

機関番号：13501

研究種目：基盤研究(C)

研究期間：2008～2010

課題番号：20560234

研究課題名（和文）積層圧電アクチュエータの衝撃力利用法の確立に関する研究

研究課題名（英文）Research on Establishment of Application Method of Impulsive Force Generated by Multilayer Piezoelectric Actuator

研究代表者

大内 英俊 (OHUCHI HIDETOSHI)

山梨大学・大学院医学工学総合研究部・教授

研究者番号：30126312

研究成果の概要（和文）：本研究では、積層圧電アクチュエータの利用分野を拡大するため、素子に急激に電圧を印加するときに発生する衝撃的な力を利用する技術を確認することを目的としている。始めに、ばねで支持された慣性体を圧電素子で連続的に打撃し、慣性力と摩擦力を利用して移動する微動機構を作製し、その動作特性を調べた。次に、素子の急激な伸張を利用して少量の流体を噴出する噴射ポンプを試作し、管路中を流動する粒子の選別装置に応用してその選別特性を調べた。

研究成果の概要（英文）：In order to expand the application field of the multilayer piezoelectric actuator, it has aimed to establish the technology that uses the impulsive force generated when the voltage is rapidly impressed to the element. First, a stepwise motion mechanism was made. Successive impulsive force is acted on a mass supported with a spring. The mechanism moves using difference between inertia force and friction force. Its driving characteristics were examined. Next, a jet pump that ejects a small amount of fluid by using a rapid expansion of the element was made. As an application of the jet pump, a sorter of the particle that flowed in the conduit was designed and its sorting characteristics were examined

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2008年度	1,800,000	540,000	2,340,000
2009年度	600,000	180,000	780,000
2010年度	500,000	150,000	650,000
総計	2,900,000	870,000	3,770,000

研究分野：工学

科研費の分科・細目：機械工学・知能機械学・機械システム

キーワード：圧電アクチュエータ、衝撃力、微動機構、噴射ポンプ、粒子選別

## 1. 研究開始当初の背景

圧電アクチュエータの利用分野は広がっているとは言え、変位量が小さいため、当然微小な変位制御に限られている。機械分野においては、その変位を直接使うほか、変位を機械的または流体的に拡大して使う、超音波アクチュエータとして使う、急速変形を使うなどがある。さらに十分な変位を得る方法として、衝撃的

な発生力の利用が考えられる。

本研究における衝撃力の利用は、打撃により慣性体を跳ね飛ばし、ばね力で復帰したときに間髪を置かず次の打撃を与える、あるいは流体中で圧力波を発生させるもので、従来はなかった駆動法である。この技術が確立されれば、積層圧電素子のインテリジェントなアクチュエータとしての利用分野拡大を図ることができる。

## 2. 研究の目的

圧電アクチュエータの衝撃的発生力を利用した新しい駆動法を開発する。そのためにマイクロ秒領域の機械制御技術確立する。その成果を踏まえ、連続跳躍技術を利用した空気圧制御弁、微動機構の開発、および圧力波を利用した流体機器の開発を目指す。

## 3. 研究の方法

積層圧電アクチュエータとしては  $2\text{mm} \times 3\text{mm} \times 10\text{mm}$  のもの1個を使用する。複数個のアクチュエータを使用すれば出力や機能が増加することは容易に推察できるので、本研究では、1個のアクチュエータでどの程度の性能が得られるかを追求する。

(1) 衝撃力・打撃力による微動機構の試作  
①シミュレーションと実験による衝突時の現象の把握と解釈

圧電素子によって打撃され、飛ばされた慣性体が初期位置に復帰し、基台と衝突するときの、数10マイクロ秒間の現象を記録し、シミュレーションも併用して効率の良い打撃のタイミングを探索する。

②連続打撃による駆動技術の確立

安定した連続打撃が可能となるような電圧印加の方法を検討する。特に、接触してから次の打撃力を与えるための遅延時間は、条件によって最適値があったり無かったりで不明な点が多い。与えられた駆動条件に対して最適な遅延時間を求める問題を解明したい。

③正逆方向への移動について

微動機構は打撃の条件によって移動方向が反転することがある。作用するモーメントの影響であろうと推察されるので、この問題について考察する。

(2) 噴射ポンプの開発と粒子選別装置への展開

①圧電素子の急激な伸張により少量の流体をノズルから吐き出す方式の噴射ポンプを試作する。素子には幅  $1\text{ms}$  程度のパルス状の電圧を印加する。1回の印加で流量が不足する場合は、連続して複数回のパルスを与える。  
②試作した噴射ポンプを使用して、管路内を流体とともに流れる粒子の選別を行う。従来は機械的に流路を切替えるか超音波を利用しており、粒子が損傷を受けることがあった。本方式は流体を吹き付けるので粒子に優しい選別が可能となる。

## 4. 研究成果

積層圧電アクチュエータの打撃力による微動機構(1)と圧電噴射ポンプによる粒子選別(2)に分けて報告する。

(1) 微動機構装置について

①構造と動作原理

微動機構装置の構造を図1に示す。アル

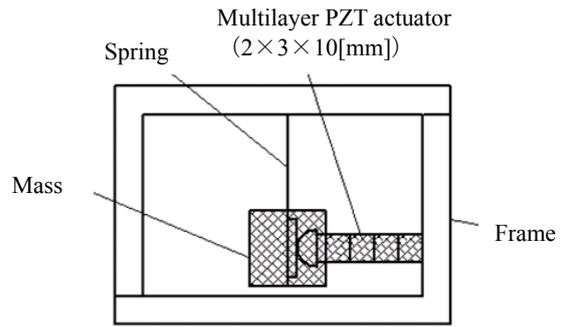


図1 微動機構の構造

ミニウム製のフレーム枠の内側下部に積層圧電素子( $2 \times 3 \times 10[\text{mm}]$ )が接着されている。素子の反対側には鋼製の半球が接着されており、 $\phi 0.3[\text{mm}]$ のピアノ線(ばね)で支持された $3.9[\text{g}]$ のリン青銅製の慣性体と接触している。以後装置の移動方向に関して、図1における方向で左右を表すこととする。

動作原理は以下の通りである。初期状態として慣性体と圧電素子先端を接触させておく。圧電素子に急激に立ち上がる電圧を印加して打撃力を発生させると、左右方向に作用する力だけでなく、フレームにモーメントが発生する。このモーメントは床との接触圧を変え、したがって摩擦力が変化するため、装置の動きに影響を与える。

低電圧( $50[\text{V}]$ )印加時の発生力は比較的小さく、慣性体に与えた力の反力がフレームに働く。その力は短時間だが摩擦力に打ち勝って、フレームは右方向へ移動する。慣性体が左方向に跳ね飛ばされると、ばねの変位が大きくなり、フレームを左方向に押す力となるが、衝撃的な力ではないので左方向へは移動しない。

高電圧( $100[\text{V}]$ )印加時は打撃力が大きくなるので、発生するモーメントも大きくなり垂直抗力が増え摩擦力が増大する。したがって右方向への移動量が小さくなる。低電圧印加時に比べてばねの変位が大きくなり、フレームを左方向に押す力が大きくなり、装置は左方向へ移動する。

なお、印加電圧の高低は、圧電素子の電氣的容量特性を利用し、印加時間の長短で調整した。

②連続打撃について

圧電アクチュエータの打撃によって打ち出された慣性体は、元位置に戻ると素子先端の半球と弾性衝突を繰り返す。したがって連続的に打撃を与えるには衝突の瞬間を検出し、タイミングを計って次の打撃力を与える必要がある。

図2は衝突時の圧電効果によって発生する電圧を検出している様子を示している。 $50 \sim 100[\text{V}]$ の電圧に含まれる $1[\text{V}]$ ほどの電圧を捉え、その後の処理をマイクロコンピュータで行っている。

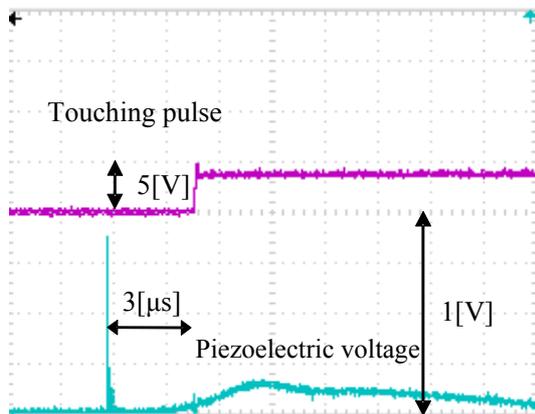


図2 圧電効果による衝突の検出

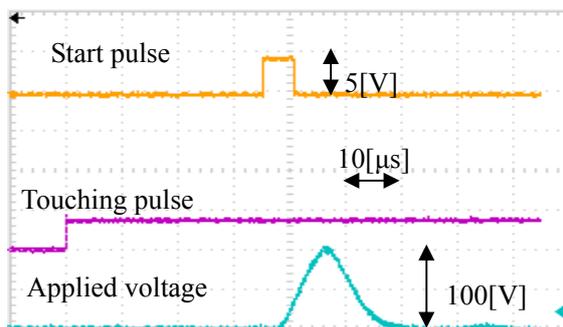


図3 衝突検出後の信号処理

信号処理の様子を図3に示す。本装置の場合、衝突から約  $40[\mu s]$  経過後に圧電アクチュエータへの電圧印加を開始すると次回の打撃を効率よく行うことができた。

### ③動作シミュレーション

図4に示すモデルを作成した。1次元モデルで近似しているが実際の装置では重心と打撃位置の関係からモーメントが発生するので、床への垂直抗力が変化することを別途考慮している。慣性体、素子、フレームについて運動方程式を立て、ルンゲクッタ法を用いて解くことにより、微動機構の変位を算出した。主な記号を以下に示す。

- $M_o$ : フレームの質量
- $\chi_o$ : 微動機構装置の変位
- $\chi_v$ : 積層圧電素子の仮想変位
- $m_p$ : 積層圧電素子の等価質量
- $K_p$ : 積層圧電素子の弾性係数
- $D_p$ : 積層圧電素子の粘性係数
- $\chi_p$ : 積層圧電素子の変位
- $D_a$ : 接触部分の粘性係数
- $K_a$ : 接触部分の弾性係数
- $M_m$ : 慣性体の質量
- $K_m$ : 支持バネの弾性係数
- $\chi_m$ : 慣性体の変位
- $F_p$ : 積層圧電素子がフレームに及ぼす力
- $F_m$ : 慣性体がフレームに及ぼす力
- $F_f$ : 微動機構装置の摩擦力

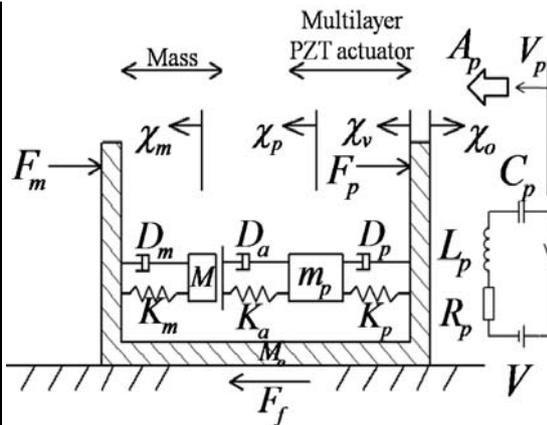
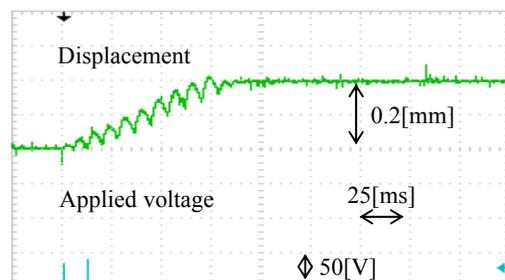


図4 シミュレーションモデル

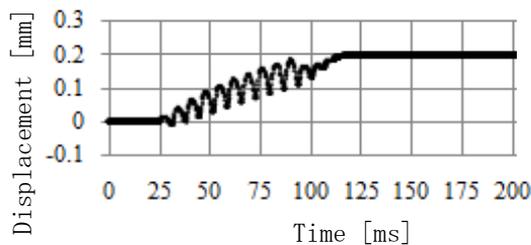
### ④動作実験

定盤の上の方眼紙を敷いて図1の装置を載せ、10回連続打撃による水平方向の変位を可視光レーザー式変位センサで測定した。50[V]印加時(打撃力が小さいことに相当)、100[V]印加時(打撃力が大きいことに相当)の各々について移動変位を測定し、シミュレーション結果との比較検討を行った。

図5(a)に50[V]印加時の水平方向における動作特性の実測値を示す。装置は10回の打撃で右方向に約  $0.2[\text{mm}]$  移動した。印加電圧が一部しか記録されていないが、これはオシロスコプのサンプリングの問題で実際には約50[V]の電圧が印加されている。最初の打撃による変位は小さいが、打撃回数が増えるにつれ慣性体に加わる力が大きくなるため変位も大きくなった。10回の打撃動作終了後も装置が移動しているのは慣性体の残留振動のためである。



(a) 実測結果

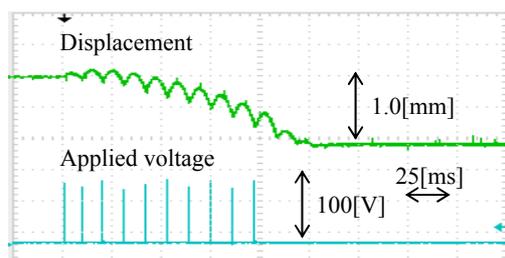


(b) シミュレーション

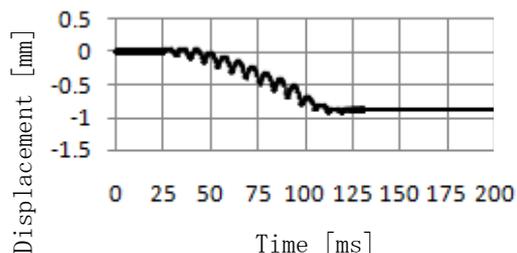
図5 低電圧弱打撃駆動時の動作

図5 (b)に50[V]印加時の水平方向における動作特性のシミュレーション結果を示す。実測値と比較してほぼ同じ変位となった。ただし、打撃終了後の残留振動による移動量に差がある。

図6 (a)、(b)に100[V]印加時の水平方向の動作特性の実測およびシミュレーション結果を示す。実測では装置は左方向に約1.1[mm]移動した。シミュレーションでは実測値と比較して僅かながら小さい値となった。100[V]印加時に発生するモーメントが大きいため、実験では装置がわずかながら傾くことがあるが、モデルでは傾くことを考慮していない影響であると思われる。



(a) 実測結果



(b) シミュレーション

図6 高電圧強打撃駆動時の動作

## (2) 圧電噴射ポンプによる粒子選別

### ①圧電噴射ポンプの構造と動作

試作した圧電噴射ポンプの構造を図7に示す。使用時はポンプ全体を液体中に浸した状態とする。使用する積層圧電アクチュエータは $2 \times 3 \times 10$ [mm]で無負荷のとき150[V]の印加電圧で長手方向に $7.5$ [ $\mu$ m]変位するものである。これをポンプ基台に接着し、上端にピストンとして厚さ4[mm]の円板を接着する。これを内径12[mm]のシリンダに入れ、 $\phi 1$ [mm]のノズル孔を有する蓋とともに基台にねじで固定している。

駆動電圧はパルス波状であり、図7に示すように、アクチュエータを急激に伸張させるとノズルからの流れは噴流を形成し、収縮させれば同じノズルの周辺から流体が吸入される。このポンプは圧電アクチュエータの瞬発的な力を利用しており、間歇的に微量な流体を噴出させるのに適している。なお、連続的に動作させると見かけ上ほと

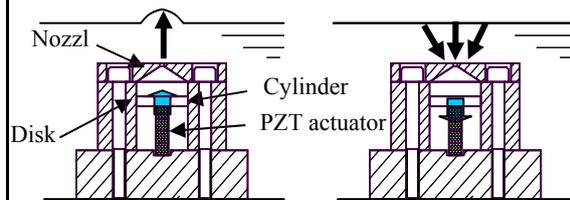


図7 圧電噴射ポンプの構造と基本動作

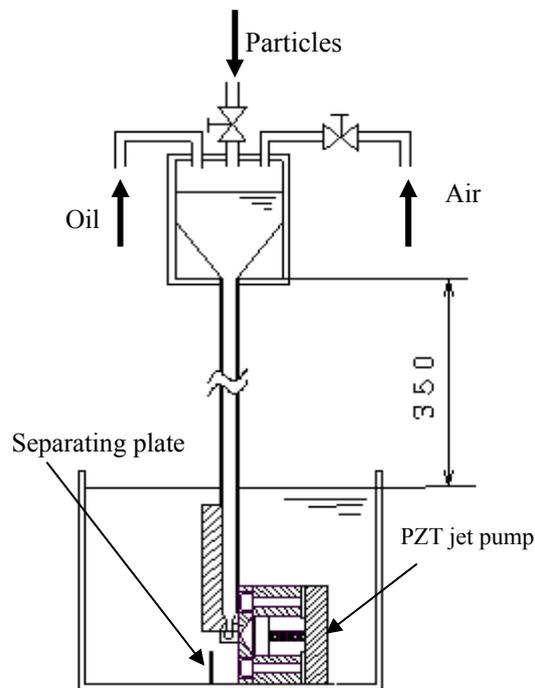


図8 粒子選別装置

んど連続的な流れが形成される。

### ②流動粒子選別装置

図8に選別装置全体の構成を示す。上部のタンクに流体とともに選別対象の粒子を混ぜておき、パイプ中を下の選別位置へ送る。粒子を光センサで検出し、圧電噴射ポンプを使って横方向から噴流を噴射し、粒子を主流から離脱させる。粒子には直径が約1mmの白と黒のポリスチレン製のものを使用した。流体は一般作動油である。必要に応じて上部に4~16kPaの空気圧をかけ、粒子の落下速度を速めることもできる。

噴射ポンプおよび選別部分の詳細を図9に示す。内径 $\phi 4$ [mm]の管の先を $\phi 1.5$ [mm]に絞り、直後に、投光部および受光部が $\phi 0.5$ [mm]の反射形フォトセンサを2.5[mm]の間隔で2つ設置する。この2つのセンサによって、管内を落下する粒子が2.5[mm]を移動するのにかかる時間を調べ、噴射のタイミングを求めた。

実験においては、黒粒子に対しては噴射せず、そのまま下方へ流し、白粒子に対しては

噴射して主流から離脱させた。また、センサを1個だけ使用した場合の選別も行い、センサを2個使用する場合との得失を比較した。

センサによる粒子の判別性能を図10に示す。選別用のパイプ内を流体とともに粒子を落下させて色判別を行った。センサ出力は最大4095であるので、出力はセンサレンジの10分の1以下しか得られなかったことになる。実験は実験室の蛍光灯下で行っており、特別な遮光は行っていない。白と黒で出力が逆転している場合もあり、色の判別精度にも問題があることが分かった。

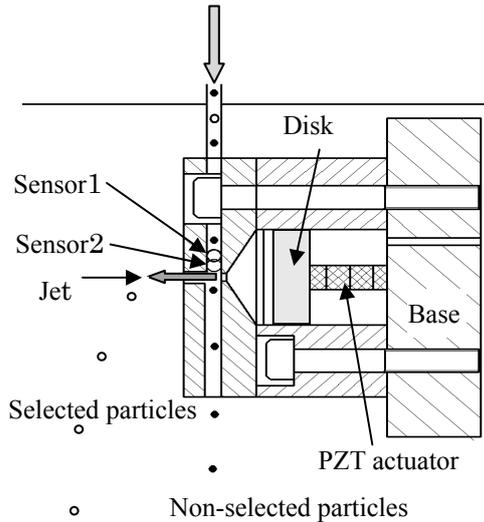


図9 選別装置詳細

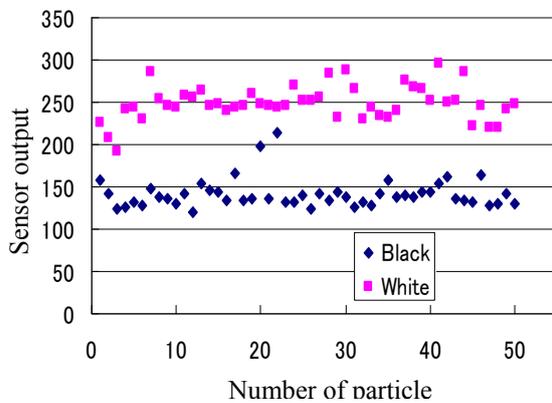


図10 センサによる白黒判別

### ③センサ1個による選別結果

図9に示すセンサ2を使った選別実験を行った。センサで検出してから噴射するまでの時間は若干の試行錯誤によって調整した。粒子の落下速度が安定している場合はこの方法が適している。

白粒子と黒粒子を各100個ずつ混在させて流し、白と黒を選別した実験結果を表1に示す。空気圧は流速を変化させるために加えたものである。例えば0kPaの場合の1行を例

に表の見方を説明すると、次のとおりである。

白粒子100個について集計すると、センサによって正しく白と判定された粒子が96個、そのうち噴射ポンプによって主流から離脱できたものも96個であった。黒粒子100個について集計すると、センサによって抽出されなかった粒子が99個で、そのうち99個は方向を変えず下方に流れた。

白粒子が検出されても分離できなかったのは、噴射のタイミングが合っていないからであり、黒粒子が黒と判定されながら分離されてしまったのは、前後を流れる白粒子に向けた噴流によって流されたものである。

表1 センサ1個による選別実験結果

Air pressure (kPa)	White particles (100)		Black particles (100)	
	Detected	Selected	Non-detected	Passed
0	96	96	99	99
4	99	98	100	99
8	99	98	97	87
12	100	99	98	96
16	100	98	96	86

### ④センサ2個による選別実験結果

次にセンサを2個使用し、センサ間の通過時間をもとにポンプを噴出させた場合の実験について述べる。

図11に示すように、センサ1の信号の立ち上がりからセンサ2の信号の立ち上がりまでの時間をマイクロコンピュータで計測し、その時間に定数を乗じてタイマーを作動させ、ポンプへの信号とした。この定数はセンサ間の距離やパイプ径の段差などにもよるが、本装置の場合は0.7が最適であった。

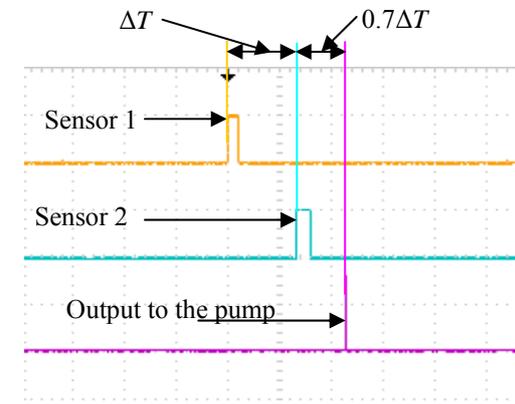


図11 センサによる粒子検出と噴射信号

表2 センサ2個による選別実験結果

Air pressure (kPa)	White particles (100)		Black particles (100)	
	Detected	Selected	Non-detected	Passed
0	97	96	100	98
4	98	98	99	95
8	95	93	99	93
12	95	93	100	97
16	97	97	100	95

選別結果を表2に示す。表1と比較すると、成績が低下している箇所がある。これは、センサ1個の場合、空気圧を変更するごとにタイミングを十分に調整してから実験をしたのに対し、センサ2個の場合は、空気圧を変更しても前述の0.7という数値を固定したためである。

(3) まとめ

積層圧電アクチュエータの衝撃的な発生力を利用した2種類の装置を試作し、特性を調べた。

①打撃力による微動機構では、シミュレーションも併用して動作特性を調べ、1個の圧電素子でも打撃力の強さを変更することで正逆両方向に移動する機器を製作した。

②流体中で素子を急激に伸張させることで噴射ポンプを作動させ、それを利用した粒子選別装置を製作した。

③これら2種類の装置の開発を通して、積層圧電アクチュエータの衝撃的な発生力の利用法を確立することができた。

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4件)

①Hidetoshi OHUCHI、Takaaki ISHII、Shunsuke MURAMATSU、Particle Sorting Using a PZT Jet Pump、International Journal of Automation Technology、査読有、Vol. 4、No. 6、2010、pp524-529

②Hidetoshi OHUCHI、Takaaki ISHII、Shin SAITO、Driving Characteristics of a Step Motion Mechanism Driven by Impulsive Force of a PZT Actuator、査読有、Proceedings of the 14th International Conferences on Mechatronics Technology、B01、2010、pp88-92

[学会発表] (計3件)

①大内英俊、石井孝明、齊藤真、圧電アクチュエータの打撃力を利用した微動機構、日本機械学会北陸信越支部、第47期定時総会講演会、No. 107-1、2010年3月10日、東大阪、pp553-554

②大内英俊、石井孝明、村松俊輔、圧電噴射ポンプによる管内流動粒子の選別実験、日本機械学会関西支部・第84期定時総会講演会、No. 094-1、2009年3月17日、新潟、p10-23

6. 研究組織

(1) 研究代表者

大内 英俊 (OHUCHI HIDETOSHI)

山梨大学・大学院医学工学総合研究部・教授

研究者番号：30126312

(2) 研究分担者

石井 孝明 (ISHII TAKAAKI)

山梨大学・大学院医学工学総合研究部・准教授

研究者番号：40262323

(3) 連携研究者

なし