

## 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24年 6月 8日現在

機関番号：82626

研究種目：基盤研究（C）

研究期間：2009～2011

課題番号：21560254

研究課題名（和文） 超音波によるマイクロ流路中の微小物体の非接触操作技術の開発

研究課題名（英文） Study of Non-Contact Acoustic Micro-Manipulation in a Microchannel

研究代表者

小塚 晃透（KOZUKA TERUYUKI）

独立行政法人産業技術総合研究所・先進製造プロセス研究部門・主任研究員

研究者番号：60357001

研究成果の概要（和文）：

マイクロ流路中にて、液体媒質と共に流れる懸濁微粒子を、外部から放射した超音波で操作する研究を行った。横50mm×縦50mm×厚さ5mmのガラス板に、幅1mm×深さ1mmの断面の流路（溝）を作成した。ガラス板の端面より超音波を放射したところ、ガラスを介して流路内で定在波音場が生成され、流路中の微粒子は音圧の節に凝集した。また、二股に分岐する流路では、周波数を制御することで微粒子の出口を選択できることを示した。

研究成果の概要（英文）：

This study is on manipulation of particles which flow with medium in a microchannel, using ultrasound from outside of the microchannel. A microchannel of 1 mm x 1 mm in cross section was made on a glass plate of 50 mm x 50 mm x 5 mm. A sound wave was generated by a transducer on the end of the glass plate, and propagated into a microchannel on a glass plate, where a standing wave field is formed and the particles agglomerate along several layers in the microchannel. Moreover, when a branched microchannel is added in the microchannel, the channel for the particle exit can be selected by the frequency sweep of ultrasound.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2009年度	1,300,000	390,000	1,690,000
2010年度	900,000	270,000	1,170,000
2011年度	500,000	150,000	650,000
年度			
年度			
総計	2,700,000	810,000	3,510,000

研究分野：工学

科研費の分科・細目：機械工学・機械力学・制御

キーワード：超音波、音響放射圧、マイクロ流路、マニピュレーション、粒子

## 1. 研究開始当初の背景

流体媒質中を進む超音波を物体で遮ると、物体には音波の進行方向に押す力が現れる。この力は音響放射圧と呼ばれ、古くから知られている。しかし、この力は非常に小さく、これまで産業に応用されることは少ない。近年、マイクロマシンやバイオテクノロジーな

どにおいて、微小な物体を非接触で操作するための技術が求められている。本研究代表者らは、音響放射圧による力は微弱であるが、微小な物体を操作するための力としては十分であると考え、これまでに水中超音波を利用した非接触超音波マイクロマニピュレーションに関する研究に取り組んできた。そし

て、複数の超音波を水中で干渉させて定在波音場を生成し、微小物体を定在波の音圧の節に捕捉して、超音波の位相を制御することで、捕捉した物体を非接触で3次元操作する技術を確立した。また、媒質の密度が液体より小さい気体中では、物体に作用する力はさらに弱くなるが、同様の力は存在する。提案者らは、反射板形状を凹面とすることで音波を集束させて強力な音場を生成し、その音場中で鉄球を浮遊できることを確認した（科学研究費補助金基盤研究(c)19560248）。

さて、バイオテクノロジーなどの分野では、顕微鏡下で生体粒子などの微粒子を操作することが必要である。マイクロ流路中を媒質と共に移動する微粒子を選別して仕分けするためには、非接触のマイクロマニピュレータが必要である。超音波の国際会議では、微粒子操作のセッションができるなど、多くの研究者がこのテーマに取り組んでいる。

## 2. 研究の目的

本研究では、超音波の音響放射圧を用いて、微細流路中で液体媒質と共に流れる固体微粒子を操作することを目的とする。そのためには、微細流路中に超音波の定在波音場を生成することが必要である。そして、定在波音場中の音圧の節に捕捉した微粒子を、音場を変化させることで任意の位置に誘導する手法を開発する。本研究では、一つの目標として、二股に分岐する流路中において、任意の出口に固体粒子を誘導するシステムの構築を目指す。

本研究は、様々な応用が期待される基盤技術である。本研究による成果は、工場廃液中からの、レアアースの分離・回収、あるいは有害物質の除去等への応用が考えられる。また、バイオテクノロジーにおいては、生体粒子の操作、微生物の捕獲手段等への応用も期待される。これらの実用化に向けたプロジェクトに発展させることも、本研究の目的の一つである。

## 3. 研究の方法

### (1) 微細流路中への超音波の導入

一辺が数百 $\mu\text{m}$ ～数 $\text{mm}$ の長方形断面の微細流路を、ガラス板を母材として作成する。超音波振動子をこの流路中に設置することは空間的に困難であるため、流路から離れた場所で発生させた超音波を、ガラス板中を伝搬させて流路に放射させて流路中に定在波音場を生成させる。超音波をガラス板に伝搬させる方法として、3つの方法を検討する。一つは、水中に超音波が放射されている音場中にガラス板を浸すことで、水中を伝搬してきた超音波をガラス板を介して流路に放射する方法である。第2は、超音波振動子を金属ブロックを介してガラス板に密着させ、超音

波を屈折させて流路に放射する方法である。第3の方法は、ガラス板の端面に直接超音波振動子を密着させる方法である。

流路中に微粒子の懸濁液を投入し、超音波を照射した際の粒子の挙動を観察する。粒子として、複数の粒径のアルミナ粒子、およびポリスチレン粒子等を用意して実験を行う。また、流路中に懸濁液を一定速度で流すために、シリンジポンプを用いる。粒子の挙動観察は、高倍率のレンズを取り付けたCCDカメラで撮影し、デジタル式のVTRに録画する観察システムを構築する。

### (2) 周波数スイープによる微粒子操作

音圧の節は、超音波の半波長間隔の位置に存在する。そこで、超音波の周波数を変化させると波長が変化するので、音圧の節の位置が移動し、音圧の節に捕捉されている微粒子は移動することになる。この原理を利用してy字型に分岐する流路中で、微粒子を任意の出口に誘導する。

### (3) 音場の数値シミュレーション

流路を含むガラス板の形状は無数に考えられるが、その試作には多大な時間と経費を要する。そこで、数値シミュレーションにより、十分な検討を行った上で流路を作成することとする。有限要素法を用いて、ガラス板の形状、流路の形状、超音波振動子の位置、超音波の周波数、等により、音場がどのように変化するのか、数値シミュレーションを行う。市販のソフトウェアを用いるが、水、ガラス、金属等の異種材質間の超音波伝搬を計算できるものを選定して使用する。

### (4) 溜まり場における微粒子の挙動

流路の基本形状は、四角形の同一断面の流路である。しかし、流路の分岐点などでは、粒子を操作するために、少し広い溜まり場を設けることが必要と考えられる。溜まり場の形状により、音場がどのように生成され、粒子はどのような挙動を示すのかについて調べる。また、複数の方向から超音波を照射することに付いても評価する。

### (5) 分岐する流路における微粒子の操作

分岐する流路中を流れる懸濁液中の固体微粒子を、任意の出口に誘導することを試みる。超音波の周波数をスイープさせることにより、音圧の節の位置を音波の伝搬方向で移動させることができるので、音圧の節に捕捉した微粒子も同時に移動すると考えられる。液体媒質が2つの出口に均等に分岐して流れる中で、固体微粒子のみを任意の出口に誘導することを試みる。

## 4. 研究成果

(1) 微細流路中への超音波の導入

横 50 mm×縦 50 mm×厚さ 5 mm のガラス板の中央に、幅 1 mm×長さ 50 mm×深さ 1 mm の流路（溝）を作成した。水槽中で、2.4 MHz の水中超音波が底面から斜め上方に放射されている水面にこのガラス板を配置して、流路中に粒子を懸濁した水を投入したところ、粒子が層状に整列する様子が観察された。すなわち、水槽中の超音波がガラス板を介して流路中の水に伝搬し、流路中に定在波音場が生成されることが確認された。また、ガラス板の端面に 5 mm×30 mm の PZT 振動子（1 MHz、2 MHz、4.5 MHz、6 MHz）を直接貼り付けた場合にも、同様に定在波音場が生成されることを確認した。なお、金属ブロックを介した場合にも同様の現象が観察されたが、粒子の挙動を分析したところ作用する力が弱いと推定された。金属とガラスの複数の固体材質を介するために、超音波が減衰するためと考えられる。各手法にはそれぞれ特徴があるが、以降の実験では PZT 振動子をガラス板の端面に密着させて行うこととした。

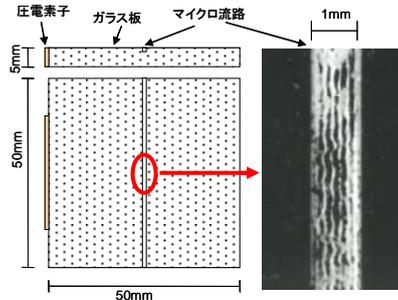


図 1. ガラス板の模式図と流路中の粒子写真

(2) 周波数スイープによる微粒子操作

y 字型の 2 つに分岐する流路をガラス板上に作成して超音波を照射する実験を行ったところ、それぞれの流路について粒子が層状に凝集した。この状態で周波数をスイープさせると、わずかではあるが片側に粒子の層が引き寄せられる現象が見られた。すなわち、流路中を流れる固体粒子を分岐点で操作して出口を選択できる可能性があることが確認された。

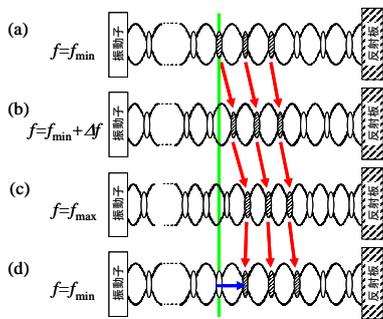


図 2. 周波数スイープによる粒子移動模式図

(3) 音場の数値シミュレーション

有限要素法による音場の数値シミュレーションを試みたところ、流路中の二次元の音圧分布については計算が可能であり、実験結果との一致を確認した。なお、より詳細な解析のためには三次元の音場計算が必要であるが、膨大なメモリ容量が必要であるために計算に至らなかった。大容量の計算機を用いるか、音場のモデルを簡略化して小さくするなどの工夫が必要であると考えられる。

(4) 溜まり場における微粒子の挙動

流路中央に幾何学模様の溜まり場（直径 5mm の円形、半円形、一辺 5mm の三角形等、深さはいずれも 1mm）を付加した。アルミナ粒子を懸濁した水を溜まり場に投入し、ガラス板の端に密着させた PZT 振動子より 4.5MHz の超音波を照射した際の、溜まり場中の粒子の挙動を調べた。粒子の濃度が薄い状態では溜まり場中の粒子が幾何学模様に凝集する様子が観察され、定在波の音圧の節に粒子が捕捉されていると考えられる。しかし、粒子濃度が濃い状態では、粒子が PZT 振動子から離れる方向に移動する現象がみられた。これは粒子が超音波の伝搬を遮るために安定した定在波が生成できず、超音波の進行波の音響放射圧により粒子が音波の伝搬方向に押し寄せられたためと考えられる。

(5) 分岐する流路における微粒子の操作

ガラス板に、T 字形に分岐する溝（流路）を加工し、中央の分岐点には直径 5mm の半円形の溜まり場を付加した。10 μm のアルミナ粒子の懸濁液を流路に流し、4.5MHz 付近でスイープする超音波を放射すると、アルミナ粒子は超音波により凝集し、2 つに分岐する流路中で一方の流路に誘導することができた。

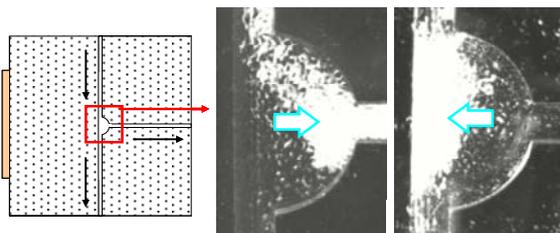


図 3. 周波数スイープによる粒子誘導（実験）

また、数ミクロンのアルミナ粒子を同様に流路に流して超音波を照射したところ、粒子は懸濁したまま媒質と共に 2 つの流路に分岐して流れていった。これは超音波による力は粒径に依存するため、大きなアルミナ粒子には力が作用して一方の流路に誘導できたが、小さな粒径のアルミナ粒子は操作できなかったことを示す。すなわち、超音波の音響放射圧を用いることで、大きさの異なる 2 種

類の粒子が混在している場合、大きな粒子を抽出できることを示した。

#### 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6件)

- ① 小塚晃透、超音波による微粉体のマニピュレーション技術、日本音響学会誌、査読有り、68巻、2012年、pp.300-304  
DOI:なし
- ② 小塚晃透、安井久一、畑中信一、辻内亨、鈴木一行、砥綿篤哉、Manipulation of particles in a microchannel with various geometric spaces using ultrasound、Japanese Journal of Applied Physics、査読有り、50巻、2011年、pp.07HE27-1~07HE27-4  
DOI:10.1143/JJAP.50.07HE27
- ③ 小塚晃透、安井久一、畑中信一、三角形の溜まり場を持つマイクロ流路中での超音波による微粒子操作、電子情報通信学会技術研究報告、査読無し、111巻US2011-3、2011年、pp.13~16  
DOI:なし
- ④ 小塚晃透、安井久一、畑中信一、辻内亨、砥綿篤哉、Acoustic manipulation in a microchannel、Proceedings of ICA2010、査読有り、1巻、2010年pp.194-1~194-4  
DOI:なし
- ⑤ 小塚晃透、安井久一、畑中信一、辻内亨、砥綿篤哉、外部からの超音波照射によるガラス板上のマイクロ流路中での微粒子操作、電子情報通信学会技術研究報告、査読無し、110巻US2010-5、2010年、pp.5~8  
DOI:なし
- ⑥ 小塚晃透、安井久一、畑中信一、辻内亨、Judy Lee、砥綿篤哉、Study of an acoustic field in a microchannel、Japanese Journal of applied physics、査読有り、49巻、2010年、pp.07HE14-1~07HE14-2  
DOI:10.1143/JJAP.49.07HE14

[学会発表] (計10件)

- ① 小塚晃透、安井久一、畑中信一、三角形の溜まり場を持つマイクロ流路中での超音波による微粒子操作、超音波研究会、2011/04/23、電気通信大学(東京都)
- ② 小塚晃透、安井久一、畑中信一、外部から

の超音波を用いる固体壁に囲まれた流路中での微粒子操作、日本音響学会2011年春季研究発表会、2011年03月11日、早稲田大学(東京都)

- ③ 小塚晃透、安井久一、畑中信一、辻内亨、鈴木一行、砥綿篤哉、Micromanipulation of particles in a microchannel with a geometric space using ultrasound、第31回超音波エレクトロニクスの基礎と応用に関するシンポジウム、2010年12月06日、明治大学(東京都)
- ④ 小塚晃透、安井久一、畑中信一、辻内亨、砥綿篤哉、Acoustic manipulation in a microchannel、ICA2010(The 20th International Congress on Acoustics)、2010年08月26日、シドニーコンベンションセンター(オーストラリア、シドニー)
- ⑤ 小塚晃透、安井久一、畑中信一、溜まり場を持つマイクロ流路中での超音波マニピュレーション、2010年度非線形音響研究会、2010年07月29日、加藤科学振興会(長野県)
- ⑥ 小塚晃透、安井久一、畑中信一、辻内亨、砥綿篤哉、外部からの超音波照射によるガラス板上のマイクロ流路中での微粒子操作、超音波研究会、2010年05月20日、機械振興会館(東京都)
- ⑦ 小塚晃透、安井久一、畑中信一、辻内亨、砥綿篤哉、超音波を用いたマイクロ流路中での微粒子操作、日本音響学会2010年春季研究発表会、2010年03月09日、電気通信大学(東京都)
- ⑧ 小塚晃透、安井久一、畑中信一、辻内亨、Judy Lee、砥綿篤哉、Study of an acoustic field in a microchannel、The 30th Symposium on Ultrasonic Electronics、2009年11月18日、同志社大学(京都府)
- ⑨ 小塚晃透、安井久一、マイクロ流路中での超音波マニピュレーション、2009年度非線形音響研究会、2009年08月29日、(財)加藤科学振興会(長野県)
- ⑩ 小塚晃透、超音波の定在波を用いた微小物体の非接触操作技術、スマート・アクチュエータ/センサ委員会第79回公開定例会、2009年07月17日、キャンパス・イノベーションセンター(東京都)

〔産業財産権〕

○出願状況（計2件）

名称：超音波を用いた乾式クリーニング方法  
および装置

発明者：小塚晃透、安井久一、砥綿篤哉

権利者：産業技術総合研究所

種類：特許

番号：特願 2011-83096

出願年月日：2011/4/4

国内外の別：国内

名称：マイクロ流路中での超音波非接触マイ  
クロマニピュレーション方法及び装置

発明者：小塚晃透、安井久一、辻内亨、砥綿  
篤哉、畑中信一

権利者：産業技術総合研究所、電気通信大学

種類：特許

番号：特願 2010-184236

出願年月日：2010/08/19

国内外の別：国内

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

小塚 晃透 (KOZUKA TERUYUKI)

独立行政法人産業技術総合研究所・先進製造  
プロセス研究部門・主任研究員

研究者番号：60357001

### (2) 研究分担者

安井 久一 (YASUI KYUICHI)

独立行政法人産業技術総合研究所・先進製造  
プロセス研究部門・主任研究員

研究者番号：30277842

畑中 信一 (HATANAKA SHIN-ICHI)

電気通信大学・情報理工学研究科・助教

研究者番号：40334578