針対平板電極系放電場における針電極の動力学*

川本 広行^{*1}, 高崎 康介^{*2}, 安田 悠^{*3}

Dynamics of Pin Electrode in Pin-to-Plate Discharge System

Hiroyuki KAWAMOTO^{*4}, Kosuke TAKASAKI and Hiromu YASUDA^{*4} Department of Mechanical Engineering, Waseda University,
3-4-1 Okubo, Shinjuku-ku, Tokyo, 169-8555 Japan

Some kinds of singular dynamic phenomena were observed in a pin-to-plate gas discharge system. (1) One was vibration of the pin electrode perpendicular to the plate electrode observed at the transition from the dark discharge and the positive corona discharge due to the streamer corona when the axial stiffness of a support of the pin electrode was low. Similar vibration was observed in the negative corona discharge due to Trichel pulse and instability of the negative corona. Both vibrations were the forced vibration due to pulsative or fluctuating electrostatic force caused by ionic wind at corona discharging. (2) Another axial vibration was observed at spark discharge for the softly supported pin electrode. The applied voltage was transiently decreased and then relaxed after the occurrence of the spark discharge and alternative force was induced due to alternative ionic wind. Thus a large forced vibration coupled with the intermittent spark discharge took place. (3) Lateral whirling of the pin electrode was observed at corona discharging when the pin electrode was extremely fine. Whirling frequency was increased with the increase of the applied voltage. Axial repulsive force due to the ionic wind was the cause of the whirling.

Key Words: Information Processing Equipment, Electromagnetic-Induced Vibration, Laser Printer, Gas Discharge, Corona, Spark, Electrostatic Force, Ionic Wind

1. 序 論

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、その電氣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成分磁気ブラシ現象系においても、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^(5,6)。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、(1) コロナ放電時の軸方向強制振動、(2) 火花放電時の軸方向放電連成振動、(3) コロナ放電時の半径方向ふれまわり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あるが、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、基本的には前報⁽⁵⁾に示したものと同一である(図1, 2参照)。すなわち、ステンレス($\phi 0.5$ mm)もしくはタングステン($\phi 0.075$, $\phi 0.1$, $\phi 0.15$ mm)製の針電極を、ステンレス鋼板製の片持ちはりをして、平板電極に対して垂直に垂下した。

* 原稿受付 2002年8月7日。

^{*1} 正員, 早稲田大学理工学部(〒169-8555 東京都新宿区大久保3-4-1)。^{*2} 早稲田大学大学院理工学研究科修士課程[現:富士写真フイルム(株)]。^{*3} 早稲田大学大学院理工学研究科修士課程。

E-mail: kawa@waseda.jp

コロナ放電時の強制振動と火花放電時の放電連成振動測定では、低剛性の片持ちはりを用い、はり先端の上下方向の変位をレーザ変位計（キーエンス LK-080）で測定した。この低剛性は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はりの剛性は、 2.68 N/m であった。いっぽう、コロナ放電時のふれまわり振動測定では、ほとんど剛体とみなせる高剛性のはりを用いた。FFT は火花放電時の電極振動やコロナ放電時のふれまわり振動の周波数測定に用いた。高電圧源には、松定プレシジョン社製組込型高圧電源 HVR-10P [正], HVR-10N [負] (出力電圧 $0 \sim \pm 10 \text{ kV}$) を利用し、外部ポテンシオメータによって電圧を設定した。ギャップの印加電圧は高電圧プローブ (IWATSU, D-401) を介して測定し、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, low-stiffness cantilever T0.1/L100/W20 mm or high-stiffness cantilever T3/L100/W20 mm, 2: laser sensor, 3: pin electrode, stainless steel $\phi 0.5 \text{ mm}$ or tungsten $\phi 0.075, \phi 0.1, \phi 0.15 \text{ mm}$, 4: plate electrode, steel, 5: laser displacement meter, 6: DC high voltage power supplies, 7: DC volt meter, 8: oscilloscope, 9: resistor, $500 \text{ k}\Omega$, 10: shunt resistor, $3 \text{ k}\Omega$, 11: mechanical stage, 12: FFT Analyzer, 13: high voltage probe)

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ものである。印加電圧を徐々に上げてゆくと、最初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⁽⁷⁾。さらに電

Fig. 3 V-I curve in pin-to-plate system. (positive, $\phi 0.5 \text{ mm}$ pin diameter, 5 mm air gap)

Fig. 4 Force applied to pin electrode in pin-to-plate system. (positive, $\phi 0.5 \text{ mm}$ pin diameter, 5 mm air gap)

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。

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。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である⁽⁶⁾。

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 における電流と針電極の上下振動波形を測定した。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・線電極系のそれに比べて十分高いため、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、コロナ放電開始時にトリチェリパルスが生じる。このトリチェリパルスの周波数は電極の振動数に比べて高いが、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（図 6）と同様である。さらに、負コロナ放電時には正コロナ放電時とは異なり、電極間

の印加電圧が高い場合に、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 10 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. (3 kV, positive, ϕ 0.5 mm pin diameter, 5 mm air gap)

Fig. 6 Vertical displacement of pin electrode and discharge current. (3.88 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. (6.4 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)

Fig. 10 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。この火花放電は非定常的な放電であり、断続的に生じる。このとき、低剛性片持ちはり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 11 はその一例である。さらにギャップを大きくし、電圧を上げると、図 12 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 μ m 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。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くらべて短い。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 12 の状態から電極間のギャップを小さくするか、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

Fig. 11 Vertical vibration of pin electrode and discharge current. (7 kV, positive, ϕ 0.5 mm pin diameter, 3 mm air gap)

Fig. 12 Vertical vibration of pin electrode and discharge current. (7.5 kV, positive, ϕ 0.5 mm pin diameter, 4 mm air gap)

Fig. 13 Vertical vibration of pin electrode and discharge current. (10 kV, positive, ϕ 0.5 mm pin diameter, 2 mm air gap)

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かつ印加電圧を上げた場合である。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。

上記のような現象を模擬するため、下記のような方法を用いた。すなわち、まず放電電極を単純な 1 自由度の振動系に置きかえる。

$$m\ddot{z} + c\dot{z} + kz = F_z(t) \quad (1)$$

ただし、 z : 片持ちはり・針電極の自重による平衡点から垂直方向への位置 (上向きを正とする), m : 片持ちはり・針電極の等価質量, c : 減衰, k : 片持ちはりの曲げ剛性, F_z : 針電極に作用する力であり, $\ddot{z} = d^2z/dt^2$, $\dot{z} = dz/dt$ (t : 時間) である。図 14 に示すように、ギャップにかかる印加電圧は火花放電の発生と同時に急激に低下し、その後火花放電電圧に達するまで徐々に回復する。したがって、火花放電と火花放電の間では、ギャップにかかる印加電圧は一定ではなく、これにともなってイオン風の反力も変化すると考えられる。そこで、非火花放電時の外力 F_z は、ギャップ電圧の実測値をもとに、図 4 に示すような電圧-静電力特性から準静的に定めることができると仮定する。なお、火花放電時の静電吸引力は、火花放電柱の大きさが電極径に等しいと仮定しても、印加電圧 10 kV の条件で μN のオーダーしかないので、ゼロと仮定する。このような仮定のもとにルンゲ・クッタ法による過渡応答計算を行った結果を図 11~13 に付記した。計算結果と実測値はほぼ一致しており、火花放電時に生じる振動は、印加電圧の変化によってイオン風の反力が変化することによって考えられる。

Fig. 14 Voltage and current at spark discharge. (positive, ϕ 0.5 mm pin diameter, 4 mm air gap)

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 15 に針電極を正にした場合、図 16 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

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

Fig. 16 Frequency of free vibration and spark-discharge-coupled forced vibration. (negative, 0.5 mm pin diameter)

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。

3.4 コロナ放電時のふれまわり振動 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、剛に支持した針電極が横方向にふれまわる現象が観測された。図 17 に線径、線長、およびギャップをパラメータにしたふれまわり振動の発生電圧をプロットした。図から、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る。

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⁽¹⁰⁾が考えられる。

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氣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⁽⁶⁾。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。図 17 に針電極に作用する力が上向きになる臨界電圧 V_t (図 4 参照) を実線で示した。この電圧はふれまわり振動の発生印加電圧よりやや低いが、線径とギャップが大きいほど臨界電圧がわずかながら高くなること、および臨界電圧は線長によらないという特徴は実測

Fig. 17 Threshold voltage of whirling onset and transition voltage V_t that force to pin electrode is compressive.

Fig. 18 Lateral whirling frequency of pin electrode at corona discharge.

値によく一致している。なお、臨界電圧がふれまわり発生電圧より少し低いのは、印加電圧を徐々に上げてふれまわりの発生を、マイクロスコープを介して肉眼で確認しており、真の発生限界電圧は観測値よりも低いと考えられることや、系に存在するわずかな減衰によって振動の発生が抑制されることなどが考えられる。

このようなメカニズムの妥当性は、ふれまわりの振動数からも確認できる。すなわち、図 18 は針電極が振動を開始した後、印加電圧をさらに上げた時の印加電圧（軸力）と振動周波数の関係を示したものである。印加電圧を上げると、振動周波数もわずかながら上昇するが、この特徴は、接線方向力で圧縮された棒の固有振動数（文献 (10) に示された方法によって計算した結果を図 18 に実線と点線で示した）によく一致する。

4. 結 論

針対平板電極系放電場における針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、およびコロナ放電時のふれまわり振動を観測した。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、低剛性支持された針電極が火花放電の発生と同期する放電連成振動が観測された。瞬発的な火花放電の発生によって印加電圧が過渡的に低下し、非火花放電時に電圧が回復する過程でギャップにかかる印加電圧が時間的に変化する。これによって、イオン風の反力である

軸力も交番的となることが振動の原因であり、針電極が振動を始めるとギャップが狭くなる際に火花放電が発生しやすくなることが連成の原因であると考えられる。

(3) コロナ放電時のふれまわり振動 針電極自身の剛性が極端に低い場合、コロナ放電開始後のある印加電圧以上で、剛に支持した針電極が横方向にふれまわることがある。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、線長にはよらない。この振動はイオン風の反力が従動力であることに起因し、その大きさが静電吸引力以上になり、針に上向きの力が作用したときに生じる。ふれまわりの固有振動数は、印加電圧が高くなるほど、すなわち軸力が増すほど、わずかながら上昇する。

本研究は、本学学生の村田典子君、鈴木穂高君に協力していただいた。また、科学研究費（基盤研究 C, 課題 No. 14550246）、および旭硝子財団研究助成による支援をいただいた。深く感謝します。

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, 統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) 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.
- (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).
- (10) ボロチン, V.V. (関谷, 杉山 訳), 非保存的弾性安定問題, 培風館 (1977).