J. Inst. Electrostat. Jpn.

論 文

進展方向制御された水面上パルス放電プラズマの 時間分解分光計測

杉山 祐樹*.1, 林 拓弥*, 豊田 創平**, 佐久川 貴志*

(2017年8月7日受付;2017年10月19日受理)

Time-Resolved Spectroscopy of Spatially-Controlled Pulse Discharge Plasma over Water Surface

Yuki SUGIYAMA^{*,1}, Takuya HAYASHI^{*}, Sohei TOYODA^{**} and Takashi SAKUGAWA^{*}

(Received August 7, 2017; Accepted October 19, 2017)

Plasma in contact with water is generated when discharge using pulsed power at the water surface. Recently, research has been actively conducted on water treatment using water surface electrical discharge. However, much remains unknown regarding this plasma. Here, we controlled the direction of plasma progress on the water surface and performed time-resolved spectroscopic measurements at several position of plasma. We found differences in emissions varying between H α , O and OH radicals temporally and spatially. At positions within 10 cm from the electrode, OH radicals had the same emission intensity, and the emission time varied. In addition, strong emission at rising edge of the negative polarity pulse was observed.

1. はじめに

水面上や水中にパルスパワーを用いて放電すると、水 に接触したプラズマを発生させることができる. これに 伴い、紫外線、衝撃波、高電界、化学活性種が生成され る¹⁾. この化学活性種の中には OH ラジカル (OH・) や オゾン(O₃),酸素原子ラジカル(O·)のような酸化力 の高い物質が含まれている. このような化学活性種の中 でも、OH ラジカルには活性酸素の中で最も高い酸化力 があり、オゾンや過酸化水素で処理できないダイオキシ ンや農薬といった有機物を分解することができる²⁾. そ のため、これらの放電プラズマは、有機物の分解、殺菌 といった水処理への応用が期待され多くの研究が行われ ている³⁶⁾.特に水面上パルス放電プラズマは、気体と液 体の界面での放電であるため多くの活性種が生成される. これによって、様々な化学反応のプロセスを経て酸化力 の高い物質が生み出される.しかし,この放電プラズマは, 気体領域・プラズマ領域・液体領域の3種類の領域と2

キーワード:水面上放電, OH ラジカル,時間分解分光, 負極性パルスパワー

* 熊本大学大学院自然科学研究科 (〒860-8555 熊本県熊本市中央区黒髪 2-39-1) Graduate School of Science and Technology, Kumamoto University, Kurokami 2-39-1, Chuo-ku, Kumamoto, Japan

** 熊本大学工学部情報電気電子工学科 (〒860-8555 熊本県熊本市中央区黒髪 2-39-1) Department of Computer Science and Electrical Engineering, Kumamoto University, Kurokami 2-39-1, Chuo-ku, Kumamoto, Japan

y.sugiyama@st.cs.kumamoto-u.ac.jp

つの界面が存在するため、その特性は複雑なものとなり、 物理及び化学的な特性は不明な点が多い.特に水面上で の放電は多数枝分かれしてランダムに進展するため、そ の発光を狭い領域でとらえることは難しい.しかしなが ら、今後、水面上パルス放電プラズマの応用を進めるう えで、この特性の解明は重要な課題となっている.そこ で我々は、通常、多数枝分かれし、放射状に広がるスト リーマ状放電の進展を一方向のみに進展するようなガイ ドを作成することで、放電進展を制御し実験を行った".

本研究では水面上パルス放電プラズマに関する基礎研 究として、プラズマ発光の時間分解分光計測を行った. パルスパワー発生装置には磁気パルス圧縮(MPC: Magnetic Pulse Compression)方式の電源を用いた. ピーク 電圧を 10 kV とした場合、立ち上がり時間は 125 ns(ピー ク電圧の 20% - 90%)となり、正極性パルスの後に負極性 パルスが現れた.印加電圧は、10 kV から 20 kV の間で変 化させた. また、分光計測位置は 2.5 cm から 12.5 cm の間 で変化させた. 水面上に生成されたパルス放電プラズマの 発光スペクトルを通常分光、時間分解分光によって観察す ることで、放電によって生成される化学活性種の時間的、 空間的な変化について調査をした. この結果より、OH ラジ カルが最も効果的に生成される放電について考察を行った.

2. 実験方法

2.1 放電リアクタ及び実験装置

図1に本研究の実験構成,図2に放電リアクタの模式 図を示す.リアクタに用いた水槽の大きさは縦200mm, 横100mm,高さ100mmである.この水槽には,超純



図1 実験構成図

Fig.1 Schematic diagram of experimental setup.





水に塩化カリウム(KCl, ナカライテスク)を添加し, 導電率を 100 µS/cm に調整した水を 500 mL 入れている. 水上には PTFE で絶縁し、先端を 2 mm 露出したタング ステン(Φ0.4)の高電圧電極,水中には環状にした銅 の接地電極を配置した。また、雰囲気ガスはアルゴンと し、流量 3 L/min で供給している。水面には放電の進展 を制御する透明アクリル製ガイド(長さ180 mm,間隙 2 mm)を、高電圧電極を挟み込むように設置している。 ストリーマ状の放電はガイドに沿って、一方向に水面上 を這うように進展する.図3に本研究で使用したパルス 圧縮回路を示す. パルスパワー電源には磁気パルス圧縮 方式(MPC)を使用し、印加電圧を 10 kV~20 kV.パ ルス繰り返し周波数を4 pps (pps: pulses per second) と した. 初めに充電器によってキャパシタ Co (1250 nF) が充電される. 主スイッチの SiC-MOSFET が ON にな るとパルストランス PT を通して, 電荷はキャパシタ C1 (1 nF) に転送される. C₁への転送が終わると可飽和イン





ダクタ SI が飽和し, 電荷は C₁ からキャパシタ C₂ (1 nF) ヘパルス圧縮されながら転送され, 同時に負荷に高速高 電圧が印加される. 放電の電圧電流は高電圧プローブ (P6015A, Tektronix) とカレントモニタ (6600, PEARSON) を用いてデジタルオシロスコープ (DPO5104B, Tektronix) で測定した. 実験は室温 (25℃~27℃), 大気圧下で行 った. また, 実験前後で水温の上昇は 0.3℃, 導電率の 上昇は 0.3 μ S/cm であった.

2.2 分光計測

分光計測はマルチチャネル分光器(PMA-12, 浜松ホ トニクス)とディレイジェネレータ(DG535, STANFORD RESEARCH SYSTEMS)を用いて行った.リアクタ上部 に計測用開口部を設け,電極から水平方向に2.5 cm, 5 cm, 7.5 cm, 10 cm, 12.5 cmの位置の分光計測を行った. 分光器の受光部には集光レンズを取り付け,直径1 cm の範囲のプラズマ発光をそれぞれ受光した.また,水面 から集光レンズまでの高さは7 cm とした.

本研究では,通常分光と時間分解分光によって分光計 測を行った.通常分光とはパルス1 shot の発光を時間的 にすべて受光し分光する方法で,発光の時間積分を観測 する(図4(a)).このとき,分光器の露光時間を20 ms, Gain を4, アベレージングを16回とした.一方,時間 分解分光はパルス1 shot の発光を短い時間で区切って分 光する方法で,発光の時間変化を観測する(図4(b)). このとき,分光器の露光時間(Gate Width)を100 ns, 測定時間間隔(Step)を50 ns, Gain を8, アベレージ ングを16回とした.測定はそれぞれ5回ずつ行った.



- 図 4 分光計測のタイミングチャート (a) 通常分光 (b) 時 間分解分光
- Fig.4 Timing chart of spectroscopic measurement. (a) normal spectroscopy, (b) time-resolved spectroscopy.

3. 実験結果及び考察

3.1 **放電進展の様子**

図5に放電の電圧、電流、ディレイジェネレータへ送 るトリガー信号の波形を示す.電圧、電流は正極性パル スの後に負極性パルスが現れた.ピーク電圧を10kVと したとき、ピーク電流は2.11 Aとなった.また、電圧の 立ち上がり時間は125 ns(ピーク電圧の20% - 90%)と なった.放電の消費エネルギーは正極性パルスが45.1 mJ,約7 µs以降に現れる負極性パルスが3.39 mJとなった.

図6にガイドによって進展方向を制御した実際の水面上 パルス放電プラズマの進展の様子を示す.このとき,ピー ク電圧は10kVである.写真左側に高電圧電極があり,右 向きにストリーマ状の放電が進展していく.ピーク電圧を 10kVとしたときのストリーマ長は平均13.4 cmとなった.



図5 放電の電圧電流波形,トリガー信号

Fig.5 Typical waveform of discharge voltage, current and trigger signal.



図 6 進展方向制御した水面上パルス放電プラズマの様子 Fig.6 State of spatially-controlled pulse discharge plasma over water surface.

3.2 通常分光

図7に印加電圧を 10 kV としたときの, 電極から 2.5, 5,7.5,10,12.5 cm の位置における通常分光計測の結 果を示す.このグラフはプラズマの発光スペクトルを表 しており,横軸が発光波長,縦軸が発光強度となる.波 長 282 nm,309 nm,にOH (A-X)のスペクトル,486 nm,656 nm に水素のバルマー系列である Hβ,Hαのス ペクトル,777 nm,844 nm にO(5 P, 3 P)のスペクトル を確認することができる⁸⁾.これらは,主に電子衝突に よる水の解離によって生成されると考えられる.以下に その主要な反応を示す^{9,10)}.また,パルス幅が数 µs と短 いことから,熱による解離は少ないと考えられる.



図7 通常分光によって計測した水面上パルス放電プラズマ の発光スペクトル

Fig.7 Emission spectrum of pulse discharge plasma over water surface measured by normal spectroscopy.

$H_2O + e \rightarrow O (^{3}P) + H_2 (X) + e$	Te = 5.03 eV	(1)
$\mathrm{H_2O} + e \rightarrow \mathrm{OH}~(\mathrm{X}) + \mathrm{H}~(n=1) + e$	Te = 5.10 eV	(2)
$H_2O + e \rightarrow O (^1D) + H_2 (X) + e$	Te = 7.00 eV	(3)
$H_2O + e \rightarrow OH (A) + H (n = 1) + e$	Te = 9.15 eV	(4)
$\mathrm{H_2O} + e \rightarrow \mathrm{O} \ (^{1}\mathrm{S}) + \mathrm{H_2} \ (\mathrm{X}) + e$	Te = 9.22 eV	(5)
$H_2O + e \rightarrow O$ (³ P) + 2H + e	Te = 9.51 eV	(6)
雰囲気ガスである Ar の発光スペ	クトルは700~	~850

nm 付近に集中して現れる.水分子は Ar の準安定原子に よっても解離される^{11,12)}.

$$Ar^{m} [^{3}P_{0} (1s_{3})] + H_{2}O \rightarrow Ar + OH (A) + H$$
(7)

 $Ar^{m} [^{3}P_{2} (1s_{5})] + H_{2}O \rightarrow Ar + OH (A) + H$ (8)

波長 336 nm には窒素第二正帯の発光が見られる.この 窒素は空気由来であると考えられるが,発光強度が小さい ことから,空気成分 (N₂, O₂)のコンタミは小さいといえる.

また、電極からの距離が長くなると、これらの発光強 度は減少する.次に、OH ラジカル (309 nm)、Hβ (486 nm)、Hα (656 nm)、O ラジカル (777 nm)のスペクト ルのピーク強度と電極からの距離の関係を図8に示す. 電極から2.5 cmの位置においてHα、O の発光強度は OH の発光強度より強くなる.しかし、電極からの距離 の長い12.5 cmの位置ではOH の発光強度の方がHαや O の発光強度より強くなる.これは、電極からの距離に





Fig.8 Distance from the electrode dependence of the peak intensity.

対する発光強度の変化が異なるためであり,それぞれの 活性種の発光時間,水の解離による生成量の差異が関係 していると考えられる。

3.3 電圧依存性

図 9 (a) に印加電圧を 10 kV から 20 kV まで 2 kV ずつ 変化させたときの、電極から 5 cm の位置における OH ラ ジカル (309 nm), Hα (656 nm), O ラジカル (777 nm) のピーク強度の変化を示す.また、図 9 (b) は図 9 (a) において各ラジカルのピーク強度を Ar の 811 nm のピー ク強度で正規化している.電圧を変化させるとパルス幅 も変化するため、このときの分光時間は、印加電圧が 2 kV となる時間から 500 ns とした (図 9 (c)).図 9 (b)



(b) Arの 811 nm で正規化した各ラジカルピーク強度の電圧依存性





- 図9 発光スペクトルの電圧依存性(a)各ラジカルピーク強度の電圧依存性,(b)Arの811 nmで正規化した各ラジカルピーク強度の電圧依存性(c)立ち上がり付近の 電圧波形
- Fig.9 Voltage dependence of emission spectrum. (a) voltage dependence of peak intensity of each radical (b) voltage dependence of peak intensity of each radical normalized by Ar at 811 nm, (c) typical waveform of voltage around rising edge.

より, Hα, O の発光強度比は電圧の増加に伴って上昇する. 一方で, OH ラジカルの発光強度比は電圧が大きくなると 小さくなっている.印加電圧が大きくなると,水に供給 されるエネルギーは大きくなる.OH ラジカルは(2)(4)式 のように水の解離によって生成される.しかし,電圧が 大きくなるとOH 生成に必要なエネルギーに対して,そ のエネルギーは過多になる.その結果,(5)(6)式のよう な O の結合が切れる反応が多くなり,OH ラジカルの生 成効率は落ちたと考えられる.また,Hoffer らの研究で は 47 kV の印加電圧のとき,OH の発光は確認できない".

3.4 時間分解分光

図 10 に印加電圧を 10 kV としたときの, 電極から5 cmの位置における電圧電流波形と重ねた,OH ラジカル (309 nm), Ha (656 nm), O ラジカル (777 nm) の時 間分解分光計測の結果を示す. このグラフはプラズマ発 光スペクトルの時間変化を表し、横軸が時間、縦軸が発 光強度となる.先行研究では電子温度の算出が行われて いるが⁷⁾,本実験では HB の発光強度が小さいため,電 子温度の正確な算出は困難である. 電極から5 cm の位 置では電圧の印加から約100 nsの遅延の後,発光が観 察される. Hα は電流の変化を追従するように変化する. これは(2)(4)(6)式に示す反応によって水が解離し、水 素原子が生成されるためである。このとき解離される水 分子は、ストリーマが水面に接して気中を進展している ことから、主に水蒸気のH2Oである^{2,13,14)}. 電流が大き くなると OH が飽和し、トリガーから約3 µs で O の発 光強度が OH を超える. これは、プラズマに投入される エネルギーが大きくなり(2)(4)式の反応と比較して、さ らにOが解離する(5)(6)式の反応が進むためである.

正極性パルスでの発光は OH が最も長く, 電圧電流が 0 になるとすべての発光が終了する. 負極性パルスの印加が 始まると, Hα, O, OH ともに再び発光が始まる. このと き OH のみが正極性パルスと比較して発光強度が強くな る. これは, 正極性パルスで生成された OH(X) が(9)式



図 10 時間分解分光計測結果

Fig.10 Result of time-resolved spectroscopy.



図 11 Ha 発光強度の時間変化 Fig.11 Time variation of Ha emission intensity.



図 12 OH 発光強度の時間変化 Fig.12 Time variation of OH emission intensity.

のように励起されたことや, (10), (11)式に示す反応により 新たに OH が生成されたためであると考えられる^{2,9,15)}.

$OH(X) + e \rightarrow OH(A) + e$	Te = 4.01 eV	(9)
$\rm H + \rm H_2O \twoheadrightarrow \rm OH + \rm H_2$		(10)
$O + H_2O \rightarrow 2OH$		(11)

また,負極性パルスの立ち上がりでは負電荷の電子を 伴ったストリーマヘッドが水面を進展していく.よって, (2)(4)式の水の解離による OH の生成が考えられる.以 上のように,1 pulse の間に発光強度が時間的に変化する.

図 11, 図 12 に電圧電流波形と重ねた各電極からの距離における Ha と OH の発光強度の時間変化を示す. 図 11 に示すように Ha は電極からの距離が長くなると,最 大発光強度,発光時間がともに減少する.一方で図 12 に示すように OH は電極からの距離が長くなると 5 cm ~10 cm では最大発光強度に変化はなく,発光時間のみ が減少することがわかる.電極からの距離が長くなると, 電子温度は小さくなるが電子密度は変化しない⁷⁰.また, 電子温度,電子密度は電流の変化を追従するように変化 する¹⁶⁰. 電極からの距離が長くなると電子温度低下のた め,Ha の発光強度は減少する.また,5 cm~10 cm の 距離で OH ラジカルが,おおよそ同じ発光強度で飽和す ることについては以下の理由が考えられる.

(1) OH の生成と消滅がバランスしている.

- (2) 新たに生成, 消滅することなく, 既に存在している OH が励起, 発光を繰り返している.
- (3) (1)(2)が同時に生じている.
- (4) 上記以外の理由.

この正確な理由については,現時点で断定はできない ため今後の研究課題である.

また, Hα と OH で発光の時間変化が異なることが, 図 8 におけるピーク強度変化の違いに表れている.上述の通り, OH の励起種である OH (A) の 1 pulse 当たりの生成量は, 位置依存性は小さく時間依存性が大きいと考えられる.

3.5 OHラジカル生成に及ぼす印加電圧の極性比較

図13に負極性パルスを印加した場合の電極から5 cmの 位置における時間分解分光計測の結果を示す、ピーク電圧 を-10 kV としたとき、ピーク電流は-1.78 A となった. また、 電圧の立ち上がり時間は 125 ns (ピーク電圧の 20% - 90%) となった. 放電の消費エネルギーは負極性パルスが 41.2 mJ,約7μs以降に現れる正極性パルスが2.82 mJとなった. このことから、極性を除く放電の電圧電流波形の違いはほ とんど見られない. また, 正極性パルスを印加したとき(図 10) と比較して、発光全体では大きな変化は見られない。 しかし、図13では1.5 us付近のパルスの立ち上がりで、 OH の強い発光が見られる.ストリーマの先端では、イオ ンと比較して質量の軽い電子のみが加速される. 正極性パ ルスを印加した場合、電子は針電極に向かって加速するが、 負極性パルスを印加した場合、電子は水面に向かって加 速し,水分子を解離する.このことが,OHの発光を強く する要因であると考えられる.一方で、立ち上がり以外は リーダの発光であり、極性による違いは見られない.



図13 負極性パルスの時間分解分光計測結果

Fig.13 Result of time-resolved spectroscopy (negative polarity pulse).

3.6 OHラジカル生成におけるパルスの最適条件

3.3 節に述べたように水面に接した Ar の 811 nm の発光 に対する OH ラジカルの発光は電圧が大きいほど,小さ くなる.このことから,効率よく OH (A)を生成するには, 印加電圧を小さくすることが有効であると考えられる.ま た、3.4節で述べた、瞬間的な OH の発光の強さが、電極 からの距離に依存しないことから、ストリーマ長は長いほ ど良いと考えられる.ストリーマの進展速度は電圧の立ち 上がりが速いほど速くなる ¹⁷⁾. そのため, ストリーマ長を 長くするためには高速な立ち上がりの出力電圧が必要で ある. 3.5節で述べたように負極性パルスでは正極性では 見られない、立ち上がりでの OH の強い発光が見られる. この立ち上がりのみで OH を生成することが、生成効率 向上につながる.この実現には短いパルス幅が必要とな る.以上より、放電可能な小さい電圧、高速な立ち上がり、 短パルス,負極性パルスの印加により効果的に OH (A) を生成することができるといえる.しかし、一般的に負極 性の沿面放電はストリーマ長が短くなる^{18,19)}.また、パル ス幅が短くなることで、進展が十分に進む前に電圧の印 加が終了し、プラズマ領域が小さくなる、このことから、 放電処理面積が小さくなることが予想される.

4. まとめ

本研究では、水面上パルス放電プラズマの発光スペク トルを通常分光計測,時間分解分光計測によって観察し た.放電プラズマの分光は、印加電圧、分光計測位置(電 極からの距離)を変化させて行った.本実験系では、時 間分解分光において Hβ や Hγ の発光は確認できなかっ たが、より強力なパルスパワーを用いることで、これら の発光が確認されるようになる.そのため、水素原子の 発光強度比によって算出される電子温度、電子密度の時 間変化、位置変化が議論できると考えられる⁷.

ガイドを、高電圧電極を挟み込むように設置すること によって、水面上の放電の進展方向を制御することがで きた.ガイドによって進展制御されたストリーマの長さ は、ピーク電圧 10 kV のとき平均 13.4 cm となった.

分光計測の結果,電圧を大きくするとArの発光に対 して,Hα,Oの発光は増加し,OHの発光は減少した. また,時間的,空間的にHα,O,OHの間には発光の変 化に違いがあった.時間的には,Hαは電流の変化を追 従するように変化し,OHは電流が大きくなると飽和し た.OHが飽和するとOの発光強度が大きくなると飽和し た.OHが飽和するとOの発光強度が大きくなると、最大発 光強度,発光時間ともに減少し,OHは発光時間のみ減 少した.負極性パルスを印加した場合,正極性と比較し て発光全体では大きな変化は見られないが,パルスの立 ち上がりでOHの強い発光が見られた.

以上より, 放電可能な小さい電圧, 高速な立ち上がり, 短パルス, 負極性パルスによって効果的に OH (A) 生 成することができると考えられる.

参考文献

- 秋山秀典,勝木淳,金澤誠司,下村直行,高木浩一,塚本俊介, 南谷靖史,山下敬彦: EE Text 高電圧パルスパワー工学,p. 128,株式会社オーム社(2003)
- 2) S. Kanazawa, H. Kawano, S. Watanabe, T. Furuki, S. Akamine, R. Ichiki, T. Ohkubo, M. Kocik and J. Mizeraczyk: Observation of OH radicals produced by pulsed discharge on the surface of a liquid. Plasma Sources Sci. Technol., **20** (2011) 034010
- S. Kawano, K. Wada, T. Kakuta, K. Takaki, N. Satta and K. Takahashi: Influence of pulse width on decolorization efficiency of organic dye by discharge inside bubble in water. J. Phys.: Conf. Ser., 441 (2013) 012007
- 布川史章,六角虎太郎,鈴木進:気泡内パルス放電によるフミン酸塩の吸光度の減少.電気学会論文誌 A, 132 (2012)664
- S. Gnapowski, H. Akiyama, T. Sakugawa and M. Akiyama: Effects of Pulse Power Discharge in Water on Algae Treatment. IEEJ Trans. FM, 133 (2013) 198
- 6) P. Lukes, E. Dolezalova, I. Sisrova and M. Clupek: Aqueous-phase chemistry and bactericidal effects from an air discharge plasma in contact with water: evidence for the formation of peroxynitrite through a pseudo-second-order post-discharge reaction of H₂O₂ and HNO₂. Plasma Sources Sci. Technol., **23** (2014) 015019
- P. Hoffer, Y. Sugiyama, S. H. R. Hosseini, H. Akiyama, P. Lukes and M. Akiyama: Characteristics of meter-scale surface electrical discharge propagating along water surface at atmospheric pressure. J. Phys. D: Appl. Phys., 49 (2016) 415202
- B. Sun, M. Sato and J. S. Clements: Optical study of active species produced by a pulsed streamer corona discharge in water. J. Electrostat., 39 (1997) 189
- R. P. Joshi and S. M. Thagard: Streamer-Like Electrical Discharges in Water: Part II. Environmental Applications. Plasma Chem Plasma Process, 33 (2013) 17
- Y. Itikawa and N. Mason: Cross Sections for Electron Collisions with Water Molecules. J. Phys. Chem. Ref. Data, 34 (2005) 1
- L. Li, A. Nikiforov, Q. Xiong, N. Britun, R. Snyders, X. Lu and C. Leys: OH radicals distribution in an Ar-H₂O atmospheric plasma jet. Phys. Plasmas, **20** (2013) 093502
- 12) H. I. A. Qazi, Q. Y. Nie, H. P. Li, X. F. Zhang and C. Y. Bao: Comparison of electrical and optical characteristics in gas-phase and gas-liquid phase discharges. Phys. Plasmas, 22 (2015) 123512
- P. Lukes and B. Locke: Plasmachemical oxidation processes in a hybrid gas-liquid electrical discharge reactor. J. Phys. D: Appl. Phys., 38 (2005) 4074
- 金澤誠司,平尾迪彦,赤峰修一,市来龍大,大久保利一, Marek KOCIK, Jerzy MIZERACZYK:水面上放電で生成された OH ラジカルの LIF 法による検出.静電気学会誌, 34 (2010) 14
- 15) A. Sarani, A. Nikiforov and C. Leys: Atmospheric pressure plasma jet in Ar and Ar/H₂O mixtures: Optical emission spectroscopy and temperature measurements. Phys. Plasmas, 17 (2010) 063504
- 16) M. S. Simeni, A. Roettgen, V. Petrishchev, K. Frederickson and I. V. Adamovich: Electron density and electron temperature measurements in nanosecond pulse discharge over liquid water surface. Plasma Sources Sci. Technol., 25 (2016) 064005
- I. Yagi, S. Okada, T. Matsumoto, D. Wang, T. Namihira and K. Takaki: Streamer Propagating of Nanosecond Pulse Discharge with Various Rise Times. IEEE Trans. Plasma Sci., 39 (2011) 2232
- 18) 遠藤正雄,千葉正邦,高須和彦,高野哲美:放電ハンドブック
 ク 上巻,堀井憲爾, pp. 317-318,株式会社オーム社(1998)
- 19) M. Chiba, A. Kumada, K. Hidaka and T. Kouno: FUNDAMENTAL CHARACTERISTICS OF SURFACE STREAMER DEVELOPMENT IN AIR. T. IEE Japan, 116 (1996) 998