

# DBD プラズマアクチュエータによる誘起流の強さが 後ろ向きステップ流れに及ぼす影響に関する数値計算

## Numerical simulation for effect of power of an induced flow by DBD plasma actuator on a back-step flow

- 李 根燮, 岐阜大, 岐阜市柳戸 1 - 1, E-mail: keunseob@gifu-u.ac.jp  
 菊地 聡, 岐阜大, 岐阜市柳戸 1 - 1, E-mail: kikuchi@gifu-u.ac.jp  
 今尾 茂樹, 岐阜大, 岐阜市柳戸 1 - 1, E-mail: imao@gifu-u.ac.jp  
 LEE Keunseob, Gifu University, 1-1 Yanagito, Gifu, Japan  
 KIKUCHI Satoshi, Gifu University, 1-1 Yanagito, Gifu, Japan  
 IMAO Shigeki, Gifu University, 1-1 Yanagito, Gifu, Japan

Numerical simulation was performed for a back-step flow to investigate an effect of power of an induced flow by DBD plasma actuator under the conditions that a burst mode has 50 Hz and a duty ratio is 20 %. The surface velocity model was used to calculate the induced flow by DBD plasma actuator. When the induced flow, which was strong enough, was introduced in the back-step flow, the reattachment of the flow occurred at a more upstream location. However, although a strength of the induced flow was increased excessively, the reattachment point was changed very little. It is mean that if the induced flow has a strength over a certain level, the back-step flow could be controlled sufficiently.

### 1. 緒言

DBD(Dielectric Barrier Discharge)プラズマアクチュエータによる流れの制御効果が報告されている。2つの電極によって誘起流が挟まれたアクチュエータは誘起流を生じさせることで流れを制御する。Corkeら<sup>(1)</sup>は、流れのはく離制御のためプラズマアクチュエータを使い、揚力と抗力が同時に増加することを確認した。Andersonら<sup>(2)</sup>は、後退翼上の流れにおいて、プラズマアクチュエータの性能と湿度の関係について実験を行い、数値モデルの基礎となるデータを示した。井上ら<sup>(3)</sup>は、アクチュエータの誘起流による3次元や2次元の攪乱が円柱まわりの流れに及ぼす影響について調べ、3次元攪乱の場合により強い速度変動が生じることを示した。山田ら<sup>(4,5)</sup>は、プラズマアクチュエータの連続駆動によって円柱後流の後流幅や周波数が変化することを示した。Jukesら<sup>(6,7)</sup>は、プラズマアクチュエータを間欠駆動することで連続駆動するより高い流れの制御効果が得られることと、流れに対してアクチュエータの駆動開始時間によって制御効果が異なることを示した。佐野ら<sup>(8)</sup>は、後ろ向きステップ流れにおいて、層流や乱流のどの状態でもプラズマアクチュエータを用いることで圧力損失を低減できることを示した。しかし、アクチュエータの流れの制御効果は示されているが、制御効果に対する最適な条件についての研究はほとんど行われていない。

本研究では後ろ向きステップ流れを対象とし数値シミュレーションを行い、アクチュエータによる誘起流の強さを変化させ、流れの制御効果について調べる。

### 2. 計算方法および計算条件

数値シミュレーションで用いた支配方程式は3次元非圧縮性連続の式とナビエストークス方程式であり、直接有限差分法を使いMAC法を用いて計算を行った。時間項については半陰的な2次精度Crank-Nicolson法、移流項および粘性項については3次精度風上差分法および4次精度中心差分法を用いた。ポアソン方程式についてはSOR法を用いた。

図1に計算領域および境界条件を示す。計算領域は $40 \text{ mm} \leq x \leq 446 \text{ mm}$ ,  $0 \text{ mm} \leq y \leq 301 \text{ mm}$ ,  $0 \text{ mm} \leq z \leq 84 \text{ mm}$ であり、 $x$ 方向の原点は、後ろ向きステップの位置である。後ろ向きステップの高さ $H$ は $40 \text{ mm}$ である。格子点数は $224 \times 158 \times 43$ である。格子間隔は $\Delta x = 2 \text{ mm}$ ,  $\Delta z = 2 \text{ mm}$ の等間隔であり、 $y$ 方向には式(1)のよう

壁面近くに格子を集めた不等間隔格子である。式(1)の $j$ は $y$ 方向の格子番号であり、 $a$ は $1.07007084882$ である。

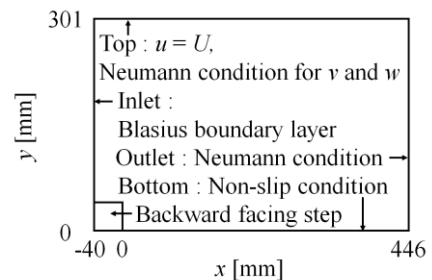


Fig. 1 Computational domain and boundary condition.

$$y(j) [\text{m}] = \begin{cases} 10^{-4} \times (a^j - 1)/(a - 1), & (0 \leq j \leq 40), (0 \leq y \leq 0.02), \\ 0.04 - 10^{-4} \times (a^{80-j} - 1)/(a - 1), & (41 < j \leq 80), (0.02 < y \leq 0.04), \\ 0.04 + 10^{-4} \times (a^{k-80} - 1)/(a - 1), & (80 < j \leq 158), (0.04 < y \leq 0.301), \end{cases} \quad (1)$$

流体の密度は $1.205 \text{ kg/m}^3$ 、動粘度は $1.512 \times 10^{-5} \text{ m}^2/\text{s}$ とし、時間間隔 $\Delta t$ は $0.001 \text{ ms}$ である。速度の境界条件の場合、流入条件は主流速度 $U$ が $10 \text{ m/s}$ で $x = -3 \text{ mm}$ での境界層厚さを代表長さとしたレイノルズ数 $Re_s$ が $1900$ となるラジウス境界層とした。この条件は菊地ら<sup>(9)</sup>の実験条件と同じである。上面は、 $U = 10 \text{ m/s}$ で一定であり $y$ 方向速度 $v$ および $z$ 方向速度 $w$ については微分値ゼロのノイマン条件とした。流出条件は各速度において微分値ゼロのノイマン条件を、下面および後ろ向きステップの表面は滑りなし条件を、側面については周期境界条件を与えた。圧力については全ての境界に対して微分値ゼロのノイマン条件を与えた。また、計算条件から1s間計算した流れ場を初期条件とした。

DBD プラズマアクチュエータによる誘起流を模擬するために李ら<sup>(10)</sup>が提案した表面速度モデルを用いた。この表面速度モデルはプラズマアクチュエータの被覆電極に当たる物体の表面付近に速度を与えるだけでアクチュエータによる誘起流が簡単に模擬できる数値モデルである。実際のアクチュエータによる誘起流の強

さは電圧によって変わるが、表面速度モデルの場合は表面に与える速度によって誘起流の強さが変わる。本研究では  $x$  方向速度  $u$  だけを表面に与えて表面速度  $u_s = 5, 15, 25 \text{ m/s}$  の 3 つの条件について調べた。表面速度を与えた位置は後ろ向きステップの上面の  $6 \text{ mm} \leq x \leq 0 \text{ mm}$  である。また、菊地ら<sup>9)</sup>の実験条件と同じくアクチュエータを 50 Hz で間欠駆動し、デューティ比は 20% とした。

### 3. 結果および考察

アクチュエータの非駆動時と駆動時の結果を比較し、プラズマアクチュエータによる誘起流が後ろ向きステップ流れに与えた影響について調べる。

図 2 は  $z = 21 \text{ mm}$ ,  $t = 1 \text{ s}$  のときの速度  $u$  を示す。アクチュエータの非駆動時の場合は表面速度を与えないが、駆動時には表面に  $u_s = 25 \text{ m/s}$  の速度を与えている。アクチュエータの非駆動時の結果に注目すると、主流がコアンダ効果によって下向きに流れ、ステップの後ろの領域では低速になる。アクチュエータの駆動時では低速になる領域の下流端がアクチュエータの非駆動時より上流側に移動していることがわかる。

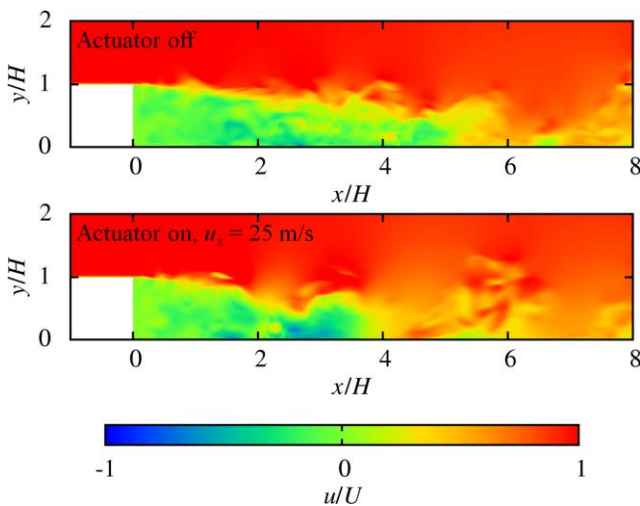


Fig. 2 Colormap for the streamwise velocity at  $z = 21 \text{ mm}$  and  $t = 1 \text{ s}$ .

図 3 は  $y = 0 \text{ mm}$ ,  $z = 21 \text{ mm}$  の壁面位置における  $0 \text{ s} \leq t \leq 1 \text{ s}$  の間の時間平均した圧力係数  $C_p$  を示す。全ての条件において、ステップから下流に向かって圧力係数  $C_p$  を見ていくと最初その値が下がり最小値となり、その後、上昇し最大値となったあと徐々に下がる。表面速度が  $u_s = 5 \text{ m/s}$  のときの圧力係数  $C_p$  はアクチュエータの非駆動時とほぼ変わらないが、表面速度が  $u_s = 15, 25 \text{ m/s}$  となりより強い誘起流を導入すると、 $C_p$  の値の変化位置がアクチュエータの非駆動時と比べて全体的に上流側に移動していることがわかる。この結果はプラズマアクチュエータによる誘起流によって、後ろ向きステップ流れの再付着がより上流で起こることを示す。しかし、2 つの表面速度  $u_s = 15, 25 \text{ m/s}$  の条件では  $C_p$  の値において違いがほぼないことから、後ろ向きステップ流れの制御に対して、プラズマアクチュエータによる誘起流の強さがある一定以上になると、その制御効果は大きくならずほぼ一定になることを意味する。

### 4. 結論

50 Hz の間欠駆動のデューティ比 20% の条件下でプラズマアクチュエータによる誘起流の強さが後ろ向きステップ流れに及ぼす影響について数値シミュレーションを行った。

アクチュエータによる誘起流を導入することで、後ろ向きステップ流れの再付着がより上流側で起こることが確認された。しか

し、誘起流の強さをより強く変化しても再付着が起こる位置にはほぼ変化がなかったことから、誘起流がある一定以上に強くなっても、後ろ向きステップ流れの制御効果は大きくならないことを意味する。

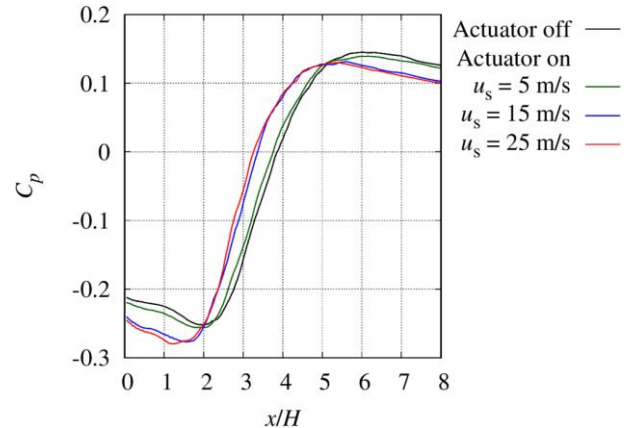


Fig. 3 Time averaged pressure coefficient for  $0 \text{ s} \leq t \leq 1 \text{ s}$  and at  $y = 0 \text{ mm}$  and  $z = 21 \text{ mm}$ .

### 参考文献

- (1) Corke, T., Jumper, E., Post, M., Orlov, D. and McLaughlin, T., "Application of weakly-ionized plasma as wing flow-control devices," AIAA, 2002-0350 (2002).
- (2) Anderson, R. and Roy, S., "Preliminary experiments of barrier discharge plasma actuators using dry and humid air," AIAA, 2006-369 (2006).
- (3) 井上薫, 中吉嗣, 深淵康二, 小尾晋之介, "プラズマアクチュエータによる三次元攪乱を用いた円柱周りの流れの制御," 日本流体学会年会 講演論文集 (2009), pp.350-350.
- (4) 山田俊輔, 柴田浩意, 石川仁, 瀬川武彦, "プラズマアクチュエータによる円柱流れの制御に関する研究 (第 1 報, 後流における時間平均特性)," 日本機械学会論文集 B 編, Vol.76, No.772 (2010), pp.2011-2017.
- (5) 山田俊輔, 石川仁, 瀬川武彦, "プラズマアクチュエータによる円柱流れの制御に関する研究 (第 2 報, 流構造の流れの可視化)," 日本機械学会論文集 B 編, Vol.78, No.788 (2012), pp.734-744.
- (6) Jukes, T. N. and Choi, K.-S., "Flow control around a circular cylinder using pulsed dielectric barrier discharge surface plasma," Physics of Fluids, Vol. 21 (2009a), 084103.
- (7) Jukes, T. N. and Choi, K.-S., "Control of unsteady flow separation over a circular cylinder using dielectric-barrier-discharge surface plasma," Physics of Fluids, Vol. 21 (2009b), 094106.
- (8) 佐野正利, 須藤輝美, 遠藤慶亮, 杉山勇氣, 鈴木 進, "プラズマアクチュエータによる後ろ向きステップ流れの損失低減," 日本機械学会論文集 B 編, Vol.78, No.785 (2012), pp.49-59.
- (9) 菊地 聡, 小里 泰章, 李 根燮, 今尾 茂樹, "DBD プラズマアクチュエータによる後ろ向きステップ流れの制御 (バースト駆動周波数とデューティ比の影響)," 日本機械学会論文集, Vol.84, No.865 (2018), pp.1-13.
- (10) 李 根燮, 菊地 聡, 今尾 茂樹, "DBD プラズマアクチュエータによる流れの表面速度モデル," 日本機械学会論文集, Vol.85, No.869 (2019), pp.1-14.