

## 科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成24年 6月 8日現在

機関番号：82626

研究種目：基盤研究（C）

研究期間：2009～2011

課題番号：21540518

研究課題名（和文）スプライトに類似した実験室内放電における分枝形成機構の解明

研究課題名（英文）The mechanism of branching structure formation on Sprite like streamer discharge in laboratory

研究代表者

高橋 栄一（TAKAHASHI EIICHI）

独立行政法人産業技術総合研究所・新燃料自動車技術研究センター・主任研究員

研究者番号：90357369

研究成果の概要（和文）：近年、高層大気中に観測され注目を集めているスプライト放電に類似した拡散と分枝構造を併せ持つ放電を一様電界中の予備電離分布を UV レーザーにより制御することで再現した。分枝の有無は初期の予備電離密度に強く依存することが分かった。高層大気中でもその様な密度分布の存在が予想される。また、放電の時間発展をナノ秒の時間分解能を有する超高速マルチフレーミングカメラをストリーマ放電に初めて適用することにより、分枝の発展の様子の詳細を明らかにした。その結果、成長を続ける分枝の止める分枝の存在、電離度が高い領域では放電の波面が一様な伝搬をしても電離度が低い領域に進展すると分枝が形成されたこと、いくつかの分枝のうち一つが反対側の電極に到達すると短絡するが残りの分枝の先端はそれでも伝搬を続ける、あるいはその短絡して形成された短絡路に向かって再結合をした振る舞いから、分枝の形成機構は成長界面の不安定性に類似のものと考えられる。

研究成果の概要（英文）：

Sprite is a characteristic discharge phenomena observed in upper atmosphere. It has diffuse and branching structure simultaneously. Sprite like discharge structures were created in laboratory experiment using a UV laser for controlling pre-ionization distribution. In order to understand the mechanism of the branching formation, the Sprite like discharge was focused. The branching was influenced by the density of pre-ionization created by a UV laser irradiation. Applying a fast-framing camera that can acquire  $10^9$  frames per second, detailed growing phenomena of streamer was firstly observed. The suppression of branching in the relatively higher pre-ionized region and autonomous propagation phenomena suggested that the origin of the branching is similar to growing surface phenomena.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2009年度	1,200,000	360,000	1,560,000
2010年度	1,000,000	300,000	1,300,000
2011年度	900,000	270,000	1,170,000
年度			
年度			
総計	3,100,000	930,000	4,030,000

研究分野：数物系科学

科研費の分科・細目：プラズマ科学・プラズマ科学

キーワード：プラズマ・核融合、超高層大気環境、原子・分子物理、分枝構造、ストリーマ

## 1. 研究開始当初の背景

近年、地上での正極性の落雷に伴って、高度 100km 付近の高層大気中に形成される“スプライト”と呼ばれる過渡的な放電が注目を集めている。そのスプライトは上方に拡散的で下方に分枝放電となる特徴的な形状を有している。その時間発展も観測されており、一部の分枝が空間的に再結合するなど様々な興味深い現象が示されていた。

一方、我々は並行平板により形成された、一様電界中に紫外レーザーを照射するとスプライトに似た構造を有する放電、負極性の方向には拡散的で正極性の方向には分枝を有する、“Double-Head”構造の放電が形成されること観測した。

ストリーマ放電そのものは非常に古くから研究や利用が行われており、これまでに実験室内の放電においても分枝を有する正ストリーマ放電や拡散的な負ストリーマ放電が、針対平板電極間等に形成された不平等電界中で観測されていた。しかし、その分枝の形成機構に関しては、電子雪崩の確率的な融合によるという考えや成長界面の不安定性によるというモデルなどが挙げられている。またストリーマ先端は針電極と高い導電性を有するストリーマトラックによりつながっていると考えるモデルと、トラック部分の導電性は低く絶縁されており、ストリーマ先端はそれ自身のエネルギーで自律的に伝搬していると考えられるモデルが混在するなど依然として議論が続いている。

そこで、本研究ではスプライトに着目して分枝構造の形成機構の研究を行う。高層大気中に形成される正ストリーマと負ストリーマが同時に形成される“Double-Head”構造は特異であると同時に、針電極の先端の様な極端な高電界を初期状態として考慮する必要が無い場合、分枝形成機構を検討する上でより適していると考えられる。

## 2. 研究の目的

本研究の目的は、実験室内において観測されたスプライトに類似した放電現象に着目し、その実験室内放電の初期状態の計測や分枝に影響を与える様々な依存性に関する実験の実施、及びモデルの構築を通じてその分枝構造の形成機構を明らかにすることである。

## 3. 研究の方法

本研究は、まず紫外レーザーにより形成された初期電離密度の定量的評価を行った。続いて、その評価に基づき、ストリーマ放電の

ICCD カメラ等の超高速カメラを用いた観測、並びに初期電離密度の分枝に与える影響の評価を実施した。最後に実験結果との比較のために 3) 流体シミュレーションコードを構築し、分枝放電の形成機構に関する考察を行う。

## 4. 研究成果

### (1) 初期電離密度の実験的評価

一様な電界中に照射した紫外レーザー光による初期電離密度の評価を行った (図 1)。UV レーザー光は紙面に垂直な方向で、一様な電界中に 3mm φ 程度のビーム状にして入射した。形成されたイオン、電子は、弱い電圧を印加することで分離し、分割された電極で電流を観測した。ドリフト電流は電圧高くするに従って増大し、飽和する。これは形成され

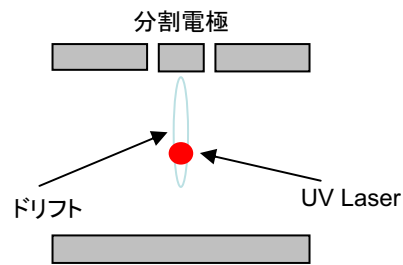


図1: 光電離の初期状態評価計測

た電子、イオンが再結合する前に分離するためである。本研究を実施する前には、紫外レーザー光の照射領域の外側にも電離領域が広がっている可能性を想定したが、初期電離分布を測定したところ、ほぼ照射領域と電離分布は一致していることを確認した。

図 2 にレーザー照射強度と観測されたシグナル、及び密度換算値を示す。レーザー光の

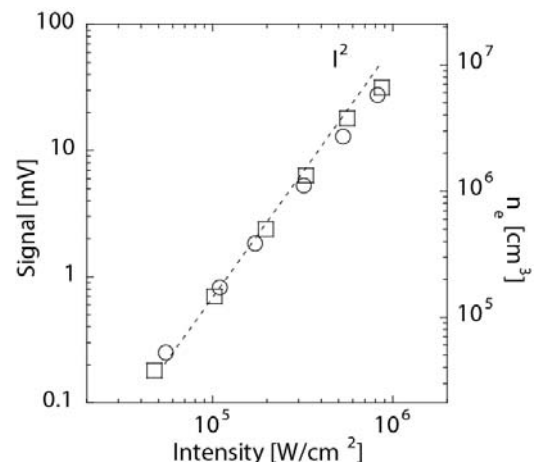


図 2: 光電離の初期状態評価計測

強度に対して2乗の依存性を有していることが分かった。レーザーを照射した気体は、アルゴンや窒素ガスと言った純度の高いガスを、まず放電チャンバーをターボ分子ポンプで十分に真空に排気してから、充填している。用いている紫外レーザーはフッ化クリプトンエキシマレーザー (KrF レーザー) であり、波長は 248nm, 光子エネルギーは 5eV である。KrF レーザー光でアルゴン原子の多光子イオン化を起こす場合には4光子が必要となるので、この二乗の依存性は、他のよりイオン化エネルギーの小さい炭化水素系の不純物が含まれているためと考えられる。実際、純度の高いガスを用いたとしても容器壁やガスの配管等に付着するそれら不純物を完全に排除することは困難である。不純物の密度がおおよそ 1ppm 程度存在すれば本実験の程度の初期電離密度が形成されることが分かった。

従って、放電実験においては基本的には不純物の存在を前提としてモデルを構築する。また不純物として 10eV 以下のイオン化エネルギーを有する候補は炭化水素系の分子であり、それらはイオン化するだけでは無く、それらから放出される VUV 光、例えば水素原子の Ly $\alpha$  線、によって他の不純物をイオン化することも可能である。

### (2) ICCD カメラ等の超高速カメラを用いたストリーマ放電の観測、並びに初期電離密度の分枝に与える影響の評価

ICCD カメラ等を用いてストリーマ放電の時間的な成長の様子を観測した。図 3 に NAC 社の高速フレーミングカメラ、Ultra NAC Neo を用いて撮像した、アルゴンガス中の正ストリーマ放電の単一ショットにおけるストリーマ放電の成長の様子の例を示す。このフレーミングカメラは毎秒 1 億フレームの撮像を連続 12 フレーム取得することが可能であり、これまで 1 度の放電現象で 1 フレームの撮像しかできなかった ICCD カメラと比べて放電の再現性を仮定すること無く成長の様子を

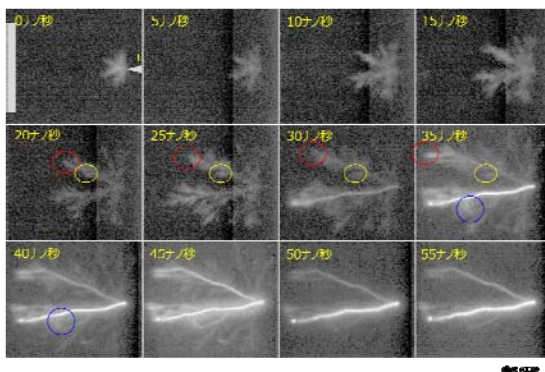


図 3: アルゴンガス中の正ストリーマの成長の様子

計測できる利点を有している。

図 3 において、各画像の撮像時刻は左上から右下の順に並んでおり、ゲート時間は 5ns、撮像間隔も 5ns である。針電極先端からストリーマが成長している様子を単一ショットで撮像できた。この計測により、図中の赤い円で示した先端は成長を続けるのとは対照的に、黄色い円で示した先端は成長をやめていることが分かった。これは結晶成長の分野で見られる拡散律速凝集 (DLA) に類似した特徴である。また、青い円で示した先端は先に平板電極に到達した経路に対して再結合をしていることが分かる。これは短絡によって電界分布が大きく変化したためと考えられる。同様なストリーマ先端の再結合はスプライトでも観測されているが、高層大気の場合にもこれと同様な”短絡“による電界分布の変化がそれをもたらしたかどうかは定かではない。

次に、針対平板電極において分枝が影響を受ける予備電離密度の評価を行った結果を図 4 に示す。針対平板電極の間に電圧を印加して正ストリーマ放電を形成するのに先立ち、針電極近傍の領域に KrF レーザーを照射して初期電離を行った。レーザー強度を変化させることでその初期電離密度を変化させた。レーザー強度は(a)から(f)の順に減少している。その結果、図 4 の(e)あるいは(f)において分枝がレーザー照射の影響を受けなくなる結果が得られた。前の初期電離密度の評価実験より、およそ  $5 \times 10^5 \text{ cm}^{-3}$  程度の値にしきい値があることが分かった。初期電子から成長する電子雪崩の重なりによって分枝の抑制が決まるモデルにより説明することができた。

この様に、分枝は初期電子の影響を強く受けることがわかったこと、また高層大気中にはこれまでの様な不平等電界は存在しないので、直径 1cm の半球電極対平板電極間に KrF レーザーを照射して電離度の分布が分枝に与える影響を評価する実験を行った。図 5 にその結果を示す。今回の画像はスプライトに

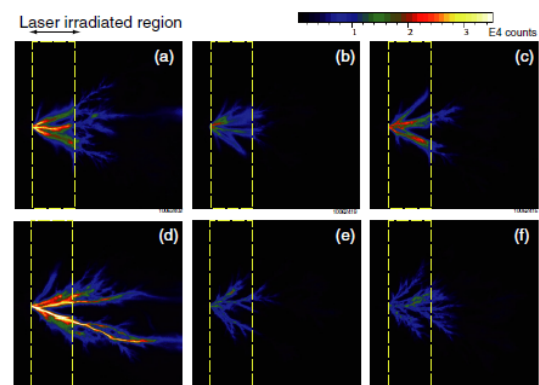


図 4: 分枝が抑制される初期電離密度の評価

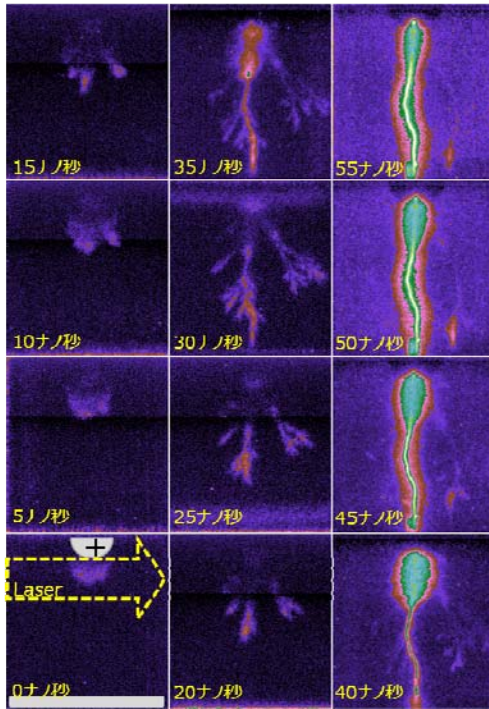


図5：スプライトに類似の形状を有する放電

合わせた方向とするため、左下から右上の順に時間が進展している。左下の図に電極の配置とレーザー光の入射位置を示す。レーザーが照射された高い電離密度を有する空間では放電は平面的に伝搬し、その先に伝搬する際に界面が不安定になり次第に細かい分枝を形成することが分かった。高層大気においても電離度は同様な分布をしている可能性が高く、類似性が示唆される。

### (3) 流体シミュレーションコード

スプライトに類似した実験室内の放電では分枝は予備電離密度に強く影響されることが分かった。また、KrF レーザーによる予備電離密度のレーザー強度依存性から、ガス中には炭化水素系の分子と思われる不純物が存在していることがわかった。特に実験に用

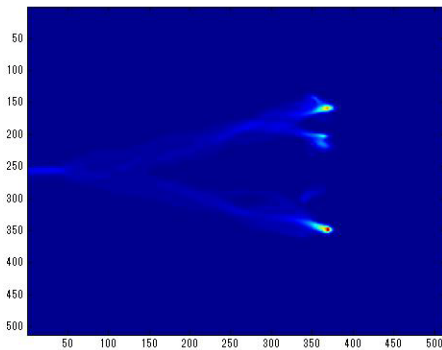


図6：流体シミュレーション結果の一例

いたアルゴンや窒素ガスでは、それら不純物に起因する VUV 発光の吸収長は極めて長く、別の場所の不純物をイオン化することが想定される。そこで、これらの実験結果に基づき、初期状態として空間的に初期電子がランダムに分布している仮定を行い、プラズマ流体シミュレーションコードによるストリーマ放電の再現を試みた。この流体シミュレーションは電子成分のみが移動するドリフト拡散近似で行った。イオン化、拡散係数、電子の移動度は窒素に関する近似式によって与えた。その計算結果の例を図6に示す。この例の場合には、空間に  $10^4 / \text{cm}^3$  の密度の初期電子がランダムに分布していると仮定して計算を行った。その結果、シミュレーションにおいても分枝が形成される結果を得ることができた。現状のシミュレーションはまだ2次元の限定的な空間領域の計算に留まっており、実験結果との定量的な比較など今後の詳細な検討を必要とする。

### 5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計2件)

- ① 高橋栄一、加藤進、佐々木明、岸本泰明、古谷博秀、Single-shot observation of growing streamers using an ultrafast camera、Journal of Physics D Applied Physics、査読有、44 巻、2011、302001、DOI: 10.1088/0022-3727/44/30/302001
- ② 高橋栄一、加藤進、佐々木明、岸本泰明、古谷博秀、Controlling branching in streamer discharge by laser background ionization、Journal of Physics D Applied Physics、査読有、44 巻、2011、075204、DOI: 10.1088/0022-3727/44/7/075204

[学会発表] (計5件)

- ① 高橋栄一、加藤進、ストリーマ放電の形成と分枝現象 II、日本物理学会 第67 回年次大会、2012 年 03 月 25 日、関西学院大学
- ② 高橋栄一、ICCD カメラを用いた高時間分解計測によるストリーマ放電の開始・分枝条件の研究、プラズマコンファレンス 2011、2011 年 11 月 24 日、石川県金沢音楽堂
- ③ 高橋栄一、加藤進、古谷博秀、佐々木明、岸本泰明、高田健司、松村哲、佐々木裕康、超高速撮像カメラによるストリーマ成長の単一ショット計測、可視化情報学会全国講演会(2011 富山)、2011 年 09

- 月 27 日、富山国際会議場
- ④ 高橋栄一、加藤進、佐々木明、岸本泰明、  
Double-headed ストリーマ放電の形成と  
分枝現象、日本物理学会 2010 年秋季大会、  
2010 年 09 月 24 日、大阪府立大学
  - ⑤ 高橋栄一、加藤進、佐々木明、岸本泰明、  
スプライトに類似した構造を有する実験  
室内放電の形成実験 I、日本物理学会第  
65 回年次大会、2010 年 03 月 20 日、岡山  
大学

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

高橋 栄一 (TAKAHASHI EIICHI)  
独立行政法人産業技術総合研究所・新燃料  
自動車技術研究センター・主任研究員  
研究者番号：90357369

### (2) 研究分担者

加藤 進 (KATO SUSUMU)  
独立行政法人産業技術総合研究所・エネ  
ルギー技術研究部門・主任研究員  
研究者番号：20356786

### (3) 連携研究者

佐々木 明 (SASAKI AKIRA)  
独立行政法人日本原子力研究開発機  
構・量子ビーム応用研究部門光量子ビー  
ム利用研究ユニット・研究職  
研究者番号：10215709