無音駆動型 SMA チューブポンプの試作と特性評価

Prototype and Characteristic Evaluation of a Soundless Type Tube Pump Using Shape Memory Alloy Actuators

谷口 浩成^{*1}(正員), 田内 寿治^{*1} (学生員), 小林 正樹^{*2}, 門脇 信傑^{*2}

Hironari TANIGUCHI (Mem.), Toshiharu TAUCHI (Stu. Mem.), Masaki KOBAYASHI, Nobuhiro KADOWAKI

The purpose of this research is to develop a novel infusion pump using shape memory alloy (SMA) actuators. Conventional infusion pumps are used motors as a driving source. The pump is also commonly used as a blood pump. However, the motor causes noises and vibrations. In a medical field, these phenomena maybe give patients a discomfort feeling. Therefore, we focus attention on SMA actuators as the driving source instead of motors. SMA actuators have many advantages such as low mass, flexibility, small size and silent drive. In this paper, we report the driving principle, the structure and fluid transportation method of this pump. We also present as basic characteristic of the pumps.

Keywords: Pump, Actuator, Shape memory alloy

1 緒言

医療現場で使われている輸液ポンプ[1]は、駆動源にモータが用いられており、モータの回転を利用してチューブをしごくことにより、液体を送るというものである。長所として、チューブ内にしか流体が流れないため、チューブを交換するだけで本体の分解清掃を必要とせず、メンテナンスが容易であることが挙げられる。また、チューブの寸法を変更することで、幅広い流量調節が可能であり、汎用性に優れている。しかし、容積型のポンプであるため、回転中にチューブの出口が閉塞されると流路内に異常な高圧が生じ、流路が破裂する危険性がある。また、医療現場において輸液ポンプは患者の傍で使用されることもあり、モータの駆動音と振動が、患者にとって騒音となり不快にさせる恐れがある。そこで我々は、モータの代わりになる輸液ポンプのアクチュエータとして、形状記憶合金

(Shape Memory Alloy, 以下 SMA と略す)に着目した。SMA は小型、軽量、単位体積当たりの発生力が高いなど多くの利点を持つことに加え、SMA の駆動時に駆動音を発生させない点が、輸液ポンプのアクチュエータとして適していると考えられる。これまでも稲葉ら[2]や横田ら[3]によって SMA アクチュエータを用いたポンプが提案されている。また我々は、コイル状の SMA と圧縮ばねを用いたポンプの開発を行い、フィン

ガーでチューブをしごき、送液を行う SMA チューブポンプを試作し、送液できることを明らかにした[4]。しかしながら、安定した流量特性を得ることができなかった。我々は、この主たる原因が SMA アクチュエータの駆動方法にあると考えた。すなわち、SMA アクチュエータは動作する際の初期状態（全長）によって発生力および応答性が変化するため、このことがポンプの流量特性に影響を与えていると考えた。

これらのことを踏まえて本論文では、SMA の長さを調節できる機構と、チューブの圧縮力およびフィンガーの変位を調整できる機構を組み込んだ SMA チューブポンプを提案する。はじめに、SMA チューブポンプの駆動原理、構造および設計手法について述べ、最後に負荷圧力-流量特性実験の結果を報告する。

2 SMA チューブポンプの送液方法と駆動原理

SMA チューブポンプの送液方法は、フィンガー方式を採用した[5]。従来のフィンガー方式は、モータとカムプレートにより、複数のフィンガーを連続動作させ、チューブをしごくことで送液を行う方法である。本研究ではカムプレートの代わりに、SMA アクチュエータと圧縮ばねを用いたフィンガーを3セット用いて、チューブをしごき送液を行う。送液方法を Fig.1 に示す。図の左側から液体を吸引し、フィンガーを①から④のように順次動作させ、右側から吐出する。

次に、フィンガーの駆動原理を説明する(Fig.2 参照)。

(1) 初期状態では、フィンガーが圧縮ばねの力で上

連絡先： 谷口 浩成, 〒708-8509 岡山県津山市沼 624-1, 津山工業高等専門学校, e-mail: taniguti@tsuyama-ct.ac.jp

^{*1} 津山高専 ^{*2} 協和ファインテック株式会社

- 向きに力が働きチューブを押さえつけている。
- (2) SMA アクチュエータは形状記憶効果により、電流を印加すると発生するジュール熱で収縮する。
 - (3) SMA アクチュエータに接続されているフィンガーが引っ張られる。
 - (4) フィンガーが下降して、チューブは開放状態となる。
 - (5) 電流の印加を停止することで、SMA に発生するジュール熱が抑えられる。
 - (6) 自然冷却により、SMA の熱が奪われ、SMA アクチュエータの力が弱まる。
 - (7) SMA アクチュエータの力が圧縮ばねの力よりも弱くなると、フィンガーが上昇しチューブを押す。

流入口と流出口のフィンガーは、チューブが閉塞するまで押しつぶし、真ん中のフィンガーは Fig.2 に示すようにチューブを少量だけ押す。これをミッドプレスといい、チューブを変形やへたりの少ない範囲で一定量つぶしてその分の液量を正確に送る方法である [6]。これにより、チューブの座屈を防ぎ、チューブの長寿命化や流量精度の向上が期待できる。

しかしながら、欠点として以下のことが考えられる。SMA アクチュエータは、一般的に自然放熱による冷却方法では、多くの冷却時間が必要となる。このことにより、ポンプが間欠的な送液となり、高い脈動を発生させる恐れがある。また、フィンガーの駆動にも時間がかかってしまうことから、低流量域での送液となる可能性が高い。

Fig.1 Method for force feeding of liquid.

Fig.2 Drive principle of the finger.

3 SMA チューブポンプの構造

3.1 全体構造

SMA チューブポンプの構造図と外観を、Fig.3 および Fig.4 に示す。製作した SMA チューブポンプの大きさは幅 232mm, 奥行き 93mm, 高さ 72mm である。SMA チューブポンプの図の右側からフィンガーを 3 セット（弁用フィンガー A および C, 送液用フィンガー B）、圧縮ばね、SMA アクチュエータユニットを配置した。SMA アクチュエータユニットについては 3.3 節で詳しく述べる。

SMA は、記憶した形状から伸ばした際の長さによって、発生力が変化するため、SMA アクチュエータユニットに位置調整ステージを用いた SMA 調整機構を設けることで、SMA の長さ調整を可能にした。また、SMA アクチュエータユニットは、周囲の温度環境によって発生力などの特性に影響が出やすいため、風が直接当たらないようにするなどの注意が必要である。

Fig.3 Structure of the SMA tube pump.

Fig.4 Photograph of the SMA tube pump.

3.2 ミッドプレス機構

Fig.5 に SMA チューブポンプの側面図を示す。図のように土台の下に2つの調整ユニットを設けた。フィンガーBは調整機構①によって、チューブを押える量の設定が可能である。これによって、チューブが座屈しない位置にフィンガーBを設定できる。この時、調節機構①を使用することで、圧縮ばねの変位量も変化する。そこで、調整機構②によって、圧縮ばねの変位量を設定できるようにし、フィンガーBがチューブを押すときの力を調整可能にした。

Fig.5 Side view of the SMA tube pump.

3.3 SMA アクチュエータユニット

送液実験で使用するチューブは、医療現場で一般的に使用されている塩化ビニール製で、内径 ϕ 1mm、外径 ϕ 3mm（以下、Tube①略す）および、内径 ϕ 3mm、外径 ϕ 5mm（以下、Tube②と略す）のものを使用した。フィンガーがこれらのチューブを押しつぶすのに必要な力は、チューブを押す面積が小さいフィンガーAとCで30N、チューブを押す面積が大きいフィンガーBでは70N必要である。Table.1に使用したSMAコイルの仕様を示す。SMAは、アクトメント社製のWDM-0.3

を用いた。コイル状のSMA単体では、フィンガーを動作させられる発生力を得られなかったため、これを10本使用したSMAアクチュエータユニットを製作した。SMAアクチュエータユニットの構造をFig.6に示す。次に、製作したSMAアクチュエータの発生力について述べる。Fig.7に実験の構成図を示す。また、SMAアクチュエータユニットに1.0Aの電流を15秒印加した時の発生力をFig.8に示す。この結果より、最大で79.4Nの発生力が得られ、動作に必要な発生力が得られることが確認できた。このSMAアクチュエータユニットは3つのポンプにそれぞれ用いられる。

Table.1 Specifications of the SMA coil.

Composition	Ni content	Diameter of SMA wire	Transformation temperature
Ti-Ni	55.4 %	0.3 mm	About 55 °C
Inner of SMA	Outer of SMA	Initial length	Displacement
ϕ 0.5 mm	ϕ 1.1 mm	11 mm	22 mm

Fig.6 SMA actuator unit.

Fig.7 Method to measure a force of the SMA coil.

Fig.8 The force generated by the SMA actuator unit.

4 SMA チューブポンプの基本特性

4.1 フィンガーの変位量特性実験

送液実験を行うにはフィンガーの下降、上昇にかかる時間を測定し、3つのフィンガーが、チューブを閉塞する時間と開放する時間のタイミングを検討する必要がある。そこで、弁用フィンガーAと送液用フィンガーBの変位量をレーザー変位計で測定した。フィンガーの変位量特性実験の構成図を Fig.9 に示す。このとき、SMA アクチュエータに 1.0A の電流を 30 秒間印加した時の変位と、印加を停止した後の変位を 60 秒間測定した。また、SMA アクチュエータユニットのコイル部分の初期の長さは 11mm で、長さを 24mm, 27mm, 30mm と変化させて実験を行った。フィンガーAの変位量について Fig.10 に、フィンガーBの変位量について Fig.11 に示す。

Fig.9 Experimental setup for displacement length characteristic.

Fig.10 Experimental results of displacement length characteristic for Finger-A.

Fig.11 Experimental results of displacement length characteristic for Finger-B.

Fig.10 と Fig.11 より、SMA の長さを 30mm にしたとき、フィンガーA と B とともに、Tube①および Tube②を完全に開放できる変位を得られていることが確認できた。またこれらの図より、フィンガーA の最大変位量は、フィンガーB よりも大きいことが分かる。さらには、電流印加停止後のフィンガーB の動作は、フィンガーA よりも早いことがわかる。これらの結果は、それぞれのフィンガーに使用した圧縮ばねの違いによるものであると考えられる。

次に、ポンプに用いるチューブに適した変位量でポンプを駆動させるために、予め目標変位を設定し、目標変位でのフィンガーの下降、上昇にかかる時間を測定した。まず、フィンガーA において Tube①の目標変位は 3mm, Tube②の目標変位は 4mm とした。これは、液体が流入する際これだけの変位量があれば十分だと考えて定めた。フィンガーA における目標変位に達した後、初期状態に戻るまでの変位量の変化を Fig.12 に示す。Fig.12 より、Tube①と Tube②のそれぞれの電流停止から初期状態に戻るまでの時間は、25 秒および 30 秒であることを確認した。

Fig.12 The return of the Finger-A with respect to the target value.

フィンガーBにおける目標変位に達した後、初期状態に戻るまでの変位量の変化を Fig.13 に示す。フィンガーB に電流を印加する時間は Tube①使用時だと 30 秒、Tube②使用時だと 25 秒必要となる。また、フィンガーB はミッドプレスを行うため使用するチューブの外径の半分の変位量を得ることができればよい。従って、フィンガーB の目標変位はTube①で1.5mm、Tube②で2.5mm とした。これらの結果を反映させた各フィ

Fig.13 The return of the Finger-B with respect to the target value.

Fig.14 Time chart of the finger.

ンガーのタイムチャートを Fig.14 に示す。Fig.12 と Fig.13 より、各フィンガーの上昇、下降にかかる時間を明らかにした。これより、Fig.14 のタイムチャートを用いて Tube①および Tube②のフィンガーの上昇、下降のタイミングを定め負荷圧力 - 流量特性試験を行った。

4.2 負荷圧力 - 流量特性実験

負荷圧力 - 流量特性実験の構成図を Fig.15 に示す。ポンプの吐出口側のチューブから SMA チューブポンプの送液が行えなくなるまで圧力を加え、吐出圧力の限界を測定した。Tube①における測定結果を Fig.16、Tube②における測定結果を Fig.17 に示す。

これらの結果より、Tube①における最大吐出圧は 0.16MPa、Tube②の場合は 0.04MPa であった。最大吐出圧時において、次のフィンガーが動作するまでにチューブを押しつぶせず、チューブが開放状態となり液体が逆流した。また、Tube①より Tube②の方が閉塞に必要な変位量が大きく、チューブを押しつぶすのに時間がかかるため、Tube②の最大吐出圧は Tube①よりも小さいと考えられる。フィンガーのタイミングを遅くすれば、負荷圧力の限界値を向上させることができると考えられるが、流量が低下することが予想される。

Fig.15 Experimental setup for load pressure-flow characteristic.

Fig.16 Experimental results of load pressure-flow characteristic for tube①.

Fig.17 Experimental results of load pressure-flow characteristic for tube②.

5 ローラーチュービングポンプとの比較

Table 2 に、提案する SMA チュービングポンプと、一般的なローラーチュービングポンプ（古江サイエンス株式会社製：モデル RP-NB）の仕様を比較した表を示す。SMA ポンプの寸法は、本体のみを示しており、電源などの周辺機器は含まれていない。Table 2 より、提案するポンプは、ローラーチュービングポンプの流量および吐出圧より、低い数値となっていることがわかる。従って、ローラーチュービングポンプと同等の利用を考える場合は、これらの性能の改善が必要であると言える。

6 結言

本論文では、ミッドプレス方式を採用した SMA チューブポンプの設計および製作について述べた。本ポンプは、SMA の長さを調節できる機構と、チューブの圧縮力およびフィンガーの変位を調整できる機構を備えている。これらを用いることにより、SMA アクチュエータを安定的に駆動させることができ、ばらつきの少ない流量特性を得ることができる。また本ポンプは、従来のチュービングポンプ同様にサイズが異なる多種類のチューブを用いることができ、駆動時には全く騒音を発せず静粛性が高いと言える。次に、試作したポンプを用いた駆動評価実験について述べた。内径 1mm および外径 3mm と、内径 3mm および外径 5mm の 2 種類のチューブを用いた負荷圧力流量特性では、最大吐出圧は 0.16MPa および 0.04MPa であった。しかしながらこれらの結果は、既存のポンプの性能と比較すると、十分であるとは言えないため、今後の改善が必要である。

(2014 年 2 月 7 日受付)

参考文献

- [1] 岡野宏, 石坂欣也, 永堀直澄, 手術室で安全に使える医療用輸液ポンプの開発, 医科器械学, 68(9), pp.381-386, 1998.
- [2] 稲葉成基, 熊崎祐教, 羽根一博, 高熱効果により駆動された小型ポンプ, 電子情報通信学会秋季大会, C-333, 1994.
- [3] 横田眞一, 吉田和弘, 岡安毅, 川上知英, 大坪泰文, 枝村一弥, ECF ジェット冷却を用いた SMA 駆動マイクロポンプ, 日本機械学会論文集 (C 編) 66 巻 650 号, pp.3516-3522, 2010.
- [4] 田内寿治, 谷口浩成, 小林正樹, 門脇信傑, 形状記憶合金を用いたチュービングポンプの開発, 日本機械学会中国四国支部総会・講演会講演論文 50th, ROMBUNNO.511, 2012.
- [5] 加納隆, 輸液ポンプの基礎と実際, Clinical Engineering Vol.11 No.5, pp.371-377, 2000.
- [6] 小井土雄一, 微量注入可能な新しい輸液ポンプの基礎的研究—犬へのカテコールアミン投与時の血圧変動に関するシリッジポンプ及び従来型輸液ポンプとの比較—, 救急医学, Vol.24 No.2, pp.229-232, 2000.

Table 2 The comparison of SMA tube pump and roller tube pump.

	Actuator	Dimensions [mm]			Weight [kg]	Dimention of tube [mm]		Flow rate [ml/min]	Pressure [MPa]
		Length	Width	Height		Inner	Outer		
SMA Pump	SMA	232	93	72	0.93	4.0	5.0	0.18	0.04
Roller tube pump	DC motor	302	120	186	3.5	3.2	4.8	0.5~6.5	0.2