リニアモータ駆動式大動脈内バルーンポンプの駆動特性評価

正員 山田 一 (信州大)

准員 鈴木 健治 (信州大)

学生員 小西 徹昌 (信州大)

正員 中川 洋 (神鋼電機)

Evaluation of Driving Characteristics of Linear Motor-Driven Intra-Aortic Balloon Pump

Hajime Yamada, Member, Kenji Suzuki, Associate, Tetsumasa Konishi, Student Member (Shinshu University), Hiroshi Nakagawa, Member (Shinko Electric Co., Ltd.)

An intra-aortic balloon pump (IABP) is an effective device for supporting the circulation in the event of acute heart failure. Small IABP devices are strongly needed in medical related fields. The authors have been investigated an IABP device using a linear pulse motor (LPM) in order to actualize a small IABP device to reduce the load of the nurses. This paper discusses the characteristics of the LPM developed by the authors for the IABP drive, and performance evaluation of an LPM-driven IABP.

Our investigation revealed as follows; (1) The trial LPM had the volume of 1.3 liters and the mass of 6.3 kg. It is capable of reduction the weight of the IABP device. (2) The LPM had a high thrust/volume ratio of 0.88 newtons/mL. (3) The driving characteristics of the LPM-driven IABP was evaluated by means of a mock testing device. The volume of operating balloon was measured with the electrical resistance between two electrodes. The maximum pumping rate of the IABP device was approximately 160 beats/min. The LPM-driven IABP will be possible to apply clinical study as small-sized device from the result of experiment.

キーワード：医療機器，大動脈内バルーンポンプ (IABP)，リニアパルスモータ (LPM)，模擬試験

1. ま え が き

筆者らは，補助循環装置の一つである大動脈内バルーンポンプ (Intra-Aortic Balloon Pump, 以下 IABP) の駆動源としてリニアパルスモータ (Linear Pulse Motor, 以下 LPM) を用い，装置の小型・軽量化を図る研究を行ってきた⁽¹⁾。装置の小型・軽量化は看護婦等の負担を軽減するものとして重要な意味を持っている。

従来より，筆者らは LPM 駆動式 IABP の小型・軽量化および駆動特性の評価指標に基づいてその性能評価を行ってきた。しかし，その評価方法は次の二点について妥当性を欠いたものであった。第一に，バルーンの動作を目視観測することなく評価を行っていた。第二に，実際の IABP の原理に基づいてバルーンが動作していなかった。以上の点から，十分な評価検討がなされてきたとはいえない。

今回，筆者らは第 2 章に述べる IABP の原理に基づいて LPM を駆動するとともに，IABP が臨床において使用される拍動数帯を考慮した⁽²⁾⁽³⁾。さらに，バルーンの動作を電極間抵抗法を用いて直接測定し，本 LPM 駆動式

IABP の性能評価を行った。本論文では以下の結果について述べる。

(1) IABP の原理と要求性能，および臨床で使用されている主な IABP 装置の仕様と性能

(2) IABP 駆動用 LPM の構造と推力特性

(3) 模擬試験装置を用いた，電極間抵抗法による LPM 駆動式 IABP の性能評価

2. IABP の原理とその要求性能

〈2・1〉 IABP の原理 IABP は急性心不全者のための緊急救命装置の一つであり，心筋の梗塞等により機能の低下した心臓を機械的に補助し，心臓の負荷を軽減させるものである。図 1 には，IABP の一般的原理を示した。同図 (a) において，まず大動脈の鎖骨下動脈分岐部のすぐ下にバルーン (風船) を位置させ，心室拡張期 (大動脈弁閉鎖後) にバルーンを膨張させる。すると大動脈圧は上昇し，冠状動脈の血流 (矢印) を増加させ，心筋へ十分な酸素を供給することになる。次に，同図 (b) においては，心室収縮期の直前にバルーンを収縮させる。すると大動脈圧

(a) バルーン膨張（心室拡張期）

(b) バルーン収縮（心室収縮期）

図 1 IABP の一般的原理
Fig. 1. Principle of the IABP.

が低下し、心室が血液を送り出す際に後方負荷の軽減となる。このように、バルーンの膨張・収縮によって弱っている心臓に補助を与えて心機能の回復を促すことになっている⁽⁴⁾⁽⁵⁾。

〈2・2〉 IABP に要求される性能 図 2 には、IABP におけるバルーンの動作タイミングを示した。同図において、IABP としての機能を満足するためには、バルーンの膨張・収縮による昇降圧効果を、大動脈弁の閉鎖から再び開放するまでの間に完了させなくてはならない⁽⁶⁾。つまり心室拡張期に、バルーンは収縮状態から膨張し再び収縮するという一連の動作を行うことになる。このバルーン動作に与えられた時間をバルーン動作時間 T_B とする。図 3 には、筆者らが典型的な心電図より測定したバルーン動作時間と拍動数の関係を示した。バルーン動作時間 T_B は拍動数 H_r (bpm) (beats per min.: (回/分)) の増加に伴い減少していく。以下、この動作時間を評価指標として、本 IABP におけるバルーン動作時間の測定、評価を行っていくことにする。

〈2・3〉 市販されている IABP の性能 表 1 には、現在市販されている主な IABP 装置 3 機種の性能を示した。駆動源には、Kontron 社製の KAAT II がステッピングモータを用いている他は、コンプレッサによる空気圧を用いている。また 3 機種のうち、最も軽量のものは、KAAT II の 53 kg であった。これより、空気圧駆動式よりモータ駆動式のほうが軽量化が可能であると考えられる。最大ポンピングレートは 3 機種共 200 bpm まで追従されるとされているが、通常の使用範囲は 110~130 bpm 程度といわれている。

図 2 IABP におけるバルーンの動作タイミング
Fig. 2. Timing of the balloon inflation-deflation in the IABP.

図 3 拍動数とバルーン動作時間の関係
Fig. 3. Relationship between the inflation-deflation time of the balloon, T_B , and the heart rate, H_r , in the IABP.

表 1 市販 IABP 駆動装置の性能
Table 1. Each performance of IABP devices in the market.

項目	アイシン (Corart BP1)	Datascope (System 95)	Kontron (KAAT II)
駆動部	空気圧	空気圧	ステッピングモータ
ポンピングレート	30~200 [bpm]	30~200 [bpm]	40~200 [bpm]
体積	148 [L]	490 [L]	175 [L]
質量	80 [kg]	80 [kg]	53 [kg]

3. LPM 駆動式 IABP

〈3・1〉 IABP 駆動用 LPM の構造の推力特性 図 4 には、IABP 駆動用に開発した LPM (LPM-BP 93) の基本構造を示した。本 LPM は両側式平板状であり、固定子は鉄心と永久磁石を交互に積層した特殊な構造をなしている。これは、2 相励磁時にすべての磁極で推力を発生さ

図 4 IABP 駆動用 LPM (LPM-BP93) の基本構造 (x : ストローク, 単位: mm)

Fig. 4. Structure of the linear pulse motor (LPM-BP93) for the IABP drive (x is the displacement, and the units are mm).

せることができる高推力密度形 LPM の磁路構造を採用したためである⁽⁷⁾。LPM の最大静推力は、励磁電流 3 A において 430 N であった。

図 5 には、LPM の動推力特性を示した。LPM の駆動にはバイポーラチョップ定電流方式マイクロステップドライバ (駆動電圧 DC 140 V) を使い、50 分割のマイクロステップで駆動した。図 5 から、本 LPM の最大動推力 F_k は 290 N であり、可動子速度 $v=50$ mm/s を超えると次第に低下していくことがわかる。

表 2 には、本 LPM の主な仕様を示してあり、体積、質量はおおの 1.3 L, 6.3 kg である。また、LPM の推力/体積比は 0.88 N/mL であり、電磁モータの単位体積当りの推力理論限界 1 N/mL⁽⁸⁾ の約 90% に相当する高い値が得られた。表 1 にあげた KAAT II は質量 53 kg の約 80% にあたる 46 kg がガス駆動装置部にあたる。よって本 LPM の質量 6.3 kg をもってすれば、他の構成要素 (ドライバ、制御回路、バッテリーなど) を考慮しても、IABP 装置の軽量化の実現が将来期待できる。

〈3・2〉 LPM 駆動式 IABP 装置の構成 図 6 には、LPM 駆動式 IABP 装置の構成を示した。本装置は、LPM 可動子の往復動作によりペローズを伸縮させ、駆動ガスを吸排気しバルーンを膨張・収縮させるものである。バルーンは模擬試験装置 (以下、mock 装置) 内に挿入されている。mock 装置は生体の負荷を模擬するものであり、mock 装置内の空気圧 (以下、mock 内圧) を調整することで負荷を変化させることができる。

〈3・3〉 バルーンの動作の確認方法 バルーンの膨張・収縮動作が完全に行われているかどうかを確認する方法として、図 6 中に示したようにバルーンの前後に電極を設け、交流定電流を通電させて電極間の抵抗を測定することでバルーン容積を測定する方法 (電極間抵抗法) がある。図 7 には、収縮・膨張時のバルーン容積の変化を示し

図 5 IABP 駆動用 LPM の動推力特性 (励磁電流 3 A, マイクロステップ駆動)

Fig. 5. Kinetic thrust characteristics of the LPM (exciting current 3A, microstep drive).

表 2 IABP 駆動用 LPM の主な仕様

Table 2. Principal specifications and characteristics of the LPM (LPM-BP93) for the IABP.

項目	記号	数値	[単位]
体積	V	1.3	[L]
質量	M	6.3	[kg]
歯ピッチ	固定子	τ_s	2.5 [mm]
	可動子	τ_m	5 [mm]
エアギャップ	相数	g	70 [μm]
		n	2 [phase]
最大静推力 (励磁電流 3 [A])	F_s	430	[N]
静推力/体積比	F_s / V_F	0.88	[N/mL]
静推力/質量比	F_s / M_F	170	[N/kg]

た。電極間のインピーダンス Z は、周波数 10~50 kHz の範囲においては、抵抗分 R として取り扱うことができる。バルーン収縮時および膨張時の電極間の抵抗 R_d, R_i は次式で表わされる⁽⁹⁾。

$$R_d = \frac{\rho L}{A_d} = \frac{\rho L^2}{V_d} (\Omega) \quad \dots\dots\dots (1)$$

$$R_i = \frac{\rho L}{A_i} = \frac{\rho L^2}{V_i} (\Omega) \quad \dots\dots\dots (2)$$

ここに、 ρ : 電解液の抵抗率 ($\Omega \cdot m$)、 L : 電極間距離 (m)、 A_d, A_i : バルーン収縮・膨張時のそれぞれの導管断面積 (m^2)、 V_d, V_i : バルーン収縮・膨張時のそれぞれの電解液の容量 (m^3)

バルーン収縮時の電解液容量 V_d とバルーン膨張時の電解液容量 V_i の差がバルーン容積となるので、バルーン容積 V_B は次式で表わされる。

$$V_B = V_d - V_i \\ = \frac{\rho L^2}{R_d} - \frac{\rho L^2}{R_i} = \left(1 - \frac{R_d}{R_i}\right) V_d \quad (m^3) \quad \dots\dots\dots (3)$$

ここで、電極間に定電流 I を通電させると、収縮・膨張時の電極間電圧 $e_d (= R_d I)$ 、 $e_i (= R_i I)$ とバルーン容積 V_B との関係は次式で表わされる。

図 6 LPM 駆動式 IABP 装置のシステム構成
Fig. 6. System configuration of the LPM-driven IABP.

図 7 収縮・膨張時のバルーン容積の変化
Fig. 7. Change of each balloon volume in cases of deflation and inflation.

$$V_B = \left(1 - \frac{e_d}{e_i}\right) V_d \quad (\text{m}^3) \quad (4)$$

バルーンが完全に収縮しているときの電極間電圧は定数と考えられる。 $e_d = K$ とおくと(4)式は次式のように表わされる。

$$V_B = V_d \left(1 - \frac{K}{e_i}\right) \quad (\text{m}^3) \quad (5)$$

したがって、筆者らは e_i を測定すればリアルタイムで V_B を測定することができる。

従来筆者らは、mock 内圧を測定することによりバルーンの容積測定を行ってきた⁽¹⁰⁾。しかし、圧力による容積測定は、バルーンの動作速度により空気室がポリトロプ変化⁽¹¹⁾(等温変化の断熱変化の間の変化)をするため温度の影響を避けることができない。そのため、バルーンの容積が変化していないにもかかわらず、mock 内圧が変化してしまう現象が生じた。このことから、正確にバルーンの容積を把握することが困難であった。今回採用した電極間抵抗法は温度等の環境に左右されないため、バルーンの挙動を確認する際に非常に有効な手段と考えられる。以下、LPM 駆動式 IABP の性能評価を行っていくうえで、バルーンの容積測定には本方法を用いた。

4. LPM 駆動式 IABP の性能評価

〈4・1〉 LPM に要求される推力 図 8 には、可動子速度をパラメータとした、可動子変位、ベローズ内圧力(以下、駆動圧力)、バルーン膨張率の時間特性を示した。バルーン膨張率 V/V_B は、バルーン容積 $V_B = 34 \text{ mL}$ 対

図 8 可動子速度をパラメータとした可動子変位、駆動圧力、バルーン膨張率-時間特性
Fig. 8. Mover displacement and driving pressure and balloon inflation rate versus time characteristics as parameter of mover velocities.

する膨張体積 V の割合とした。可動子速度を大きくすることで、バルーンの膨張時間は短くなるが、同時に駆動圧力 p_B のピーク値 p_{Bm} は大きくなる。このピーク値 p_{Bm} は LPM 駆動時の最大負荷といえる。よって、バルーンを高速で動作させるために速度を上げると、それに応じて LPM への負荷も大きくなり、動推力との関係で限界が生じることになる。

LPM に要求される推力(以下、要求推力)は、ベローズの硬さを無視すると、駆動圧力のピーク値を推力に換算した値である。駆動圧力を図 6 に示した圧力センサ 1 より測定し、そのピーク値 $p_{Bm}(\text{mmHg})$ から要求推力 $F_t(\text{N})$ は次式のように換算することができる。

$$F_t = k A p_{Bm} \quad (\text{N}) \quad (6)$$

ここに、 k :換算係数 ($=1.33 \times 10^2 \text{ N} \cdot \text{mmHg}/\text{m}^2$),
 A :ベローズ断面積 ($=3.8 \times 10^{-3} \text{ m}^2$)

図9には、要求推力とLPM動推力の関係を示した。駆動条件としてベローズの初期長 $L_s=60, 80 \text{ mm}$ について、おのおのバルーンを完全に膨張させることができるストローク l_s を設定した。速度の増加とともにLPMに要求される推力は増加し、要求推力がLPMの動推力を超えるとLPMは脱調することになる。よって、負荷の増加と動推力特性の交点がバルーンを高速で動作させるLPMの動作限界点となる。なお、図10にはベローズの初期長 L_s とLPMのストローク l_s の関係を示した。 $L_s=60$ と 80 mm では、おのおのベローズの初期体積 V_s が異なるため、バルーンを完全に膨張させるために必要なLPMのストローク

図9 LPMに要求される推力と動推力の関係 (L_s :ベローズの初期長, l_s :ストローク)

Fig. 9. Relationship between the required thrust, F_r , and the kinetic thrust characteristics of the LPM (L_s is a first length of the bellows, l_s is a stroke).

図10 ベローズの初期長とLPMストロークの関係 (V_s :ベローズ初期体積)

Fig. 10. Relationship initial length of the bellows, L_s , and stroke of the LPM, l_s (V_s is a initial volume of the bellows).

ク l_s が異なっている。また、同図にはLPMの駆動パターンを示した。まず可動子を $+l_s$ 移動させてベローズを押しバルーンを膨張させる(①)。次に可動子を $-2l_s$ だけ引き戻しバルーンを収縮させる(②)⁽¹²⁾。最後に、この位置から原点復帰させるために $+l_s$ 戻し(③)、1周期 T が完了する。

〈4・2〉 バルーンの動作時間特性 駆動圧力がピーク値に達する時間と、バルーンの膨張率が100%に達する時間の間には時間遅れがある。駆動圧力のピーク値がLPMの駆動終了時にあたるため、LPMの駆動時間とバルーンの膨張時間の間にも同様に時間遅れが生じることになる。よって、LPMの駆動方向変換時に休止時間を与えなければ、バルーンを完全に動作させることはできない。このことから、本LPM駆動式IABPにおけるバルーンの最短動作時間を測定した。

図11には、本実験におけるLPMの駆動パターンを示した。バルーン膨張時の駆動(push)と収縮時の駆動(pull)の間、つまり運動の向きが反転するときに休止時間 T_s を設けた。ここで、正(膨張)、負(収縮)方向への駆動時間 T_i , T_d と2回の休止時間 $2T_s$ の和 T_B がバルーン動作時間となる。なお、負方向駆動後の原点復帰は、将来心電図に同期して駆動させるとき心室収縮期に行うものと想定しているため、バルーン動作時間には含めていない(図2参照)。表3には、本実験におけるLPMの駆動条件を示した。LPMの可動子速度は、図9より明らかとなった動作限界点におけるおのおのの値に設定した。なお、膨張時駆動(push)の収縮時駆動(pull)では、要求推力が違うため可動子速度が異なっている。

図12には、バルーン膨張率-可動子休止時間特性を示し

図11 LPMの駆動パターン
 Fig. 11. Driving pattern of the LPM (T_s is a break time, T_d is a driving time, and T is a period).

表3 LPMの駆動条件
 Table 3. Driving conditions of the LPM.

	初期長 L_s [mm]	ストローク $\pm l_s$ [mm]	可動子速度 push/pull [mm/s]
駆動条件 1	60	9.75	220/300
駆動条件 2	80	11.5	280/350

図 12 バルーン膨張率-可動子休止時間特性
Fig. 12. Balloon inflation rate versus break time characteristics.

た。バルーン膨張率 95%以上をもって、バルーンが完全に動作しているとみなし、各駆動条件における最短バルーン動作時間を求めた。休止時間 $T_s=0$ ms では、いずれの駆動条件でもバルーン膨張率は 50~70%程度であり、バルーンを完全に動作させることはできなかった。しかし、 $T_s=50$ ms 以上に設定すると駆動条件 1 においてバルーンは完全に動作した。図 11 の駆動パターンからバルーン動作時間を計算すると、駆動条件 1 では 210 ms、また条件 2 では 267 ms であった。おのおのの動作時間から図 3 より拍動数に換算すると、135~160 bpm の拍動数において駆動可能であることが明らかとなり、IABP の通常使用範囲である 110~130 bpm をクリアした。

5. あとがき

LPM 駆動式 IABP の性能評価を行った結果、明らかとなった事項を以下にまとめる。

(1) 高推力密度形の磁路構造を採用した本 LPM の推力/体積比は 0.88 N/mL であり、電磁モータの推力密度の理論限界 1 N/mL の約 90%に達する値が得られた。

(2) 試作したリニアパルスモータ (LPM-BP 93) の質量は 6.3 kg であり、LPM 駆動式 IABP は臨床で用いられている市販の IABP 装置よりさらに軽量化できる見通しを得た。

(3) 本 LPM 駆動式 IABP 装置のバルーン最短動作時間は 210 ms であり、拍動数 160 bpm 程度まで駆動可能であることが明らかとなった。本 IABP は臨床で通常使用される範囲においてはその機能を満足している。

(平成 6 年 6 月 23 日受付, 同 6 年 12 月 26 日再受付)

文 献

- (1) 山田・脇若・矢野・度会・菊田・森本・辻:「リニアパルスモータ駆動形大動脈内バルーンポンプの試作」, 電学論 D, 113, 4, 532 (平 4)
- (2) 山田・小林・鈴木・脇若・中川:「大動脈内バルーンポンプに用

いるリニアパルスモータの軽量化」, リニアドライブ研究会資料, LD-93-47 (平 5)

- (3) 小林・鈴木・小西・中川・山田:「大動脈内バルーンポンプ駆動用 LPM に要求される動推力」, 平 6 電気学会全大, 915, 7-142 (平 6)
- (4) 杉本, 他:「心不全」, 南江堂, 209 (平元)
- (5) 桜井:「医用工学 ME の基礎と応用」, 共立出版, 438 (昭 56)
- (6) 岡田・中村:「補助循環法」, 金原出版, 5 (昭 63)
- (7) 中川・前田・菊田:「高密度リニアモータ」, 神鋼電機技報, 128, 36-3, 86 (平 3)
- (8) 長坂:「極限の電磁モータ」, '92 モータ技術シンポジウム/'92 モータゼネラルセッション, 1 (平 4)
- (9) 佐々木・中谷・穴井・広瀬・高野:「大動脈内バルーンポンピング (IABP) 用のバルーンの新しい特性評価方法と市販各種バルーンの評価」, 人工臓器, 21, 6, 1444 (平 4)
- (10) 小林・鈴木・中川・山田:「リニアパルスモータ駆動式大動脈内バルーンポンプの性能評価」, 日本応用磁気学会誌, 18, 2, 525 (平 6)
- (11) 中島:「空気圧技術読本」, オーム社, 10 (昭 49)
- (12) 小林・鈴木・脇若・中川・山田:「リニアモータ式大動脈内バルーンポンプのバルーンの動作特性評価」, マグネティックス・リニアドライブ合同研究会資料, MAG-93-205, LD-93-69, 47 (平 5)

山 田 一 (正員) 1933 年 4 月生。59 年東京工業大学大学院修士課程修了。現在、信州大学工学部教授。工学博士。磁気回路の解析に興味を持ちリニアモータ、磁気センサと電磁型人工心臓の研究に従事。広島大学医学部教授併任。IEEE、日本応用磁気学会、日本人工臓器学会、機械学会等の会員。

鈴木 健 治 (准員) 1969 年 4 月生。93 年信州大学工学部電気電子工学科卒業。同年信川大学大学院工学系研究科修士課程入学。1995 年修士修了後、明電舎へ就職。リニアモータおよびリニアモータを駆動源とした医療機器の研究に従事。日本応用磁気学会会員。

小 西 徹 昌 (学生員) 1970 年 10 月生。89 年信州大学工学部電気電子工学科入学。現在にいたる。リニアモータおよび人体の循環系シミュレーションの研究に従事。

中 川 洋 (正員) 1950 年 9 月生。69 年三重県立伊勢工業高校電気科卒業。同年神鋼電機(株)入社。以来、電磁アクチュエータの研究開発に従事。現在、同社開発本部商品開発部 P & M 開発室主務。