

## DBD プラズマアクチュエータによる誘起流の 表面速度モデルと化学反応モデルの比較

### Comparison between the surface velocity model and the chemical reaction model of the induced flow by a DBD plasma actuator.

- 長谷 泰孝, 岐阜大院, 岐阜市柳戸 1-1, y4526058@edu.gifu-u.ac.jp:  
李 根燮, 岐阜大, 岐阜市柳戸 1-1, keunseob@gifu-u.ac.jp:  
菊地 聡, 岐阜大, 岐阜市柳戸 1-1, kikuchi@gifu-u.ac.jp:  
今尾 茂樹, 岐阜大, 岐阜市柳戸 1-1, imao@gifu-u.ac.jp:  
HASE Yasutaka, Gifu Graduate School, 1-1 Yanagido Gifu  
LEE Keunseob, Gifu University, 1-1 Yanagido Gifu  
KIKUCHI Satoshi, Gifu University, 1-1 Yanagido Gifu  
IMAO Shigeki, Gifu University, 1-1 Yanagido Gifu

Plasma actuator is one of the fluid control methods. In order to perform numerical calculation for the plasma actuator, a chemical reaction model was considered, which takes into account chemical reaction between charged particles in the discharge region and the neutrons of the surrounding gas. In this study, a surface velocity model that only gives velocity to the wall of the coated electrode was checked the model's validity by comparing with the chemical reaction model. As a result, the surface velocity model showed that a firstly generated vortex was collapsed by the small vortices, which was also shown in the result of the chemical reaction model.

#### 1. 緒言

物体周りを流体が流れる際、層流状態から乱流状態に変化すると物体にかかる摩擦抵抗は10倍ほど大きくなる。また、流れの方向や速度など、特性に変化が生じるため、目的に応じて流れの制御が必要となる。その気体の流れの制御法として、DBD プラズマアクチュエータを用いる方法が挙げられる。DBD プラズマアクチュエータは、数値計算においても研究が進められている。現在、主に使用されている Suzen<sup>(1)</sup>が提案した数値モデルは、放電領域内の粒子の運動量の合成までは考慮していない。そこで、運動量の合成まで考慮した化学反応モデル<sup>(2-5)</sup>がある。このモデルは、放電による放電領域内の荷電粒子、および周囲のガスの中性子分子との運動量の合成が起り、放電プラズマ粒子から中性分子への運動量の伝達が体積力を発生させ、周囲のガスに流れを与えるモデルが提案されている。また、物体表面に速度を与え、簡易的に誘起流を模擬する表面速度モデルが提案されている。

本研究ではより簡単にプラズマアクチュエータによる誘起流を模擬できる表面速度モデルと最も実験に近い化学反応モデルと比較を行うことで、その妥当性に調べる。

#### 2. 数値計算方法および計算条件

本研究の数値解法は、3次元連続の式と3次元非圧縮性ナビエーストックス方程式を有限差分法により解いた。移流項は3次精度風上差分法を用い、残りの項は2次精度中心差分を用いた。また、MAC法を用い、時間発展には2次精度Crank-Nicolsonの半陰解法を用いた。

##### 2.1 プラズマアクチュエータの数値モデル

化学反応モデルは、プラズマアクチュエータを駆動した際の放電によって引き起こされる、放電領域内の荷電粒子と周囲のガスの中性子との間における運動量の合成を考慮したモデルである。このモデルにおいて、放電プラズマ粒子から中性分子への運動伝達によって体積力が発生し、流れを周囲に与える。また、今回比較を行う化学反応モデルでは、プラズマ粒子に電子、1種類の陽イオン、1種類の陰イオンを考慮した単純な数値モデルである。ただ

し、空気の詳細なプラズマ化学は考慮せず、電子衝撃イオン化、付着、再結合を含む基本的なプラズマ化学を用いている。

表面速度モデルは、プラズマアクチュエータの被覆電極および露出電極上表面に速度を与えることで誘起流を模擬することが可能なモデルである。「表面速度モデルの結果と実際のプラズマアクチュエータによる誘起流<sup>(6)</sup>を比較したところ、よく一致しているという結果<sup>(6)</sup>が得られている。

##### 2.2 計算領域および計算条件

計算は有次元で行い、流体の密度は $1.176\text{kg/m}^3$ 、動粘度は $1.583 \times 10^{-5} \text{m}^2/\text{s}$ の値を用いた。

座標系は誘起流の発生方向をx軸とし、垂直方向をy軸、奥行き方向をz軸とした。格子数は $386 \times 152 \times 73$ であり、格子間隔は $\Delta x$ と $\Delta z$ は $60 \mu\text{m}$ の等間隔格子、 $\Delta y$ については初項 $3 \times 10^{-5}$ 、公比1.02の等比数列によってメッシュを切る。このため、計算領域は $-7.98 \text{mm} \leq x \leq 15.12 \text{mm}$ ,  $0 \text{mm} \leq y \leq 28.33 \text{mm}$ ,  $0 \text{mm} \leq z \leq 42.6 \text{mm}$ とした。また、時間間隔 $\Delta t$ は $10^{-7}\text{s}$ とした。また、 $y=0\text{mm}$ , および $z=0\text{mm}$ に平板があるものとした。

表面速度モデルの計算条件を図1(a), (b)に示す。今回、x軸の原点は表面速度を与え始める位置を $x=0$ 、y方向では壁面上を $y=0$ とし、z方向では壁面上を $z=0$ とする。この時、 $0 \text{mm} \leq x \leq 1.98 \text{mm}$ および $0 \text{mm} \leq z \leq 4.26 \text{mm}$ で表面速度を与える。この時、表面速度をx方向速度 $u$ は $20 \text{m/s}$ を与え、z方向速度 $w$ については $-30 \sim 30 \text{m/s}$ を乱数によって決定し、主流速度は全方向で $0\text{m/s}$ を与える。この領域を図1において青い領域で示している。また、 $x=0\text{mm}$ の位置に $0.06\text{mm}$ 四方のbumpを等間隔に4つ設置した。今回、用いた化学反応モデルで設置されているため、設置している。

圧力の境界条件は、全ての境界で微分値ゼロのノイマン条件とし、速度の境界条件は、平板表面においては表面速度を与える位置以外は0とし、 $x=-7.98\text{mm}$   $z=42.6\text{mm}$ では速度0を与える。また、 $z=0\text{mm}$ ,  $z=42.6\text{mm}$ については周期境界条件を使用し、その他の計算領域外縁ではノイマン条件を用いた。

### 3. 実験結果および考察

静止流体中における誘起流について、表面速度モデルと化学反応モデルを比較する。化学反応モデルの誘起流は Nishida ら<sup>2)</sup>の計算結果を用いた。

図 2 は、表面速度モデルの上記の条件で壁面の表面に速度を与えた時の時間を  $t=0$  ms とした際の  $t=0.2$  ms,  $t=0.9$  ms,  $t=3.5$  ms における誘起流を表している。また、可視化は速度勾配テンソルの第 2 不変量である Q 値を  $10^6$  とした。

$t=0.2$  ms のとき、 $x=0$  でポンプによる影響がみられ、表面速度を与えている部分に強い速度勾配テンソルの第 2 不変量が存在する。 $x=2$  付近では渦が巻く。 $t=0.9$  ms のときは渦が大きくなり、その周辺には小さな渦が生成される。 $t=3.5$  ms のときには小さい渦が多数生成され、最初に巻いた渦とともに崩壊する。

最初に巻いた渦が周辺に生成された小さな渦によって崩壊し始めるという過程は化学反応式を用いたモデルの結果と一致する。

### 4. 結言

本研究では、プラズマアクチュエータによる誘起流の数値モデルである、既存の化学反応モデルと表面速度モデルの結果を比較し、数値モデルの妥当性について調べた。

表面速度モデルを使用し誘起流を模擬した結果、化学反応モデルで見られた渦の崩壊の過程が一致した。

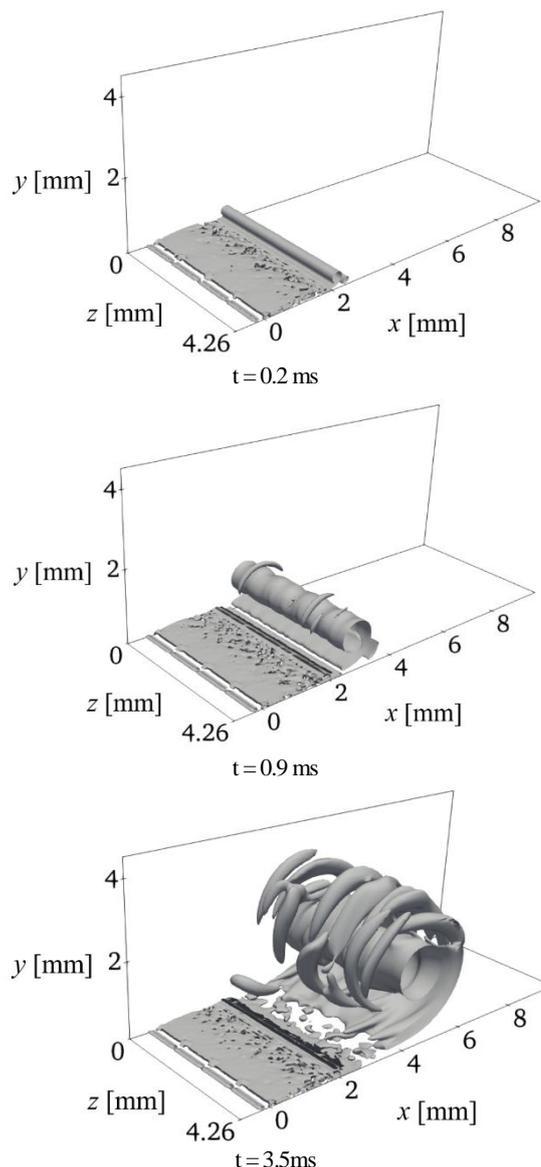
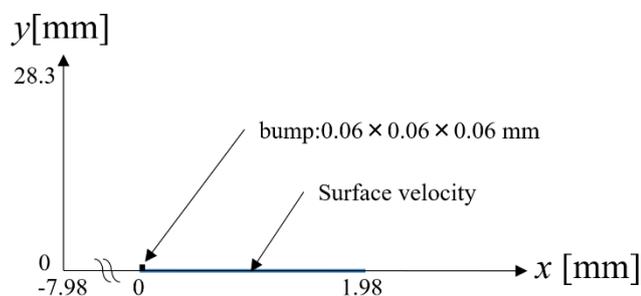
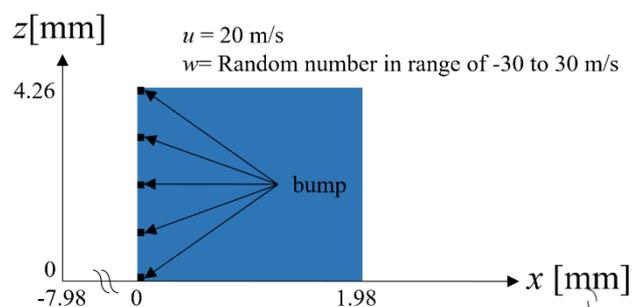


Fig. 2 The result of the surface velocity model



(a)



(b)

Fig. 1 Simulation settings of the surface velocity model for (a) a side view and (b) a top view

### 参考文献

- (1) Suzen, Y.B. Huang, P.G. Jacob, J.D. ; "Numerical Simulations of Plasma Based Flow Control Applications," Fluid Dynamics Conference and Exhibit., 35 (2015)
- (2) Nishida, H. and Nonomura, T. and Abe, T., "Numerical Study of Plasma Dynamics and Electrohydrodynamic Effect in DBD Plasma Actuator," International Journal of Plasma Environmental Science & Technology, 10 (20016)
- (3) Boeuf, J.P. and Pitchford, L.P. "Electrohydrodynamic force and aerodynamic flow acceleration in surface dielectric barrier discharge," JOURNAL OF APPLIED PHYSICS 97, 103307(2005)
- (4) JBoeuf, J.P. Lagmich, Y. Unfer, Th. Callegari, Th. and Pitchford, L.C. "Electrohydrodynamic force in dielectric barrier discharge plasma actuators," Journal of Physics D: Applied Physics, 40, 652 (2007).
- (5) Lagmich, Y. Callegari, Th. Pitchford, L.C. and Boeuf, P. "Model description of surface dielectric barrier discharges for flow control," Journal of Physics D: Applied Physics, 41, 095205 (2008).
- (6) Jukes, T. N. and Choi, K.-S., "Flow control around a circular cylinder using pulsed dielectric barrier discharge surface plasma," Physics of

Fluids, 21 (2009a), 084103.

- (7) Bal Krishan Mishra, Panigrahi P.K. , "Formation and characterization of the vortices generated by a DBD plasma actuator in burst mode," PHYSICS OF FLUIDS 29, 024104 (2017)
- (8) 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, (2018)