
針対平板電極系における針電極の放電連成振動

(課題番号 12650235)

平成 12 年度 ~ 平成 13 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 14 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は、オゾン生成装置やレーザプリンタの帯電器などに利用されている。これらはいずれも気体放電を利用するものであるが、放電に伴う静電力によって針電極が変形や特異な振動を生じることがある。本研究は、このような針対平板電極系における針電極の力学を理論と実験の両面から解明し、放電系の各パラメータの影響を明らかにし、さらに、振動の抑制策を提案することを目的とする。本研究によって以下のような知見が得られた。

静特性 コロナ放電のない静電場では、電極が互いに吸引する方向の静電力が作用する。コロナ放電開始後の静電力は、正負ともに、印加電圧を高くするにしたがってコロナ開始前とは反対の、針電極を押し上げる向きに働く。コロナ放電時の静電力の向きが逆転するのは、コロナ風の影響が大きい。正負コロナともに、針の直径やギャップは静電力にはほとんど影響を及ぼさない。

動特性 低剛性支持された針電極に生じる動力学現象として、パルス状のコロナ電流によって生じる強制振動と火花放電時に生じる放電連成振動を観測した。前者はイオン風の反力がパルス状に変化することによる一種の強制振動と考えられる。後者も印加電圧の変化にともなうイオン風の反力の変化による強制振動と火花放電の連成振動と考えられる。

特異な力学現象 本研究の過程で次のような3種の特異な力学現象を発見した。その第1は、水を平板電極にすると、静電力やコロナ放電時のイオン風によって水面が変化する現象が生じ、さらに火花放電が生じると、水の重力波が生じる現象である。第2は、極低剛性の針電極にフラッタが生じる現象であり、マイクロマシンの駆動源への適用が考えられる。第3は、絶縁チューブの中を水で満たした針電極では、静電力によって水を吐出する現象であり、新しいインクジェットプリンタや生化学用微小液滴分析装置への適用が考えられる。これらの現象の解明と応用は今後の課題である。

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)	11

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	2,200	0	2,200
平成 13 年度	700	0	700
総 計	2,900	0	2,900

3. 研究発表

(1) 学会誌等

- (1-1) H. Kawamoto, K. Takasaki, H. Yasuda and N. Kumagai, "Statics of Pin Corona Charger in Electrophotography," *IS&T's NIP16: International Conference on Digital Printing Technologies*, Vancouver, Canada (2000-10) pp.827-835.
- (1-2) 川本、"OA 機器 (機械工学年鑑、情報・精密機器)"、日本機械学会誌、Vol. **103**、No. 981 (2000-8) pp.548.
- (1-3) 川本、"電子写真カラープリンタ技術の現状と今後の課題"、日本 AEM 学会誌、Vol. **8**、No. 3 (2000-9) pp.295-311.
- (1-4) 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"、日本機械学会論文集 (C 編)、67 巻、657 号 (2001-5) pp.1385-1392.
- (1-5) H. Kawamoto, "Statics of Pin Electrode in Pin-to-Plate Discharge System", *J. Imaging Sci. & Technol.*, Vol. 45, No. 6 (2001) pp.556-564.
- (1-6) H. Kawamoto, K. Takasaki, H. Yasuda and N. Kumagai, "Dynamics of Pin Electrode in Pin-to-Plate Gas Discharge System Used for Ozone-less Charger in Laser Printer," *10th ICPE: 10th The International Conference on Precision Engineering*, Yokohama (2001-7) pp.694-698.
- (1-7) H. Kawamoto, K. Takasaki and H. Yasuda, "Dynamics of Pin Electrode in Pin-to-Plate Discharge System," *IS&T's NIP17: International Conference on Digital Printing Technologies*, Fort Lauderdale, Florida (2001-10) pp.682-689.
- (1-8) H. Kawamoto, K. Takasaki, H. Yasuda, S. Umezu and K. Arai, "Static and Dynamic Phenomena of Pin Electrode in Pin-to-Plate Discharge System," *Proceedings of the 3rd. IFToMM International Micromechanism Symposium* (2001-9) pp.69-74.

(2) 口頭発表

- (2-1) 川本、安田、熊谷、"針対平板電極系放電場における針電極の静力学特性"、第 12 回「電磁力関連のダイナミクス」シンポジウム講演論文集、2C22、沖縄 (2000-6) pp.585-588.
- (2-2) 川本、高崎、熊谷、安田、"針対平板電極系負コロナ放電場における針電極の静力学特性"、日本機械学会 (D & D2000) 機械力学・計測制御講演論文アブストラクト

集、No. 00-6、419、明治大学 (2000-9) pp.198.

- (2-3) 川本、安田、高崎、熊谷、"針対電極板放電場における動力学特性"、日本機械学会 東海支部 第 50 期総会・講演会 講演論文集 No. 013-1、名古屋、106 (2001-3) pp.11-12.
- (2-4) 川本、高崎、熊谷、安田、"針対平板電極系放電場における力学"、電気学会 放電研究会資料、ED-00-171 (2000-12) pp.19-26.
- (2-5) 川本、高崎、安田、"針対平板電極放電場における特異な力学現象"、第 13 回「電磁力関連のダイナミクス」シンポジウム、No. 01-251、312、幕張メッセ (2001-6) pp.475-480.
- (2-6) 川本、新井、河辺、"針対平板電極系におけるインクジェット現象"、日本機械学会 情報・知能・精密機器部門講演会 (2002-3).
- (2-7) 川本、高崎、安田、村田、"針対平板電極系放電場における針電極の動力学"、電気学会 放電研究会資料、ED-01-275 (2001-12) pp.65-69.

(3) 出版物

- (3-1) 川本、"機械工学便覧"、日本機械学会.

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. ま え が き

針対平板電極系放電場は、避雷、高電圧機器の絶縁対策、オゾナイザー、電気集塵機、静電スプレーなどで工学的に重要であり、その電気的な特性に関しては古くから多くの研究が行われている⁽¹⁾。これらの在来の応用例では、通常電極は十分剛であり、送電線から垂れ下がる雨滴などの特別な事例⁽²⁾を除いて、力学的な問題が生じることはなかったようである。しかしながら、この放電場の新しい応用であるレーザプリンタのブラシ帯電器や磁気ブラシ帯電器では⁽³⁾、電極が極端に低剛性であり、放電にともなう静電力によって、電極の変形や特異な振動を生じる恐れがある。またレーザプリンタの2成分磁気現象系においても、磁界中で穂立ちしたキャリア粒子の一部が感光体に移動する、いわゆる "bead carry-out" のメカニズムを解明し対策するためには、針対平板電極系における電極の力学的なふるまいを明らかにすることが不可欠である⁽⁴⁾。

このためわれわれは、図1に示すような一対の針対平板電極系放電場における低剛性支持針電極の電磁力学特性を明らかにすることを目的とした一連の研究を行っており、静力学特性に関してはすでに報告した⁽⁵⁾。本報告では、このような研究の過程で観測された特異な動力学現象であるコロナ放電時の強制振動と火花放電時の放電連成振動について報告する。現時点ではまだこれらのメカニズム等について不明な点が多いが、電磁力関連振動の新しい興味ある現象であり、マイクロマシンの駆動源など前述のレーザプリンタ以外への応用も期待される。

2. 実 験

実験装置は、基本的には既報⁽⁵⁾に示したものと同じである(図1, 2参照)。すなわち、ステンレス製の針電極($\phi 0.2 \sim 0.5$ mm)を、ステンレス鋼板製の片持ちばりを介して、平板電極に対して垂直に垂下し、この片持ちばり先端の変位をレーザ変位計(キーエンスLK-080)で測定した。FFTは3.3節の火花放電時の電極振動や火花放電の周波数測定に用いた。ばりの先端につけた錘とレーザ変位計で計測した変位から事前に測定した片持ちばりの剛性は、2.68 N/mであった。直流電圧は、松定プレジジョン社製組込型高圧電源HVR-10P [正], HVR-10N [負](出力電圧0 ~ ± 10 kV)を利用し、外部ポテンショメータによって電圧を設定した。印加電圧は、このポテンショメータの設定(事前に較正してある)から換算し、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、平板電極下部のメカニカルステージで可変にできる構造になっている。

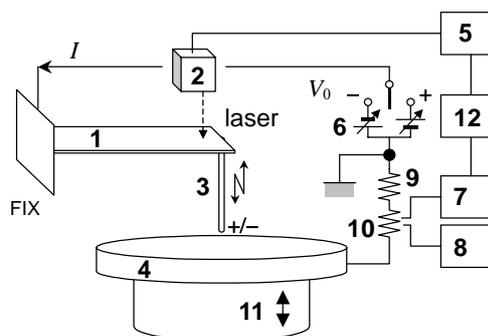


Fig. 1 Experimental set-up. (1: stainless steel plate, cantilever, T0.1/L100/W20 mm, 2: laser sensor, 3: pin electrode, stainless steel, $\phi 0.2 \sim 0.5$ mm, 4: plate electrode, steel, 5: laser displacement meter, 6: DC high voltage power supply, 7: DC volt meter, 8: oscilloscope, 9: resistor, 500 k Ω , 10: shunt resistor, 3 k Ω , 11: mechanical stage, 12: FFT Analyzer)

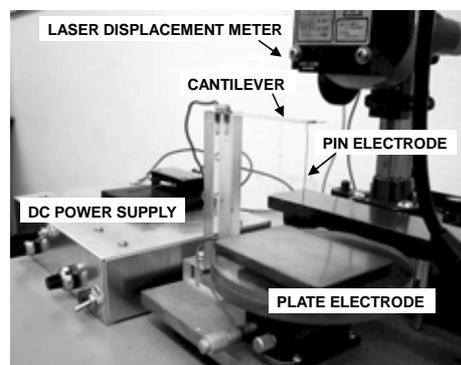


Fig. 2 Photograph of experimental set-up.

前報に報告したように⁽⁵⁾、電圧 電流特性や静電力は、電極の先端形状や放電生成物の付着の影響を受けるため、針電極先端を平滑にし、かつ清浄に保つよう努めた。本報告に示したデータは、実験の前後でほぼ再現性があることが確認されている。

3. 静電力と電極の振動

3.1 放電特性と静電力 針対平板電極系放電場における放電特性と電極に作用する静電力に関しては、文献⁽⁵⁾に報告済であるが、動特性との関連で要約すれば、以下のとおりである。すなわち、図1に示すような電極間に電圧を印加すると、図3に示すような電圧 - 電流特性と図4のような静電力が得られる。

まず電圧 - 電流特性に関しては以下のようなのである。印加電圧を徐々に上げてゆくと、最初はごく微小な暗電流が流れるだけであるが、ある限界電圧に達すると、 μA オーダーの有意な電流が流れ始める。このとき正負いずれの場合にも、針の先端に微小な（コロナ）発光が認められる。放電電流や発光は通常安定であり、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。さらに電圧を上げていくと放電音を生じるとともに、図示してある最大印加電圧以上で火花放電を生じる⁽⁶⁾。

つぎに静電力に関しては、まずコロナ開始電圧以下の放電のない静電場では、静電界による、印加電圧の2乗に比例する、 $10\ \mu\text{N}$ オーダーのごく微小な、吸引方向の静電力が作用する（針電極の上方に働く力を正に表示している）。静電力の大きさは、電極の極性によらない。空隙が小さく線径が大きいほど静電力は大きい。コロナ放電が始まると、数 $100\ \mu\text{N}$ オーダーの反発方向の静電力が生じる。静電力は正負コロナで大きな差は認められない。また電極径やギャップの依存性もほとんどない。予備的な実験の結果から、コロナ放電時にこのような力が生じるのは、イオン風の反力によるものと考えている。さらに電圧を上げると火花放電が生じるが、これについては3.3節に示す。

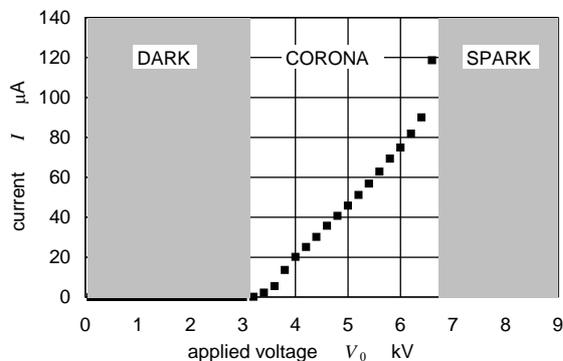


Fig. 3 V-I curve in pin-to plate system. (positive, ϕ 0.5 mm pin diameter, 5 mm air gap)

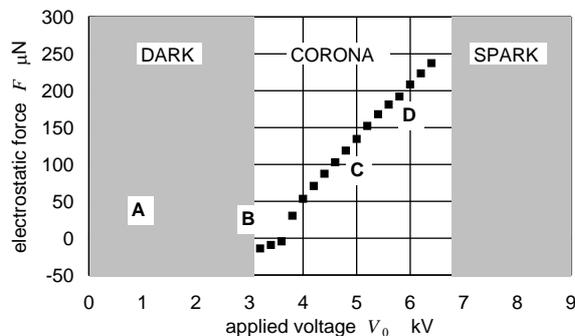


Fig. 4 Force applied to pin electrode in pin-to plate system. (positive, ϕ 0.5 mm pin diameter, 5 mm air gap)

3.2 コロナ放電時の電極振動 上記のような暗流域およびコロナ放電域における静電力は静的であるから、針電極は静的な変位をするだけのはずである。これを確認するために、図4の電圧 - 静電力特性のA~Dにおける電流と静電力波形を測定した。それぞれの結果を図5~8に示す。まず暗流域（図4 A）では、当然ながら、電流、変位ともに時間によらずほぼ一定である（図5）。しかし正コロナ放電開始電圧付近（図4 B）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6）。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（図4 C）になると、コロナ放電電流は安定な一定値になり、これにともなって変位も安定になる（図7）。しかしさらに電圧を上げて図4のDの付近になると、安定なコロナ電流にパルス電流が重畳するようになる（図8）。しかし、この状態での電流パルスの周波数は、片持ちはり・線電極系のそれにくらべて十分高いため、線電極はほとんど振動しない。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電流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静電力も一定ではなく、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。

負コロナ放電ではトリチェリパルスが生じるため⁽⁷⁾、原理的には正コロナ放電時と同様な電極振動が生じるはずであるが、トリチェリパルスの周波数は電極の振動数にくらべて十分高いため、有為な振動は観測されなかった。しかし印加電圧が高い場合には、負コロナ特有の放電の不安定性に起因して、電極振動を生じることがある。このような振動の例を図9に示す。放電電流が比較的安定であるにもかかわらず電極振動を生じていることから、全電流の変化ではなく、針電極先端部での負コロナ特有の放電位置の変化が振動を励起していると考えられる⁽⁸⁾。なお振動は偶発的であり、その発生条件は特定できていない。

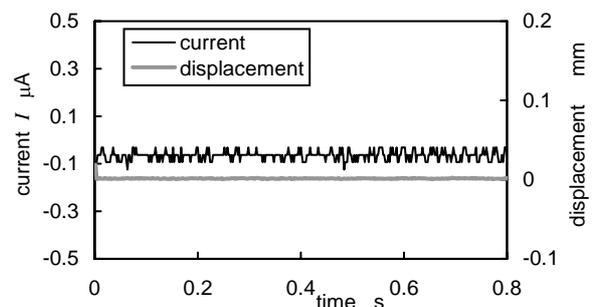


Fig. 5 Vertical displacement of pin electrode and discharge current. (1 kV, positive, ϕ 0.5 mm pin diameter, 5 mm air gap)

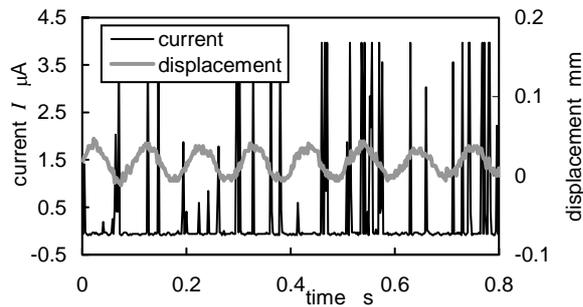


Fig. 6 Vertical displacement of pin electrode and discharge current. (3 kV, positive, ϕ 0.5 mm pin diameter, 5 mm air gap)

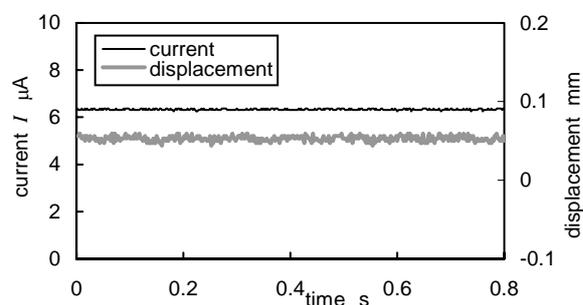


Fig. 7 Vertical displacement of pin electrode and discharge current. (5 kV, positive, ϕ 0.5 mm pin diameter, 5 mm air gap)

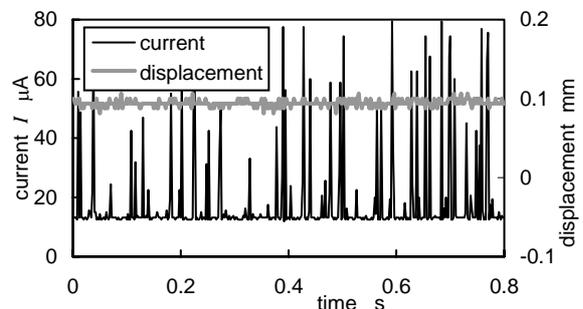


Fig. 8 Vertical vibration of pin electrode and discharge current. (6 kV, positive, ϕ 0.5 mm pin diameter, 5 mm air gap)

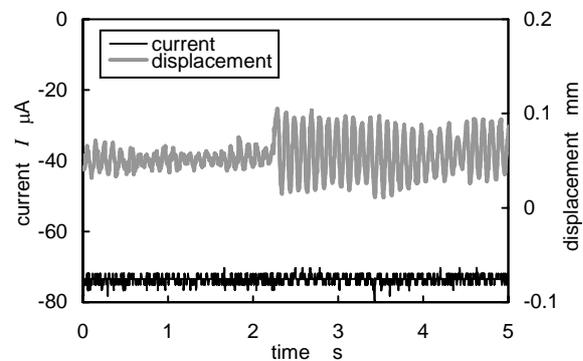


Fig. 9 Vertical vibration of pin electrode and discharge current. (9.4 kV, negative, ϕ 0.5 mm pin diameter, 7 mm air gap)

3.3 火花放電時の電極振動 コロナ放電よりさらに電圧を上げていくと、ある電圧以上で放電音を生じるとともに火花放電を生じる。火花放電は非持続放電であり、断続的に生じる。このとき、片持ちはり（剛性 2.68 N/m、減衰率 0.00179、固有振動数 9.79 Hz）によって支持された針電極が上下に振動する現象が観測された。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。図 10 はその一例である。さらに電圧を上げると、図 11 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おり、火花放電時に吸引力が発生していることがわかる。図 12 は針電極の極性を負にして同じ実験を行なったものであるが、正の場合と同じように、火花放電と針電極の連成振動現象が観察される。いずれの場合にも振動振幅は最大 2 mm 程度であり、コロナ放電時の静電力による静変位（最大 200 μ m 程度）より約 1 桁大きい。火花放電電流のパルス幅は 0.5~5 ms 程度であり、振動系の固有周期に比べて短い。火花電流の波高値は電源容量によって規制されるため、アーク放電まで発達することはない。

図 11 の状態から電極間のギャップを小さくする、あるいは電圧を上げると、振動の方向によらず火花放電が生じるようになる。電極が上方にあるときにも火花放電の発生条件以上の電圧が印加されるからであると考えられる。図 13 はギャップを小さくした場合である。火花放電の発生頻度が高くなるほど、その周期は系の固有振動周期から離れてゆくため、もはや共振的な連成振動ではなくなり、振動振幅は小さくなる。

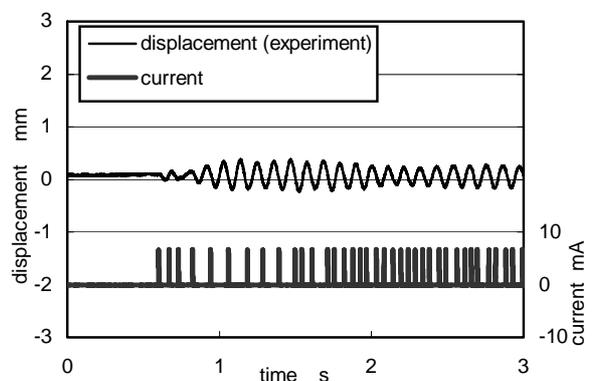


Fig. 10 Vertical vibration of pin electrode and discharge current. (6.35 kV, positive, ϕ 0.5 mm pin diameter, 3 mm air gap)

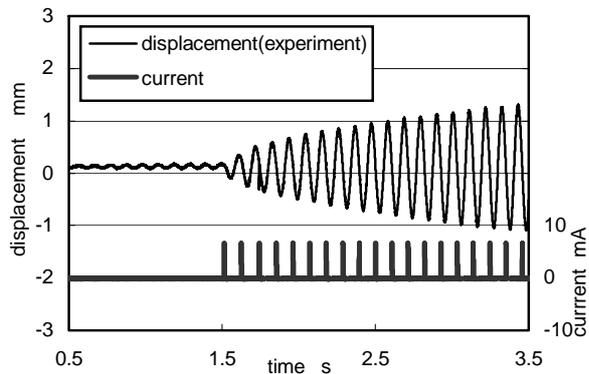


Fig. 11 Vertical vibration of pin electrode and discharge current. (8.12 kV, positive, ϕ 0.5 mm pin diameter, 4 mm air gap)

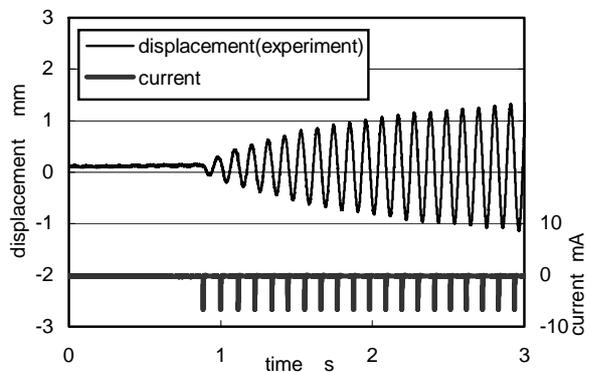


Fig. 12 Vertical vibration of pin electrode and discharge current. (8.12 kV, negative, ϕ 0.5 mm pin diameter, 4 mm air gap)

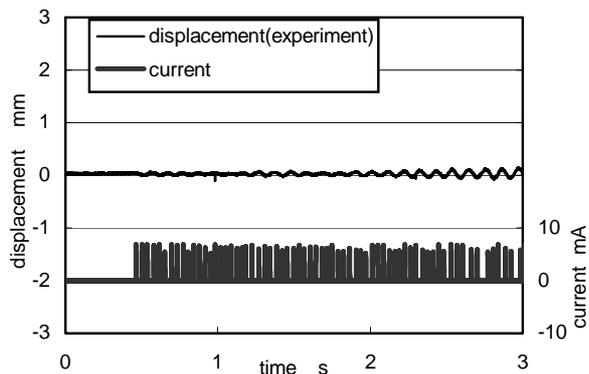


Fig. 13 Vertical vibration of pin electrode and discharge current. (4.73 kV, positive, ϕ 0.5 mm pin diameter, 2 mm air gap)

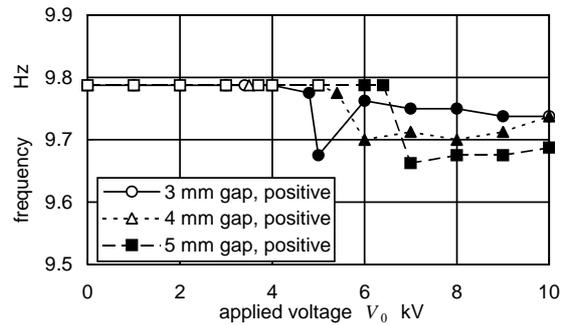


Fig. 14 Frequency of free vibration and spark-discharge-coupled forced vibration. (positive, 0.5 mm pin diameter)

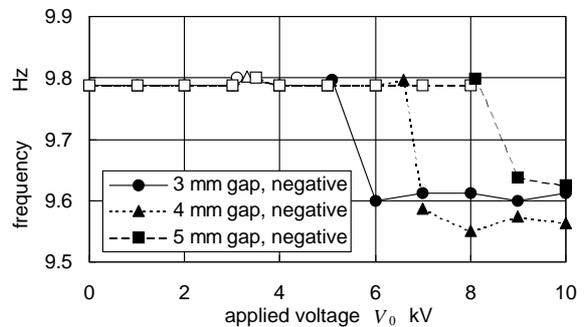


Fig. 15 Frequency of free vibration and spark-discharge-coupled forced vibration. (negative, 0.5 mm pin diameter)

火花放電時に発生する連成振動の振動数についても調べた。図 14 に針電極を正にした場合、図 15 に負の場合の測定結果を示す。火花放電開始以前では、基本的に振動は生じないので、自由振動させたときの値を白抜きプロットで表示している。コロナ放電時の（イオン風に起因する）反発力の大きさは、ギャップにほとんど依存しないので⁽⁵⁾、コロナ放電時の固有振動数は非放電時のそれに等しい。しかし、火花放電開始後、振動の周波数は、固有振動数にくらべて、正に印加した場合で 0.02 ~ 0.1 Hz、負の場合で 0.1 ~ 0.2 Hz 低くなる。このような特徴は線対平板電極系における振動でも観測されているが⁽⁹⁾、振動の発生メカニズムは同じではなく、針対平板電極系の場合その原因は不明である。

4. あとがき

針対平板電極系放電場における電極に生じる特異な動力学現象である、コロナ放電時の強制振動と火花放電時の放電連成振動を観測した。これらの現象の特徴は以下のとおりである。なお、著者の知る限りこのような現象は過去に報告されていない。

(1) コロナ放電時の振動 針対平板電極系の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電流が生

じることがあるため，イオン風の反力である静電力も一定ではなく，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ことがある．コロナ電流が一定であっても，放電位置の変化などの負コロナに特有の放電の不安定性によって電極振動が生じることがある．これらはいずれもイオン風の反力を外力とする強制振動であると考えられる．

(2) 火花放電時の振動 火花放電時に針電極が振動する放電連成振動が観測された．この振動は，コロナ放電時の反発力が，火花放電時に吸引力に転じることによって生じる強制振動であると考えられる．振動の周波数は系の固有振動数よりわずかに低い．

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) Farzaneh, M. and Teisseyre, Y., 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.
- (3) 電子写真学会 編，続電子写真技術の基礎と応用，コロナ社，(1996) 257.
- (4) E. M. Williams, The Physics and Technology of Xerographic Processes, Krieger Publishing Co., Malabar, FL (1993) 200.
- (5) 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.
- (6) Walsh, P. J., Pietrowski, K. W. and Sigmond, R. S., The Negative Corona Current Distribution for a Long Pin-to-Plane Geometry, *Photographic Sci. Eng.*, **28-3** (1984) 101-108.
- (7) Lama, W. L. and Gallo, C. F., 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.
- (8) 山崎憲明，電子写真のコロナ放電装置の課題，静電気学会誌，**12-6** (1988) 418-425.
- (9) 伊東圭昌，線対平板電極系における線電極の挙動に関する研究，慶応義塾大学博士論文（1996）.

6. 添付資料 (発表論文)

- (1) H. Kawamoto, K. Takasaki, H. Yasuda and N. Kumagai, "Statics of Pin Corona Charger in Electrophotography," *IS&T's NIP16: International Conference on Digital Printing Technologies*, Vancouver, Canada (2000-10) pp.827-835.
- (2) 川本、"電子写真カラープリンタ技術の現状と今後の課題"、日本 AEM 学会誌、Vol. 8、No. 3 (2000-9) pp.295-311.
- (3) 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"、日本機械学会論文集 (C 編)、67 巻、657 号 (2001-5) pp.1385-1392.
- (4) H. Kawamoto, "Statics of Pin Electrode in Pin-to-Plate Discharge System", *J. Imaging Sci. & Technol.*, Vol. 45, No. 6 (2001) pp.556-564.
- (5) H. Kawamoto, K. Takasaki, H. Yasuda and N. Kumagai, "Dynamics of Pin Electrode in Pin-to-Plate Gas Discharge System Used for Ozone-less Charger in Laser Printer," *10th ICPE: 10th The International Conference on Precision Engineering*, Yokohama (2001-7) pp.694-698.
- (6) H. Kawamoto, K. Takasaki and H. Yasuda, "Dynamics of Pin Electrode in Pin-to-Plate Discharge System," *IS&T's NIP17: International Conference on Digital Printing Technologies*, Fort Lauderdale, Florida (2001-10) pp.682-689.
- (7) H. Kawamoto, K. Takasaki, H. Yasuda, S. Umezu and K. Arai, "Static and Dynamic Phenomena of Pin Electrode in Pin-to-Plate Discharge System," *Proceedings of the 3rd. IFToMM International Micromechanism Symposium* (2001-9) pp.69-74.
- (8) 川本、安田、熊谷、"針対平板電極系放電場における針電極の静力学特性"、第 12 回「電磁力関連のダイナミクス」シンポジウム講演論文集、2C22、沖縄 (2000-6) pp.585-588.
- (9) 川本、高崎、熊谷、安田、"針対平板電極系負コロナ放電場における針電極の静力学特性"、日本機械学会 (D & D2000) 機械力学・計測制御講演論文アブストラクト集、No. 00-6、419、明治大学 (2000-9) pp.198.
- (10) 川本、安田、高崎、熊谷、"針対電極板放電場における動力学特性"、日本機械学会 東海支部 第 50 期総会・講演会 講演論文集 No. 013-1、名古屋、106 (2001-3) pp.11-12.
- (11) 川本、高崎、熊谷、安田、"針対平板電極系放電場における力学"、電気学会 放電研究会資料、ED-00-171 (2000-12) pp.19-26.
- (12) 川本、高崎、安田、"針対平板電極放電場における特異な力学現象"、第 13 回「電磁力関連のダイナミクス」シンポジウム、No. 01-251、312、幕張メッセ (2001-6) pp.475-480.
- (13) 川本、高崎、安田、村田、"針対平板電極系放電場における針電極の動力学"、電気学会 放電研究会資料、ED-01-275 (2001-12) pp.65-69.