

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 5 月 27 日現在

機関番号：17104

研究種目：基盤研究（C）

研究期間：2010 ～ 2012

課題番号：22560279

研究課題名（和文） 外部磁界によって駆動可能な体内埋込用マイクロポンプの高吐出圧力化

研究課題名（英文） Increasing pump pressure of implantable micropump drive by external magnetic fields

研究代表者

本田 崇（HONDA TAKASHI）

九州工業大学・工学研究院・教授

研究者番号：70295004

研究成果の概要（和文）：永久磁石を可動子に用いるマイクロポンプは外部磁界で駆動可能なことから、体内埋込型の医療デバイスへの応用が期待できる。本研究では、研究代表者が開発した、弾性板の揺動を利用する揺動型、及びピストンの微小振動を利用するピストン型の 2 種類のマイクロポンプを外部磁界で駆動し、体内埋込時に求められる高吐出圧力化の可能性を実験的に探った。その結果、揺動型を複数個直列に接続する手法が有効であることを実証した。

研究成果の概要（英文）：Since a micropump with a moving part including a permanent magnet can be driven by external magnetic fields, it has a great potential in implantable medical applications. This study focused on two pumping methods that the principal investigator has developed so far. One is an angular oscillation pumping method, in which an elastic film is angularly oscillated, and the other is a piston pumping method based on asymmetry vibration of a piston. The feasibility of increasing the pumping pressure suitable for implantable use was experimentally investigated in details. As a result, the serial connection of micropumps using the oscillating elastic film successfully generated high pressure over 10kPa.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2010 年度	1,200,000	360,000	1,560,000
2011 年度	1,200,000	360,000	1,560,000
2012 年度	900,000	270,000	1,170,000
年度	0	0	0
年度	0	0	0
総計	3,300,000	990,000	4,290,000

研究分野：工学

科研費の分科・細目：工学・電気電子工学

キーワード：電気機器

1. 研究開始当初の背景

マイクロポンプは μ -TAS（集積型化学分析機器）や投薬デバイスなど各種医療・分析機器において性能を左右する重要な構成要素の一つであり、1980 年代後半から現在まで世

界中で精力的に研究が進められてきた。その駆動力やポンピングの方式には大きさや用途に応じ様々なものが提案され、比較的大きなサイズでは電磁モータ利用の遠心ポンプやプランジャ型ポンプなどの電磁型が主流

である。しかし、サイズが小さくなるとスケーリング則で有利な圧電型や静電型が採用され、ポンピングの方式も半導体マイクロマシーニングとの相性からダイヤフラム型が主流となっている。

一方、今後期待されるマイクロポンプの医療応用として、体内埋め込み型マイクロポンプによる薬剤散布や体液シャント、カプセル内視鏡による治療システムなど、生体内における駆動がある。このような場合、圧電型や静電型などの比較的高い電圧印加による駆動では絶縁破壊の危険があり、バッテリーの液漏れも危惧される。安全性を考慮すれば、体の外からワイヤレスで駆動できるマイクロポンプが望ましい。また、一般的なダイヤフラムポンプでは逆止バルブが必要となるが、固着や不純物の詰まりなどの問題があり、信頼性の観点からバルブレス化も必須である。この解決策として、東北大の研究グループではらせん体の可動子を回転磁界で回転させる方式のマイクロポンプを提案し、磁界によるワイヤレス駆動の有用性を示している。しかし、電磁駆動は小型化に不向きという固定観念が根強く、国内外を見回してもほとんど報告例がないのが現状である。

これに対し研究代表者は、以前から外部からの交流磁界による駆動に適した2種類のマイクロポンプを提案し、検討を続けてきた。一つは弾性板の揺動を利用したタイプ（以後、揺動型）、もう一つはピストンの非対称振動を利用したタイプ（以後、ピストン型）である。いずれもポンプ可動子に永久磁石を内蔵し、外部から交流磁界を受けてワイヤレス駆動が可能である。前述の東北大のポンプとの相違は駆動磁界が回転磁界ではなく、より簡便に発生できる交流磁界である点である。この2つのポンプのうち揺動型については以前に産婦人科の医師との共同研究を実施し、胎児水頭症の治療への応用を目指した。しかし、吐出圧力が低く、実用化には高圧力化が課題であった。一方、ピストン型は最近開発に成功したもので、高い圧力が期待されるがその動作メカニズムについてはまだ不明な点が多く、設計指針が確立していない。

2. 研究の目的

前章で述べた背景に鑑み、本研究では、体内埋込型のマイクロ医療デバイスやカプセル内視鏡への搭載が可能な、外部磁界でワイヤレス駆動がでるマイクロポンプの開発を目的とした。駆動原理には前述した外部磁界で駆動の可能な2つの原理を取り上げ、複数の分散配置やピストン形状を検討することによって、高い吐出圧力の付与を目指す。具体的な目標値としては、mmサイズのポンプにおいて10kPa以上の高吐出圧力とした。これは高吐出圧力として知られる圧電駆動

のマイクロポンプと同一オーダーであり、電磁駆動方式としては挑戦的な数値である。

3. 研究の方法

外部磁界で駆動する2種類のマイクロポンプの高吐出圧力化を達成するために、はじめに期待される方策（分散配置、可動子形状の最適化、等）についてcmサイズの拡大モデルを使って検証し、設計指針を確立する。続いて、それら結果を基に実際の応用を想定したmmサイズのマイクロポンプを作製し、評価を行う。具体的な研究の方法は以下の通りである。

(1) 拡大モデルによる基礎検討

ポンプの設計法を確立するために初年度に実施する。提案する2つのポンピング原理に対するcmサイズの拡大モデルを使い、高圧力化のための方策について検討を行う。

① 揺動型ポンプの拡大モデル

可動子の弾性板の振動モードを実験と理論計算から解析し、高吐出圧力を得られる形状や振動の条件を明らかにする。複数のポンプを直列や並列に分散配置することがポンプ特性に与える影響を明らかにする。

② ピストン型ポンプの拡大モデル

高い吐出圧力を発生させるためのピストン形状を流体力学的に解析し、実験によって検証する。また、ピストンの材料（ポリマー材料、金属材料）について検討し、生体適合性のある材料の中から最適な材料を選定する。本ポンプの圧力はピストンの往復運動の行きと帰りの速度差に比例する。そのためピストンの非対称振動を効率よく発生させる振動子の機構を、電磁界解析を援用しながら明らかにし、最適な振動子の構造を決定する。

(2) mmサイズモデルの試作と評価

拡大モデルの結果を受け、実際の応用を想定したサイズ・形状に小型化し評価を行う。具体的には、低侵襲化を意識し外径4mm以下の円筒形状において10kPa以上の吐出圧力を目指す。実施項目は、以下の通りである。

① 揺動型マイクロポンプの試作

拡大モデルの結果に基づき、スケーリング則から各部の最適寸法を導出するとともに、弾性板材質の選定を行い、外径4mmまで細径化したポンプを試作する。拡大モデルにおいて圧力増加に大きな効果のあった直列接続を試み、目標の10kPa以上の吐出圧力の達成を目指す。

② ピストン型マイクロポンプの試作

拡大モデルで高吐出圧力に適したピストン形状が明らかになったことを受け、その形状を外径4mmまで小型化した場合の特性を評価する。さらに、ピストンを励振するための振動子の小型化を行う。小型化に伴い使用する永久磁石の体積が小さくなり、発生力が大幅に低下すると予想される。そこで、振動子

とピストンを結合するバネ部の見直しを行い、圧力低下を抑える。

(3) 駆動コイルの作製

ポンプの基礎特性の評価は、ポンプを固定して行うため、基本的に1軸のコイルにより行う。しかし、ポンプを体内埋込型の医療デバイスやカプセル内視鏡へ応用することを考えると、任意の方向に磁界を印加する必要がある。そこで、まず平面内の任意方向に磁界を印加させる2軸のヘルムホルツコイルとその制御回路を作製し、評価を行う。その結果を基に、3次元で任意方向の磁界を発生させるための3軸のヘルムホルツコイルの作製を行い、任意姿勢のマイクロポンプの駆動を行う。

4. 研究成果

本研究では体内埋込型のマイクロ医療デバイスやカプセル内視鏡への搭載を想定し、外部磁界によって経皮的な駆動が可能、かつ高吐出圧力特性を有する医用マイクロポンプの実現を目指した。外部磁界でワイヤレス駆動可能な2原理のマイクロポンプを試作・評価し、以下のような成果が得られた。

(1) 揺動型マイクロポンプ

① 流量・吐出圧力とも弾性板の形状や材質（とくに弾性率）に強く依存することがわかった。実験的に探索した最適な形状を与えた結果、外径4mmのポンプ単体で100ml/min以

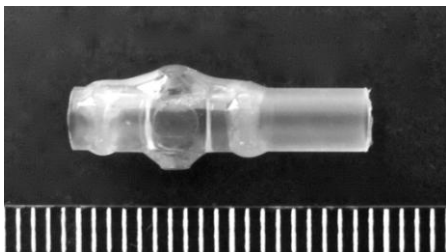


図1 揺動型マイクロポンプ

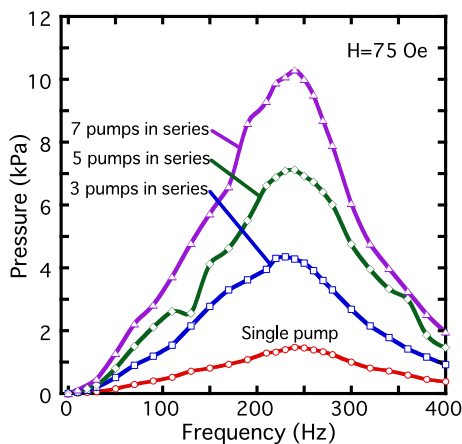


図2 連結個数を変えた場合の圧力と周波数の関係

上の大流量と1.5kPaの吐出圧力が得られた。図1に試作したポンプ（単体）の外観写真を示す。

② 単体では吐出圧力の目標値（10kPa）に達しなかったため、複数個のポンプを直列に接続することで圧力の増加を試みた。図2に、連結個数毎の吐出圧力と周波数の関係を示す。吐出圧力はポンプ個数にほぼ比例して増加し、7個の直列接続時において目標値である10kPaを達成した。

③ 揺動型マイクロポンプの直列接続の応用として、超小型の液冷システムを試作した。本ポンプは配管の内部にポンプ可動子を設置できるため、遠心ポンプを使用した従来技術よりもシステム全体を格段に小型化できることを実証した。

(2) ピストン型マイクロポンプ

① はじめに可動子のピストン形状を検討した。可動子は図3に示すように左から振動子、連結バネ、ピストンの順で構成される。ピストンの形状を従来の円柱形状から、図のように両端部だけ残し、ピストン側面とシリンダー内壁の摩擦が小さくなるようにすることで速度差の増加を図った。また、ピストンの外径を2.85mmから1.45mmまで細径化を行った。

② 続いて振動子の検討を行った。振動子で

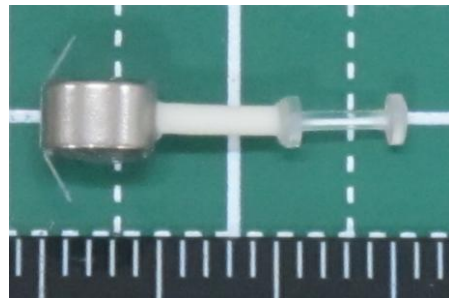


図3 ピストン型ポンプの可動子

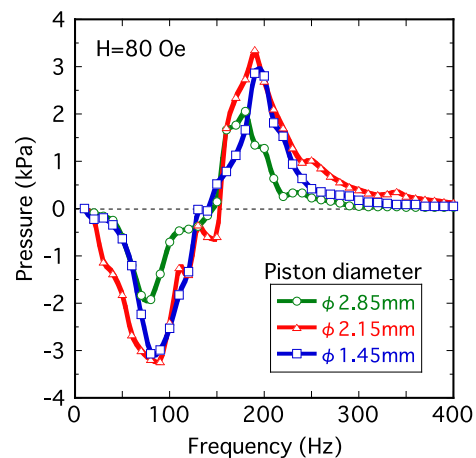


図4 ピストン径を変えた場合の圧力と周波数の関係

は連結バネのバネ定数と耐久性を見直すとともに振動子磁石に取り付ける脚の最適な角度を調べた。その結果、適切な条件においてピストンの往復運動の速度差を増加させることに成功し、ポンプ単体で 6kPa 以上の圧力を達成した。しかし、目標の 10kPa には届かなかった。

本実験の過程において、振動子の脚の角度によっては、双方向送液システムへと展開できる可能性を示した。これは揺動型にはないユニークな特徴である。図 4 に代表的な圧力と周波数の関係を示す。取り付け角度 60° の結果であり、両方向に 3kPa 以上の圧力を発生させていることがわかる。

(3) 駆動装置の作製

体内埋込型マイクロデバイスの姿勢に合わせて任意の方向に磁界を印加するための基礎検討として、3 軸のヘルムホルツコイルを試作した。各コイルに通電する電流値を制御することで任意方向に直流磁界及び交流磁界を印加することができ、また任意の回転面に回転磁界を発生させることも可能である。したがって、例えばカプセル内視鏡への応用時には、外部磁界でポンプを駆動し薬剤散布するだけでなく、カプセル本体を回転させて散布の方向を調整することも可能である。

(4) 本研究の総括

以上述べてきたように、外部磁界で駆動できるマイクロポンプの高吐出圧力化という当初の目的は、揺動型の直列接続によって達成したと判断できる。電磁駆動型、バルブレス構造、ワイヤレス駆動というユニークな特徴を有しつつ、10 kPa 以上の吐出圧力は世界的にも例が無く、そのインパクトは大きいと考える。ただし、医用応用としては研究協力者の医師と議論した結果、更なる小型化が必要であるとの指摘があり、引き続き本研究を発展させていく予定である。

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 2 件)

- ① 山本陽輔、本田崇、弾性フィルムの回転振動を利用した磁気駆動マイクロポンプの直列接続とその応用、日本 AEM 学会誌、査読有、Vol. 21, No. 2, 2013 (印刷中)
- ② 山下真紀、本田崇、カプセル内視鏡に搭載する細胞診ブラシ用マイクロ磁気アクチュエータの試作、電気学会論文誌 A, Vol. 133, No. 6, 2013 (印刷中)

[学会発表] (計 7 件)

- ① 山本陽輔、本田崇、弾性フィルムの回転振動を利用した磁気駆動マイクロポンプ

の直列接続とその応用、第 21 回 MAGD A コンファレンス、PS5, 2012 年 11 月 21 日、仙台市戦災復興記念館 (仙台)

- ② 山内究、本田崇、外部磁界で駆動可能な双方向バルブレスマイクロポンプの開発、平成 24 年度電気関係学会九州支部連合大会、11-2A-12、2012 年 9 月 24 日、佐賀大学 (佐賀)
- ③ 山本陽輔、本田崇：磁気駆動マイクロポンプを直列配置した小型液冷システムの試作、第 24 回「電磁力関連のダイナミクス」シンポジウム、17A1-2、2012 年 5 月 17 日、富山国際会議場 (富山)
- ④ 山田慎太郎、三好優矢、本田崇、カプセル内視鏡に搭載する細胞診ブラシ用マイクロアクチュエータの試作と評価、電気学会マグネティックス研究会、MAG-11-073、2011 年 11 月 16 日電力中央研究所 (我孫子)
- ⑤ 山本陽輔、本田崇、弾性板の扇ぎを利用したマイクロポンプによる液冷システムの試作、日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会 Robomec2011、2P1-M09、2011 年 5 月 27 日、岡山コンベンションセンター (岡山)
- ⑥ 橋本峻輔、本田崇、非対称振動を利用した磁気駆動マイクロポンプの特性向上、第 34 回日本磁気学会学術講演会、6pC-7、2010 年 9 月 6 日、つくば国際会議場 (つくば)
- ⑦ 黒木達哉、本田崇、直列配置した液冷システム用マイクロポンプの基礎特性、第 34 回日本磁気学会学術講演会、6pC-8、2010 年 9 月 6 日、つくば国際会議場 (つくば)

[図書] (計 1 件)

- ① 本田崇、他 27 名、あいうえお順で 20 項目、磁気の医療応用研究の動向、磁気応用による医療へのシーズ技術調査専門委員会編、電気学会技術報告第 1260 号、ISSN 0919-9195, 2012 年 9 月, pp. 20-22

6. 研究組織

(1) 研究代表者

本田 崇 (HONDA TAKASHI)
九州工業大学・工学研究院・教授
研究者番号：70295004