

機関番号：17401

研究種目：基盤研究(B)

研究期間：2008～2010

課題番号：20360087

研究課題名(和文) 熱電素子と熱可変材料を用いた無電源体内埋め込み型マイクロポンプの開発

研究課題名(英文) Development of Micro-Pump without Power Supply with the aid of Peltier Devices and Deformation Material

研究代表者

鳥居 修一 (TORII SHUICHI)

熊本大学・大学院自然科学研究科・教授

研究者番号：30180201

研究成果の概要(和文)：本研究は、ペルチェ素子の加熱・冷却特性により、それに接する熱可変材料を熱膨張・収縮させて、これを動力源とする円筒型マイクロポンプを設計・製作し、その応答試験を行うことを目的としている。その結果、ノズルバルブ部・ディフューザーバルブ部・熱可変材料部で構成されるマイクロポンプは、熱可変材料部の膨張・収縮、およびディフューザーバルブ部・ノズルバルブ部の形状の損失差により、ポンプ内部の作動流体が一定方向に流動することを明らかにした。

研究成果の概要(英文)：The micro pump is one of the application research and development fields of the MEMS technology. Its fundamental form is proposed from the end of the 1980's to the beginning of the 1990's with the MEMS technology development. The aim of the present study is to design and develop a cylindrical micro pump which is driven by expansion and contraction of the heat deformation material with the aid of heating and cooling properties of Peltier devices. The Peltier devices are periodically heated and cooled and the corresponding heat deformation material unit causes heat expansion and compression. With the aid of these motions, the working fluid filed in the micro-pump flows. The flow phenomenon is disclosed by X-ray apparatus and PIV method.

交付決定額

(金額単位：円)

|        | 直接経費       | 間接経費      | 合計         |
|--------|------------|-----------|------------|
| 2008年度 | 10,700,000 | 3,210,000 | 13,910,000 |
| 2009年度 | 2,300,000  | 690,000   | 2,990,000  |
| 2010年度 | 2,400,000  | 720,000   | 3,120,000  |
| 年度     |            |           |            |
| 年度     |            |           |            |
| 総計     | 15,400,000 | 4,620,000 | 20,020,000 |

研究分野：工学

科研費の分科・細目：機械工学・流体工学

キーワード：ペルチェ素子、熱可変材料、X線装置、流動現象、デフューザーバルブ、ノズルバルブ、PIV計測法

## 1. 研究開始当初の背景

現在、各種抗癌剤の投与方法として注目されているのが、局所注入療法・動注化学療法である。局所注入療法は、抗癌剤やそれに類似する薬剤を針などを使用して直接腫瘍内に投与方法で、強い副作用は伴わず、抗癌剤を高濃度に投与できることから、治療効果の期待できる治療法である。更に動注化学療法は、腫瘍や癌が栄養としている動脈に対して、直接抗癌剤を投与方法で、局所注入療法と同様に抗癌剤を高濃度に投与でき、全身に循環する抗癌剤も少なく済むことから副作用も軽減できる特徴をもっている。

近年、分析化学の分野ではマイクロチップケミストリーが盛んに試みられ、ガラス基板上に内径数十から数百 $\mu\text{m}$ のマイクロチャンネルを形成し、この微小流路内を流れるナノリットルの超微量流体を制御することが問題となっている。それを実現するには、マイクロポンプやマイクロバルブの開発が進められている。

国内でマイクロチップとポンプを組み合わせた流動実験を行ったのは東京大学の佐藤教授であり、北海道大学の渡辺教授は同様の実験をマイクロチップとシリンジポンプを組み合わせて試みている。国外では、マイクロポンプの概念設計を行ったのはミシガン大学の Yang 教授であり、液体粘性の温度依存性を利用したマイクロポンプの研究は、ドセルデン工科大学の Klein 教授である。本研究の構想は液体をマイクロポンプで流動させるだけでなく、その駆動力電源に熱電素子を使用するので、従来のマイクロポンプに関する研究成果をそのまま活用することはできない。従って、熱電素子で起電力を発生させ、その電力でポンプを駆動させた場合の動特性に関する有用な知見を得なければ、マイクロポンプを使用した本構想は実現できない。以上の状況から、これらの研究テーマは本構想を可能にするだけでなく、各研究分野への応用が期待されるので、工学的にも工業的にも興味深い。

平成16年度から2年間の科学研究費で開発したペルチェ素子の発熱・吸熱特性で形状記憶合金の形状を規則的に変形させて駆動するマイクロポンプの基本性能を明らかにした。また一方で、形状記憶合金の形状変化では、漏れが生じることが分かり、収縮・膨張の機能を有する材料でポンプ内部の流体を制御することが効果的であることを明らかにした。このコンセプトを小型化すれば、内視鏡（腹腔鏡）を利用したマイクロポンプが可能になる。

## 2. 研究の目的

本研究の構想は、(1) ペルチェ素子と熱可変材料で構成されたマイクロポンプとマイクロタンクを内視鏡（腹腔鏡）を使って直接体内の腫瘍近傍まで挿入する、(2) 熱電素子を使用して体温と外気温度との温度差で発生した電力でペルチェ素子の加熱冷却を周期的に制御する、(3) その加熱冷却によって熱可変材料が熱膨張・収縮を交互に行う、(4) その駆動によってマイクロポンプ内の抗癌剤が腫瘍に注入される、一連の機構を持つ無電源体内埋め込み型マイクロポンプの開発を行うことである。本研究は、

- (1) ペルチェ素子の発熱・吸熱特性で熱可変材料の熱膨張・収縮を規則的に変形させて内部作動媒体を駆動するマイクロポンプを製作する。
  - (2) 既存の熱電素子による発電特性とサイズの関係性を明らかにし、使用するペルチェ素子の動特性を確認する。
  - (3) マイクロチューブを使って液体をマイクロタンクに満たすことができるかを確認する。
  - (4) マイクロタンク内の液体をマイクロポンプによって投入できるか確認する。
  - (5) 体温と外気温度との温度差で出力電力を発生できる小型高出力熱電素子を開発し、外部電源を一切使わないでマイクロポンプを常に駆動できるようにする。
- のような各種実験で本構想の可能性を探る。

## 3. 研究の方法

## (1) マイクロポンプの構造と動作原理

図1に示すポンプはノズルバルブ部、ディフューザーバルブ部、熱可変材料部、カバーで構成されている。以下に、各部について詳細に説明する。



図1 マイクロポンプの外観

ノズルバルブ部の外観を図2に示す。一方には熱可変材料部に接続するための溝（図2左）があり、反対側にはホースニップルとの

接続のためにねじ切り(図2右)されている。内部はテーパ状で、熱可変材料部との接続側の径が大きくなっている。また、カバーを固定するためのねじ穴を2か所設けている。



図2 ノズルバルブ部の外観

ディフューザーバルブ部を図3に示す。ノズルバルブ部と同様に、一方には熱可変材料部に接続するための溝(図3右)があり、反対側にはホースニップルとの接続のためにねじ切り(図3左)がされている。内部はテーパ状で、ホースニップルとの接続側の径が大きくなっている。また、カバーを固定するためのねじ穴が2か所設けている。



図3 ディフューザーバルブ部の外観

熱可変材料は温度変化により寸法が大きく変化する素材である。開発するポンプに用いる熱可変材料の必要条件としては、

- ① 少ない温度変化で大きな寸法変化を有すること。即ち、線膨張率が大きいこと。
- ② 比較的熱伝導率がよいこと。即ち、熱伝導率が高いこと

表1は様々な材料の線膨張率を纏めたものである。線膨張率が高い材料として高分子材料があげられる。その中で線膨張率・熱伝

導率等を検討し、ポリオキシメチレン樹脂(POM: ポリアセタール樹脂)を用いることとした。その物性を表2に示す。本研究で制作したポンプ熱可変材料部の形状を図4に示す。

表1 各種材料の線膨張率

| Material       | Coefficient of Liner Expansion [ $\times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ ] |
|----------------|--|
| Iron           | 11.8   |
| Copper         | 16.7   |
| Aluminum       | 23.0   |
| Elastic Rubber | 77   |
| Polyethylene   | 55-100   |
| Polyester      | 100-200  |

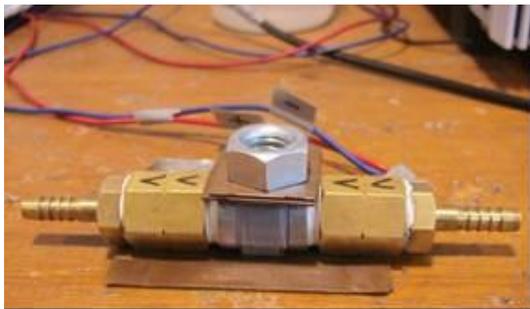
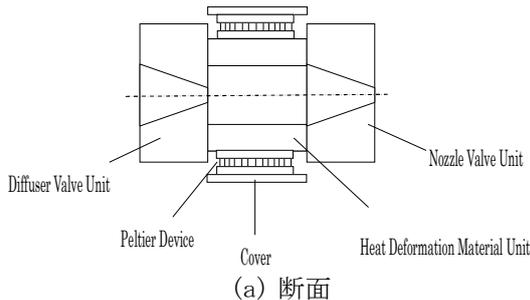
表2 ポリオキシメチレン樹脂の特性

| Material   | Polyoxymethylene |
|--|------------------|
| Melting Point [ $^{\circ}\text{C}$ ]                                 | 165              |
| Specific Heat [ $\text{kJ}/(\text{Kg} \cdot \text{K})$ ]             | 1.47             |
| Coefficient of Liner Expansion [ $\times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ ] | 120              |
| Thermal Conductivity [ $\text{W}/(\text{m} \cdot \text{K})$ ]        | 0.23             |



図4 ポンプ熱可変材料部の外観

上記で述べた各部で制作されたポンプを図5に示す。ポンプはノズルバルブ部・ディフューザバルブ部・熱可変材料部・ペルチェ素子・カバーから構成されている。ポンプは円筒形をしており、横方向から見て図5のような構造になっている。ここで使用するペルチェ素子はバイポーラ電源に接続されており、カバーはノズルバルブ部・ディフューザバルブ部とねじで固定しており、放熱、ペルチェ素子固定の役割を担っている。本論文中では、熱可変材料部に接触しているペルチェ素子面を制御面、カバーに接触しているペルチェ素子面を放熱面とする。



(b) 外観  
図5 製作したマイクロポンプ

図5に示しているポンプの原理を以下に述べる。バイポーラ電源（エヌエフ回路設計ブロック社製BP4610、図6）はペルチェ素子に電流を印加する。ペルチェ素子はその入力電流の方向により、素子の制御面・放熱面を加熱・冷却する。ペルチェ素子面加熱・冷却の温度調節はバイポーラ電源が印加する電流量により決定される。ペルチェ素子制御面を加熱・冷却することにより、面に接する熱可変材料は熱膨張・熱収縮を行い、それに伴い、内径面が収縮・膨張し、これがポンプ作動動力源となる。熱可変材料部内径面の膨張・収縮、およびディフューザバルブ部・ノズルバルブ部の形状の損失差によりポンプの作動流体が一定方向に流動する。この作動原理を以下に纏める。

(ステップ1)

- ① ペルチェ素子制御面の加熱
- ② 熱可変材料部外径の温度上昇
- ③ 熱可変材料部円周方向の熱膨張による熱

- 可変材料部厚さの増大
  - ④ 熱可変材料部内径の収縮
  - ⑤ 熱可変材料部内部空間の縮小
  - ⑥ 熱可変材料部内作動流体の外部流出
- ディフューザバルブ部・ノズルバルブ部の構造により一定方向に流動  
(ステップ2)
- ⑦ ペルチェ素子制御面の冷却
  - ⑧ 熱可変材料部外径の温度下降
  - ⑨ 熱可変材料部円周方向の熱収縮による熱可変材料部厚さの減少
  - ⑩ 熱可変材料部内径の膨張
  - ⑪ 熱可変材料部内部空間の増大
  - ⑫ 作動流体の熱可変材料部への流入。ディフューザバルブ部・ノズルバルブ部の構造により一定方向に流動。

以上①～⑫を1サイクルとし、それを繰り返して、作動流体を相対的に一定の方向に流動させる。一連の動きを図7に示す。



図6 バイポーラ電源

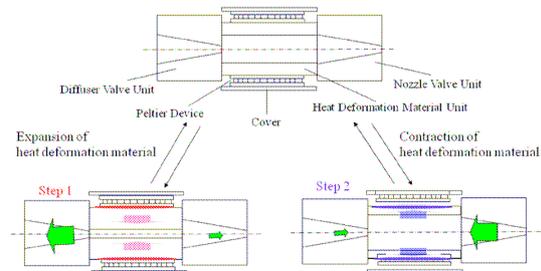


図7 ポンプの駆動

ポンプ内部状況観察はポンプをX線装置内試料テーブル上に設置して、X線を照射することによりポンプ熱可変材料部の内部構造を撮影し観察する。使用するX線装置（申請した備品）を図8に示す。X線装置はmediXtec社製のMX-90Basicを購入した。仕様は表3に纏める。ここで用いるX線装置の特徴として、以下の点が挙げられる。

- ① X線が物質をよく透過する。
- ② 非接触・非破壊で内部状況を観察できる。
- ③ 試料の表面精度・形状によらず観察できる。



図 8 X線装置

表 3 X線装置の特性

|                               |   |
|-------------------------------|---|
| Model                         | MX-90Basic                                |
| Voltage of X-ray Tube         | Max 90kV                                  |
| X-ray Tube Current            | Max 0.5mA                                 |
| Focal Spot size of X-ray Tube | 0.1mm                                     |
| X-ray Detector                | X-ray CCD camera                          |
| Dimension of Input Plane      | 24×18mm                                   |
| Resolution                    | 13LP/mm                                   |
| Dimension of Stage            | 600×470mm                                 |
| Distances of X and Y Axes     | X-axis=160mm, Y-axis=100mm, Rotation=360° |
| Sample Height                 | Max 60mm                                  |
| Image Processing Software     | IP-Basic                                  |
| Cabin Dimension               | Width 690×Depth 590×Height 620mm          |
| X-ray Leakage Dose            | Under 10μSv/h                             |

#### 4. 研究成果

図 9 は、入力電流の相違によるペルチェ素子制御面の温度変化の相違について示している。ペルチェ素子制御面は 30℃程度の温度変化を考慮する必要であるので、ペルチェ素子温度変化の上限・下限の中間温度から上下に 15～20℃程度の範囲においてペルチェ素子の故障の原因となる結露が生じないこと、ポンプ熱可変材料部が熔融しないことが必要となってくる。ペルチェ素子は入力電流の向き・量により素子表面温度を変えることができ、入力電流を調節することで即座に素子表面温度を室温以下にすることができるため、結露が生じてペルチェ素子がショートしてしまう可能性がある。したがって、温度変化の上限値が熱可変材料部、ポリオキシメチレン樹脂の融点 165℃以下であることが条件となってくる。0.6～1.0 A において条件を満たしている。ただし、1.0 A の場合、ペルチェ素子放熱面において過度の温度上昇が生じるため、0.6～0.8 A で実験を行う必要があることが分かった。

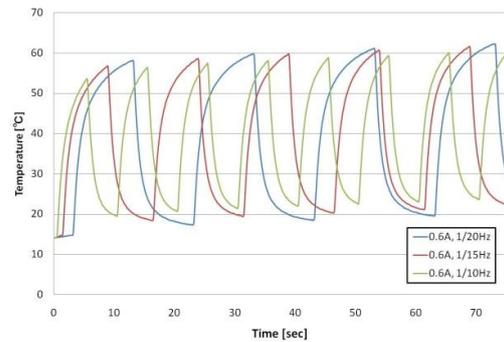


図 9 入力電流と素子温度との関係

図 1 0 は X 線装置でポンプ熱可変材料部を可視化したものである。ここで、内部駆動がわかるように、気泡を注入し、この動きでポンプ駆動を把握した。気泡が軸方向に振動しながら一定方向に流動している(図左方向)ことが分かった。さらに、気泡の動きに注目し時系列で並べたものを図 1 1 に示す。これにより気泡が一定方向に少しずつ流動していることが明らかとなった。

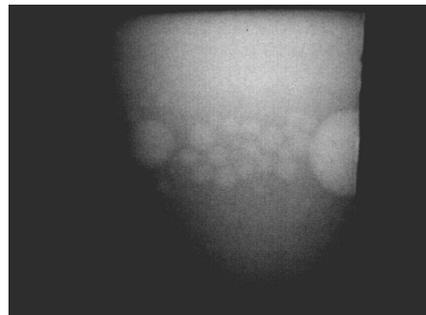


図 1 0 気泡の動き

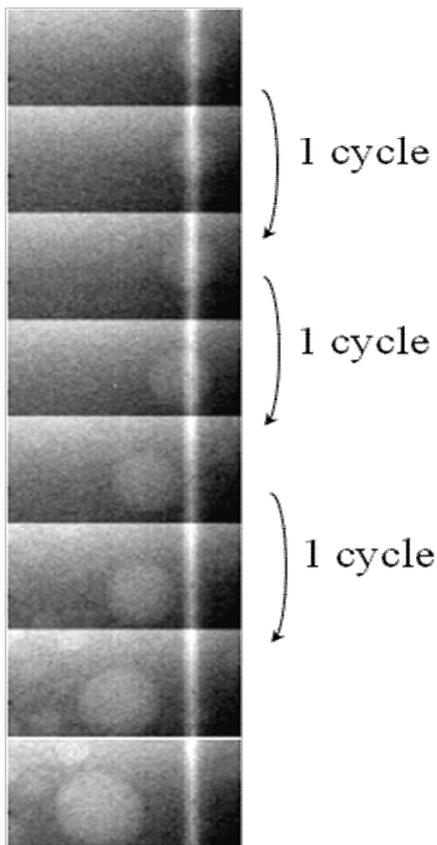


図 1.1 ポンプ名部の媒体の流動（気泡の動き）

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. Yasuhiro Takakura, Shuichi Torii, and C.Kehang, Study of Developing Micro-pump with the Aid of Peltier Devices and Evaluation of its Usage in Buildings, Proceedings of YSRIM 2011 有, p. 243, 2011.
2. Yasuhiro Takakura, Shuichi Torii, and C.Kehang, Response examination using x-ray for cylindrical valveless pump with the aid of peltier devices and heat deformation material, Proceedings of 4th Yellow Sea Rim Workshop on Explosion, Combustion and Other Energetic Phenomena, 有, p. 27, 2011.
3. Yasuhiro Takakura, Shuichi Torii, and C.Kehang, Response Examination to Make Micro-pump with the Aid of Peltier Devices and Heat Deformation Material, Proceedings of MULTIPHYSICS, 有, p.62, 2010.
4. Yasuhiro Takakura, Shuichi Torii, and C.Kehang, Visualization Experiment using X-ray to Develop Cylindrical Valveless

Pump with the Aid of Peltier Devices and Heat Deformation Material, Proceedings of X-Earth(IWX), 無, p. 157, 2010.

5. Yasuhiro Takakura, Shuichi Torii and Cui Kehang, RESPONSE EXAMINATION USING X-RAY FOR CYLINDRICAL VALVELESS PUMP WITH THE AID OF PELTIER DEVICES AND HEAT DEFORMATION MATERIAL, Proceedings of 21st International Symposium on Transport Phenomena, 有, p. 682, 2010.
6. Yasuhiro Takakura, Shuichi TORII, Toshio Tomimura and Yasushi Koito, RESPONSE EXPERIMENT FOR CYLINDRICAL VALVELESS PUMP WITH THE AID OF PELTIER DEVICE, Proceedings of 2009 International Symposium on Nano Science and Technology, 有, p. 241, 2009

〔学会発表〕（計4件）

1. 高倉泰浩, 鳥居修一, マイクロポンプ内部の可視化 Visualization Research inside Chamber of Micropump with the Aid of Peltier Devices and Heat Deformation Material, 可視化情報学会全国講演会(鹿児島 2010)講演論文集, p. 175, October 7, 2010, 霧島市国分シビックセンター.
2. Yasuhiro Takakura and Shuichi Torii, Response Experiment for Cylindrical Valveless Pump with the Aid of Peltier Device, INTERNATIONAL WORKSHOP ON THERMOFLUIDS, USM, January 8, 2010, USM (UNIVERSITI SAINS MALAYSIA), Malaysia.
3. Yasuhiro Takakura and Shuichi Torii, RESPONSE EXAMINATION USING X-RAY FOR CYLINDRICAL VALVELESS PUMP WITH THE AID OF PELTIER DEVICES AND HEAT DEFORMATION MATERIAL, GeoX, March 3, 2009, New Orleans, Louisiana, USA.

6. 研究組織

(1) 研究代表者

鳥居 修一 (TORII SHUICHI)

熊本大学・大学院自然科学研究科・教授

研究者番号：30180201

(2) 研究分担者

伊東 繁 (ITOH SHIGERU)

国立沖縄工業高等専門学校・校長

研究者番号：80069567

外本 和幸 (HOKAMOTO KAZUYUKI)

熊本大学・衝撃・極限環境研究センター・

教授

研究者番号：70199462