S052021

誘電体バリア放電と誘起流れのハイブリッドシミュレーション

大西 直文, 杉本 和弥, 高橋 聖幸

Hybrid Simulation of Dielectric Barrier Discharge and Induced Flow

Naofumi OHNISHI, Kazuya SUGIMOTO, and Masayuki TAKAHASHI

Dept. of Aerospace Engineering, Tohoku University
6-6-01 Aramaki-Aza-Aoba, Aoba-ku, Sendai 980-8579, Japan

Modeling of minute plasma formation is of great importance around electrodes of a plasma actuator (PA) utilizing dielectric barrier discharge (DBD) with a relatively low computational cost. Although electrons need some distance to acquire sufficient energy causing impact ionization, such a transient phenomenon cannot be described in a conventional fluid model because of local field approximation. In order to simulate appropriate discharge process in the DBD-PA, a hybrid code coupling with a particle model was constructed, which treats high-density region as the fluid model but high electric field region as the particle model. The hybrid simulation reproduced spreading of the high-density region from the exposed electrode for the positively biased case as well as the full-particle simulation.

Key Words : Plasma Actuator, Dielectric Barrier Discharge, Hybrid Simulation

1. 緒 言

プラズマを利用した可動部を持たない流体制御装置としてプラズマアクチュエータが注目されている⁽¹⁾. 既存の流体制御デバイスと比較したプラズマアクチュエータの利点としては, そのシンプルな構造や, 応答性の良さ, さらに利用エネルギーの少なさが挙げられる. 現在最も研究されている誘電体バリア放電 (dielectric barrier discharge: DBD) を用いたプラズマアクチュエータは, 2 枚の電極と誘電体で構成されたシンプルで軽量のデバイスである. 電極の 1 枚は気流に対して露出しており, もう 1 枚は誘電体により被覆されている. 2 枚の電極間に交流電圧を印加すると, 電子は電場により加速され周囲の中性粒子と衝突を繰り返す. そのうち電離衝突で生成されたイオンはさらに中性粒子と衝突し, 運動量を輸送することで, 流れ場が誘起される.

DBD プラズマアクチュエータについては実用化に向けた研究以外に, その放電の基礎過程についても, これまで実験と数値計算の両面から研究が行われている⁽²⁾⁻⁽⁵⁾. 放電過程を解析するためには, 実験で見られているようなパルス電流が生じる時間と同じオーダーであるマイクロ秒オーダーの計算が必要となる. 粒子モデルによる計算は詳細な放電過程の再現を可能にするが⁽³⁾, 計算コストが高く, マイクロ秒オーダーの解析を行うことは難しい. 一方で, より長時間の計算を行うために計算コストの低い流体モデルが用いられ, ストリーマ放電や推力生成のメカニズムについて調べられている.⁽⁴⁾⁽⁵⁾ しかし, 流体モデルでは移動度や電離周波数などのパラメータを局所的な電場強度のみによって決定する局所電界近似を用いているため, 電子の加速過程が重要となる電離面近傍では現実的な解析を行えない可能性がある. また, 光電離を考慮しないとストリーマ放電の様子が実験と一致しないという報告もあり⁽⁶⁾, 放電過程の数値的再現には改良の余地がある.

そこで本研究では, 電離面近傍を適切に表現しつつ, マイクロ秒オーダーの比較的長時間に渡る現象の解析を目指し, 光電離を含めた粒子モデルと流体モデルのハイブリッドモデルの構築を試みたので, それを報告する.

2. 数 値 計 算 法

2.1 粒子モデル

粒子モデルにおいては, 荷電粒子と電場の相互作用は Particle-In-Cell (PIC) 法⁽⁷⁾を用いて評価し, その上で Monte Carlo Collision (MCC) 法⁽⁸⁾を用いて粒子間衝突による化学反応や運動量輸送を再現する.

東北大学大学院工学研究科航空宇宙工学専攻 (〒 980-8579 仙台市青葉区荒巻字青葉 6-6-01)
Email: ohnishi@rhd.mech.tohoku.ac.jp

本研究で用いた PIC 法の基礎方程式は粒子の運動方程式と静電ポテンシャルに対する Poisson 方程式である。Poisson 方程式の解として得られる電場に従って粒子の運動方程式を解き、その位置を追跡する。PIC 法では現実の荷電粒子を代表する計算セル程度の大きさを持った超粒子を考え、空間格子点上に weighting と呼ばれる手法を用いて電荷を配分する。そして各超粒子の運動を更新する際には、その隣接する格子点上の電場を超粒子位置に内挿し、それを用いて運動方程式を解く。2 次元の Poisson 方程式を中心差分で表現すると対称な係数行列を持つ線形システム方程式に帰着するが、この計算時間をできるだけ短縮するためにパラレル・ブロック・オーダリング法を用いて ICCG 法の並列化を行い、計算時間の短縮を図った⁽⁹⁾。

荷電粒子と中性粒子の相互作用を考慮するためには、分子間の衝突過程を評価する必要がある。衝突を含んだ分子運動の基礎方程式は Boltzmann 方程式であり、この数値解法として MCC 法は広く知られている。MCC 法では多数のサンプル粒子を用い、粒子間衝突を確率的に評価することで流れ場の時間発展を解く。本研究では、N₂ 80% と O₂ 20% の混合気体を扱うものとし、これらの衝突過程として以下を考慮した。

式 (1), (5), (8), (9), (10) は弾性衝突、式 (2), (6) は電離反応、式 (3) は励起反応、式 (4) は電荷交換反応、式 (7) は付着反応である。窒素に関する衝突断面積の値は Phelps⁽¹⁰⁾ のデータと Halas ら⁽¹¹⁾ のデータを用い、酸素に関する衝突断面積の値は Itikawa⁽¹²⁾ のデータを用いた。また、断面積モデルは Hard Sphere (HS) モデル⁽⁸⁾ とした。

2.2 流体モデル

流体モデルの基礎方程式は荷電粒子の密度関数に対する連続の式と静電ポテンシャルに対する Poisson 方程式である。また、粒子モデルと同様に窒素と酸素を考慮した反応も同時に評価する。空間における電離は電子と中性粒子の衝突でのみ起こるものと仮定し、電離周波数 ν は $\nu = \alpha |v_e|$ とする。ここで、 α は電離係数であり、 v_e は電子の平均速度を表している。これらの値と移動度 μ はフリーソフトである bolsig+⁽¹³⁾ に収められているデータから算出した。連続の式に用いる拡散係数 D は、低温プラズマにおける標準的な電子とイオンの温度に基づいたアインシュタインの関係式: $D_e/\mu_e = 1 \text{ V}$, $D_i/\mu_i = 0.01 \text{ V}$ から求め、再結合係数 γ は過去の論文より $1 \times 10^{-13} \text{ m}^{-3} \text{ s}^{-1}$ とした⁽⁵⁾。

Poisson 方程式については粒子モデルと同様に扱う。連続の式に含まれる移流項は二次精度 MUSCL 法⁽¹⁴⁾ で高次精度化した風上法によって評価し、拡散項は二次精度中心差分により離散化した。

2.3 光電離の導入

誘電バリア放電でストリーマを伴う場合、ストリーマの進展に要する時間ではイオンによる 2 次電子放出はほとんど起こらない。このような場合、光電離による電子供給が重要となる⁽¹⁵⁾。そこで本研究では、Zheleznyak らが提案したモデル⁽¹⁶⁾を用いて光電離過程の導入を行った。導入したモデルでは、ある点における光電離レートを 3 つの成分の線形和として近似し、それぞれの成分に対する Helmholtz 方程式を解くことによって評価する。Helmholtz 方程式は楕円型の偏微分方程式なので Poisson 方程式と同様に解くことができる。算出した電離レートに従い、粒子モデルでは新たに電子を生成し、流体モデルでは連続の式のソース項を評価する。

2.4 ハイブリッドモデルの概要

ハイブリッドシミュレーションでは粒子・流体の両モデルの領域間にモデルインターフェイスを設け⁽¹⁷⁾, その位置はプラズマ密度を指標として決定する. また, 粒子と流体の両モデル間の相互作用を考慮する領域が必要である. この領域をバッファ領域とし, 両モデルの間に 2, 3 セル程度設ける. この領域では粒子モデルから流体モデルへ流入する粒子数をカウントし, この粒子流束を流体モデルの境界条件として用いる.

前述のように, 通常の流体モデルではプラズマの移動度や電離周波数は bolsig+ の値を用いている. しかし, ハイブリッドシミュレーションを行う際はこれらの値を粒子モデルから算出されるものと一致させなければ, モデル間での不整合が生じてしまう. そこで, 移動度や電離周波数は平行平板間に一定電圧を印加した粒子シミュレーション結果から算出し, 電場強度の値で整理した上で, 流体領域に適用した.

3. 結果と考察

ここでは紙面の都合上, プラズマアクチュエータを模擬した電極間の 2 次元ハイブリッドシミュレーションの結果のみを示す. $2\text{ mm} \times 2\text{ mm}$ の空間に, 長さ 0.25 mm , 厚さ 0.5 mm の露出電極, 長さ 1.5 mm , 厚さ 0.1 mm の被覆電極, 厚さ 0.5 mm の誘電体を配置し, 600×600 個の計算セルを用いて計算を行った. ただし, $t = 2.0\text{ ns}$ までは粒子モデルのみで計算を行い, その後ハイブリッドシミュレーションに移行した. また, 正イオンの数密度が 10^{19} m^{-3} 以上かつ電場強度が $5 \times 10^6\text{ V/m}$ 以下の領域を流体モデルで扱った.

露出電極を被覆電極に対し $+2000\text{ V}$ で一定にバイアスした際の, $t = 4.0\text{ ns}$ における電子数密度と電場強度分布を Fig. 1 に示す. Fig. 1(a) より高電子数密度領域がストリーマ状に広がっていく様子が確認できる. また Fig. 1(b) より高電場領域が誘電体表面付近で形成され, ストリーマ状の高密度領域とともに移動していることがわかる. このとき, 誘電体表面に沿ってストリーマが進展していくのは, 表面近傍で光電離による種電子が生成されることに起因する. これらの結果は粒子モデルのみの計算結果と定性的に良い一致を示している.

次に, Fig. 1(a) の $y = 0.67\text{ mm}$ における断面の電子の数密度を Fig. 2(a) に示す. また参考のために, ハイブリッドシミュレーションに移行する直前の $t = 2.0\text{ ns}$ における電子数密度を Fig. 2(b) に示す. Fig. 2(a) の高密度領域は流体モデルで扱っているため, Fig. 2(b) に比べ値が安定していることがわかる. 得られた電子数密度分布は, 粒子モデルのみの計算の延長として自然な値を算出していると考えられ, 構築したモデルは妥当であると考えられる.

4. 結 言

本研究ではプラズマアクチュエータ内の流れ場を適切に再現するために, PIC-MCC 法を用いた粒子モデルと移流拡散方程式を基にした流体モデルの構築を行った. また, 両モデルを組合わせたハイブリッドモデルを構築した. ハイブリッドモデルを用いた計算では移動度や電離周波数などのパラメータを粒子モデルから算出することで, 粒子モデルのみの計算結果に近付けた. 実際にハイブリッドモデルを用いてシミュレーションを

Fig. 1 (a) Electron number density and (b) electric field strength at $t = 4.0\text{ ns}$.

Fig. 2 Electron number density along a line of $y = 0.67$ mm for (a) hybrid model ($t = 4.0$ ns) and (b) particle model ($t = 2.0$ ns).

行った結果, 正の一定バイアス下ではストリーマ状の放電が見られ, 粒子モデルを用いた計算と定性的に一致することを示した。また, 高密度領域における数密度の大きさも粒子モデルからの自然な延長として得られたため, 流体モデルへの移行が無理なく行われていることが確認できた。

文 献

- (1) 例えば T. C. Corke and M. L. Post, "Overview of Plasma Flow Control: Concepts, Optimization, and Applications," AIAA Paper 2005-563 (2005).
- (2) T. Abe, Y. Takizawa, and S. Sato, "A Parametric Experimental Study for Momentum Transfer by Plasma Actuator," AIAA Paper 2007-187 (2007).
- (3) G. I. Font and W. L. Morgan, "Plasma Discharge in Atmospheric Pressure Oxygen for Boundary Layer Separation Control," AIAA Paper 2005-4632 (2005).
- (4) J. P. Boeuf, Y. Lagmich, Th. Unfer, Th. Callegari, and L. C. Pitchford, "Electrohydrodynamic Force in Dielectric Barrier Discharge Plasma Actuator," *Journal of Physics D*, Vol. 40 (2007), pp. 652–662.
- (5) H. Nishida, T. Nomura, and T. Abe, "Numerical Analysis on Three-Dimensional Body Force Field of DBD Plasma Actuator," AIAA Paper 2012-3092 (2012).
- (6) A. V. Likhanskii, V. V. Semak, M. N. Shneider, D. F. Opaitis, R. B. Miles, and S. O. Macheret, "The Role of the Photoionization in the Numerical Modeling of the DBD Plasma Actuator," AIAA Paper 2009-841 (2009).
- (7) C. K. Birdsall and A. B. Langdon, *Plasma Physics via Computer Simulation*, Institute of Physics Publishing, London (2004).
- (8) G. A. Bird, *Molecular Gas Dynamics and the Direct Simulation of Gas Flows*, Oxford Science Publications, New York (2003).
- (9) <http://accr.riken.jp/HPC/training.html>.
- (10) A. V. Phelps, "Cross Sections and Swarm Coefficients for Nitrogen Ions and Neutrals in N_2 and Argon Ions and Neutrals in Ar for Energies from 0.1 eV to 10 keV," *Journal of Physical and Chemical Reference Data*, Vol. 2 (1991), pp. 557–573.
- (11) S. T. Halas and B. Adamczyk, "Cross Sections for the Production of N_2^+ , N^+ , and N_2^{2+} from Nitrogen by Electrons in the Energy Range 16–600 eV," *International Journal of Mass Spectrometry and Ion Physics*, Vol. 10 (1972), pp. 157–160.
- (12) Y. Itikawa, "Cross Sections for Electron Collisions with Oxygen Molecules," *Journal of Physical and Chemical Reference Data*, Vol. 38 (2009), pp. 1–20.
- (13) <http://www.siglo-kinema.com/bolsig.htm>.
- (14) B. van Leer, "Toward the Ultimate Conservative Difference Scheme. 4, A New Approach to Numerical Convection," *Journal of Computational Physics*, Vol. 23 (1977), pp. 276–299.
- (15) N. Liu and V. P. Pasko, "Effect of Photoionization on Propagation and Branching of Positive and Negative Streamer in Sprites," *Journal of Geophysical Research*, Vol. 109 (2004), pp. A04301-1–A04301-17.
- (16) M. B. Zheleznyak, A. K. Mnatsakanyan, and S. V. Sizykh, "Photoionization of Nitrogen and Oxygen Mixtures by Radiation from a Gas Discharge," *High Temperature*, Vol. 20 (1982), pp. 357–362.
- (17) C. Li, U. Ebert, and W. Hundsdorfer, "Spatially Hybrid Computations for Streamer Discharges with Generic Features of Pulled Fronts: I. Planar Fronts," *Journal of Computational Physics*, Vol. 229 (2010), pp. 200–220.