

人工筋肉を用いた蠕動運動型ポンプにおける流量制御弁の開発

Development of the flow control valve in the peristaltic pump using artificial muscle

精密工学専攻 25 号 齊藤邦広

Kunihiro Saito

1. 緒言

現在、製品生産時の効率化や自動化のために生産工程の多くに機械が使用されている。これらは工業製品だけではなく、食品や化学製品などの分野においても同様である。食品や化学製品の工場において扱われる素材の多くは、液体やスラリー液などの流体であり、これらの搬送や流量の調整にはポンプやバルブが用いられる。これらの機械には高粘度や大型の粒子が混ざった流体の搬送や、衛生面の観点からメンテナンスの容易さが求められる⁽¹⁾。

一般的な流体に用いられるポンプは、ターボ形と容積形が主流である⁽²⁾。一方で、先に挙げたような分野における特殊流体の搬送には、容積形に属するギヤポンプやダイヤフラムポンプが用いられる。しかし、ギヤポンプにおいては、歯車の回転により流体を搬送するポンプであるため、固体が混ざったものは搬送することができない。ダイヤフラムポンプとは、ダイヤフラムと呼ばれる膜を上下または左右に運動させて容積を変化させ搬送を行うポンプであるが、構造が複雑で大型のため管路に対してポンプ全体が大きくなりすぎるという欠点がある。また、流量調整に用いられるバルブには、一般的なものとしてグローブ弁やバタフライ弁が挙げられる⁽³⁾。しかし、グローブ弁においては全開時の損失が大きい点、バタフライ弁においては流路中心部にジスクがあるために大型の粒子が流路を封鎖してしまう恐れ等の問題点がある。

本研究ではこれまでに、腸管の蠕動運動に着目し、6 ユニットで構成された腸管構造を規範とした蠕動運動型ポンプを開発し、流体の垂直搬送に成功している。

そこで、本報では蠕動運動型ポンプのユニットの膨張過程に着目し、膨張形状を制御することで流路面積を変化させ、流量を調整することのできる流量制御弁の開発を行う。加えて、粘性流体や固液混合流体における流量制御についても言及する。

2. 腸管の蠕動運動

Fig. 1 に腸管の蠕動運動⁽⁴⁾の様子を示す。腸管の蠕動運動は次の三段階に分かれている。Ⅰ．食塊の移動が腸管の輪状筋を伸展させ刺激する。Ⅱ．輪状筋が環状に収縮し食塊を押し出す。Ⅲ．食塊を押し出した輪状筋は弛緩し元の状態に戻る。この過程が繰り返されることにより、

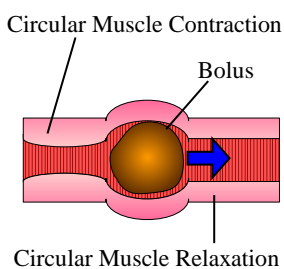


Fig. 1 Bowel peristalsis

腸内の食塊を運搬することができる。これより、腸内での搬送は輪走筋の収縮力のみを用いれば可能であること、また輪走筋の収縮は搬送対象が肛門にたどり着くまで管路全体にわたり伝播してゆくことが確認できる。この観点から、腸管の蠕動運動の搬送モデルを利用した配管では、長い管路においても小さな駆動力を連続的に発生させることで、高粘度流体・固液混合流体の搬送が行えると考える。

3. 蠕動運動型ポンプ

ポンプ全体を同形状ユニットで構成する。各ユニットは腸管の輪状筋に見立てた機構をとっている。

3.1 ユニットの概要

単一ユニットの断面図を Fig.2 に示す。軸方向繊維強化型人工筋肉（以下、人工筋肉）⁽⁵⁾の内側に繊維レス閉口チューブ（以下、閉口チューブ）を配置し、両端をフランジに接合さ

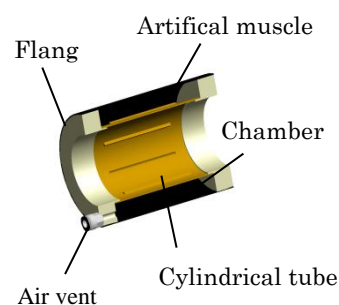


Fig.2 Cross-section diagram of a pump unit

せる構造をとる。このとき、人工筋肉と閉口チューブとフランジとで囲まれる空間がチャンバとなる。チャンバを加圧することでユニット内部を閉鎖させることができる。

Fig.3 は加圧時のユニットの変化を半径方向と軸方向から見たモデルである。加圧時には人工筋肉と閉口チューブの両方が膨張する。人工筋肉は半径方向にのみ膨張し、これよりユニットの軸方向に収縮が生じる。閉口チューブに設けたガイド溝に応力が集中することにより折れ目が生じ、軸方向から見た様子では膨張部が四分割される。

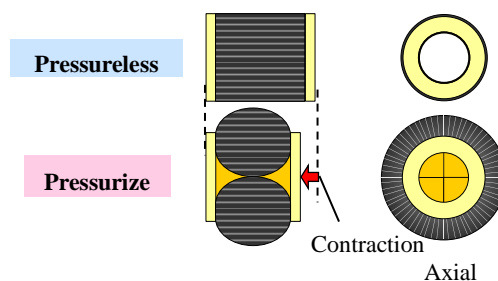


Fig.3 Appearance of pressurization

3.2 蠕動運動型ポンプの概要

蠕動運動型ポンプを Fig. 4 に示す。また、仕様を Table 1 に示す。



Fig. 4 Peristaltic pump

Table 1 Specifications of peristaltic pump

Maximum length [m]	5.6×10^{-1}
Minimum length [m]	4.6×10^{-1}
Mass [kg]	1.34
The number of units	6

ポンプの各ユニットは腸管と同様に環状に収縮することができる。このユニットを、動作パターンと呼ばれるある規則性に従って収縮させることで、ポンプは蠕動運動を発生させることができる。蠕動運動型ポンプの動作パターンの概略図を Fig. 5 に示す。同図の A → F のように、一定の動作間隔において加圧するユニットを一つずつ右へずらしていくことで、内包物を運搬する。運動パターンは「波長・送り・波数」の三つの要素をもつ。波長とは隣接して膨張しているユニットの数であり、送りは波を伝播させるユニットの数、波数はポンプ全体で同時に伝播させる波の数を表す。即ち、Fig. 5 に示す運動パターンは 2-1-1 と表せる。なお、ユニットの数は三つ以上であれば波長・送り・波数の要素を自由に増減させる事ができる。

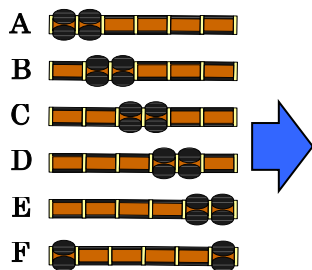


Fig. 5 Schematic diagram of motion pattern

3.3 搬送実験

Fig. 6 に実験システムの概要を示す。

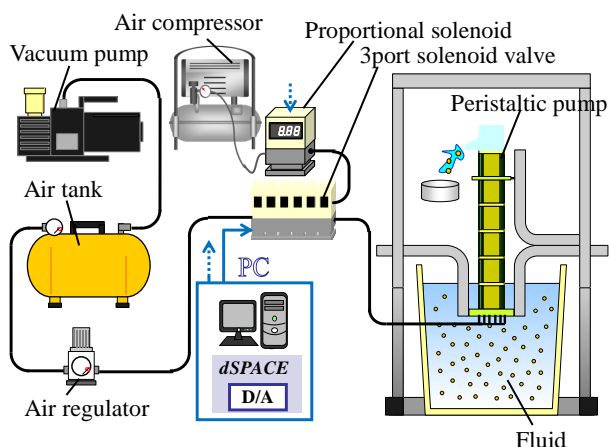


Fig. 6 Schematic diagram of experiment system

ユニットへの空気の吸気はエアコンプレッサを用い、ユニットの空気を排気する際は真空ポンプを用いる。排気に真空ポンプを用いるのは、大気圧で排気を行うとユニットが完全に復元しないためである。本実験のシステムは電圧信号によって、空気圧の制御を行っている。比例電磁弁に加えて 3 ポート電磁弁を併用する事で、各ユニットへの吸気と排気の流路切り替えを行う。これらを動作パターンに従って蠕動運動

型ポンプに空気を印加することで流体の搬送が可能になる。実験では各ユニットへの印加圧力を 0.04 [MPa] に設定し、排気負圧値は吸込み圧と同値に設定する。

このような実験システムを用い、粘性流体および固液混合流体の搬送を行う。粘性流体として水 (1[mPa·s])・菜種油 (900[mPa·s])・ポリアクリル酸ナトリウム水溶液 (15000[mPa·s])、固液混合流体として水と直径 6 [mm] の球状固体 (ポリプロピレン製) の混合体を用いる。使用する動作パターンは 2-1-1 とし、排気システムの機能する 2.8 秒以上において動作間隔を変化させて流量を計測する。Fig. 7 に粘性流体における動作間隔と体積流量の関係、Fig. 8 に固液混合流体における動作間隔と体積流量の関係を示す。

Fig. 7 より、蠕動運動型ポンプにおいて低粘度および高粘度の流体の搬送を行うことができることが確認できる。動作間隔が短いほど流量が少ないのは、管内の復元が間に合っていないためであり、最終的に流量が収束するのは管内の復元が完了したためである。

Fig. 8 より、固液混合流体においても搬送が可能ことが確認できる。しかし、搬送流体の固体含有率が増加するに従って流量値が減少している。これは膨張したユニットに固体が挟まってしまい漏れ流量が多くなったためと考える。この固体含有率の増加に伴う流量の減少はポンプ内径と搬送固体の直径の双方に関係しているものと考えられる。

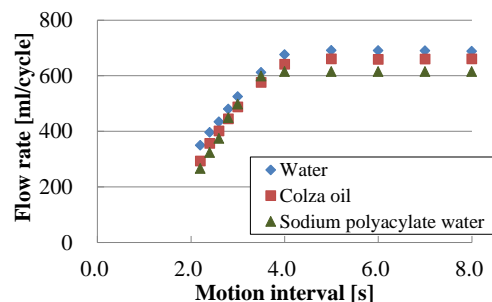


Fig. 7 Relationship between motion interval and flow rate

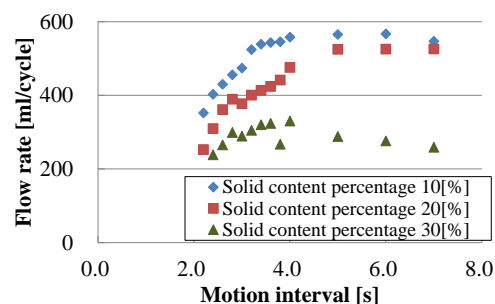


Fig. 8 Relationship between motion interval and flow rate

4. 流量制御弁

蠕動運動型ポンプでは、閉口率が 100% に到着するかのみに着目していた。しかし、印加圧力を適切に変化させ、閉口率を制御し、管径を小さくすることで流量を制御することが可能となる。なお、閉口率については後述する。

4.1 弁ユニット

弁ユニットの断面図をFig. 9に示し、仕様をTable 2に示す。基本的な構造はFig. 2に示した蠕動運動型ポンプの単一ユニットと同様であるが、弁機能を実現するためにユニットの圧力応答を低下させた弁用チューブを内側に採用している。圧力応答を低下させることにより、より細かな閉口率の制御が可能となり、弁の分解能を向上につながる。弁用チューブの形状は繊維レス閉口チューブと同様であるが、中心部15[mm]を残しそれ以外の部分をカーボンシートで覆われている。このため膨張が阻害され圧力応答が低下する。一方で繊維レス閉口チューブの機能も有するため完全閉口を実現する。また、高圧力印加に対応するため、フランジ等も再設計している。

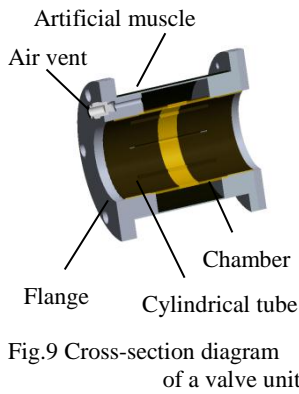


Table 2 Specifications of valve unit

Length [m]	1.0×10^{-1}
Inner diameter [m]	6.0×10^{-2}
Outer diameter [m]	1.2×10^{-1}
Mass [kg]	1.07
Width of carbon sheet [m]	1.5×10^{-2}

4.2 閉口率

閉口率とは、ユニットの弁としての性能を表す指標であり、閉口率 R_L [%]は式(1)で定義される。

$$R_L = \frac{S_0 - S_p}{S_0} \times 100 \quad (1)$$

ここで、 S_0 [mm²]はユニットを軸方向から見たときの初期開口面積、 S_p [mm²]は加圧時開口面積である。

Fig.10は弁ユニットと蠕動運動型ポンプのユニットにおける閉口率の圧力応答であり、Fig.11は低圧力部の拡大図である。同図より、弁ユニットにおいて応答性が低下していることが確認できる。また、Fig.12は閉口率25%・50%・75%・100%時における管内の様子である。

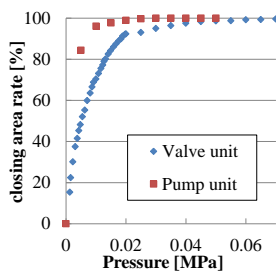


Fig.10 Pressure response of closing area rate

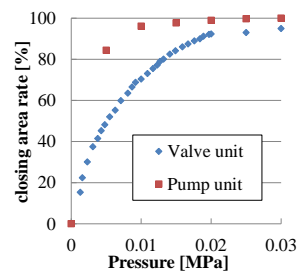


Fig.11 Closeup of low pressure

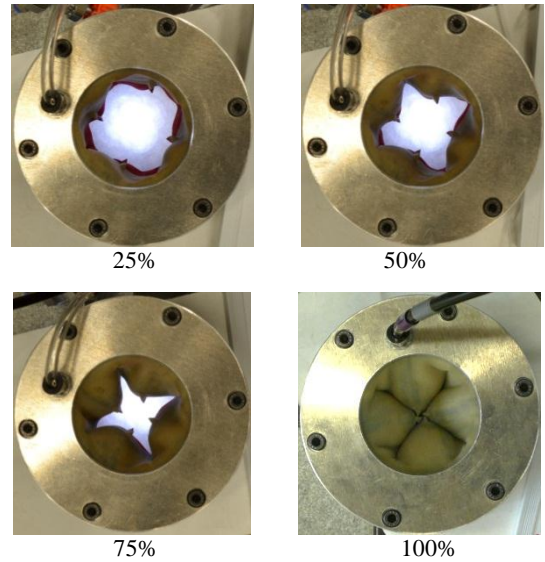


Fig.12 Closing area rate

6. 流量制御実験

作製した弁ユニットを用いて水、粘性流体、固液混合流体の流量を制御することができるかを検証する。

6.1 実験システム

実験システムの概要をFig.13に示す。作製した弁ユニットを用い、印加圧力を変化させ実験を行う。

まず、タンク底部の栓を閉じた状態で貯水タンクに水を貯め、ユニットに指定した圧力値になるよう空気を印加する。その後、二秒間栓を開放しユニットを通過してきた水を受け、計測を行う。また、実験中は水深が一定になるようタンクに水を供給する。なお、空気を印加するコンプレッサーや信号を送るPC、電磁弁については、蠕動運動型ポンプと同様である。

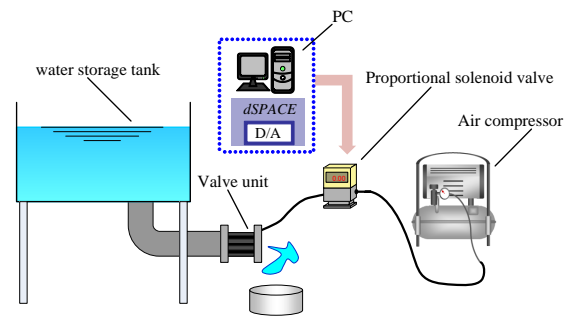


Fig.13 Schematic diagram of experiment system

6.2 流量制御実験

弁ユニットを用いて流量制御を検証するために、基本的な流体である水を用いて実験を行う。また、水頭による影響を確認するために、タンクの水深を200[mm]、300[mm]、400[mm]と変化させる。Fig.14に印加圧力と流量の関係を示す。同図より、印加圧力の上昇に伴い流量が減少しており、流量制御が行えていることが確認できる。しかし、わずかながら低圧力印加時に水頭の差による影響が見られ、値にも不安定さが見られた。不安定さの原因に関しては、流量が多

いことによる実験時の誤差に加え、流速の変化による影響が考えられる。ベルヌーイの式より、管内断面積が減少すると流速が上昇し、面積が最小となった部分の直後において圧力が低下する。加えて、流速は水頭が高いほど上昇する。このため、ユニットの印加圧力が低い時により大きな影響を受けたと考えられる。本実験の結果から印加圧力 P 、流量 Q とし、水頭 H を考慮した関係を式(2)で表すことができる。なお、重力加速度を g 、初期開口部面積を S とする。

$$Q = \sqrt{2gH} \times S \times e^{-103P} \quad (2)$$

式(2)を用いて求めた実験式 Fig.15 に示す。実験値と比較すると、同様の傾向を示していることが確認できる。しかし、特に低圧力印加時において実験値よりも流量が多くなっている。この原因としては、管路による摩擦や吸込み口における損失などが考えられる。そこで、これらの損失を考慮した実験式を算出するために、式(3)のように損失に関する補正係数 α を導入する。

$$Q = \alpha \sqrt{2gH} \times S \times e^{-103P} \quad (3)$$

本装置においては、 $\alpha = 0.55$ となった。

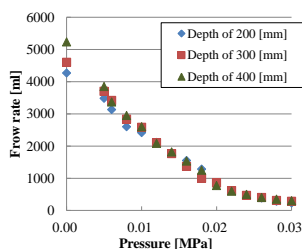


Fig.14 Relationship between pressure and flow rate

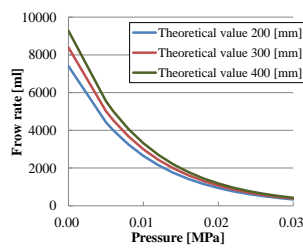


Fig.15 Theoretical value of flow rate

6.3 粘性流体制御実験

粘性流体において弁ユニットが機能するかを検証する。粘性流体にはポリアクリル酸ナトリウム(SAP)水溶液(粘度 15000[mPa・s])を用いる。なお、水深は 200[mm]である。結果を Fig.16 に示す。同図より、水に比べ流量が著しく少ないことがわかる。これは、SAP 水溶液の粘度が水の 15000 倍と高い値であるために、粘性の影響が大きく現れたと考えられる。初期流量を 100%とし、印加圧力と流量の関係を表すと、Fig.17 となる。同図において水と比較すると、不安定ではあるが水と似た傾向であることが確認できる。これは、SAP 水溶液の粘性が高いために管内に流入する量が一定とならず、流量が不安定となったと考えられる。また、水と同様の傾向であることから、粘性の損失を考慮した適切な補正係数を求めることで式(3)を適用することができると考える。

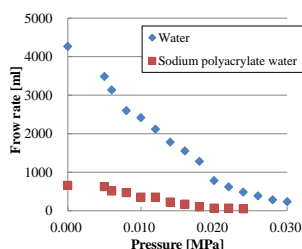


Fig.16 Relationship between pressure and flow rate

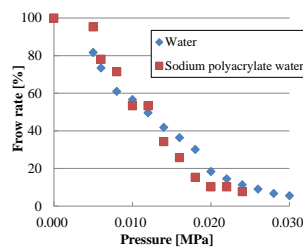


Fig.17 Relationship between pressure and flow rate(%)

6.4 固液混合流体制御実験

固液混合流体において弁ユニットが機能するかを検証する。固液混合流体には水と直径 6 [mm]の球状固体(ポリプロピレン製)の混合体を用いる。なお、水深は 200[mm]とする。結果を Fig.18 に示す。同図より、固液混合流体においても流量制御が行え、流量に関しても同様の傾向となっていることが確認できる。しかし、印加圧力が上昇すると固体がユニット出口部に詰まってしまい、流量が著しく低下し、固体が放出されなくなった。本実験においては 0.016[MPa]以降で固体の詰まりが発生したが、これは固体の大きさによって変化すると考えられる。また、固体含有率の違いにより損失が異なり、固体含有率が高いほど流量が低下したと考えられる。

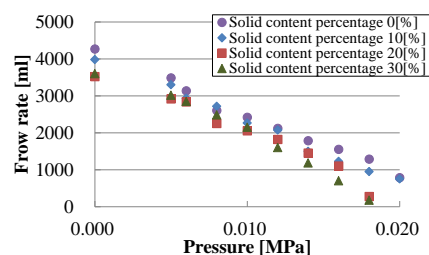


Fig.18 Relationship between pressure and flow rate

7. 弁ユニットと蠕動運動型ポンプの併用

弁ユニットと蠕動運動型ポンプのユニットの仕組みは同様なため、この二つは併用することが可能である。併用することによって、部品交換なしで分岐と合流を切り替える分岐管を実現できる。分岐管のすべての分岐の先に弁ユニット、蠕動運動型ポンプの順に接続することにより、流れの方向を切り替えることに加え、流量比を制御することができる。他にも、蠕動運動の周期を変えることなく、流量の制御を行うことなどが可能となる。

8. 結言

蠕動運動型ポンプの開発に続き、同一の機構を持った流量制御弁の開発を行った。また、水・粘性流体・固液混合流体において流量制御が可能かを検証した。今後は、より適確な損失係数を求められるよう、流路、流体の位置水頭や圧力水頭、流体の粘度などのパラメータを変化させた実験を行う。また、動水圧の影響についても検証を行う。加えて、七章に挙げたような蠕動運動型ポンプと流量制御弁を併用した運用を目指す。

9. 参考文献

- (1) 山根哲夫, 高粘性移送のサニタリー仕様のポンプ, 化学装置, Vol.49 (2007), pp.54-58
- (2) 安達勤, 安部克郎, 東昭, 新井実他, 機械工学便覧B5 流体機械, 丸善
- (3) 白井十四雄, バルブ便覧, 日刊工業新聞社
- (4) 内田さえ, 原田玲子, 鈴木敦子, 佐藤優子, 人体の構造と機能 第2版, 医歯薬出版
- (5) 中村太郎, 図解 人工筋肉, 日刊工業新聞社