

---

# 静電マイクロウォータージェット現象の解明と その工学的応用

---

( 課題番号 16360127 )

平成 16 年度～平成 17 年度科学研究費補助金 (基盤研究(B)) 研究成果報告書

平成 18 年 3 月

研究代表者  
(早稲田大学・理工学部・教授)

川本 広行

## は し が き

本研究は、絶縁チューブの中を水で満たした針電極と平板電極間に電圧を印加すると、静電力によって水が吐出する静電インクジェット現象の詳細なメカニズムを解明し、さらにこの現象を新しいインクジェットプリンタの印字ヘッドや生化学用微小液滴分析装置、およびマイクロスプレーなどへ工学的に応用することを目的とした。電極系、電源、平板電極の移動装置、および高速度カメラなどからなる実験装置を製作して行った本研究の実施内容とその成果は以下のとおりである。

- (1) 印加電圧によって液滴吐出モードが変化することを観測し、そのメカニズムを明らかにした。
- (2) 液滴が帯電することを利用し、電界によって軌跡を制御する技術を開発した。
- (3) 気体放電に伴うオゾン生成に関する解析と実験を行い、その特性を把握した。
- (4) 電極間にパルス電圧を印加することによって、水滴の吐出を制御することが可能であることを実証した。これは静電液滴形成現象をインクジェットプリンタの印字ヘッドに応用できる可能性を示唆するものであり、工学的な応用のための開発と実証を行なった。とくに、インクジェットによって、DOD (Dot on Demand) で文字を描写する技術を開発し、市販のインクジェットプリンタを凌駕する画質の印字に成功した。
- (5) 印字速度の高速化を目指して、クロストークをキャンセルできるマルチノズルシステムを考案した。
- (6) 本技術を電子回路のマスキレスパターニングに応用できることを実証した。

## 目 次

はしがき	2
1. 研究組織	4
2. 交付決定額	4
3. 研究発表	4
学会誌等	4
口頭発表	4
出版物	5
4. 研究成果による工業所有権の出願，取得状況	5
5. 研究成果	6
6. 添付資料 (発表論文)	12

## 1. 研究組織

研究代表者: 川本 行 (早稲田大学・理工学部・教授)

## 2. 交付決定額

(金額単位: 千円)

	直接経費	間接経費	合計
平成 16 年度	9,400	0	9,400
平成 17 年度	4,600	0	4,600
総 計	14,000	0	14,000

## 3. 研究発表

### (1) 学会誌等

- (1-1) 川本, 新井, 小泉, "針対平板電極系における静電液滴形成", 日本機械学会論文集 (C 編), Vol. 70, No. 699 (2004) pp.3131-3137.
- (1-2) H. Kawamoto, S. Umezu and R. Koizumi, "Fundamental Investigation on Electrostatic Inkjet Phenomena in Pin-to-Plate Discharge System," J. Imaging Sci. Technol., Vol. 49, No. 1 (2005) pp.19-27.
- (1-3) H. Kawamoto and S. Umezu, "Electrohydrodynamic deformation of water surface in metal pin to water plate corona discharge system," J. Phys. D: Appl. Phys., Vol. 38 (2005) pp.887-894.
- (1-4) H. Kawamoto and S. Hayashi, "Fundamental investigation on electrostatic traveling-wave transport of a liquid drop," J. Phys. D: Appl. Phys., Vol. 39 (2006) pp. 418-423
- (1-5) 川本, 林, "進行波電界による液滴搬送の基礎特性", 日本機械学会論文集 (C 編), Vol. 71, No. 712 (2005) pp.3465-3469.
- (1-6) 川本, "OA 機器 (機械工学年鑑, 情報・精密機械)", 日本機械学会誌, Vol. 107, No. 1029 (2004) pp.652.
- (1-7) H. Kawamoto, H. Yasuda and S. Umezu, "Flow distribution and pressure of air due to ionic wind in pin-to-plate corona discharge system," J. Electrostatics (to be published).
- (1-8) S. Umezu, H. Suzuki and H. Kawamoto, "Droplet Formation and Dropping Position Control in Electrostatic Inkjet Phenomena," NIP21: International Conference on Digital Printing Technologies, Baltimore, Maryland (2005) pp.283-286.
- (1-9) 川本, "OA 機器 (機械工学年鑑, 情報・精密機械)", 日本機械学会誌, Vol. 108, No. 1041 (2005) pp.667.
- (1-10) S. Umezu, R. Nakazawa and H. Kawamoto, "Development of Mask-less Printing Technology for Microelectronic Circuit Utilizing Electrostatic Inkjet System," ASME/JSME Joint Conference on Micromechatronics for Information and Precision Equipment (MIPE 2006) Santa Clara, CA (2006).

### (2) 口頭発表

- (2-1) 鈴木, 梅津, 川本, "静電インクジェット現象における液滴の帯電", Japan Hard Copy 2004 Fall Meeting, 京都 (2004) pp.37-40.
- (2-2) 中澤, 梅津, 川本, "静電インクジェット現象における液滴滴下制御", Japan Hardcopy Fall Meeting, 京都 (2005) pp.25-28.
- (2-3) 堀川, 梅津, 中澤, 川本, "静電インクジェット現象を利用した電気回路パターンの描画", Imaging Conference JAPAN 2006 (2006).

### (3) 出版物

- (3-1) 川本, "機械工学便覧 応用システム編 g 8 「情報・メディア機器」", 4.5 プリンタ、6.4 複写機、日本機械学会 (2005) pp.83-91.

## 4. 研究成果による工業所有権の出願, 取得状況

なし

## 5. 研究成果

### 1. 緒 言

針対平板電極系放電場は、避雷、高電圧機器の絶縁対策、オゾンナイザーなどで工学的に重要な場であり、その電気的な特性に関して古くから多くの研究が行われている<sup>(1)</sup>。またこの系には、電気力学効果により、さまざまな特異な力学現象が生じることが報告されている<sup>(2-5)</sup>。液体を満たしたチューブに電界を印加することによって、チューブの先端から液滴を吐出させる静電スプレー現象も針対平板電極系における力学現象の一つであり<sup>(6)</sup>、インクジェットプリンタ<sup>(7,8)</sup>や微量な水滴を形成する質量検量器<sup>(9)</sup>への応用などが検討されている。インクジェットプリンタは、インクをノズルから微細な液滴として吐出し用紙に付着させるものであり、現在普及している方法には、ヒータで気泡を発生させてノズルからインクを押し出すバブルジェット方式と、 piezo素子の変形によりインクを押し出すpiezo方式がある<sup>(10)</sup>。液体に電圧を印加することで微小なインク滴の吐出を制御することが可能になれば、新しいインクジェットプリンタの印字ヘッドが実現できる。またこの方式の場合、比較的大きなギャップでも作動すること、液滴が帯電しているので静電偏向が可能であること、サーマル式のように流体に熱が加わらないことなどの特徴があり、これらを生かした応用の可能性もあると考えられる。しかし、これまでの研究は印字ヘッドなどの実用化を目指した応用研究が主体であり<sup>(7,8)</sup>、現象そのものの体系的な検討は十分ではない。この現象を工学的に利用するためには、まず現象の基礎特性を明らかにすることが重要であり、液滴形成・分離機構やその特徴を明らかにする研究を行った。また、初歩的であるが、この現象が実際の画像形成に応用できることを実証したので報告する。

### 2. 実験装置

液体を満たした液柱を針電極とした場合の液滴の吐出特性に関する実験を行うために、図1のような実験装置を構成した。テルモ社製注射器シリンジ(10 ml)の先端にPolymicroTechnologies社製キャピラリーチューブ(シリカチューブにポリイミドをコーティングしたもの、内径 50, 100  $\mu\text{m}$ , 外径 170  $\mu\text{m}$ )を取り付けた。静電液滴形成に関するこれまでの研究では<sup>(7-9)</sup>、金属製のチューブに液体を注入する方式がほと

んどであったが、液体にのみ力が作用するよう現象を単純化するために、絶縁性のチューブを用いた。シリンジ内に水を入れ、圧力を利用してこの絶縁性チューブ内まで水を注入し、これを針電極として平板金属電極に対して垂下した。水は水道水であり、イオン導電性がある。チューブ先端の水滴の挙動を観察するために、順静的な画像撮影にはKeyence社製デジタルマイクロスコープVH-7000を、高速現象の撮影には日本ローバー製Motion-Meter 1140-0003を用いた。電極間に電圧を印加するための高圧電源には直流電源とパルス電源の2種類を準備した。直流電圧は松定プレシジョン社製高電圧アンプHVR-10Pを利用し、パルス電圧は岩崎通信社製ファンクションジェネレータSG-4105によって生成された電圧波形を松定プレシジョン社製高電圧アンプHEOP-10B2で増幅することによって生成した。直流印加電圧はポテンショメータの設定から換算し、パルス電圧はオシロスコープで測定した。電流は回路に直列に挿入したシャント抵抗の電圧ドロップから測定した。電極間のギャップは、メカニカルステージを用いて平板電極を上下させることによって調整できる構造になっている。また、印字実験用に $x, y$ 方向に2つのオリエンタルモータ製直動電動スライダSPL42(最大速度 24 mm/s, 最大加速度 0.4  $\text{m/s}^2$ )を設けた。

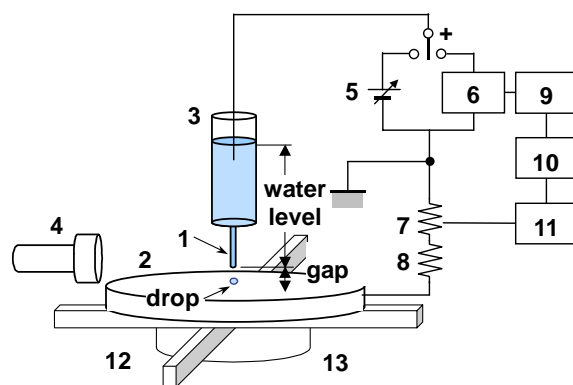


Fig. 1 Experimental set-up. (1: water pin electrode, insulative capillary tube filled with water, 2: metal plate electrode, 3: water tank, 4: CCD camera, 5: DC high voltage power supply, 6: high voltage amplifier, 7: shunt resistor, 400  $\text{k}\Omega$ , 8: resistor: 400  $\text{k}\Omega$ , 9: function generator, 10: oscilloscope, 11: volt meter, 12: linear stages,  $x$  and  $y$  directions, 13: mechanical stage)

### 3. 放電特性と液滴形成

液体針電極を用いた針対平板電極系の放電特性を調査するために、まず印加電圧 - 電流特性を測定した。

図2に実測値を示す。比較のために液体針電極の代わりにチューブの内径と同じ直径の金属針電極を用いた場合の結果も示してある。金属針電極と液体針電極とでは電流値に2倍程度の違いがあり、液体針電極の場合、先端の水面形状が金属針電極のそれと異なることやチューブの帯電などが影響していると考えられるが、放電の基本的な特徴は、既報に示した金属製針対平板電極系の特性と同じである。すなわち、印加電圧を上げていくと、はじめはごく微少な暗電流が流れるだけであるが(暗流域)、ある限界電圧(コロナ開始電圧)に達するとコロナ電流と呼ばれる $\mu\text{A}$ から数 $10\ \mu\text{A}$ オーダの有意な電流が流れる(コロナ放電域)。

このような放電特性に対応して、観測された液滴の形成は、図2に付記したような3つのモードに大別できる。

MODE 1 暗流域(0~2 kV)では、チューブ先端に水滴が形成され、時間とともに徐々に大きくなり、ある臨界の大きさになると滴下する。

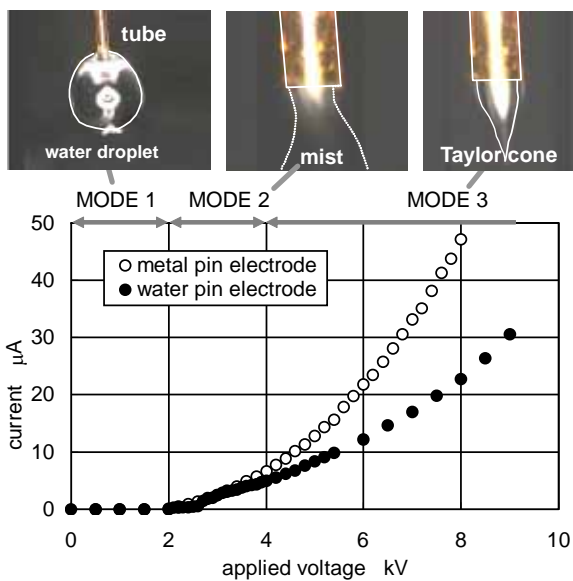


Fig. 2 V-I curves in pin-to-plate electrode system. (90 mm water level,  $\phi 100\ \mu\text{m}$  inner tube diameter,  $\phi 100\ \mu\text{m}$  metal pin diameter, 3 mm air gap)

MODE 2 コロナ放電域の初期(2~4 kV)では、チューブから $\mu\text{m}$ オーダの霧状の水滴が広範囲に噴霧される<sup>(11)</sup>。ただし、暗流域からコロナ放電初期における液滴形成モードは単純ではなく、印加電圧などの条件によって、不安定に種々の形態の水滴が吐出する。

MODE 3 さらに印加電圧を上昇させると、電極先端にテーラーコーンと呼ばれる筆先状の水面が形成され<sup>(6,9)</sup>、その先端から周期的に水滴が吐出される。

以下、以上の各モードの詳細を示す。

#### 4. 暗流域における水滴滴下

4.1 水滴形成臨界水位・電圧 まず、暗流域において、図2に付記したMODE 1のように水滴が形成され滴下しはじめる時の水位-電圧特性の実測値を図3に示す。水位(水タンク内水面からチューブ先端までの距離)が高いほど吐出圧力が高くなり、また印加電圧が高いほどチューブ先端に形成される水球が平板側に吸引されるクーロン力が大きくなるので、これらの合力が表面張力に打ち勝つ条件で水滴が滴下すると考えられる。

4.2 水滴の大きさ 水滴が滴下する直前の水滴直径を図4~6に示す。各図はそれぞれ印加電圧、ギャップ、および水位をパラメータにとったものである。図から、印加電圧とギャップが水滴滴下直前の水滴臨界径に及ぼす影響が大きいことがわかる。ギャップが小さく印加電圧が高いことは、電界強度が高いことに相当するので、これらの条件では水滴に作用するクーロン力が大きくなり水滴が大きく成長する前に滴下してしまうからであると考えられる。また、前述のように水位は水滴形成・滴下への影響は大きいですが、水滴臨界直径に及ぼす影響は小さい。いずれにしても、水滴の大きさは最小でも0.5 mm程度であり、チューブの外径に対して数倍以上大きい。

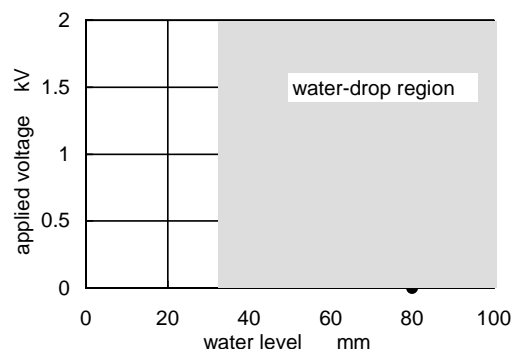


Fig. 3 Critical water level and voltage of water dropping at dark discharge. (3 mm air gap,  $\phi 100\ \mu\text{m}$  inner tube diameter)

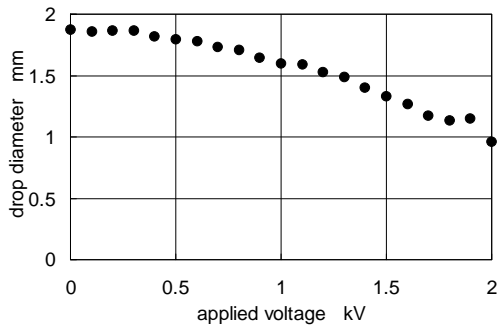


Fig. 4 Applied voltage vs. critical diameter of drop at dark discharge. (3 mm air gap, 90 mm water level,  $\phi$  100  $\mu$ m inner tube diameter)

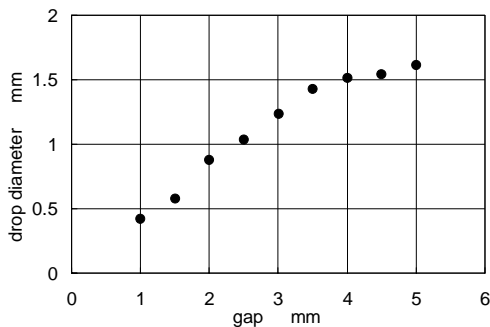


Fig. 5 Air gap vs. critical diameter of drop at dark discharge. (90 mm water level,  $\phi$  100  $\mu$ m inner tube diameter, 1.6 kV applied voltage)

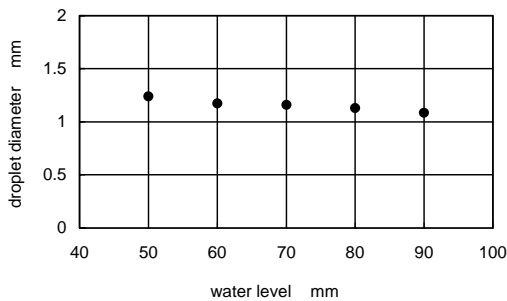


Fig. 6 Water level vs. critical diameter of drop at dark discharge. (3 mm air gap,  $\phi$  100  $\mu$ m inner tube diameter, 1.6 kV applied voltage)

**4.3 水滴に作用する力のバランス** 暗流域において、チューブ先端の分離前の水滴に働く力は水滴の自重、表面張力、水圧、静電力の4つである。図2に付記した写真のようにチューブ下端に形成された水滴は、自重・静電力・水圧によって成長し、これらの合力が表面張力を上回った時に滴下すると考えられる。これを確認するために、力の釣り合いから水滴に働く静電力を求め、別途測定した金属針電極に作用するクーロン力と比較した。静電力を $F_e$ 、表面張力による力を $F_s (= 2\pi r_o \gamma, r_o$ : チューブの外半径,  $\gamma$ : 水の表面張

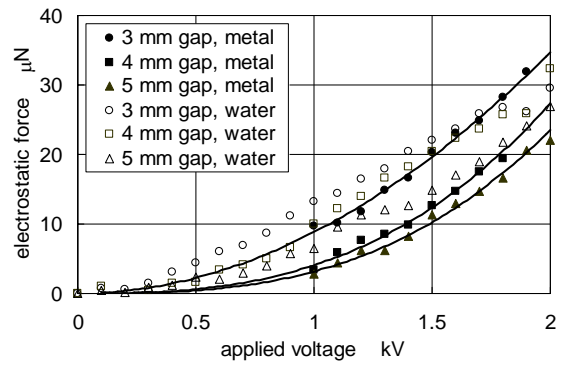


Fig. 7 Electrostatic Coulomb force applied to water drop and metal electrode at dark discharge. Solid lines are least-square fitted quadratic curves of the metal electrode. ( $\phi$  1.2 mm metal pin diameter)

力、吊環法に準じた方法によって測定<sup>(3)</sup>、チューブの内半径を $r_i$ 、水の密度を $\rho$ 、水位を $h$ 、水滴の半径を $r_d$ 、重力の加速度を $g$ とすると水滴が滴下する直前の力のバランスは次式で表される。

$$F_e = F_s - \pi r_i^2 \rho g h - \rho \frac{4}{3} \pi r_d^3 g \quad \text{-----} \quad (1)$$

図7に式(1)から算出した液滴に作用する臨界静電力と金属針電極の場合の静電力を比較して示す。金属針電極に作用するクーロン力の測定方法は文献(2)に示したとおりである。ただし、液体針電極と平板電極間のギャップは水滴の大きさによって変化するので、金属針電極の場合のギャップが液体電極の実効的なギャップに一致するように調節しながら静電力の測定を行った。また、金属針には臨界水滴径に近い直径1.2 mmのステンレス製針電極を用いた。静電力は、印加電圧の2乗に比例して大きくなっており、両者はおおむね一致していることがわかる。これらの結果から、暗流域における水滴の滴下は、静電力、水滴の自重、表面張力、および水圧の4種の力の準静的なバランスによると結論できる。

## 5. コロナ放電域における水滴滴下

**5.1 コロナ放電域初期における霧状噴霧** つぎに、コロナ放電域初期における霧状噴射 (MODE 2) とコロナ放電の関係を調べるために、電流波形を測定した。図8に示すように、コロナ放電電流 (図8の場合約0.2  $\mu$ A) に140 Hzの比較的高周波のパルスが重畳された波形であった。コロナ放電によって帯電した水滴がクーロン反発力によって霧状に分解し、(この領域ではイオン風の影響は小さいので) ほぼ電気力線に沿うように広範囲に噴霧され、これが平板電極に達し



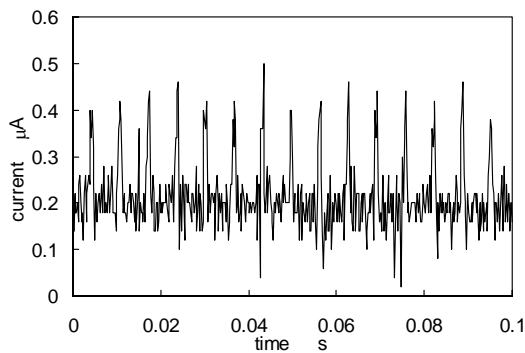


Fig. 8 Current corresponding to formation of water mist at the beginning of corona discharge. (3 mm air gap, 90 mm water level,  $\phi$  100  $\mu$ m inner tube diameter, 2.3 kV applied voltage)

たときにパルス状の電荷移動電流が流れるものと考えられる。ただし、この領域におけるモードは単純ではなく、印加電圧などの条件によって、霧状や液滴状など種々の形態の水滴が吐出する。静電力、重力、表面張力、水圧だけでなく、ストリーマコロナによる静電力自体のふらつき<sup>(2)</sup> やイオン風が時間的にも空間的にも複雑に影響を及ぼしあっていると推測される。これらの詳細メカニズムについては今後さらに検討が必要である。

**5・2 コロナ放電域における水滴滴下** さらに印加電圧を上昇させると (4.0 kV 以上)、周期的な水滴滴下 (MODE 3) に対応して、図 9 のように 80 Hz 程度のほぼ一定周波数のパルス状の電流変化が観測される。コロナ放電域初期における霧状噴霧の場合と同様に、この電流の変化は帯電した水滴の落下に対応する電荷移動電流であると推測される。これを確認するために、高速度カメラとオシロスコープを同期させ、チューブから水滴が吐出される様子を高速度カメラで確認しながら電流波形を計測した。水滴

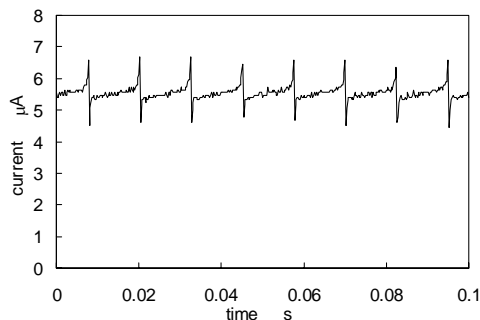


Fig. 9 Pulse current corresponding to spraying of water at stable region of corona discharge. (3 mm air gap, 90 mm water level,  $\phi$  100  $\mu$ m inner tube diameter, 4.3 kV applied voltage)

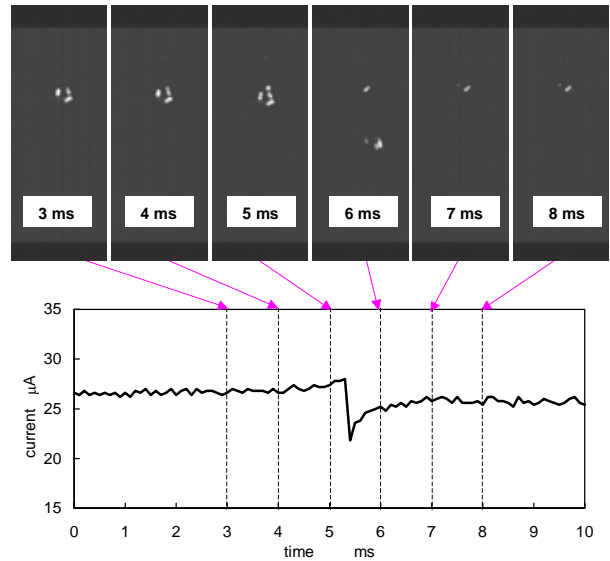


Fig. 10 Photograph of dropping of water droplet and corresponding discharge current just at the separation of water droplet. (5 mm air gap, 100  $\mu$ m inner tube diameter, 7 kV applied voltage)

が滴下する前後の電流波形と高速度カメラで撮影した写真を対応させて図 10 に示す。図から、3~5 ms の区間でチューブ先端の水滴が徐々に下向きに成長し電極間ギャップが短くなるのともなって電流値がわずかに高くなり、5~6 ms間の水滴の落下にともない電流値が大きく減少するが、水滴滴下後に電流値が回復してゆく様子が確認できる。発達したコロナ放電域では、下向きの比較的流速の早いイオン風が流れており<sup>(5)</sup>、これが帯電した水滴のクーロン反発力による分解を防いでいると思われる。

このような安定なパルスが生じる領域での印加電圧と周波数の関係を図 11 に示す。印加電圧が高いほど液滴が形成しやすいように思われるが、実際には印加電圧を上げるとパルス電流の周波数は減少する。これは次のような理由によると考えられる。すなわち、印加電圧を上げて、コロナ放電時には、チューブに付着した状態の液滴表面の電界はコロナ開始電界に保たれているので、下方に作用するクーロン力の大きさは増加しない<sup>(2)</sup>。これに対して、イオン風の反力 (液滴をチューブ内に押し戻す方向の力) は印加電圧の上昇とともに大きくなるので<sup>(5)</sup>、印加電圧が高いほど液滴が滴下しづらくなるためであると考えられる。

このような仮説は、滴下液滴の大きさの測定結果からも支持できる。滴下される水滴の大きさに影響を及ぼすものとして、印加電圧のほかに、電極間ギャップとチューブの内径が考えられるので、それらをパラメータとして水滴の大きさを測定し、それぞれ図 12、

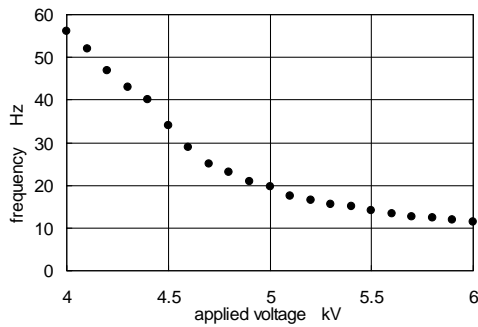


Fig. 11 Frequency of current pulse corresponding to spraying of water at stable region of corona discharge. (3 mm air gap, 90 mm water level,  $\phi$  100  $\mu$ m inner tube diameter)

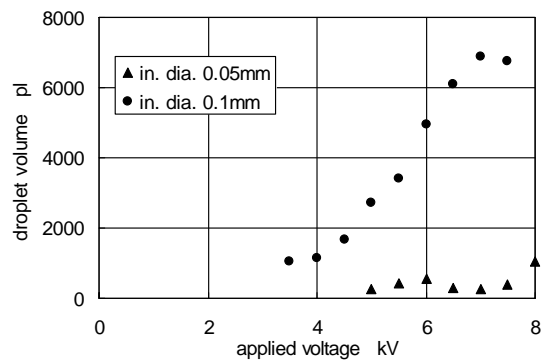


Fig. 13 Applied voltage vs. droplet volume. (3 mm air gap, 90 mm water level, parameter: inner tube diameter)

13にまとめた。(100 plは水滴径 58  $\mu$ m, 1,000 plは水滴径 124  $\mu$ m, 10,000 plは水滴径 267 $\mu$ mに相当する)各図より,印加電圧の上昇とともに滴下される水滴が大きくなっていることが確認できる.前述のようにこれは,電圧の上昇とともにイオン風による反力が大きくなることにより,チューブ先端に保持される水滴が大きく成長したあとで滴下するためであると考えられる.また,図 12 には電極間ギャップは滴下液滴の大きさにほとんど影響を及ぼさないことが示されているが,これは,イオン風の反力はほとんどギャップによらないことに対応している<sup>(2)</sup>.

なお,図 13 から,滴下液滴の大きさはチューブの内径にも大きく依存し,当然ながら,チューブの内径が小さいほど液滴が小さくなるのがわかる.しかし現状の液滴の大きさは,チューブ内径 100  $\mu$ m で最小 1,050 pl,チューブ内径 50  $\mu$ m でも 250 pl 程度であり,市販のインクジェットプリンタの数 pl に比べて数桁大きい.本現象をインクジェットプリンタの印字ヘッドに応用するためには液滴をさらに大幅に小さくすることが必要であり,今後詳細な検討が必要である.

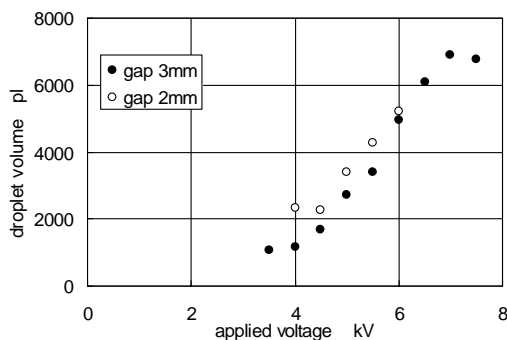


Fig. 12 Applied voltage vs. droplet. (90 mm water level,  $\phi$  100  $\mu$ m inner tube diameter, parameter: air gap)

5.3 水滴滴下の制御 本現象を工学的に利用するためには水滴の吐出を任意に制御できることが不可欠である.このため,MODE 3 の領域で電極間に一定の電圧を印加すると一定の大きさの水滴が周期的に吐出する性質を利用して吐出を制御することを試みた.具体的には,パルス周波数を固定し,実際に電圧が印加される時間であるパルス幅を変化させながら,一パルスで一滴の水滴が滴下される臨界パルス幅を測定した.実験結果を図 14 に示す.横軸にパルス周波数,縦軸に一周期に水滴が一滴だけ吐出されるパルス幅,パラメータに印加電圧をとっている.臨界パルス幅は周波数によらずほぼ一定で印加電圧だけに依存し,4.5 kV で約 40 ms, 6.5 kV では約 70 ms であった.

5.4 印字実験 この結果を応用して実際に文字の印字を試みた.図 15 に示す印字サンプルは,図 1 のリニアステージを移動して,オリジナルのビットイメージにもとづいて PC により制御してパルス電圧を印加し,1 ヘッドで 1 点ずつ印字したものである.印字技術としてはまだ稚拙であるが,本現象を応用して,実際に印字できることを実証したものである.

## 6. 結 言

水を満たした絶縁チューブからなる針電極と平板電極間に電圧を印加した時,電極先端から水滴が吐出する静電液滴形成について実験を行い,以下のような知見を得た.

(1) コロナ開始電圧以下の暗流域では,自重・静電力・水圧によってチューブ先端に比較的大きな水滴が形成され,これらの合力が表面張力を上回ると滴下する.印加電圧が高くギャップが小さいほど,電極先端の電

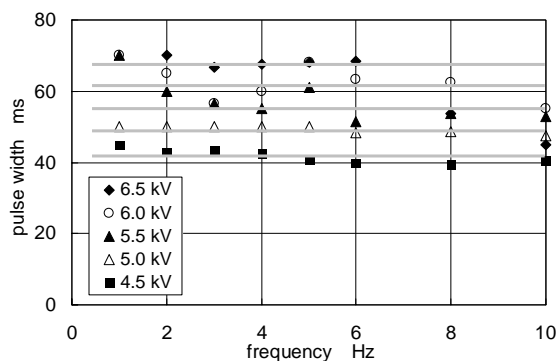


Fig. 14 Pulse voltage frequency vs. critical pulse width that separates a drop from the tip of the tube. (3 mm air gap, 70 mm water level,  $\phi$  100  $\mu$ m inner tube diameter, parameter: applied voltage)

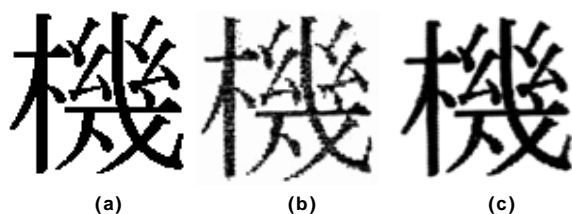


Fig. 15 Original (a) and printed samples (b) (c) of Chinese character "Mechanics."

- (a) original
- (b) 1st stage sample: 50 dpi, 50  $\times$  50 dots, 100  $\mu$ m inner tube diameter, 3 mm gap, 4.5 kV applied voltage, dye blue ink for fountain pen
- (c) 2nd stage sample: 181 dpi, 100  $\times$  100 dots, 50  $\mu$ m inner tube diameter, 0.5 mm gap, 1.5 kV applied voltage, pigmented black ink for Epson inkjet printer

界強度が大きくなるので、滴下する水滴の直径は小さくなる。印加電圧 1.6 kV, ギャップ 1.0 mm の条件では、液滴径は 0.5 mm であった。

(2) コロナ放電開始直後は、霧状の水滴が広範囲に噴霧される。コロナ放電によって帯電した水滴がクーロン反発力によって霧状に分解し、ほぼ電気力線に沿うように広範囲に噴霧されるものと考えられる。なおこの現象は、マイクロ静電塗装への応用が考えられる。また制御方法によっては、非常に微細な液滴を形成できる可能性を有している。

(3) 印加電圧をさらに上昇させたコロナ放電域では、周期的に水滴が吐出される。印加電圧を上げて、コロナ放電時には、チューブに付着した状態の液滴表面の電界はコロナ開始電界に保たれているので、下方に作用するクーロン力の大きさは増加しないが、液滴をチューブ内に押し戻す方向のイオン風の反力は印加電圧の上昇とともに大きくなるので、印加電圧が高い

ほど滴下周期は長くなる。具体的には、チューブ内径 100  $\mu$ m の場合約 1,000 pl の水滴を毎秒 60 滴程度の速度で、チューブ内径 50  $\mu$ m では約 250 pl の水滴を毎秒 60 滴の速度で形成できる。

(4) 電極間にパルス電圧を印加することによって、水滴の吐出を制御することが可能である。これは静電液滴形成現象をインクジェットプリンタの印字ヘッドに応用できる可能性を示唆するものである。

(5) 本実験結果を応用して、実際に印字できることを実証した。

#### 参考文献

- (1) 電気学会 放電ハンドブック出版委員会編, 放電ハンドブック (上巻), 電気学会 (1998).
- (2) 川本広行, 針対平板電極系放電場における針電極の静力学特性, 機論, **67**-657, C (2001) 1385-1392.
- (3) 川本広行・梅津信二郎・小泉竜太・白石潤平, 針対平板電極系放電場における静電静水力学効果について, 機論, **69**-678, C (2003) 328-334.
- (4) 川本広行・高崎康介・安田悠, 針対平板電極系放電場における針電極の動力学, 機論, **69**-681, C (2003) 1449-1455.
- (5) 川本広行・安田悠・梅津信二郎, 針対平板電極系コロナ放電場におけるイオン風について, 機論, **70**-689, C (2003) 169-175.
- (6) A. G. Bailey, Electrostatic Spraying of Liquids, Research Studies Press Ltd. (1988).
- (7) Mills, R. N., ESJNET™ Printing Technology, *IS&T's NIP 12: International Conference on Digital Printing Technologies* (1996) 262-266.
- (8) 村上照夫・ほか 4 名, 静電力を用いた超高精細インクジェット記録技術の開発, 日本画像学会誌, **40**-1 (2001) 40-47.
- (9) Yogi, O. et al., On-Demand Droplet Spotter for Preparing Pico- to Femtoliter Droplets on Surfaces, *Anal. Chem.*, **73** (2001) 1896-1902.
- (10) 川本広行・中島一浩・鴨井和美, インクジェットプリンタの最新技術, 日本 AEM 学会誌, **11**-1 (2003) 23-29.
- (11) Moon, J-D, Kim, J-G and Lee, D-H, Electrophysicochemical Characteristics of a Waterpen Corona Discharge, *IEEE Trans. Industry Applications*, **34**-6 (1998) 1212-1217.

## 6. 添付資料 (発表論文)

1. 川本,新井,小泉,"針対平板電極系における静電液滴形成",日本機械学会論文集 (C編), Vol. 70, No. 699 (2004) pp.3131-3137.
2. H. Kawamoto, S. Umezu and R. Koizumi, "Fundamental Investigation on Electrostatic Inkjet Phenomena in Pin-to-Plate Discharge System," J. Imaging Sci. Technol., Vol. 49, No. 1 (2005) pp.19-27.
3. H. Kawamoto and S. Umezu, "Electrohydrodynamic deformation of water surface in metal pin to water plate corona discharge system," J. Phys. D: Appl. Phys., Vol. 38 (2005) pp.887-894.
4. H. Kawamoto and S. Hayashi, "Fundamental investigation on electrostatic traveling-wave transport of a liquid drop, " J. Phys. D: Appl. Phys., Vol. 39 (2006) pp. 418-423
5. 川本,林,"進行波電界による液滴搬送の基礎特性",日本機械学会論文集 (C編), Vol. 71, No. 712 (2005) pp.3465-3469.
6. S. Umezu, H. Suzuki and H. Kawamoto, "Droplet Formation and Dropping Position Control in Electrostatic Inkjet Phenomena," NIP21: International Conference on Digital Printing Technologies, Baltimore, Maryland (2005) pp.283-286.
7. 鈴木,梅津,川本,"静電インクジェット現象における液滴の帯電",Japan Hard Copy 2004 Fall Meeting, 京都 (2004) pp.37-40.
8. 中澤,梅津,川本,"静電インクジェット現象における液滴滴下制御",Japan Hardcopy Fall Meeting, 京都 (2005) pp.25-28.

以 上