

ストリーマ放電及び活性種生成の3次元シミュレーション

Three-Dimensional Simulation of Streamer Discharge and Production of Chemically Active Species

磯島 知也*・渡辺 庸一・上田 憲明・柴田 一美

ISOSHIMA, Tomoya*, WATANABE, Yoichi, UEDA, Noriaki, SHIBATA, Kazumi

株式会社ウェーブフロント 〒220-6112 横浜市西区みなとみらい2丁目3番3号 クイーンズタワーB12階

Wave Front Co., Ltd., Queen's Tower B12, 2-3-3, Minatomirai, Nishi-Ku, Yokohama City, 220-6112, Japan

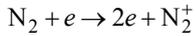
1. 緒言

スパークプラグによる火花着火は内燃機関で広く用いられている。ストリーマ放電は、火花着火の初期段階と考えられているが、それだけではなく、非熱平衡プラズマとしての特性を生かした新しい点火技術としても研究されている[1]。活性化学種の生成を含めた、ストリーマのシミュレーションを行うことは、点火機構の開発に資すると思われる。

本研究では、新規開発したプラズマ解析ソフトウェアを用いて、大気圧での電極間ストリーマ放電、およびそれに伴い生成される活性化学種の分布の解析を行った。軸対称形状の解析で従来の研究[2]との比較を行うと共に、3次元形状の解析で、電極形状に応じてストリーマの進行状況が変化することを示す。

2. モデル

解析対象とするのは、陽極から陰極へと進行するストリーマである。1気圧の窒素を想定し、電離については衝突電離 (α 作用) と、ストリーマ理論で重視される光電離とを想定する。衝突電離



の係数 α (cm^{-1})には、文献[2]と同じ

$$\alpha = N \times 1.61 \times 10^{-16} \exp(-735/E')$$

を用いる。ただし N は中性気体の密度 (cm^{-3})、 E' は換算電界 (Td) である。光電離は、同じく文献[2]に従い、窒素 99.5%、酸素 0.5% の混合気体を想定して計算する。光電離レート S を求めるために、発光点 (r_1) と受光点 (r) との関係を考えて空間積分

$$S(r) = \frac{1}{4\pi} \int dr_1 \frac{q(r_1)}{|r - r_1|^2} f(|r - r_1|)$$

を行う。関数 q および f の定義は文献[2]と同じで、それぞれ発光強度と、酸素分子による吸光を表す。文献[2]ではこの右辺の積分を大幅に単純化しているが、当ソフトウェアでは、任意形状でのシミュレーションを可能にするため、この空間分布を考慮した積分をそのまま行った。

さて、これらの電離によって、電子密度とイオン密度が局部的に増大するが、生成した電子が電場に従って移動するため、電荷密度が変化する。この電子の移動は、モビリティ μ と拡散係数 D によって扱う。つまり、電子密度 n_e のフラックス Γ を計算する際、

$$\Gamma = -D\nabla n_e - \mu n_e E$$

とする。イオンの運動は電子と比べて遅いため、電子とイオンの密度分布 ($n_e, n_{N_2^+}$) の違いによって、電場が生まれる。プログラム中では、ポアソン方程式

$$-\epsilon \nabla^2 \phi = -en_e + en_{N_2^+}$$

を解き、電位 ϕ を求めることで、電場 $E = -\nabla \phi$ を得ている。

3. 軸対称形状での計算

こうして得た、衝突電離レート、電子密度、換算電場を Fig. 1 に示す。陽極、陰極はいずれも平板 (右側が陽極) で、それらの間隔 5 mm に、25 kV の電位差を与え、陽極表面にピーク密度 $1 \times 10^{20} 1/m^3$ の電子及び N_2^+ の初期分布を与えて計算したものである。電極面に垂直な方向を対称軸とした軸対称形状での計算で、図の横軸が、陽極からの距離、縦軸が半径である。電子密度分布 (Fig. 1(b)) の先頭近く

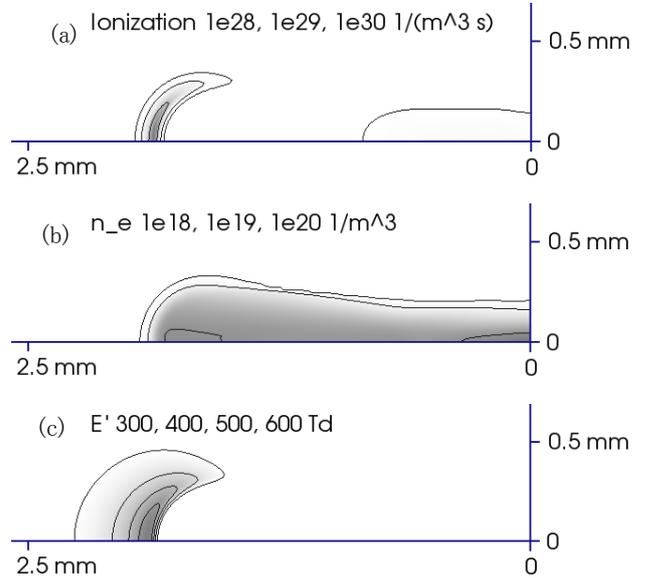


Fig. 1 Contour plots of (a) ionization ratio, (b) electron density, and (c) Electric field at $t=2.5$ ns. Values on the contour lines are shown in the title of each plot.

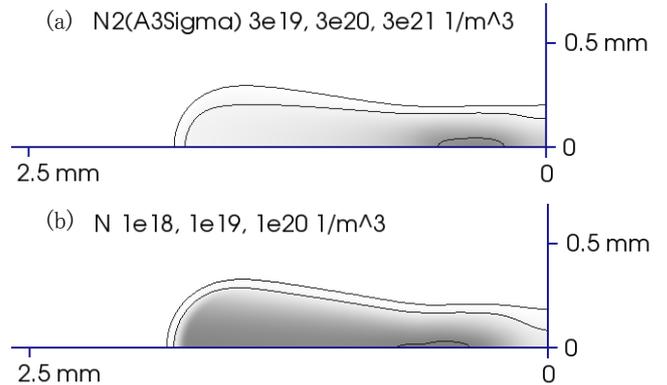
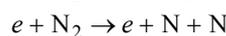
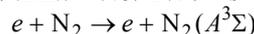


Fig. 2 Number densities of chemically active species (a) $N_2(A^3\Sigma)$ and (b) N . Values on the contour lines are shown in the title of each figure. Assuming that generated species does not move nor react, we integrated each generation ratio until $t = 2.5$ ns.

で電場強度が強くなり (Fig. 1(c)), それによってイオン化が局部的に起こっている (Fig. 1(a)) ことが判る。

4. 活性化学種の生成

このようにして得られた電子密度および電場の分布を使って、活性化学種生成の計算を行う。反応は



の2つとした。文献[3]の計算方法に従い、反応レートは、電子密度、 N_2 の密度 (単位 m^{-3})、および反応レート定数 K_1, K_2 (単位 m^3/s)

$$K_1 = 1 \times 10^{-14} \cdot \exp(-336/E'),$$

$$K_2 = 6.3 \times 10^{-15} \cdot \exp(-949/E')$$

の積とする。ここで、定数には、文献[3]の値を用いた。生成した化学種が、ここで考えている ns 程度の時間内では反応や移動をしないと仮定して、積算した生成量を Fig. 2 に示す。

5. 文献値との比較

Fig. 3 に、ストリーマ長さの時間変化を示す。ただし、ストリーマ先頭を、電場のピーク位置とした。軸対称計算 (図中 axisymmetric) と文献[2]の値(図中 literature)とは、良く一致している。

6. 電位差

ストリーマの進展速度は、電極間の電位差によって異なることが期待される。軸対称の計算について、陽極と陰極との電位差を 50 kV および 15 kV に変更した場合のシミュレーション結果を、Fig. 4 に示す。15 kV の場合には、ストリーマの進展は見られない。

7. 3次元形状でのシミュレーション

当ソフトウェアは、3次元形状での計算に対応している。上述のシミュレーションと同一設定の計算を3次元で行い、ストリーマ長さの時間変化を Fig.3 の点線で示す。ストリーマ長さ 1 mm 程度まで、軸対称計算、および文献値とよく一致している。

物性値の分布が軸対称ではない場合の例として、円柱形状の陽極から進展するストリーマの計算を Fig. 5 に示す。陽極と陰極との間隔は 5 mm、電位差は 25 kV で、Fig. 1-3 に示した解析と同じである。陽極の角の部分では電場が強くなるため、その陽極の角の一点からストリーマが発射するとして、ピーク密度 $1 \times 10^{20} 1/m^3$ の電子及び N_2^+ の初期分布を与えて計算した。ストリーマは、おおよそ、初期の電場ベクトルの方向に従って斜め方向に出発し、弧を描いて進行する (Fig. 5)。ストリーマ長さの時間変化を、Fig. 3 に一点鎖線 (cylindrical anode) で示す。電極形状の違いにより、平板の陽極ではストリーマ進行速度は、およそ 5×10^5 m/s だったものが、およそ 15×10^5 m/s へと、速くなっている。

8. 結言

陽極から陰極へのストリーマ進展を軸対称系および3次元でシミュレートできるソフトウェアを開発し、既存研究の軸対称計算と比較検証を行った。また、3次元形状の計算で、電極構造に応じた計算結果が得られることを示した。なお、ここでは陽極から陰極に進展するストリーマについて述べたが、陰極から陽極に進展する電子雪崩についても、シミュレーション可能である。

参考文献

1. T. Shiraishi, A. Kakuho, T. Urushihara, C. Cathey, T. Tang, and M. Gundersen, SAE Int. J. Engines: 1, 399 (2008)
2. A. A. Kulikovskiy, J. Phys. D: Appl. Phys. 28, 2483-2493 (1995).
3. A. A. Kulikovskiy, IEEE Trans. on Plasma Sci., 25, 439 (1997)

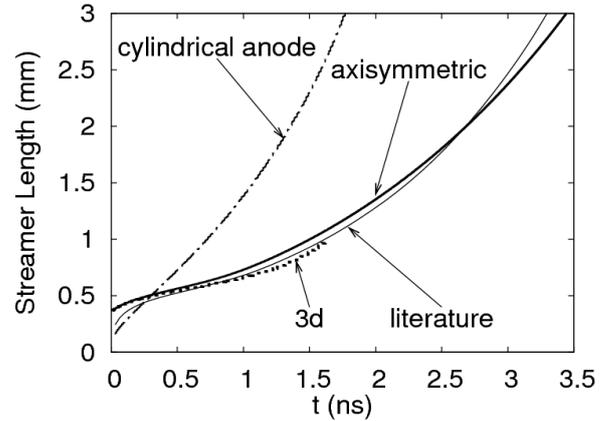


Fig. 3 The dependencies of streamer length on time. Bold solid line (axisymmetric) is the result of our axisymmetric simulation. Thin solid line (literature) is taken from Ref. [2]. Dotted line (3d) shows the result of our 3-dimensional simulation. Anode of cylindrical shape is used for the dot dashed line (cylindrical anode).

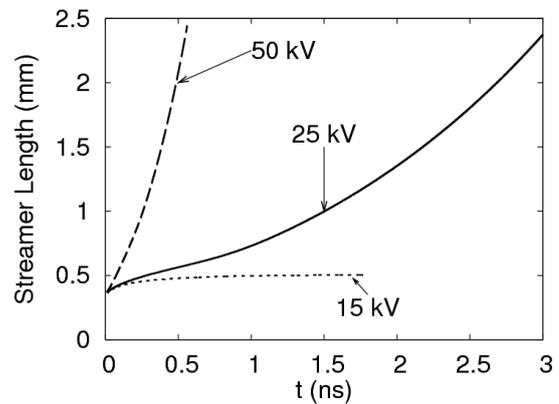


Fig. 4 The dependencies of streamer length on time. Applied voltages are 50 kV (dashed line), 25 kV (solid line), and 15 kV (dotted line).

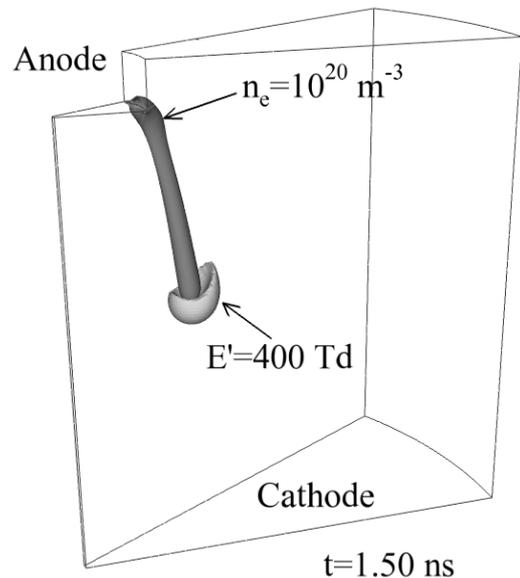


Fig. 5 A cathode-directed streamer starts from cylindrical anode. Isosurfaces of electron density and electric field are shown.