J. Inst. Electrostat. Jpn.

論 文

静電気力によるマイクロプラズマ電極表面上の 微粒子除去の研究 清水 -男*.***¹, 伊藤 暁彦*, マリウス ブラジャン**,

ヤロスラヴ クリストフ***, 米田 仁紀****

(2016年9月29日受付;2016年12月1日受理)

Study of Fine Particle Removal from the Surface of a Microplasma Electrode Using the Electrostatic Force Kazuo SHIMIZU^{*, **, ***, 1}, Akihiko ITO^{*}, Marius BLAJAN^{**}, Jaroslav KRISTOF^{***} and Hitoki YONEDA^{****}

(Received September 29, 2016; Accepted December 1, 2016)

Removal of glass beads with different particle diameter using a microplasma electrode was investigated. Our microplasma electrode, with a discharge gap set to 25 μ m, enabled discharge to occur at around 1 kV. Applied AC voltage was set to 1 kV and the frequency was varied from 10 Hz to 10 kHz. Particle movement was visualized using a laser. It was observed that glass beads were blown off many times and finally transferred to the outside part of the electrode. When the frequency was 10 Hz, 99% of glass beads were moved to the outside part of the electrode. It was found that removal rate decreased as the frequency increased. Removal rate and particle movement were different from the each glass beads diameter.

1. はじめに

近年, 微小粒子状物質 (PM 2.5) が大気汚染や人体, 特に呼吸器系に悪影響を及ぼすため, 非常に問題視され ている. 微粒子の問題はこういった室内外の環境分野の みならず, 半導体産業分野においては品質低下等をもた らしたり¹¹, 太陽電池表面上での微粒子の堆積が発電効

- **キーワード**:マイクロプラズマ,誘電体バリア放電,微 粒子除去,静電気力
 - 静岡大学大学院 総合科学技術研究科
 (〒432-8561 静岡県浜松市中区城北 3-5-1)
 Graduate School of Integrated Science and Technology,
 Shizuoka University, 3-5-1 Johoku, Naka-ku, Hamamatsu,
 Shizuoka 432-8561, Japan
 - *** 静岡大学 イノベーション社会連携推進機構 (〒432-8561 静岡県浜松市中区城北 3-5-1) Organization for Innovation and Social Collaboration, Shizuoka University, 3-5-1 Johoku, Naka-ku, Hamamatsu, Shizuoka 432-8561, Japan
- **** 静岡大学創造科学技術大学院 光ナノ物質機能専攻 (〒432-8561 静岡県浜松市中区城北 3-5-1) Graduate School of Science and Technology, Shizuoka Unuversity, 3-5-1 Johoku, Naka-ku, Hamamatsu, Shizuoka 432-8561, Japan
- **** 電気通信大学 レーザー新世代研究センター

(〒182-8585 東京都調布市調布ヶ丘 1-5-1) Institute of Laser Science, The University of Electro-Communications, 1-5-1 Chofugaoka, Chofu, Tokyo 182-8585, Japan

shimizu@cjr.shizuoka.ac.jp

率を低下させたり等,さまざまな方面に見られる.これらの問題を解決するため,ウエハ表面のコンタミネーションの除去²⁴⁾ や電気集じん装置⁵⁷⁾,太陽電池表面上に堆積した砂の除去⁸⁻¹⁰⁾,さらには宇宙空間での調査に悪影響を与える微粒子の除去^{8-11,12} など数多くの研究がなされている.一方で,微粒子やエアロゾルによる薄膜形成¹³⁻¹⁵⁾ など微粒子を用いた研究も進められている.

本研究ではマイクロプラズマ電極を用いて、電極表面 上の微粒子の除去を目的に実験的検討を行った. 微粒子 除去や輸送では多層交流電圧による電界カーテンを用い たものなどが多く存在するが^{8,9},本研究では単相の正弦 波電圧により微粒子除去が可能となっている。使用した マイクロプラズマ電極は2つの電極と誘電体層からなり、 プラズマアクチュエータと同様の構造をしている¹⁶⁻¹⁹⁾.こ の全体の厚さが約100 µm ほどの電極をソーラーパネル やウエハなどの表面に埋め込むまたはデバイスをそのま ま表面に張り付けることでコンタミネーションの除去が 期待される.特に電極が非常に薄いフィルム電極である ため、曲面などでもそのまま表面に貼り付け使用するこ とが可能である.また、上部電極において発生するスト リーマの進展距離がサブミリオーダーであり、一般的な 誘電体バリア放電のミリスケールの進展距離と比較して 小さい. このようにサブミリからマイクロスケールでの プラズマをマイクロプラズマと呼ぶ²⁰⁻²²⁾.マイクロプラ ズマは空間的に微小であったり、非平衡であったりする

などの利点をもつため, 微細加工への応用^{23,24} や医療応 用^{25,26} など幅広い分野に応用されている.

2. 実験方法

2.1 マイクロプラズマ電極

図1に本研究で使用したマイクロプラズマ電極を示す. 厚さ25µmの誘電体層の両面に銅電極が設置されている. 上部電極は高電圧を印加する櫛形状の電極となっている. 線電極の太さを200µm,長さを30mm,厚さを18µmと し、また各線電極の間隔は1mmとした.一方で、下部 電極は平板上の電極となっており、接地されている.本 電極は誘電体層が25µmと非常に薄いため、低電圧(約 1 kV)でプラズマを発生することが可能となり、また高 強度の電界を得ることができる.また、電極の構造上、 容量性負荷であり、静電容量は約200 pFである.



- 図1 マイクロプラズマ電極の構成図:(a)上面図,(b)断面図
- Fig.1 Configuration of microplasma electrode: (a) top view, (b) cross-section view.

2.2 実験装置

電極表面上の微粒子除去および電圧・電流測定に使用 した実験装置図を図2に示す.マイクロプラズマ電極へ の印加電圧は正弦波高電圧とした.正弦波高電圧はファ ンクションジェネレータ(Tektronix, model AFG3102) および交直両用高圧アンプリファイア(Trek, model 5/80) を用いて発生させ.高電圧プローブ(Iwatsu, model F/80) およびオシロスコープ(Tektronix, model TDS 2014) により観測した.放電電流は抵抗をマイクロプラズマ電 極と直列に接続し,抵抗の両端にかかる電圧を電圧プロ ーブ(Tektronix, model P2220)およびオシロスコープを 用いて計測した.

対象微粒子として粒径 38~53 µm (ガラスビーズ (45



図2 実験装置図

Fig.2 Experimental setup for measuring waveforms and observing the fine particle movement.



- 図 3 ガラスビーズの顕微鏡写真:粒径 (a) 38~53 µm, (b) 63~75 µm, および (c) 90~106 µm
- Fig.3 Microscopic image of glass beads with a diameter of (a) $38 \sim 53 \ \mu\text{m}$, (b) $63 \sim 75 \ \mu\text{m}$, and (c) $90 \sim 106 \ \mu\text{m}$.

μm)), 63~75 μm (ガラスビーズ (70 μm)), 90~106 μm (ガラスビーズ (100 μm)) の3種類のガラスビーズ (株式会社不二製作所, ソーダ石灰ガラス)を用いた. 図3はそれぞれの微粒子を光学顕微鏡 (Leica, model DM IL LED)を用いて撮影した写真である. 図のように ガラスビーズは球形であり, ガラスビーズ 100 mg をマ イクロプラズマ電極表面上に撒き, 電圧を印加した際の 微粒子の振る舞いの観測を行った. 印加した正弦波高電 圧の電圧値は1 kV に固定し, 周波数を 10 Hz~10 kHz の間で変化させ, 各周波数における振る舞いを観測した.

2.3 微粒子の振る舞いの可視化

電極表面上での微粒子の振る舞いを観測するために、 レーザーを用いて微粒子の振る舞いの可視化を行った. 図4に可視化方法の概略図を示す.図のように波長 532 nmのNd: YVO4 レーザーを微粒子に照射し、散乱光を ハイスピードカメラ(Red Lake, MotionScope M3)で撮 影し、微粒子の振る舞いの可視化を行った.ハイスピー



- 図4 レーザーを用いた微粒子の振る舞いの可視化方法の概 略図
- Fig.4 Visualizing method for observation of fine particle movement using a Nd: YVO4 laser.

ドカメラの解像度は 512 × 384, 露光時間は 60 µs, フ レームレートは 1000 fps として撮影を行った.

3. 実験結果および考察

3.1 マイクロプラズマ電極の電気的特性

図5は正弦波電圧の周波数を50 Hz, 500 Hz, および 5 kHz に設定したときの印加電圧および放電電流の波形 である.図5より放電電流は大きく2つの電流成分から 成っていることが確認できる.1つはマイクロプラズマ 電極の容量成分による容量性電流である.この電流は印 加電圧に対して位相が90°進んだ正弦波状の電流である. もう1つは誘電体バリア放電特有のスパイク状の電流で ある.誘電体バリア放電ではストリーマ形式の絶縁破壊 が発生することで,時間的および空間的にランダムにスト リーマが形成される.このスパイク状の電流は印加電圧



- 図5 印加電圧の周波数(a) 50 Hz, (b) 500 Hz, (c) 5 kHz とした場合の電圧・電流波形
- Fig.5 Waveforms of applied voltage and discharge current when the frequencies were (a) 50 Hz, (b) 500 Hz, and (c) 5 kHz.



図 6 周波数 500 Hz 時のリサージュ図形

Fig.6 Lissajous figure when the frequency was 500 Hz.



図7 各周波数におけるマイクロプラズマ電極における消費 電力

Fig.7 Power consumption as a function of the frequency of the applied voltage.

の正勾配部分と負勾配部分で半周期ごとに生じるのだが, すべての周波数において,負勾配時より正勾配時の方が 大きなスパイク上の電流が発生している.これは正負勾 配において,ストリーマ進展速度の差異が生じ,それぞ れ異なる放電形態となっているためと考えられる^{27,28)}.

次に、各周波数におけるマイクロプラズマ電極におけ る消費電力の測定を行った.電力測定には一般的に V-Q リサージュ図形を用いる^{29,30)}.周波数 500 Hz のときのリ サージュ図形を図6に示す.電力測定時は図2の抵抗を 100 nF のコンデンサに置き換えた.図6のリサージュ図 形から1周期あたりに消費されるエネルギーを計算する と0.27 mJ となり、この値に周波数を掛けることで消費電 力が0.13 W と計算された.各周波数における消費電力を グラフ化したものを図7に示す.消費電力は印加電圧の 周波数に比例して増加することがわかる.周波数と消費 電力の比例関係は多くの研究で報告されている^{17,30,31)}.

3.2 イオン濃度

印加電圧の周波数を変化させ,各周波数において発生 したイオンの濃度測定を行った.測定にはイオン測定器



図8 各周波数におけるイオン濃度

Fig.8 Ion concentration as a function of the frequency of the applied voltage.

(Alton, model KEC-900)を用いて、電極表面から距離 5 cm の位置で測定した.測定に関して、プラズマ中の微 粒子は電子とイオンの熱速度の違いにより、定常的に負 に帯電するため³²⁾、負イオンのみ測定を行った.図8は イオン濃度の周波数依存性をグラフ化したものである. 周波数を増加させると、発生するイオンの濃度が増加し ているのが分かる.空気中の酸素や窒素が電離によって $N_2^+ や O_2^- といったイオンとなる.これらのイオンが最終$ 的には XH⁺(H₂O)ⁿ や NO3⁻(HNO3)^m(H₂O)ⁿ などのイオンになるのだが³³⁾、印加電圧の周波数増加により電極への投入エネルギーが増加することで、空気中の酸素や窒素の電離が活発に起こり、イオンの生成量が増加する.



図9 除去率の周波数依存性

Fig.9 Removal rate as a function of the frequency of the applied voltage.

3.3 微粒子の除去

マイクロプラズマ電極に正弦波高電圧を印加すること で電極表面上のガラスビーズの除去を行った.電極表面 上に3種類のガラスビーズをそれぞれ撒き,電圧値を1 kVに固定し,周波数を10 Hzから10 kHzまで変化させ, 振る舞いの様子を観察した.

微粒子除去を定量評価するために, 微粒子の除去率 η を次式で定義した.

$$\eta = \frac{M_r}{M_b} \times 100 \left[\%\right] \tag{1}$$

ここで, M, は電極の外側へ移動した微粒子の質量,



図10 電圧印加による微粒子除去の様子:(a)電圧印加前,(b)電圧印加後

Fig.10 Glass beads movement on the electrode surface: (a) before applying the AC voltage and (b) after applying the AC voltage for 2 min with a frequency of 50 Hz, 500 Hz, and 5000 Hz.



図 11 ガラスビーズ (70 µm)の周波数 10 Hz, 100 Hz, 1000 Hz における微粒子除去の時間推移

Fig.11 Movement of glass beads with a diameter of 70 µm at 1 s, 5 s, 10 s, 30 s, and 2 min when the frequency of the applied voltage was set to 10 Hz, 100 Hz, and 1000 Hz.

M_bは電圧印加前に電極表面に撒いた微粒子の質量(100 mg)である. 電極の外側へ移動した微粒子の質量測定は, 電圧印加後電極の外側に移動したガラスビーズのみを拭 き取り、電極表面上に残ったガラスビーズの質量を電子 天秤 (Ohaus, PA213) により計測することで、(1)式よ り算出した. 図9に3種類のガラスビーズの各周波数で の除去率を示す. ここで示した除去率は全ての条件にお いて、3回測定を行い、その平均値をプロットしたもので ある. また, 周波数を 50 Hz, 500 Hz, および 5000 Hz と した時のそれぞれの微粒子除去の様子を図10に示す.図 9および図10より全てのガラスビーズにおいて、高周波 数になるにつれてガラスビーズの除去率が低下している のが確認できる.これは3.4節で詳細を記すが、ガラスビ ーズが高周波数により、線電極からの反発を繰り返すこ とにより線電極間で振動運動し、電極間にトラップされ たためである. また, 図9においてガラスビーズの粒径 が大きくなるにつれて、除去率が低下し始める周波数の 値が小さくなっていることが認められた. 微粒子の帯電 量はその微粒子の表面積で決まる. つまり, 微粒子の半 径の2乗に比例して大きくなる.一方で、微粒子1粒あ たりの重力は微粒子の半径の3乗に比例して大きくなる. そのため、粒径が大きくなるにつれて、 微粒子が帯電す ることにより発生するクーロン力よりも重力が上回るた め,図9のような結果が生じたと考えられる^{10,12)}.

次に, ガラスビーズ (70 μm) の各周波数における微 粒子除去の時間推移を図 11 に示す. 周波数が 10 Hz の 場合と100 Hz の場合を比較すると,100 Hz の場合の方 が短い時間でガラスビーズの除去がなされているのが分 かる.これは,高周波数の方が電圧の反転が多くそれに 伴いガラスビーズの飛散回数が多くなること,およびイ オンの発生量が多くガラスビーズの帯電量が大きくなる こと³⁴⁾が理由として考えられる.周波数1000 Hz にお いては,時間とともに徐々にガラスビーズが外側へ移動 しているのが分かるが,10 Hz および100 Hz と比較する と,除去率の低下が認められた.

3.4 微粒子の振る舞いの可視化

レーザーを照射し, ガラスビーズからの散乱光を撮影 することでガラスビーズの振る舞いの可視化を行った. 図 12 は正弦波電圧(1 kV, 50 Hz)印加した際の各ガラ スビーズの 50 ms 経過時点での振る舞いを可視化したも のである.3.3節でも述べたように粒径が大きくなるに つれて,重力の影響が大きくなるため,ガラスビーズ(45 µm,70 µm,100 µm)が飛散する際に到達する高さがお よそ23 mm,21 mm,16 mmと徐々に低くなっているこ とが確認された.また,一度飛散し,再度電極表面上に 落下したガラスビーズが再度飛散することも確認され た.つまり,ガラスビーズは何度も飛散を繰り返すこと で電極の外側に移動することが分かった.

また,対象微粒子をガラスビーズから線香の煙に変更 し,気体流れの観測を行った.可視化方法に関しては, 25×25×25 cm³のアクリルボックス内に電極を設置し, 容器内に線香の煙を充満させたのち,微粒子の場合と同



図 12 正弦波電圧(1 kV, 50 Hz)印加後 50 ms 後のガラス ビーズの振る舞いの可視化:(a)ガラスビーズ(45 μm),(b)ガラスビーズ(70 μm),(c)ガラスビー ズ(100 μm)

Fig.12 Visualized image of glass beads movement after applying the AC voltage with 1 kV and 50 Hz for 50 ms: (a) glass beads (45 μ m), (b) glass beads (70 μ m), (c) glass beads (100 μ m).



- 図13 各半周期におけるガラスビーズ微粒子の帯電および 除去のプロセス:(a) 低周波数 (~50 Hz), (b) 高 周波数 (5 kHz~)
- Fig.13 Charging and removal process of glass beads during each half cycle: (a) at low frequencies (~50 Hz), (b) at high frequencies (5 kHz~).

様にレーザーからの散乱光を高速度カメラで撮影した.1 kHz 以下においては線香の煙の動きは観測されず,プラ ズマアクチュエータが誘起するような流れは観測されな かった.10 kHz では誘起流が生成されたものの,電子天 秤を用いて上向き流れにより発生する推力を測定したとこ ろ³⁵⁾,ガラスビーズ1粒あたりの重力より小さい値であっ た.以上より,本研究で用いた印加電圧範囲内では,イ オン風は微粒子除去に寄与していないものと考えられる.

ここで、図13に微粒子の帯電および除去プロセスを 示す.まず低周波数(~50 Hz)において、半周期ごと にガラスビーズが飛散することが確認された.これは、 図13(a)に示したように、ガラスビーズ微粒子が正の半 周期では正に、負の半周期では負に帯電し、飛散するた めと考えられる.一方,高周波数(5kHz~)においては, ガラスビーズが高電圧電極の隣り合う線電極間で振動を 繰り返していることが確認された.特に,ガラスビーズ の粒径が大きくなるにつれて,上方向に飛散するガラス ビーズの数が減少することが確認された.これは,粒径 が大きくなるにつれて,クーロン力の鉛直方向成分より も重力が大きくなるためであると考えられる.これから, ガラスビーズ微粒子は水平方向にのみ運動し,また,電 圧の極性が高速に反転するため,線電極間で電極からの 反発を繰り返し,振動運動をすると考えられる.その結果, ガラスビーズの除去率が急激に低下したと考えられる.

4. まとめ

本研究ではマイクロプラズマ電極を用いて, 粒径の異 なる3種類のガラスビーズの電極表面上からの除去を目 的として,振幅1kVの正弦波高電圧を電極に印加した. 印加電圧の周波数を変化させることで,低周波数(~50 Hz)においては全ての粒径において99%のガラスビー ズを除去することができたのに対し,高周波数(5kHz~) になるにつれて除去率が低下していくことが確認され た.また,除去率が低下し始める周波数は,粒径が大き くなるにつれて小さくなることがわかった.これは粒径 が大きくなるにつれてガラスビーズに働くクーロン力よ りも重力の影響が大きくなったためであると考えられ る.また,振る舞いを可視化した結果,粒径が大きくな るにつれてガラスビーズが飛散した際に到達する高さも 低くなることが確認された.

参考文献

- 1) 鈴木道夫:半導体産業における微粒子汚染の諸問題. エ アロゾル研究, 4 (1989) 88-94
- W. Kern: The Evolution of Silicon Wafer Cleaning Technology. J. Electrochem. Soc., 137 (1990) 1887-1892
- H. Setyawan, M. Shimada, Y. Imajo, Y. Hayashi, and K. Okuyama: Characterization of particle contamination in process steps during plasma-enhanced chemical vapor deposition operation. J. Aerosol Sci., 34 (2003) 923-936
- F. Zhang, A. A. Busnaina, M. A. Fury, and S–Q. Wang: The removal of deformed submicron particles from silicon wafers by spin rinse and megasonics. J. Electron. Mater., 29 (2000) 199–204
- 5) 諫早典夫:電気集じん装置におけるコロナ電界分布の鋼 球落下法による解析.電気学会雑誌, 82 (1962) 219-228
- 6) 安本浩二,瑞慶覧章朝,高木康裕,江原由泰:交流電界 形電気集塵装置における再飛散防止と下流壁面への粒子 付着防止.紛体工学会誌,43 (2006) 198-204

- J. H. Byeon, J. Hwang, J. H. Park, K. Y. Yoon, B. J. Ko, S. H. Kang, and J. H. Ji: Collection of submicron particles by an electrostatic precipitator using a dielectric barrier discharge. J. Aerosol Sci., 37 (2006) 1618-1628
- 8) C. I. Calle, M. K. Mazumder, C. D. Immer, C. R. Buhler, J. S. Clements, P. Lundeen, A. Chen, and J. G. Mantovani: Controlled particle removal from surfaces by electrodynamic methods for terrestrial, lunar, and Martian environmental conditions. J. Phys.: Conf. Ser., **142** (2008) 012073
- 9) M. Mazumder, M. Horenstein, J. Stark, J. N. Hudelson, A. Sayyah, C. Heiling, and J. Yellowhair: Electrodynamic removal of dust from solar mirrors and its applications in concentrated solar power (CSP) plants. Proceedings of IAS Annual Meeting 2014, 2014-EPC-0305, Vancouver (2014)
- H. Kawamoto and T. Shibata: Electrostatic cleaning system for removal of sand from solar panels. J. Electrostat., 73 (2015) 65-70
- 11) C. I. Calle, J. L. McFall, C. R. Buhler, S. J. Snyder, E. E. Arens, A. Chen, M. L. Ritz, J. S. Clements, C. R. Fortier, and S. Trigwell : Dust particle removal by electrostatic and dielectrophoretic forces with applications to NASA exploration missions. Proceedings of ESA Annual Meeting on Electrostatics 2008, Paper O1, Minneapolis (2008)
- H. Kawamoto and T. Miwa: Mitigation of lunar dust adhered to mechanical parts of equipment used for lunar exploration. J. Electrostat., 69 (2011) 365-369
- 13) 佐藤守,藤本文範:イオン注入と真空蒸着による薄膜合成(IVD法).応用物理,53 (1984) 195-198
- 14) E. M. Wong and P. C. Searson: ZnO quantum particle thin films fabricated by electrophoretic deposition. Appl. Phys. Lett., 74 (1999) 2939-2941
- 15) 明渡純, 中野禅, 朴載赫, 馬場創, 芦田極:エアロゾル デポジション法. 構成学, 1 (2008) 130-138
- 16) J. R. Roth and X. Dai: Optimization of the aerodynamic plasma actuator as an electrohydrodynamic (EHD) electrical device. Proceedings of 44th AIAA Aerospace Sciences Meeting and Exhibit, AIAA 2006-1203, Reno (2006)
- 17) G. Touchard: Plasma actuators for aeronautics applications -State of art review-. Int. J. Plasma Environ. Sci. Tech. (IJPEST), 2 (2008) 1-25
- 18) T. C. Corke, C. L. Enloe, and S. P. Wilkinson: Dielectric barrier discharge plasma actuators for flow control. Annu. Rev. Fluid Mech., 42 (2010) 505-529
- 19) 深潟康二,山田俊輔,石川仁:プラズマアクチュエータ の基礎と研究動向. ながれ,29 (2010) 243-250
- 20) 橋邦英:マイクロプラズマの基礎と展望. 応用物理, 75 (2006) 399-411
- 21) K. Tachibana: Current status of microplasma research. IEEJ

Trans. Electr. Electron. Eng., 1 (2006) 145-155

- M. Blajan and K. Shimizu: Temporal evolution of dielectric barrier discharge microplasma. Appl. Phys. Lett., 101 (2012) 104101
- 23) H. Yoshiki, K. Ikeda, A. Wakaki, S. Togashi, K. Taniguchi, and Y. Horiike: Localized plasma processing of materials using atmospheric-pressure microplasma jets. Jpn. J. Appl. Phys., 42 (2003) 4000-4003
- 24) T. Okumura, M. Saitoh, and I. Matsuda: Fine pattern etching of silicon substrates using atmospheric line-shaped microplasma source. Jpn. J. Appl. Phys., 43 (2004) 3959-3963
- 25) J. L. Lauer, J. L. Shohet, R. M. Albrecht, C. Pratoomtong, R. Murugesan, S. Esnault, J. S. Malter, U. H. von Andrian, R. D. Bathke, and S. B. Shohet: Reduced adhesion of human blood platelets to polyethylene tubing by microplasma surface modification. J. Appl. Phys., **96** (2004) 4539-4546
- 26) K. Shimizu, N. A. Tran, K. Hayashida, and M. Blajan: Comparison of atmospheric microplasma and plasma jet irradiation for increasing of skin permeability. J. Phys. D: Appl. Phys., 49 (2016) 315201
- 27) 遠藤正雄, 閑利通:沿面線状ストリーマの伸展. 電気学 会論文誌 A, 103 (1983) 373-378
- 28)高橋勉,金田輝男,杉沼義隆:絶縁細線上の沿面ストリ ーマの進展,電気学会論文誌 A, 113 (1993) 503-510
- 29)赤松浩,金田知大,市川和典:簡単に始められる大気圧 低温プラズマジェットの実験.神戸高専研究紀要,50 (2012) 87-92
- 30) J. Kriegseis, B. Moller, S. Grundmann, and C. Tropea: Capacitance and power consumption quantification of dielectric barrier discharge (DBD) plasma actuators. J. Electrostat., 69 (2011) 302-312
- 31) J. Pons, E. Moreau, and G. Touchard: Asymmetric surface dielectric barrier discharge in air at atmospheric pressure: electrical properties and induced airflow characteristics. J. Phys. D Appl. Phys., 38 (2005) 3635
- 32) 東辻浩夫:小特集微小重力下の微粒子プラズマ研究-国際宇宙ステーション(ISS)における実験- 2. 微粒子(ダスト)プラズマについて、プラズマ・核融合学会誌,91 (2015) 515-516
- 33)長門研吉:空気中の放電で発生するイオン種と化学反応 過程.静電気学会誌,35 (2011) 102-107
- 34)水野彰:粒子帯電量の制御技術.エアロゾル研究,2
 (1987) 88-97
- 35) F. O. Thomas, T. C. Corke, M. Iqbal, A. Kozlov, and D. Schatzman: Optimization of Dielectric Barrier Discharge Plasma Actuators for Active Aerodynamic Flow Control. AIAA J., 47 (2009) 2169-2178