

科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成 25 年 4 月 19 日現在

機関番号：34315

研究種目：基盤研究（C）

研究期間：2010～2012

課題番号：22510127

研究課題名（和文） マイクロ分析装置の省エネ化，効率化，小型化のための多機能マイクロポンプの開発研究

研究課題名（英文） Study on multifunctional micropump to save energy, increase efficiency, and reduce size of microanalysis equipment

研究代表者

大上 芳文（OGAMI YOSHIFUMI）立命館大学・理工学部・教授

研究者番号：30203722

研究成果の概要（和文）：

本研究は『マイクロ分析装置の省エネ化，効率化，小型化のための多機能マイクロポンプの開発研究』であり，具体的な機能を備えた素子として，角速度センサー，加速度センサー，攪拌素子の設計を数値流体力学による数値シミュレーションによって行ない，その効率の向上を図るとともに，工学的特性を明らかにした．特に角速度センサーと加速度センサーは 3 軸方向の成分を同時に計測が可能となるように設計した．

研究成果の概要（英文）：

This project studied multifunctional micropumps that were designed to save energy, increase efficiency, and reduce the size of microanalysis equipment. The pump functions considered here were those of the angular velocity sensor, acceleration sensor, and microstirrer. Simulations based on computational fluid dynamics were used to examine the engineering characteristics of the multifunctional micropumps to increase the efficiency of each function. The angular velocity sensor and acceleration sensor were designed to measure the three components in the x, y, and z directions simultaneously.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2010 年度	700,000	210,000	910,000
2011 年度	1,200,000	360,000	1,560,000
2012 年度	900,000	270,000	1,170,000
総計	2,800,000	840,000	3,640,000

研究分野：複合新領域

科研費の分科・細目：ナノ・マイクロ科学・マイクロ・ナノデバイス

キーワード：マイクロメカニクス，ナノマイクロセンサー，数値流体力学，マイクロポンプ，加速度センサー，攪拌装置，MEMS

1. 研究開始当初の背景

申請者らのマイクロポンプの研究 マイクロ分析装置で用いられるポンプの動作法には，電磁力などを用いる方法，弁などの運動を利用する方法がある．最近注目されている

のは弁を用いないポンプである．これは流路内のノズルに流体が出入りする際の流体抵抗の差を利用する方法である（ノズル拡散方式．Schabmueller et al, 2002）．申請者ら

はノズル拡散方式を研究対象とし、従来の十倍以上の流量を達成している。これは図1に示すように、平面内に左右対称の流路が設置された簡単な構造で、流体抵抗が小さい。その結果、高流量を実現した。

申請者らのマイクロミキサーの研究 微小環境下では流体粘性が相対的に大きくなり、試薬の混合が起きないと言う問題がある。そこで、流路形状を工夫する、流体に何らかの力を与える、ローターなどを用いて混合するなどの方法が研究されている。申請者らは入口が二つ、出口が一つの流路内で、ローターによって流体混合を行う研究を続けている(図2)。その結果、流体の三次元的なカオス流れが混合に重要であることを解明し、その原理を利用し従来よりも混合効果の大きい装置を開発した。

多機能マイクロポンプへの発展的研究 申請者らが開発した高流量マイクロポンプ(図1)は入口が二つ、出口が一つであり、二種類の試薬の混合に適した構造であるために、

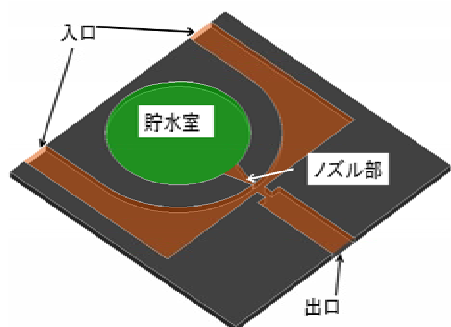


図1 貯水室上の隔膜の振動で動作する

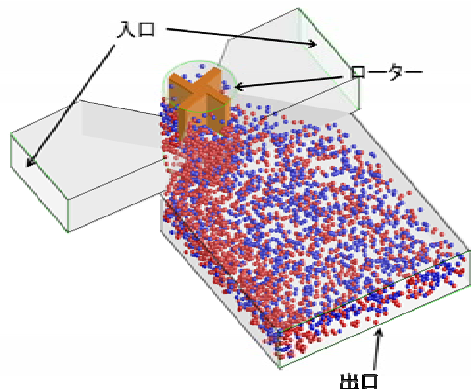


図2 ローターによってカオス的な流れが誘起

ノズル部に混合促進の装置を設置することで、ミキサーと一体化した多機能マイクロポンプの開発が可能である。さらに、本マイクロポンプを同心円に並べることで、加速度センサーに用いられる噴流を生み出すことができる。すでにその原理を米国機械学会誌(ASME)に報告しているが、本研究ではさらなる省エネ化、効率化、小型化を図る。数年後には、これらの多機能マイクロポンプを加速度センサーやマイクロクーラー、マイクロタービンの燃料噴射装置に応用することを計画しているが、まず本研究では多機能マイクロポンプについて基礎的研究を行う。

2. 研究の目的

申請者らが開発した高流量マイクロポンプには様々な機能を付加できるが、ここでは a) マイクロポンプ+ミキサー、および b) マイクロポンプ+ジェット噴流を研究対象とする。これは、付加される機能が異なっても、大部分が同様の方法で解析、設計できるからである。また、数年後には加速度センサーやマイクロクーラーへの応用や、両装置を合体させ、マイクロタービンの燃料の混合・噴射装置への応用も計画しているからであり、まず本研究ではそれぞれの多機能マイクロポンプについて基礎的研究を行う。

単に二つのものを組み合わせれば良いのではなく、設計段階から有機的に結合され、その結果、マイクロ分析装置の省エネ化、効率化、小型化が実現されなければならない。そのために必要な諸元を明らかにすることを研究目的とする。具体的には以下のようなものである。

(1) 電磁力の解析と最適な隔膜部の設計 (a, b) (a はマイクロポンプ+ミキサー, b はマイクロポンプ+ジェット噴流を表す) 貯水室上の隔膜は、そこに付着された永久磁石と、その上方にある電磁石の引力と斥力によって振動する(次ページ図3)。隔膜にどのような力の分布が発生し、変形、振幅運動が生じるのか、さらにそれによってどのような

流体の脈動が生じるのかを計算機による解析で明らかにする。その結果、低電力で高流量となるための隔膜部の設計条件を見出す。

(2) 流路形状の最適化(a, b) 次に流路全体を計算機の解析対象とし、流れを解析する。流体抵抗や運動エネルギー損失がどのように発生し、それをどのように押さえるのかを明らかにし、流体抵抗のより小さくなる最適な流路設計を行う。

(3) 混合率の最適化(a) 試薬の混合を促進するために、流路のノズル部にカオス的な流れ（壁乱流とも言う）を生じさせる加工を行う。すなわち、段差を設ける、拡散板を設置などを行う。計算機を用いた解析により、二種類の試薬の混合率を計算し、混合率がより大きくなる最適な混合促進装置の条件を明らかにする。

(4) 噴流速度、速度分布の最適化(b) 加速度センサーに用いる噴流は、広がりのない直進性の良いことが重要である。逆に燃料噴射に用いる噴流は、広い空間に広がる方が良い。このように噴流広がり方を制御するための条件を明らかにする。

(5) 実機の製作(a, b) 上記の設計条件を用いて多機能マイクロポンプを製作する。

(6) 実験的検証(a, b) 実験を行いその機能を検証する。測定データを設計プロセスにフィードバックし、より省エネ化、効率化、小型化を目指す。

3. 研究の方法

研究目的 1 「電磁力の解析と最適な隔膜部の設計」は研究分担者：Thien X Dinh と大学院生 2 名体制で行う。図 3 に示すように高流量マイクロポンプは、平面内に左右対称の流路が設置された簡単な構造である（一辺が数ミリから数センチ程度）。中央の貯水室の天井に隔膜が貼られており、それに永久磁石がついている。上方に電磁石が設置されており、これらの相互作用により隔膜が上下振動する。この運動により貯水室の流体が前方の首部から流入、流出する。流入時の流体抵抗は流出時のものより大きくなるように設計さ

れているため、結果的に流体が出口から流出することになる。このポンプ作用を解析対象とし、電磁界解析ソフトを用いて、隔膜にどのような力の分布が発生し、どのように変形、振幅運動が生じるのかを明らかにすることで低電力で高流量となるための隔膜部の設計条件を算出する。この隔膜の運動を研究目的 2 の解析の境界条件として用いる。

研究目的 2 「流路形状の最適化」を行う。上述のように図 3 が高流量マイクロポンプの模式図である。熱流体解析ソフトを用いて、隔膜の振動を取り入れたシミュレーションを行い、流路の圧力分布や速度分布を計算し、流体抵抗やエネルギー損失の起こりにくい設計条件を見出す。すでに開発している装置よりも、低電力で高流量となるための設計条件を明らかにする。計算結果を研究目的 1 にフィードバックし、より高流量となる隔膜の運動を得るための条件を算出する（研究代表者：大上芳文と大学院生 1 名）。

図 4 は噴流発生装置の模式図である。マイクロポンプを 4 つ並べた構造になっている。隔膜の振動により、中心にある貯水室の流体が流路に排出され、円周部の流路を通して噴流室に流入し、噴流を生み出す。これは閉じた構造になっている。上述の場合と同様に、流路の圧力分布や速度分布を計算し、流体抵抗やエネルギー損失の起こりにくい設計条件を算出する。（分担者：Thien X Dinh と大学院生 1 名）。このように、流体抵抗のより小さくなる最適な流路設計を行う。

研究目的 1 の隔膜の変形の解析結果が思わしくなく、境界条件として使うことに無理が生じる場合には、適宜、人工的に作った調和振動などを隔膜の運動条件として与えることとする。この手法で理想的な隔膜の動きが得られる場合には、目的 1 にフィードバックし、実際にこのような運動を得るための電磁力の与え方を明らかにする。

研究目的 3, 4 「混合率の最適化（代表者：大上芳文と大学院生 1 名）」と「噴流速度、速度分布の最適化（分担者：Thien X Dinh と大学院生 1 名）」を行う。前者では試薬の混

合を促進するために、流路のノズル部にカオス的な流れを生じさせる加工を行う。つまり、段差を設ける、拡散板を設置するなどを行う。流路形状や混合部の形状を様々に変えて二種類の試薬の混合率を計算し、混合率がより大きくなる最適な混合促進装置の条件を明らかにする。

後者では、加速度センサーに利用する場合は、噴流ができるだけ広がらず直進することが望ましい。逆に燃料噴射装置の場合は、空間に広がった方がよい。そのような噴流を発生させるための条件を明らかにする。具体的には流路形状や振動パターン、流速分布を様々に変えて解析を行い、噴流広がり方を制御するための条件を明らかにする。

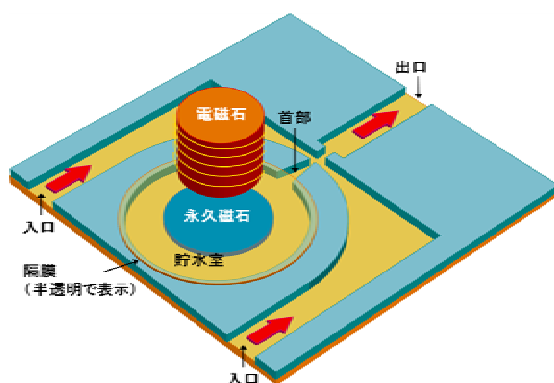


図3 高流量マイクロポンプの模式図

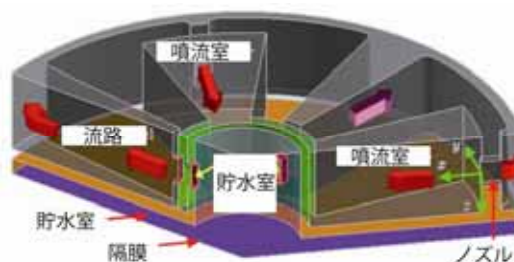


図4 噴流発生装置の模式図 マイクロポンプを4つ並べた構造になっている。隔膜の振動により、中心にある貯水室の流体が流路に排出され、円周部の流路を通って噴流室に流入し、噴流を生み出す。これは閉じた構造になっている。噴流室を一つにまとめれば、燃料の噴出装置に転用できる。

4. 研究成果

本研究は『マイクロ分析装置の省エネ化、効率化、小型化のための多機能マイクロポン

プの開発研究』であり、具体的な機能を備えた素子として、角速度センサー、加速度センサー、攪拌素子の設計を数値流体力学による数値シミュレーションによって行ない、その効率の向上を図るとともに、工学的特性を明らかにした。特に角速度センサーと加速度センサーは3軸方向の加速度を同時に計測が可能となるように設計した。噴流型角速度センサーの設計

piezo素子の振動を利用し噴流を生じさせることの出来るマイクロポンプを設計し、従来の10倍以上の流量を達成することができた。さらに、このポンプが加速度運動を行う物体に設置されているとき、噴流の状態が変化する様子を検知することで、物体の角速度を算出する噴流型角速度センサーの設計を行った。

これはx, y, zの3軸の角速度の同時検知が可能となるように設計を行った。また、噴流が出る流路の形状を2つ用意し(流路がやや広い: Type 1, やや狭い: Type 2), それぞれについての特性調査を行った。噴流を作るためのpiezo素子の振動数を変化させ、最適な値が存在することを明らかにし、その値を算出した。Y軸周りとZ軸周りの加速度に対するセンサーの感度はType 2の方が良いことが明らかとなった。しかし、両加速度の干渉による誤差出力も大きいことが明らかとなった。

一方、電磁力、流体力、隔膜の変形に要する力を考慮し、計算機によるシミュレーションを行ない、供給する電磁力、すなわち必要電力との関係も明らかにし、省エネ化の基礎データ得ることが出来た。

マイクロ攪拌素子の設計

流路内にマイクロ回転体を置き、光ピンセット技術などで回転させることを想定した攪拌素子の設計を行った。従来の2次元的な素子とは異なり、3次元的な流れが生じるような設計にしたため、従来よりも1.5倍程度の攪拌率を得ることが出来た。さらに、隔膜振動ポンプ内の攪拌促進用の突起物をつけ

ること、前者と同様の攪拌性能を持ったより簡便な形状のポンプが設計でき、本ポンプの多機能化の可能性が広がった。

熱検知型加速度センサーの設計

ヒーターを用いて熱塊を作り、その動きを検知する(すなわち、温度変化を検知する)手法によっても、3軸方向の角速度の測定が可能となることを明らかにした。これは従来の手法よりも高性能であることを示し、特許の申請を行った。

熱感知型加速度計の数値シミュレーションにおいては、与える加速度のベクトルの大きさの組み合わせの数を増やし、シミュレーションを行い、出力のデータを収集した。加速度の大きさを昨年度の10倍の200Gまで増やし、センサーとしての感度、精度、干渉度を明らかにした。

加速度に単振動を与えることで、センサーとしての応答性や追従性の解析も行った。実際にセンサーとして機能させるために、適宜、出力値を設定し、与えられた加速度を正確に逆計算する手法も構築した。

動作流体として空気以外の気体(ヘリウム)を用いてシミュレーションを行い、熱力学的な相似性の解析を行い、気体の物性値とセンサーの設計に関する考察も行った。

以上のように『マイクロ分析装置の省エネ化、効率化、小型化のための多機能マイクロポンプ』に用いることの出来る多機能素子の研究開発を行った。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文](計5件)

Thien X. Dinh, Y Ogami, Design and Simulation of MEMS-based Dual-axis Fluidic Angular Velocity Sensor, Sensor and Actuator A, 査読有, 189-15, 2013, 61-66.

Thien X. Dinh, Y Ogami, A Dynamic Model

of Valveless Micropumps With a Fluid Damping Effect, J. Micromech. Microeng., 査読有, 21-11, 2011, 1-5, DOI:10.1088/0960-1317/21/2/025015

Thien X. Dinh, Y Ogami, An Integrated Pumping and Mixing Device, JSME J. Fluids Science and Technology, 査読有, 6-6, 2011, 949-961, DOI: 10.1299/jfst.6.949

Thien X. Dinh, Y Ogami, Mixing Enhancement by Microrotor in Step Channel, Trans. ASME, J. Fluids Eng., 査読有, 133-2, 2011, 21101-1-21101-6

Thien X. Dinh, Nghia M. Le, Van T. Dau, Y. Ogami, Dynamic Model for Studying Valveless Electromagnetic Micropumps, J. Micromech. Microeng., 査読有, 21-2, 2011, 1-7, DOI:10.1088/0960-1317/21/2/025015

[学会発表](計11件)

発表者名: 長谷川 祐希, Thien X. Dinh, 大上芳文, 発表表題: MEMS 熱検知型 3軸加速度センサーに加速度や振動を与えて、3軸でのセンサーの感度と応答性を数値シミュレーションで解析する研究, 学会名等: 日本機械学会 関西学生会平成 24 年度学生員卒業研究発表講演会, 発表年月日: 2013 年 3 月 15 日, 発表場所: 大阪工業大学(大阪府)

発表者名: Thien X. Dinh, Y. Ogami, 発表表題: Design of a Triple-Axis MEMS Based Fluidic Gyroscope, 学会名等: IEEE Sensor, 発表年月日: 2012 年 10 月 30 日, 発表場所: 台北(台湾)

発表者名: Thien X. Dinh, Y. Ogami, 発表表題: A Realizable MEMS-Based Triple-Axis Fluidic Gyroscope Sensor, 学会名等: 9th Int. Conf. Flow Dynamics, 発表年月日: 2012 年 9 月 19 日, 発表場所: ホテルメトロポリタン(宮城県)

発表者名: Thien X. Dinh, Y. Ogami,

発表表題：MEMS-Based Dual-Axis Gyroscope Sensor，学会名等：2012 Mechanical Engineering Congress，発表年月日：2012年9月10日，発表場所：金沢大学（石川県）

発表者名：Thien X. Dinh, Y. Ogami，発表表題：A triple axis Fluidic Angular Rate Sensor，学会名等：2012 IEEE/ASME Int. Conf. Advanced Intelligent Mechatronics，発表年月日：2012年7月13日，発表場所：高雄（台湾）

発表者名：石原, Thien X. Dinh, 大上，発表表題：CFDによる3軸ガスレートジャイロの設計，学会名等：日本機械学会 関西支部第87期定時総会講演会，発表年月日：2012年3月16日，発表場所：関西大学（大阪府）

発表者名：遠藤, Thien X. Dinh, 大上，発表表題：熱感知型3軸加速度センサーに関する数値流体力学の研究，学会名等：日本機械学会 関西学生会平成23年度学生員卒業研究発表講演会，発表年月日：2012年3月15日，発表場所：関西大学（大阪府）

発表者名：Thien X. Dinh, Y. Ogami，発表表題：Three-axis Thermal Accelerometer，学会名等：2011ASME Int. Mechanical Engineering Congress and Exposition，発表年月日：2011年11月15日，発表場所：デンバー（米国）

発表者名：Thien X. Dinh, Y. Ogami，発表表題：Simulation of a Triple-Axis Thermal Bubble Accelerometer，学会名等：8th Int. Conf. Flow Dynamics，発表年月日：2011年11月9日，発表場所：東北大学（宮城県）

発表者名：Thien X. Dinh, Y. Ogami，発表表題：Numerical simulation of a three-axis accelerometer，学会名等：JSME Congress，発表年月日：2011年9月12日，発表場所：東京工業大学（東京都）

発表者名：N T M Le, Thien X. Dinh, Y. Ogami，発表表題：A Dynamic Model of Valveless Micropumps with Squeeze Film Effect，学会名等：JSME Congress，発表年月日：2011年9月12日，発表場所：東京工業大学（東京都）

〔産業財産権〕
出願状況（計1件）

名称：熱感知型加速度センサ

発明者：大上芳文, ディン スアン チェン

権利者：学校法人立命館

種類：特許

番号：特願 2011-24210 号

出願年月日：2011年11月4日

国内外の別：外国

6. 研究組織

(1) 研究代表者

大上 芳文 (OGAMI YOSHI FUMI)

立命館大学・理工学部・教授

研究者番号：30203722

(2) 研究分担者

Dinh Xuan Thien (ディン スアン チェン)

総合理工学研究機構・ポストドクトラルフェロー

研究者番号：40469200