

誘電泳動電極集積化マイクロ流体デバイスによる 微粒子クロマトグラフィー技術の開発

Dielectrophoretic electrode-integrated microfluidic devices
for particulate chromatography.

助成年度	令和4年度研究助成		
助成番号	MZR2023004		
研究期間	2023/04/01 ~ 2024/03/31		
代表研究者	横山 奨 (Sho Yokoyama) 大阪工業大学大学 工学部 機械工学科		
共同研究者	吉田 恵一郎 (Keiichiro Yoshida)	大阪工業大学大学 工学部	
	廣芝 伸哉 (Nobuya Hiroshiba)	大阪工業大学大学 工学部	
キーワード	誘電泳動、クーロン力、イオン風、マイクロ流体デバイス、微粒子操作		

1. 研究の背景と目的

直径がマイクロメートルオーダーの粒子選別技術は、化学、環境、バイオメディカル分野の研究用途や、様々な産業分野で必要不可欠である。マイクロオーダーの試料や試薬を分析・計測を行なうデバイスのことをマイクロ流体デバイスという。マイクロ流体デバイスの特徴は、微量、迅速、簡便という点にあり、分析・計測という観点からも魅力的である。また、微小空間内で化学プロセス（反応や合成など）を行なうため、実験条件を精密に制御することができるという特徴もある。これまで、液相中の微小粒子を選別・捕集するためのマイクロ流体デバイスが数多く提案されている。一方、PM2.5に代表される粉塵のような気相中の微粒子を選別・捕集するためのマイクロ流体デバイスの報告例は比較的少ない。これは、液

相中と異なり気相中では浮力の助けを借りることができず、分離に必要なエネルギーが大きくなり、難易度が著しく上昇するためである。誘電泳動現象を利用した気相中の粒子捕集に関する論文はごく少数あるものの、あくまで理論的検討に留まっている^[1-3]。

これまでの研究から、我々は誘電泳動力を利用して微粒子を気相中に保持する静電集塵技術の開発に成功している^[4]。この技術を発展させ、静電的引力を利用して微粒子を捕集流路に導くマイクロ流体デバイスを開発した。このマイクロ流体デバイスは、流体のせん断力と誘電泳動力の大きさの釣り合いによって捕集位置が決定される。そのため、捕集対象となる微粒子の大きさ・質量・誘電率などによって微粒子群を分類することが可能である。これは、物質の大きさ・吸着力・電

荷・質量・疎水性などの違いを利用して、物質を成分ごとに分離するクロマトグラフィー技術（chromatography）の微粒子版であることから、我々の研究グループでは、本デバイスを用いた微粒子分離・捕集技術を微粒子クロマトグラフィー技術と呼称としている。

一方で、誘電泳動力などの静電的引力を利用した微粒子分離・捕集技術では、静電気力により電極部に一部の微粒子が固着し捕集の妨げとなる現象が確認された。そこで、本研究では新たに静電的斥力を用いた微粒子分離・捕集技術を開発する。

2. 研究の内容・方法

ファンクションジェネレータで発生させた電圧波形を高電圧アンプ (20/20C-HS, Trek) により増幅し、上方電極に印加する。デバイス内電極部を通過する微粒子の挙動を高速カメラ (k7-USB, KATO-KOKEN) で撮影する。撮影条件は、解像度 1024×768 pixel、300 fps とした。実験装置の概要図を図 1 に示す。

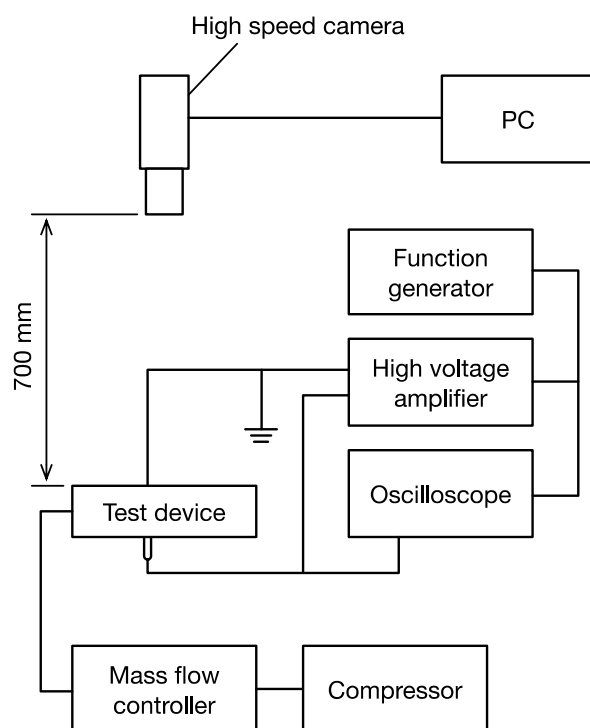


図 1 実験装置の構成概要

本研究では、より確実性が高く効率的な粒子分離・捕集を目指して複数タイプのデバイスを試作した。最新の粒子分離・捕集デバイスを図 2 に示す。

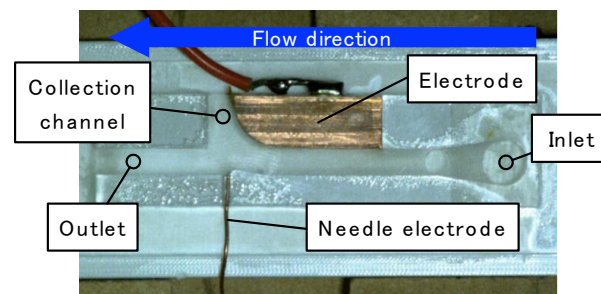


図 2 粒子分離・捕集デバイス

デバイスには、コンプレッサーとマスフローコントローラを用いて、所定流量の空気を送風する。印加電圧と流量を調整し、粒子がデバイス内を通過する様子を丈夫に設置した高速度カメラで撮影した。粒子には、着色したソーダライムガラスビーズを用いた。様々な初期位置での微粒子の挙動を評価するため複数回の撮影を行った。撮影した動画をオープンソースの動作分析ソフトウェア (Kinovea, Kinovea.org) を用いて解析し、粒子の軌跡を取得した。粒子の軌跡から 1 フレームごとガラスビーズの位置を特定する。デバイス内部の針状電極先端 (図 2 内の赤十字部分) を x, y 軸の原点として解析を行なった。フレーム前後 2 点間の移動距離と時間とからガラスビーズの速度・加速度を算出、算出した加速度とガラスビーズの質量を乗算することで電界中に働く斥力を決定した。また、複数のガラスビーズを同時にデバイス内に導入し捕集率を測定した。

3. 研究の成果

空気流量 3.0 L/min、粒子径 0.60 mm、粒子質量 0.23 mg、印加電圧 5 or 6 kV の条件で粒子 1 個を 20 回デバイス内に通過させ、粒子分離・捕集を実施した結果を図 3 と図 4 にそれぞれ示す。矢印の色が流速を表しており、赤い矢印が最も粒子

が早く移動したことを示している。印加電圧 5 kV では、針状電極直下にガラスビーズが侵入し捕集流路を通過する事例が複数回発生した。印加電圧 6 kV では、針状電極から上部の集塵極に向かう静電氣的斥力がより強く発生しており、ガラスビーズが通過するとき粒子は静電気斥力により集塵極側に加速していることが確認できた。

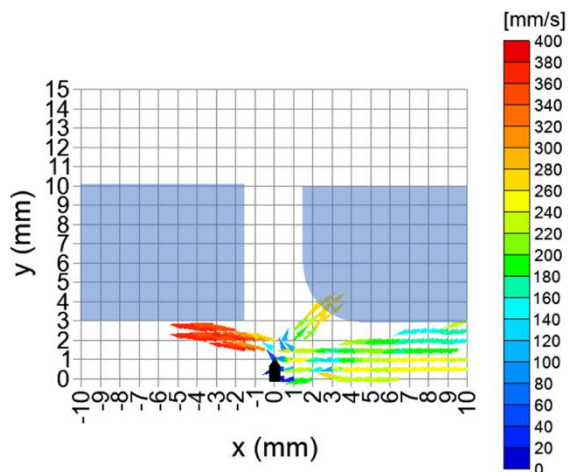


図3 空気流量 3.0 L/min、粒子径 0.60 mm、粒子質量 0.23 mg、印加電圧 5 kV

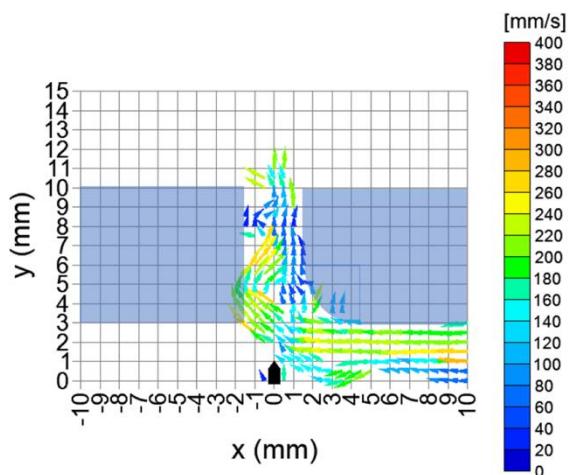


図4 空気流量 3.0 L/min、粒子径 0.60 mm、粒子質量 0.23 mg、印加電圧 6 kV

漏斗状の装置を作製し、デバイス内に 5、10、15 個のガラスビーズを連続的に導入し、捕集率を評

価した。実験結果より、ガラスビーズ数 5 個では平均回収率 62.0%、ガラスビーズ数 10 個では平均回収率 36.1%、ガラスビーズ数 15 個では平均回収率 46.7%となった(図 5 参照)。ガラスビーズ数が 10 個以上では、顕著に回収率が低下した。この要因としては、ガラスビーズが相互に阻害しあいイオン風や帯電の機会が満足に得られなかったためと考えている。

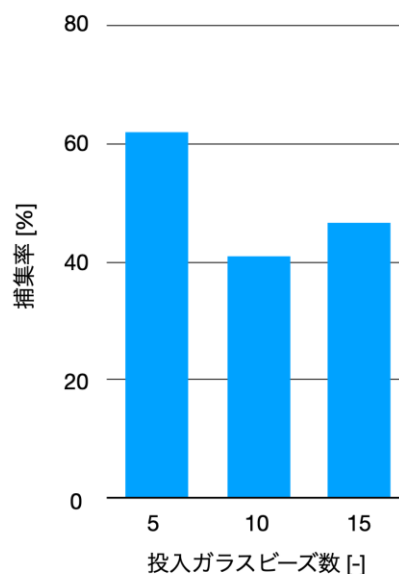


図5 導入ガラスビーズ数と捕集率の関係

4. 結び

実験結果より印加電圧 5 kV と 6 kV を比較すると、6 kV の方がガラスビーズに作用する斥力が大きくなることが判明した。結果として、ガラスビーズが捕集流路に誘導される率も高くなる。一方で、印加電圧を 7 kV 以上にした場合は絶縁破壊を生じ放電現象が生じた。そのため、現在のデバイス設計では印加電圧 6 kV が最適であった。当初の目的である静電氣的斥力を用いた微粒子分離・捕集技術の開発に成功した。静電氣的斥力を利用する技術とは異なるメカニズムのため、静電気力により電極部に一部の微粒子が固着する現象を回避することが可能である。また、同時に複数の微粒子を導入した場合でも連続的に捕集可能であることを実証した。

5. 今後の研究方向性・課題

今後の課題としては、複数の微粒子を導入した場合の捕集率の向上が急務である。静電的斥力の一層の向上を目指し印加電圧の向上も検討したい。また、静電的斥力がイオン風に起因するのか、帯電現象に起因するのかも不明確である。そこで、大きく分けて二つの研究方向性を模索する予定である。一つは、デバイスの小型化・最適化である。PM2.5に代表される粉塵を想定した場合、現在の流路は課題である。流路幅を1 mm以下に再設計、絶縁方法も見直すことで静電的斥力と印加電圧の向上を図る。二つ目は、静電的斥力の発生機序を明らかにしデバイスの設計指針を得ることである。PIVやピトー管を用いて静電的斥力を調査することを想定している。

6. 参考文献

- [1] Lorenz, M., Weber, A. P., Baune, M., Thöming, J. & Pesch, G. R., “Aerosol classification by dielectrophoresis: a theoretical study on spherical particles”, Sci Rep-uk., 2020, 10, 10617.
- [2] Pesch G., Du F., “A review of dielectrophoretic separation and classification of non-biological particles”, Electrophoresis., 2021, 42, 1-2.
- [3] 小林研斗, 古澤尚也, 脇坂嘉一, 中島崇仁, 箱田優, “マイクロ流路型誘電泳動分離装置を用いた iPS 細胞とフィーダー細胞の連続分離”, J. Inst. Electrostat. Jpn., 2017, 41, 1, 39-44
- [4] 城田長生, 吉田恵一郎, “グリッド構造電極

をもつ静電式マニピュレーションデバイスの基礎的評価”, 静電気学会講演論文集, 2022, 199-200

7. 論文・発表

【学会発表】

- [1] Ito Y, Suzuki K, Yoshida K. and Yokoyama S. Design of a Microfluidic Device for Microparticle Collection Through Electrostatic Attraction and Repulsion, The 27th International Conference on Miniaturized Systems for Chemistry and Life Sciences (MicroTAS 2023 Conference), M130.d, Katowice, Poland, Oct. 15-19, 2023
- [2] Yoshida K. and Shirota I. A Manipulation Device for Tiny Objects Using a Grid-Structure Electrode, International Workshop on Environment & Engineering (IWEE2023), Matsue, Japan, Jul. 25-28, 2023
- [3] 鈴木浩太, 吉田恵一郎. グリッド電極構造を用いた微小物体マニピュレーションにおける電極突起の効果, 令和5年電気学会関西連合大会, 11月25-26日, 2023

8. 謝辞

本研究の遂行にあたっては、一般財団法人向科学技術振興財団より多大なる資金援助を頂戴した。ここに深い感謝の意を表する。