拍動式ポンプに用いるリニアアクチュエータの開発

Development of Linear Actuator for Pulsatile Pump

村上 岩範^{*1}(正員), 金子 健佑^{*1}, 樋口 哲太^{*1}, 池 礼紋^{*1}

Iwanori MURAKAMI (Mem.), Kensuke KANEKO, Tetsuta HIGUTI, Raymond CHI

Recently, the majority of artificial hearts have been no pulsatile types. However natural hearts are pulsatile, and the long-term biocompatibility of the no pulsatile types has not been confirmed. We developed a linear actuator that can expect to be applied to pulsatile artificial heart. This linear actuator was applied to a pulsatile pump. It consists of power transmission, tanks, and permanent magnets. We propose a structure to reduce power consumption by a spring. Reduction in power consumption makes possible to downsize the entire apparatus. We developed such a linear actuator for pulsatile pump. In addition, we applied it to the electromagnetic pump and evaluated the basic structure and characteristics from the experiment.

Keywords: pulsatile pump, electromagnetic pump, linear actuator, artificial heart, halbach array.

(2017年3月10日受付, 2017年8月28日再受付, 2017年9月29日再々受付)

1 緒言

近年の医療技術は日々進歩を遂げている。心臓外科においては、これまで治療が困難とされてきた重症心疾患の多くが、救命・延命可能となりつつある。しかし、非常に複雑な心奇形や重症心筋障害などに対する、確実な救命は実現できていない。こうした治療困難な心臓を代行しようとするものが人工心臓、ないしは心臓移植である。人工心臓は必要な時に治療できる手段として期待されており、心臓移植に代わり得るシステムの開発が進められている。現在研究されている人工心臓の多くが体内に埋め込むことができるコンパクトな構造の非容積式である軸流ポンプ・遠心ポンプによる無拍動型が主流となっている [1,2]。しかし、無拍動流で駆動した場合、心臓を切除して残存心房に縫合する心房カフに心房壁が吸い込まれ血液の駆出が阻害されるサッキング現象が発生しやすいなどの欠点がある。また、長期に無拍動で循環することの生体適合性は確かめられていない [3,4]。

著者らは人工心臓への応用を目標として、永久磁石型リニアアクチュエータを用いた拍動式電磁ポンプを開発してきた [5,6]。開発したリニアアクチュエータは片面多極磁石を用い、一方の磁石をモータで回転させることで、磁石が吸引と反発を繰り返し、磁石間距

離の増減により、直動運動を行う仕組みとなっている。直動部分にタンクを設置することによって、内蔵したタンクを伸縮させ、流体を押し出すことができる。しかし、完全吸引状態の磁石を引き剥がして回転させる際の回転トルクが大きく、高出力のモータが必要であり、装置全体が大型化してしまうという問題点があった。

そこで、このような問題点を解決するために、本研究では回転側磁石を完全吸引状態と完全反発状態の間で往復運動させ、回転側磁石に取り付けたばねにトルクのエネルギーを蓄積することにより、ばねの復元力による回転トルクの補償を行う。これにより、磁石の回転トルクを減らすことができ、使用するモータや装置全体の小型化が見込まれる。同時に消費電力の減少も期待できる。また、片面多極磁石の極数を変更したモデルを製作し、それぞれについて比較、検証する。

本研究では、このような拍動式の電磁ポンプに用いるリニアアクチュエータを開発する。また、実際に電磁ポンプへ応用し、実験から基本構造及び特性を評価する事とした。

2 実験装置

2.1 ポンプの構成

図1に本研究で開発した電磁ポンプの概念図を示す。本研究で新たに開発した電磁ポンプは主に、A：永久磁石、B：タンク、C：駆動部により構成されている。

連絡先：池 礼紋, 〒376-8515 桐生市天神町一丁目5番1号, 群馬大学理工学部機械知能システム理工学科,
e-mail: tl3302070@gunma-u.ac.jp

^{*1} 群馬大学

Fig. 1 Geometry of the electromagnetic pump

Fig. 2 Relation between magnetic flux density and angle

駆動は DC モータを用いており、モータと永久磁石の減速比は 1 : 180 となっている。今回、永久磁石は 4 極、6 極、8 極を用いる。それぞれ磁石は 4 極では 90 度、6 極では 60 度、8 極では 45 度の回転につきそれぞれ 1 回の拍動を行う。これにより、モータの最高回転数から算出される直動部の最大拍動周波数は 2.56 ~ 5.14 Hz である。

2.2 永久磁石

磁石表面から 0.5 mm での磁石角度ごとの磁束密度を図 2 に示す。今回、ハルバツハ配列を用いた多極リング磁石を 4 枚使用している。片面 8 極磁石は 30 度 15 度、片面 6 極磁石は 40 度 20 度、片面 4 極磁石は 60 度 30 度のセグメント磁石を用いて磁石列を形成している。角度が大きいセグメント磁石が厚み方向着磁、小さい磁石が幅方向着磁となっている。

2.3 リニアアクチュエータの動作原理

図 3 に永久磁石及び、タンクの横方向から見た配置図を示す。2 枚の中心磁石は、回転運動のみを行うように固定されている。中心磁石は回転が同期するよう

に連結シャフトで固定されている。直動側磁石は、リニアブッシュに固定されており、直動方向のみに動きが限定されている。また、側面部磁石は、外周部で連結されており、常に一定の距離を保つ構造となっている。中央部磁石と側面部磁石は、互に対向しているため、モータで中央部磁石をそれぞれの磁石の極数に合わせた回転角度で往復運動させることにより、側面部磁石との磁気反発と磁気吸引を繰り返す仕組みとなっている。

永久磁石間の吸引と反発が入れ替えることで、側面部磁石が吸引、反発力に応じて左右方向に移動し、タンクが圧縮、伸張を繰り返す。タンクには、ホースが取り付けられており、一定方向の流体の流れを作るために、流路に逆止弁を配置する。

2.4 バネの位置

磁石の回転トルクを補償するために引っ張りばねを設置する。設置するばねの配置図を図 4 に示す。

Fig. 3 Model of electromagnetic pump

Fig. 4 Layout of the springs

Table 1 Dimensions of the springs

Length	65 mm
Spring constant (Spring1, 2, 3)	9.15, 4.27, 2.03 N/mm

Fig. 5 Relation between force and gap

Fig. 6 Relation between torque and angle

回転側磁石は取り付けられた磁石の極数に合わせた回転角度で往復運動を行い吸引と反発を切り替える。回転側磁石が反発と吸引の中立状態から吸引状態へ変化する際に、磁石の吸引力により片方の引張ばねを伸張する。モータが逆回転となり、再び中立状態へと戻る際に磁石を引き剥がす力をばねの復元力により補償する仕組みとなっている。また、ばねは取り付け時に2本とも初期テンションをかけた状態で設置している。これにより、回転側磁石が往復しても両方のばねから常に引張り力を取り出せる構造になっている。使用したばねの諸元を表1に示す。

3 シミュレーション

3.1 推力・トルク

回転側磁石を固定し、直動側磁石を片側完全吸引、片側完全反発の状態から、磁石間距離 5 mm から 15 mm まで計 10 mm 直動させる。その際の直動側磁石の推力の変化を求める。また、回転側磁石に発生するトルクを求める。直動側磁石に発生する磁力に応じて直動を行うこととする。

直動側磁石の推力と磁石間距離の関係を図5に示す。

回転側磁石の回転角度とトルクの関係を図6に示す。

推力は片面4極磁石が最も大きくなった。これは、磁束密度の最大値が4極の場合が最も大きいことと、4極磁石が最も軸方向着磁の磁石の面積が大きく、推力を得やすかったためであると考えられる。

トルクの最大値は片面4極磁石が最も小さくなった。これは、片面4極磁石に用いているハルバッハ用磁石の角度が大きく、図2の極性の変化からも分かるように、磁束密度の変化が、緩やかだったからだと考えられる。

3.2 ばねの選定

図7に磁石とばねの配置図を示す。(a)は全体の模式図、(b)は回転側磁石のばね取り付け端の拡大図を示す。磁石の回転角度を θ として、ばねの伸張長さを x を導出する。磁石回転中心Oから29 mmの位置Aに引っ張りばねの片端が固定されており、もう片端は、磁石回転中心から横に60 mm、縦に55 mmの位置Bに固定されている。

$$x = 29 \times 2 \times \sin \frac{\theta}{2} \quad (1)$$

$$n = x \times \cos \frac{\theta}{2} \quad (2)$$

$$m = x \times \sin \frac{\theta}{2} \quad (3)$$

$$N = 60 + n \quad (4)$$

$$M = 26 + m \quad (5)$$

$$X = \sqrt{N^2 + M^2} \quad (6)$$

$$F = T / 29 \times 10^{-3} \quad (7)$$

(a)

(b)

Fig. 7 Relation between rotation radius of magnet and spring

Fig. 8 Relation between torque and angle (4poles)

Fig. 9 Relation between torque and angle (6poles)

Fig. 10 Relation between torque and angle (8poles)

Table 2 Potential energy of springs

	Spring1	Spring2	Spring3
8 poles	1.14 J	0.58 J	0.29 J
6 poles	1.67 J	0.84 J	0.42 J
4 poles	2.92 J	1.46 J	0.72 J

式 (1) ～式 (6) を用いることで、角度 $\theta(\text{deg})$ からばねの伸張長さが算出される。また、シミュレーションにより導き出した回転角度ごとのトルク T を、位置 A に発生する力 F に変換した (式 (7))。その際、トルクは回転半径の接線方向に発生し、全ての力がばねに伝わらないが、便宜上トルクからの力全てがばねに蓄積されるものとして計算を行った。算出された変位と力の関係を図 8～図 10 に示す。その仕事量より使用する引張ばねの目安とする。算出された仕事量は 4 極では 1.63 J、6 極では 1.35 J、8 極では 1.12 J であった。ばねの仕事量が磁石の仕事量の半分程度となるように選定を行った。表 2 から、4 極では Spring3、6 極では Spring2、8 極では Spring2 を使用した。

4 実験結果及び考察

4.1 駆動実験

ポンプとしての性能を検証するため、流体に水を用いて、実験を行う。ばねを用いた場合と、ばねを用いない場合について実験を行い、性能を比較する。また、推力の測定。消費電力、流量、圧力について比較を行う。

4.2 実験結果 (推力)

4 極磁石を用いて測定した最大推力とシミュレーションとの比較を図 11、6 極磁石の場合を図 12、8 極磁

Fig. 11 Comparison of simulation and measured (4poles)

Fig. 12 Comparison of simulation and measured (6poles)

Fig. 13 Comparison of simulation and measured (8poles)

石の場合を図 13 に示す。全ての極数においてシミュレーションより実測値が小さい値となった。これは製作した装置の歪みなどにより力が分散されてしまったためであると考えられる。また、磁束密度においても 3.1 でのシミュレーション値より同様の条件で実測した値が小さくなったので、その影響も考えられる。

4.3 実験結果 (消費電力)

4 極磁石を用いた場合の周波数と消費電力の関係を図 14, 6 極磁石の場合を図 15, 8 極磁石の場合を図 16 に示す。ばねを用いた際の消費電力の低減が確認でき

Fig. 14 Relation between electric power and frequency (4poles)

Fig. 15 Relation between electric power and frequency (6poles)

Fig. 16 Relation between electric power and frequency (8poles)

た。このことにより、ばねを設置することによる消費電力の減少の有用性を確認できた。また、同周波数で比較した場合、8 極磁石を用いた場合が最も消費電力が小さいことが確認できた。これは、一回の拍動を行うのに必要な回転角度が、8 極の場合が最も小さく、低い入力電圧で早い拍動を行うことができたからである。

4.4 実験結果 (トルク)

8 極磁石を用いた場合の角度とトルクの変化を図 17 に示す。図は回転側磁石の 5 往復分のトルクの変化を

表しており、トルクは図中 ABCD の順に反時計回りに推移する。領域 A 及び C では、ばね有りの方がトルクが小さいことが分かる。これは磁石を引き剥がす際のトルクをばねが補償しているためである。対して、領域 B と D ではばね有りの方がトルクを要している。これはばねを引き伸ばしエネルギーを蓄える際に、磁石の吸引力の他にモータの回転力を一部必要とするためと考えられる。

4.5 実験結果（流量）

測定した周波数と流量の関係を図 18 示す。

各条件での周波数毎の毎分の流量はほぼ一定となった。これは、周波数が変化しても変位はほぼ一定であり、一回の拍動による流量が約 47 ml であったためである。ここで、本研究で開発した電磁ポンプのタンク容量は、50 ml である。この流量とタンク容量の差は、構造上の直動部の可動限界によって生じるタンクと直動部間の隙間によるものである。

また、毎分の流量は各条件においても、拍動周波数に応じて上昇することが確認できた。これは、拍動周波数の増加によるリニアアクチュエータの推力低下が起きないことで、一回の拍動における流量が一定に保たれたためであると考えられる。

Fig. 17 Relation between torque and angle

Fig. 18 Relation between flowrate and frequency

4.6 実験結果（圧力）

圧力は実験ごとにばらつきが多くなってしまった。再現性が得られなかった理由としては、使用しているシリコンの伸び等による特性の変化と考えられる。

今後、安定した圧力を供給するために、定常流を流すことで一定圧力をかけ、圧力の安定化などの対策が必要であると考えられる。

5 結言

ばねの復元力を利用することで、磁石の回転に必要なトルクを抑える構造を開発し、そのことによる電力消費量の減少を確認した。

4 極磁石使用時に、約 210~282 N の推力を確認することができた。

拍動周波数に応じる流量の上昇から、拍動周波数の増加によるリニアアクチュエータの推力低下が起きないことが確認できた。

6 今後の課題

流体排出圧力が安定しなかったため、循環系などの実験を行い、特性を確認する。

参考文献

- [1] 井街, 三田村, 妙中, 電磁駆動型人工心臓, コロナ社, pp. 2-8, 1994.
- [2] M. Kitago, T. Masuzawa, T. Nishimura and S. Kyo, Axial-type magnetically suspend motor for a therapeutic artificial heart, *Journal of JSAEM*, Vol.19, No.2, pp. 280-285, 2011.
- [3] 築谷, 巽, 妙中, 大久保, 長田, 山根, 体内埋込型補助人工心臓用軸流ポンプの生体適合性, 日本機械学会誌, No.09-55, p. 55, 2010.
- [4] T. Yamane, O. Maruyama, M. Nishida and R. Kosaka, Durability and hemocompatibility of MERA monopivot centrifugal pump, *Synthesiology English edition*, Vol.5, No.1, pp. 17-24, 2012.
- [5] I. Murakami, H. Imai, Y. Ando and K. Yamada, Development of pulsating artificial heart with magnetic flux convergent arrangement, *International Journal of Applied Electromagnetics and Mechanics*, Vol.45, Nos.1-4, pp. 763-769, 2014.
- [6] 今井, 永久磁石を用いた拍動式人工心臓の開発, 群馬大学平成 25 年度修士論文, 2014.