

水中正ストリーマの進展開始電圧に及ぼす 放電パラメータの影響

藤田 英理*, 金澤 誠司**, 大谷 清伸*, 小宮 敦樹*, 金子 俊郎***, 佐藤 岳彦*.¹

(2014年9月8日受付; 2014年12月11日受理)

Influence of Discharge Parameters on the Inception Voltage of Positive Streamers in Water

Hidemasa FUJITA*, Seiji KANAZAWA**, Kiyonobu OHTANI*, Atsuki KOMIYA*,
Toshiro KANEKO*** and Takehiko SATO*.¹

(Received September 8, 2014; Accepted December 11, 2014)

The influence of gap distance, capacitance, and water conductivity on the inception voltages of a primary streamer and a secondary streamer was investigated when a single-shot pulsed positive voltage with a duration of 10 μs was applied to a needle electrode in water. The inception voltages increased with increasing gap distance, with decreasing capacitance, and with increasing water conductivity. However, the propagation velocity of primary streamers was not influenced by these discharge parameters as well as the applied voltage.

1. はじめに

液中の針電極にパルス高電圧を印加すると、電極間にストリーマと呼ばれる筋状の発光現象が観測される¹⁾。液中のストリーマ発光は微弱なため、シャドウグラフ法やシュリーレン法など背景光を用いた屈折率の変化として観測する場合も多く、この場合は区別してストリーマ・チャンネルと呼ばれる。ストリーマは対向電極まで到達するとスパークに遷移するが、電極間隔や印加電圧の大きさを調整することにより電極間の途中で進展が停止する場合も多い。

ストリーマは本来、大気中の正極性コロナ放電のうち細い筋状の放電を指し、1次ストリーマと2次ストリーマの2段階の進展過程を持つことが知られている^{2,3)}。始めに1次ストリーマが100 - 1000 km/sの速度で進展し、

印加電圧が十分に高い場合、1次ストリーマが対向電極に到達すると、針電極から新たなストリーマが進展する。この2番目に進展するストリーマは2次ストリーマと呼ばれる。

水中の針電極に正電圧を印加した場合も同様に2通りの進展形態が観察され、1次ストリーマおよび2次ストリーマと呼ばれる^{4,8)}。しかし、水中ストリーマは、気中ストリーマのような進展順序ではなく、進展形状や進展速度から分類される。放電水が超純水の場合1次ストリーマは半球ブラシ状の形状を有し、平均2 - 3 km/sで進展することが報告されている⁷⁾。他方、2次ストリーマは1次ストリーマよりも発光が強く、樹枝状の形状を持ち、進展速度は30 km/sに達する^{4,6,8)}。2次ストリーマ進展後

キーワード: 水中放電, ストリーマ, 進展開始電圧, 進展速度

* 東北大学流体科学研究所

(〒980-8577 仙台市青葉区片平 2-1-1)

Institute of Fluid Science, Tohoku University, 2-1-1
Katahira, Aoba-ku, Sendai 980-8577, Japan

** 大分大学工学部

(〒870-1192 大分市旦野原 700)

Department of Electrical and Electronic Engineering, Oita
University, 700 Dannoharu, Oita 870-1192, Japan

*** 東北大学大学院工学研究科

(〒980-8579 仙台市青葉区荒巻 6-6-05)

Department of Electronic Engineering, Tohoku University,
6-6-05 Aoba, Aramaki, Aoba-ku, Sendai 980-8579, Japan

¹ sato@ifs.tohoku.ac.jp

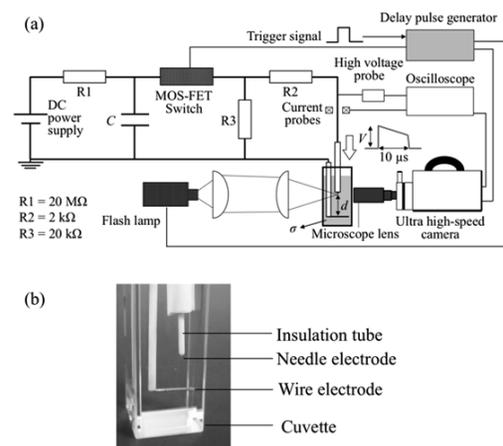


図1 実験装置の概略図 (a) と放電セル (b)
Fig.1 (a) Schematic of experimental setup. (b) Image of the
needle-to-wire electrode system in the discharge reactor.

に形成されたチャンネル内では断続的な気相中放電が起こり、再発光と呼ばれる⁵⁾。しかし、こうした水中ストリーマの進展機構はいまだ十分に解明されていない。この理由に、現象が確率的であること、時空間スケールが小さく観察が困難なこと、さらに多くのパラメータの影響を受けることが挙げられる。水中放電に先行する絶縁油中放電の研究では、針電極の曲率半径、対向電極の面積、電極間距離、印加電圧の立ち上がり時間、および周囲圧力がストリーマの進展に及ぼす影響が報告されている⁹⁾。水中放電では、たとえば電気伝導率の影響が調べられ、2次ストリーマの進展速度は電気伝導率に依存しないことが報告されている⁵⁾。しかし、実験諸条件が水中ストリーマの進展に及ぼす影響は報告例が少なく、特に1次ストリーマの進展速度に与える影響は知られていない。

そこで本研究では、放電パラメータとして電極間距離、コンデンサの静電容量および水の電気伝導率を変化させ、ストリーマの進展開始電圧に及ぼす影響を検討した。また、1次ストリーマの進展速度に与える影響を検証した。

2. 実験方法

2.1 実験装置

図1に実験装置の概略を示す。電極には先端を曲率半径40 μm に加工した針電極を用い、幅10 μs の単一正パルス電圧を印加した。接地電極にワイヤ電極を用い、電極間距離を2 mm, 6 mm および10 mm で変化させた。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ある。パルス電圧は、まず直流電源(松定, HAR-30R-10)で耐圧40 kVのセラミックコンデンサ(TDK, UHV-9A)を充電し、MOS-FETスイッチ(BEHLKE, HTS651-03-LC)を起動することで充電された電荷を放電部へ放出して生成した。このとき、電圧の立ち上りにはおよそ100 ns有した。コンデンサ1個当たりの静電容量の定格値は2 nFで、コンデンサを3個直列に用いることで静電容量を666 pFに、3個並列に用いることで6 nFに調整した。

放電セルには10 \times 10 \times 45 mmのキューベットを用い、3 mlの水で満たした。実験には空気曝露後に電気伝導率が0.8 $\mu\text{S}/\text{cm}$ まで上昇した超純水、この超純水にNaClを加え10 $\mu\text{S}/\text{cm}$, 100 $\mu\text{S}/\text{cm}$ に調整した水、および水道水を用いた。使用した水道水の電気伝導率は161 $\mu\text{S}/\text{cm}$ である。

2.2 計測方法

放電部の可視化には最短露光時間5 nsで12枚連続撮影の可能な超高速カメラ(NAC Image Technology, ULTRA Neo)を用い、顕微鏡用ズームレンズ(KEYENCE, VH-Z50-L)を装着して撮影した。ディレイジェネレー

タ(Stanford Research Systems, DG645)を用いて、放電、フラッシュランプの発光、および超高速カメラのゲートタイミングを同期させた。また、高電圧プローブ(LeCroy, PPE20kV)および電流プローブ(bergoz, FCT-016-1.25WB)により電圧・電流波形を測定し、カメラのゲート信号と共にオシロスコープ(LeCroy, WaveSurfer 104MXs-B)上でモニタリングした。計測器内部の遅れ、および同軸ケーブルの長さを考慮することで、可視化結果と電圧・電流波形を1 ns以下の精度で同期した。

2.3 発生確率と進展速度の評価

1次、2次ストリーマおよびスパークの発生は電流波形から推定することができる^{7,8)}。図2に示すように1次ストリーマの進展は振幅100 mAほどの繰り返しパルス電流で特徴付けられる⁷⁾。また、図3に示すように、2次ストリーマの進展は電流波形上に現れる400 mAほどの直流成分で特徴付けられる⁸⁾。加えて図4に示すように、2次ストリーマが1次ストリーマ先端から進展する場合も観測され、このとき電流波形上では、繰り返しパルス電流の途中から直流成分が現れる。以上のようにストリーマの進展形態は電流波形から推定することができる。またストリーマが対向電極に到達しスパークに至る場合、急激な電圧降下と数Aの電流が検出されるため電流波形による推定が可能である。なお、電圧の立ち上りに合わせて変位電流が計測されるが、変位電流が流れている間に放電は確認されなかった。なお、本実験系における変位電流のピーク値は、20 kVの印加電圧に対しておよそ2.3 Aに達する。発生確率は各電圧あたり10回以上の放電から評価した。図2-4において針電極先端に現れる不定形の影領域は、電圧の立ち上りからストリーマ進展開始までの遅れ時間にジュール熱で形成された気泡群を表す¹¹⁾。電流波形上に特有の電流値は検知されず、本稿の発生確率には考慮していない。

1次ストリーマの進展速度は、図2に示すような連続写真から半球ブラシ構造の平均進展速度として解析した^{7,8)}。図2の場合、半球ブラシ構造の半径の時間変化を計測し、線形近似で算出した勾配を平均速度としている。なお、進展速度は各条件あたり、3回以上の計測から評価した。

3. 結果とその検討

3.1 印加電圧

図5に1次、2次ストリーマおよびスパークの発生確率に及ぼす印加電圧の影響を示す。このとき、電極間距離は6 mm、静電容量は666 pFとし、超純水中で放電した。ストリーマの進展は1次ストリーマに始まり、さらに印加電圧を増加することで2次ストリーマの進展が開

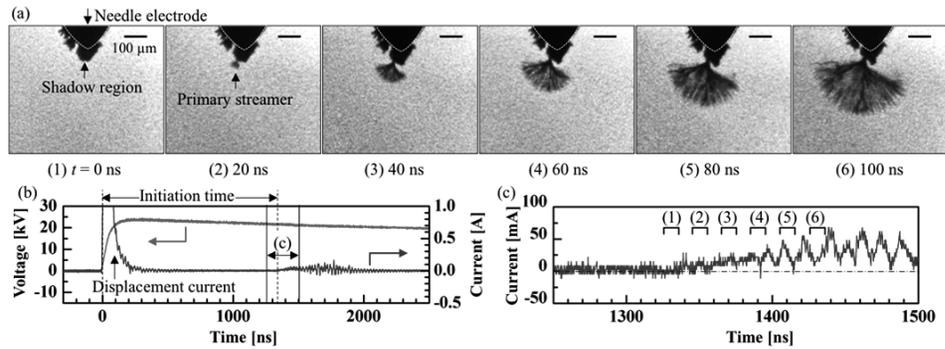


図2 1次ストリーマ進展の連続写真 (a), 同期された電圧・電流波形 (b), 放電波形の拡大図とカメラのゲートタイミング (c).
 Fig.2 (a) A series of images of primary streamer propagation in ultrapure water taken with an exposure time of 10 ns at 50 Mfps at 25.0 kV and (b) the synchronized waveforms of the applied voltage and the discharge current. (c) Magnification of the discharge current with camera gate timings. ($d = 10 \text{ mm}$, $\sigma = 0.8 \text{ }\mu\text{S/cm}$, $C = 666 \text{ pF}$).

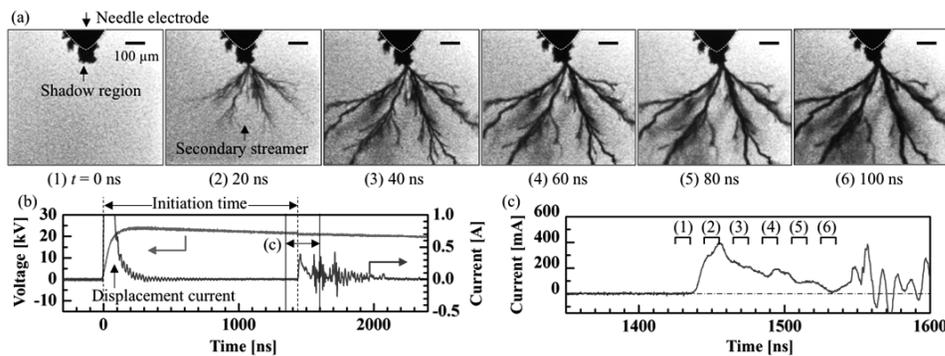


図3 2次ストリーマ進展の連続写真 (a), 同期された電圧・電流波形 (b), 放電波形の拡大図とカメラのゲートタイミング (c).
 Fig.3 (a) A series of images of secondary streamer propagation in ultrapure water taken with an exposure time of 10 ns at 50 Mfps at 25.0 kV and (b) the synchronized waveforms of the applied voltage and the discharge current. (c) Magnification of the discharge current with camera gate timings. ($d = 10 \text{ mm}$, $\sigma = 0.8 \text{ }\mu\text{S/cm}$, $C = 666 \text{ pF}$).

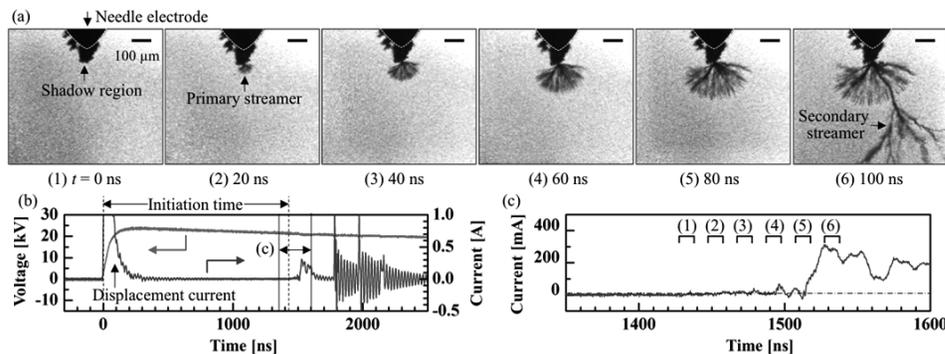


図4 1次ストリーマから2次ストリーマが進展する場合の連続写真 (a), 同期された電圧・電流波形 (b), 放電波形の拡大図とカメラのゲートタイミング (c).
 Fig.4 (a) A series of images of secondary streamer propagation from the tip of a primary streamer in ultrapure water taken with an exposure time of 10 ns at 50 Mfps at 25.0 kV and (b) the synchronized waveforms of the applied voltage and the discharge current. (c) Magnification of the discharge current with camera gate timings. ($d = 10 \text{ mm}$, $\sigma = 0.8 \text{ }\mu\text{S/cm}$, $C = 666 \text{ pF}$).

始する。最初に進展が確認される電圧を進展開始電圧と定義すると、1次ストリーマの進展開始電圧は16.5 kV、2次ストリーマの進展開始電圧は21.0 kVである。進展開始電圧を境にストリーマの発生確率は増加するが、2次ストリーマの進展開始電圧を越えると1次ストリーマの発生確率は減少傾向を示す。しかし、電圧が増加して

も1次ストリーマの発生確率はゼロにならない。これは、図4にみられるように、2次ストリーマの進展前に1次ストリーマが形成され、わずかに進展するためである。

図6に1次ストリーマの進展速度に及ぼす印加電圧の影響を示す。1次ストリーマの進展速度は印加電圧によらず一定で、その平均値は2.4 km/sになる。

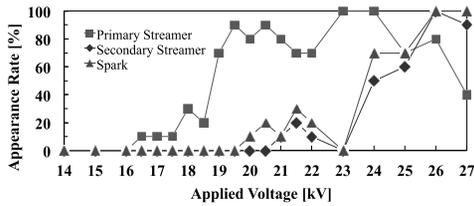


図5 1次、2次ストリーマおよびスパーク発生確率の印加電圧依存性。
Fig.5 Appearance rate of primary streamers, secondary streamers, and sparks in ultrapure water vs. applied voltage ($d = 6$ mm, $\sigma = 0.8 \mu\text{S}/\text{cm}$, $C = 666$ pF).

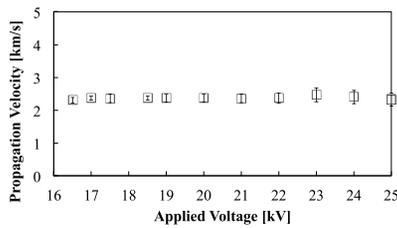


図6 1次ストリーマ進展速度の印加電圧依存性
Fig.6 Propagation velocity of primary streamers vs. applied voltage. ($d = 6$ mm, $\sigma = 0.8 \mu\text{S}/\text{cm}$, $C = 666$ pF).

3.2 電極間距離

図7に1次、2次ストリーマおよびスパークの発生確率に及ぼす電極間距離の影響を示す。このときコンデンサの静電容量は666 pFとし、超純水中で放電させた。図7(a)は電極間距離が2 mmの場合、(b)は10 mmの場合に各印加電圧における発生確率を表す。電極間距離の増加に伴い、発生確率は高電圧側に移行し、ストリーマが進展しにくくなる。図5、図7から、電極間距離が2 mm, 6 mm, 10 mmと増加すると、進展開始電圧は、1次ストリーマが14.5 kV, 16.5 kV, 19.5 kVに増加し、2次ストリーマは17.5 kV, 21.0 kV, 21.5 kVに増加した。

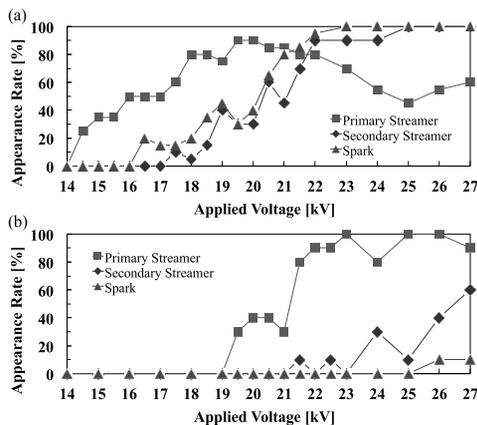


図7 1次、2次ストリーマおよびスパーク発生確率に及ぼす電極間距離の影響 ((a) 2 mm, (b) 10 mm).
Fig.7 Appearance rate of primary streamers, secondary streamers, and sparks vs. applied voltage at each gap distance: (a) $d = 2$ mm and (b) $d = 10$ mm. ($\sigma = 0.8 \mu\text{S}/\text{cm}$, $C = 666$ pF).

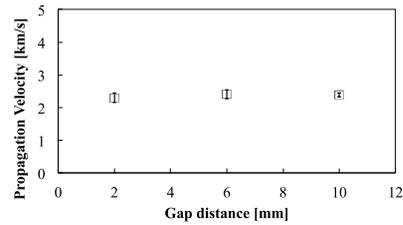


図8 1次ストリーマ進展速度の電極間距離依存性
Fig.8 Propagation velocity of primary streamers vs. gap distance. ($\sigma = 0.8 \mu\text{S}/\text{cm}$, $C = 666$ pF).

図8に1次ストリーマの進展速度に及ぼす電極間距離の影響を示す。1次ストリーマの進展速度は電極間距離の影響を受けず、平均速度は2.3 km/sとなる。

3.3 静電容量

図9に1次、2次ストリーマおよびスパークの発生確率に及ぼす静電容量の影響を示す。このとき電極間距離は6 mmとし、超純水中で放電させた。図9(a)は静電容量が2 nFの場合、(b)は6 nFの場合に各印加電圧に対する発生確率を表す。静電容量の増加に伴いストリーマの発生確率は低電圧側に移行する。図5と図9から静電容量が666 pF, 2 nF, 6 nFと増加すると、進展開始電圧はそれぞれ、1次ストリーマが16.5 kV, 13.5 kV, 11.0

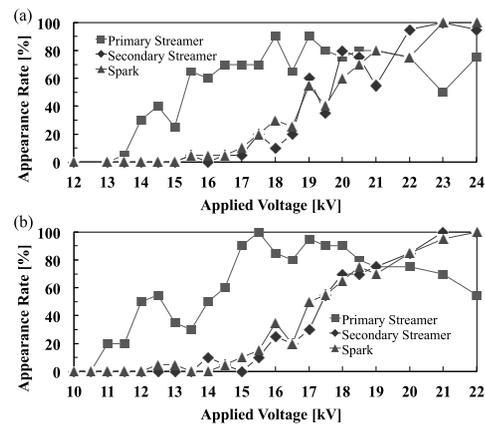


図9 1次、2次ストリーマおよびスパーク発生確率に及ぼす静電容量の影響 ((a) 2 nF, (b) 6 nF).
Fig.9 Appearance rate of primary streamers, secondary streamers, and sparks vs. applied voltage at each capacitance: (a) $C = 2$ nF and (b) $C = 6$ nF. ($d = 6$ mm, $\sigma = 0.8 \mu\text{S}/\text{cm}$).

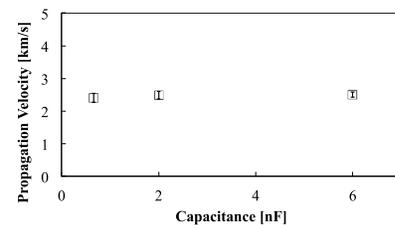


図10 1次ストリーマ進展速度の静電容量依存性
Fig.10 Propagation velocity of primary streamers vs. capacitance. ($d = 6$ mm, $\sigma = 0.8 \mu\text{S}/\text{cm}$).

kVに減少し、2次ストリーマが21.0 kV, 15.5 kV, 14.0 kVに減少した。

図10に1次ストリーマの進展速度に及ぼす静電容量の影響を示す。静電容量によらず、1次ストリーマの進展速度は一定で、その平均速度は2.4 km/sとなる。

3.4 電気伝導率

図11に1次、2次ストリーマおよびスパークの発生確率に及ぼす電気伝導率の影響を示す。このとき電極間距離は6 mmとし、コンデンサの静電容量は666 pFで放電した。図11(a)は電気伝導率が10 $\mu\text{S}/\text{cm}$ の場合、(b)は100 $\mu\text{S}/\text{cm}$ の場合に各印加電圧に対する発生確率を表す。電気伝導率が10 $\mu\text{S}/\text{cm}$ から100 $\mu\text{S}/\text{cm}$ に増加すると、1次ストリーマの進展開始電圧は15.0 kVから17.0 kVに増加し、2次ストリーマの進展開始電圧は18.0 kVから20.0 kVに増加する。電気伝導率が大きい場合、1次ストリーマへの影響が大きく、100 $\mu\text{S}/\text{cm}$ 水中では、1次ストリーマの発生確率が2次ストリーマの発生確率におおよそ一致している。図12に、10 $\mu\text{S}/\text{cm}$ および100 $\mu\text{S}/\text{cm}$ 水中の2次ストリーマ出現率のうち、図4のように1次ストリーマの進展を伴う場合と、図3のように2次ストリーマ単独で進展する場合の発生確率をそれぞれ示す。図12(a),(b)に示した破線はそれぞれ、図11(a),(b)の2次ストリーマの発生確率を示す。10 $\mu\text{S}/\text{cm}$ 水中では印加電圧の増加に伴い2次ストリーマ単独で進展する割合が増加するが、100 $\mu\text{S}/\text{cm}$ 水中では多くの場合、印加電圧によらず1次ストリーマの進展が先立つ。同様の傾向は図13に示す161 $\mu\text{S}/\text{cm}$ の水道水中の放電でもみられ、電気伝導率が増加すると2次ストリーマの進展が1次ストリーマ先端から開始する割合が増加する。

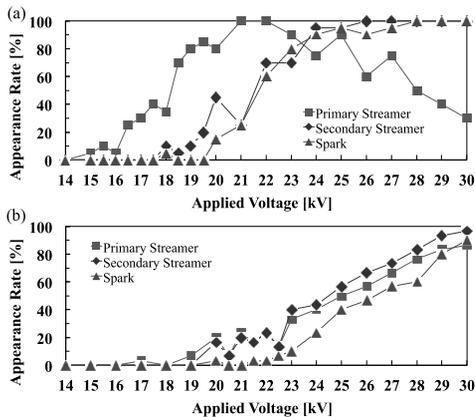


図11 1次、2次ストリーマおよびスパーク発生確率に及ぼす電気伝導率の影響 ((a) 10 $\mu\text{S}/\text{cm}$, (b) 100 $\mu\text{S}/\text{cm}$)。

Fig.11 Appearance rate of primary streamers, secondary streamers, and sparks vs. applied voltage at each conductivity: (a) $\sigma = 10 \mu\text{S}/\text{cm}$ and (b) $\sigma = 100 \mu\text{S}/\text{cm}$ ($d = 6 \text{ mm}$, $C = 666 \text{ pF}$).

図14に典型的な水道水中放電の連続写真と、同期した電流、電圧波形を示す。まず1次ストリーマが進展し、その先端から2次ストリーマが進展している。どちらのストリーマも超純水中のストリーマと進展形状に大きな差異は見受けられない。しかし、電流波形は大きく変化し、ストリーマ進展前から500 mA以上の定常的な直流電流が流れる。定常電流の発生にも関わらず、図4(c)と図14(c)を比較すると、水道水でも100 mA以下の振幅を持つ繰り返しパルス電流により1次ストリーマが進展し、その後の急峻な直流電流の立ち上がりから2次ストリーマの進展がみられる点は共通する。ただし、2次ストリーマの進展で計測される直流電流の大きさが超純水中では400 mAほどであるのに対し、水道水中では1 A近くに達し、この直流成分は残留する。また、図15に1次ストリーマの進展速度に及ぼす電気伝導率の影響を示す。2次ストリーマと同様に⁵⁾、1次ストリーマの進展速度も電気伝導率の影響を受けず、その平均速度は2.5 km/sとなる。

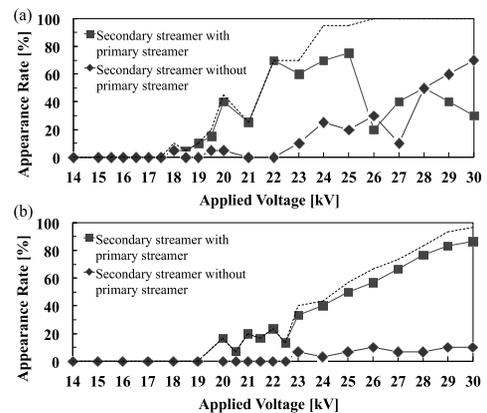


図12 2次ストリーマが1次ストリーマから進展する割合に及ぼす電気伝導率の影響 ((a) 10 $\mu\text{S}/\text{cm}$, (b) 100 $\mu\text{S}/\text{cm}$)

Fig.12 Appearance rate of secondary streamers with / without primary streamers vs. applied voltage at each conductivity: (a) $\sigma = 10 \mu\text{S}/\text{cm}$ and (b) $\sigma = 100 \mu\text{S}/\text{cm}$ ($d = 6 \text{ mm}$, $C = 666 \text{ pF}$). Each dot-line shows the total appearance rate of secondary streamers shown in Fig. 11 (a) and (b), respectively.

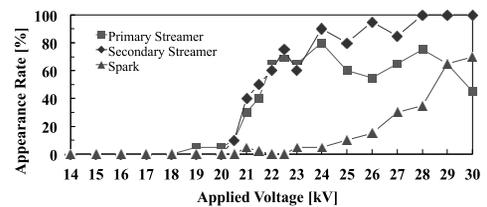


図13 水道水中における1次、2次ストリーマおよびスパーク発生確率の印加電圧依存性。

Fig.13 Appearance rate of primary streamers, secondary streamers, and sparks in tap water vs. applied voltage ($d = 6 \text{ mm}$, $\sigma = 161 \mu\text{S}/\text{cm}$, $C = 666 \text{ pF}$).

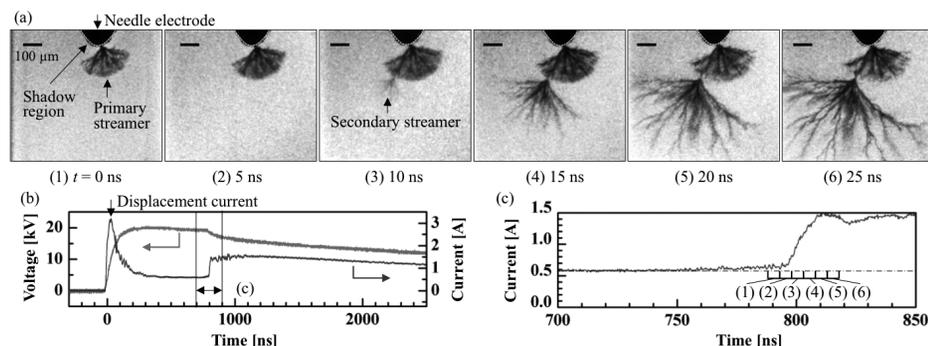


図 14 水道水中で 1 次ストリーマから 2 次ストリーマが進展する場合の連続写真 (a), 同期された電圧・電流波形 (b), 放電波形の拡大図とカメラのゲートタイミング (c).

Fig.14 (a) A series of images of secondary streamer propagation from the tip of a primary streamer in tap water taken with an exposure time of 5 ns at 200 Mfps at 23.0 kV and (b) the synchronized waveforms of the applied voltage and the discharge current. (c) Magnification of the discharge current with camera gate timings. ($d = 6$ mm, $\sigma = 161$ μ S/cm, $C = 666$ pF).

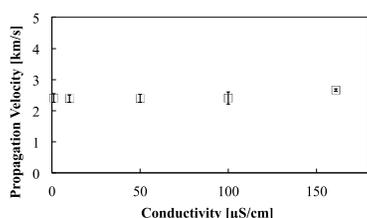


図 15 1 次ストリーマ進展速度の電気伝導率依存性

Fig.15 Propagation velocity of primary streamers vs. conductivity. ($d = 6$ mm, $C = 666$ pF).

4. まとめ

電極間距離, コンデンサの静電容量, 水の電気伝導率がストリーマの進展開始電圧に与える影響を検証した. 1 次, 2 次ストリーマともに進展開始電圧は, 電極間距離の増加, 静電容量の減少, 電気伝導率の増加に伴い増大した. また 1 次ストリーマの進展速度は, 印加電圧の大きさに加え, 電極間距離, 静電容量, 電気伝導率に影響されないことが示された.

本研究遂行にあたり, 科研費, 東北大学流体科学研究所公募共同研究, 東北大学国際高等研究教育機構国際高等研究教育院ならびに東北大学流体科学研究所中嶋智樹技術職員の支援を得ましたので, ここに感謝致します.

参考文献

- 1) J. F. Kolb, R. P. Joshi, S. Xiao, and K. H. Schoenbach: Streamers in water and other dielectric liquids. *J. Phys. D: Appl. Phys.*, **41** (2008) 234007
- 2) R. Ono and T. Oda: Formation and structure of primary and secondary streamers in positive pulsed corona discharge - effect of oxygen concentration and applied voltage. *J. Phys. D: Appl. Phys.*, **36** (2003) 1952-1958
- 3) 金澤誠司: 大気圧放電プラズマにおけるストリーマのダイナミクスと構造. *J. Plasma Fusion Res.*, **84** (2008) 348-355
- 4) W. An, K. Baumung, and H. Bluhm: Underwater streamer propagation analyzed from detailed measurements of pressure release. *J. Appl. Phys.*, **101** (2007) 053302
- 5) P. H. Ceccato, O. Guaitella, M. R. L. Gloaghec, and A. Rousseau: Time-resolved nanosecond imaging of the propagation of a corona-like plasma discharge in water at positive applied voltage polarity. *J. Phys. D: Appl. Phys.*, **43** (2010) 175202
- 6) S. Kanazawa, Y. Ichihashi, S. Akamine, R. Ichiki, T. Ohkubo, T. Sato, M. Kocik, and J. Mizeraczyk: Observation of liquid-gas phase dynamics from pre-breakdown to post-discharge in a single-shot underwater pulsed discharge. *J. Plasma Envi. Sci. Tech.*, **6** (2012) 49-53
- 7) H. Fujita, S. Kanazawa, K. Ohtani, A. Komiya, and T. Sato: Spatiotemporal analysis of propagation mechanism of positive primary streamer in water. *J. Appl. Phys.*, **113** (2013) 113304
- 8) H. Fujita, S. Kanazawa, K. Ohtani, A. Komiya, T. Kaneko and T. Sato: Fast propagation of an underwater secondary streamer by the appearance of a continuous component in the discharge current. *EPL*, **105** (2014) 15003
- 9) P. Gournay and O. Lesaint: A study of the inception of positive streamers in cyclohexane and pentane. *J. Phys. D: Appl. Phys.*, **26** (1993) 1966-1974
- 10) G. Touya, T. Reess, L. Pecastaing, A. Gibert and P. Domens: Development of subsonic electrical discharges in water and measurements of the associated pressure waves. *J. Phys. D: Appl. Phys.*, **39** (2006) 5236-5244
- 11) H. Fujita, S. Kanazawa, K. Ohtani, A. Komiya, T. Kaneko and T. Sato: Initiation process and propagation mechanism of positive streamer discharge in water. *J. Appl. Phys.*, **116** (2014) 213301