

2025年12月9日

埼玉大学
東京大学
科学技術振興機構(JST)

高性能レーザー計測で捉えた放電発生初期の超高速現象 —雷現象から医療・農業応用にまで供する実験ベンチマークを提示—

1 ポイント

- ・高性能なレーザー計測技術により、放電発生初期の超高速現象(ストリーマ放電^{※1})を支配する主要パラメータ群をセットで直接計測することに成功。
- ・これにより、従来モデルでは予測されていなかった内部の電荷・電界構造を発見。
- ・従来モデルの妥当性検証・改良・精緻化に供する実験ベンチマークを初めて提示。
- ・放電の予測・制御性能向上により、雷現象の理解や放電の医療・農業・環境・エネルギー応用が加速するものと期待される。

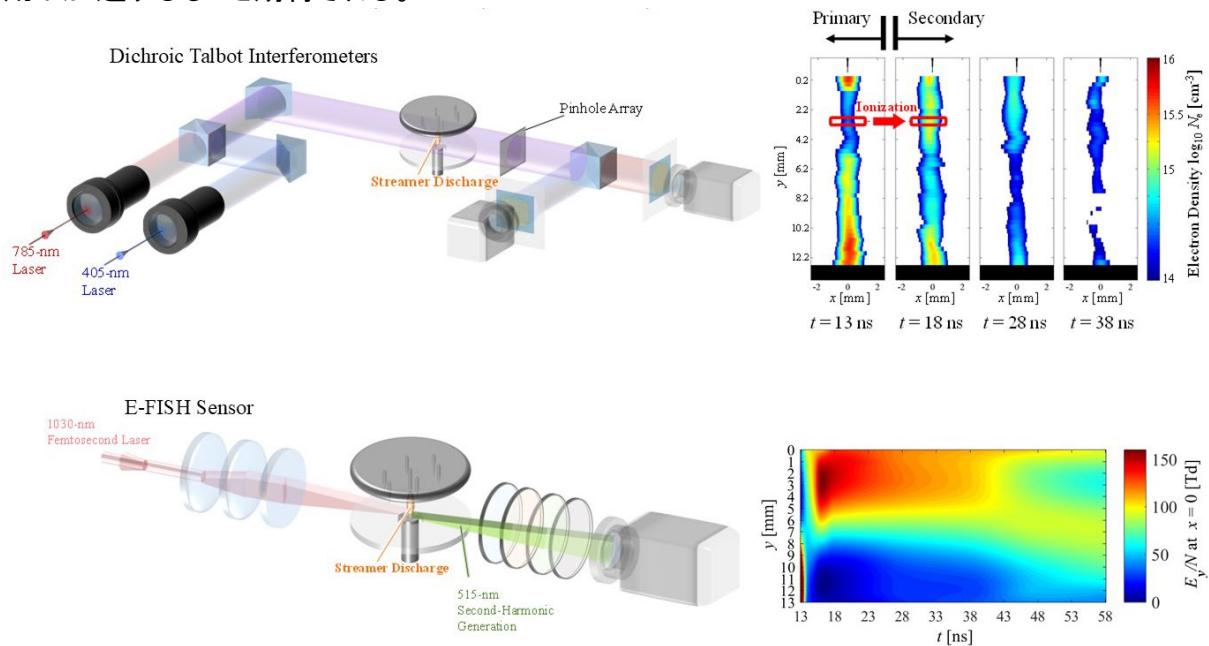


図1 ストリーマ放電のダイナミクスを支配する電子密度(右上)と電界(右下)を
セットで直接計測することに成功

左上:2波長 Talbot干渉計(Dichroic Talbot Interferometers)では、2種類の波長(785nmと405nm, nm=ナノメートル、ナノは10億分の1)のレーザーを用いる。ストリーマ放電(Streamer Discharge)の屈折率分布を2波長のレーザーと光学素子(Pinhole Array)で観測する。

右上:1次放電(Primary)と2次放電(Secondary)の間で電界が電離臨界値を超えたためにイオン化(Ionization)が起き、電子密度(Electron Density)の値が増加している(赤線で囲んだ部分)ことがわかる。

左下:電界誘起第2高調波発生法(E-FISH Sensor)では、波長が1030nmのフェムト秒レーザー(Femtosecond Laser)を用いる。ストリーマ放電(Streamer Discharge)内部の電界によって波長が515nmの第2高調波発生(Second-Harmonic Generation)が生じる。

右下:電界ベクトルの1次元分布を測定し、値(単位はTd、読み方はタウンゼント)を疑似カラーで表示。

2 概要

本研究では、高時間分解能を有する複数のレーザー計測技術を駆使することで、幅広い領域で研究が進められているストリーマ放電においてそのダイナミクスを支配する電子密度と電界を世界で初めてセットで直接計測することに成功しました。実験には再現性の高い単一フィラメント状の放電を用い、2次元電子密度分布と1次元電界分布を取得し、相互に整合することを実証しました。さらに、これらの実験結果は従来の理論・数値計算モデルでは予測されていなかった新しい電荷・電界構造であることを明らかにし、既存モデルの妥当性検証・改良・精緻化に資する実験的ベンチマークを提示しました。

本研究は埼玉大学大学院理工学研究科 稲田優貴准教授、塩田達俊准教授、中村亮介特任准教授、前山光明名誉教授、東京大学大学院新領域創成科学研究科 小野亮教授、東京大学大学院工学系研究科 熊田亜紀子教授らの共同研究によって実施され、2025年12月8日に『Physical Review Letters』へ掲載されました。

3 研究の背景

放電は次世代半導体の製造プロセスや宇宙機の推進機構といった現代科学の最先端で活用されています。ここで、放電の一種であるストリーマ放電は雷の前駆体として知られており、自然現象として重要です。さらに、ストリーマ放電はがん治療、免疫療法、種子の発芽促進、汚染物質の浄化、化石燃料の燃費向上など、多様な医療、農業、環境、エネルギー応用の中核をなす基礎現象でもあるため、応用上も非常に重要です。

ストリーマ放電の内部では、電界で加速された電子が雰囲気気体（放電容器内に充填した気体）と衝突することで解離・電離・励起・付着といった多彩な反応（ダイナミクス）が起こり、放電の物理・化学的な特性が決定されます。そのため、電子の数（電子密度）と電界はストリーマ放電のダイナミクスを司る最も重要なパラメーターです。しかし、ストリーマ放電は形状に再現性が無く、ナノ秒（10億分の1秒、ns）で経時変化する超高速現象であるため、これらを直接計測することは極めて困難でした。そのため多くの従来研究では理論・数値計算モデルにより電子密度と電界を予測してきましたが、実験による検証は皆無でした。この「想と実のギャップ」を埋めモデルの信頼性を向上させるためには、これまで捉えることができなかった電子密度と電界をセットで計測する必要がありました。

4 研究内容

そこで本研究では、サイクロの「5の目」配置を採用した独自の電極構成により再現性の高い単一フィラメントのストリーマ放電を生成しました。このストリーマ放電に対し2波長 Talbot干渉計を適用することで、電子密度の2次元分布をシングルショットで可視化し、さらに電界誘起第2高調波発生（E-FISH）法では電界ベクトルの1次元分布を測定しました。これらの計測技術はいずれも～1ns以下の時間分解能を有しているため、超高速変化するストリーマ放電のダイナミクスを捉えることが可能となりました。

本研究ではまず、電子密度と電界の実測結果が互いに整合していることを電子に対する連続の式を解くことで実証しました。次に、既存の理論・数値計算モデルによって得られた予測結果の妥当性を吟味することで、これらの従来研究では実験結果が正確に再現できていないことを明らかにしました。具体的には、2次ストリーマ放電の発生直後、その内部では電界が電離臨界値を超えることで電子密度が増加していることを本計測により実証しました（図1右上）。さらに、この原因は1次から2次への遷移過程において、陰極近傍で生じる高電界領域の広がりによるものであることを明らかにしました（図1右下）。本成果は既存モデルの妥当性を検証し、既存モデルの改良・精緻化に供する初めての実験的ベンチマークです。こうした総合的な検討を通して最後に、2次ストリーマ放電の普遍的な支配機構は「電流の連続性」であることを示しました。

5 今後の展開

今後は本実験データを基に理論・数値計算モデルを改良することで、放電の予測・制御性能の向上を目指します。これにより、雷現象や雷雲上方で発生するスプライトを含む自然現象の理解が促進されます。さらに、放電の医療・農業・環境・エネルギー応用がさらに加速するものと期待されます。

PRESS RELEASE



6 論文情報

掲載誌	Physical Review Letters
論文名	Direct combinational measurements of the electron density and electric field in secondary streamer discharge under atmospheric-pressure air
著者名	Yuki Inada, Tatsutoshi Shiota, Ryosuke Nakamura, Akiko Kumada, Mitsuaki Maeyama, and Ryo Ono
DOI	10.1103/5sv6-28qp
URL	https://doi.org/10.1103/5sv6-28qp

7 研究支援

本研究は科学技術振興機構(JST)創発的研究支援事業 課題番号 JPMJFR233Y、同機構戦略的創造研究推進事業 さきがけ 課題番号 JPMJPR2003、日本学術振興会(JSPS)科研費(JP18H01418, JP19H02122, JP20K20995, JP24H02248, JP24H02246)の支援を受けて行われました。

8 用語解説

※1 ストリーマ放電: 気体中放電のごく初期に発生する超高速現象のこと、自然現象である雷の前駆体としても知られている。