

# マイクロプラスチック捕集における誘電泳動特性の数値解析 — 溶媒導電率, 周波数および粒径依存性の検証 —

福井 紗也\*, 八木 一平\*, 内田 諭\*,<sup>1</sup>

(2024年5月22日受付; 2024年7月30日受理)

## Numerical Analysis of Dielectrophoresis Characteristics in Microplastic Collection - Validation of the Dependence on Medium Conductivity, Frequency, and Particle Size -

Saya FUKUI\*, Ippei YAGI\* and Satoshi UCHIDA\*,<sup>1</sup>

(Received May 22, 2024; Accepted July 30, 2024)

This research aims to address the problem of marine plastic pollution by using dielectrophoresis to accurately identify and isolate microplastics. The application of dielectrophoretic force on particles can be affected by a variety of factors, such as frequency, device and particle geometry, as well as the dielectric and conductive properties of the medium and particles. This study aims to analyze the effects of variations in medium conductivity, operational frequency, and particle dimensions on particle behavior through a two-dimensional analytical approach. The results suggest that the strength of the electric field increases with higher frequencies or lower medium conductivities. It was found that at lower frequencies or lower medium conductivities, particles are attracted towards higher electric field regions, indicating positive dielectrophoresis. Conversely, as particle size increases, particles are repelled from these regions, indicating negative dielectrophoresis. The factors influencing the direction of particle movement include the frequency of the applied electric field, the conductivity of the medium, and the size of the particles. These findings could potentially enhance the precision of microplastic separation and analytical methods.

### 1. はじめに

近年, 海洋プラスチックによる環境汚染および健康被害が危惧されている<sup>1,2</sup>. 海洋中のプラスチックは波や紫外線により分解されマイクロプラスチック (MP) と呼ばれる 5 mm 以下の粒子が残留する. 比表面積の増大に応じて汚染物質の吸着量が多くなることから, 食物連鎖による生態系への影響が懸念されている.

しかし, MP の詳細な分布や生成メカニズムが明らかになっておらず, MP モニタリング技術の確立が急務である. 現在 MP のモニタリングには捕集・分離・分析の工程があり, マイクロメートル以下の粒子の分離が特に課題となっている<sup>3</sup>. 従来の技術では, 特に直径が数十  $\mu\text{m}$  以下の微小な MP の環境サンプルからの分離は難しい<sup>4</sup>. そのため粒子の選別方法として, フィールドフロー法<sup>5</sup>, 音響学<sup>6</sup>, マイクロ流体工学<sup>7</sup>を用いた能動的分離と, 濾過, 密度分

離<sup>8</sup>, 疎水性相互作用<sup>9</sup>などの受動的分離が研究されている<sup>10</sup>.

その中でも, 著者らは MP の電気的特性を利用した誘電泳動法に着目し, プラスチック粒子の分離・分析技術を研究してきた<sup>11,12</sup>. 誘電泳動法は少量のサンプルに対してラベルフリーの分析が可能であり, 微粒子の操作に優れているため技術として期待されている<sup>10</sup>.

一方, 分離技術の研究における問題は, 環境要因や入力条件が多岐にわたるため, 全ての条件を試験することができない点にある. 加えて, この技術では粒子の濃縮と精度の向上が必要とされる. 誘電泳動を用いた際の粒子のインピーダンスと濃縮性の関係性など, より定量的な確認が求められる<sup>12</sup>. これは, デバイス内の粒子や電解質に影響を及ぼす様々な物理現象が複雑に作用しているためである. これらの問題を解決するためには, 現象の理解を深め, 最適化された処理を行うためのシミュレーションが必要不可欠である.

そこで本研究では, 誘電泳動デバイス内部の電界分布および MP の粒子挙動を明らかにした. 誘電泳動力を微細に調整でき, MP の分離・分析効率を向上させる交流電圧を使用することで, 周波数によって効果的に制御することができる. 特に本解析では, 溶媒導電率, 周波数, 粒子径の影響を明らかにした. この条件は, MP の誘電泳動力が界面分極効果と電界に依存し, これらが導電率, 周波数, 粒子径と相互に関連するためである. MP 分離・分析技術の発展には, これ

キーワード: 誘電泳動, マイクロプラスチック, 動電現象, ポリスチレン, モニタリング技術

\* 東京都立大学システムデザイン研究科

(〒191-0065 東京都日野市旭が丘6-6)

Graduate School of Systems Design, Tokyo Metropolitan University, 6-6, Asahigaoka, Hino-shi, Tokyo 191-0065, Japan

<sup>1</sup> s-uchida@tmu.ac.jp

DOI: <https://doi.org/10.34342/iesj.2024.48.5.201>

らの基礎的な特性を整理し理解を深めることが必要不可欠であり、本論文はその目標に向けた報告である。

2. 原理

2.1 誘電泳動

交流電場中にある粒子や流体は、誘電泳動力 (DEP)、交流電気浸透 (ACEO) および交流熱電流 (ACET) の影響を受ける。DEPは粒子に働く力である一方、ACEO、ACETは流体に働く力である<sup>13)</sup>。本報告では、これらの力のうち、粒子の誘電特性に依存し kHz~MHz 帯域において支配的な力となるため、DEP の特性について解析を行った。

DEP<sup>14)</sup>は、不均一電界中で粒子が電界勾配に沿って泳動する現象である。粒子は印加電圧によってその内部で電荷が分離する。しかし、不均一電界にさらされると、力の差により粒子が駆動される。この誘電泳動力は、

$$F_{DEP} = 2\pi a^3 \epsilon_m \text{Re}[K(\omega)] |\nabla|E|^2 \tag{1}$$

$$[K(\omega)] = \frac{\epsilon_p^* - \epsilon_m^*}{\epsilon_p^* + 2\epsilon_m^*} \tag{2}$$

と表される。ここで、 $a$ は粒子の半径、 $\text{Re}[K(\omega)]$ はクラウジウスモソッティ (CM) 関数の実部、 $\epsilon_m$ は溶媒の誘電率、 $\epsilon_p$ は粒子の誘電率、 $*$ は複素誘電率を表す。

$\text{Re}[K(\omega)] > 0$ となる場合 (図1(a))、これを正の誘電泳動 (pDEP) と呼び、粒子は強電界領域に向かって移動する。逆に、 $\text{Re}[K(\omega)] < 0$ となる場合 (図1(b))、これを負の誘電泳動 (nDEP) と呼び、粒子は弱電界領域に向かって移動する。

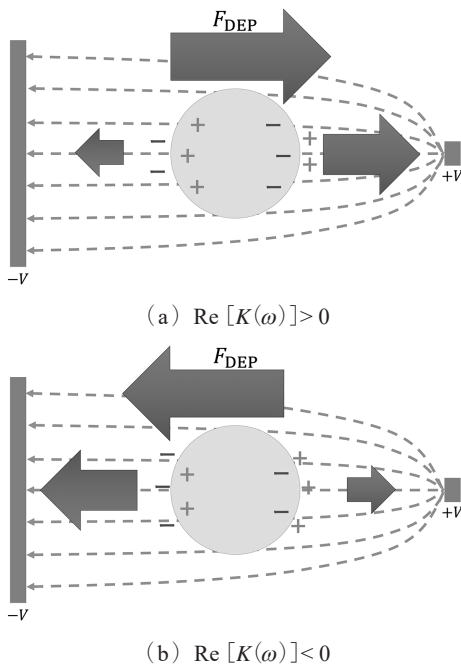


図1 粒子にかかる誘電泳動力  
Fig.1 Schematic diagram of dielectrophoretic force.

2.2 解析モデル

本著者らが実験で使用している楕型電極に対して、二次元モデルを作成した。基本的な泳動を確認するため、本研究では楕型電極を用いた。電極流路拡大部分を図2 (a)、COMSOL Multiphysics 6.1にて作成した二次元モデルの電極間の拡大図を図2 (b)に示す。このモデルは、底面に横幅 110  $\mu\text{m}$ 、厚さ 0.1  $\mu\text{m}$  の ITO 電極を 10  $\mu\text{m}$  間隔で設置し、底面電極の上に SiO<sub>2</sub>膜を厚さ 0.3  $\mu\text{m}$ 、電極間も SiO<sub>2</sub>膜が蒸着されている。粒子を含む溶媒は高さ 199.6  $\mu\text{m}$  として、SiO<sub>2</sub>膜上に配置した。また、両電極端に幅 5  $\mu\text{m}$  の SiO<sub>2</sub>膜間隙を作成し、周期境界条件を用いることで楕型電極の繰り返し構造を再現した。本解析モデルは電極間中央を基準として対称的なモデルを作成したため、解析結果では図2 (b)に示される範囲に限定して掲載する。

2.3 解析理論

電界解析 支配方程式として動的な電流の方程式を適用した<sup>15)</sup>。電荷の連続方程式は式 (3)、(4) で表される。ここで、 $\rho$ は媒質の導電率、 $J_e$ は外部電源による電流密度である。

$$\nabla \cdot J + \frac{\partial \rho}{\partial t} = 0 \tag{3}$$

$$J = \sigma E + j\omega D + J_e \tag{4}$$

また、電界  $E$  と電位  $V$  については次式で表される。

$$E = -\nabla V \tag{5}$$

粒子挙動解析 本解析では、誘電泳動力および抗力のみを考慮した。粒子追跡解析では、電界解析を用いて粒子

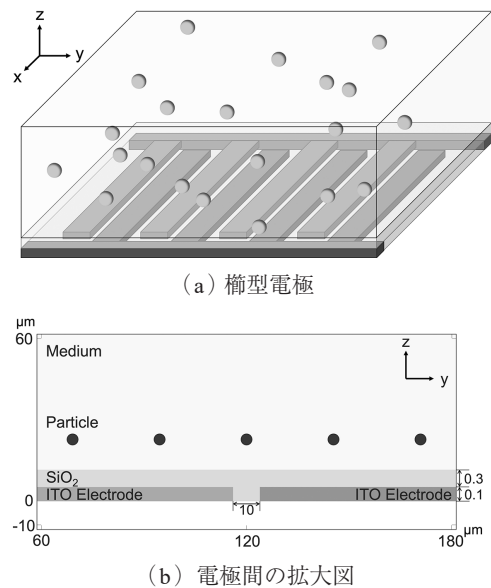


図2 電極構造と解析モデルの拡大図  
Fig.2 Electrode structure and analytical model.

に働く運動方程式を解くことで、粒子の挙動を解析することが可能である。式(6)に粒子に対する運動方程式を示す。

$$m \frac{dv}{dt} = F_{DEP} + F_{drag} \quad (6)$$

ここで、 $m$  は粒子の質量、 $v$  は粒子の速度を表す。また、右辺の力はそれぞれ、 $F_{DEP}$  は誘電泳動力、 $F_{drag}$  は抗力を表す。ここで抗力とは、流体中を粒子が運動するとき、粒子の進行を妨げる向きに生じる力である。溶媒によるこの力を粒子速度応答時間  $\tau_p$ 、粒子位置における流体速度  $u$  を用いて式(7)に表す。

$$F_{drag} = \frac{1}{\tau_p} m(u - v) \quad (7)$$

MP 分離においては、浮力と誘電泳動力の相対的な大きさが粒子の移動方向と距離に影響を与える。しかし本研究では浮力の影響を考慮していない。これは、今回使用したポリスチレン粒子の密度が  $1050 \text{ kg/m}^3$  であり、水の密度との差はわずか  $51.79 \text{ kg/m}^3$  となる。この差は粒子に働く浮力が誘電泳動力に比べて無視できるほど小さいことを意味する。

### 3. 解析方法

#### 3.1 電界解析

二次元モデルの電極に  $10 \text{ V}$  と接地、 $1 \text{ kHz} \sim 1 \text{ MHz}$  の交流周波数  $f$  を印加した。さらに、溶媒の導電率  $\sigma_m$  を  $1 \times 10^{-4}$ ,  $1 \times 10^{-2}$ ,  $1 \text{ S/m}$  に変更し、導電率ごとの電界分布から2乗電界勾配  $|E|^2$  を解析した。これは、蒸留水、水道水(河川)、海水を想定している。

#### 3.2 粒子追跡解析

ポリスチレン (PS) 粒子を二次元モデルの捕集空間内に、 $x$  方向に  $25 \mu\text{m}$  毎、 $y$  方向  $10 \mu\text{m}$  に均一に初期配置し、電圧印加5秒後の粒子挙動を電界解析を基に解析した。PS 粒子の本来の導電率は  $1 \mu\text{S/m}$  であるが、今回は表面導電率を考慮した。PS 粒子の本来の導電率  $\sigma_s$ 、PS 粒子の半径  $a$ 、表面コンダクタンス  $K_s$  を用いると表面導電率を含めた PS 粒子の導電率  $\sigma_p$  は、

$$\sigma_p = \sigma_s + \frac{2K_s}{a} \quad (8)$$

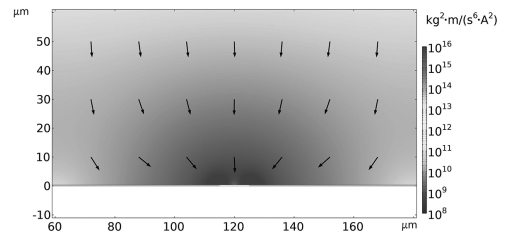
と表すことができる<sup>16)</sup>。  $K_s$  はおおよそ  $1 \text{ nS}$  とされており、今回の計算ではその値を用いた<sup>17)</sup>。直径  $2a=1, 2, 5, 10 \mu\text{m}$  で計算をすると  $\sigma_p$  は、 $4 \times 10^{-3}, 2 \times 10^{-3}, 8 \times 10^{-4}, 4 \times 10^{-4} \text{ S/m}$  となった。

本論文では、溶媒導電率変化、周波数変化、粒子径変化における誘電泳動による影響の比較を行った。用いたパラメータは表1に記載する<sup>18)</sup>。

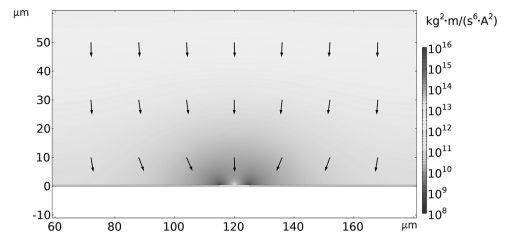
## 4. 解析結果

### 4.1 溶媒導電率による影響

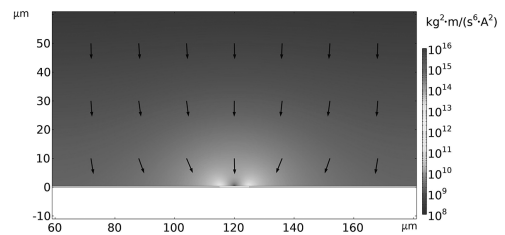
図3に各溶媒導電率における2乗電界勾配分布を、図4にCM関数の溶媒導電率特性を、図5に粒子追跡結果を示



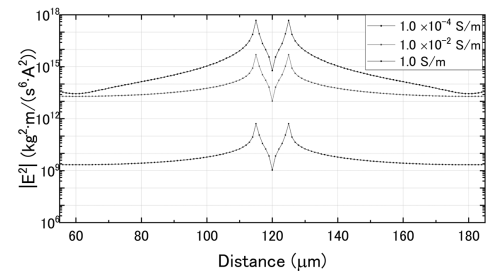
(a)  $\sigma_m = 1 \times 10^{-4} \text{ S/m}$



(b)  $\sigma_m = 1 \times 10^{-2} \text{ S/m}$



(c)  $\sigma_m = 1 \text{ S/m}$



(d) SiO<sub>2</sub>上の2乗電界勾配

表1 解析で使用したパラメータ

Table 1 Electrical parameters for numerical analysis.

	Conductivity [S/m]	Relative permittivity	Density [kg/m <sup>3</sup> ]	Viscosity [Pa · S]
Medium	$1 \times 10^{-4}$ , $1 \times 10^{-2}$ , 1	78.9	998.21	$8.9 \times 10^{-4}$
SiO <sub>2</sub>	$0.5 \times 10^6$	10	—	—
ITO	$1.0 \times 10^{14}$	3.9	—	—
PS Particle	$4 \times 10^{-3}$ , $2 \times 10^{-3}$ , $8 \times 10^{-4}$ , $4 \times 10^{-4}$	2.55	1050	—

図3 各溶媒導電率における2乗電界勾配 ( $f=100 \text{ kHz}$ )  
Fig.3  $\nabla|E|^2$  at each conductivity.  
以降カラーバーは  $\nabla|E|^2$  の大きさ、矢印は向きを表す。

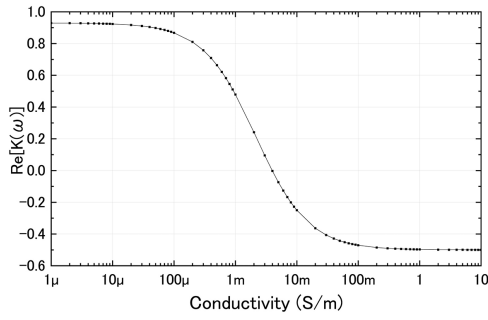


図4 CM関数の溶媒導電率特性 ( $\sigma_p=4 \times 10^{-3}$  S/m)  
Fig.4 conductivity response of CM Functions.

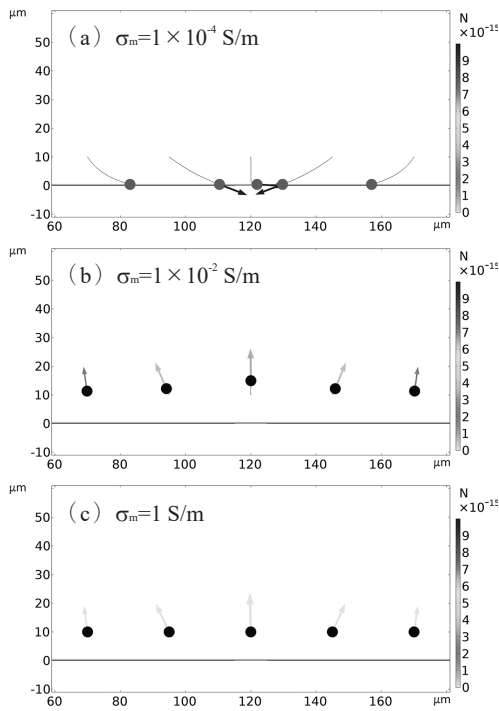


図5 各導電率における5秒後の粒子位置 ( $f=100$  kHz,  $2a=1$   $\mu$ m,  $\sigma_p=4 \times 10^{-3}$  S/m)

Fig.5 particle position after 5 s each conductivity.  
以降カラーバーは  $F_{DEP}$  の大きさ, 矢印は向きを表す.

す。解析条件は周波数  $f=100$  kHz, 直径  $a=1$   $\mu$ m とする。図3において, 矢印の向きと大きさは  $|\nabla|E|^2|$  を示す。低導電率では  $|E|^2$  の向きが電極端部に向かっているのに対し, 高導電率では垂直成分が多くなることが確認された。図3 (d) より, 溶媒導電率が純水の  $10^2$  倍にした場合,  $|\nabla|E|^2|$  は電極端部で約  $10^3$  倍となるが中央ではほぼ変わらない。さらに導電率を  $10^2$  倍にした場合,  $|\nabla|E|^2|$  は各位置で約  $10^4$  倍となる。このように導電率が高くなると  $|\nabla|E|^2|$  が減少する結果となった。また, 図5より  $\sigma_m=1 \times 10^{-4}$  S/m のときのみ pDEP を示す。これは, 図4において CM 関数が  $\sigma_m=4 \times 10^{-3}$  S/m 付近で正負が変わり,  $\sigma_m=1 \times 10^{-4}$  S/m で正の値を取ることと一致する。また図5 (b), (c) で電極間上部の粒子に着目すると, 溶媒導電率が  $10^2$  倍増加すると,  $F_{DEP}$  は  $2.7 \times 10^3$  倍する。このように  $F_{DEP}$  は  $|\nabla|E|^2|$  の影響を受けることが確認された。

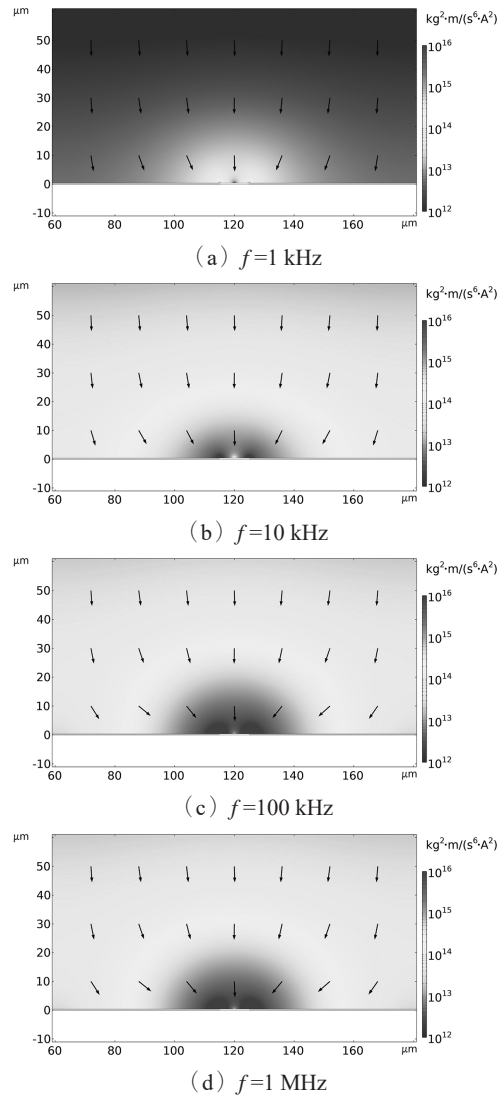


図6 各周波数における2乗電界勾配 ( $\sigma_m=1 \times 10^{-4}$  S/m)  
Fig.6  $|\nabla|E|^2|$  at each frequency.

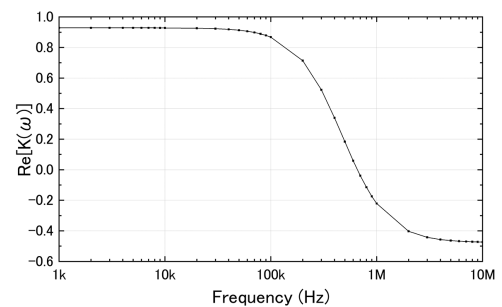


図7 CM関数の周波数特性 ( $\sigma_m=1 \times 10^{-4}$  S/m,  $2a=1$   $\mu$ m,  $\sigma_p=4 \times 10^{-3}$  S/m)

Fig.7 Frequency response of CM function.

### 4.2 周波数による影響

図6に各周波数における2乗電界勾配分布を, 図7にCM関数の周波数特性を, 図8に粒子追跡結果を示す。解析条件は溶媒導電率  $\sigma_m=1 \times 10^{-4}$  S/m, 直径  $2a=1$   $\mu$ m, 粒子導電率  $\sigma_p=4 \times 10^{-3}$  S/m とする。図6より,  $|\nabla|E|^2|$  は電極端部



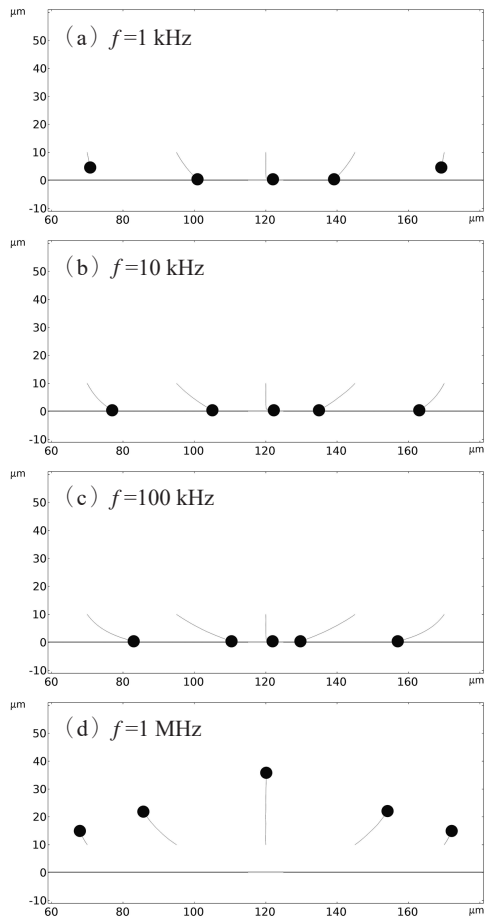


図8 各周波数における5秒後の粒子位置 ( $\sigma_m=1 \times 10^4$  S/m,  $2a=1 \mu\text{m}$ ,  $\sigma_p=4 \times 10^3$  S/m)

Fig.8 particle position after 5 s each frequency.

に集中し、周波数が増加とともに大きくなり 100 kHz 付近で最大となった。図8より、pDEPを示す場合は粒子が電極間へ向かう結果となった。これはDEPが $\nabla|E|^2$ の傾きに影響を受けるためである。さらにpDEPを示す場合1 kHzのときのみ電極側に到達していない粒子が存在した。これはDEPが $\nabla|E|^2$ の大きさによって影響を受けるためである。実際に図6の電極中央付近(横軸70  $\mu\text{m}$ )において、周波数が1 kHzから10 kHzに増加すると、初期位置(底面から10  $\mu\text{m}$ )の $\nabla|E|^2$ が21.2倍増加することが確認できた。また、1 MHzのときのみ粒子は電極から離れる方向に向かったが、これは図7において657 kHz付近でCM関数の正負が代わり1 MHzで負の値となることと一致する。

### 4.3 粒子径による影響

図9にCM関数の粒子特性を、図10に粒子追跡結果を示す。解析条件は周波数 $f=100$  kHz、溶媒導電率 $\sigma_m=1 \times 10^4$  S/mとする。式(1)より、本解析条件下において $F_{DEP}$ は $\text{Re}[K(\omega)]$ と $a^3$ に依存する。図9より、粒子径が大きい場合は負の値を示しやすく100 kHzでは10  $\mu\text{m}$ の場合に負の値となった。また、粒径が小さいほど $\text{Re}[K(\omega)]$ が大きくなった。このとき $\text{Re}[K(\omega)]$ と $a^3$ の積は、直径 $2a=1, 2,$

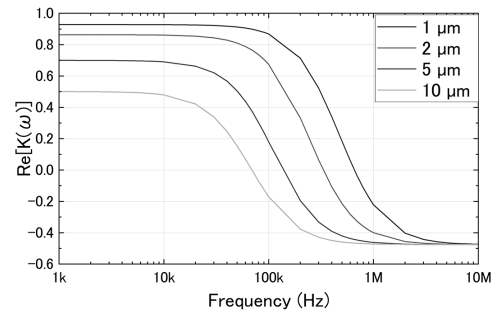


図9 CM関数の粒子特性 ( $\sigma_m=1 \times 10^4$  S/m)  
Fig.9 particle response of CM Functions.

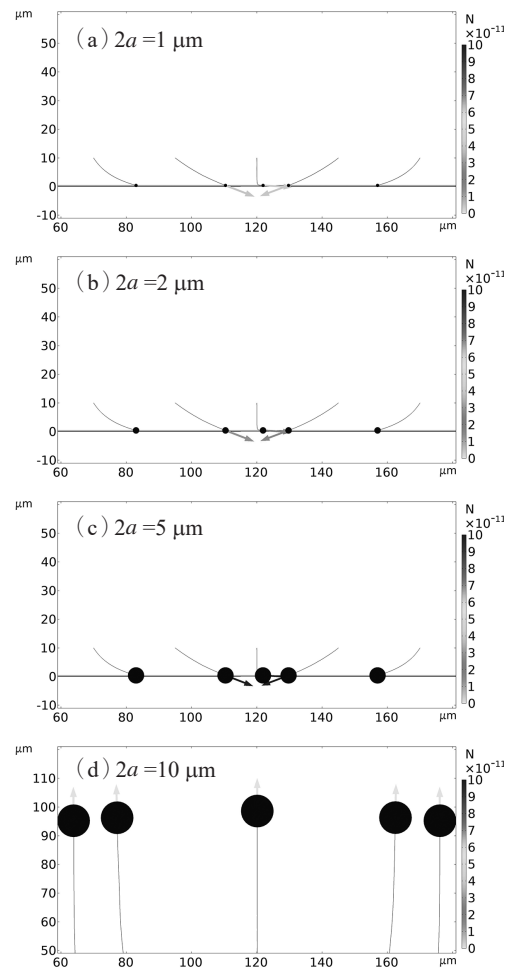


図10 各粒径における5秒後の粒子位置 ( $f=100$  kHz,  $\sigma_m=1 \times 10^4$  S/m)

Fig.10 particle position after 5 s each particle size.

5  $\mu\text{m}$ ではそれぞれ0.108, 0.674, 2.794となり、粒径が大きいほど $F_{DEP}$ が強くなる。ここで、図10の中央にある粒子が受ける誘電泳動力に着目する。解析結果より直径 $2a=1, 2, 5$ において誘電泳動力はそれぞれ $3.75 \times 10^{-12}$ ,  $2.33 \times 10^{-11}$ ,  $9.65 \times 10^{-11}$  Nであった。これは計算結果と一致する。

### 5. 考察

楕型電極を用いて、二次元モデルを作成し周波数、粒子

径、溶媒導電率を変化させたところ、誘電泳動の理論式に従う粒子挙動を確認することができた。加えて当研究室で行った先行実験では周波数の変化によって捕集面積の変化が確認されている<sup>10)</sup>。この先行実験の結果と同等の傾向を示すことからシミュレーションの妥当性が確認された。

導電率が増加するにつれて二乗電界勾配が減少する結果が得られた。ここで電界分布について考える。溶媒導電率が低い場合、溶媒部分がコンデンサのように見なされ電気力線が疎となり高電界となる(図11(a))。逆に溶媒導電率が高い場合、溶媒部分は短絡状態と見なされ電気力線は密となり弱電界となる(図11(b))。これは、溶媒の複素誘電率が

$$\epsilon_m^* = \epsilon_m + \frac{\sigma_m}{j\omega} \quad (9)$$

と表され、分子に含まれる溶媒導電率の周波数により変化することが原因である<sup>18)</sup>。つまりEは $\sigma_m$ の関数であるとみなせる。また、図4および図5より、導電率によってCM関数の正負が変わり、それに伴い力の方向も変化する。これはDEPの処理環境を調整することが重要であることを指している。

濾過などにより不純物を取り除く表面改質などの前処理を施した粒子と、外部から溶媒の導電率を変更することで、プラスチック種や溶液中の夾雑物など粒子の種類で分離する技術に応用可能である。

次に、周波数によって電界分布が変わることが示された。これは、式(9)において周波数が分子に含まれ、電界の変化に影響を与えるためである<sup>19)</sup>。つまりEは $\omega(f)$ の関数であるとみなせる。さらに誘電泳動力は2乗電界勾配の影響を受けるため、周波数による電界の変化によって力の大きさや進む距離が変化する。また、同様に式(2)が変動しCM関数が

変化するため、誘電泳動力の向きが周波数に応じて変わる。つまり、このような導電性を持つ溶媒では、周波数を変化することで粒子の力や向きが変化すると推察される。

最後に、粒径変化において、力の大きさの変化や粒子の進む距離が異なる結果となった。誘電泳動力は粒子の最底面だけでなく粒子全体に作用する力であり、電界分布により決定される。加えて式(1)における誘電泳動力の電界は、粒子中心における電界を指す。このため、粒径の変化に伴う力の大きさや移動距離の変化は、電極面とのギャップ距離の変化による影響より $a^3$ が誘電泳動力に影響を及ぼすためであると説明される。また図9より100 kHz~1 MHzでCM関数が反転することから、力の向きが変わる。これらより、粒径が小さい場合 $F_{DEP}$ は半径の三乗に比例し減少するが、 $\text{Re}[K(\omega)]$ は表面導電率の影響で線形的に増加し1に近づく。つまりこの二つの影響のバランスが重要であり、分離において重要な粒子選択性を周波数特性と力の差によりもたらすことができると推察される。また、本報告では式(8)を用いて $K_s=1 \text{ nS}$ と設定し粒子導電率を設定したが、実際には粒子表面に形成される電気二重層が $K_s$ に影響を与える。これは溶媒中のイオンと溶媒導電率が関係しており、今後より詳しい粒子条件を用いる際には検討が必要である。

また今回の研究では、粒子位置と力の解析において5秒後のデータを図示した。捕集に必要な時間は誘電泳動力が強いほど短くなる。低導電率では電界が強く捕集時間が短縮する。周波数は100 kHz付近が最適で、粒径は大きいほど捕集時間が短くなる。しかしこの2つのパラメータは大きくなると誘電泳動力が反転するため、見極めが必要である。これらのパラメータを最適化することで、効率的な捕集が可能となる。

以上の結果より、純水程度の導電率ではPS粒子の捕集に有効であると推察される。ここで、他媒質での捕集が可能であるか検討するために、異なる周波数でのCM関数の導電率特性を確認した。そのグラフを図12に示し、PS粒子を直径 $2a=1 \mu\text{m}$ と仮定した。図12より、CM関数は4

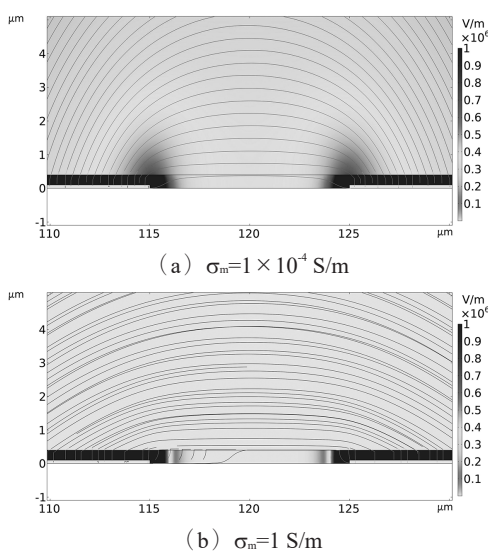


図11 高低溶媒導電率における電界分布 ( $f=100 \text{ kHz}$ )  
Fig.11 Comparison of electric fields at each conductivity. カラーバーはEの大きさ、線は電気力線を表す。

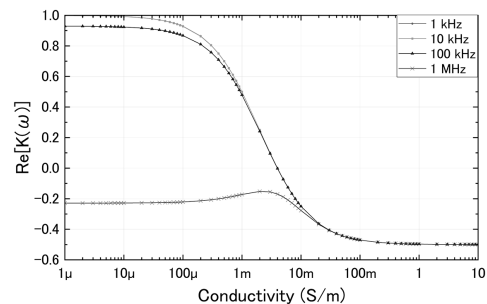


図12 周波数毎におけるCM関数の導電率特性 ( $2a=1 \mu\text{m}$ ,  $\sigma_p=4 \times 10^{-3} \text{ S/m}$ )  
Fig.12 Conductivity characteristics of the CM function at each frequency.

$\times 10^3$  S/m 付近で正負が反転もしくは常に負の値となった。これは河川などから回収したサンプルの溶媒導電率を 1/10 程度に希釈することで捕集可能になることを示唆する。

## 6. まとめ

本報告では、誘電泳動 (Dielectrophoresis) を用いたマイクロプラスチック (MP) の分離・分析に向けて、誘電泳動デバイス内部の電界分布および粒子挙動を理解するため、周期構造を持つ電極に対して二次元モデルを作成した。誘電泳動において、粒子の泳動方向は CM 関数により決定し、その泳動力の大きさは溶媒の導電率、電界の周波数および粒径に強く依存することが示された。溶媒の導電率は純水程度が理想的であり、これより増加すると電界強度が減少し捕集効率も低下する。電界の周波数は 100 kHz 付近が最適と考えられる。粒径は体積と CM 関数の影響が確認され、粒径が増大すると誘電泳動力も増加するが捕集可能な周波数帯は低下する。これらの特性を制御することは、MP の分離、分析を行う上で重要であり、その精度向上の鍵となるであろう。そのため、実応用に向けては定量的な閾値をもとにデバイス設計を最適化することが重要である。一方、動電現象は誘電泳動に加えて交流電気浸透や交流熱電流などの流体力学的および電気的な作用が関わる。特に導電率が高い場合はジュール加熱による影響が交流熱電流を通じて現れる可能性がある。また、交流電気浸透および交流熱電流を通じて水の流動が起り粒子の挙動に影響を与えるであろう。今後の研究では、これらの力の相対的な寄与を定量的に評価することが重要である。

## 謝辞

本研究は JSPS 科研費 JP23H03765, JP21H01317, JP23KK0260 の助成を受けた。

## 参考文献

- 1) C. G. Alimba and C. Faggio: Microplastics in the marine environment: Current trends in environmental pollution and mechanisms of toxicological profile. *Environmental Toxicology and Pharmacology*, **68** (2019) 61
- 2) A. D. Vethaak and J. Legler: Microplastics and human health. *Science*, **371** (2021) 672
- 3) O. M. Rodríguez-Narvaez, A. Goonetilleke, L. Perez and E. R. Bandala: Engineered technologies for the separation and degradation of microplastics in water: A review. *Chemical Engineering Journal*, **414** (2021) 128692
- 4) G. Lamichhane, A. Acharya, R. Marahatha, B. Modi, R. Paudel, A. Adhikari, B. K. Raut, S. Aryal and N. Parajuli: Microplastics in environment: global concern, challenges, and controlling measures. *International Journal of Environmental Science and Technology*, **20** (2023) 4673
- 5) C. Schwaferts, T. Egawa, R. Welz, F. Meier, T. Klein, R. Niessner, M. Elsner and N. P. Ivleva: Nanoplastic Analysis by Online Coupling of Raman Microscopy and Field-Flow Fractionation Enabled by Optical Tweezers. *Analytical Chemistry*, **92** (2020) 5813
- 6) Y. Akiyama, V. Sogne, K. Koyano and H. Moriwaki: Acoustic focusing of microplastics in microchannels: A promising continuous collection approach. *Sensors and Actuators B: Chemical*, **304** (2020) 127328
- 7) A. Philippe, M. Gangloff, D. Rakcheev and G. E. Schaumann: Evaluation of hydrodynamic chromatography coupled with inductively coupled plasma mass spectrometry detector for analysis of colloids in environmental media – effects of colloid composition, coating and shape. *Analytical Methods*, **6** (2014) 8722
- 8) B. Quinn, F. Murphy and C. Ewins: Validation of density separation for the rapid recovery of microplastics from sediment. *Analytical Methods*, **9** (2017) 1491
- 9) A. Kitagawa, M. Ota, T. Watamura, T. Tonooka and Y. Murai: Microplastic particle trapping through microfluidic devices with different shaped pillars. *Chemical Engineering Science*, **264** (2022) 118163
- 10) Y. Wei, J. Dong, P. Zhao, Y. Wang X. Pan and J. Wang: Separation and characterization of microplastic and nanoplastic particles in marine environment. *Environmental Pollution*, **297** (2022) 118773
- 11) 舟橋昌哉, 内田 諭, 八木一平, 山岡英彦, 永田晃基: 河川・湖沼中のマイクロプラスチックに対する誘電泳動検出デバイスの開発. 静電気学会講演論文集 '22, p23, 静電気学会 (2022)
- 12) 舟橋昌哉, 内田 諭, 八木一平, 山岡英彦, 永田晃基: 誘電泳動インピーダンス計測によるマイクロプラスチック数量測定デバイスの検討. 令和 5 年電気学会全国大会講演論文集 vol.3, p.260, 電気学会 (2023)
- 13) J. Wu: Interactions of electrical fields with fluids: laboratory-on-a-chip applications. *IET Nanobiotechnol.*, **2** (2008) 14
- 14) H. A. Pohl: Dielectrophoresis: The behavior of neutral matter in nonuniform electric fields, p. 6, Cambridge University Press (1978)
- 15) A. Abdulhameed, M. M. Halim and A. I. Halin: Simulation and experimental validation of the interplay between dielectrophoretic and electroosmotic behavior of conductive and insulator particles for nanofabrication and lab-on-chip applications. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, **663** (2023) 131065
- 16) Q. Chen and Y. J. Yuan: A review of polystyrene bead manipulation by dielectrophoresis. *RSC Advances*, **9** (2019) 4963
- 17) H. Chang and L. Y. Yeo: Electrokinetically driven microfluidics and nanofluidics, p. 290, Cambridge University Press (2010)
- 18) A. Abdulhameed, M. N. Mohtar, M. N. Hamidon and I. A. Halin: Assembly of long carbon nanotube bridges across transparent electrodes using novel thickness - controlled dielectrophoresis. *ELECTROPHORESIS*, **43** (2022) 487
- 19) R. Pethig: Dielectrophoresis: theory, methodology and biological applications p. 136, Wiley (2010)