

非接触微粒子分離技術の確立を目指した静電的斥力発生メカニズム解明と最適化

大阪工業大学工学部機械工学科*

横山 奨

1. はじめに

近年、マイクロプラスチックや PM2.5 といった微小粒子による環境汚染および健康被害が深刻な問題となっている。これらの粒子は、大気中に浮遊し、呼吸器系や循環器系の疾患を引き起こすリスクを高めるため、効率的な除去技術の開発が急務である。特に、気相中の微粒子は液相中と比較して拡散しやすく、空気流の影響を強く受けるため、その回収は技術的に困難を伴う。

現在主流の粒子回収技術には、フィルター方式、遠心分離方式、静電集塵方式などがあるが、それぞれに課題を抱えている。フィルター方式は目詰まりによる圧力損失の増大、遠心分離方式は微細粒子に対する回収効率の低さ、従来の静電集塵方式は捕集した粒子の再飛散といった問題が指摘されている。これらの課題を克服し、持続的かつ高効率な粒子回収を実現する新たな技術が求められている。

本研究は、先行研究で開発された静電的斥力を利用するマイクロ流体デバイスを基盤とし、その性能向上を目的とする。具体的には、以下の二つの最適化を通じて、気相中における微粒子回収率の向上を目指す。

非接触微粒子分離デバイスの物理的形状の最適化：粒子と電極の衝突を回避し、回収効率を高めるための流路設計を検討する。

印加電源の比較検討：静電的斥力を発生させる電源として直流（DC）と交流（AC）を用い、どちらが複数粒子の安定的な回収に適しているかを実験的に検証する。

2. 実験装置と方法

本研究で用いる微粒子回収の基本原理は、針型電極に高電圧を印加して放電現象を発生させ、これにより粒子を帯電させるとともにイオン風を生成し、静電的斥力（クーロン斥力）とイオン風の複合作用によって粒子を回収口へ誘導するものである。開発した非接触微粒子分離デバイスは、コンプレッサー、マスフローコントローラー（8500MC-Air-10, kofloc）、高電圧アンプ、ファンクションジェネレーター、そして微粒子挙動観察用の高速度カメラ（K7-USB, KATO-KOKEN）から構成されており、図 1 に示すような構成になっている。マスフローコントローラーで流量を精密に制御した空気をデバイスに供給し、高電圧アンプを用いて針電極に電圧を印加した。

本研究では、性能比較のために 3 種類のデバイス形状を設計・作製した。

1. 従来型デバイス（スロープなし）：先行研究に基づく設計で、針電極が流路内に露出
2. スロープ付きデバイス：針電極の手前に傾斜（スロープ）を設け、粒子が電極に直接衝突することなく乗り越えるよう誘導する改良設計
3. 電極埋め込みデバイス：針電極をデバイスの壁面内に完全に埋め込み、流路から物理

的に隔離することで粒子との接触を完全に防ぐ設計
 主要な実験条件は以下の通り統一した。

- 使用粒子：ガラス球（直径 0.60 mm, 質量 0.23 mg, BZ-06, 東京ガラス）
- 印加電圧：6.0 kV
- 電源：交流（1.0 kHz）または直流
- 流量：3.0 L/min（ただし、流路断面積が異なる場合は空塔速度が等しくなるよう調整）

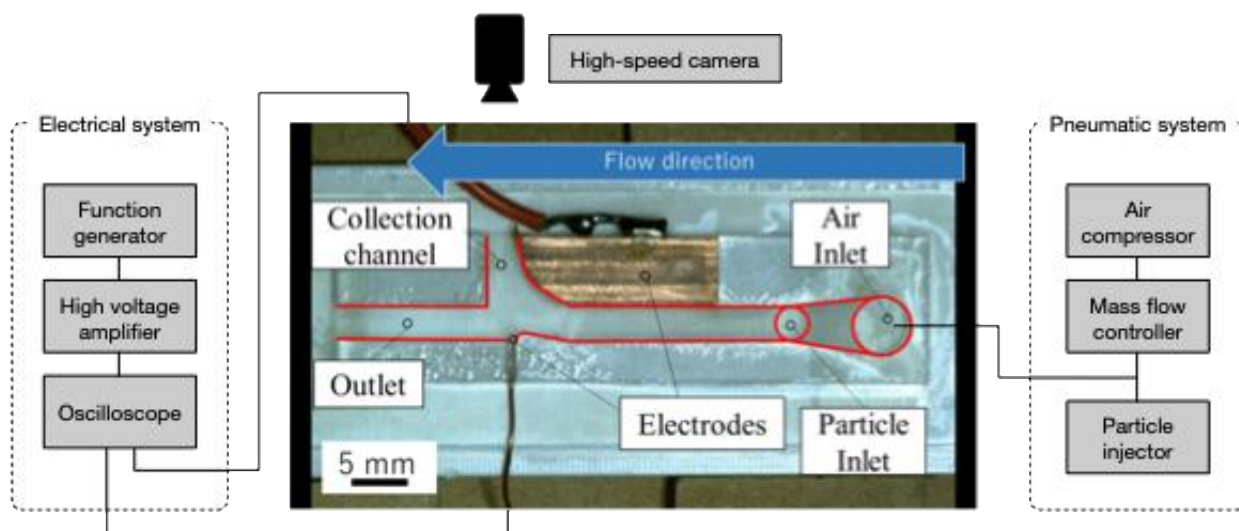


図 1. 非接触微粒子分離デバイスの構成

3. 実験結果と考察

3. 1. 非接触微粒子分離デバイス形状の最適化

針電極周囲のデバイス形状が複数粒子の回収率に与える影響を評価するため、3種類の形状（スロープなし、スロープあり、電極埋め込み）を試作した。針電極周囲の形状を図2に示す。これらデバイスに対して投入粒子数を変えて分離率を測定した。

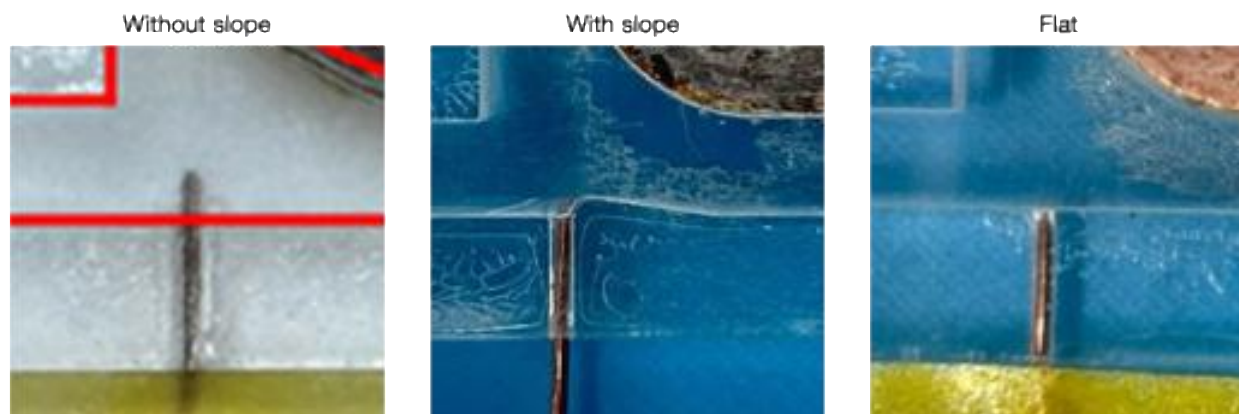


図 2. 本研究で検討した針電極周囲のデバイス形状

測定した分離率を Table 1 に示す。投入粒子数が 5 個、10 個、15 個のいずれの場合においても、スロープ付きデバイスが最も高い回収率を示した。特に粒子数が 5 個および 10 個の場合、従来のスロープなしデバイスと比較して回収率がそれぞれ 10.0%、22.9%と大幅に向上しており、スロープ構造が複数粒子の回収に極めて有効であることが確認された。

表 1. 針電極周囲のデバイス形状による分離率の変化

同時投入粒子数 [個]	スロープなし 分離率[%]	スロープあり 分離率[%]	埋め込み 分離率[%]
5	62.0	72.0	44.0
10	41.1	64.0	51.8
10	46.7	49.3	43.1

一方で、電極埋め込みデバイスは、当初の目的であった粒子と電極の物理的干渉の防止には成功したものの、回収率の向上には繋がらなかった。図 3 に示す速度分布図の解析から、このデバイスでは粒子が電極に衝突して減速する現象は見られなくなったが、同時に、流路下部を通過する粒子が回収口へ誘導されず、そのまま流れてしまう様子が観察された。これは、電極を壁内に埋め込んだことで、粒子が通過する空間への静電場の影響が弱まったためと考えられる。つまり、物理的な衝突を回避することに注力した結果、粒子を操作するための最も重要な要素である電場の有効性が損なわれるという設計上のトレードオフが明らかになった。この結果は、今後の設計において、電極の露出を抑えつつも、粒子流路に対して効果的な電場を形成する構造（例：コーティング電極や半埋め込み構造）の重要性を示唆している。

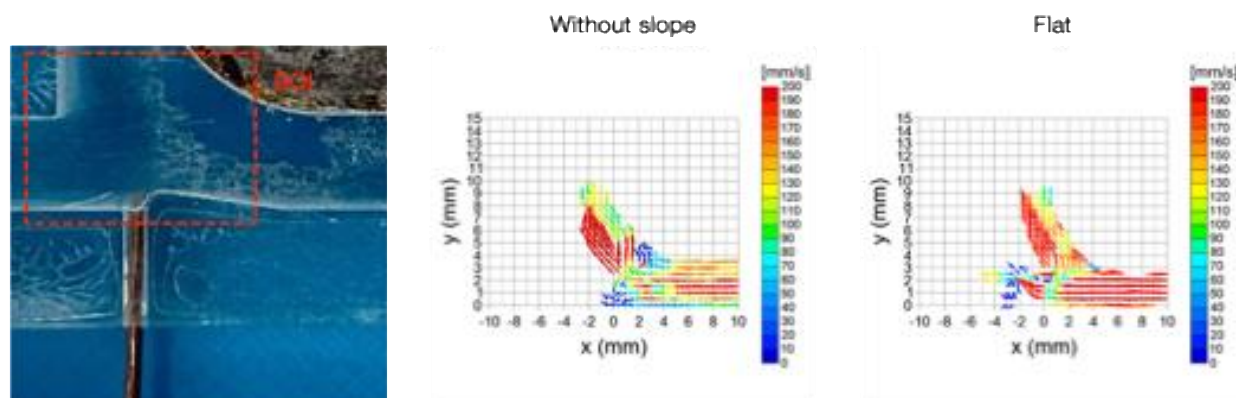


図 3. デバイス形状による微粒子速度分布図の変化

3. 2. デバイス形状の最適化

次に、最も性能の高かったスロープ付きデバイスを用いて、電源を直流とした場合と交流とした場合での粒子回収性能を比較した。Table 2 に、粒子を 5 個、10 個、15 個投入した際のそれぞれの回収率を示す。粒子 1 個の挙動を追跡した速度分布図を比較すると、直流電源の方が粒子をより高速に (150 mm/s 以上) 加速させており、交流電源 (70-120 mm/s)

よりも瞬間的な斥力が強いことが示唆されていたからである。通常、より強い斥力はより高い制御能力に繋がり、回収率も向上すると予測される。

表 2. 電流方式による分離率の変化

同時投入粒子数 [個]	交流電源 分離率[%]	直流電源 分離率[%]
5	62.0	72.0
10	41.1	64.0
10	46.7	49.3

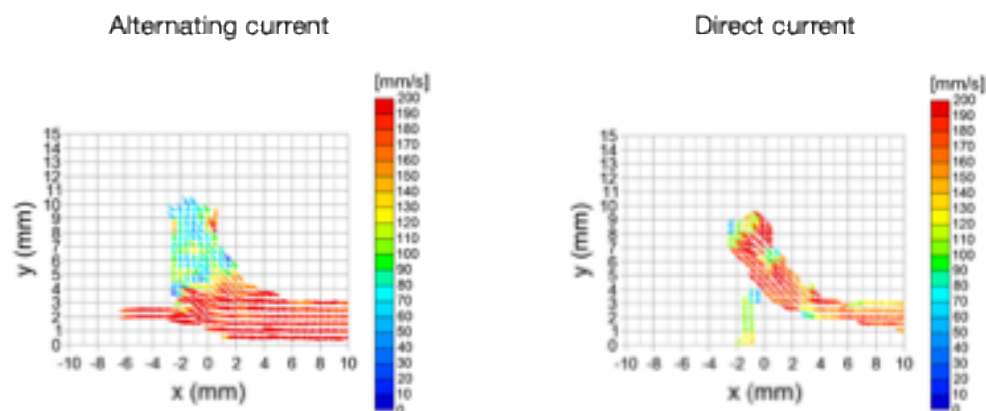


図 3. 電流方式による微粒子速度分布図の変化

しかし、複数粒子を投入した実験では逆の結果となった。この矛盾は、単一粒子と複数粒子とで静電場の安定性が異なることに起因すると考えられる。直流電源による強力で一定な電場は、単一の粒子に対しては効果的だが、複数の誘電体粒子が連続的に通過すると、電場が乱れたり、粒子への帯電が不安定になったりする可能性がある。特に、放電現象そのものが粒子の存在によって阻害され、安定したイオン風の形成が妨げられることが推測される。対照的に、交流電源は周期的に電圧が変動するため、瞬間的な力は直流電源に劣るものの、断続的な斥力を安定して供給し続けることができる。このパルス的な作用が、複数粒子による電場の乱れをリセットし、後続の粒子に対しても安定したイオン風と斥力を提供し続けることで、結果的に高い回収率を達成したと考えられる。このことから、本デバイスにおける回収効率は、斥力の絶対的な大きさよりも、複数粒子を扱う際の「放電現象の安定性」に強く依存することが示唆された。

4. まとめ

本研究では、気相中の微粒子を効率的に回収するための非接触型微粒子分離デバイスの性能最適化を目的として、デバイスの形状および印加電源の違いによる回収性能の影響を検討した。

デバイス形状の最適化に関しては、針電極の手前に傾斜構造（スロープ）を設けた「スロープ付きデバイス」が、粒子の電極衝突を回避しつつ、最も高い回収率を示した。一方で、電極を完全に壁面内に埋め込んだ構造は、粒子との物理的干渉を防げるものの、電場の影響が弱まり、回収性能の低下を招いた。この結果は、電極配置と電場形成のバランス設計の重要性を示唆するものであった。

次に、印加電源方式の最適化においては、単一粒子の回収では直流電源が優位であったが、複数粒子を扱う場合には交流電源の方が高い回収率を示した。これは、交流電源による周期的な電場変動が放電現象を安定させ、複数粒子による電場の乱れを緩和するためと考えられる。

以上の結果から、非接触型微粒子分離デバイスにおいては、スロープ構造の導入と交流電源の併用が、気相中の複数粒子の安定かつ高効率な回収に最も有効であることが明らかとなった。

謝辞

本研究を遂行するにあたり、公益財団法人天野工業技術研究所から多大なご支援を頂きました。ここに記して謝意を示します。

参考文献

- 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