

パルス変調を用いたSDBDプラズマアクチュエータが誘起する流れ

柳田祥之（日大院），小森瑛（日大理工・現トヨタ自動車），
大竹智久，村松旦典，本橋龍郎（日大理工）

A flow induced by a SDBD plasma actuator with pulse modulation

by

Shoji YANAGIDA, Akira KOMORI, Tomohisa OHTAKE, Akinori MURAMATSU and Tatsuo MOTOHASHI (Nihon Univ.)

ABSTRACT

A SDBD plasma actuator has been proposed to use pulse modulation in order to increase the efficiency of the performance. We examined the performance of the SDBD plasma actuator by varying both duty ratio and frequency of pulse modulation. The distributions of velocity induced by the SDBD plasma actuator in the still air were measured using a hot-wire anemometer. Induced flows were visualized by Mie scattering. The induced flows depend on both the duty ratio and the modulation frequency. The flow widens vertically when the duty ratio is high and the modulation frequency is low.

1. はじめに

近年，流体制御デバイスとしてSDBD (Single Dielectric Discharge) プラズマアクチュエータが注目されている。これは図1に示されるように，誘電体を2枚の電極で挟んだ単純な構造であり，非常に薄いアクチュエータである。これを利用して，翼まわりの流れ場の剥離を抑制することにより空力特性が改善されることが示されている⁽¹⁾。さらに，電極に印加する電圧を間欠的に変化させるパルス変調を用いることにより，翼面上の境界層の剥離を効果的に抑制できることが報告されている⁽²⁾。

本研究では，パルス変調を用いたSDBDプラズマアクチュエータが誘起する流れを調べるために，静止大気中で実験を行った。パルス変調のパラメータである変調周波数，Duty比を変えることにより流れがどのように変化するかを流れの可視化，速度分布の測定によって調べた。

2. 実験装置および方法

実験に使用したSDBDプラズマアクチュエータの断面図を図1に示す。電極には厚さ70 μm の銅テープを，誘電体には厚さ70 μm のポリイミドテープを5枚重ねて使用した。露出電極の幅は1mm，被覆電極は10mm，両電極間のx方向の間隔は空けていない⁽³⁾。SDBDプラズマアクチュエータの作動にはピー・エス・アイ社製の高周波数・高電圧の電源装置(PSI-PG1040F)を使用した。

図2に電極間に印加するパルス変調された矩形波の模式図を示す。本研究ではパルス変調のパラメータを変調周波数 $f_m (= T_m^{-1})$ ，Duty比 $D (= T_{on}/T_m)$ のみとし，基本波周波数 $f_{base} (= T_{base}^{-1})$ は8kHz，印加電圧は10kV_{p-p}とした⁽³⁾。基本波は疑似矩形波である。D=50%で $f_m = 5 \sim 100 \text{ Hz}$ の範囲， $f_m = 50 \text{ Hz}$ でD=10~75%の範囲で実験を行った。また，パルス変調を用いない連続的な基本波の印加でも同様の実験を行った。

煙発生装置，レーザシートを用いて流れの可視化を行っ

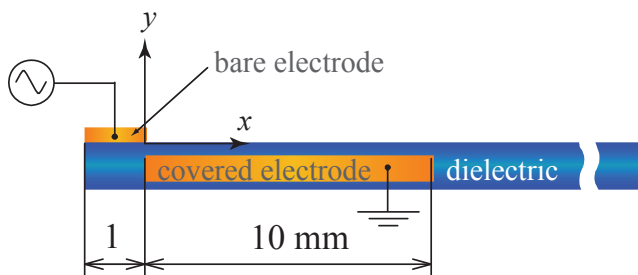


Fig.1 Schematic of the plasma actuator.

た。内寸600×294×120mmの亚克力製の測定部に煙を満たし，その中でプラズマアクチュエータを作動させてレーザシートによるミー散乱光をデジタルスチルカメラ（露光時間1/200s），高速度デジタルカメラ（フレームレート600fps）で撮影した。

速度分布の測定には，I型プローブを定温度型熱線風速計に接続して使用した。I型プローブは自作のもので，長さ1mm，直径5 μm のタングステン線を用いた。熱線風速計からの出力信号はローパスフィルタを通過後，A/Dコンバータを介してPCに収録した。ローパスフィルタのカットオフ周波数は1kHz，A/Dコンバータのサンプリング周波数は1kHz，サンプリング時間は15sとした。また，同時に電源装置からのモニタ出力もPCに収録した。図1に示されるように，xは露出電極後端からの距離，yは壁面からの距離を表し，速度分布の測定位置はx=14mm，測定範囲はy=0.2~10mmである。なお，速度の算出に当たって，温度の補償は行っていない。

3. 速度分布の測定結果

3-1. 変調周波数の影響

はじめに，Duty比D=50%について，変調周波数 f_m を変えた場合の誘起された流れの速度分布の測定結果を示す。図3は平均速度 \bar{u} の分布図であり，図4は速度変動成分の実効値 u' の分布図である。図中のcont.はパルス変調を用いない連続的な基本波の印加を表す。誘起速度 \bar{u} のピーク値はcont.の場合が最大で，パルス変調を用いた場合には f_m が高いほど，ピーク値も大きくなっている。

図5に流速，電源電圧の時間履歴の一例としてy=1.6mmにおける $f_m = 5 \text{ Hz}$ ，D=50%の場合を示す。流速の周期が印加電圧の変調周波数と同期していることが分かる。電圧印加後，流速が上がるまでの遅れがあるが，これは測定場

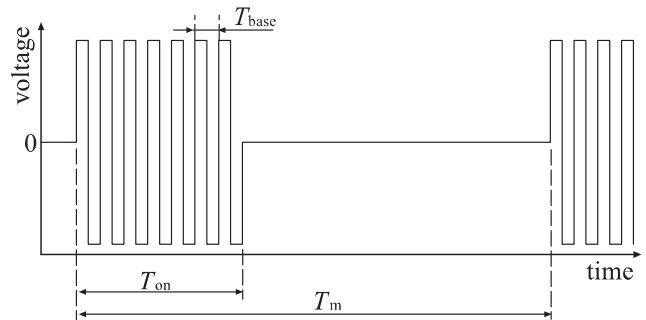


Fig.2 Explanation of pulse modulation.

所によって違い、 x が小さくなると小さくなる。入力電圧に対する流速の応答は立ち上がりは速いが、減少する過程では遅い。したがって、 f_m が高ければ速度が低下しきらないうちに次の電圧の印加が始まり速度が上昇することから、 f_m が高いほど \bar{u} が大きくなることわかる。

パルス変調を用いた場合、 \bar{u} の分布のピークとなる位置は cont. の場合に比べ壁面から離れている。y 方向への速度分布の広がりを見ると、cont. の場合では半値幅にしておよそ 1.5 mm である。それに対しパルス変調を用いた場合の $f_m = 100 \text{ Hz}$ では約 3 mm、 $f_m = 50 \text{ Hz}$ では約 4.8 mm と f_m が低くなるにつれ広がりが大きくなる傾向が見られた。

誘起された速度の変動成分 u' のピーク値は平均速度分とは逆に cont. の場合が一番低く、 f_m が低いほどピーク値が大きくなり、エントレインメントが増大した結果、誘起された速度分布の幅が大きくなっていると考えられる。このことは誘起される流れは脈動噴流のようにエントレインメントを増大させているのではないかと考えている⁽⁴⁾。

図 6 に速度分布から得られた単位幅あたりの流量、単位時間当たりの運動量の変調周波数 f_m による変化を示す。これらはそれぞれ、

$$Q = \rho \int \bar{u} dy \quad (1)$$

$$\bar{M} = \rho \int \bar{u}^2 dy, M' = \rho \int u'^2 dy, M_{tot} = \bar{M} + M' \quad (2)$$

で与えられる。ここで、 Q は質量流量、 \bar{M}, M' は運動量の平均成分、変動成分であり、その合計を M_{tot} と表す。これらの値の積分範囲は測定範囲である $y = 0 \sim 10 \text{ mm}$ として、台形則により算出した。また、速度は x 方向成分のみと仮定した。

パルス変調を用いることにより cont. の場合に比べて、上述のようにエントレインメントが増加し半値幅も大きくなることから流量 Q が増えることがわかる。 Q は f_m が低くなるに従って大きくなる。運動量はいずれも変動速度の寄与分 M' に比べ平均速度の寄与分 \bar{M} のほうが大きい、 M' は f_m が低いほど大きくなっている。 \bar{M} は cont. の場合が一番低く、 $f_m = 50 \text{ Hz}$ で最大となっている。2つの成分の合計である M_{tot} を見ると 10 Hz が最大となっている。

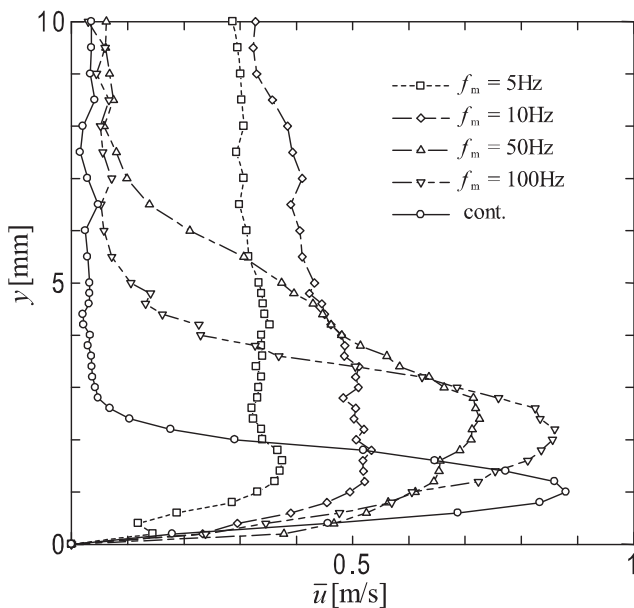


Fig.3 Profiles of mean velocity at $D = 50 \%$ ($x = 14 \text{ mm}$).

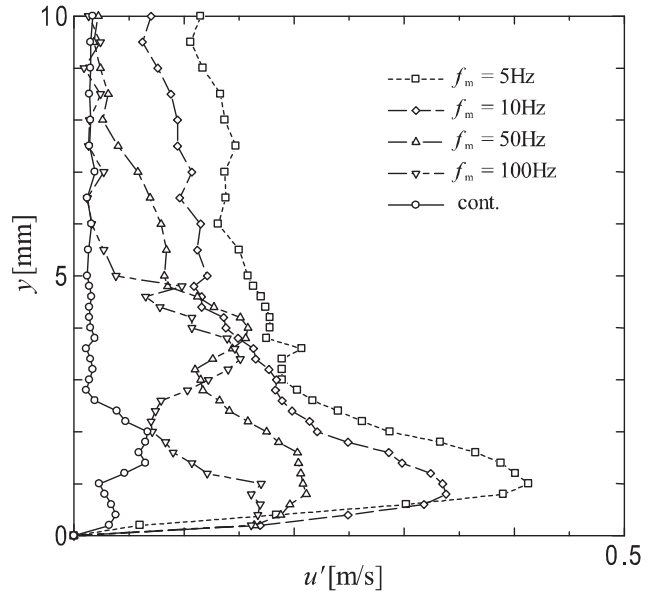


Fig.4 Profiles of turbulence intensity at $D = 50 \%$ ($x = 14 \text{ mm}$).

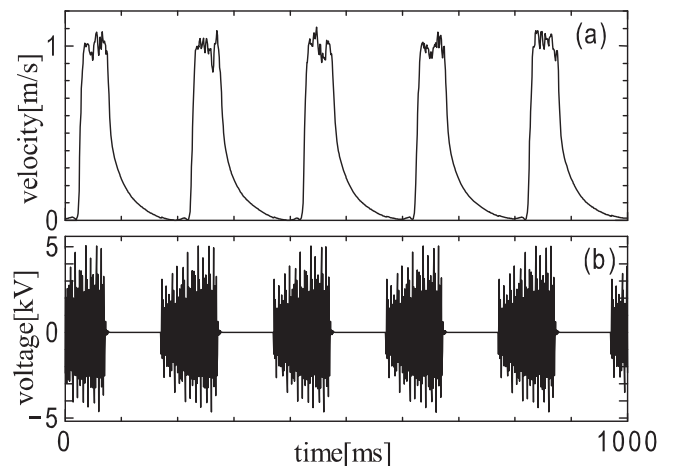


Fig.5 (a) Velocity and (b) voltage of power supply at $f_m = 5 \text{ Hz}$, $D = 50 \%$ ($x = 14 \text{ mm}$, $y = 1.6 \text{ mm}$).

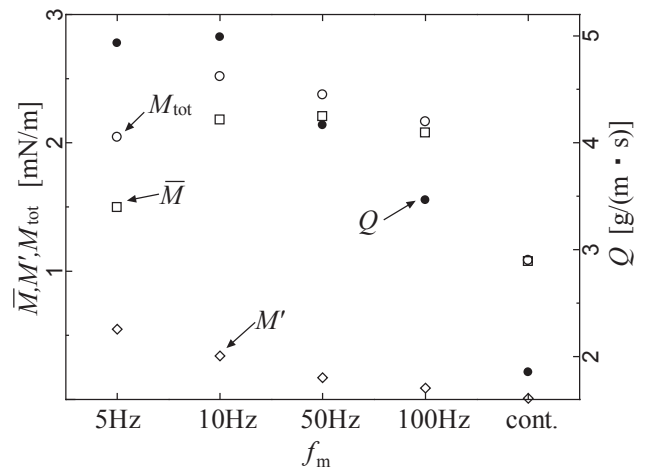


Fig.6 Mass flow rate and momentum at $D = 50 \%$.

3-2. Duty比の影響

次に、Duty比 D の影響を、変調周波数 $f_m = 50$ Hzの場合について示す。図7は誘起された流れの平均速度 \bar{u} の分布図であり、図8は速度変動成分の実効値 u' の分布図である。 D が低いほど流速が低くなっているのがわかる。 $D = 50\%$ と25%の間の流速に大きな違いが見られる。広がりにはcont.の場合が一番小さく、パルス変調を用いると $D = 75\%$ が一番大きく、 D が低いほど広がりも小さい。速度の変動成分 u' の分布を見ると、パルス変調を用いた場合、平均速度分布と同様に D が低いほど小さくなっている。広がりについても D が低いほど小さく、平均速度分布同様に $D = 50\%$ と25%の間に大きな開きが見られる。電圧印加後に流速が定常になるまで10 msほど必要であることが文献(5)に示されている。 $f_m = 50$ Hzの場合 $T_m = 20$ msであるから、 $D = 50\%$ では $T_{on} = 10$ ms、 $D = 25\%$ では $T_{on} = 5$ msであるので、 $D = 25\%$ 以下では流速の増速過程が終わる前に電圧の印加を停止していると考えられる。さらに D が低いほど印加停止時間が長くなり、誘起速度の低下が大きくなる。そのため誘起速度が上がらず、 $D = 25 \sim 50\%$ で平均速度、変動速度に大きな開きがあると考えられる。一例として図9に示した $y = 1.6$ mmにおける $f_m = 5$ Hz、 $D = 50\%$ の場合の速度の時間応答からも流速の減少する時間に比べ、増速する時間が短いことがわかる。

図10には式(1)、(2)より算出した、単位幅あたりの流量、単位時間当たりの運動量のDuty比 D による変化を示す。 $D = 100\%$ を除きDuty比が大きいくほど流量は大きくなるが、cont.の場合では50%よりも小さくなった。流量、運動量ともに $D = 25 \sim 50\%$ で大きな開きが見られる。これは上述の速度分布と同様の理由によるものである。運動量の増減は $D = 75\%$ と100%の間で変化がある。100%は連続的な基本波の印加を表すが、電圧非印加時間が短いと、誘起速度が下がりきらずこれらの量は100%のときに近づいていくものと考えられる。つまり、変調周波数が低いほど増減の変化が表れるDuty比は高いのではないかと考えられる。

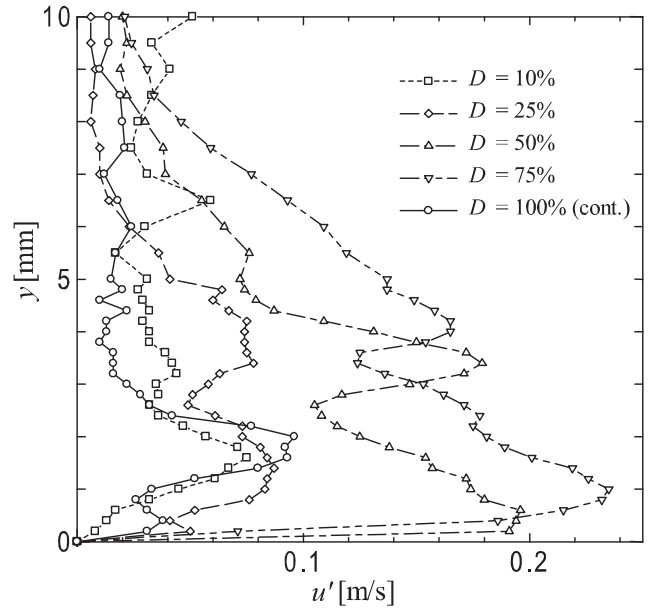


Fig.8 Profiles of turbulence intensity at $f_m = 50$ Hz ($x = 14$ mm).

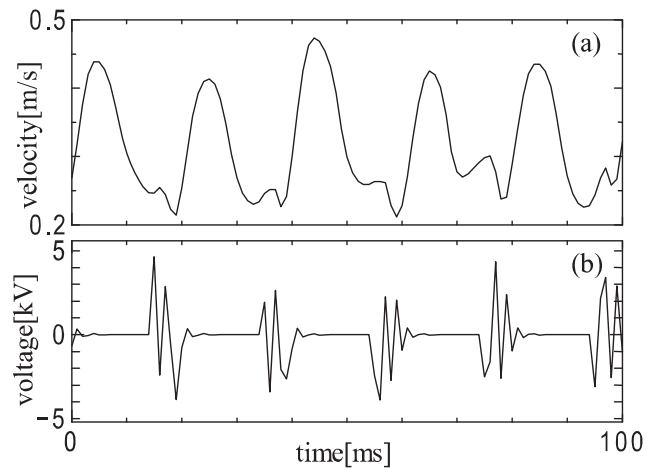


Fig.9 (a) Velocity and (b) voltage of power supply at $f_m = 50$ Hz, $D = 25\%$ ($x = 14$ mm, $y = 1.6$ mm).

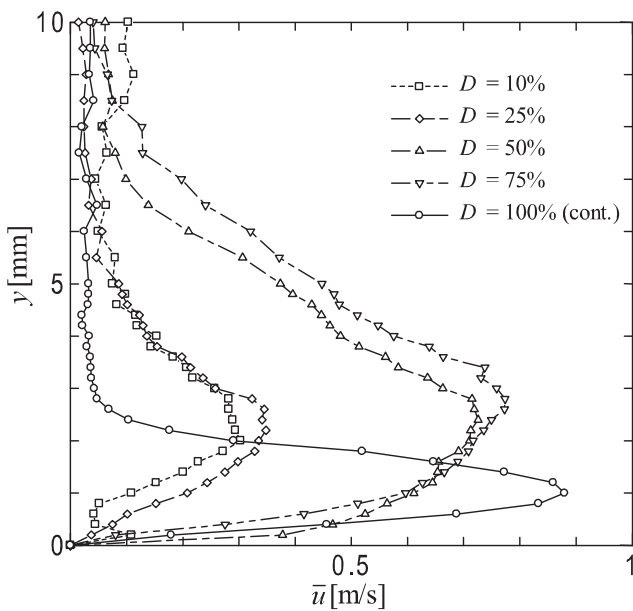


Fig.7 Profiles of mean velocity at $f_m = 50$ Hz ($x = 14$ mm).

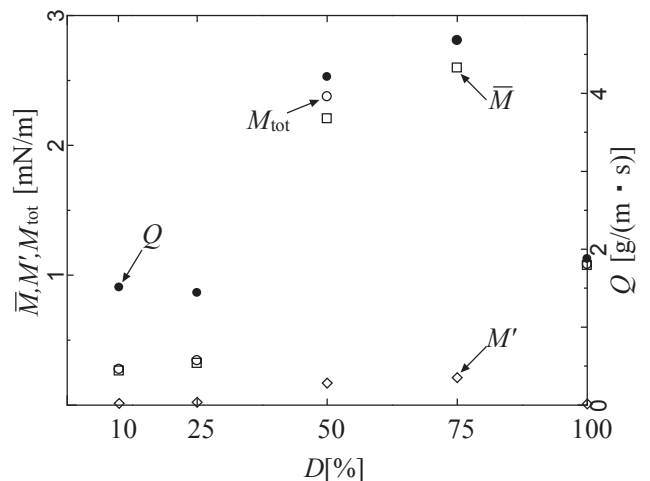


Fig.10 Mass flow rate and momentum at $f_m = 50$ Hz.

4. 流れの可視化結果および位相平均速度による分布

デジタルスチルカメラは露光時間をある程度長くすることで平均的な流れ場を鮮明に捉えるために、高速度デジタルカメラは時々刻々変化する流れ場を捉えるために用いた。位相平均速度 \tilde{u} の基準周期は T_m であり、電圧の印加開始時を基準位相 $\phi = 0 \text{ deg}$ とした。3-1, 3-2節と同じデータを用いているため、変調周波数により位相の分解能が異なっている。図11にcont.の場合のデジタルスチルカメラによる流れの可視化写真を示す。プラズマアクチュエータを取り付けた板を灰色、座標原点を青色の三角形で示している。壁面に沿った薄い流れが確認できる。ここには示していないが、高速度カメラで撮影したcont.の場合の過渡応答では、電圧印加開始直後、原点付近に $x-y$ 平面における反時計回りの渦が発生し、電圧を印加し始めてからの時間が経過するとともに渦は x 方向に移動しつつ大きくなっていく様子が観察された。この渦は、電圧印加直後に誘起された流れと周囲の静止空気の間でせん断が生じたため発生したと考えられる。渦が通過した後は図11および図3, 7に示す壁に沿った薄い流れが誘起されている。

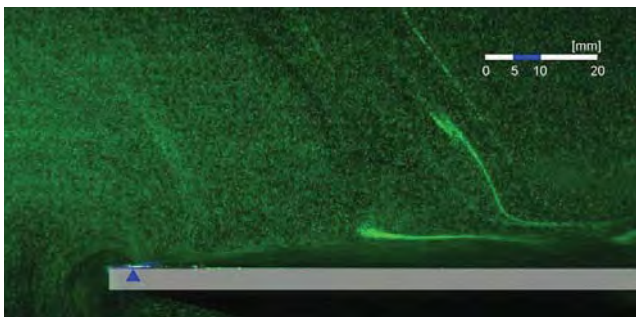


Fig.11 Photograph of continuous induced flow by a still camera.

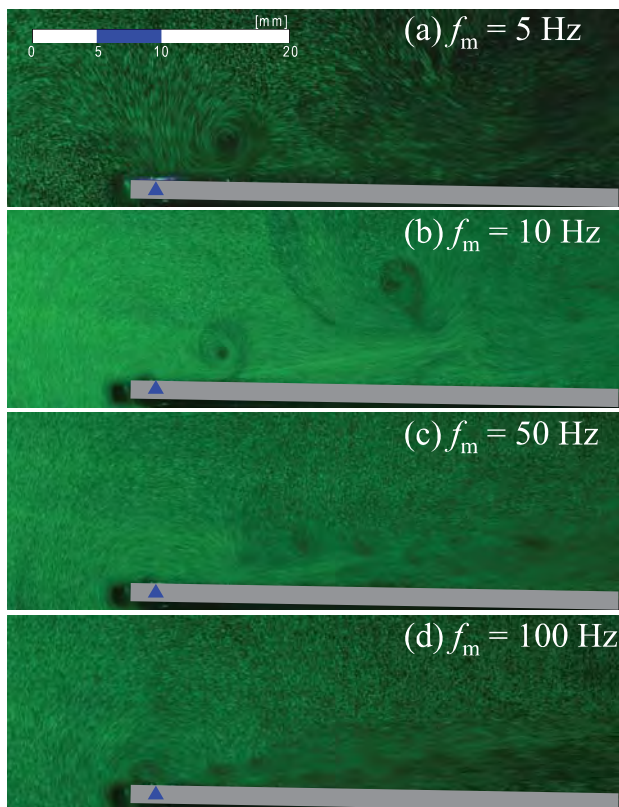


Fig.12 Photographs of pulsed induced flow at $D = 50 \%$ by a still camera.

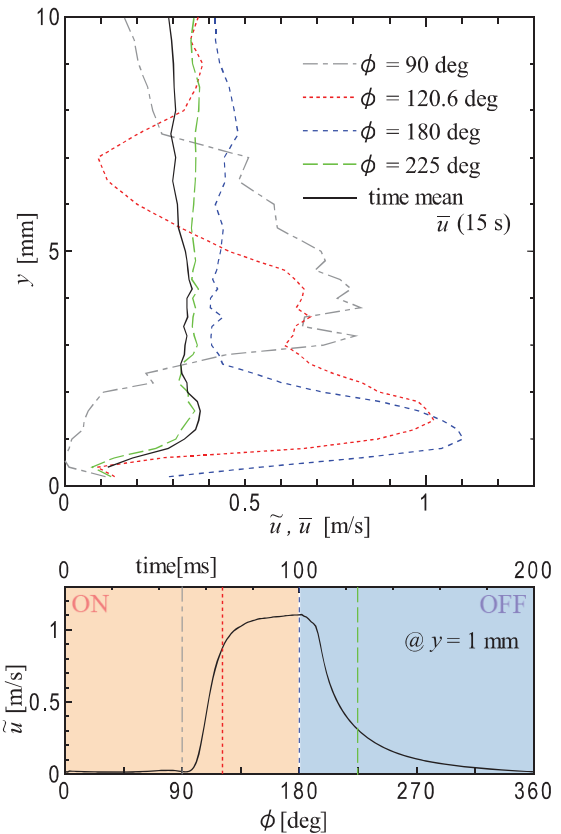


Fig.13 Profiles of phase averaged velocity at $f_m = 5 \text{ Hz}$, $D = 50 \%$ ($x = 14 \text{ mm}$).

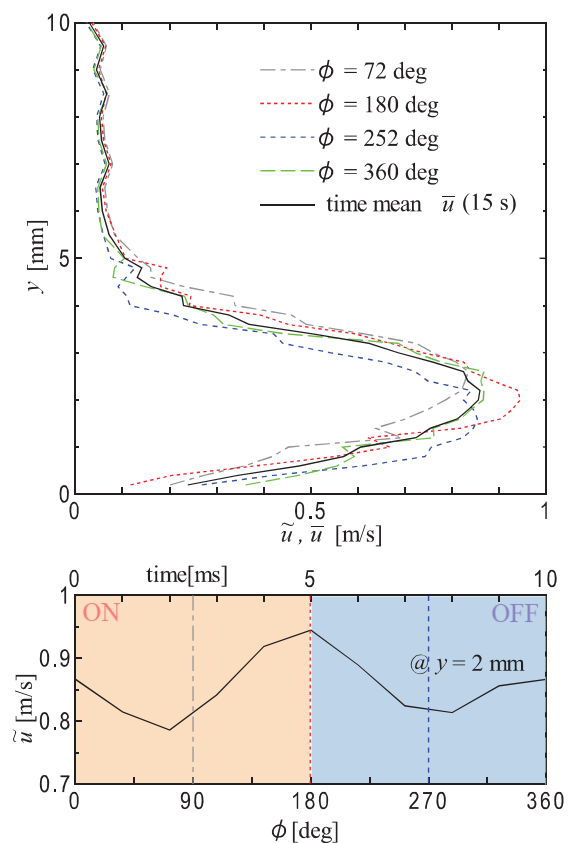


Fig.14 Profiles of phase averaged velocity at $f_m = 100 \text{ Hz}$, $D = 50 \%$ ($x = 14 \text{ mm}$).

4-1. 変調周波数の影響

高速度カメラで撮影した映像を見ると、パルス変調を用いた場合はいずれも変調周波数 f_m に同期した渦が確認できた。図12に $D = 50\%$ におけるデジタルスチルカメラによる流れの可視化写真を示す。変調周波数が低いほど流れが y 方向に広がっていることが分かる。高速度カメラの映像からこの広がりには変調周波数に同期した渦によるものということが分かった。変調周波数が低いほど、電圧印加時間 T_{on} が長い場合渦が大きくなる。

図13, 14に $D = 50\%$ での $f_m = 5, 100\text{ Hz}$ における位相平均速度分布を示した。 f_m が低いほど位相による速度のピーク位置の上下移動が大きいことが分かる。また、 f_m が高いほど平均速度分布と各位相における位相平均分布の差が小さくなる。これは渦の放出周期が短く、渦同士の間隔が狭いためだと考えられる。

高速度カメラの映像と同期して位相平均速度分布をみると、変調周波数が低いときは、渦が通過するときに壁面から離れた所で流速が大きくなり、渦の通過後は壁面付近で速度のピークが確認できた。図15には高速度カメラの映像から判断した、測定位置($x = 14\text{ mm}$)に渦の中心がある時の位相における位相平均速度と時間平均速度の差の分布を示す。この図から可視化でも見られるように反時計回りの渦が確認でき、変調周波数が低いほど渦が大きいことがわかる。また渦の移流速度は変調周波数が高いほど大きいことがわかる。

4-2. Duty比の影響

図16に $f_m = 50\text{ Hz}$ におけるデジタルスチルカメラによる流れの可視化写真を示す。 D が大きいほど流れが y 方向に広がっている様子が分かる。高速度カメラの映像を見ると、やはり電圧印加時間の長い大きな D ほど渦が大きくなっていることが分かる。また、 D が大きいほど渦の移動速度が速いことが分かった。渦は下流に移動するに従って遅くなり、隣り合う渦に近づき、崩れていく様子が観察できた。

図17, 18に $f_m = 50\text{ Hz}$ での $D = 25, 50\%$ における位相平均速度分布を示した。Duty比が大きいほど位相による分布の違いが大きいことが分かる。Duty比が大きいほど渦の移動速度が速いことが分かった。 $D = 10$ と 25% では位相による流速のピーク位置の上下移動は見られないが、 $D = 50$ と 75% ではそれが見られる。これは渦同士の間隔が、小さな D ほど狭いためだと考えられる。

図19には図15と同様に測定位置に渦の中心がある位相での $\tilde{u} - \bar{u}$ の分布を示す。渦は反時計回りでDuty比が大きいほど渦が大きく、移流速度は速いことがわかる。

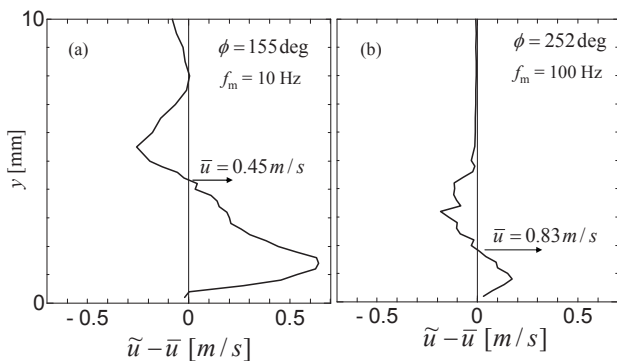


Fig.15 Profiles of difference between \tilde{u} and \bar{u} at $D = 50\%$, (a) $f_m = 10\text{ Hz}$, (b) $f_m = 100\text{ Hz}$.

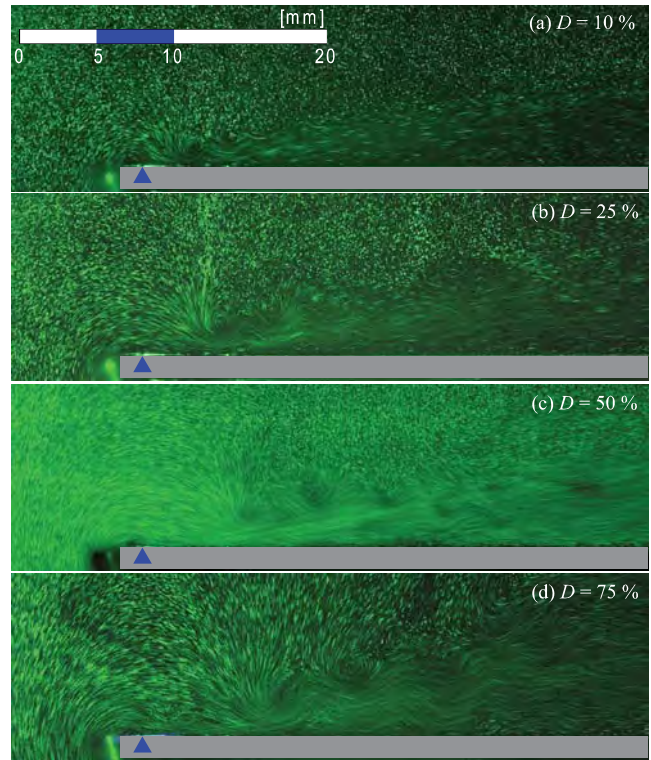


Fig.16 Photographs of pulsed induced flow at $f_m = 50\text{ Hz}$ by a still camera.

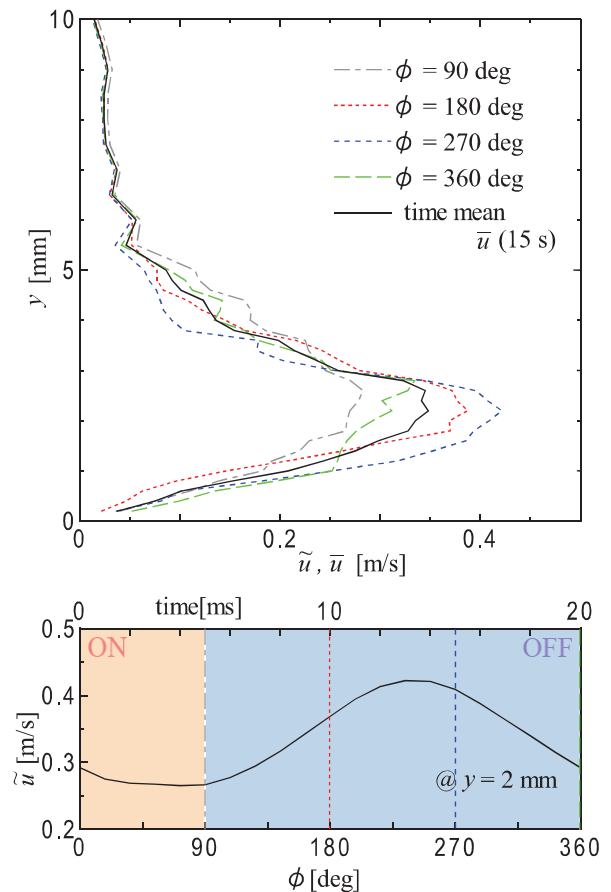


Fig.17 Profiles of phase averaged velocity at $f_m = 50\text{ Hz}$, $D = 25\%$ ($x = 14\text{ mm}$).

5. まとめ

パルス変調を用いた SDBD プラズマアクチュエータが静止大気中で誘起する流れを調べた結果、以下のことが分かった。

- 1) パルス変調による変調周波数に同期した周期的な渦が形成される。渦によるエントレインメントにより流れが主流に直交する方向に広がる。
- 2) 変調周波数が低いほど流れが広がり、流量が増える。
- 3) Duty 比が大きいほど流速は大きくなり、流量、運動量は増える。

参考文献

- (1) Yanase et al, T.: Influence of DBD plasma actuator on aerodynamic characteristics of NACA0012 airfoil at low Reynolds numbers, Proc. Of The 3rd Int. Conf. on Jets, Wakes and Separated flows (ICJWSF-2010), Cincinnati, USA, 2010.
- (2) 松田ほか9名：非平衡プラズマによる気流制御，日本機械学会論文集（B編），Vol. 74, No. 744, pp. 1667-1672, 2008.
- (3) 鈴木ほか5名：プラズマアクチュエータの電極形状について，第46回飛行機シンポジウム，2008.
- (4) 井口・山田：脈動自由噴流の平均流特性，日本機械学会論文集(B編)，Vol. 55, No. 514, pp. 1524-1529, 1989.
- (5) Eric Moreau: Airflow control by non-thermal plasma actuators, J. Phys. D: Appl. Phys. 40, 605-636, 2007.

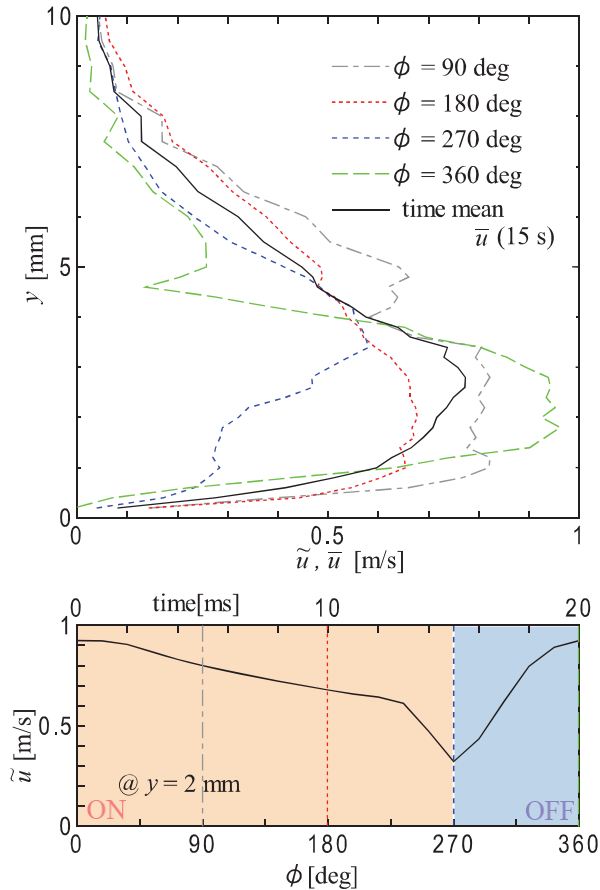


Fig.18 Profiles of phase averaged velocity
at $f_m = 50$ Hz, $D = 75\%$ ($x = 14$ mm).

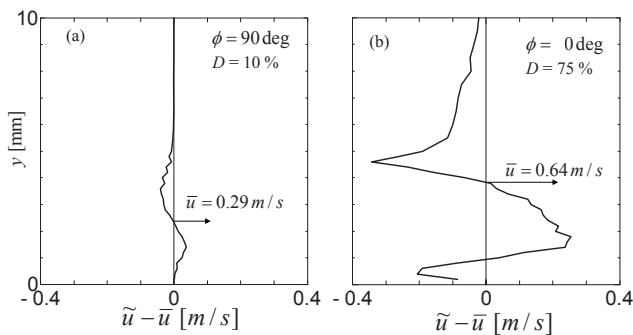


Fig.19 Profiles of difference between \tilde{u} and \bar{u} at $f_m = 50$ Hz.
(a) $D = 10\%$, (b) $D = 75\%$