

研究論文

直流放電へのパルス電圧重畳による 液体陰極大気圧マイクロ放電の生成

菊 地 淳,武藤貴昭,井深真治,石井彰三
東京工業大学 大学院理工学研究科 電気電子工学専攻
(論文受付:2011年10月17日/論文受理:2012年1月9日)

微細ヘリウムガス流を導入したノズル電極と液体陰極間で大気圧パルス・マイクロ放電を生成するとき, 2kV 程度の比較的低いパルス電圧では生成できない.そこで直流電圧によりあらかじめ放電を形成し,そこにパ ルス電圧を重畳することにより,電極間距離 1.0 mm 以上としても,1-2kV 程度のパルス電圧による放電生成を 実現した.パルス電圧重畳を用いた方法の動作範囲は直流放電の電流値によって決まり,電極間距離 1.0-1.5 mm の場合,直流電流を 2.1 mA 以上とすれば,パルス・マイクロ放電を生成できる.ただし,パルス放電の繰り返し 周波数を 100 Hz から 1000 Hz へ高くすると,パルス電圧に対する放電遅れが 19 ns から 39 ns まで増加し,さら にガス流に沿わないパルス放電の進展が確認された.このとき液面の状態を観測すると,液面がくぼんだ形状を とることがわかった.くぼみの変形深さは,パルス放電の繰り返し周波数とピーク電流によって変化し,周波数 1000 Hz,ピーク電流 14 A としたとき,44 mm まで増加した.

Keywords:

microplasma, DC discharge, pulsed microdischarge, liquid cathode, atmospheric

1. はじめに

大気圧下で生成されるマイクログロー放電は有害物質の 分解,元素分析,薄膜堆積や表面改質など幅広い分野で応 用が期待されている[1,2].また,真空排気が不要であるた め高価な真空装置などを必要とせず,低コストで運転でき るといった利点がある.しかしながら,大気圧下であるた め,平均自由行程が短く,熱プラズマへ容易に移行してし まうという問題点がある.

大気圧グロー放電を安定に生成するために、マイクロプ ラズマを利用する方法があり、プラズマの寸法を1mm以 下へ小さくして, 直流電力による大気圧グロー・マイクロ 放電の安定生成が報告されている[3,4].また,短パルス電 圧により、放電が熱プラズマであるアーク放電へと遷移す る前に電力注入を遮断すれば、大電力パルスグロー放電の 生成が可能である[5]. パルス電力で生成するパルスグ ロー放電は、 直流放電と比べて、 瞬時注入電力を大きくで きるとともに、パルス電圧、パルス幅や繰り返し周波数な ど制御パラメータが多いという特徴がある.筆者らは, 1mm以下の微小電極間へ微細Heガス流を導入し、パルス 幅 1.0 µs 以下の電圧印加により、パルスグロー・マイクロ 放電を安定に生成している[8,9].非線形伝送線路を用い てパルス幅, パルス間隔がそれぞれ 100 ns 以下である高速 高電圧パルス列 (バーストパルス)を発生して, 陰極形状 によらず安定したパルスグロー・マイクロ放電も生成して いる[10].

大気圧マイクロ放電を水処理や医療応用に適用するた

め、液体を媒質や電極として用いた放電が近年、研究され ている[11-13].筆者らは、硫酸ナトリウム水溶液などを陰 極とし、微細ヘリウムガス流を導入して、微小電極間で安 定な大気圧グロー・マイクロ放電が得られることを報告し た[14].この放電では直流電圧を印加する場合、低電流で は微細ガス流とその周辺空気の原子・分子が主に発光する が、電流を増加させると、放電の発光特性が変化した.放 電電流が20mA以上では、硫酸ナトリウム水溶液の表面が 気化し、金属イオンであるナトリウムの発光スペクトル線 が観測される.直流電圧をパルス変調すると、電圧を印加 するパルス幅によってナトリウムの発光強度が時間的に変 化し、デューティー比によって発光特性の制御ができるこ とがわかった[15].

一方で、液体電極を用いて、電流が数A以上となる大電 カパルス放電の研究例は少ない.液体電極を用いたパルス 放電において問題となるのが、金属陰極と比べて放電開始 電圧が高くなること、静電気力で液体が対向電極側に引き 寄せられ、液面が不安定になることである[16]. Bruggemanらは、大気中で1.5 mmの針対水電極間にパル ス放電を生成するとき、繰り返し周波数3kHz、パルス幅 600 ns、5 kV の電圧を印加している[17].しかしなが ら、このような電圧を出力できるパルス電源は高価で、か つ大気圧マイクロ放電に対しその寸法が大きくなってしま う.放電開始電圧を低く抑えるために、金属電極では電極 間距離を短くするといった方法が用いられる.しかし液体 電極の場合、電極間距離を0.5 mmより小さくすると、電界

Generation of Liquid-Cathode Atmospheric Microdischarges by Applying Pulsed Voltages to a DC DischargeKIKUCHI Jun, MUTO Takaaki, IBUKA Shinji and ISHII Shozocorresponding author's e-mail: kikuchi@pwr.ee.titech.ac.jp

©2012 The Japan Society of Plasma Science and Nuclear Fusion Research が大きくなるため静電気力が増加し,液面が対向電極側に 引き寄せられ,電極間が短絡してしまうことがある.その ため,電極間距離を1.0 mm以上として,パルス電圧はでき る限り低いことが望ましい.そこで,大気圧パルス・マイ クロ放電を,1.0 mm以上の電極間,2 kV程度のパルス電圧 という条件下で生成する手法を,直流放電によりあらかじ め放電路を形成しておくことで実現させることとした.

本論文では, 直流放電と放電電流が10 A以上となるパル ス放電を重畳した放電を利用し, 液体電極を用いた大気圧 パルス・マイクロ放電の生成手法とともに, それを安定に 生成するための課題について述べる. その課題とは, パル ス電圧の繰り返し周波数を増加させた場合, 一様な平面上 の液体がくぼむ現象である. 金属を電極として用いる放電 では生じないため, これは液体電極を用いた放電特有の課 題である.

2.実験装置

液体陰極を用いた大気圧パルス・マイクロ放電生成のた めの回路の概略を図1に示す.陽極は内径0.5 mm,外径 0.8 mmのステンレススチール製ノズル電極であり,これを 開放空気中で微動ステージに固定し,µmオーダで電極間 距離を調節可能とした.ノズル電極から導入される微細へ リウムガス流量はマスフローコントローラ (KOFLOC: 8300MC)により制御し,流量は210 sccmとした.陰極は 直径32.5 mm,高さ14 mmのガラス容器中に入れたNa₂SO₄ 電解質水溶液でその濃度を0.1%,0.5%,1.0%に変化させ た.ガラス容器の底にはステンレス平板を置き,これを接 地した.実験中において,放電の熱により液体が蒸発し, 液面位置の低下,水溶液濃度の変化が生ずる.そこで,液 体電極を入れたガラス容器の下に容積の大きな容器を置 き,二重構造にして2つの容器間で液体をポンプで循環さ せ,液面の高さと水溶液濃度を一定に保った.

直流電源とパルス電源は電極に並列に接続し、直流とパルスを重畳した電圧を電極間に印加する.直流回路には、 電流制限用抵抗 200 kΩ とともに、直流電源(松定プレシ ジョン株式会社:HAR-10P30)の保護用にダイオード (ED-75X1, 耐圧 75 kV)と、100 μHの空芯インダクタを直



図1 直流とパルス電圧による重畳放電生成ための回路と電極構成.

列に接続した.ダイオードとインダクタにより高周波成分 を含むパルス電圧を遮断する.直流電源は電流制限モード にて電流は1-7mAまで制御した.パルス電源回路はパル スチャージャー,パルス形成線路(Pulse Forming Network: PFN),半導体スイッチ(IGBT)およびダイオードにより 構成されている. PFN はキャパシタ1.0nF(耐圧 6 kV), インダクタ2.0 µHにより構成される16段のはしご型回路で あり,特性インピーダンスは45 Ω,パルス幅は1.2 µs であ る.パルス・マイクロ放電を繰り返し動作させるために, PFNの充電はパルスチャージャー(LAMBDA社)を用い, 充電電圧は0.8-2.0 kVとした.PFNの投入スイッチとして 4 直列した IGBT(BUP313,耐圧1200 V)を使用し,ファ ンクションジェネレータ(BNC社:MODEL555)からの出 力信号で,IGBTのゲート駆動回路を動作させた.繰り返 し周波数は100-1000 Hzの範囲で変化させた.

負荷に直列接続したダイオード(STTA812D,耐圧 1200 V,4 直列)は、パルス電源回路側に直流電源からの 電流が PFN 側に流れ込まないようにするために必要であ る.このダイオードが無い場合、パルス電圧印加後は PFN のインピーダンスが放電部の抵抗よりも低くなるため、直 流電源からの電流は放電部ではなく、PFN 側に流れ、直流 放電が維持できない.よって、PFN へ直流電源の電流が流 れることを防ぐダイオードの挿入により、大気圧パルス・ マイクロ放電を生成するための、直流放電が維持される.

電極間の電圧は, 陽極と接地間の電位を高電圧受動プ ローブ(Tektronix: P6015A)を用いて, 放電電流はCT センサ(Pearson: MODEL 2878)をパルス電源側に設置し, デジタルオシロスコープ(IWATSU: DS-4262)で観測し た. 放電の可視光像の観測は, 光学倍率0.7-4.5倍の拡大レ ンズ(Edmund: VZM450)により拡大し, これと組み合わ せ接続されたデジタルカメラ(OLYMPUS: E-410)を用い て撮影した.

液面が変形する進展過程の観測には、1コマの露光時間 が0.2 ms である高速度ビデオカメラ(REDLAKE社: MO-TION PRO X4)を使用した.高速度ビデオカメラの反対側 に照明用の光源を置き、液面の変形を観測した.この観測 に限り、ポンプによる液体の循環で液面が不安定にならな いようポンプは止めて撮影した.また、液面を観測しやす いように、液体電極容器は幅31 mm、高さ30 mm、奥行き 10 mm のアクリル容器を用い、光軸方向の容器の厚さを薄 くした.溶液中に白金線を浸して電極とし、外部回路と接 続した.

3. 液体陰極を用いた大気圧重畳放電の生成

直流放電と並列にパルス電圧を印加し、大気圧パルス・ マイクロ放電を生成する手法を検証した。ヘリウムガス流 量を210 sccm, Na₂SO₄ 水溶液濃度を1.0%,電極間距離を 1.5 mm,直流側のバイアス電流を4 mA, PFN の充電電圧 を1.9 kV,繰り返し周波数を100 Hz としたときにおける, 典型的なパルス放電電流と電極間電圧を図2に示す.ま ず,直流電圧によって直流予備放電を生成し、この条件下 で直流バイアス電流を4 mAとすると、電極間電圧は700 V Contributed Paper Generation of Liquid-Cathode Atmospheric Microdischarges by Applying Pulsed Voltages to a DC Discharge J. Kikuchi et al.



図2 パルスマイクロ放電の電極間電圧と電流波形.

で維持される.この直流予備放電が形成されている状態 で,時刻0でパルス電圧を印加することでパルス放電電流 が流れる.なお、パルス電圧が印加される瞬間は、直流予 備放電のインピーダンスが約175 kΩ であるため, PFN か らみると負荷は開放状態と見なせる.したがって、電極間 電圧は充電電圧とほぼ同じ値まで立ち上がり、その後なだ らかに低下する.パルス放電電流はパルス印加直後は急峻 に立ち上がるが、それ以降は緩やかに増加し、ピーク電流 は13.4 A だった.図2から求めた最大瞬時電力および1パ ルス注入エネルギーは、それぞれ19kW、25mlであり、瞬 時電力が大きな液体陰極を用いた大気圧パルス・マイクロ 放電の生成が実現できた. なお, 1パルスの注入エネル ギーは,図2の時刻-0.1から4.0 μs まで電極間電圧と放電 電流の積を時間積分し、求めた. ここで、直流予備放電と パルス・マイクロ放電の消費電力を比較すると、直流予備 放電は電極間電圧700 V,直流バイアス電流4mAであるた め,2.8 Wとなり,パルス・マイクロ放電は1パルス注入エ ネルギー25 mJ, 繰り返し周波数100 Hz であるため, 2.5 W となる.繰り返し周波数を 1000 Hz などに上げた場合,パ ルス・マイクロ放電の消費電力は 20 W 以上となるが, 消 費電力の比は1/10程度までしか広がらない. したがって応 用を検討するときは、低電流の直流放電と大電流のパル ス・マイクロ放電を重ね合わせた重畳放電の特性を活かす 必要がある.

図3に直流放電のみと直流とパルス重畳放電の可視光像 を示す.露光時間はそれぞれ20msである.直流放電のみ では,負グローが明確に認められるが,パルス・マイクロ 放電では,液面に広がる発光が確認できる.露光時間を 50nsとしてICCDカメラによりこのパルス・マイクロ放電 を高速度撮影すると,図2における時刻0.05-0.1 µsでは, 細い発光となる.そこから発光は拡散していき,ノズル外 径と同じくらいの放電路が形成される.電極間電圧が平坦 となっている0.7-0.75 µsでは液体表面に発光が観測され た.また,すべての放電進展過程でフィラメント状の放電 になることはなく,一様な発光分布となった.大気中で水 を陰極としたパルス放電は,放電開始後300 nsで放電が フィラメント状に変化したが,本研究では微細へリウムガ ス流を導入し,一様な放電を生成できる[17].液体陰極を



(b) DC and pulsed voltages

図3 液体陰極を用いたマイクロ放電の時間積分された可視光像.

用いたパルス放電と金属陰極を用いたものとの大きな違い が電流の変化に表れている.金属陰極を用いたパルス放電 では,電圧印加に伴う電流上昇は200 ns 程度で収まり,パ ルス電流波形は矩形波に近い[8,9].一方で,液体陰極では 電流は500 ns 以上増加し続け,同様な傾向は水を陰極とし たパルス放電でも見られる[17].したがって,これは液体 が介在する放電において特有の現象であるといえ,液体電 極がパルス放電の特性に影響を与えていることがわかる.

大気圧パルス・マイクロ放電が安定に生成される動作条件について,直流電流と電極間距離を変えて検討した.その他の条件は上記と同一として実験した.まず,直流放電の電流を7mAとした状態でパルス・マイクロ放電を生成した後,徐々に直流電流を減少させ,パルス放電進展が不安定となったときの直流電流値を5回測定し,その平均値と最大値,最小値を求めた.また,直流放電のみの場合についても,直流放電が不安定となった電流値を調べた.これらの電流値を電極間距離に対してまとめた結果を図4に示し,プロットが平均値,エラーバーが5回の測定におけ



る最大値と最小値に対応する.直流放電が電極間に形成さ れていれば、必ずパルス放電が進展するとは限らず、電極 間距離 4.5 mm 未満では直流放電を維持するよりも大きな 電流がパルス・マイクロ放電生成に必要となった.また, 電極間距離を 6.5 mm 以上とすると,安定した放電を生成 できなかった.金属電極を用いた場合でも、大気中で 5mm 程度の電極間に放電を進展させるのにパルス幅 10 ns, 5 kV 以上のパルス電圧を繰り返し周波数 10 kHz で印加している研究例もあり[18],絶縁破壊電圧が高くな る液体陰極放電では、パルス電圧が十分でなかったと考え られる. 直流予備放電を利用した本実験では, 電極間距離 が 5.0 mm 程度でも,バイアス電流を 4 mA 以上とすれば, 2kV 程度の電圧でパルス・マイクロ放電の生成が可能で ある. 直流電圧とパルス電圧を重畳させる本方式は、半導 体スイッチの耐圧や直列接続数の低減ができるため、高電 圧パルス電源を設計する上で難しい耐圧の確保という制約 から解放される点で有効である.

パルス電圧の繰り返し周波数を増加させたときに、大気 圧パルス・マイクロ放電の特性変化について検討した. 図5に、電極間距離1.0mm, 直流電流4mA, 充電電圧 1.9 kV としたときの放電開始電圧,放電遅れと繰り返し周 波数の関係を示す.各プロットとエラーバーは5回測定し た平均値と最大値,最小値を表す.繰り返し周波数を高く すると、放電開始電圧は増加するが、700 Hz で飽和し始め た. この電圧増加は、放電遅れより生じており、遅れ時間 の分だけ放電開始電圧が増加する.しかし、繰り返し周波 数 700 Hz 以上ではパルス電圧最大値まで印加電圧が増加 するため、放電開始電圧は飽和し、一方で放電遅れは増加 し続ける.通常,金属電極を用いた大気圧パルス・マイク ロ放電においては,先行する放電で生じた荷電粒子や活性 種が多く残存するため、繰り返し周波数の高い方が放電進 展が容易となるが、液体陰極を用いた場合反対の結果と なった.この要因として、後述する液面の変形現象による 電極間距離の増加が考えられる.

おける液面の変形現象を観測するため、カメラの光軸を液面から30度傾け、放電の可視光像と液面の状態を撮影した. 露光時間を20 ms 一定として撮影した写真を図6に示す. パルスの繰り返し周波数は100 Hz, 500 Hz, 1000 Hz の三種類とし、PFNの充電電圧を0.8-1.8 kVの範囲で変化させた. また、放電形成前の電極間距離は1.5 mm, 直流電流は4 mA とした.

繰り返し周波数が100 Hzのとき, 放電形状は充電電圧を 変化させてもほぼ変化が見られなかった。繰り返し周波数 を 500 Hz, 充電電圧を 1.2 kV とすると, 放電長が電極間距 離1.5 mmよりも長くなった. さらに充電電圧を1.8 kVまで 上昇させると, 放電長の増加とともに, 液体電極表面にお ける発光の広がりが観測された. 放電長が長くなっている こと、液面における発光がノズル直下の周囲でも発生する ことより、液面がくぼんだ形状になっていると予想され る. 繰り返し周波数を 1000 Hz とすると, 500 Hz よりもさ らに放電長と液面の発光領域が大きくなった.変形現象は 繰り返し周波数が100 Hzのときには見られない. したがっ て,パルス放電の間隔が長いと,単一のパルス放電により 液面が変形しても元の平坦な状態に戻るが、高周波化でそ の間隔を短くすると、液面が戻る前に次のパルス放電が生 成され,液面が変形していったと考えられる.液面の変形 深さが大きい場合、ガス流に沿わない放電が進展する場合 があり、再現性の良いパルス・マイクロ放電を生成できな くなるという点が問題となる.

液面の変形現象についてより詳細に調べるため、フレー ムレート 5000 fps, 露光時間 0.2 ms の高速度ビデオカメラ により液面における変形の進展過程とその深さを観測し た. Na₂SO₄ 水溶液濃度は 1.0% で、電極間距離を 1.0 mm, 直流電流を4 mA, 充電電圧を 1.9 kVとした.繰り返し周波 数に対する液面の変化を図7に示す. 100 Hz はパルス放電 後8.4-8.6 ms時の液面の状態を、その他の周波数は変形が 進展し、飽和した状態を載せた. 100 Hz では、パルス放電



図6 充電電圧と繰り返し周波数に対する放電と液面の変化.

4.液体陰極表面における変形現象

液体陰極を用いた大気圧パルス・マイクロ放電生成時に



図5 パルス電圧印加時の放電開始電圧とその放電遅れの周波数 特性.

Contributed Paper Generation of Liquid-Cathode Atmospheric Microdischarges by Applying Pulsed Voltages to a DC Discharge J. Kikuchi et al.



図7 液面の変形深さの繰り返し周波数依存性.

 $0.8 \,\mathrm{kV}$ 1.4 kV 82 Hollow depth [mm] 1.9 kV 2 0 -1 600 800 1000 0 200 400 Frequency [Hz] (a) Na₂SO₄ 水溶液濃度 1.0% 0.1% Â 0.5% Hollow depth [mm] 1.0% . 3 2 0 -1 800 1000 0 200 400 600 Frequency [Hz] (b) 充電電圧 1.9 kV

図8 水溶液濃度,充電電圧と繰り返し周波数に対する液面の変 形深さの変化.

後から 4.2 ms までの間,液面の変形が大きくなっていく が、その後徐々に変形が小さくなり、8.4 ms には液面の状 態が元に戻った.繰り返し周波数が大きくなると、液面が 元の状態に戻る前に次のパルス電圧が印加されるようにな る. そのためパルス放電が形成されるごとに、液面の変形 深さは大きくなっていき、ある一定値で飽和した. そこで、 飽和した状態の液面の変形深さを求め、繰り返し周波数, 充電電圧,水溶液濃度に対する影響を検証した.図8(a), (b)に、水溶液濃度を 1.0% と固定し、充電電圧と繰り返し 周波数を変化させたときの液面の変形深さの変化と、充電 電圧を 1.9 kV と固定したときの変形深さの変化を示す.電 極間距離は 1.0 mm, 直流電流は 4 mA とした. 充電電圧が 0.8 kV, または水溶液濃度が 0.1% の場合, 液面の変形深さ は 0.2 mm 以下となり, ほとんど変形しないことがわかる. 水溶液濃度、パルス電圧、繰り返し周波数がそれぞれ高い ほど、液面の変形深さは大きくなった.

ここで,繰り返し周波数,充電電圧,水溶液濃度に対す るパルス放電のピーク電流の変化を図9(a),(b)にまとめ た.これより,ピーク電流は繰り返し周波数によっては大 きく変化しないが,充電電圧,水溶液濃度の増加に伴い増 えていくことがわかる.そこで,このピーク電流変化が液 面の変形深さへ与える影響を調べた.充電電圧 0.8, 1.4, 1.9 kV と水溶液濃度 0.1, 0.5, 1.0% という 9 種類の条件下 において,それぞれのピーク電流に対する液面の変形深さ



図9 水溶液濃度、充電電圧と繰り返し周波数に対するパルス放 電のピーク電流変化.

を求め、図10に繰り返し周波数500 Hzと1000 Hzにおける 結果をまとめた. 直線はピーク電流が2A以上の範囲で最 小二乗法により導出した近似直線である. ピーク電流が 2A以下では液面が変形しないため、液面の変形が発生し 始めるピーク電流のしきい値があり、その範囲は2-3A にあると考えられる.なぜなら,300-1000 Hz それぞれの 近似直線について,変形深さ0mmにおける電流値が 2.1-2.8 Aの範囲に収まるためである. 液面変形後は、ピー ク電流に対し比例的に変形深さが増加していく.繰り返し 周波数による変形深さの増加は、1パルスごとに水溶液に 加わる力がより短い周期で発生することによる. したがっ て、1パルスごとに水溶液に加わる力そのものは主にピー ク電流によって決まると考えられる.この力の原因には, パルス放電後に発生する衝撃波や、正イオンによるイオン 風などが挙げられる.前者は、金属電極間であるが、大気 中でパルス幅 10 ns, ピーク電流 20-40 A の放電において 衝撃波が発生することが確認されている[19].後者は、液 体陰極を用いた大気中の正コロナ放電によってイオン風が 発生し、液面が変形するという結果が報告されている[20].

イオン風の影響を検討するため、電極の極性を変えて、 液体陽極とした場合における液面の変形を測定した. Na₂SO₄水溶液濃度を1.0%,電極間距離を1.0 mm,直流電 流を4 mA としたときの、液面の変形深さの変化を示す 図11により、液体陽極とすると、液体陰極と比べ、液面の









変形深さは小さくなった.この結果は,電極の極性によっ て水溶液の力が変わることを示している.液体陽極のと き,液面へ向かうイオン風が形成されなくなるため,液面 の変形深さが減少したと推測される.

5. まとめ

液体陰極を用いた大気圧マイクロ放電において、直流と パルスの重畳放電を利用すると,最大瞬時電力 19 kW のパ ルス放電を生成できた.その動作条件は電極間距離と直流 放電の電流によって決まり、電極間距離 1.0-1.5 mm では 直流電流を2.1 mA以上流せばよい.ただし繰り返し周波数 を 100 Hz から 1000 Hz へ増加させると、放電遅れが 19 ns から39 nsまで増加した.この原因として、ノズル直下の液 面がくぼむ変形現象が挙げられる.液面におけるくぼみの 変形深さはパルス放電の繰り返し周波数とピーク電流に依 存し、ピーク電流約14 Aのパルスマイクロ放電を生成する とき,液面の変形深さは周波数 1000 Hz で 4.4 mm となっ た.よって、応用する際はこの液面の変形を考慮する必要 がある.また、1パルスごとに水溶液に加わる力はピーク 電流によって決まると推測され、この力が加わる過程につ いては、パルス放電後に発生する衝撃波やイオン風などが 寄与している考えられる.

参考文献

- [1] K.H. Becker, K.H. Schoenbach and J.G. Eden, J. Phys. D 39, 55 (2006).
- [2] J. Benedikt, K. Focke, A. Yanguas-Gil and A. V. Keudell, Appl. Phy. Lett. **89**, 25104 (2006).
- [3] T. Yokoyama, S. Hamada, S. Ibuka, K. Yasuoka and S. Ishii, J. Phys. D 38, 1684 (2005).
- [4] D. Staack, B. Farouk, A. Gutsol and A. Fridman, Plasma Sci. Technol. 17, 025013 (2008).
- [5] 高木浩一,藤原民也,栃久保文嘉,プラズマ・核融合学 会誌 79,1002 (2003) [in Japanease].
- [6] K.H. Becker, U. Kogelschatz, K.H. Schoenbach and R.J. Barker, Non-Equilibrium Air Plasmas at Atmospheric Pressure (Institute of Physics Publishing, London, 2005) Chap. 7, pp. 419-427.
- [7] M.A. Lieberman and A.J. Lichtenberg, Principles of Plasma Discharges and Materials Processing (Wiley, New York, 2005) Chap. 10, p. 380.
- [8] S. Ibuka, R. Mikami, F. Furuya, K. Ogura, K. Yasuoka and S. Ishii, IEEJ Trans. Fundam. Mater. **127**, 411 (2007).
- [9] 菊地 淳, 五十嵐晃一, 井深真治, 石井彰三: IEEJ Trans. Fundam. Mater. 129, 275 (2009) [*in Japanese*].
- [10] S. Ibuka, K. Harada, J. Kikuchi, K. Igarashi and S. Ishii, *Research Report NIFS-Proc Series* (National Institute for Fusion Science, Toki, 2009) 79, pp. 66-71.
- [11] A. Yamatake, J. Fletcher, K. Yasuoka and S. Ishii, IEEE Trans. Plasma. Sci. **34**, 1375 (2006).
- [12] V.A. Titov, V.V. Rybkin, A.I. Maximov and H.-S. Choi, Plasma Chem. Plasma Process. 25, 503 (2005).
- [13] P. Bruggeman, E. Ribežl, A. Maslani, J. Degroote, A. Malesevic, R. Rego, J. Vierendeels and C. Leys, Plasma Sources Sci. Technol. 17, 025012 (2008).
- [14] N. Shirai, M. Nakazawa, S. Ibuka and S. Ishii, Jpn. J. Appl.

Contributed Paper Generation of Liquid-Cathode Atmospheric Microdischarges by Applying Pulsed Voltages to a DC Discharge J. Kikuchi et al.

Phys. 48, 036002 (2009).

- [15] 白井直機, 中澤将人, 井深真治, 石井彰三: IEEJ Trans. Fundam. Mater. **129**, 269 (2009) [*in Japanese*].
- [16] P. Bruggeman, L. Graham, J. Degroote, J. Vierendeels and C. Leys, J. Phys. D 40, 4779 (2007).
- [17] P. Bruggeman, J. L. Walsh, D.C. Schram, C. Leys and M.

G. Kong, Plasma Sci. Technol. 18, 045023 (2009).

- [18] D.Z. Pai, G.D. Stancu, D.A. Lacoste and C.O. Laux, Plasma Sci. Technol. **18**, 045030 (2009).
- [19] D.A. Xu, D.A. Lacoste, D.L. Rusterholtz, P.-Q. Elias, G.D. Stancu and C.O. Laux, Appl. Phys. Lett. 99, 121502 (2011).
- [20] H. Kawamoto and S. Umezu, J. Phys. D 38, 887 (2005).