
放電場における特異な力学現象の解明と マイクロ機器への応用

(課題番号 14550246)

平成 14 年度～平成 15 年度科学研究費補助金 (基盤研究(C) (2)) 研究成果報告書

平成 16 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

針対平板電極系放電場における下記のような得意な力学現象のメカニズムを明らかにし、これらをマイクロ機器へ応用することを目的とした研究を行った。本研究により、以下のような成果が得られた。

1. 静電モーゼ効果　　イオン伝導性を付与した水を平板電極にすると、水面が変化する現象が生じる。この現象のメカニズムを解明するために、まず針対平板電極系における力学作用として、暗流域ではクーロン力が、コロナ放電域ではクーロン力に加えてイオン風の反力が作用するが、火花放電域では有意な力は働かないことを示した。つぎに、放電場解析と流れ場解析を組み合わせた解析や実験によって、静電モーゼ効果は、静電力やコロナ放電時のイオン風によって生じることを明らかにした。また、この現象をマイクロマシンの駆動源として利用できることを示した。
2. コロナジェット現象　　針電極が極低剛性の場合、上述のイオン風によって針電極にフラッタ様の横振動が生じることを明らかにした。本研究で得られた知見は、オゾンナイザやレーザープリンタの帯電器、および各種プラズマ応用機器や高電圧機器に潜在するトラブルの解決に寄与すると考えられる。
3. 静電ウォータージェット現象　　絶縁チューブの中を水で満たして針電極とし高電圧を印加すると、静電力によって水を吐出する現象が観測される。この現象は、上述の放電形態に対応していくつかの特徴的なモードに分類できることを詳細な観測によって明らかにし、それらのメカニズムを検討した。また、適当なパルス電圧を印加することによって、この液滴滴下が制御できることを示し、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へ適用できることを実証した。
4. その他　　静電力を利用した紙の剥離・搬送機構を開発し、特許出願した。

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	5
出版物	7
4. 研究成果による工業所有権の出願，取得状況	7
5. 研究成果	8
6. 添付資料 (発表論文)	13

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 12 年度	3,000	0	3,000
平成 13 年度	1,000	0	1,000
総 計	4,000	0	4,000

3. 研究発表

(1) 学会誌等

- (1-1) 川本, 梅津, 小泉, 白石, "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", 日本機械学会論文集 (C 編), 69 巻, 678 号 (2003) pp.328-334.
- (1-2) 川本, 高崎, 安田, "針対平板電極系放電場における針電極の動力学", 日本機械学会論文集 (C 編), 69 巻, 681 号 (2003) pp.1449-1455.
- (1-3) 川本, 安田, 梅津, "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", 日本機械学会論文集 (C 編), 70 巻, 689 号 (2004) pp.169-175.
- (1-4) 梅津, 川本, "針対平板電極系における火花放電時の力について", 日本機械学会論文集 (C 編) (to be published).
- (1-5) N. Nakayama, H. Kawamoto, S. Yamada and A. Sasakawa, "Statics of Electromagnetic Bead Chain in Electromagnetic Field," *IS&T's NIP18: International Conference on Digital Printing Technologies* (2002) pp.742-747.
- (1-6) H. Kawamoto, K. Arai, R. Koizumi and S. Umezu, "Electrostatic Inkjet Phenomena Utilizing Pin-to-Plate System," *Proceedings of the 2003 JSME-IIP/ASME-ISPS Joint Conference on Micromechatronics for Information and Precision Equipment: IIP/ISPS Joint MIPE* (2003) pp.327-328.
- (1-7) N. Nakayama, H. Kawamoto and M. Nakatsuhara, "Electrostatic Pull-off of Magnetic Bead Chains in Two-Component Magnetic Development System of Electrophotography," *Proceedings of the 2003 JSME-IIP/ASME-ISPS Joint Conference on Micromechatronics for Information and Precision Equipment: IIP/ISPS Joint MIPE* (2003) pp.323-324.
- (1-8) H. Kawamoto, S. Umezu and J. Shiraishi, "Paper Separation and Feed Utilizing Electrostatic Force," *Proceedings of the 2003 JSME-IIP/ASME-ISPS Joint Conference on Micromechatronics for Information and Precision Equipment: IIP/ISPS Joint MIPE* (2003) pp.329-330.
- (1-9) M. Nakano and H. Kawamoto, "Investigation of a Non-Magnetic and Non-Contact AC Development Process in Electrophotography," *Proceedings of the 2003 JSME-IIP/ASME-ISPS Joint Conference on Micromechatronics for Information and Precision Equipment: IIP/ISPS Joint MIPE* (2003) pp.331-332.
- (1-10) H. Kawamoto, "Basic research and application on dynamics of electromagnetic

particles for imaging technology," *Particles 2003: Imaging, Marking, and Printing Applications of Particle Technology* (2003) pp.57.

- (1-11) H. Kawamoto, K. Arai and R. Koizumi, "Electrostatic Inkjet Phenomena in Pin-to-Plate Discharge System," *IS&T's NIP19: International Conference on Digital Printing Technologies* (2003) pp.359-364.
- (1-12) S. Umezu, J. Shiraishi, H. Nishimura and H. Kawamoto, "Paper Separation and Feed Mechanisms Utilizing Electrostatic Force," *IS&T's NIP19: International Conference on Digital Printing Technologies* (2003) pp.559-564.
- (1-13) M. Nakano, H. Kawamoto and I. Itoh, "Influence of Toner Charge on Magnetic Chain Formation in Magnetic Single-Component Development System of Electrophotography," *IS&T's NIP19: International Conference on Digital Printing Technologies* (2003) pp.74-78.
- (1-14) N. Nakayama, Y. Watanabe, Y. Watanabe, and H. Kawamoto, "Experimental and Numerical Study on the Bead-Carry-Out in Two-Component Development Process in Electrophotography," *IS&T's NIP19: International Conference on Digital Printing Technologies* (2003) pp.69-73.
- (1-15) S. Umezu, J. Shiraishi and H. Kawamoto, "Micro Driving Mechanism Utilizing Pin-to-Plate Gas Discharge Field," *ISPS2004* (2004).
- (1-16) M. Nakano, T. Ando, Y. Nobusue and H. Kawamoto, "Investigation on Image Profile of Magnetic Toner Particles on Photoreceptor in Electrophotography," *ISPS2004* (2004).
- (1-17) H. Kawamoto, "Introduction of Research and Development on Electromechanics of Electromagnetic Particles for Imaging Technology," *PFC* (2004).
- (1-18) 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. 105, No. 1005 (2002) pp.563-564.
- (1-19) 川本, 中山, "複写機の設計の変遷", 設計工学, Vol. 37, No. 5 (2002) pp.211-217.
- (1-20) 川本, 中島, 鴨井, "インクジェットプリンタの最新技術", 日本 AEM 学会誌, Vol. 11, No. 1 (2003) pp.23-29.
- (1-21) 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. 106, No. 1017 (2003) pp.642.
- (1-22) 川本, "オゾンが発生しない複写機", 特集 プラズマ応用の新しい展開, 電気学会誌, Vol. 123 (2003) pp.660-663.
- (1-23) 川本, "放電力学 - 放電にともなう力学現象とその応用", 静電力応用技術の新展開 特集, AEM 学会誌, Vol. 11, No. 3 (2003) pp.161-166.
- (1-24) 川本, "高画質化に向けた現像プロセスのシミュレーション", MATERIAL STAGE (2003) pp.54-59.

(2) 口頭発表

- (2-1) 川本, 白石, 梅津, 小泉, "針対平板電極系放電場における静電モーゼ効果", 第 13 回「電磁力関連のダイナミクス」シンポジウム講演論文集 (2002) pp.145-150.
- (2-2) 川本, 小泉, 梅津, 白石, "複数の針対平板電極系放電場における針電極間の干渉効果", 第 13 回「電磁力関連のダイナミクス」シンポジウム講演論文

- 集 (2002) pp.141-144.
- (2-3) 梅津, 白石, 林, 川本, "針対平板電極系放電場を利用する水上移動機構について", 日本機械学会 2002 年度年次大会講演論文集, Vol. VII (2002) pp.237-238.
 - (2-4) 村田, 安田, 高崎, 川本, "針対平板電極系放電場における動力学", 日本機械学会 機械力学・計測制御部門講演会 D&D2002 (2002).
 - (2-5) 安田, 梅津, 白石, 小泉, 川本, "針対平板電極系放電場におけるイオン風について", 日本機械学会 機械力学・計測制御部門講演会 D&D2002 (2002) pp.276.
 - (2-6) 梅津, 白石, 川本, "静電力を利用するリニア駆動機構", 日本機械学会 機械力学・計測制御部門講演会 D&D2002 (2002) pp.278.
 - (2-7) 川本, 梅津, 小泉, 白石, 安田, "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", 電気学会放電研究会資料, ED-03-2, DEI-03-7 (2003), pp.7-13.
 - (2-8) 西村, 梅津, 白石, 川本, "静電力を利用する紙の分離機構", 日本機械学会 関東学生会第 42 回 学生員卒業研究発表講演会 講演前刷集 (2003) pp.5-6.
 - (2-9) 中山, 渡辺, 渡辺, 川本, "電子写真二成分磁気ブラシにおける磁性キャリア粒子の電界剥離現象", 第 15 回「電磁力関連のダイナミクス」シンポジウム講演論文集 (2003) pp.205-208.
 - (2-10) 仲野, 川本, "電子写真の非磁性非接触 AC 反転現象におけるライン画像の再現特性", 第 15 回「電磁力関連のダイナミクス」シンポジウム講演論文集, 金沢 (2003-5) pp.209-212.
 - (2-11) 梅津, 安田, 曾我部, 川本, "針体平板電極系放電場における火花放電時に働く力について", 第 15 回「電磁力関連のダイナミクス」シンポジウム講演論文集 (2003) pp.213- 218.
 - (2-12) 西村, 梅津, 白石, 川本, "静電力を利用する紙の分離機構", 第 15 回「電磁力関連のダイナミクス」シンポジウム講演論文集 (2003) pp.219-222.
 - (2-13) 中津原, 山田, 須甲, 中山, 川本, "電磁界中における電磁粒子の電界効果", 第 15 回「電磁力関連のダイナミクス」シンポジウム講演論文集 (2003) pp.223-226.
 - (2-14) 高橋, 山田, 須甲, 中山, 川本, "磁界中で形成される磁性粒子の力学", 第 15 回「電磁力関連のダイナミクス」シンポジウム講演論文集 (2003) pp.227-230.
 - (2-15) 川本, "電子写真プロセスのシミュレーション", Japan Hard Copy 2003 論文集 (2003) pp.99-102.
 - (2-16) 16.梅津, 西村, 川本, "静電力を利用する用紙剥離・搬送機構", Japan Hard Copy 2003 論文集 (2003) pp.73-76.
 - (2-17) 白石, 梅津, 黒宮, 川本, "斜毛シートを用いた静電駆動機構について", 日本機械学会 2003 年次大会 講演論文集, Vol. V (2003) pp.285-286.
 - (2-18) 梅津, 白石, 西村, 川本, "静電力を利用した紙の分離に関する研究", 日本機械学会 2003 年次大会講演論文集, Vol. V (2003) pp.287-288.

- (2-19) 山村，梅津，川本，村田，池尻，吉沢，"針對平板電極系放電場におけるイオン風について"，日本機械学会 機械力学・計測制御部門講演会，Dynamics & Design Conference 2003 (DD2003)，アブストラクト集 (2003) pp.94.
- (2-20) 川本，新井，小泉，梅津，"針對平板電極系における静電インクジェット現象"，電気学会 放電研究会資料，ED-03-248 (2003) pp.51-58.
- (2-21) 仲野，川本，伊藤，"磁性 1 成分現像においてトナー電荷がトナーチェーンに及ぼす影響"，Japan Hardcopy 2003 Fall Meeting (2003) pp.41-44.
- (2-22) 中山，山田，川本，"平行平板電極中における導電性粒子のダイナミクス"，日本機械学会 情報・知能・精密機器部門講演会 (IIP2004) (2004).
- (2-23) 黒宮，関，川本，"進行波電界による粒子の搬送"，日本機械学会 情報・知能・精密機器部門講演会 (IIP2004) (2004).
- (2-24) 鈴木，梅津，小泉，川本，"静電インクジェット現象における微小液滴吐出"，日本機械学会 情報・知能・精密機器部門講演会 (IIP2004) (2004).

(3) 出版物

なし

4. 研究成果による工業所有権の出願，取得状況

川本，梅津，"シート分離機構"，特願 2003-353060 (2003-10).

5. 研究成果

1 まえがき

電極間に電圧を印加すると、ある限界電圧以上で放電が生じることは周知のとおりである[1]。静電力を利用しようとする場合、電界が高いほど高出力が得られるが、この放電が障害となって出力密度に限界が生じる。したがって、静電力応用の立場からは、放電は防ぐべきものであり百害あって一利なしというのが一般的なコンセンサスであろう。しかし、放電時に、単に電離電流が流れるだけでなく、非放電時の静電力とは異なる何らかの力学作用が生じるなら、それはそれで使い道があるのではないかと、というのが「放電力学」の研究を始めた動機である。もとより「放電力学」なる専門語はない。著者の勝手な造語である。しかしそれでは放電にともなう力学作用についてこれまでまったく報告がないかというところではなく、電気流体力学 (EHD: Electro Hydro Dynamics) の一分野としてこれまでもいくつかの特異な力学現象や応用例が報告されている。本研究では、この放電にともなう力学作用とその応用を行ったものである。

2 放電現象と発生する力 [2]

図1に示すような針対平板電極間に印加する電圧を徐々に上げてゆくと、図2に示すような電圧-電流特性が得られる。すなわち、印加電圧が低い場合には暗電流が流れるだけであるが、ある限界電圧に達すると有意な電流が流れ始める。コロナ放電である。このとき正負いずれの場合にも、針の先端に微小な発光が認められる。放電は無声である。針電極が正の正コロナでは初期にストリーマーコロナが、針電極が負の負コロナではトリチェリパルスが生じる。さらに電圧を上げると放電音を生じるとともに、火花放電を生じる。

それでは、このような放電現象に対応して電極にはどのような力が作用するであろうか。この力を検出するために、針電極に低剛性の片持ちばりを接続し、この片持ちばりの変位にはりの剛性を掛けて静電力を算出した。図3に測定結果を示す。上向きの力を正に表示してある。

実験結果から、まずコロナ放電のない静電場では、(1) 電極が互いに吸引する方向に $10 \mu\text{N}$ オーダの静電力が作用する、(2) この静電力は印加電圧の2乗に比例する、(3) ギャップが小さいほど静電力が大きい などの特徴がわかる。このよう

な特徴は、図に付記した静電場におけるクーロン力の計算結果と良く一致する。すなわち、暗流域において電極間に吸引力が作用するのは、静電場におけるクーロン力によるものであるという自明のことが確認できる。

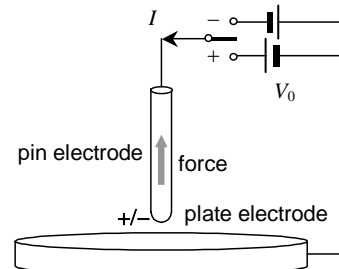


Fig. 1 Pin-to-plate gas discharge system.

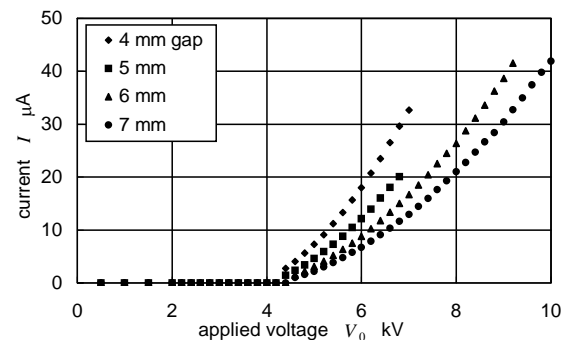


Fig. 2 V-I curves in pin-to-plate system. (ϕ 0.5 mm pin diameter)

しかしコロナ放電域では、逆に電極間が離反する方向に数 $100 \mu\text{N}$ オーダの力が生じる。コロナ放電時には電極表面の電界は臨界値を超えることはなく、単に臨界電界に達した電極面積が広がるだけであるから、印加電圧を上げてもクーロン力の大きさはほとんど変わらないし、そもそもこの静電力は吸引力である。しかし、コロナ放電時には針電極の先端からイオン風が生じており、その反力によって上向きの力が生じるのではないかと考えた。図4は放電場におけるイオンの電荷密度と電界分布を計算し、その積で表されるイオンの泳動力 (体積力) を駆動源とする非圧縮性粘性流体に関するナビエ・ストークスの式を解いて流速分布を計算したものである。このようにして求めた圧力分布や流速分布は実測値によく一致した。これらの検討から、コロナ放電時に針電極と平板電極間に反発力が生じるのは、イオン風の反力であると結論できた[3]。

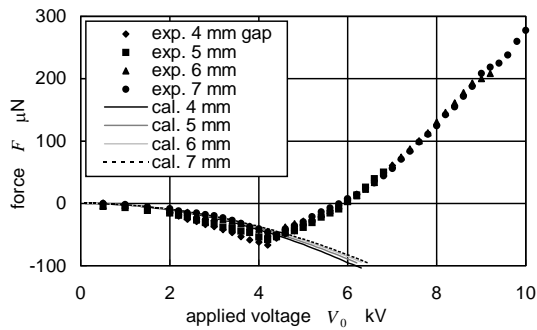


Fig. 3 Force applied to pin electrode in pin-to-plate system. (ϕ 0.5 mm pin diameter)

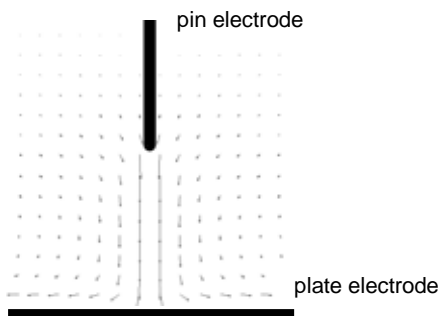


Fig. 4 Velocity of ionic wind. (max. 7.7 m/s, 7 mm gap, $V_0 = 7$ kV, ϕ 0.5 mm pin diameter)

さらに電圧を上げた火花放電域では、放電音が生じるので何らかの力が生じているのではないかと思われたが、いくつかの間接的な方法で検討した結果、有意な力は生じていないことが確認された[4]。

以上を整理すると、以下のようになる。

- (1) 暗流域：電極間には、極性によらず数 $10 \mu\text{N}$ オーダの電界の 2 乗に比例する吸引力が作用する。
- (2) コロナ放電域：イオン風の反力によって数 $100 \mu\text{N}$ オーダの電極が離反する方向の力が作用する。
- (3) 火花放電域：電極間が橋絡するだけであり、有意な力は生じない。

3 放電に起因する特異な力学現象とその応用

3.1 静電モーゼ効果[5]

図1の金属製の平板電極をイオン伝導性の水に置き換えれば、静電力やイオン風の反力が水面の変形として観測されるはずである。図5はまず暗流域における水面の持ち上げりをクーロン力の計算値と比較したものであり、これからも暗流域における力は単純なクーロン力であることが再確認できる。

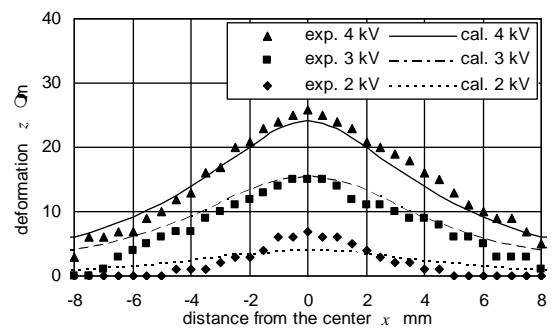


Fig. 5 Rising of water level at dark discharge. (ϕ 0.5 mm pin diameter, 4 mm air gap)

つぎに、コロナ放電域ではイオン風によって逆に水面がへこむはずであり、これを確認した結果を、原理図とともに図6に示す。図7は、この液位のくぼみに液体の密度と重力の加速度をかけて圧力に換算した結果 (E) とこれに表面張力とクーロン力を加えたもの (F)、および平板上の圧力 (D) を比較したものである。独立な方法で導出した圧力分布 (F) と (D) はよく一致しており、これから、コロナ放電域における液位のへこみはイオン風の反力によることが確認できる。

また後述のように火花放電は断続的に生じ、これにともなって火花放電域では液面に振動が生じる。高磁界中におけるモーゼ効果[6]と対比させて、気体放電によってこのように水面が変化する現象を、われわれは「静電モーゼ効果」と命名している。

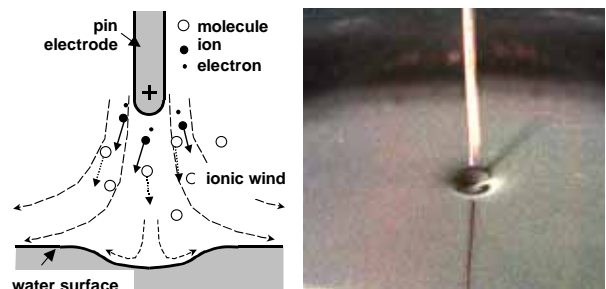


Fig. 6 Conceptual drawing (left) and photograph (right) of Electrostatic Moses Effect. High voltage (~ 7 kV) is applied between the upper pin electrode (ϕ 0.5 mm diameter) and the lower ion-conductive water pigmented by black ink (right).

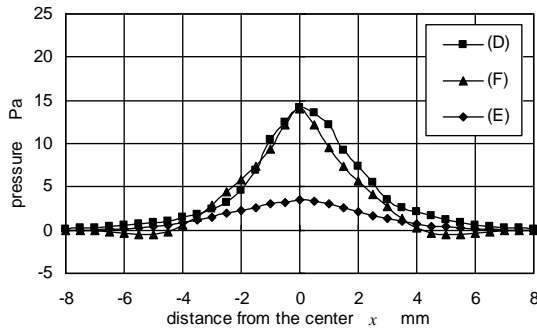


Fig. 7 Pressure distribution on plate electrode at corona discharge. (ϕ 0.5 mm pin diameter, 7 mm air gap, 6 kV applied voltage)

3.2 コロナジェット現象 [7]

針電極自身の剛性が極端に低い場合,コロナ放電が生じるある印加電圧以上で,針電極がフラッタ様に横方向にふれまわる現象が観測される.実験の結果,線径とギャップが大きいほどふれまわり開始電圧がわずかながら高くなるが,線長にはほとんどよらないことがわかった.このような現象の発生メカニズムとして,"従動"力によって圧縮された棒の安定問題が考えられる[8].すなわち,本実験の場合,針電極は平板電極に対して厳密に直角ではありえず,ある程度の初期曲がりや傾きが存在するが,針電極が傾いた場合,針電極に作用するコロナ風の反力は電気的なギャップが最小となる鉛直方向に作用するのではなく,傾いた針電極に沿う方向に作用することが確認されている.したがって,針電極に作用する力が上向きになる電圧でふれまわりが生じると考えられる.このようなメカニズムの妥当性は,ふれまわり振動の発生臨界電圧とその線長依存性,ふれまわり周波数の印加電圧依存性からも確認されている.

これに類似した現象は線対平板電極系でも観測されており,コロナ放電時に線電極に横振動が生じることが報告されている.この振動は,この系をポリエステルフィルム急冷製膜装置や電子写真機の帯電器に応用する場合に障害になるものであり,現象の解明と対策が進められている[9]-[13].

3.3 放電連成振動 [7]

針電極の支持剛性が弱いとき,針電極が上下方向に振動することがある.まず暗流域では,針電極は下方に静変位するだけであり,当然ながら振動は生じない.しかし正コロナ放電開始電圧付近では,パルス状の不安定なストリーマコロナが生じ,これにともなって電極が振動する現象が観

測された(図8).振動の周波数は,ほぼ片持ちはり・針電極系の固有振動数に等しい.さらに印加電圧を上げて安定なコロナ放電状態になると,コロナ放電電流は安定な一定値になり,変位も安定になる.このように,針対平板電極系の正コロナ電流は必ずしも常に安定ではなく,条件によってパルスが生じることがあるため,イオン風の反力であるコロナ放電時の力も一定ではなく,針電極の支持剛性や固有振動数などの条件によっては針電極が振動する.

負コロナ放電では,コロナ放電開始時にトリチェリパルスが生じる[14].このトリチェリパルスの周波数は電極の振動数にくらべて高いが,図9のように電極振動が生じることがある.これは原理的には正コロナ放電開始時と同様の強制振動である.

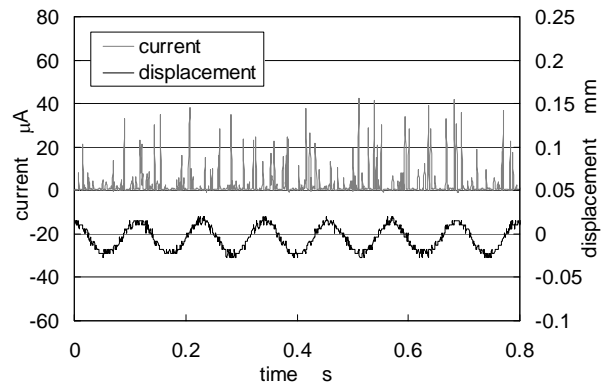


Fig. 8 Vertical displacement of pin electrode and discharge current. (3.88 kV, positive, ϕ 0.5 mm pin diameter, 5 mm air gap)

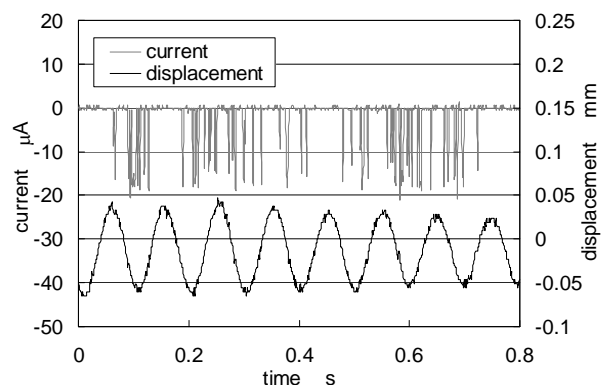


Fig. 9 Vertical vibration of pin electrode and discharge current. (4.23 kV, negative, ϕ 0.5 mm pin diameter, 7 mm air gap)

電圧を上げて火花放電が始まると,低剛性支持された針電極が上下に大きく振動する現象が観測される.まず火花放電開始電圧付近では,火花

放電の発生が安定しないが、一度放電が起こると針電極は振動を始める。その結果ギャップが狭くなる際に火花放電が発生しやすくなり、火花放電と連成した振動になる。さらにギャップを大きくし、電圧を上げると、図10に示すような安定したほぼ一定周期の火花放電が生じる。図から火花放電は、針電極が下方に振動したとき、すなわち電極間ギャップが狭まったときに生じており、その発生は針の振動と連成していること、片持ちはりが振動を開始するとき、最初に下方へ振動していることがわかる。針電極の極性を負にした場合にも同様な連成振動が観察された。いずれの場合にも振動振幅は最大1 mm程度であり、コロナ放電時の静電力による静変位（最大100 μm 程度）より約1桁大きい。振動は電圧印加後数秒で定常になり、発散することはない。

このような現象を模擬するため、放電電極を単純な1自由度の振動系に置き換え、先述の各領域における力を外力にして応答計算した。図10に付記したように、計算結果は実測値によく一致した。これらの結果から、火花放電時の放電連成振動は、火花放電時に力が作用するからではなく、ギャップ電圧が変化することによって、クーロン力やイオン風の反力が変化することによるものであることが判明した。

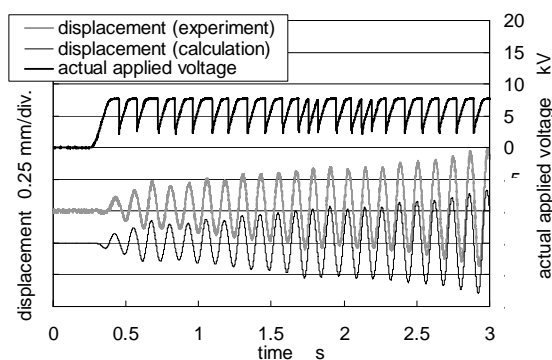


Fig. 10 Vertical vibration of pin electrode and discharge current. (7.5 kV, positive, ϕ 0.5 mm pin diameter, 4 mm air gap)

3.4 インクジェット [15]

金属針電極をチューブに満たした液体に置き換え、液体と平板間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 [16][17] や微量な水滴を形成する質量検量器 [18] が実現できる。このような観点から検討を行い以下のような知見を得た。

(1) 暗流域： 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。 [19]

(2) コロナ放電開始直後： 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。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 [20]。

(3) 印加電圧を上昇させたコロナ放電域： 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。

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。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。図11に印字サンプルを示す。技術的にはまだ稚拙であるが、新しい可能性を実証したものである。

なおインクジェット現象に関連して、送電線から垂れ下がる雨滴を針電極とみなして、送電線に作用する力を測定した報告がある。 [21]



Fig. 15 Original bit image (a), first (b) and second (c) stage print sample.

3.5 イオン風の利用

コロナ放電を利用する駆動機構としてはいわゆるコロナモータが有名であり、多くの研究が行われている [22][23]。いっぽうわれわれは、イオン風の反力が一種の従動力であることを利用したマイクロ駆動機構を開発している。すなわち、前述のように、針対平板電極系において針電極が平板電極に対して傾いた場合、力は電極間の最短距離方向ではなく、針電極の向きに沿う方向に作用することが判明している。したがって、図16に示すような可動子の上面に平板電極を対抗させて高電圧を印加すると、(a)では水平方向の力が、(b)では回転トルクが生じる [24]。発生する力は

小さいが、可動子の構造が簡単であり、マイクロマシンの駆動源に利用できるのではないかと考えている。

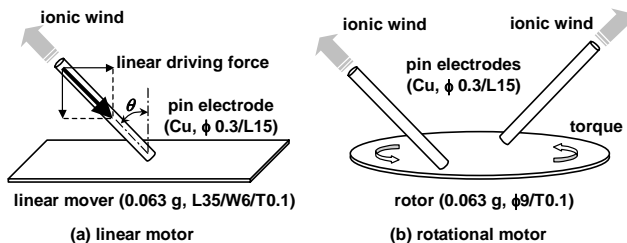


Fig. 16 Linear and rotational driving mechanisms utilizing ionic wind.

このほかに、イオン風そのものをファンとして利用したものもある。可動部がないこと、無騒音であること、針の先端付近に局所的な風を起こすことができるので、電子回路などの局所的な冷却が可能であること、コロナ放電で生じるオゾン[25]の送風機として利用できることなどの利点がある。

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, 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, 安田, 梅津, 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, C (投稿中).
- [4] 梅津, 安田, 曾我部, 川本, 針体平板電極系放電場における火花放電時に働く力について, 第15回「電磁気関連のダイナミクス」シンポジウム講演論文集 (2002) 213-218.
- [5] 川本, 梅津, 小泉, 白石, 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.
- [6] N. Hirota, et al., Rise and Fall of Surface Level of Water Solution under High Magnetic Field, *Jpn. J. Appl. Phys.*, **34** (1995) L991-L993.
- [7] 川本, 高崎, 安田, 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.
- [8] V. V. ボロチン (関谷, 杉山 訳), 非保存的弾性安定問題, 培風館 (1977).
- [9] 吉沢, 津田, 菅原, 辻岡, 線対平板電極系における線電極の静力学特性, 機論, **58**-548, C (1992) 1099-1104.
- [10] 伊東, 吉沢, 菅原, 線対平板電極系における線電極の面外横振動, 機論, **60**-573, C (1994) 1502-1508.
- [11] 伊東, 吉沢, 菅原, 線対平板電極系における線電極の自励振動とその緩和, 機論, **61**-590, C (1995) 3851-3858.
- [12] 伊東, 磯口, 吉沢, 菅原, 線対平板電極系におけるコロナ放電に伴う線電極の横振動 (内部共振を用いた線電極の振動緩和), 機論, **62**-594, C (1996) 474-481.
- [13] 伊東, 吉沢, 都筑, 菅原, コロナ放電に起因する線電極周囲における流体場の数値解析 (渦平成の検討と流体力の評価), 機論, **64**-627, C (1998) 4115-4122.
- [14] W. L. Lama and C. F. Gallo, Systematic Study of the Electrical Characteristics of the "Trichel" Current Pulses from Negative Needle-to-Plane Coronas, *J. Appl. Phys.*, **45**-1 (1974) 103-113.
- [15] H. Kawamoto, K. Arai, R. Koizumi and S. Umezu, Electrostatic Inkjet Phenomena Utilizing Pin-to-Plate System, *Proc. of the 2003 JSME-IIP/ASME-ISPS Joint Conf. on Micromechatronics for Information and Precision Equipment: IIP/ISPS Joint MIPE* (2003) 327-328.
- [16] R. N. Mills, ESIJET™ Printing Technology, *IS&T's NIP 12: Int. Conf. on Digital Printing Technologies* (1996) 262-266.
- [17] 村上, ほか, 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.
- [18] O. Yogi et al., On-Demand Droplet Spotter for Preparing Pico- to Femtoliter Droplets on Surfaces, *Anal. Chem.*, **73** (2001) 1896-1902.
- [19] A. G. Bailey, *Electrostatic Spraying of Liquids*, Research Studies Press (1988).
- [20] J-D. Moon, J-G. Kim and D-H. Lee, Electrophysicochemical Characteristics of a Waterpen Corona Discharge, *IEEE Trans. Industry Applications*, **34**-6 (1998) 1212-1217.
- [21] M. Farzaneh and Y. Teisseyre, Mechanical Vibration of H.V. Conductors Induced by Corona: Roles of the Space Charge and Ionic Wind, *IEEE Trans. on Power Delivery*, **3**-3 (1988) 1122-1130.
- [22] J. E. C. Stringer, Electrostatic Motors, *Nature*, **20**, (1962) 264-265.
- [23] M. Hattori, K. Asano and Y. Higashiyama, The fundamental characteristics of a cylindrical corona motor with multi-blade electrodes, *J. Electrostatics*, **27** (1992) 223-235.
- [24] 梅津, 白石, 林, 川本, 針対平板電極系放電場を利用する水上移動機構について, 機械学会2002年度年次大会講演論文集, Vol. VII (2002) 237-238.
- [25] 川本, 針状電極コロナ放電場を利用する電子写真帯電器のオゾン生成, 機論, **66**-64, C (2000) 681-686.

6. 添付資料 (発表論文)

- (1) 川本, 梅津, 小泉, 白石, "針對平板電極系放電場における静電静水力学効果について", 日本機械学会論文集 (C 編), 69 巻, 678 号 (2003) pp.328-334.
- (2) 川本, 高崎, 安田, "針對平板電極系放電場における針電極の動力学", 日本機械学会論文集 (C 編), 69 巻, 681 号 (2003) pp.1449-1455.
- (3) 川本, 安田, 梅津, "針對平板電極系コロナ放電場におけるイオン風について", 日本機械学会論文集 (C 編), 70 巻, 689 号 (2004) pp.169-175.
- (4) N. Nakayama, H. Kawamoto, S. Yamada and A. Sasakawa, "Statics of Electromagnetic Bead Chain in Electromagnetic Field," *IS&T's NIP18: International Conference on Digital Printing Technologies* (2002) pp.742-747.
- (5) H. Kawamoto, K. Arai, R. Koizumi and S. Umezu, "Electrostatic Inkjet Phenomena Utilizing Pin-to-Plate System," *Proceedings of the 2003 JSME-IIP/ASME-ISPS Joint Conference on Micromechatronics for Information and Precision Equipment: IIP/ISPS Joint MIPE* (2003) pp.327-328.
- (6) H. Kawamoto, S. Umezu and J. Shiraishi, "Paper Separation and Feed Utilizing Electrostatic Force," *Proceedings of the 2003 JSME-IIP/ASME-ISPS Joint Conference on Micromechatronics for Information and Precision Equipment: IIP/ISPS Joint MIPE* (2003) pp.329-330.
- (7) M. Nakano and H. Kawamoto, "Investigation of a Non-Magnetic and Non-Contact AC Development Process in Electrophotography," *Proceedings of the 2003 JSME-IIP/ASME-ISPS Joint Conference on Micromechatronics for Information and Precision Equipment: IIP/ISPS Joint MIPE* (2003) pp.331-332.
- (8) H. Kawamoto, "Basic research and application on dynamics of electromagnetic particles for imaging technology," *Particles 2003: Imaging, Marking, and Printing Applications of Particle Technology* (2003) pp.57.
- (9) H. Kawamoto, K. Arai and R. Koizumi, "*Electrostatic Inkjet Phenomena in Pin-to-Plate Discharge System*," *IS&T's NIP19: International Conference on Digital Printing Technologies* (2003) pp.359-364.
- (10) S. Umezu, J. Shiraishi, H. Nishimura and H. Kawamoto, "Paper Separation and Feed Mechanisms Utilizing Electrostatic Force," *IS&T's NIP19: International Conference on Digital Printing Technologies* (2003) pp.559-564.
- (11) M. Nakano, H. Kawamoto and I. Itoh, "Influence of Toner Charge on Magnetic Chain Formation in Magnetic Single-Component Development System of Electrophotography," *IS&T's NIP19: International Conference on Digital Printing Technologies* (2003) pp.74-78.
- (12) N. Nakayama, Y. Watanabe, Y. Watanabe, and H. Kawamoto, "Experimental and Numerical Study on the Bead-Carry-Out in Two-Component Development Process in Electrophotography," *IS&T's NIP19: International Conference on Digital Printing Technologies* (2003) pp.69-73.
- (13) 川本, 中山, "複写機的设计の変遷", 設計工学, Vol. 37, No. 5 (2002) pp.211-217.
- (14) 川本, 中島, 鴨井, "インクジェットプリンタの最新技術", 日本 AEM 学会誌, Vol. 11, No. 1 (2003) pp.23-29.

- (15) 川本, "オゾンを発生しない複写機", 特集 プラズマ応用の新しい展開, 電気学会誌, Vol. 123 (2003) pp.660-663.
- (16) 川本, "放電力学 - 放電にともなう力学現象とその応用", 静電力応用技術の新展開 特集, AEM 学会誌, Vol. 11, No. 3 (2003) pp.161-166.
- (17) 川本, 梅津, 小泉, 白石, 安田, "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", 電気学会放電研究会資料, ED-03-2, DEI-03-7 (2003), pp.7-13.
- (18) 川本, 新井, 小泉, 梅津, "針対平板電極系における静電インクジェット現象", 電気学会 放電研究会資料, ED-03-248 (2003) pp.51-58.

以 上