

# 多電極マイクロプラズマアクチュエータ による流体の能動制御

水野 良典\*, マリウスブラジャン\*\*, 米田 仁紀\*\*\*, 清水 一男\*, \*\*, 1

(2014年9月8日受付; 2014年12月5日受理)

## Active Fluid Control by Multi-electrode Microplasma Actuator

Yoshinori MIZUNO\*, Marius BLAJAN\*\*, Hitoki YONEDA\*\*\* and Kazuo SHIMIZU\*, \*\*, 1

(Received September 8, 2014; Accepted December 5, 2014)

In this study, multi-electrode microplasma actuator for active fluid control was investigated. Our microplasma electrode could generate plasma by relatively low voltage less than 1.5 kV due to the  $\mu\text{m}$  discharge gap. Such low voltage is easily controlled by semiconductor switches and small step-up transformer. This contributes to miniaturize the system on parallel operation the electrodes system. Therefore, more active flow control could be carried out compared as traditionally plasma actuator. Air flow induced by the atmospheric microplasma was measured by the Particle Tracking Velocimetry (PTV). Incense smoke with sub-micron diameter was used for tracer particles and Nd YVO<sub>4</sub> 532 nm laser was utilized to visualize the tracer particles. When applying sinusoidal voltage 1.4 kV, 20 kHz, to the multi-electrode microplasma electrodes, air flow velocity of 1 m/s was obtained and its direction (left, right, up, down) was controlled without changing the electrode geometry.

### 1. はじめに

近年、装置の高効率化や高精度化、製造プロセスの改善と製品の品質化、気象・気候予測、地球規模の環境問題の解決などを目標として、気体流れの柔軟な制御はより一層重要なものとなっている<sup>1,2)</sup>。これまでも、流れの制御を実現するために様々な機械式アクチュエータが開発されてきた。

さらに、現在では、誘電体バリア放電による大気圧非熱平衡プラズマを用いた、プラズマアクチュエータによる気体流れの能動制御技術が盛んに研究されている。この新たな流体制御デバイスは90年代にRothらにより提案され<sup>3)</sup>、従来の機械式アクチュエータと比較して、(1)電極と誘電体からなる単純な構造であること、(2)二次流れの要因と

なる駆動部を有さないこと、(3)時定数の短い電氣的制御が可能であるなどの特長を有している<sup>4,5)</sup>。それゆえ、多くの研究グループにより、気体の剥離制御<sup>6-10)</sup>、ノイズ低減<sup>11,12)</sup>などの実験的研究が行われている。また、数値計算によるプラズマアクチュエータの特性解析も、電界分布の時間平均を仮定する Shyy モデル<sup>13)</sup>、電荷分布を仮定して電界を計算する Suzen モデル<sup>14)</sup>などの簡易モデルや、電子・イオンの流体方程式を解く Plasma Fluid Model<sup>15-17)</sup>、個々の粒子運動を計算する Particle in Cell (PIC) 法<sup>18)</sup>など精力的に進められている。

Fig.1に誘電体バリア放電を用いたプラズマアクチュエータの構造を示す。誘電体を挟んで2枚の電極を設置するだけの簡単なものである。下部電極を接地し、上部電極に交流高電圧を印加すると、上部電極から下部電極へ向けてプラズマが発生する。プラズマ中の荷電粒子がクーロン力により加速され、中性粒子と衝突し運動量を伝達することで、矢印に示すような気体流れが生じる仕組みである<sup>3)</sup>。

プラズマアクチュエータにより誘起される流れの方向

**キーワード:** マイクロプラズマ, 電気流体力学効果, プラズマアクチュエータ, 流体制御, 流れの可視化

\* 静岡大学大学院工学研究科

(〒432-8561 静岡県浜松市中区城北 3-5-1)

Graduate School of Engineering, Shizuoka University, 3-5-1 Johoku, Naka-ku, Hamamatsu, Shizuoka 432-8561, Japan

\*\* 静岡大学イノベーション社会連携推進機構

(〒432-8561 静岡県浜松市中区城北 3-5-1)

Organization for Innovation and Social Collaboration, Shizuoka University, 3-5-1 Johoku, Naka-ku, Hamamatsu, Shizuoka 432-8561, Japan

\*\*\* 電気通信大学レーザー新世代研究センター

(〒182-8585 東京都調布市調布ヶ丘 1-5-1)

Institute for Laser Science, The University of Electro-Communications, 1-5-1 Chofugaoka, Chofu-shi, Tokyo 182-8585, Japan

<sup>1</sup> shimizu@cjr.shizuoka.ac.jp

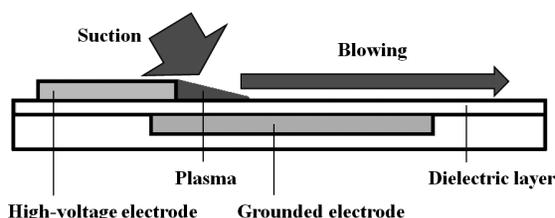


図1 プラズマアクチュエータの構造図

Fig.1 Schematic of typical plasma actuator.

を柔軟に変化できれば、流れの能動制御を行う上で有用であると考えられる。印加電圧の振幅を負に限定した場合に通常とは逆方向の流れが誘起されることがあるという数値解析結果<sup>19)</sup>と実験結果<sup>20)</sup>があり、電圧波形の制御により流れの方向を制御する方法がある。本研究では、プラズマアクチュエータを多電極化にし、半導体スイッチにより各電極を独立駆動することで流れ方向の能動制御を試みた。また、より能動的な流体制御を実現するために電極を密に配置する、微小アクチュエータ構造とした。

2. 実験装置

本研究で構築した多電極マイクロプラズマアクチュエータの構造を Fig.2 に示す。25  $\mu\text{m}$  の誘電体フィルムの両面に電極が配置されている。下側電極は接地されており、また、下側で放電が生じないよう絶縁処理が施されている。上側の電極は、4つの独立したチャンネルから構成されている。各チャンネルの間隔を短く設定するため、チャンネル同士でのスパーク防止のために低電圧駆動が求められた。そして、低電圧でプラズマを発生させるための高電界強度を得るため、誘電体厚さを 25  $\mu\text{m}$  に設定した。本プラズマアクチュエータでは、上部電極からのプラズマの進展距離がサブミリの領域であり、典型的なミリスケールの進展距離と比較して一桁小さい。このような、サブミリの進展距離のバリア放電をマイクロプラズマと通称している<sup>21,22)</sup>。

Fig.3 に正弦波電圧を制御するためのスイッチを示す。FET とブリッジダイオードを組み合わせた双方向スイッチである<sup>23)</sup>。このスイッチを4つ並列に配置し、プラズ

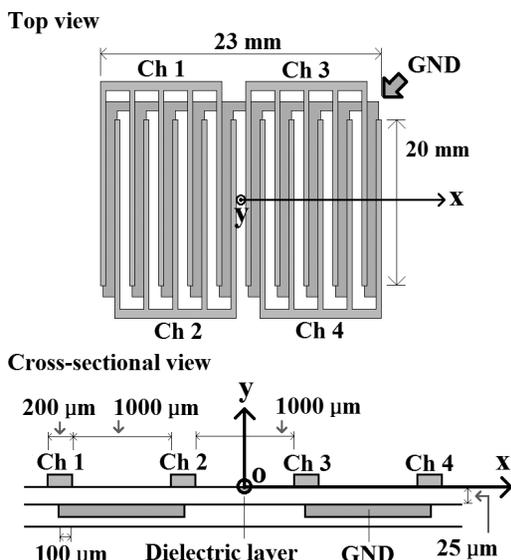


図2 多電極マイクロプラズマアクチュエータの構造図  
Fig.2 Configuration of multi-electrode microplasma actuator.

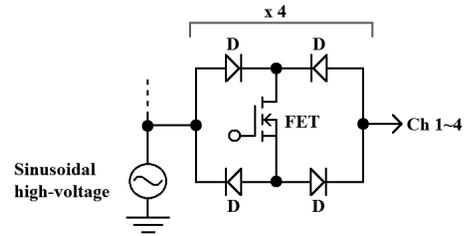


図3 正弦波電圧制御用スイッチの概略図  
Fig.3 FET switches for sinusoidal voltage control.

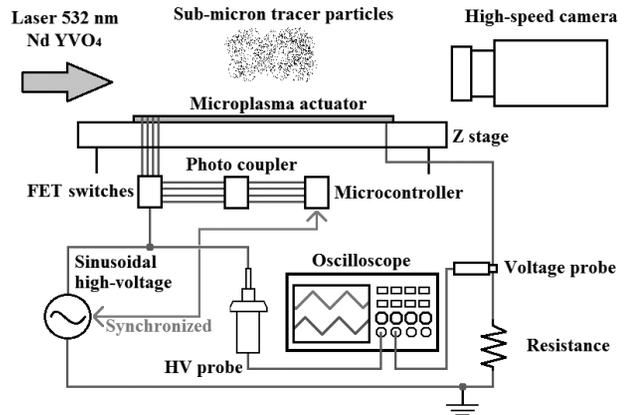


図4 実験装置図  
Fig.4 Schematic of experimental set up.

マアクチュエータの各チャンネル Ch1~4 とそれぞれ接続した。

本プラズマアクチュエータにより発生した空気流れを可視化、測定するための実験装置図を Fig.4 に示す。マイクロプラズマアクチュエータを z ステージ上に設置し、周りにトレーサ粒子を分布させた。トレーサ粒子は線香の煙(サブミクロン粒子)を用いた。波長 532 nm の Nd YVO<sub>4</sub> レーザーを粒子に照射し、散乱光をハイスピードカメラ (Red lake, Motion Scope M3) で撮影し、気体流れの可視化を行った。また、粒子個々の運動を手動にて解析し、流速を測定した。本手法を Particle Tracking Velocimetry (PTV) と呼ぶ。プラズマアクチュエータへの印加電圧は高電圧正弦波とした。印加電圧は高電圧プローブ (Tektronix, P6105A) とオシロスコープ (Tektronix, TDS2024B) で観測し、電流は電圧プローブ (Tektronix, P2220) と 100  $\Omega$  抵抗を用いて測定した。また、FET スイッチを駆動するためのマイクロコントローラは、フォトプラにより、高電圧回路から絶縁させた。そして、正弦波高電圧とマイコン信号の位相は同期させた。

3. 実験結果及び考察

3.1 マイクロプラズマの基礎特性

Ch 1 と Ch 3 に 1.4 kV, 20 kHz の正弦波高電圧を印加した際の電圧波形とそれに対応する電流波形を Fig.5 に

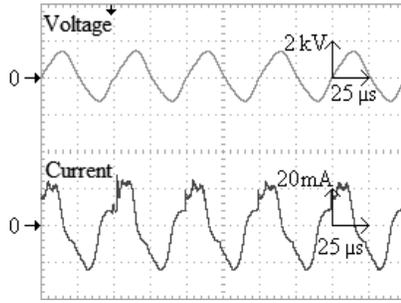


図5 128回同期加算時の電圧電流波形

Fig.5 Applied voltage and current waveform, 128 times averages.

示す。電力を計算するため、各波形を128回同期加算し、電力5 Wを得た。また、半導体スイッチの容量成分や漏れ電流により、Ch2とCh4をオフしていても100 V程度の振幅が認められた。しかし、この程度の電圧はプラズマの発生には寄与しないことが確認されている。そして、スイッチのターンオフの際、容量成分、漏れ電流の影響により電極間に蓄積された電荷は維持されずに、正弦波の半周期程度の時間で減衰することが認められた。

### 3.2 気体流れの可視化・流速分布

多電極マイクロプラズマアクチュエータに1.4 kV, 20 kHzの正弦波高電圧を印加した際に、誘起される気体流れの可視化を行った結果を以下に示す。プラズマアクチュエータに印加する電圧はゼロを中心とした正弦波であるため、Fig.1のように、上部電極から下部電極に向かっている流れが生じると考えられる。従って、Ch1とCh3を駆動すれば、Fig.6に図示するように、右向き流れが得られる。そして、カメラの露光時間を10 msに設定したときの可視化した流れをFig.7に示す。各々のプラズマへの吸い込み・吐き出しが認められた。これは、プラズマにより加速された流れが、次のプラズマによる再加速を繰り返していることを意味する。次に、露光時間247 μs、カメラの画像取得のインターバルは250 μsとして、個々の粒子の運動から流速を求めた結果をFig.8に示す。流速測定の分解能は水平(x軸)方向が500 μmで、垂直(y軸)方向が100 μmである。これらの設定は、他の流れパターンの実験においても同条件に設定した。

高さ(y軸)方向については、アクチュエータの面からの高さ0.25 mmにて流速が最大となることが分かった。このことから、プラズマにより生じる体積力は面からの高さ0.25 mm以下のごく表面近傍にしか生じないと考えられる。しかし、体積力・流速の最大値が得られるのはもっと壁面に近い位置、高さ0.1 mm程度という数値計算の報告<sup>24)</sup>がある。そのため、より精密な測定、もしくは数値計算による解析も必要だと考えられる。

水平(x軸)方向について、右に進むほど流速が増し

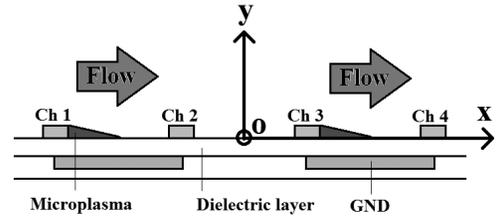


図6 右向き流れの模式図

Fig.6 Schematic image of right-ward flow.

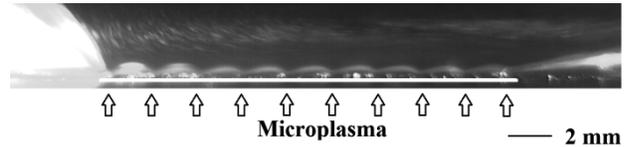


図7 右向き流れの可視化の例

Fig.7 Visualization of right-ward flow.

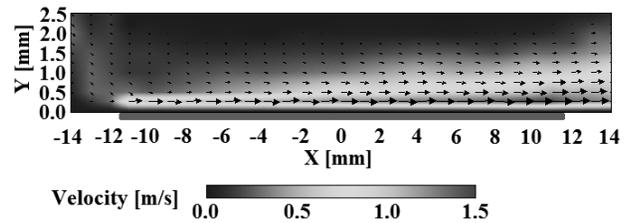


図8 右向き流れの速度ベクトル分布

Fig.8 Flow vector distribution of right-ward flow.

ていくことが分かる。これは、Fig.7に示した通り、各プラズマによる流れの加速が重畳されたためである。x = -11 mmでは流速は0.9 m/sであったが、x = 11 mmでは1.5 m/sまで加速されていた。電極数を増やせば流速を増加できると考えられるが、Forteらの報告<sup>25)</sup>にあるように、流れが次のプラズマにより再加速されるまでの間では、抵抗により流れが減速する。そのため、加速と減速の釣り合いにより、流速はある値で頭打ちになると考えられる。壁面付近での流速の垂直成分の振動は、プラズマ領域での吸い込み、吐き出しに起因すると考えられる。

また、x = 11 mmにおけるy軸の速度プロファイルから、本アクチュエータの変換効率 $\eta$ を近似的に算出した。近似式は以下のとおりである<sup>26)</sup>。

$$\eta = \frac{\text{Kinetic power}}{\text{Electric power}} = \frac{\frac{1}{2} \rho l \int_0^{\infty} dy u(y)^3}{5 \text{ W}} \quad (1)$$

ここで、 $\rho$ : 空気の密度 1.205 [kg m<sup>-3</sup>]<sup>27)</sup>、 $l$ : アクチュエータの長さ 20 mm、 $u(y)$ : 流速である。計算した結果、効率は10<sup>-3</sup>%となり、従来の10<sup>-2</sup>~10<sup>-1</sup>%という報告<sup>24,26)</sup>と比較して低い値を示した。一般に、同一のプラズマアクチュエータに対し、印加電圧が高いほど、変換効率が高くなる<sup>26)</sup>。

本デバイスは、各チャンネル同士でのスパーク防止の

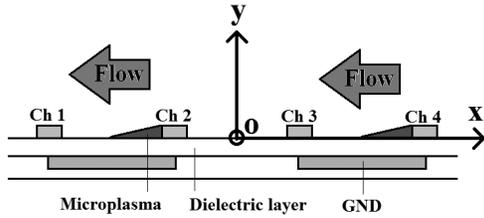


図9 左向き流れの模式図  
Fig.9 Schematic image of left-ward flow.

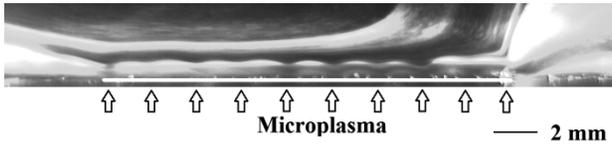


図10 左向き流れの可視化の例  
Fig.10 Visualization of left-ward flow.

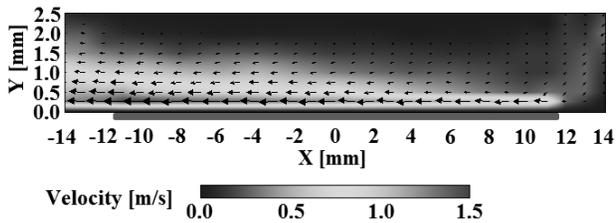


図11 左向き流れの速度ベクトル分布  
Fig.11 Flow vector distribution of left-ward flow.

ため、印加できる電圧の値が1.5 kV程度に制限されており、変換効率が低くなったと考えられる。しかし、空間的に高い制御性を実現するためには、電極を密に配置する必要がある。つまり、変換効率と制御性はトレードオフの関係にあると考えられる。高い制御性と変換効率の改善には、電極間隔を保ったまま、印加電圧をより高くできる電極構造の最適化が求められる。

次に、Ch 2とCh 4を駆動させれば、Fig.9に図示するような、左向き流れが得られる。可視化流れをFig.10に、個々の粒子の運動から流速を求めた結果をFig.11に示す。

電極構造の対称性のため、右向き流れとは左右反対称の流れが得られた。従って、詳細な説明は省く。

今まではアクチュエータの面に対して水平方向の流れであったが、ここからは面に対して垂直な流れについて述べる。Ch1とCh4を駆動させれば、Fig.12に図示するように、アクチュエータ中央で二つの流れが衝突し、上向き流れが生じる。可視化流れをFig.13に、粒子の運動から流速を求めた結果をFig.14に示す。

中央部、高さ1 mmの位置で1.0 m/sの上向き流れが生じた。また、高さ1 mmにおいて、ベクトルが上向きとなっている領域が $x = -1 \sim 1$  mmの間のごく狭い領域であるが、これは、上向き流れが、プラズマ領域からの高流速、狭領域の吹き出しにより生じるためである。ま

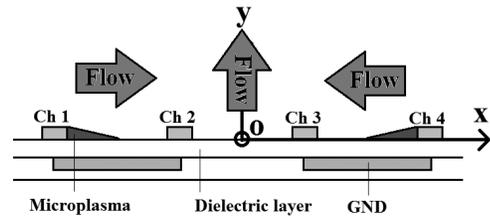


図12 上向き流れの模式図  
Fig.12 Schematic image of up-ward flow.

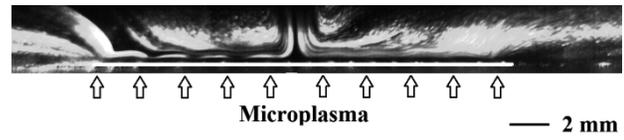


図13 上向き流れの可視化の例  
Fig.13 Visualization of up-ward-flow.

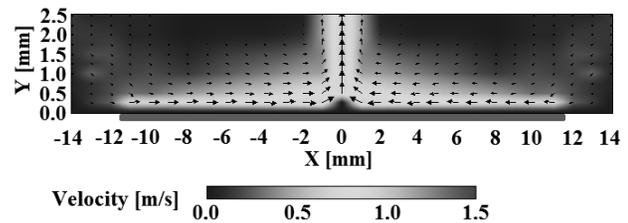


図14 上向き流れの速度ベクトル分布  
Fig.14 Flow vector distribution of up-ward flow.

た、中央部、高さ0.25 mmの位置では流れはほとんど生じていなかった。アクチュエータの中央では、電極の対称性より流速の水平成分はゼロになると考えられる。すると、流れは垂直成分のみになるが、アクチュエータ表面近傍において流れの連続の式を考慮すると、垂直成分もゼロになると考えられる。

次に、Ch 2とCh 3を駆動すれば、Fig.15に図示するような下向き流れが得られる。これは、流体の連続性のためである。カメラの露光時間を10 msに設定したときの可視化した流れをFig.16に、粒子の運動から流速を求めた結果をFig.17に示す。

中央部、高さ1 mmの位置で0.2 m/sの下向き流れが生じた。また、高さ1 mmにおいて、ベクトルが下向きとなっている領域が $x = -11 \sim 11$  mmの間の広い領域(アクチュエータの全面)であるが、これは、下向き流

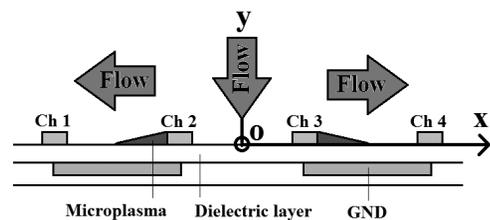


図15 下向き流れの模式図  
Fig.15 Schematic image of up-ward flow.

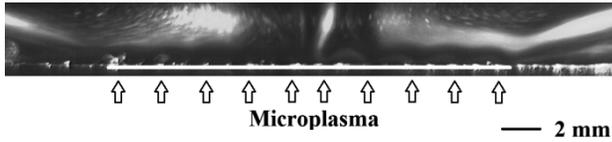


図 16 下向き流れの可視化の例  
Fig.16 Visualization of up-ward-flow.

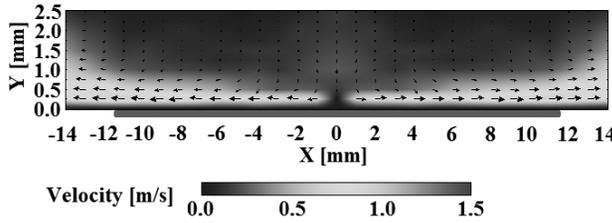


図 17 下向き流れの速度ベクトル分布  
Fig.17 Flow vector distribution of up-ward flow.

れが、プラズマ領域への低流速、広領域の吸い込みにより生じるためである。また、中央部、高さ 0.25 mm の位置では、上向き流れと同様の理由で流れはほとんど生じていなかった。

3.3 誘起されるガス流量

前節にて速度分布を得たので、ここでは誘起されたガス流量について述べる。Table 1 にガス流量の測定面と、測定値を示す。いずれの流れも約 2 L/min であることが分かった。特に、上向き流れと下向き流れでは、流速とその範囲が大きく異なるが、供給するガスの流量としてはほぼ等しいことが明らかとなった。

表 1 各流れパターンにより誘起される流量  
Table 1 Measurement of gas flow rate

	Measuring plane	Flow rate [L/min]
Right-ward flow	x = 11 mm	2.0
Left-ward flow	x = -11 mm	2.0
Up-ward flow	y = 1 mm	2.3
Down-ward flow	y = 1 mm	2.5

3.4 流速の過渡応答性

誘起される流れの過渡特性を Fig.18 に示す。測定点は Table 2 の通りである。駆動後 80 ms 程度で定常状態に移行することが明らかになった。プラズマアクチュエータを駆動する電気信号自体は瞬時に伝搬するが、気体の粘性のため、このような遅延が生じたのだと考えられる。

表 2 流れの過渡応答性の測定位置  
Table 2 Measurement point of flow velocity

Right-ward flow	(y, x) = (0.25 mm, 11 mm)
Left-ward flow	(y, x) = (0.25 mm, -11 mm)
Up-ward flow	(y, x) = (1.0 mm, 0 mm)
Down-ward flow	(y, x) = (1.0 mm, 0 mm)

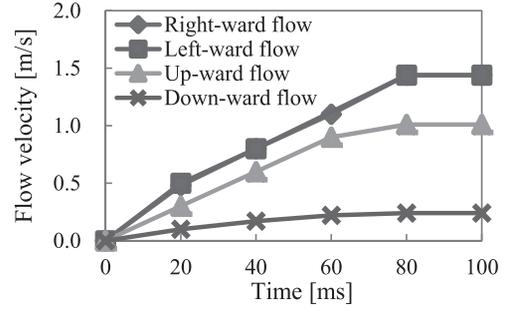


図 18 電気信号に対する気体流れの遅延結果  
Fig.18 Transient response of a flow to an electrical signal.

3.5 パースト制御による斜め方向への噴流

前節より、気体の応答には、数十 ms の時間を要することが分かった。逆にいえば、ms 未満の時間間隔でオンオフを繰り返せば、デューティ比に応じて放電電力、つまり誘起されるガス流量を調整できる。そこで、上向き流れにおいて、左右から中央へのガス流量を非平衡に設定することにより、斜め方向への流れを試みた。印加電圧は 1.4 kV、20 kHz の正弦波であり、オンオフの周期は 250 μs とした。電圧波形の例を Fig.19 に示す。また、Fig.20 に流れの可視化の例を示す。Ch 1 をデューティ比 D [%] で駆動し、Ch 4 をデューティ比 D' = 100 - D [%]

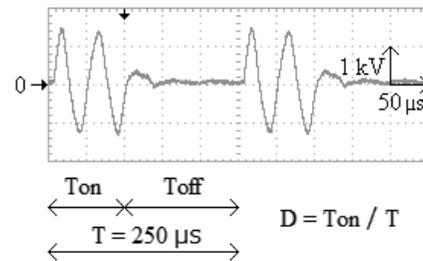


図 19 FET スイッチによる正弦波電圧の変調  
Fig.19 Sinusoidal voltage with FET switching.



図 20 斜め方向流れの可視化の例  
Fig.20 Visualization of skew flow.

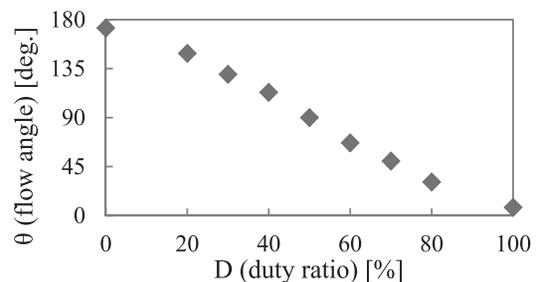


図 21 デューティ比制御による流れの角度制御  
Fig.21 Duty ratio and induced flow angle.

にて駆動した時の流れの角度を Fig.21 に示す。デューティ比、流量の小さい側に流れが傾くことが分かる。消費電力はいずれの場合も 2.5 W であった。また、誘起された流速は 0.7 m/s 程度であった。

Benard らは、印加電圧を上下させることで、斜め方向への流れを実現<sup>28)</sup>したが、本研究では、より簡単な半導体スイッチのオンオフのデューティ比の調整により斜め方向への角度制御を実現できた。

#### 4. 結論

多電極マイクロプラズマアクチュエータにより、気体流れの能動的制御を検討し、可視化を行ったところ、以下の知見が得られた。

- (1) 4つのチャンネルを独立駆動させることで、上下左右4方向への、電気信号に応じた気体流れを確認した。印加電圧が正弦波 1.4 kV, 20 kHz の場合、放電電力は 5 W であり、誘起される流速は 1 m/s 程度であった。
- (2) 得られた速度分布から、プラズマによる体積力はアクチュエータの面から高さ 0.25 mm 以下のごく近傍に発生すると推察される。
- (3) 誘起されるガス流量は、上下左右いずれの流れにおいても 2 L/min 程度であった。
- (4) エネルギー変換効率は 10<sup>-3</sup>%程度と低い値であるが、これは、密な電極配置に応じた低電圧駆動に起因している。そのため、効率と制御性はトレードオフの関係にあると考えられる。
- (5) 気体の粘性のため、気体流れは電気信号に対して追従に 80ms 程度の時間を要した。
- (6) 半導体スイッチングにより、左右から中央へのガス供給を非平衡に設定することで、斜め上方向への流れの角度制御を実現した。

#### 参考文献

- 1) M. Gadhak: Flow control, Cambridge University press, (2000)
- 2) 笠木伸英: ながれ, **25** (2006) 13-22
- 3) J. R. Roth, X. Din: Proc. 44th AIAA Aerospace Sciences Meeting and Exhibit, Jan., AIAA 2006-1203 (2006) 9-12
- 4) K. P. Singh, S. Roy: J. Appl. Phys., **103**, 013305 (2008)
- 5) M. Neumann, C. Friedrich, J. Kriegseis, S. Grundmann, J. Czarske: J. Phys., D: Appl. Phys., **46**, 042001 (2013)
- 6) J. D. Jacob, K. Ramakumar, R. Anthony, R. B. Rivir: Proc. 4th International Symposium on Turbulence and Shear Flow Phenomena, June (2005) 27-29
- 7) S. Im, H. Do, M. A. Cappelli: Appl. Phys. Lett., **97**, 041503 (2010)
- 8) B. Goksel, D. Greenblatt, I. Rechenberg, Y. Singh, C. N. Nayeri, C.O. Paschereit: Proc. Conf. Turbulence and Interactions TI2006, Porquerolles, France, May 29 – June 2 (2006)
- 9) T. C. Corke, M. L. Post, D. M. Orlov: Exp Fluids, **46** (2010) 1-26
- 10) J. Little, K. Takashima, M. Nishihara, I. Adamovich, M. Samimy: J. AIAA, **50** [2] (2012) 350-365
- 11) Y. Li, X. Zhang, X. Huang: Exp Fluids, **49** (2010) 367-377
- 12) F. O. Thomas, Al. Kozlov, T. C. Corke: J. AIAA **46** [8] (2008) 1921-1931
- 13) W. Shyy, B. Jayaraman, A. Andersson: J. Appl. Phys., **92** (2002) 6434
- 14) Y. B. Suzen, P. G. Huang, J. D. Jacob, D. E. Ashpis: Proc. 35th Fluid Dynamics Conference and Exhibit, Toronto, Ontario, June (2005) 6-9
- 15) A. V. Likhanskii, M. N. Shneider, S. O. Macheret, R. B. Miles: J. Appl. Phys. **103**, 053305 (2008)
- 16) H. Nisida, T. Abe: Proc. 41st Plasmadynamics and Lasers Conference, 28 June – July 1, AIAA 2010-4634 (2010)
- 17) B. Jayaraman, S. Thakur, W. Shyy, J. Haet Transfer, **129** [4] (2007) 517-525
- 18) G. I. Font, S. Jung, C. L. Enloe, T.E. McLaughlin: Proc. 44th AIAA Aerospace Sciences Meeting, 9-12 January, AIAA 2006-167 (2006)
- 19) J. P. Boeuf, Y. Lagmich, Th. Unfer, Th. Callegari, L. C. Pitchford: J. Phys., D: Appl. Phys., **40** (2007) 652
- 20) 小方 聡, 射越 悠, 瀬川武彦, 日本機械学会論文集 B 編, 77 巻, 775 号, pp. 672-679 (2011)
- 21) 橋 邦英, 応用物理, **75** [4] (2006)
- 22) M. Blajan, K. Shimizu: Appl. Phys. Lett, **101**, 104101, (2012)
- 23) M. Venturini: Proc. Powercon 7, San Diego, CA (1980)
- 24) 大河内翔平, 笠木伸英, 鈴木雄二: ながれ, **29** (2010) 271-276
- 25) M. Forte, J. Jolibois, J. Pons, E. Moreau, G. Touchard, M. Cazalens: Exp Fluids, **43** (2007) 917-928
- 26) E. Moreau: J. Phys. D: Appl. Phys., **40** (2007) 605
- 27) ISO 2533, "Standard atmosphere" (1975)
- 28) N. Benard, J. Jolibois, E. Moreau, R. Sosa, G. Artana, G. Touchard: Thin Solid Film, **516** (2008) 6660-6667