ストリークカメラを用いた水中ストリーマの高時間分解解析

Highly temporal analysis of underwater streamers with a streak camera

○学 藤田 英理 (東北大) 金澤 誠司 (大分大) 正 大谷 清伸 (東北大)
正 小宮 敦樹 (東北大) 金子 俊郎 (東北大) 正 佐藤 岳彦 (東北大)

Hidemasa FUJITA, Tohoku University, 2-1-1 Katahira, Aoba-ku, Sendai 980-8577
Seiji KANAZAWA, Oita University, 700 Dannoharu, Oita 870-1192
Kiyonobu OHTANI, Tohoku University, 2-1-1 Katahira, Aoba-ku, Sendai 980-8577
Atsuki KOMIYA, Tohoku University, 2-1-1 Katahira, Aoba-ku, Sendai 980-8577
Toshiro KANEKO, Tohoku University, 6-6-05 Aoba, Aramaki, Aoba-ku, Sendai 980-8579
Takehiko SATO, Tohoku University, 2-1-1 Katahira, Aoba-ku, Sendai 980-8577

The highly temporal streak imaging of an underwater discharge revealed that the primary streamer propagation was intermittent though the propagation had been considered continuous from our previous study. In addition, the intermittent luminescence pattern was synchronized with the pattern of discharge pulsed currents. The primary streamer in ultrapure water was generated by the application of a single-shot pulsed positive high voltage with a duration of 10 μ s to a needle-wire electrode system with the tip radius of 40 μ m and with the gap distance of 6 mm.

Key Words: Underwater discharge, Streamer, Streak camera

1. 緒言

液中の針電極に高電圧を印加するとストリーマと呼ばれるフィラメント状の発光現象が観測される。液中ストリーマは自発光だけでなく、シャドウグラフ法やシュリーレン法により屈折率の変化としても可視化される⁽¹⁾。このとき観察される影絵はストリーマ・チャンネルと呼ばれる。

液中ストリーマの進展には紫外線、衝撃波、微細気泡、オゾン、および化学活性種の生成を伴う⁽²⁾。特に水中ではヒドロキシルラジカルやスーパーオキシドアニオンラジカルのような酸化力の高いラジカル種が形成されるため、水質浄化や医療分野への応用が期待されている⁽³⁾。

水中正ストリーマは形状や進展速度、放電電流波形から1次ストリーマと2次ストリーマに分類されている⁽⁴⁾⁽⁸⁾。1次ストリーマは半球ブラシ状に2-3 km/sで進展し、電流波形上には繰り返しパルス電流が観測される⁽⁴⁾⁽⁷⁾。他方、2次ストリーマは樹枝形状を有し、進展速度は20-30 km/sに達する⁽⁴⁾⁽⁶⁾⁽⁸⁾。2次ストリーマの進展時には電流波形上に直流成分が現れ、低電気伝導率の水中では断続的なスパイク電流が続く⁽⁵⁾⁽⁶⁾⁽⁸⁾。このスパイク電流は2次ストリーマの進展後に形成されたチャンネル内での気相中放電を表している⁽⁵⁾⁽⁶⁾。1次ストリーマは2次ストリーマに比べて進展長が短く、発光も微弱なため観測が難しい。そのため、1次ストリーマの自発光はイメージインテンシファイアと高感度カメラを組み合わせた単一写真として可視化されているものの⁽⁷⁾、連続写真としては観察されていない。顕微鏡レンズと超高速度カメラを組み合わせることで1次ストリーマの進展を連続的に可視

化することができる⁽⁷⁾。しかしこの場合、強力な背景光を用いてストリーマ・チャンネルを可視化するため、パルス状の電流波形に関わらず、その進展は連続的に観測される。このように、水中ストリーマの詳細な進展機構は未だ十分解明されていない。

そこで本研究では、高感度で高時間分解能のストリークカメラを用いて1次ストリーマの自発光を連続的に可視化した。また、ストリーク写真と電流波形を同期させることで、1次ストリーマの進展とそれを特徴付ける繰り返しパルス電流の関連性を検証した。

2. 実験

2-1 放電装置と放電条件 放電セルに石英ガラスセルを用い、内部に電極間距離6 mmの針-ワイヤ電極を固定した。両電極ともに直径0.5 mmの白金線で作成し、放電部を除き絶縁管で被覆している。針電極の先端は約40 μ mの曲率半径に加工した。セラミックコンデンサを介して10 μ sの単一正パルス電圧を針電極に印加する。電圧の立ち上がり時間は約200 nsである。また、ワイヤ電極は接地している。水は空気曝露後に電気伝導率が約0.8 μ S/cmに上昇した超純水を用いた。

2-2 計測方法 可視化にはストリークカメラ(浜松ホトニクス, C10910)を使用した。本実験で用いた掃引ユニットの最大時間分解能は20 psである。撮影には顕微鏡レンズを使用し、背景光にフラッシュランプを用いた。電圧ならびに電流波形は高電圧プローブおよび電流プローブを用いて計測し、ストリークカメラのゲート信号と共にオシロスコープ上でモニタリングした。

2-3 ストリーク写真 ストリーク写真では、空間情報が1次元に限られるが、現象の連続的な時間変化の観察が可能となる。図1(a)に1次ストリーマの進展を超高速度カメラで撮影したときに得られる画像のうち、3フレーム分を示している。電極先端に描いた長方形はストリークカメラのスリットを表し、図1(b)に示すように、ストリークカメラで得られる空間情報はこのスリット内に限られる。しかし図1(b)では、超高速度カメラでは得られない1次ストリーマの連続的な時間変化を可視化することができる。

3. 結果および考察

図2に背景光を入れて撮影した1次ストリーマ進展のスト

Fig. 1 Schematic of the visualization results of primary streamer propagation by means of (a) an ultra high-speed camera and (b) a streak camera.

Fig. 2 A streak image with the backlight and the synchronized current waveform. (Applied voltage: 22.0 kV, streak time: 100 ns, space: 431 μm)

リーク写真およびその電流波形を示す。写真中の▽は針電極の位置を示し、針電極より下方の影領域は、電圧の立ち上がりから1次ストリーマ進展前までの遅れ時間に形成された気泡領域を表す⁽⁵⁾。1次ストリーマの進展は三角形の影として電圧印加後 1877 ns から観察される。背景光を入れて観察した場合、ストリーマの進展は連続的に観察され、三角形の傾きから見積もられる平均進展速度は 2.4 km/s になる。こうした観測結果は、超高速度カメラを用いたシャドーグラフ法の可視化結果とよく一致する⁽⁷⁾。1次ストリーマの進展を示唆する電流波形の変動は1次ストリーマ進展開始前の 1865 ns からみられる。ストリークカメラのスリットは図 1 (a)の模式図に示すように針電極の先端に合わせているが、1次ストリーマの進展は必ずしも針電極先端から始まるわけではない。図 2 ではスリットの外側から進展を開始して、1877 ns 以降にスリット内部まで進展領域が広がったものと解釈できる。

図 3 に示すように、背景光を消し、カメラの感度を最大にして1次ストリーマの進展を撮影すると、断続的な発光が観測された。さらに時空間分解能を約 2 倍に向上させたストリーク写真を図 4 に示す。図 4 では1次ストリーマの進展開始から 130 ns 後にカメラゲートを開いている。このときストリーマの断続的な発光のタイミングとパルス電流はおおよそ一致していた。

パルス電流と同期した断続的な進展は、2次ストリーマ進展後にみられるスパイク電流と同期したストリーマ・チャンネル内での気相中放電を類推させる。すなわち1次ストリーマの進展は、チャンネル先端の電界集中による水中電離に始まり、多量の電子が気相チャンネルを介して電極先端に向かって駆動され、気相中放電に至る機構が示唆される。ストリーマ・チャンネル先端はガス化することでわずかに伸長し、チャンネル先端で再び電界集中が起こるまで休止期間ができる、この繰り返しが断続的な進展を引き起こすと推測される。

4. 結言

ストリークカメラを用いて水中1次ストリーマの進展を可視化した。背景光を用いた場合、これまで超高速度カメラで観測したように1次ストリーマの進展は連続的に観測される。しかし、背景光を消して自発光を観測すると1次ストリーマ

Fig. 3 A streak image without the backlight and the synchronized current waveform. (Applied voltage: 22.0 kV, streak time: 100 ns, space: 431 μm)

Fig. 4 Streak image with backlight turned off and the synchronized current waveform. (Applied voltage: 22.0 kV, streak time: 47.5 ns, space: 221 μm)

は断続的に進展していた。また、発光のタイミングは電流波形のパルス成分に一致していた。

本研究は、科研費および東北大流体研公募共同研究の支援を得た。実験遂行において、東北大流体研中嶋智樹技術専門職員の支援を得た。ここに謝意を表す。

引用文献

- (1) 吉野他, 液体エレクトロニクス, (1996), コロナ社.
- (2) H. Akiyama, *IEEE Trans. Electr. Insul.*, **7** (2000), 646-653.
- (3) P. Bruggeman and C. Leys, *J. Phys. D: Appl. Phys.*, **42** (2009), 053001.
- (4) W. An *et al.*, *J. Appl. Phys.*, **101** (2007), 053302.
- (5) P. H. Ceccato *et al.*, in *Proc. IEEE Pulsed Power Conf.*, (2010), 866-871.
- (6) P. H. Ceccato *et al.*, *D: Appl. Phys.*, **43** (2010), 175202.
- (7) H. Fujita *et al.*, *J. Appl. Phys.*, **113** (2013), 113304.
- (8) H. Fujita *et al.*, *EPL*, **105** (2014), 15003.