
**静電力を利用するマイクロ粒子の
マニピュレーション技術**

18360125

**平成 18 年度～平成 19 年度科学研究費補助金
(基盤研究(B)) 研究成果報告書**

平成 20 年 4 月

**研究代表者 川本 広行
早稲田大学・理工学術院 教授**

<はしがき>

本研究は、電子材料、セラミックス、プリンタ、医薬品、化粧品、再生医療などの分野で用いられるマイクロ粒子を、静電力によって搬送、分別、分離、混合など自在に操作する技術を開発することを目的とした。本研究の結果、以下の成果が得られた。

- (1) 粒子のミクロな運動を計算し、各種因子の影響を調べるために、個別要素法に電磁力を付加した数値シミュレーションモデルを構築した。個別要素法は従来のCundallモデルにもとづく軟体球モデルのほかに、計算速度が格段に速い剛体球モデルによるものも開発した。これらの計算手法は、下記の各分野のほかに、電子写真技術の研究開発に役立てられている。
- (2) 進行波電界によって粒子群を搬送、分散、集中、混合する技術を開発した。この技術は、2008年度以降、NASAとのコラボレーションによる、月面活動時に障害となるダストのクリーニング技術の開発に発展させる計画である。
- (3) 特殊な電極を用いることによって、粒径などの異なる粒子が混在する粒子群から、特定の粒子を分離・分別する技術を開発した。
- (4) 静電ピンセットによる単体粒子のマニピュレーション技術を開発した。この技術も、2008年度以降、NASAとのコラボレーションによる月面上のダストのハンドリング技術の開発や再生医療のための細胞ハンドリング技術に発展させる計画である。
- (5) 本研究の一部は国内外企業や医学分野などとの共同研究に発展しており、現在鋭意実用化研究を行っている。

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
(1) 雑誌論文	4
(2) 学会発表	4
(3) 図 書	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	7
6. 添付資料 (発表論文)	21

1. 研究組織

研究代表者: 川本 広行 (早稲田大学・理工学術院・教授)

2. 交付決定額

	直接経費 (¥)	間接経費 (¥)	合計 (¥)
平成 18 年度	10,700,000	642,000	11,342,000
平成 19 年度	3,100,000	186,000	3,286,000
総計 (¥)	13,800,000	828,000	14,628,000

3. 研究発表

(1) 雑誌論文 (9 件)

1. 川本, 岡田, 賀嶋, 梅津, "進行波電界による粒子の粒度分別", 日本機械学会論文
文集(C編), Vol. 72, No. 723 (2006-11) pp.3509-3516.
2. 川本, 手島, 高橋, 中山, 廣田, "超高磁界中における磁性粒子のチェーン形成",
日本機械学会論文集(C編), Vol. 73, No. 725 (2007-1) pp.305-311.
3. H. Kawamoto, "Some techniques on electrostatic classification of particle size utilizing
electrostatic traveling wave field," *J. Electrostatics*, Vol. 66 (2008) pp.220-228.
4. H. Kawamoto, M. Teshima and H. Takahashi, "Formation of magnetic particle chains in
ultra high magnetic field," *Journal of Advanced Mechanical Design, Systems, and Manu-
facturing*, Vol. 1, No. 5 (2007) pp.669-680.
5. 川本, 八代, 安藤, "静電力を利用した粒子のマニピュレータ", 日本機械学会論
文集 (C編), Vol. 73, No. 735 (2007-11) pp.3031-3038.
6. 川本, "電子写真技術のシミュレーション入門 (I) モデリングー", 日本画像学
会誌, 第 45 巻, 第 5 号 (2006) pp.471-478.
7. 川本, 門永, "電子写真技術のシミュレーション入門 (II) 有限差分法ー", 日本
画像学会誌, Vol. 45, No. 6 (2006) pp.586-592.
8. 川本, "電子写真技術のシミュレーション入門 (III) 有限要素法ー", 日本画像学
会誌, Vol. 46, No. 1 (2007) pp.74-79.
9. 川本, "電子写真技術のシミュレーション入門 (IV) 個別要素法ー", 日本画像学
会誌, Vol. 46, No. 2 (2007) pp. 158-163.

(2) 学会発表 (15 件)

1. H. Kawamoto, H. Ando and S. Umezu, "Electrostatic Manipulation of Particles," *ASME/JSME Joint Conference on Micromechatronics for Information and Precision Equipment (MIPE 2006)*, Santa Clara, CA (2006-6).
2. H. Kawamoto, H. Ando and S. Umezu, "Electrostatic Manipulation of Particle," *NIP22: International Conference on Digital Printing Technologies*, Denver, Colorado (2005-9) pp.176-179.
3. H. Kawamoto and S. Umezu, "Electrostatic Traveling-Wave Manipulation of Liquid Drop and Soft Body," *The 3rd International Symposium on Bioprinting & Biofabrication* (2006-11) pp.O-11.
4. H. Kawamoto, T. Hiratsuka, H. Wakai and T. Adachi, (Focal) "Dynamics of Carrier Particles in Two- Component Magnetic Development System of Electrophotography," *NIP23: International Conference on Digital Printing Technologies*, Anchorage, Alaska (2007-9) pp.43-46.
5. H. Kawamoto, "Electrostatic Transport and Manipulation of Lunar Soil and Dust," *Space Technology & Applications International Forum (STAIF-2008)* (2008-2) pp.203-212.
6. 手島, 中山, 廣田, 川本, "超高磁界中における磁性粒子のチェーン形成", 第 18 回「電磁力関連のダイナミクス」シンポジウム, 神戸 (2006-5) pp.147-152.
7. 梅津, 安藤, 矢代, 川本, "静電マニピュレータによる粒子の捕捉と分離", 第 18 回「電磁力関連のダイナミクス」シンポジウム, 神戸 (2006-5) pp.153-156.
8. 大河原, 岡田, 賀嶋, 梅津, 川本, "進行波電界による粒子の粒度分別", 日本機械学会 機械力学・計測制御部門講演会DD2006, 名古屋 (2006-8) pp.234.
9. 笹岡, 辻, 川本, "進行波電界を用いたトナー搬送とそのシミュレーション", 日本画像学会, Imaging Conference JAPAN 2006 Fall Meeting, 京都 (2006-11) pp.57-60.
10. 杉山, 川本, 梅津, 榎本, 手島, "摩擦帯電型電子ペーパー製造工程における粒子注入技術の開発", 第 19 回「電磁力関連のダイナミクス」シンポジウム, 早稲田 (2007-5) pp.171-173.
11. 内山, 大河原, 梅津, 川本, "進行波電界を利用した粒子の粒度分別", 第 19 回「電磁力関連のダイナミクス」シンポジウム, 早稲田 (2007-5) pp.174-176.
12. 矢代, 平本, 梅津, 川本, "静電力を利用した粒子のマニピュレータ", 第 19 回「電磁力関連のダイナミクス」シンポジウム, 早稲田 (2007-5) pp.165-167.
13. 笹岡, 辻, 川本, "進行波電界によるトナー搬送とそのシミュレーション", 日本画像学会, Imaging Conference JAPAN 2007, 東京 (2007-6) pp.203-206.
14. 川本, "電磁力を利用する粒子のマニピュレーション", 日本機械学会 機械力学・計測部門講演会DD2007, 広島大 (2007-9) pp.355-356.
15. 井ノ上, 大門, 岩永, 川本, "磁性ナノ粒子を封入したゲルビーズのパターン形成とマニピュレーション", 日本機械学会情報・知能・精密機器部門講演会IIP2008, 東工大 (2008.3) pp.46-48.

(3) 図 書

なし

4. 研究成果による産業財産権の出願・取得状況

なし

5. 研究成果

5.1 緒 言

近年、急速に小型化が進んでいる電子部品や機械部品の実装・組立に際して、粒子を1粒ずつ取り扱うなど、微小粒子を対象としたハンドリング技術が必要とされている⁽¹⁾⁻⁽⁹⁾。このような粒子の操作法は、レーザ光の放射圧を利用する非接触方法⁽¹⁾と機械的なグリッパや静電プローブを利用する接触方法⁽²⁾⁻⁽⁹⁾に大別される。レーザ光を利用する方法は、数 μm ～数 $10\mu\text{m}$ の粒子を非接触で操作することが可能なので、粒子を傷つける危険性が少ないが、力が非常に小さいため、比較的大きな対象物は操作できないという制約がある。いっぽうグリッパを用いる方式は、機械的な可動部によって粒子を確実に操作できるが、対象粒子がやわらかい場合に粒子を傷つける危険性がある。これらに対して静電プローブを用いる方法では、粒子を捕捉する際に機械的な可動部を必要としないため、グリッパを用いる機構に比べて粒子を傷つける恐れが小さく、しかもレーザ光では困難な数 $10\mu\text{m}$ ～ 1mm の粒子を操作することができる。静電プローブ方式とは、電極端部に不平等電界を形成し、分極力を利用して粒子を捕捉するものである。前述の電子部品や機械部品の実装・組立に際しては、直径数 μm ～ 1mm 程度の粒子が使用されることが予想されるので、これらの用途にはこの静電プローブを用いるマニピュレータが適していると考えられる。

しかし静電マニピュレータでは、操作対象とする粒子が小さい場合、粒子を捕捉した後、自重と同程度以上の付着力が作用することがあるため、電圧を遮断しただけでは、必ずしも粒子を確実に分離することはできないという問題がある⁽⁴⁾⁽⁷⁾。そこで本研究では、粒子の捕捉だけでなく確実な分離が可能な機構の実現を目的として、イオン風分離機構をそなえた静電マニピュレータを考案した。イオン風分離機構とは、絶縁コーティングした針電極の外側にイオン風を発生させるための針電極を取り付けたものである。これらの電極間に電圧を印加した状態でプローブ先端を粒子に近づけると、分極力によって粒子が付着する。ここまでは従来の静電プローブと同じであるが、分離時にはさらに高電圧を印加して、コロナ放電によるイオン風を発生させて粒子をブローするように分離するものである⁽¹⁰⁾。本研究ではこのようなプローブを用いて、様々な粒子操作実験を行った。またプローブの吸引力について、分極力や粒子表面の接触帯電による静電気を評価し、実験値と計算値の比較・検討を行ったので報告する。

5.2 実験装置

粒子操作を目的とした静電マニピュレータとして、図1のような実験装置を作成した。粒子を捕捉するためのプローブには、単極子プローブと双極子プローブがあるが、前者は電界が平板電極と単極子プローブ間のギャップに依存するため、粒子を捕捉した後自由な移動ができないという制約がある⁽⁷⁾。そこで本研究では、位置に関係なく粒子の操作が可能な双極子プローブを用いた。双極子プローブにもいろいろな構造が考えられるが、本研究では製作が簡単で電極の大きさを変えることによって広範囲の大きさの

粒子を操作することができる平行線電極を用いた．本研究では，直径 1 mm 程度以下の粒子をハンドリングするために，直径 300 μm の金属針先端をプラスチック樹脂で絶縁コーティングした 2 本の電極を 1 mm 間隔で並べたものを作製した．この双極子プローブに電圧を印加した状態でプローブの先端を粒子に近づけると粒子がプローブ先端に付着し，電源をOFFにすれば分離する．

直流電源には，松定プレジジョン社製高電圧アンプ HEOPT-1B30 を用いた．また，住田光学ガラス社製ライト LS-M210 をバックライトに利用し，24,000 fps で撮影可能なフォトロン社製高速度顕微鏡カメラ FASTCAM-MAX 120K model 1 を用いて，粒子を操作する様子を観測した．

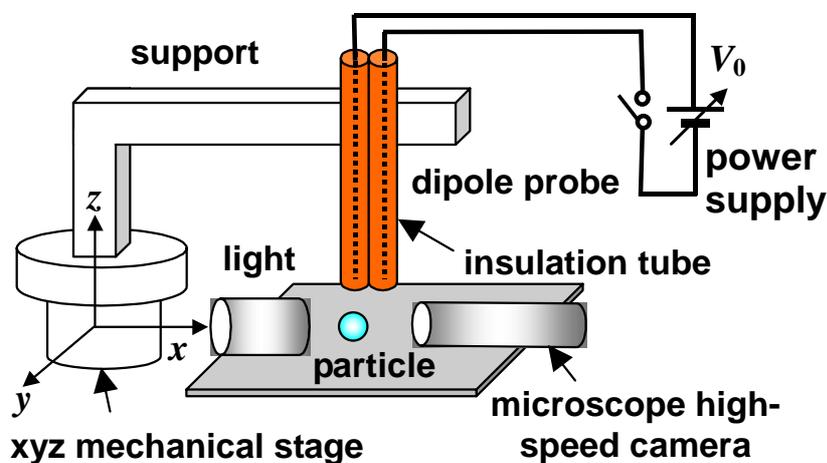


Fig. 1 Experimental setup of electrostatic particle manipulator.

5.3 吸引力の解析

粒子に作用する分極力を，3次元電界解析により計算した．粒子の大きさは電極の大きさに比べて無視できないため，粒子に働く力 F は，マックスウェルの応力差より，式 (1) のようになる．

$$F = \int_S f dS \quad \text{ただし, } f = \frac{1}{2} \epsilon_r (n \cdot E)^2 \quad (1)$$

ここで， ϵ_r は粒子の誘電率， n は外向き単位法線ベクトル， S は粒子の表面積である．粒子に作用する吸引力を計算するためには，電界 $E = -\nabla\phi$ を求める必要がある．そこで粒子の誘電性と導電性を考慮し，式 (2) に示すポアソン方程式と式 (3) に示す電荷保存則を支配方程式として 3次元電界解析を行った．

$$\nabla \cdot (-\epsilon \nabla \phi) = \rho \quad (2)$$

$$\nabla \cdot (-\sigma \nabla \phi) + \frac{\partial \rho}{\partial t} = 0 \quad (3)$$

ただし, ϕ は電位, σ は電気伝導度, ε は粒子, 絶縁コーティング, 外部空間のいずれかの誘電率, ρ は電荷密度である.

境界条件は, 電位 ϕ に対する固定境界条件 (4-1) (4-2) と絶縁境界条件 (4-3)

$$\phi = V_0 \text{ on applied electrode} \quad (4-1)$$

$$\phi = 0 \text{ on another electrode} \quad (4-2)$$

$$\mathbf{n} \cdot \nabla \phi = 0 \text{ on insulating boundaries} \quad (4-3)$$

を考えた. V_0 は印加電圧である. また, 電荷密度の初期条件として, $\rho(x, y, z) = 0$ (at $t = 0$) とした.

式 (2) (3) の計算には 3 次元の差分法を用いた. 図 2 に計算領域を示す. 厳密には無限空間における電位分布を計算すべきであるが, 電極に比べて十分広い閉空間を対象とした. メッシュは, x, y, z 軸方向にそれぞれ等間隔で 101 分割した (約 10^6 節点). 実験条件に合わせて, プロブの直径を $300 \mu\text{m}$ 2 本のプロブの中心間距離を 1 mm とした. 絶縁コーティングは底面が縦 1 mm , 横 2 mm の四角柱とし, 双極子先端から絶縁コーティング表面までの距離を $100 \mu\text{m}$ とした. 絶縁コーティングの比誘電率は 3.5 とした. そして, 双極子の一方の真下に粒子があるとし, 粒子の直径は 1 mm , 比誘電率は 3.5 とした.

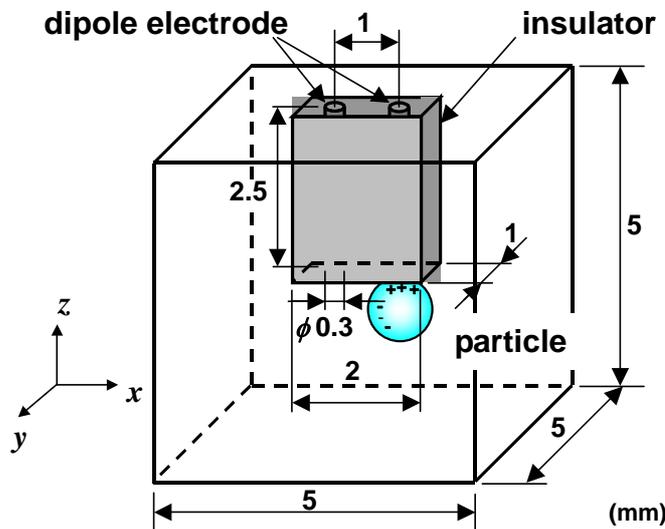


Fig. 2 Geometries of three-dimensional FDM calculation to calculate polarized electrostatic field.

5.4 粒子操作実験

5.4.1 基本操作実験 まず, 直径 1 mm の比較的大きな絶縁性のプラスチック粒子の捕捉・分離を行った. プロブには粒子を捕捉するためのしきい電圧が存在し, 試作したプロブの場合, その値は約 800 V であった. プロブにこのしきい電圧より高

い電圧を印加して粒子に接近させると、粒子がプローブ先端に付着し、その後電位を 0 V にすることによってプローブから粒子を分離することができた。

なお、粒子が絶縁性であれば、電極を絶縁コーティングしなくても捕捉・分離操作できることも確認した。しかし、絶縁コーティングのないプローブで導電性の粒子を捕捉すると、双極子が短絡する恐れがあるので、以下の実験では、絶縁コーティングしたプローブを用いた。また粒子を搭載する平板は、絶縁体でも導電体でも粒子を捕捉することが可能であった。しかし、絶縁性の平板の場合には、捕捉条件の再現性が悪かったため、以下のすべての実験では金属平板を用いた。なお、捕捉条件がばらつくのは、絶縁性の平板が帯電しかつその値がばらつくためであると考えられる。

つぎに、図 3 に示すように単一粒子をある地点から別の地点へ移動させる実験を行った。まず電圧を 1.6 kV にしたプローブを粒子に接近させ 粒子を付着させた(図 3 (a))。つぎにプローブを上方に移動させ(図 3 (b))、別の粒子の上を越えて目的の地点の上方に移動させた(図 3 (c))。さらに電圧を 0 V にして、粒子を分離した(図 3 (d))。以上のようにして単一粒子をある地点から別の狙った地点へ移動できることを実証した。

原理的には移動実験と同じであるが、より実際の用途を想定し、図 4 に示すように複数の粒子の中から、ある単一粒子を選択して捕捉する実験を行った。まず電圧を 1.6 kV にしたプローブを捕捉する粒子の上方に移動させ(図 4 (a))、プローブを粒子に接近させて粒子を付着させた(図 4 (b))。さらに粒子を付着させた状態でプローブを上方に移動させた(図 4 (c))。以上のようにして、粒子がある程度疎に分布しており、かつ粒径がプローブの大きさに対して極端に小さくない場合には、複数の粒子の中から、ある単一粒子を選択して捕捉できることを実証した。

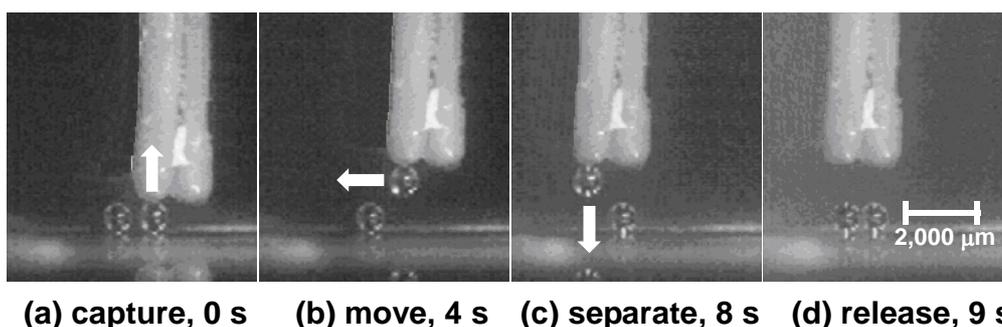


Fig. 3 Capture, move, separate, and release of particle. (1 mm plastic particle, 1.6 kV applied voltage at capture)

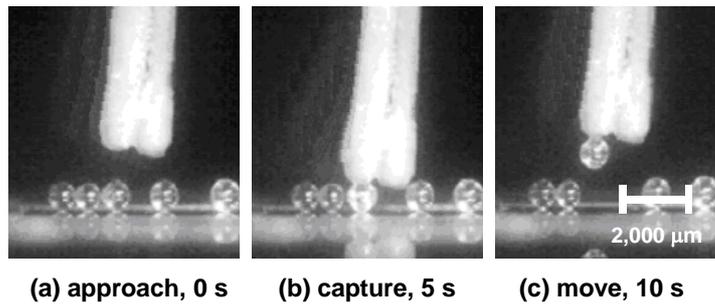


Fig. 4 Selective capture and move of particle. (1 mm plastic particle, 1.6 kV applied voltage at capture)

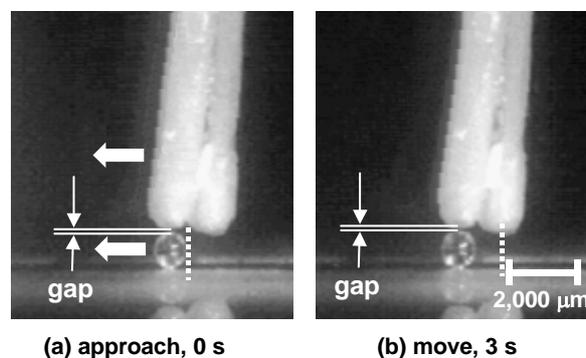


Fig. 5 Capture and transport of particle without contact. (1 mm plastic particle, 1.6 kV applied voltage at capture)

このプローブを用いて非接触で搬送できれば、壊れやすい粒子のハンドリングに利用できる。そこで、まず印加電圧を 1.6 kV にしたプローブを粒子の上方から接近させ、粒子が付着する寸前まで移動させた(図 5 (a))。つぎにプローブを粒子と非接触のまま水平方向に移動させると、粒子もプローブの真下の位置を保った状態で平板上を水平方向に滑りながら移動した(図 5 (b))。なお非接触搬送では、粒子に加わる力が非常に小さいので、プローブの動作に粒子を追従させるために、プローブをゆっくり水平移動させなければならなかった。微妙な調整が必要ではあるが、以上のようにして非接触で粒子を搬送することに成功した。

粒子を捕捉することが可能な範囲を調べる実験を行った。まず電圧を 1.6 kV にしたプローブを平板との距離が粒子の直径と同じになる高さまで移動させた(図 6 (a))。さらにプローブを水平方向に移動させると(図 6 (b))、プローブの電圧印加側電極の中心と粒子中心の距離が 1 mm 程度となったときに、プローブの真下より 500 μm 程度ずれて付着した(図 6 (c))。この実験から、プローブ付近に粒子があれば、プローブを粒子に接触しなくても捕捉できることが確認された。

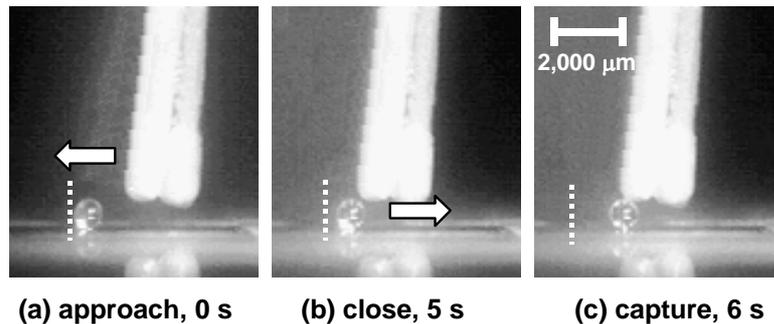


Fig. 6 Capture of particle at a point distance from particle. (1,000 μm plastic particle, 1,600 V applied voltage at capture)

5.4.2 導電性粒子の操作 粒子の導電性の影響を調べる実験を行った。まず、直径 100 μm の比較的小さな半導電性粒子($10^7 \sim 10^9 \Omega\text{cm}$)の捕捉・分離実験を行った。この粒子(戸田工業製)はレーザープリンタの 2 成分磁気ブラシ現像系のキャリアとして用いられているものであり、マグネタイト粉を分散させたフェノール樹脂を、重合によって球形に合成したものである⁽¹¹⁾。電圧を印加したプローブを粒子に近づけ(図 7 (a))、粒子をプローブに向かって飛翔させ(図 7 (b), (c))、粒子をプローブに付着させた(図 7 (d))。しかし、電源を遮断しても粒子を確実に分離できるというわけではなかった。特に、直径約 50 μm 以下の粒子では、ひとたびプローブに付着した後は、電源をOFFにしてもプローブから分離することはなかった。粒子の分離に関しては、後の節で詳細に報告する。

導電性の金属粒子に対しても捕捉が可能であることを確認するため、絶縁性粒子の場合と同様に、直径 500 μm の亜鉛粒子の捕捉・分離を行った。まず電極間電位差を 1,000 V にしたプローブを粒子に近づけ(図 8 (a))、粒子をプローブ先端に付着させ(図 8 (b))、さらに粒子を付着させた状態のままプローブを鉛直上方に上げ(図 8 (c))、最後に印加電圧を 0 V にすることで粒子を分離した(図 8 (d))。この結果より、金属粒子でも捕捉・分離できることを確認した。

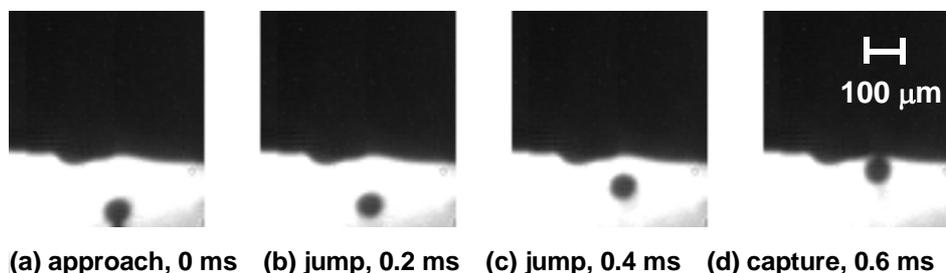


Fig. 7 Capture of conductive particle. (100 μm resistive carrier particle, 1.0 kV applied voltage at capture)

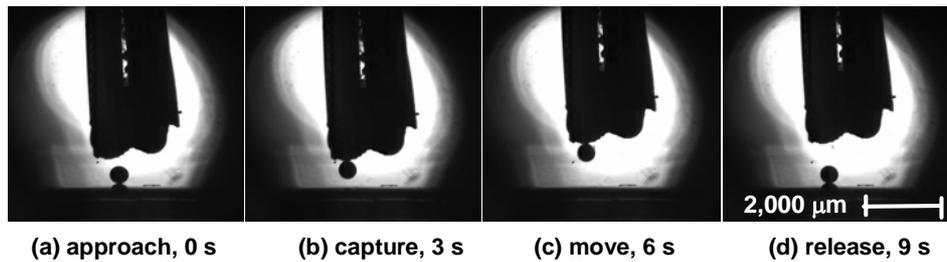


Fig. 8 Capture, move, and release of conductive particle. (500 μm conductive zinc particle, 1.0 kV applied voltage at capture)

5.4.3 液体中における粒子の操作 粒子は、空気中だけではなく液体中でも操作されることがある。そこで、油中におけるプラスチック粒子の捕捉・分離実験を行った。空気中で粒子を確実に捕捉するためには、プローブを粒子に接触させなければならなかったが、油中においては浮力が作用するため、プローブと粒子間にギャップがある状態でも粒子が浮上して容易にプローブに付着した。液体中では大きな粘性減衰力が作用することもあり、油中の方が空気中よりも粒子を操作しやすかった。

5.4.4 操作可能な粒子の大きさ 操作可能な粒子の大きさを表1にまとめて示す。まず粒径1 mmの亜鉛粒子は、粒子重量がプローブの静電力よりも大きいため、捕捉できなかった。静電プローブに生じる力には電極間の絶縁耐力による上限があり、その値は機械的なグリッパなどに比べて小さいため、あまり大きな粒子の操作には不向きである。これに対して、粒径1 mm程度以下の大きさの粒子であれば、捕捉すること自体は容易であった。問題は捕捉後の分離であり、表に示すように、プラスチックやガラス、キャリアなど比較的low比重で200 μm 以下程度の小粒径の粒子は、印加電圧をOFFしても、粒子はプローブに付着したままであり、分離できなかった。これはプローブと粒子の間に働く分子間力、液架橋力、接触電位差による付着力などが、粒子の自重よりも大きくなるためであると考えられる。すなわち、この限界粒径は、粒子の比重、プローブの大きさ、環境条件、帯電などに依存するものであるが、小粒径の粒子ほどその自重に対して付着力が相対的に大きくなる。これまでの研究では、このような小粒径の粒子の分離方法として、微小な振動を加える、電氣的に短絡する、極性を変える、などの方策が報告されており⁽⁷⁾、われわれも同様な方法を試みたが、確実に分離できるというわけではなかった。

Table 1 Summary of demonstrated electrostatic manipulation.

particle diameter (μm)	capture	release
1,000	(plastic, glass) × (zinc)	(plastic, glass)
800	(plastic)	(plastic)
500	(zinc)	(zinc)
400	(plastic)	(plastic)
200	(plastic, glass)	× (plastic, glass)
150	(plastic, glass)	× (plastic, glass)
100	(plastic, carrier)	× (plastic, carrier)

specific gravity: plastic 1.0, glass 2.5, carrier 3.6, zinc 7.1

5.5 イオン風分離機構

5.5.1 分離機能を備えたプローブ 上述のように，操作対象とする粒子の直径がある値以下になると，プローブと粒子の間に作用する付着力が粒子の自重を上回るため，分離が困難になる．そこで，プローブに付着している粒子にイオン風を当てることで，粒子を強制的に分離させる機能を備えたプローブを作成した．図 9 にその構造を示す．直径 $50\ \mu\text{m}$ の金属針を内径 $100\ \mu\text{m}$ の絶縁チューブに通し，先端を絶縁コーティングした．この絶縁チューブの外側に，先端を絶縁コーティングしていない金属針を取り付けたものをイオン風分離機構とした．小粒径粒子を対象とするため，小径電極を用いた．

このプローブの動作原理は以下のものである．まず，電極間にコロナ放電開始電圧以下の電圧を印加し，捕捉電極先端部に不平等電界を作り，静電分極力によって粒子を捕捉する．ここまでの動作原理は前節の双極子プローブと同じである．コロナ放電の開始電圧は，事前に系の電圧 電流特性を測定しておくことによって知ることができる⁽¹²⁾．つぎに印加電圧を遮断するのではなく，逆にコロナ放電開始電圧以上の電圧を印加する．そうすると，印加電圧の大きさに対応して，絶縁していないイオン風発生電極先端からイオン風が発生し⁽¹²⁾，付着した粒子をブローするように分離することができる．なお，イオン風の発生は，図 10 に示すように，煙を利用した可視化実験でも確認した．図の縦の薄い煙線(点線部)は下部からの線香の煙であり，これがプローブ先端に達して，イオン風によって左方に吹き飛ばされている様子がわかる．

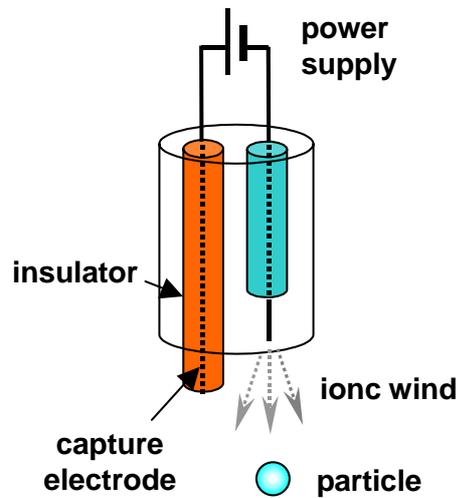


Fig. 9 Electrostatic dipole probe with particle separation system utilizing ionic wind.

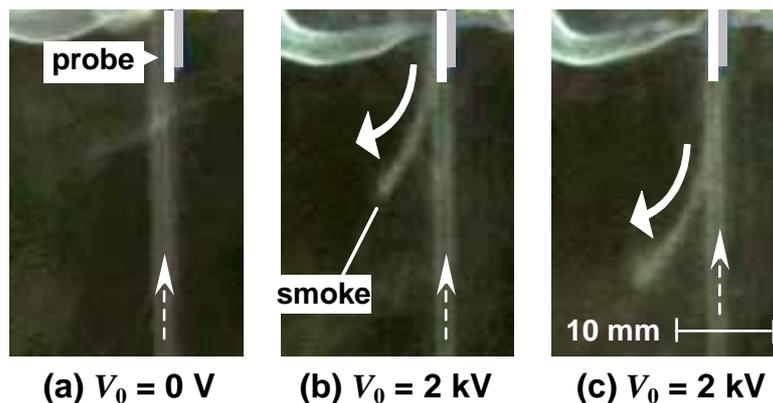


Fig. 10 Visualization of ionic wind utilizing smoke flow. (2.0 kV applied voltage)

5.5.2 粒子の分離 改良したイオン風分離機構を用いて、直径 $150 \mu\text{m}$ のガラス粒子の操作実験を行った。まず電圧を 300 V にしたプローブを粒子に近づけることで、粒子を捕捉した(図 11 (a))。つぎに粒子の分離を目的として電圧を 0 V にしたが、前述のようにこの状態では粒子は捕捉電極に付着したままであり、分離されない。そこで電圧を 2.0 kV にしてイオン風発生電極先端にコロナ放電を発生させ、イオン風を励起することにより、粒子を分離した(図 11 (b), (c))。本機構により、粒子を確実に分離できることを実証したが、イオン風が強すぎると、分離した粒子が目標とする位置にとどまらないで飛散してしまうことがあった。しかし、イオン風の大きさは事前の予備実験によって確認することができるため、粒子に過大な流体力が加わらない適切な分離電圧をあらかじめ設定することが可能である⁽¹⁰⁾。また予備実験結果がなくても、徐々に印加電圧を上昇することによって、所望の位置に粒子を

分離することも可能である．このような操作が可能であることを実証するために，4角柱形状の粒子を積み上げる実験を行った．操作対象として， $200\ \mu\text{m}$ の食塩粒を用いた．まず電圧を $1.0\ \text{kV}$ にしたプローブを食塩に近づけて食塩を捕捉し(図 12 (a)) ,さらに他の $500\ \mu\text{m}$ の食塩の真上に移動させ，電圧を $0\ \text{V}$ にした(図 12 (b))．つぎに電圧を $2.0\ \text{kV}$ にして食塩を静粛に分離させ， $500\ \mu\text{m}$ の食塩の上に積み上げることができることを実証した(図 12 (c))．

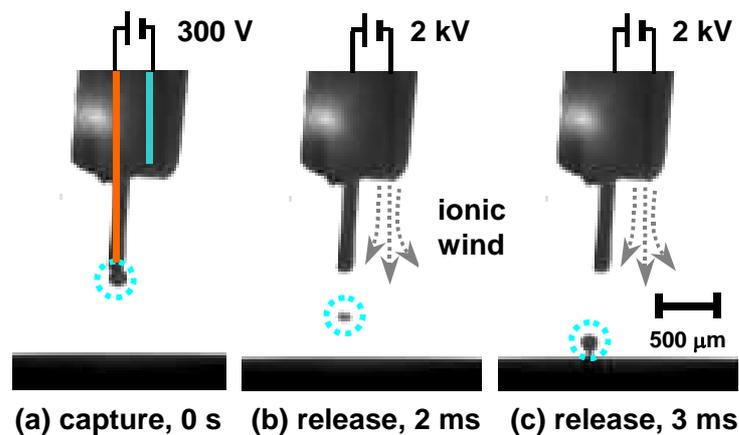


Fig. 11 Capture and release of small particle utilizing ionic wind. ($150\ \mu\text{m}$ glass particle, $300\ \text{V}$ for capture and then $2.0\ \text{kV}$ for release)

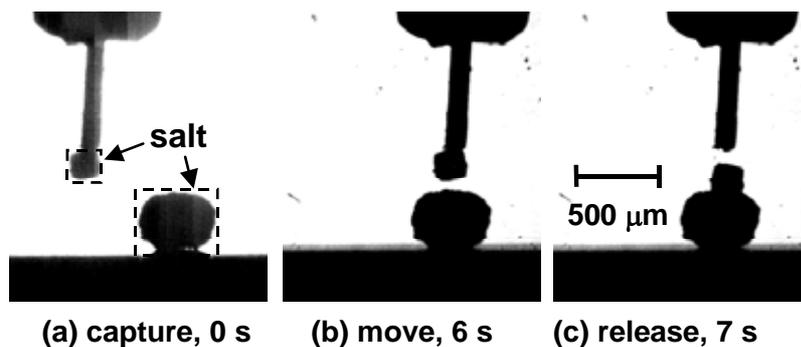


Fig. 12 Construction of small cubic on cubic utilizing electrostatic dipole manipulator with ionic separation system. ($200\ \mu\text{m}$ salt cubic on $500\ \mu\text{m}$ salt cubic, $1.0\ \text{kV}$ for capture and then $2.0\ \text{kV}$ for release)

双極子プローブでは，操作対象とする粒子が小さくなると，空气中だけでなく液体中においても分離が困難であった．そこで，イオン風分離機構を用いて，誘電性の油に電場を与えることで，液体中でも粒子を分離できることを実証した．油中ではコロナ放電は生じないためイオン風も発生しないが，電気流体力学(EHD)効果による誘電性の流

体の対流によって粒子を分離できると考えられる．この EHD 対流の様子を可視化するために，針電極の先端に油性染料を塗布し，電圧を印加したとき，染料が電極先端から吐出されることを確認した．

5.6 粒子に作用する力

5.6.1 吸引力測定 図 13 に示す実験装置を用いてプローブと粒子間に作用する吸引力を測定した．すなわち，低剛性の片持ちはりの先端に接着させた直径 1 mm のガラス粒子に，電圧を印加した状態のプローブを近づけて，粒子を捕捉した．つぎに粒子を捕捉した状態でプローブを下方に下げると，粒子とプローブ間に働く吸引力とはりの復元力がつり合う位置まで，はりが変形する．このはりの臨界変位量をレーザ変位計 (Keyence Corp, LK-080) によって測定し，あらかじめ測定しておいたはりの剛性を乗ずることで吸引力を算出した．測定結果を図 14 に示す．接触面の状態や温湿度変化などによると思われるばらつきがあるが⁽¹³⁾，印加電圧に対しておおむね 2 次関数的に増加していることがわかる．なお実験環境は通常の空調室であり，室温 20～27℃，相対湿度 40～60% 程度である．

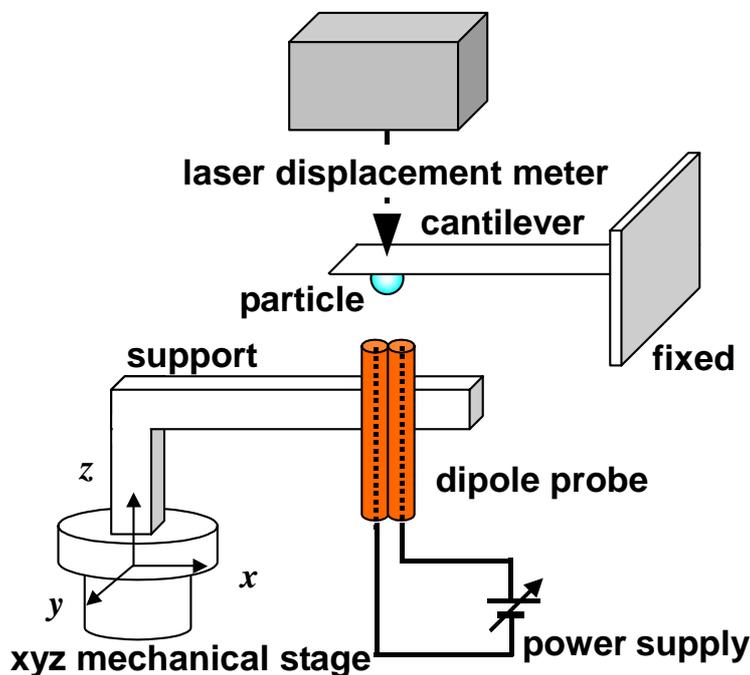


Fig. 13 Experimental setup to measure capture force of electrostatic dipole probe.

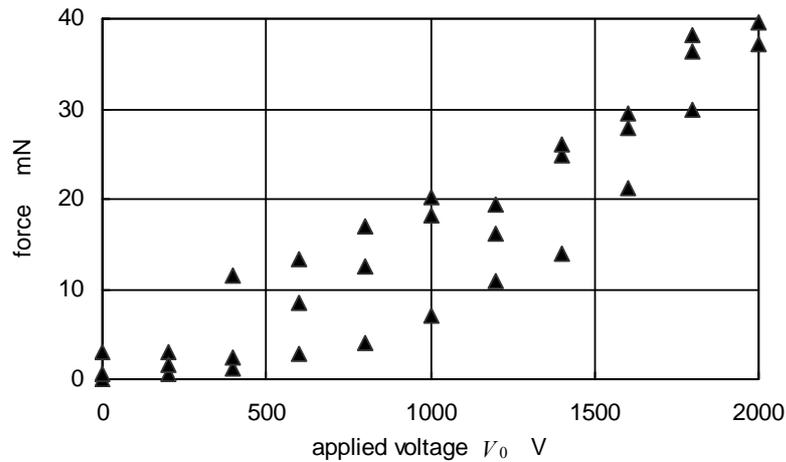


Fig. 14 Measured capture force of electrostatic dipole probe.

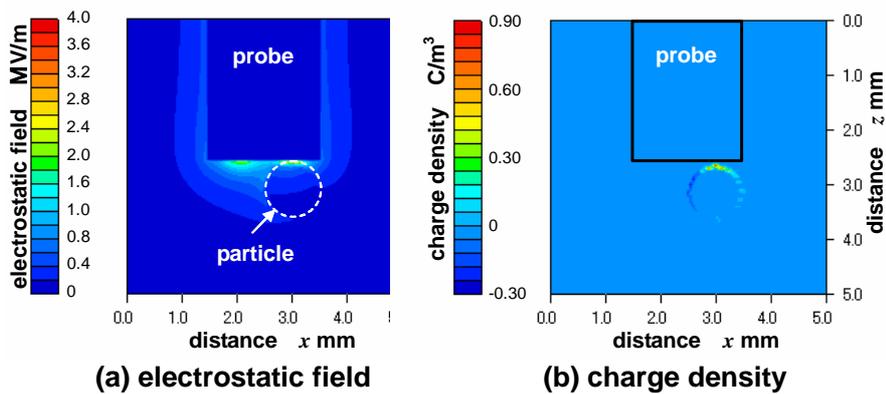


Fig. 15 Distributions of electrostatic field and charge density. (1 mm glass particle, 1,600 V applied voltage)

5.6.2 分極力 図 15 に定常時における電界強度分布と帯電量分布の計算結果を示す．この結果をもとに，直径 1 mm，比誘電率 3.5 の粒子に作用する分極力 F_p を算出した結果を図 18 に付記した．図に示すように，計算値も実測値と同様に印加電圧に対して 2 次関数的に増加するものの，その絶対値は実験値を大きく下回るものでしかなかった．これまで，静電プローブに作用する力は分極力によるものであると定性的に説明されてきたが⁽¹⁴⁾，別の要因を考慮すべきであることを示唆する結果となった．

5.6.3 クーロン力 進行波電界によって粒子を搬送する研究では，電界中で絶縁体に接触しながら運動する粒子に作用する力は，分極力よりも粒子が接触帯電することによって生じるクーロン力が支配的であることがわかっている⁽¹¹⁾．本システムでも粒子はプローブに接触するので，同様に接触帯電によるクーロン力が作用すると考えられる．そこで接触による粒子の帯電量を測定し，クーロン力 F_e を算出した．

帯電量測定の方法は以下のものである．まず，プローブに電圧を印加して粒子を捕

捉する(図 16 (a))．つぎに，プローブと金属平板間に電圧を印加して，粒子を飛翔させる(図 16 (b))．このときの粒子加速度 a を高速度カメラで測定し，式 (5) に代入することで帯電量 q を求めた．

$$ma = qE + mg - 6\pi\eta rv \quad (5)$$

ここで， m は粒子の質量， g は重力加速度， η は空気の粘性係数， r は粒子の半径， v は粒子の速度である．電界強度 E は3次元電界計算により算出した値を用いた．帯電量の測定結果を図 17 に示す．帯電は表面状態や温湿度などの条件に大きく依存するため⁽¹³⁾，測定結果にも大きなばらつきがある．これは力の測定結果と同様であり，帯電によるクーロン力が粒子に作用する支配的な力であることを示唆するものである．力に関する以上の実験値と計算値を図 18 にまとめて示す．ただし，実験値は図 14 の結果を印加電圧ごとに平均したものであり，クーロン力は，図 17 に示した帯電量の平均値に3次元電界計算で求めた電界強度をかけたものである．なお，帯電電荷は，接触点に集中しているものとみなし，その位置における電界強度の値を用いた．図からわかるように，分極力よりも接触帯電によるクーロン力が支配的であり，これらの和は実験値に近い値となった．

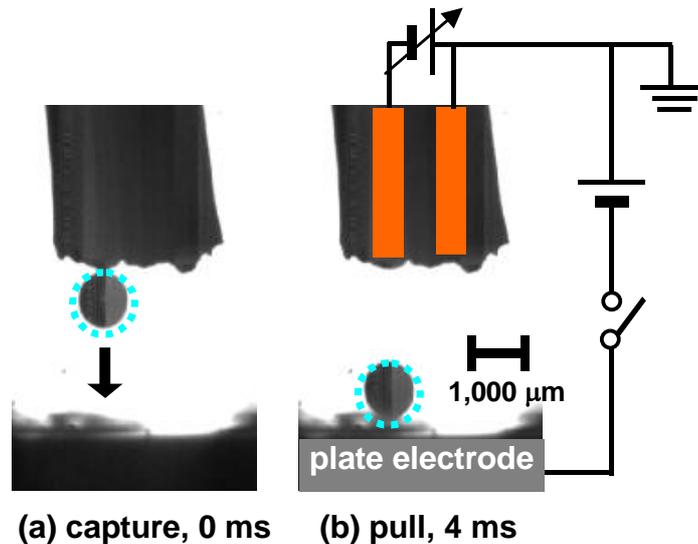


Fig. 16 Measurement of particle motion in electrostatic field. (1 mm particle)

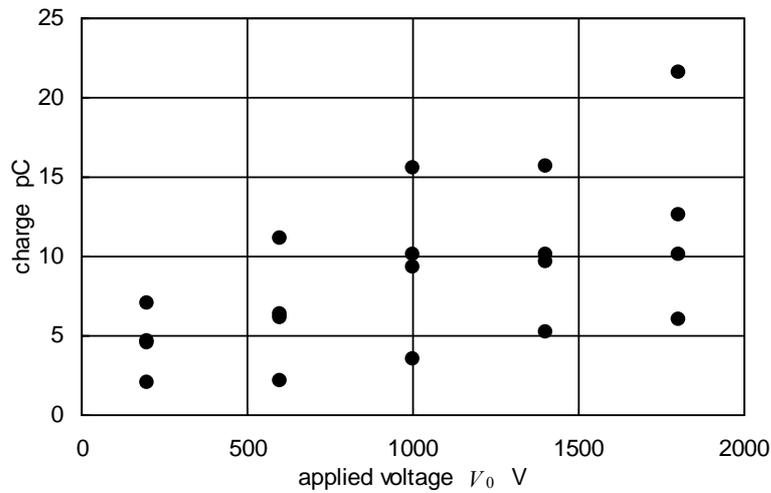


Fig. 17 Measured charge of captured particle. (1 mm glass particle)

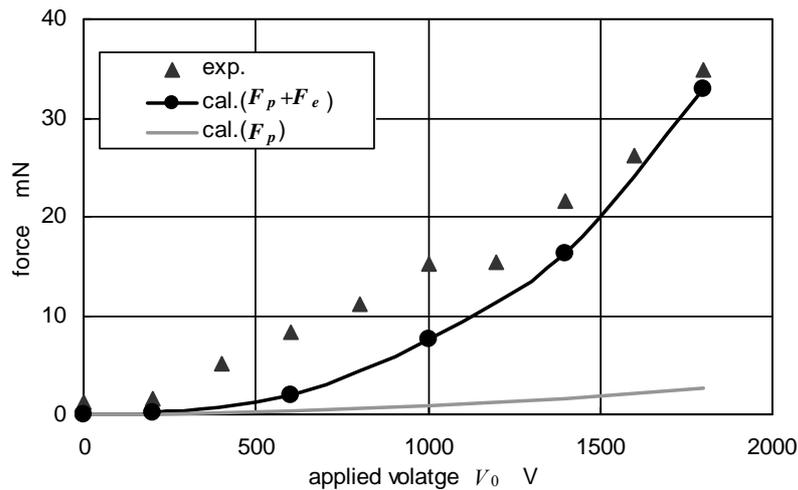


Fig. 18 Relationship between measured total force, calculated electrophoresis force F_p , and estimated Coulomb force F_e applied to 1 mm glass particle attached to electrostatic dipole probe.

7.7 結 言

微小粒子を1粒ずつ正確に操作できる静電マニピュレータの開発を目的として、直径1 mm ~ 100 μm 程度の粒子を捕捉・分離できるイオン風分離機構を備えた双極子プローブを作成し、様々な粒子の操作実験を行った。微細なマニュアル操作であり、ある程度の熟練は必要であるが、本静電双極子プローブを用いて、粒子の導電性に係わらず、粒子を捕捉・移動・分離することが可能であることを実証した。また、このプローブの吸引力を評価し、粒子とプローブとの付着力は、粒子の接触帯電にともなうクーロン力が支配的であることを示した。

参考文献

- (1) M. Ozkan, M. Wang, C. Ozkan, R. Flynn, A. Birkbeck and S. Esener, Optical Manipulation of Objects and Biological Cells in Microfluidic Devices, *Biomedical Microdevices*, **5**, 1 (2003) pp.61-67.
- (2) O. Millet, P. Bernardoni, S. Regnier, P. Bidaud, E. Tsitsiris, D. Collard and L. Buchaillot, Electrostatic actuated micro gripper using an amplification mechanism, *Sensors and Actuators A*, **114** (2004) pp.371-378.
- (3) Y. Rollet, S. Regnier and J. C. Guinot, Dynamical model for the micro-manipulation by adhesion: experimental validations for determined conditions, *J. Micromechatronics*, **1**, 4 (2002) pp.273-297.
- (4) K. Takahashi, H. Kajihara, M. Urago, S. Saito, Y. Mochimaru and T. Onzawa, Voltage required to detach an adhered particle by Coulomb interaction for micromanipulation, *J. Appl. Physics*, **90**, 1 (2001) pp.432-437.
- (5) S. Saito, H. Himeno, K. Takahashi and M. Urago, Kinetic control of a particle by voltage sequence for nonimpact electrostatic micromanipulation, *Appl. Physics Letters*, **83**, 10 (2003) pp.2076-2078.
- (6) L. Altomare, M. Borgatti, G. Medoro, N. Manaresi, M. Taragni, R. Guerrieri and R. Gambari, Levitation and Movement of Human Tumor Cells Using a Printed Circuit Board Device Based on Software-Controlled Dielectrophoresis, *Biotechnology and Bioengineering*, **82**, 4 (2003) pp.474-479.
- (7) T. Konno, M Kobayashi, M Egashira and N. Shinya, Manipulation of Particles by Dipole Probe, *J. Soc. Powder Technol, Japan*, **42** (2005) pp.23-30.
- (8) T. Konno, M Kobayashi, M Egashira and N. Shinya, Study on Manipulation and Welding Method of Fine Particles Using Microprobe, *J. Soc. Powder Technol, Japan*, **42** (2005) pp.98-104.
- (9) C. Yu, J. Vykoukal, D. M. Vykoukal, J. A. Schwartz, L. Shi and P. R. C. Gascoyne, A Three-Dimensional Dielectrophoretic Particle Focusing Channel for Microcytometry Applications, *J. Microelectromechanical Systems*, **14**, 3 (2005) pp.480-487.
- (10) H. Kawamoto, H. Yasuda and S. Umezu, Flow distribution and pressure of air due to ionic wind in pin-to-plate corona discharge system, *J. Electrostatics*, **64** (2006) pp.400-407.
- (11) H. Kawamoto, K. Seki and N. Kuromiya, Mechanism on Traveling-Wave Transport of Particles, *J. Phys. D: Appl. Phys*, **39** (2006) pp.1249-1256.
- (12) H. Kawamoto, Statics of Pin Electrode in Pin-to-Plate Discharge System, *J. Imaging Sci. Technol*, **45**, 6 (2001) pp.556-564.
- (13) L. B. Schein, Recent Progress and Continuing Puzzles in Electrostatics, *Science*, **316** (2007) pp.1572-1573.
- (14) T. B. Jones, *Electromechanics of Particles*, Cambridge University Press, NY (1995).

6. 添付資料 (発表論文)

3.研究発表に記載の論文に対応

以上