ECF ジェット冷却を用いた SMA 駆動マイクロポンプ*

横田 眞一^{*1}, 吉田 和弘^{*1}, 岡安 毅^{*2}
川上 和英^{*2}, 大坪 泰文^{*3}, 枝村 一弥^{*4}

An SMA-Driven Micropump Using ECF Jet Cooling

Shinichi YOKOTA^{*5}, Kazuhiro YOSHIDA, Takeshi OKAYASU,
Tomohide KAWAUE, Yasufumi OTSUBO and Kazuya EDAMURA^{*5} Precision and Intelligence Laboratory, Tokyo Institute of Technology,
4259 Nagatsuta-cho, Midori-ku, Yokohama, Kanagawa, 226-8503 Japan

For high power micromachines using fluid power in millimeter size, micropumps are needed as fluid power sources. An SMA or Shape Memory Alloy is one of promising actuators for micropumps, however, the response is very low on the cooling phase. To overcome the problem, the paper proposes an SMA-driven micropump using ECF jet cooling. The ECF or Electro-Conjugate Fluid is a new kind of dielectric functional fluid which produces jet flows between high DC voltage-applied rod electrodes and realizes a simple cooling mechanism. Firstly, the micropump is proposed and characteristics of the actuator using ECF jet cooling are experimentally investigated. Effectiveness of the ECF jet cooling is verified. Secondly, a micropump in 1 cm-cubic size is fabricated and the basic characteristics are experimentally investigated. The optimal parameters are obtained and the maximum output flowrate and pressure of 11 mm³/s and 0.18 MPa are realized. Finally, for an optimal design method, a mathematical model is derived and verified through simulations.

Key Words: Micromachine, Pump, Fluid Machinery, Actuator, SMA (Shape Memory Alloy), ECF (Electro-Conjugate Fluid), Thermal Response

1. ま え が き

発電施設の内径 10 mm 程度の細管内で検査, 補修作業を行うマイクロメンテナンスシステムなどの実現を目指し, マイクロマシンの研究開発がすすめられている⁽¹⁾⁽²⁾. このような作業を行うマイクロマシンを実現するため, 著者らの一部は, 高パワー密度でミリメートルサイズのアクチュエータに適した特長を有する流体パワーを用いたマイクロマシンの開発をすすめており⁽³⁾⁽⁴⁾, 流体パワー源となるマイクロポンプが必要とされている. しかし従来の多くのマイクロポンプは液体あるいは気体の搬送用であり⁽¹⁾, 出力パワーは流体パワー源としては不十分である. 著者らの一部は, ポンプ室となるペローズを圧電素子により共振駆動し吐出流量の増大を図った高パワー密度のマイクロポンプを開発しているが⁽⁵⁾, 磁界により粘度制御可能な MR 流体⁽⁶⁾などの基底粘度が高い作動流体では減衰

が大きいため共振駆動は困難と考えられる.

SMA (Shape Memory Alloy, 形状記憶合金) はシンプルな構造で出力エネルギー密度が高いため高出力マイクロポンプ駆動の有望なアクチュエータの一つである. しかし冷却時の熱応答はきわめて遅く, ポンピング周波数, したがって吐出流量の増大は困難である. 著者らの二人は, 油圧比例制御弁のため, 強制油冷などによりバンド幅を 60 Hz まで改善した SMA アクチュエータを実現している⁽⁷⁾. しかしその冷却機構は比較的大形となるためマイクロポンプへの適用は困難である.

そこで本論文では, ECF ジェットによる SMA アクチュエータのシンプルな液体強制冷却機構を用いた SMA 駆動マイクロポンプを提案する. ECF (Electro-Conjugate Fluid, 電界共役流体) は, 直流高電圧を印加した線状電極間に自発的にジェット流(電極間隔 2 mm, 電圧 2 kV で流速 50 mm/s 程度)を生じる新しい機能性流体であり⁽⁸⁾, デカン二酸ジブチル (DiButyl Decanedioate, 以降, DBD と呼ぶ) などが知られている. 提案する SMA 駆動マイクロポンプは, 作動流体の粘度によらず大流量を吐出できると期待される. 当然, 各種の液体の搬送などにも応用可能である.

本論文では, まず, ECF ジェット冷却を用いた

* 原稿受付 2000 年 2 月 8 日.

^{*1} 正員, 東京工業大学精密工学研究所 (〒226-8503 横浜市緑区長津田町 4259).^{*2} 東京工業大学大学院.^{*3} 千葉大学工学部 (〒263-8522 千葉市稲毛区弥生町 1-33).^{*4} (有) 新技術マネイジメント (〒124-0023 葛飾区東新小岩 2-9-1-306).

E-mail: syokota@pi.titech.ac.jp

SMA 駆動マイクロポンプを提案し、その SMA アクチュエータの特性について実験的に検討する。次に、10 mm 立方サイズのマイクロポンプを試作し、その構造パラメータおよび基本特性に関する実験的検討を行う。最後に、最適設計手法確立のための第 1 段階として数学モデルを導出し、シミュレーションによりその妥当性を検討する。

2. ECF ジェット冷却を用いた SMA 駆動マイクロポンプの提案

2.1 提案するマイクロポンプの動作原理 提案するマイクロポンプの構造を図 1 に示す。本マイクロポンプは、周囲に軸方向に張られた SMA 細線により伸縮されるベローズ、ベローズの外側に配置され内面に ECF 用線状電極を有する円筒(以降、外側円筒と呼ぶ)および吸入側と吐出側の二つの逆止弁から構成される。SMA 細線は加熱により収縮することによりベローズを圧縮し、吐出側逆止弁を通して作動流体を吐出させる。冷却時にはベローズのばね力により SMA 細線は引き伸ばされ、吸入側逆止弁を通して作動流体を吸入しながらベローズは伸長する。パルス電流による通電加熱と冷却の繰返しによりポンピングは行われる。提案するマイクロポンプでは、熱応答性を高めるため SMA は細線とし、ベローズと外側円筒の間に満たされた ECF のジェット流により強制冷却を行う。なお熱は外側円筒の大きな表面積から環境に放熱される。

図 2 は SMA 細線の応力ひずみ線図の模式図である。提案するマイクロポンプでは、A 点は高压で吐出した状態、B 点は低压で吸入した状態に相当する。したがって吐出圧力 P に対する吐出流量 Q は、

$$Q = A_b x f = \begin{cases} Q_{\max} \left(1 - \frac{P}{P_{\max}} \right) & (P < P_y) \\ 0 & (P \geq P_y) \end{cases},$$

$$P_y = \frac{A_s}{A_b} \sigma_{\max}, Q_{\max} = A_b L_s \varepsilon_0 f, P_{\max} = \frac{\varepsilon_0 E_s A_s}{A_b}, \dots (1)$$

と求められる。ここで x, f, L_s, A_s, E_s および $\sigma_{\max}$ は、SMA 細線の変位、駆動パルス周波数、長さ、断面積の総和、縦弾性係数および降伏応力、 A_b はベローズの有効断面積である。出力特性は、2 点 $(P, Q) = (0, Q_{\max})$ と $(P_{\max}, 0)$ を結ぶ直線として表される。

2.2 SMA アクチュエータの基礎実験 図 3 に示す ECF ジェット冷却を用いた二つの SMA アクチュエータを試作し、特性実験を行った。図 3 (a) に示すモデル A は外側円筒内面に中心軸と平行に線状電極を配置したもので、中心軸と垂直な平面内で循環流を発生する。図 3 (b) に示すモデル B は外側円筒内面に中心軸と直交して線状電極を配置したもので、中心軸を含む平面内で循環流を発生する。SMA 細線には母相変態終了温度 65°C 、直径 $75 \mu\text{m}$ 、長さ 14 mm の Ti-50 Ni(at%) 細線を 4 本、ECF には DBD を用

Fig. 2 Static characteristics of an SMA wire

Fig. 1 Proposed SMA-driven micropump using ECF jet cooling

Fig. 3 Fabricated SMA actuators using ECF jet cooling

いる。アクチュエータ上部のばねのばね定数は 1.9 kN/m である。特性実験では、SMA 細線に周期的パルス電流を通電し、SMA 細線の収縮変位に相当する出力軸変位を測定レンジ 1 mm のリニアポテンシオメータで測定する。駆動電流のパルス幅は 20 ms であり、出力変位を測定し、振幅変化が 3% 以下となった定常状態において出力変位振幅を評価する。

図 4 は駆動パルス周波数 5 Hz におけるモデル A の出力変位の測定例である。出力変位はパルス電流通電時に急しゅんに増加し、電流が切られると回復している。ECF に電圧を印加しない場合、SMA の平均温度が高いため、図 4 (a) に示すように最大出力変位は大きく、変位振幅は小さい。ECF 印加電圧を増加すると、冷却性能が改善されるため図 4 (b), (c) のように最大出力変位は減少し、出力変位振幅は増大する。ECF ジェット冷却の効果は、出力変位波形の変化としても現れている。ただし ECF 印加電圧が高過ぎると、最大出力変位は小さくなるが相変態が十分に生じず図 4 (d) のように出力変位振幅は小さくなる。モデル B でも同様であった。

図 5 は駆動パルス周波数を 5 Hz としたときの出力変位振幅と ECF 印加電圧の関係を示す。SMA 細線

への供給電力は出力変位振幅が最大となる値を用いている。図 5 より、モデル A の方がモデル B より出力変位振幅が大きく、優れていることが確認された。

3. マイクロポンプの試作と特性実験

3・1 マイクロポンプの試作 図 6 に試作したマイクロポンプを示す。実験時に組立て、分解するためのねじ部を除いた有効サイズは直径 9 mm、高さ 10 mm である。電極配置はモデル A であるが、SMA 細線を ECF 電圧印加用負電極としても用いたシンプルな配置の検討のため、図 6 (b), (c) に示すモデル A₁ およびモデル A₂ を試作した。SMA 細線は母相変態終了温度 65°C、直径 75 μ m、長さ 6 mm の Ti-50 Ni (at%) 細線 8 本、ECF は DBD である。ペローズは外径 6.2 mm、高さ 2.0 mm、有効断面積 19 mm²、ばね定数 8.9 kN/m である。逆止弁の弁体は厚さ 20 μ m

Fig. 5 Measured amplitude of SMA actuators

Fig. 4 Measured output displacement of SMA actuator model A

Fig. 6 Fabricated micropump

(空気中での共振周波数 6 kHz)であり、電鍍加工により製作している。作動流体は水道水(粘度 1 mPa・s)である。

3・2 無負荷吐出流量 無負荷特性について検討した。吐出流量は 120 s 間の吐出体積をメスシリンダにより測定し求めている。ペローズの出力変位は測定レンジ 1 mm の静電容量形変位センサで測定している。駆動電流パルス幅は 20 ms であり、各測定データはサンプリング周波数 1 kHz で A/D 変換され、パーソナルコンピュータに入力される。ECF の最大印加電圧は放電が生じない 2 kV である。

3・2・1 ECF 用電極配置 図 7 は吐出流量と SMA 供給電力の関係をモデル A₁ について示す。黒塗りの記号は測定値、白抜きの記号は出力変位振幅にペローズ有効断面積および駆動パルス周波数を乗じた推定値を示す。測定流量と推定流量は定性的にはほぼ一致することが確認された。また ECF 印加電圧 2 kV, SMA 供給電力 0.45 W のとき、最大吐出流量が得られることが確認された。モデル A₂ も同様である。

図 8 は吐出流量と駆動パルス周波数の関係を示す。ECF 印加電圧は 2 kV, SMA 供給電力は 0.45 W である。駆動パルス周波数 5 Hz 未満では、SMA 細線が瞬間的に過熱するため測定不可能であった。結果と

して、モデル A₁ の方がモデル A₂ に比べ大きな吐出流量が得られた。以下ではモデル A₁ を用いる。

3・2・2 SMA 母相変態終了温度 SMA 細線の母相変態終了温度が高く環境との温度差が大きいと、外側円筒からの放熱量が増すため応答性が改善される可能性がある。そこで母相変態終了温度 100°C の SMA を適用してみた結果、最大変位振幅 57 μm と母相変態終了温度 65°C の場合の値 50 μm と比べ大きい値が得られた。以下では母相変態終了温度 100°C の SMA を用いる。

3・2・3 逆止弁の弁体厚さ 弁体が厚いと開度が小さいため逆止弁における圧力損失が大きくなり、逆に薄いと機械的強度が低下すると考えられる。そこで弁体の厚さ 20 μm と 10 μm (空気中での共振周波数 3 kHz) の場合について吐出流量を測定した。その結果、弁体厚さ 10 μm において大きい吐出流量が得られ、永久変形も見られないことが確認された。以下では逆止弁厚さ 10 μm を用いる。

3・2・4 駆動電流パルス幅 本マイクロポンプでは強制冷却が加熱時にも継続されるため、高温時に十分な相変態を生じさせるためにはその分高いエネルギーの供給が必要である。この不要な加熱を避け、冷却媒体を低温に保つためには駆動電流パルス幅は小さい方がよいと考えられるので、これを実験的に検討した。

Fig. 7 No-load output flowrate of the fabricated micropump model A₁

Fig. 8 No-load output flowrate of the fabricated micropump

(a) Output displacements

(b) Output flowrate

Fig. 9 No-load output flowrate with different driving pulse width

図9(a)はペローズの出力変位, 図9(b)は吐出流量と駆動電流パルス幅の関係を示す。ただしパルス幅1 ms未満では, 瞬時大流量により逆止弁弁体の永久変形が見られている。図9より, 小さいパルス幅で吐出流量が大きいことが確認された。さらに, パルス幅1 msにおいて SMA 供給電力を変え吐出流量を測定した結果, 最終的に SMA 供給電力0.7 Wにおいて無負荷吐出流量11 mm³/sが実現された。

3・3 負荷印加時の吐出流量 ポンプ性能として負荷印加時の吐出流量を測定した。小流量で負荷圧力を印加するため, 吐出ポートに負荷用ペローズを取付けた。このときポンプ吐出流量, すなわち負荷用ペローズの流入流量は,

$$Q = A_{bL} \frac{dx_{bL}}{dt} = A_{bL} \frac{d(PA_{bL}/K_{bL})}{dt} = \frac{A_{bL}^2}{K_{bL}} \frac{dP}{dt} \quad \dots\dots\dots (2)$$

と与えられる。ただし x_{bL} , A_{bL} , K_{bL} は負荷用ペローズの変位, 有効断面積およびばね定数であり, P はポンプ吐出圧力, t は時間である。

実験では, 吐出流量 Q を吐出圧力 P の測定値から式(2)により求めた。負荷用ペローズの有効断面積37 mm², 長さ13 mm, ばね定数8.8 kN/mである。吐出圧力 P は測定レンジ0.2 MPaの半導体形圧力センサで測定し, サンプル周波数10 HzでA/D変

換しパーソナルコンピュータに入力している。

図10(a)は吐出圧力の時間変化である。若干の乱れはあるがほぼ一次遅れ応答の波形であり, 最大吐出圧力0.18 MPaが得られた。図10(b)は吐出圧力と図10(a)の結果から一次遅れ応答波形を仮定し求めた吐出流量の関係を示す。出力特性が2・1節で述べたように直線状であることが確認された。

4. 熱収支に基づく数学モデルの構築

4・1 熱収支に基づく数学モデル 最適設計手法確立の第1段階として, 熱収支に基づく数学モデルを構築した。SMA 細線は十分に細いため断面内におけ

Fig. 11 Static characteristics of an SMA wire with phase transformation temperature of 65°C

(a) Time history of output pressure

(b) Relation between flowrate and output pressure

Fig. 10 Measured output characteristics under load

Fig. 12 Simulation results of SMA actuator model A

Fig. 13 Identified heat transfer coefficient h_c

Fig. 14 Simulation results of micropump with SMA phase transformation temperature of 65°C

る温度分布は一樣であり、また外側円筒の肉厚は十分に小さく熱抵抗は十分に小さいと仮定すると、熱エネルギーの収支より、

$$M_s C_s \frac{dT_s(t)}{dt} = q(t) - h_c A_s (T_s(t) - T_c(t)) \quad \dots\dots\dots (3)$$

$$M_c C_c \frac{dT_c(t)}{dt} = h_c A_s (T_s(t) - T_c(t)) - h_e A_c T_c(t) \quad \dots\dots\dots (4)$$

が成立する。ただし M は質量、 A は表面積、 C は比熱、 $T(t)$ は環境に対する相対温度、添字 s, c は SMA および ECF を表し、 h_c は SMA と ECF 間の熱伝達率、 h_e は ECF と環境間の熱伝達率、 $q(t)$ は SMA 供給電力瞬時値である。図 11 は母相変態終了温度 65°C の SMA 細線の静特性の測定例であり、破線は 1 次および 5 次曲線を接続した本数学モデルで用いる近似曲線である。ただし本実験でほとんど使用しない領域は簡略化している。

図 12 は 2・2 節で述べた SMA アクチュエータモデル A のシミュレーション結果である。ただし熱伝達率 h_c は同シミュレーションにより同定した図 13 の

Fig. 15 Simulation results with different surface area A_c of outside cylinder

結果を用いている。出力変位波形が良好に一致することが確認された。図 14 は母相変態終了温度 65°C の SMA を用いたマイクロポンプに対し図 13 の熱伝達率 h_c を用いた結果である。ECF 印加電圧 2 kV では良好な一致をみている。

4・2 ポンプ性能の改善 マイクロポンプの吐出流量の増大について検討するため、外側円筒の表面積 A_c を変え吐出流量を 4・1 節で得られた数学モデルを用い求めた。図 15 にシミュレーション結果を示す。SMA 母相変態終了温度は 65°C である。外側円筒表面積の増加により吐出流量を増大できることが確認された。

5. あとがき

本論文では、作業を行う実用的な流体駆動形マイクロマシンの流体パワー源として、ECF ジェット冷却を用いた SMA 駆動マイクロポンプを提案、試作し、その特性について実験的、理論的に検討した。得られたおもな結論は以下のとおりである。

(1) ECF ジェット冷却を用いた SMA 駆動マイクロポンプを提案した。

(2) SMA アクチュエータおよび直径 9 mm、高さ 10 mm のマイクロポンプを試作し特性実験をおこない、提案する手法の有効性を確認するとともに、最適パラメータを実験的に求めた。その結果、最大吐出流量 11 mm³/s および最大吐出圧力 0.18 MPa を実現した。

(3) 熱収支に基づく数学モデルを構築し、マイクロポンプの吐出流量増大についてシミュレーションにより検討した。

文 献

- (1) *Proc. IEEE 10th Annual Int. Workshop on Micro Electro Mechanical Systems (MEMS' 97)*, (1997).

- (2) 北原時雄, 産業科学技術研究開発制度における「マイクロマシン技術」, 機誌, **97**-905(1994), 255-258.
 - (3) 吉田和弘・横田眞一, 流体パワーを用いたマイクロアクチュエータに関する研究(第1報, 微小化に適したアクチュエータ方式の検討と管内走行機械への応用), 油圧と空気圧, **25**-2(1994), 281-288.
 - (4) 吉田和弘・高橋健・横田眞一, 流体パワーを用いた管内走行マイクロマシン(管径に適應できるメカニズム), 機論, **62**-601, B(1996), 3341-3346.
 - (5) 朴重濠・横田眞一・吉田和弘, 共振駆動を用いた高パワー密度の圧電マイクロポンプ, 機論, **65**-631, C(1999), 1071-1077.
 - (6) 吉田和弘・高松環・横田眞一, MR 流体を作動流体としたマイクロバルブ(マイクロ磁気回路の検討), 機学山梨講演会講論集, (1999-10), 131-132.
 - (7) 横田眞一・吉田和弘・坂東賢一・須原正明, 形状記憶合金アレイアクチュエータを用いた小形比例弁, 機論, **62**-593, B (1996), 224-229.
 - (8) 横田眞一・貞本敦史・近藤豊・大坪泰文・枝村一弥, 電界共役流体(ECF)を応用したマイクロモータ(ステータ電極(SE)形マイクロ ECF モータの提案), 機論, **66**-642, C(2000), 627-633.
-