レーザーオリジナル

シミュレーションによるレーザー誘雷の研究 ー不連続プラズマからの放電開始シミュレーションー

古河 裕之*・内田 成明*・島田 義則*・安田 裕彦*・山中千代衛*
河崎善一郎**・山中 龍彦***・石窪 雄二****

(1996年3月25日 受理)

Study of Laser Triggered Lightning by Simulation ー Simulation on Start-up of Discharges from Discontinuous Plasmas ー

Hiroyuki FURUKAWA*, Shigeaki UCHIDA*, Yoshinori SHIMADA*,
Hirohiko YASUDA*, Chiyoe YAMANAKA*, Zen KAWASAKI**,
Tatsuhiko YAMANAKA*** and Yuuji ISHIKUBO****

(Received March 25, 1996)

We have developed a simulation code on the discharges from discontinuous plasmas to study laser triggered lightning theoretically. And the simulations of the discharges with 2m gap from discontinuous plasmas, of which intervals are 5mm or 10mm, are performed. The model is based on plasma approximation. The effects of distortion of external electric field by tower and the progresses of the leader are included. The speed of the progresses of the leader obtained by simulations is about $3 \times 10^6 \text{ m/s}$ which agrees with experimental results.

Key Words: Simulation, Discontinuous plasma, Plasma approximation, Leader, External electric field.

-
- * (財) レーザー技術総合研究所 (〒565 大阪府吹田市山田丘2-6)
 - ** 大阪大学工学部電気工学科、(〒565 大阪府吹田市山田丘2-1)
 - *** 大阪大学レーザー核融合研究センター (〒565 大阪府吹田市山田丘2-6)
 - **** 関西電力(株) 総合技術研究所流通設備研究室 (〒661 尼崎市若王寺3-11-20)
 - * Institute for Laser Technology (2-6 Yamada-oka, Suita, Osaka 565)
 - ** Department of Electrical Engineering, Faculty of Engineering, Osaka University (2-6 Yamada-oka, Suita, Osaka 565)
 - *** Institute of Laser Engineering, Osaka University (2-6 Yamada-oka, Suita, Osaka 565)
 - **** Electric Power Engineering Research Section, Technical Research Center, Kansai Electric Power Company, Inc. (3-11-20 Wakaoji, Amagasaki, Hyogo-ken, 661)

1. 序 章

レーザー誘雷は、誘雷塔の上にレーザーでプラズマを作り、それをトリガーにしてリーダーを進展させ、雷雲からの落雷を誘導しよう、というものである。そこで、レーザーにより生成された不連続プラズマが、電界によってどのように成長しプラズマチャンネルを作るか、を評価することが非常に重要となる。そこでプラズマ近似をもとにシミュレーションモデルを構築し、プラズマチャンネルの評価を行った。Fig. 1に本研究で用いたモデルを示す。初期に、誘雷塔の先端から図のように不連続プラズマが生成されているとしてシミュレーションを始めた。 E_0 は雲の電荷により作られる一様電界で、本研究では10kV/mと設定した。誘雷塔の先端付近では、電界集中のため非常に大きな電界強度となっている。本研究では、誘雷塔を回転楕円体と近似し、電界集中の評価を行った。プラズマ自身が作る電界は、プラズマ近似により評価した。また、初期の不連続プラズマの条件を3通り選択し、全長2 mのシミュレーションを行い、プラズマ中のリーダーの進展を評価した。

2. 基礎方程式の導出

2.1 連続の式

成分として、電子、 O_2^- 、 N_2^+ を考慮する。プラズマ近似を適用し、電子の運動周期に対して

Fig. 1 Schematic diagram of this research.

時間平均をとるものとする、 v_d をドリフト速度として電子、 O_2^- 、 N_2^+ の密度、速度に関して、

$$\bar{n}_{N_2^+} = \bar{n}_e + \bar{n}_{O_2^-}, \quad \bar{v}_{N_2^+} = \bar{v}_{N_2^-} = \bar{v}_e = v_d \quad (1)$$

と書き下せる。上線は電子の運動周期に対する時間平均を表す。 S をソースタームとすると、 O_2^- 、 N_2^+ に関して、次式が得られる¹⁾。

$$\frac{\partial \bar{n}_\alpha}{\partial t} + \text{div}(\bar{n}_\alpha v_d) = S_\alpha \quad (2)$$

ソースタームには、熱電離、電界電離、酸素分子への電子の付着、窒素陽イオンへの電子の再結合、等の効果が含まれている。

熱電離の効果は、次のサハ方程式から見積もることができる²⁾。

$$\frac{\bar{n}_{N_2^+} \bar{n}_e}{\bar{n}_{N_2}} = 2 \left(2\pi m_e T_e / h^2 \right)^{3/2} \exp(-W/T_e) \quad (3)$$

W は窒素分子のイオン化エネルギーであり、15.8eVである。 T_e はエネルギーで表わした電子の温度である。

電界電離の効果は、次のように見積もれる²⁾。

$$\frac{\partial}{\partial t} \bar{n}_{N_2^+} = A \bar{n}_{N_2} \bar{n}_e E \exp(-Bp/E) \quad (4)$$

E は電界強度、 A と B は係数、 p は圧力である。係数の値は化学便覧を参照した。

電子密度は次式で求める。

$$\bar{n}_e = \bar{n}_{N_2^+} - \bar{n}_{O_2^-} \quad (5)$$

2.2 運動方程式

電子、 O_2^- 、 N_2^+ に対する運動方程式3式を足すことにより、質量密度に対する運動方程式が得られる。

$$\frac{\partial \rho v_d}{\partial t} + \text{div}(\rho v_d v_d) + \text{grad} P = -\Gamma v_d \quad (6)$$

ここで、

$$\rho = m_e \bar{n}_e + m_{O_2^-} \bar{n}_{O_2^-} + m_{N_2^+} \bar{n}_{N_2^+} \quad (7)$$

$$P = \bar{n}_e T_e + \bar{n}_{O_2^-} T_{O_2^-} + \bar{n}_{N_2^+} T_{N_2^+} \quad (8)$$

$$\Gamma = v_e m_e \bar{n}_e + v_{O_2^-} m_{O_2^-} \bar{n}_{O_2^-} + v_{N_2^+} m_{N_2^+} \bar{n}_{N_2^+} \quad (9)$$

である。上式からわかるように、電子の運動周期

に対して時間平均された運動量密度は、ドリフト速度 v_d で運ばれる。

2.3 エネルギー方程式

電子については、ジュール加熱、及びイオン化による電子のエネルギー損失の効果を含んだエネルギー方程式とした¹⁾。

$$\frac{\partial \varepsilon_e}{\partial t} + \text{div}\{(\varepsilon_e + \bar{n}_e T_e) v_d\} = j_e E - W S_{N_2^+} \quad (10)$$

O_2^- , N_2^+ については、ジュール加熱、の効果を含んだ同様のエネルギー方程式をたてた。

$$\frac{\partial \varepsilon_\alpha}{\partial t} + \text{div}\{(\varepsilon_\alpha + \bar{n}_\alpha T_\alpha) v_d\} = j_\alpha E \quad (11)$$

ここで ε_α はエネルギー密度であり、次のように表わされる。

$$\varepsilon_\alpha = \frac{1}{2} m_\alpha \bar{n}_\alpha v_\alpha^2 + \frac{3}{2} \bar{n}_\alpha T_\alpha \quad (12)$$

j は電流密度であり、次のように表わされる。

$$j_\alpha = q_\alpha \bar{n}_\alpha v_\alpha \quad (13)$$

v_α は時間平均されていない瞬時の速度で、次のように求めた。

$$v_\alpha = \mu_\alpha E \quad (14)$$

ε_α と j_α も時間平均されていない物理量である。

2.4 電界の評価

プラズマにかかる電界は、雲の電荷により生じる外部電界と、プラズマ自身が作る電界の和で表わされる。誘雷塔を回転楕円体として近似し、誘雷塔による一様電界の歪みを評価した³⁾。

$$E_{\text{ext}}(z) = E_0 + \frac{E_0}{\tanh^{-1}(k) - k} \times \left\{ \frac{(z+b)\sqrt{b^2 - a^2}}{b^2 + bz + a^2} - \tanh^{-1} \frac{\sqrt{b^2 - a^2}}{z+b} \right\} \quad (15)$$

ここで

$$k = \frac{\sqrt{b^2 - a^2}}{b} \quad (16)$$

Fig. 2 Distortion of uniform electric field by tower for the case of $E_0=10\text{kV/m}$.

E_0 は、雲の電荷により生じる一様電界である。Fig. 2 に $E_0=10\text{kV/m}$, $a=1\text{m}$, $b=50\text{m}$ としたときの、誘雷塔による一様電界の歪みを示す。図からわかるように、誘雷塔先端から数 cm の範囲では数 MV/m 程度の外部電界が存在するので、この領域での大きな電界電離効果が期待できる。

プラズマ自身が作る電界は、プラズマ近似より評価した²⁾。

$$E_{\text{ind}}(z) = - \frac{D_e \nabla \bar{n}_e + D_{O_2^-} \nabla \bar{n}_{O_2^-} - D_{N_2^+} \nabla \bar{n}_{N_2^+}}{\mu_e \bar{n}_e + \mu_{O_2^-} \bar{n}_{O_2^-} + \mu_{N_2^+} \bar{n}_{N_2^+}} \quad (17)$$

リーダーの先端位置は、次のようにして求めた。誘雷塔の先端位置 ($z=0$) から電子密度を検索し、ある臨界密度 (10^{24}m^{-3}) 以下になる位置をリーダーの先端位置とした。さらに、リーダーの先端の位置の時間発展の効果も取り入れて、プラズマにかかる電界を次のように評価した。簡単のため、リーダーの先端では誘雷塔の先端と同電界強度である、と仮定した。

$$E(z) = E_{\text{ind}}(z) + E_{\text{ext}}(z, z_{\text{leader}}(t)) \quad (18)$$

$$E_{\text{ext}}(z, z_{\text{leader}}(t)) = E_{\text{ext}}(z - z_{\text{leader}}(t)) \quad \text{for } z \geq z_{\text{leader}}(t)$$

$$E_{\text{ext}}(z, z_{\text{leader}}(t)) = 0 \quad \text{for } z < z_{\text{leader}}(t) \quad (19)$$

(1)~(19)を基礎方程式とし、シミュレーションを行った。

3. シミュレーション結果

3.1 初期条件

初期のプラズマビーズの電子密度分布は、次のように与えた。

$$n = n_0 \exp \left\{ - \left(\frac{z - z_0}{r_0} \right)^3 \right\} \quad (20)$$

n_0 はピーク密度、 r_0 は半径 z_0 はプラズマビーズの中心位置である。初期には O_2^- は存在しないとした。

(財) レーザー技術総合研究所の室内、野外実験の結果から、ビーズの間隔が5～10mm程度のプラズマが生成されていることがわかっている。また、誘雷塔の先端より20cm程度の範囲では、プラズマが生成されにくくなっていることがわ

かっている。そこで本研究では、次の3通りの場合についてシミュレーションを行った。

- 1) プラズマビーズの間隔が5mmで、誘雷塔の先端から均等に400個並んでいる。
- 2) プラズマビーズの間隔が10mmで、誘雷塔の先端から均等に200個並んでいる。
- 3) プラズマビーズの間隔が10mmで、誘雷塔の先端より20cm高い所から均等に180個並んでいる。

いずれの場合も、ピーク密度は 10^{16} m^{-3} 、半径は1mm、電子温度を1eV、イオン温度を0.1eVとし、シミュレーションを行った。Fig. 3に1)～3)の場合の初期の電子密度の空間プロファイルを示す。

Fig. 3 Initial spatial profiles of electron number densities for the case of 1)~3).

Fig. 4 Time evolution of the spatial profile of electron number density for the case 1).

3.2 不連続プラズマ中のリーダーの進展

Fig. 4に1)の場合の電子密度の空間プロファイルの時間発展, Fig. 5に1)の場合の電界強度の空間プロファイルの時間発展を示す。Fig. 4からわかるように, リーダーの先端に対応した電子密度の大きな飛びが生じ, それが時間とともに進行していることがわかる。Fig. 5からわかるように, リーダーの先端で大きな電界が生じ, それが伝搬していることがわかる。Fig. 6に1)~3)の場合のリーダーの先端位置の時間発展を示す。どの場合もリーダーの進展速度は約 3×10^6 m/s程度と評価できる。どの場合もリーダーの先端は, 初期にプラズマが存在していた2m地点まで進展した。

Fig. 5 Time evolution of the spatial profile of electric field for the case 1).

Fig. 6 Time development of the top of leaders for the case of 1)~3).

Fig. 7 Time evolution of the spatial profile of electron number density for the case 3) within the range of 20cm.

Fig. 8 Time evolution of the spatial profile of electron number density for the case 3) within the range of 2mm.

3)の場合について, 誘雷塔の先端とその20cm上にあるプラズマが, どのような過程をへて連結したのか, を議論する。Fig. 7は, 3)の場合の誘雷塔の先端から20cmの範囲における, 電子密

度の空間プロファイルの時間発展を示している。この図からわかるように、 $0.13\mu\text{s}$ 程度の時間では、電子は誘雷塔先端付近にわずかに存在するだけである。しかし $0.147\mu\text{s}$ 程度の時間になると、 3cm 程度の範囲まで電離が進み、 $0.153\mu\text{s}$ 程度の時間では、ほぼ 20cm の範囲に渡って電離が進んでいることがわかる。Fig. 8は、 $0.14\mu\text{s}$ 程度の時間において誘雷塔先端付近を詳細に示したものである。この2つの図からわかるように、誘雷塔の先端からプラズマに向かって電離が進展し、 $0.15\mu\text{s}$ 程かかって誘雷塔の先端とプラズマが連結した、と予想される。誘雷塔の先端とプラズマが連結する速度は約 $1.3 \times 10^6\text{m/s}$ 程と見積もることができる。

4. 結 言

プラズマ近似をもとにシミュレーションモデルを構築し、プラズマチャンネルの評価を行った。

3通りの場合についてシミュレーションを行い、いずれの場合も、リーダーの先端が、初期にプラズマが存在していた 2m 地点までは進展する、という結果を得た。

本シミュレーションモデルには、光電離の効果、誘雷塔先端付近でのプラズマシースの効果などが含まれていない。このことにより、一部実験結果と異なるシミュレーション結果を導いている。今後これらの効果を取り入れて、より厳密なシミュレーションを行い、さらに、プラズマがとぎれた地点から、リーダーが雲まで到達するための条件を求め、実験条件の最適化を行う予定である。

謝 辞

大阪工大の西口彰夫助教授には、本研究に関し大変有益な御助言を頂きました。ここに謝意を表します。

参 考 文 献

- 1) R. Klingbeil, D. A. Tidman, and R. F. Fernsler : Phys. Fluids 15 (1972) 1969.
- 2) 例えば、山中千代衛「近代高電圧放電工学」電気書院。
- 3) 例えば、プリンツ「電界計算法」(増田閃一、河野照哉 共訳) 朝倉書店。

レーザーワード

レーザープラズマ (laser plasma, laser produced plasma)

レーザーにより生成したプラズマの総称である。気体のプラズマ化(絶縁破壊)の閾値はレーザー波長(光子エネルギー)、気体分子(原子)の種類、圧力に依存するが1気圧の空気の場合、波長 $10\mu\text{m}$ の CO_2 レーザーでは $\sim 10^9\text{W/cm}^2$ である。固体のプラズマ化はレーザー強度(W/cm^2)が $\sim 10^8\text{W/cm}^2$ になると起る。気体の場合、プラズマ化はレーザーの強度が最初に閾値を越える焦点付近で起り、プラズマ化領域はレーザーの上流に向かって進展する。このため気体のプラズマ化では高温のプラズマ発生には適さない。しかし、真空中での固体のプラズマ化では前面にプラズマ化物質がないため高温のプラズマを発生することが出来る。このレーザープラズマはX線源、X線レーザー、核融合(レーザー核融合)、高エネルギー多価イオンの発生等に利用されている。

(山中 龍彦)