

令和 5 年 6 月 16 日現在

機関番号：82626
研究種目：研究活動スタート支援
研究期間：2020～2022
課題番号：20K22422
研究課題名（和文）MEMSマイクロポンプを用いた選択粒子径可変分級器の開発と小型検出装置への応用

研究課題名（英文）Development of a Selective Particle Size Variable Classifier Using a MEMS Micropump for a Compact Detection Device

研究代表者
岡本 有貴（Okamoto, Yuki）
国立研究開発法人産業技術総合研究所・エレクトロニクス・製造領域・研究員

研究者番号：40880753
交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 2,200,000円

研究成果の概要（和文）：本研究の目的は、幅広い径の微粒子に対して用いることができる微粒子検出装置をキーホルダーほどの大きさで実現することである。提案する素子に必要な超小型MEMSマイクロポンプをPZT圧電ダイアフラムアクチュエータを利用して実現することに成功した。また、提案する構造の実現には流量を計測することが必要となるため、別途数百nL/minの微小流量が計測できるマイクロ流路に埋め込むことが可能な流量センサを開発した。また、散乱光計測ではフローセル中の粒子の形状差を検出することができ、以上これらのことから提案構造実現のための要素技術を網羅的に実現することができた。

研究成果の学術的意義や社会的意義

従来のMEMSマイクロポンプは小型のものでも数cm四方のものがほとんどで、mmオーダーの小型のものは実現されてこなかった。本研究では圧電ダイアフラムアクチュエータとSU-8とPDMSによる樹脂接合技術を用いて小型化に成功し、世界最小クラスのマイクロポンプ構造や高精度流量センサを実現できた。これらは小型化が重要なIoT機器・医療機器での応用が期待できる。

研究成果の概要（英文）：The purpose of this study is to realize a particle detection device that can be used for a wide size range of particles and is the size of a key ring. We have successfully realized an ultra-compact MEMS micropump, which is necessary for the proposed device, using a PZT piezoelectric diaphragm actuator. Besides, as the principle of the proposed structure, the precise flow rate measurement is required. Therefore, we also developed a flow sensor that can be embedded in a microfluidic channel capable of measuring micro flow rates of several hundred nL/min. In addition, We performed the scattered light measurement and detected the shape difference of particles in the flow cell.

研究分野：MEMS

キーワード：MEMSマイクロポンプ 圧電ダイアフラム 流量センサ

1. 研究開始当初の背景

微粒子計測は、液中のマイクロプラスチック、流体中の花粉やPM2.5のような有害粒子を検出する上で重要な課題となっている。特に、個人が浴びる微粒子量を検出するためには、数cm四方の違和感なく持ち歩ける小型微粒子検出装置の実現が重要である。微粒子検出が簡単に行えれば、アレルギー持ちの人が浴びた微粒子量を自己管理するといったことも可能である。また、モノのインターネット(IoT)技術などと組み合わせることで、大規模な空気状態マップの構築も行える。これにより、例えば微粒子量に応じた機器制御などができ、品質管理や省エネルギー化にもつながる。微粒子検出は、(1) 流体の引き込み、(2) 計測対象の粒子の仕分け(分級)、(3) 粒子のセンシングの3つから構成される。

しかし、これら3つの部分を既存の機械部品要素を組み合わせると素子の小型化には限界が生じてしまう。そこで、更なる小型化の観点から、シリコンやガラス製の微細流路構造内の流体を流し分析するマイクロ流路技術を応用した研究が注目を集めている。微細流路でも構造の工夫で実現できるという利点から、微粒子の粒径による仕分けを行う分級器では、粒子の慣性力を用いて分級を行うバーチャルインパクトと呼ばれる機構が特に注目されている。これは、粒子を含んだ流体が流れる流路に分岐を設け、流れによって仮想的に与える力で小径の粒子のみを分岐側に仕分ける(分級する)仕組みである。しかしながら、これまでの研究ではバーチャルインパクトの粒子選択性向上に着目した研究がほとんどで、数種類の粒子径を分類しようとする場合バーチャルインパクトを多段に接続する必要があり、素子の小型化を阻んでいた。つまり、選択する粒子径を自在に変化させられる可変バーチャルインパクトが、小型微粒子検出器の実現には不可欠であった。

2. 研究の目的

本研究の目的は、幅広い径の微粒子に対して用いることができる微粒子検出装置をキーホルダーほどの大きさで実現することである。また、そのために、選択粒子径を制御できるバーチャルインパクト分級器を流体引き込み機構の集積によって実現する。従来から小型バーチャルインパクトの研究は広く行われていたが、分級器自体やセンサ素子との集積についての研究は行われていなかった。そのため、複数の粒子径を選択するには、選択粒子径の異なる複数のバーチャルインパクトを直列に接続して行う必要があった。本研究では、流速に着目して単体のバーチャルインパクトの複数の選択粒子径を制御する点が独創的である。従来の分級器において流速を制御することは、流体吸込みに用いる外付けの機械式ポンプの流速変更にかかることから現実的ではない。そこで、本研究ではMEMSマイクロポンプを用いることでその高速応答性を利用し、流速制御を実現する。また、従来の研究では外付けの機械式ポンプや直列接続した複数のバーチャルインパクトを要しており、小型化を阻む要因となっていた。一方で、本研究はポータブル微粒子検出器を念頭に置き、流体引き込み機構・分級器を一体化した更なる小型化を考えている。以上要するに、本研究は、MEMSマイクロポンプを用いて、従来実現できていなかった分級器の選択粒子径の制御と装置小型化に取り組む点において独創的であり、自らのMEMSアクチュエータ及びLSIの研究基盤を基づくことから独自の取組と位置付けられる。

3. 研究の方法

本研究は、(1) MEMSマイクロポンプを用いた分級器の選択枝粒子径の動的制御 (2) 散乱光計測による粒子検出の2項目で構成される。

「MEMSマイクロポンプを用いた分級器の選択枝粒子径の動的制御」

圧電薄膜ダイアフラムMEMSマイクロポンプを集積した素子を開発し、MEMSマイクロポンプを用いてバーチャルインパクト分級器の選択粒子径の閾値を制御する。圧電薄膜ダイアフラムMEMSマイクロポンプは、圧電薄膜の振動により流体を押し出し駆動するポンプである。流量が数mL/minと他のポンプ機構と比べ流量が大きく、流体吸込み機構として小型化・集積化に適している。また、圧電薄膜に入力する電圧の周波数を変えることで流れる流速を制御することができるので、流速の制御が容易である。バーチャルインパクトの選択粒子径は、流れ入る流体の流速が速くなるほど小

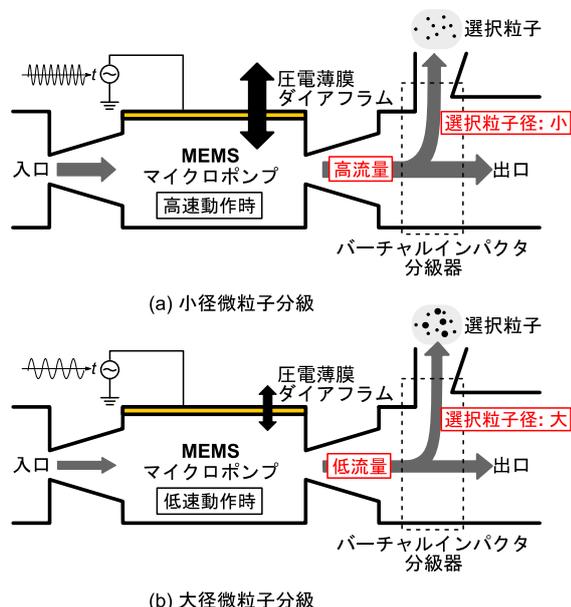


図1: 本研究で提案する構造

さくなるため、マイクロポンプの入力周波数に応じて選択粒径を制御することが可能となる。開発したデバイスのマイクロポンプで流速の制御ができていることを、流量計を用いて確認する。

「散乱光計測による粒子検出」

外部からレーザー光を照射し微粒子による散乱光を計測することで流体中の微粒子量検出を行う。マイクロポンプの流量を変化させ、粒径の小さい微粒子から順に検出を行っていくことで、検出が行えることを示し、幅広い粒径の微粒子の検出が行えることを明らかにする。

4. 研究成果「MEMS マイクロポンプの開発」

初めに、提案する可変分級器に必要な圧電薄膜ダイアフラム MEMS マイクロポンプの開発を行った。本研究では、機械構造が少ないことから液中動作でも故障が少ないバルブレスマイクロポンプを検討した。バルブレスマイクロポンプは、図2のようにディヒューザ構造によって流れの方向で流量を変えることでポンプとして動作するポンプである。本研究では、数 cm 四方の素子実現のために小型のマイクロポンプを実現する必要がある。

まず、PZT 薄膜を SOI 基板上に成膜し MEMS 加工をすることで、マイクロポンプに必要なダイアフラムアクチュエータの動作を確認した(図3)。マイクロポンプとして動作させるためにはシリコン基板の上のダイアフラムアクチュエータを封止し、流路を形成する必要がある。そこで、永久効果エポキシ樹脂レジスト(SU-8)とシリコン樹脂(PDMS)を利用した接合を利用し、流路構造を構築すると同時にダイアフラムアクチュエータを封止することに成功した。図4に、圧電ダイアフラムを動作させた時の変位動作を示す。

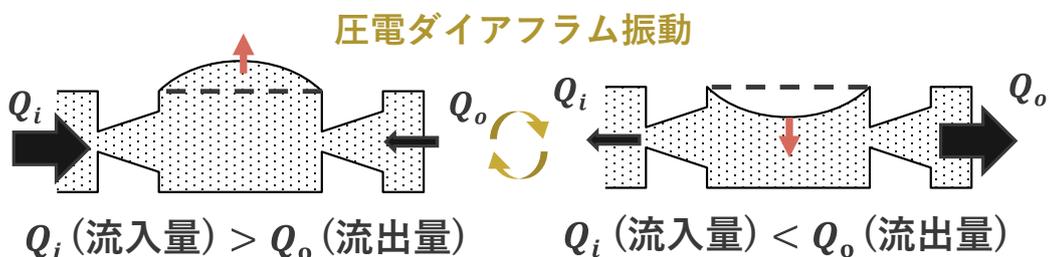


図2: 圧電ダイアフラムによるバルブレスマイクロポンプ動作

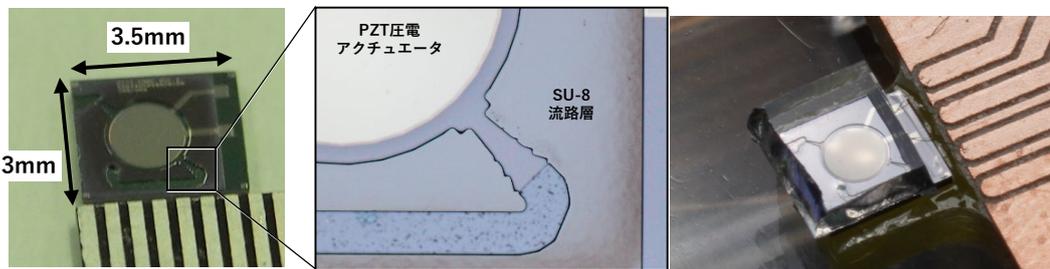


図3: SU-8, PDMS 封止技術で接合封止したマイクロポンプ構造

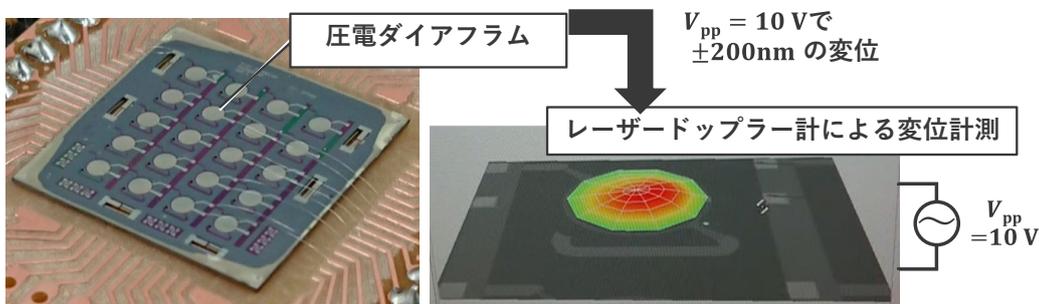


図4: レーザードップラー振動計で計測した圧電ダイアフラムの動作。

「流量センサの開発」

本研究では、流量を制御することで分級器の閾値を変化させることを目標としている。そのため、しかしながら、マイクロポンプの脈流が大きく、流量を正確に計測するにはマイクロ流路内

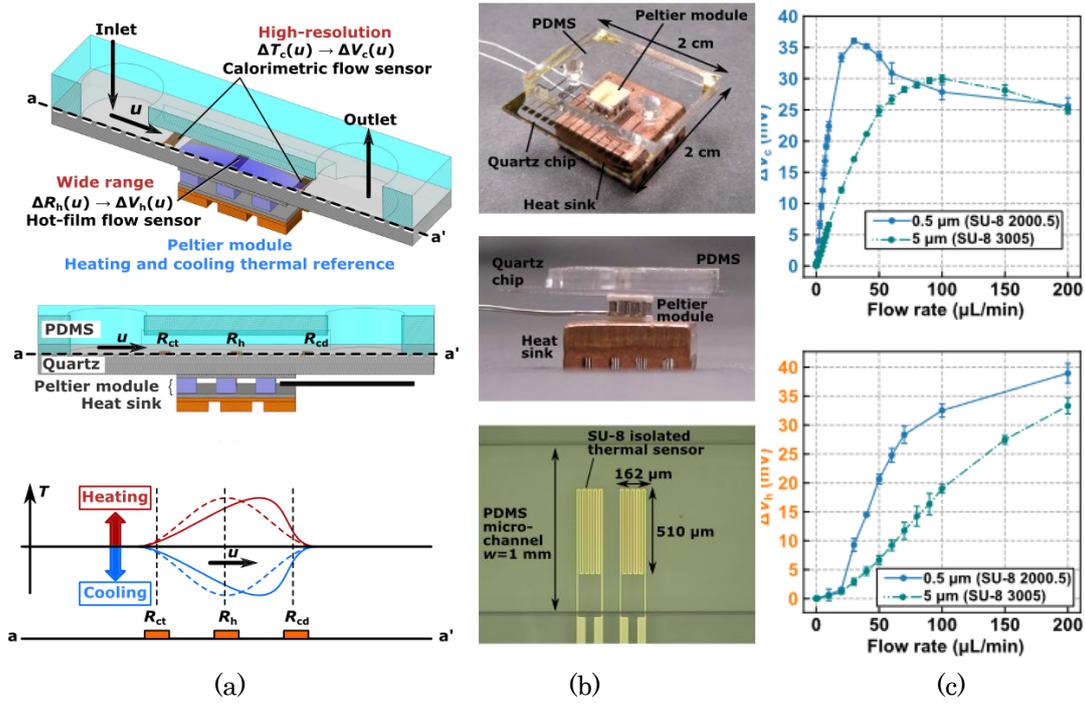


図 5 (a) 流量センサの概念図。(b) 作製した流量センサ。(c) 流量計測結果。

に流量センサを埋め込み計測する必要があることが実験を進めるにつれ分かってきた。そこで、本研究では、流量センサの開発も行った。開発する流量センサとしては、熱式流量センサの採用を考えた。熱式流量センサは他の方式と比較して精度に優れており、マイクロ流路中を流れる液体の流量を計測する上で主要な手法となっている。しかしながら、従来の $\mu\text{L}/\text{min}$ オーダーの熱式流量センサは加熱式が主であり、使用できる流体に制限があった。そこで、温度参照部にペルチェ素子を用いることで電圧の向きの制御により冷却式・加熱式の熱参照源を実現し、いずれの手法も実現できる流量センサを開発した。図に、作製した流量センサの概念図を示す。また、図に、実際に作製した流量センサを示す。熱式センサとして 2 方式導入することで、広い流量範囲で計測を行うことに成功した。流量が大きくなると Calorimetric 型センサでは温度差が小さくなってしまいが、図 7 のように低流量のときは温度差が高精度に取得できることが分かる。一方、Hot-film 型センサの場合、低流量のときはほとんど温度差が生じないため計測が難しいが、高流量のときも流量に応じた出力があることが分かる。

「散乱光計測による粒子検出」

散乱光計測による粒子検出を行うために、別途フローセルを作製し散乱光の計測を行った。図 6(a) に作製したフローセルを示す。フローセルは ZnSe で作製し、中赤外光により計測した。ま

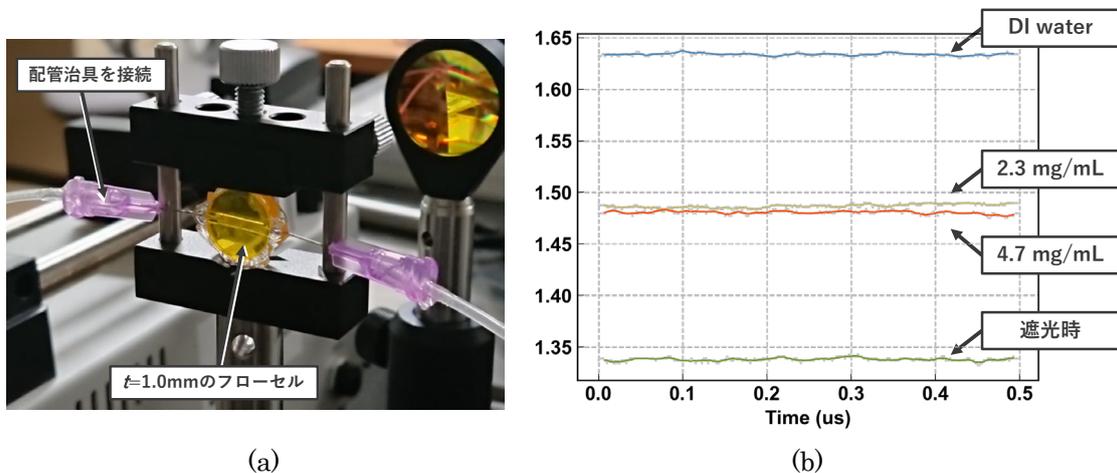


図 6: (a) 散乱光計測用セル。(b) 粒径 $50 \mu\text{m}$ のマイクロビーズを $2.3 \text{ mg}/\text{mL}$ 含む溶液と $4.7 \text{ mg}/\text{mL}$ 含む溶液をそれぞれフローセルに注入した場合の透過光強度の変化と遮光時、純水注入時の比較。

た、試作したフローセルを用いて透過光計測の試験を行った。光源としては波長 7~10 μm の光を含むランプ光源を用い、ディテクタには波長 2~12 μm の範囲に感度があり、9 μm に感度のピークがある光電変換素子を用いた。フローセルを透過した光はディテクタに照射され、その出力電圧をオシロスコープにより計測した。粒子としては、Thermo Scientific 社製の粒径 50 μm COOH 基付ポリスチレンマイクロビーズを用い、フローセルにシリンジポンプを用いてビーズ濃度 4.2 mg/mL の溶液と、2.3 mg/mL の溶液をフローセルに注入し、それぞれの場合のディテクタの電圧を計測した。いずれの場合もフローセル中が溶液で満たされたのを確認した後は溶液を静止させて計測した。図 6(b) に、遮光時、純水、ビーズ濃度 4.2 mg/mL の溶液、2.3 mg/mL の溶液を注入した場合の電圧を示す。ビーズを含む溶液の場合は、純水に比べて透過光強度が低くなっていることがわかる。さらに、ビーズ濃度が濃い場合の方が透過光強度が低くなっていることから、散乱光計測が行えることが分かった。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計1件（うち査読付論文 0件／うち国際共著 0件／うちオープンアクセス 0件）

1. 著者名 Okamoto Yuki, Nguyen Thanh-Vinh, Okada Hironao, Ichiki Masaaki	4. 巻 31
2. 論文標題 Thermal Flow Sensor With a Bidirectional Thermal Reference	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Journal of Microelectromechanical Systems	6. 最初と最後の頁 830 ~ 839
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1109/JMEMS.2022.3195169	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

〔学会発表〕 計4件（うち招待講演 0件／うち国際学会 3件）

1. 発表者名 Yuki Okamoto, Yusuke Takei, Thanh-Vinh Nguyen, Shinya Kano, Takeshi Kobayashi, Masaaki Ichiki
2. 発表標題 Pattern Reconfigurable Ultrasonic Sound Source Using Laser-Induced Graphene Interdigitated Electrodes
3. 学会等名 2022 IEEE 35th International Conference on Micro Electro Mechanical Systems Conference (MEMS) (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Yuki Okamoto, Thanh-Vinh Nguyen, Hironao Okada, Masaaki Ichiki
2. 発表標題 Via-Less Two-Axis Electromagnetic Scanner Using An Asymmetric Frame On A One-Axis Lateral Magnetic Field
3. 学会等名 2022 IEEE 35th International Conference on Micro Electro Mechanical Systems Conference (MEMS) (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 岡本 有貴、グエン タンヴィン、岡田 浩尚、一木 正聡
2. 発表標題 冷却型熱式オンチップ流量センサ
3. 学会等名 第38回「センサ・マイクロマシンと応用システム」シンポジウム
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Okamoto Yuki、Nguyen Thanh-Vinh、Okada Hironao、Ichiki Masaaki
2. 発表標題 On-Chip Cooling Thermal Flow Sensor for Biological Applications
3. 学会等名 2021 IEEE 34th International Conference on Micro Electro Mechanical Systems (MEMS) (国際学会)
4. 発表年 2021年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
---------------------------	-----------------------	----

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------