回転磁場を用いたマイクロロータリーポンプの開発

Design of a Micro Rotary Pump Worked by a Rotational Magnetic Field

○正 菊地 謙次 正 望月 修

Kenji KIKUCHI, Toyo University, 2100, Kujirai, Kawagoe, Saitama 350-8585, Japan
Osamu MOCHIZUKI, Toyo University, 2100, Kujirai, Kawagoe, Saitama 350-8585, Japan

A micro pump has not been developed for a micro TAS to transport blood because of size effects. We have developed a micro rotary pump worked by a rotary magnetic field. The rotor was designed by morphology based on mimetics of a shape of mosquito's sucking blood pump system with high performance. This pump consists of a rotor implanted magnets, a square-shaped casing and four input-output ports. We measured pressure and flow rate of the scale-up model of the micro rotary pump and compared them with numerically estimated values.

Key Words: Micro pump, Rotational magnetic field, Mosquito, Bio mimetics

1. はじめに

近年医療や生化学の分野で、 μ TAS(micro Total Analysis System)や Lab-on-a-chip と呼ばれる小型の化学分析機器の開発が行われている。これまでの大型の機器の機能をチップ上に集約されており、解析時間短縮や低コスト、携帯性、廃液減少などが見込まれている。内部流体デバイスの微小化に伴う駆動流体に対する比界面積の増加により、流路壁面と駆動流体との界面における摩擦損失の影響が大きくなり、流路全体での圧力抵抗が大きくなり、 μ TAS 内部に搭載する流体駆動デバイスの開発には多くの障壁を抱えている。また、微細加工技術の発展に伴い、微小機械部品の製作が容易に行えるようにはなってきたが、部品点数の少ないシンプルな構造が望まれている。本研究では、蚊の吸血ポンプのポンプ形状を模したマイクロポンプにおける駆動部の設計とともに、駆動方式に着目し、磁気駆動による微小ロータリーポンプの開発を行ってきた。蚊の吸血ポンプと同等の体積を持ち、目標流量毎分 $1\mu\text{l}$ を目指すポンプ設計とした。外部駆動源を持つポンプの設計・駆動メカニズムとモデルによるポンプ性能評価を行った結果を報告する。

2. マイクロポンプ設計

2-1 ポンプローター設計 生物の持つ微小ポンプの代表として蚊の吸血ポンプに着目し、ポンプ形状を観察したところ、特異な形状を持つことがわかってきた⁽¹⁾。ポンプ形状の詳細を観察するために、蚊の頭部を厚さ $0.5\mu\text{m}$ でスライスし、組織染色を行い、ポンプの断面形状の観察を行った。その結果得られた蚊の吸血ポンプの断面像を Fig.1 に示す。二つのポンプのうち後部の咽頭ポンプ(Pharynx pump)の断面形状は、三方向からの筋収縮により拡張・収縮運動を行う。拡張時の形状は、定幅図形(どの差渡し幅も一定である図形)の代表といえるルーローの三角形の酷似したものであった。さらに、このルーローの三角形は、他のどの定幅正多角形よりも、拡張比(辺弧部の移動による内部面積比)が最大となる図形であることから、限られた駆動空間を効率的に利用するための生物進化の上形成された最適化形状であるといえる。

これまでこのルーローの三角形は、エンジンローター部やマンホール形状、葉錠など工業的な応用・利用がされている。以上のことより本研究では、マイクロロータリーポンプの流体駆動部であるローター部に蚊の吸血ポンプの断面形状を採用した。

2-2 ポンプ部設計 ポンプ形状としてルーローの三角形を採用したが、蚊のように弧部を振幅させるポンプ駆動ではアクチュエータの多用や、機械部品の複雑化よりマイクロポンプへの応用は困難である。そこでルーローの三角形を利用し、

Fig.1 Cross sectional shapes of mosquito's pumps located in head

Fig.2 Rotor and casing of the micro rotary pump.

容積変化を容易に作り出せるポンプ形状を Fig.2 に示す構造を考案した。正方形のケーシング内部は、ルーローの三角形がローターとして配置された回転式ギアポンプとなっている。また、正方形ケーシングの各頂点には内部流体の流入出ポートを設けてある。図中右に示すようにローター回転に伴い、各ポート部におけるケーシングとローターで囲われた部分の面積は変化する。この面積変化がポンプ運動として体積変化を引き起こし、内部流体を撻動させることになる。よってこのポンプの流入出部には内部流体を駆動させるために一方向性の弁が必要とされる。正方形ケーシングの一辺を $a(\text{m})$ とし、各ポート部に形成されるケーシングとローターで囲われた面積を $S(\text{m}^2)$ とした時に、ローター回転における面積変化を Fig.3 に示す。横軸はローターの回転角 θ を示し、縦軸はポート近傍におけるローターとケーシングで囲われ

た面積 S を一辺が a の正方形の面積 a^2 で無次元化したものを示している。無次元面積 S/a^2 にケーシングの一辺の長さ a の面積 a^2 とローターの奥行き幅 d を掛けると体積流量を得ることができる。面積変化 $\Delta S/a^2 > 0$ であれば、ポンプ内から流体が流出し、 $\Delta S/a^2 < 0$ であれば流入することを示している。図内に示す各ポートでは、位相差が $\pi/2(\text{rad})$ で、周期的な流入・流出が連続的に行われている。また、全ポートにおいて一周期は $2\pi/3(\text{rad})$ であった。これより各ポートにおける面積変化周波数 $f_p(\text{rad/s})$ は、ローターの回転周波数 $f_r(\text{rad/s})$ の三倍であり、面積変化の最大振幅が $A_{\max}=0.15$ であったため、ポートに備える一方向弁が 100% の効率だとすると、各ポートにおける面積変化量は $A_{\text{port}}=3 A_{\max}=0.45$ となり、また全ポートにおける総面積変化量は $A_{\text{all}}=4 A_{\text{port}}=1.8$ となった。これはローター一回転によって、正方形ケーシングの面積 a^2 の 1.8 倍の面積変化が得られることとなる。これよりローターおよびケーシングに奥行き幅 d を持つポンプを作成すると、得られる体積流量 Q は、 $Q=1.8a^2df(\text{m}^3/\text{s})$ となる。仮にケーシング一辺の長さ $a=500\mu\text{m}$ 、ポンプ奥行き幅 $d=50\mu\text{m}$ とすると、目標流量 $1\mu\text{l/s}$ を達成するためには、ローター回転周波数 $f=0.8\text{Hz}$ となる。本研究では、一方向性バルブを機械部品簡素化のためにディフューザノズル型のダイナミックバルブを利用しようと考えている。このバルブは、流路形状のみで一方向性のバルブとしての機能を持つことができるシンプルな構造が特徴であるが、整流効率はこれまでの研究報告例⁽²⁾では 0.2 程度である。このバルブを採用するにあたって、ローターの必要回転周波数をあらかじめ 5 倍程度増加して設計を行うこととする。

ローターは、回転時に円運動で回転せず、偏心して回転する。この偏心回転を行うローターに直接モータ等の回転機構を装備することを、ミクロンオーダーの微小空間で実現するのは困難である。そこで、ローター内部に 2 つの磁石を埋め込み、マグネチックスターラーを用いて外部から回転磁場を印加することによって駆動させる。

3. モデル実験

設計したポンプを MEMS で微細加工する前に、ポンプ性能を評価するために、Fig.4 に示すスケール比 1000 倍の ABS 樹脂製のモデルを作成した。ガラスシャーレに収まる大きさで作成し、ケーシングには 4 つ入出力ポートを設けた。ローター内部には、ネオジウム磁石がお互いに反対の極が表面に向くよう取り付けられた。作成したポンプモデルをガラスシャーレ内に収め、漏れが無いようシリコンボンンドでシーリング加工し、各ポートに鉛直にプラスチックチューブを取り付けた。ポンプ内部に水を浸し、マグネチックスターラー上で回転磁場を与えローターを回転させた。取り付けたプラスチックチューブ内に水を加え、負荷を与えてポンプの駆動と得られた流量変化を観察した。ポンプモデルにおけるポンプ負荷に対するポンプ周波数と体積流量を Fig.5 に示す。横軸にはポンプ駆動に対し加えた負荷圧力を示し、縦軸にはその負荷圧力に対するポンプの周波数と体積流量を示している。本来ポンプに作用する圧力抵抗が増加した時、ポンプ駆動に負荷となり、駆動周波数は低下し、得られる体積流量も減少することが予想されていた。しかしながら、本実験で得られた結果は、従来の考察とは異なり、圧力負荷に伴い周波数、体積流量の増加が観察された。本実験は 1 プロットあたり 100 回の繰り返し実験で得られたものである。今後負荷圧力を増減させ最大負荷圧力を求め、更にポンプ性能を評価していく。

回転磁場によってローターは回転し、その回転に応じた流量を得られた点では、微小化への実現が示唆できた。

Fig.3 Change in flow rate at each port.

Fig.4 Scale-up model of the micro rotary pump worked by rotational magnetic field.

Fig.4 Pump performance of micro rotary pump model. Comparison among load pressure, pump frequency and volume flow rate.

4. まとめ

蚊の吸血ポンプの形状を模したマイクロポンプを実現するために、回転磁場駆動型のマイクロロータリーポンプの設計を行った。モデル実験からこのポンプの有効性を示唆することができた。

参考文献

- (1) 菊地謙次, 寺田信幸, 望月修, 蚊の吸血ポンプの性能評価, 生体医工学, Vol.46 No.2 (2008) pp.232-237
- (2) T. Gerlach, Fundamentals of Dynamic Flux Rectification as the Basis of Valve-Less Dynamic Micropumps, Micro System Technologies '96, (1996), p.445