

特集 静電力応用技術の新展開

放電力学 — 放電にともなう力学現象とその応用

Discharge dynamics

Some singular mechanical phenomena caused by gas discharge
and these applications

川本 広行 (早稲田大学)

Hiroyuki KAWAMOTO Member

Some singular dynamic phenomena were observed due to the electrical gas discharge. In a pin-to-plate system, when the axial stiffness of the support of the pin electrode was low, vibration of the pin electrode perpendicular to the plate electrode was observed at the transition from the dark discharge and the corona discharge and at the spark discharge. An electrostatic water jet phenomenon was observed, when an insulative capillary tube filled with water was used for the pin electrode. On the contrary, when the plate electrode made of metal was replaced to water, repulsive reaction force due to the corona wind changed the shape of water level. When the flexural rigidity of the pin electrode was extremely low, an unstable vibration of the pin electrode, flutter, took place at the corona discharge due to the corona wind. Similar vibration was observed also in a wire-to-plate system. These phenomena are expected to be utilized for a new ink jet system, a rotor-less fan, and a new driving system of a micromachine.

Key Words: Gas Discharge, Corona, Spark, Electrostatic Force, Ionic Wind, Micromachine

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、というのが著者の研究室で「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。本報告では、この放電にともなう力学作用とその応用例について解説する。

2 放電現象と発生する力 [2]

Fig. 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、Fig. 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。

連絡先: 川本 広行, 〒169-8555 東京都新宿区大久保 3-4-1, 早稲田大学理工学部, e-mail: kawa@waseda.jp

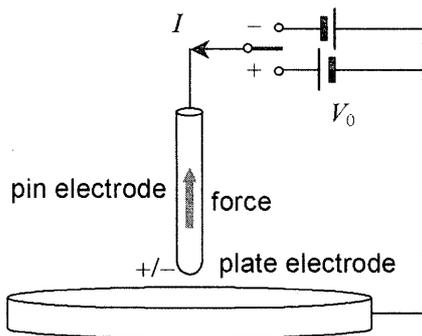
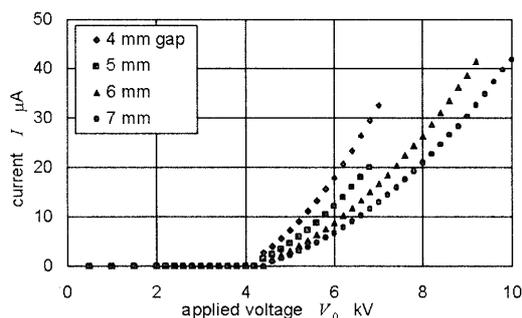


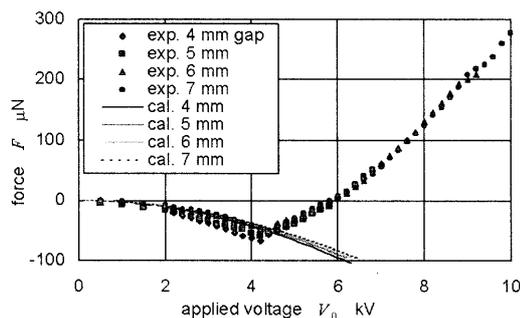
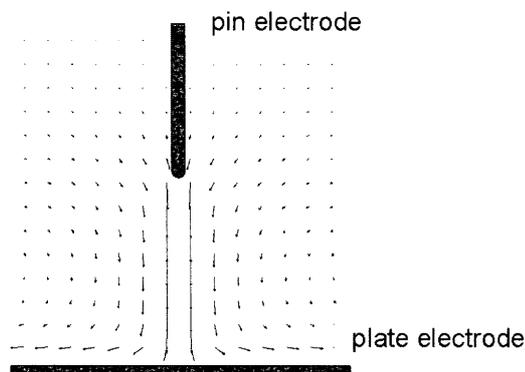
Fig. 1 Pin-to-plate gas discharge system.

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

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。Fig. 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. 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, $V_0 = 7 \text{ kV}$, 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。Fig. 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]。

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

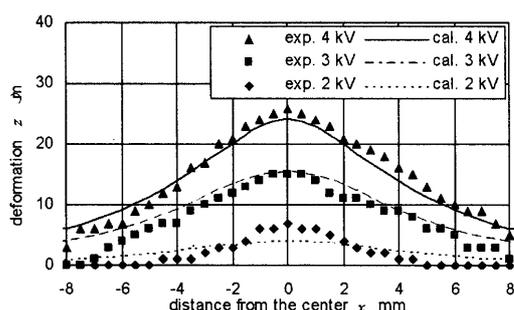


Fig. 5 Rising of water level at dark discharge. (ϕ 0.5 mm pin diameter, 4 mm air gap)

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]

Fig. 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。Fig. 5 はまず暗流域における水面の持ち上が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。

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 Fig. 6 に示す。Fig. 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、これともなって火花放電域では液面に振動が生じる。高磁

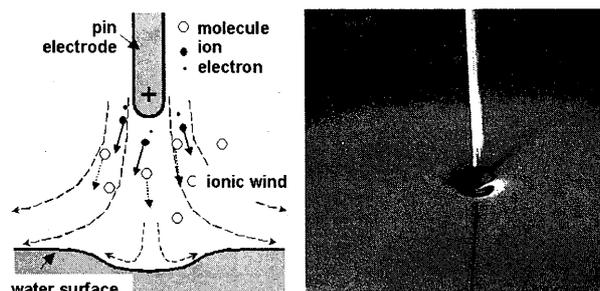


Fig. 6 Conceptual drawing (left) and photograph (right) of Electrostatic Moses Effect. High voltage (7 kV) is applied between the upper pin electrode (ϕ 0.5 mm diameter) and the lower ion-conductive water pigmented by black ink (right).

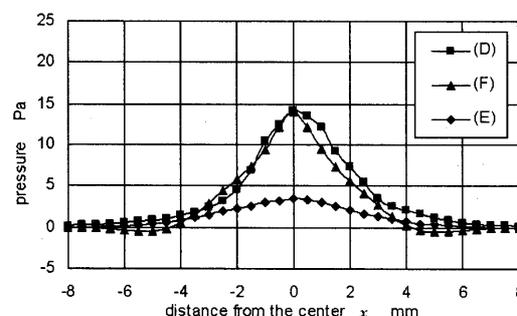


Fig. 7 Pressure distribution on plate electrode at corona discharge. (ϕ 0.5 mm pin diameter, 7 mm air gap, 6 kV applied voltage)

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。

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。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。まず暗領域では、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 (Fig. 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比べて高いが、Fig. 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。

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、Fig. 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

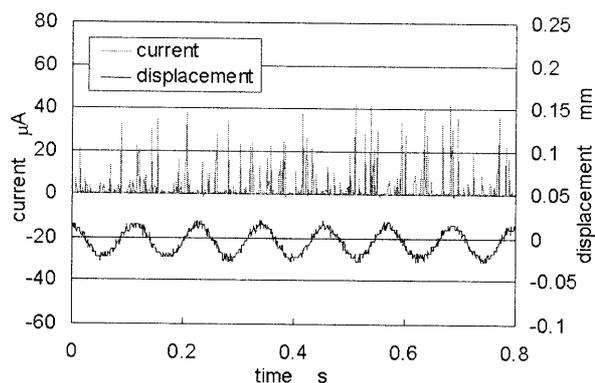


Fig. 8 Vertical displacement of pin electrode and discharge current. (3.88 kV, positive, ϕ 0.5 mm pin diameter, 5 mm air gap)

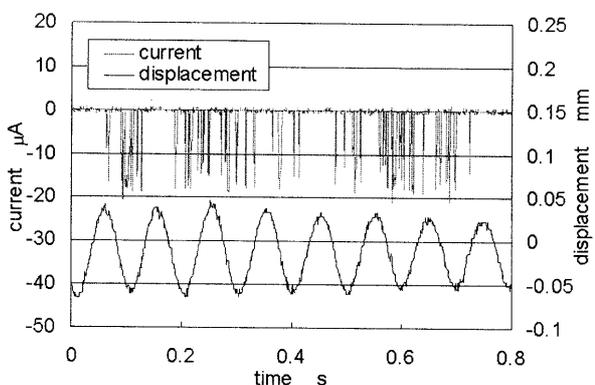


Fig. 9 Vertical vibration of pin electrode and discharge current. (4.23 kV, negative, ϕ 0.5 mm pin diameter, 7 mm air gap)

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。Fig. 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。

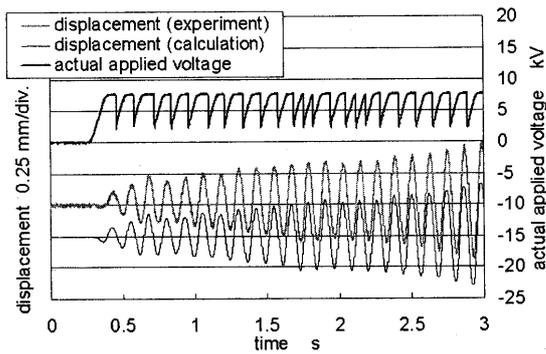


Fig. 10 Vertical vibration of pin electrode and discharge current. (7.5 kV, positive, ϕ 0.5 mm pin diameter, 4 mm air gap)

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

機機機

(a) (b) (c)

Fig. 11 Original bit image (a), first (b) and second (c) stage print samples.

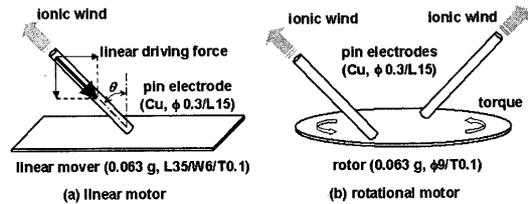


Fig. 12 Linear and rotational driving mechanisms utilizing ionic wind.

用して、実際に印字できることを実証した。Fig. 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]。

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、Fig. 12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。

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。

4 あとがき

主として針対平板電極系を例にして、気体放電にもなういくつかの特異な力学現象とその利用について紹介した。非放電時の静電力にくらべて制約はあるが、その特徴を生かした新しい応用が広がることを期待している。

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, 針対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 (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, Electro-physicochemical 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.