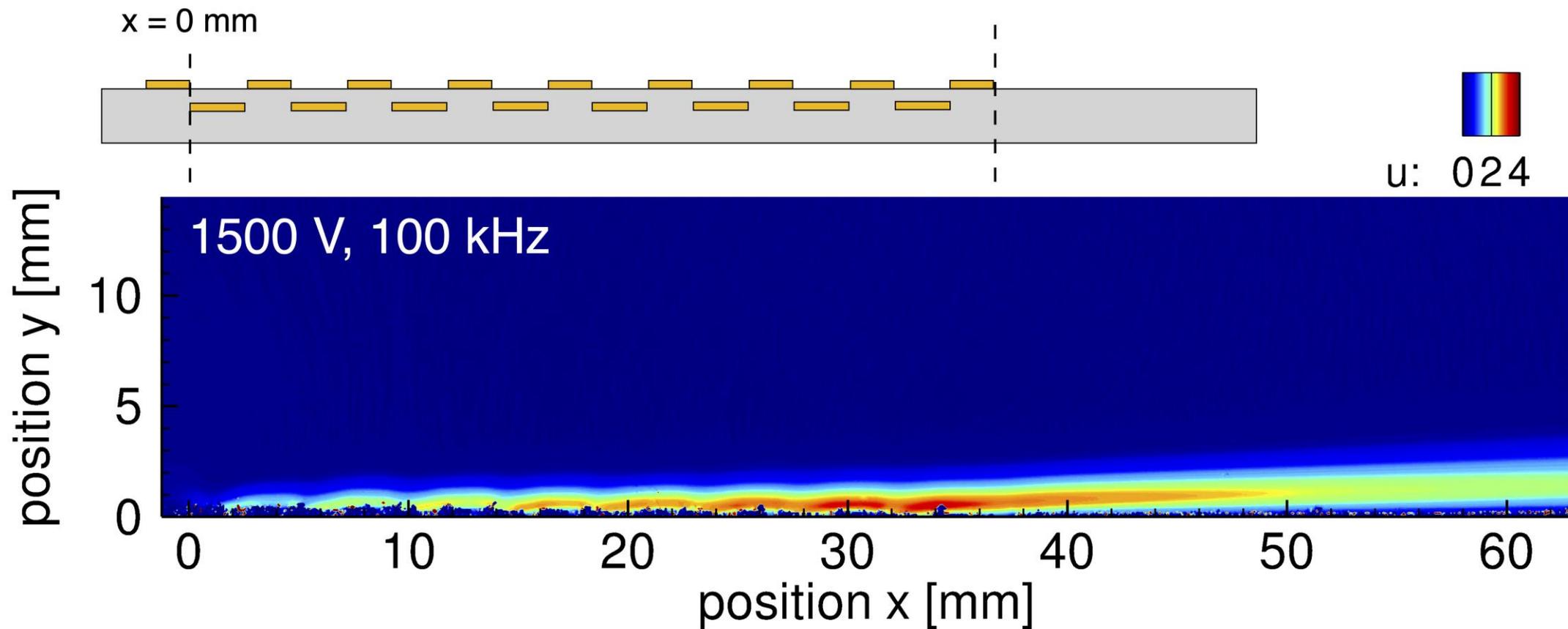
- 印加電圧が低い場合, DC 電圧を直接スイッチングすることが可能 (スイッチには SiC-MOSFET を使用)
- SW 1 を ON → 充電, SW 2 を ON → 放電 のサイクルを繰り返す
- DC 電源とスイッチのみで構成されるため, 電源系が大幅に簡素化

# 放電の様子



- 8素子を集積したプラズマアクチュエータを製作
- 1500 V の電圧でも一様に放電することを確認
- 全ての素子において電極の片側のみから放電が発生

# 1500 V で駆動した時の 誘起流速分布



- 上流側の素子によって誘起された気流が下流側の素子によって追加速される様子を確認
- 最下流のアクチュエータ素子によって 4 m/s 程度まで加速
- 従来の高電圧駆動型と同程度の最大誘起流速を達成

# 本技術の特徴・従来技術との比較

## 本技術の特徴

従来技術よりも大幅に低い電圧で  
気流を能動的に制御することができる

## 従来技術との比較

### 従来技術

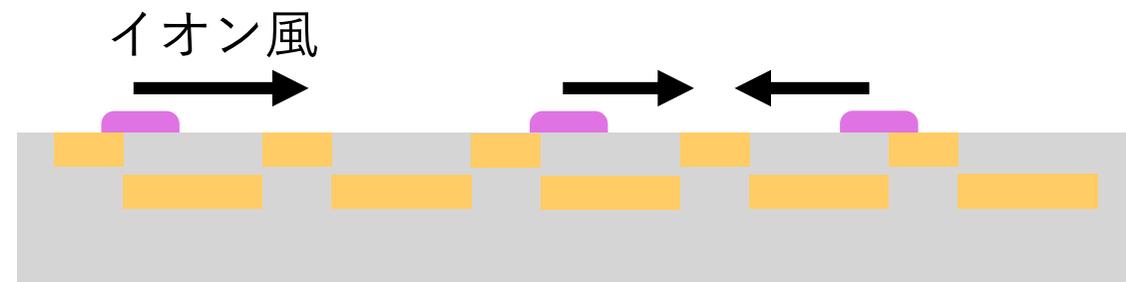
- ✓ 高電圧 (>10 kV) が必須
- ✓ 正弦波電圧を印加
- ✓ 単一素子での使用が基本

### 本技術

- ✓ 1 kV 程度の電圧でも駆動可能
- ✓ DC 電圧 + パルスを印加
- ✓ 複数素子の組み合わせが可能

# 想定される用途

- あらゆる流体機器への設置が可能  
(デバイス自体はフレキシブルであり, 後付けも可能)
- 各素子を独立に制御し, 表面上の流れを自由に制御できる
- 物体周りの空力抵抗低減
- 空力騒音の低減
- 流体の混合促進
- 風力発電の発電効率向上



作動させるプラズマアクチュエータ素子  
およびイオン風の向きを選択

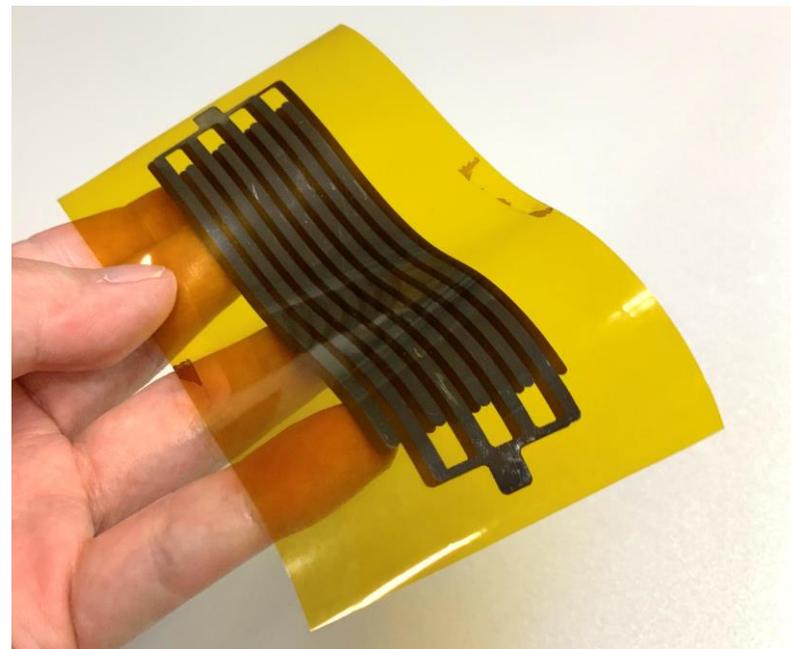
⇒ 表面流れを自由に制御することが可能

# 実用化に向けた課題

- アクチュエータ素子の微細化  
→ より低電圧での駆動が可能に 目標：500V 以下  
(EV や電動飛行機のバッテリーからの直接駆動を視野に)  
**プリントドエレクトロニクス技術に注目**

- プラズマアクチュエータの低出力化（高効率化）
- 誘電体および電極の最適な材料選定

銀ナノインクを用いて  
試作したプラズマアクチュエータ



# まとめと企業への期待

高圧電源を用いずに駆動できる  
高集積プラズマアクチュエータを開発した

⇒ 電動飛行機や電気自動車のバッテリーでの直接駆動を  
目標に現在研究中

## 企業への期待

- プラズマアクチュエータの新しい応用先の検討
- プリントドエレクトロニクス技術との組み合わせ
- 実環境での試験の実施および課題の抽出（湿度、温度の影響等）
- 最適な誘電体および電極の選定
- プラズマアクチュエータの大面積化・長時間運転試験の実施

# 本技術に関する知的財産権

---

- 発明の名称 : プラズマアクチュエータ
- 出願番号 : 特願2020-000206
- 出願人 : 東北大学
- 発明者 : 佐藤慎太郎、大西直文

# お問い合わせ先

---

東北大学

産学連携機構 総合連携推進部

TEL 022-795-5274

FAX 022-795-5286

問い合わせ専用URL

<http://www.rpip.tohoku.ac.jp/jp/information/gijutsu/>

e-mail [liaison@rpip.tohoku.ac.jp](mailto:liaison@rpip.tohoku.ac.jp)