

管内挿入型蠕動運動ポンプの開発

Development of an Insertion-type Peristaltic Pump

精密工学専攻 25号 木村義規

Yoshiki Kimura

1. 緒言

現在、固液混合流体や高粘度流体などの特殊流体を搬送するためのさまざまな装置が開発されている。しかし、これら特殊流体の搬送装置は、システムが局所的に集約されている為、配管が延長するに従い大きな運動エネルギーが必要になり大型化する。また管壁との粘性抵抗の影響を受け易く、流動性の低下から管路の目詰まりを起こしかねない。よって、搬送に必要な圧力エネルギーを管路各所に分散させる事で搬送効率が管路長に依存しない、かつ流量や吐出圧をコントロールする事ができる小型のポンプが求められる。

配管内に配置できるほどの小型特殊流体搬送装置があれば、工場などで使用しているポンプが故障した際に応急措置として取り付けて搬送を行うことが出来ると考える。また、ホース内に配置することで、浚渫作業や浚渫物の長距離管送に役立つと考える。

一般的に用いられるポンプは、ターボ形と容積形が主流である⁽¹⁾。ターボ形は羽根車を回転させる機構で、大容量の流体を搬送する際に適する。一方、容積形はピストンを往復運動や回転運動させる機構で、高圧環境下における流体搬送に適する。しかし、高粘度流体や固液混合流体を搬送する際には、ターボ形は発生する流圧が低い点や羽根車の破損が発生する危険性がある点が、容積形においては管路長が大きくなるにつれ搬送効率が著しく低下してしまう点や駆動部とケーシングの間の潤滑性が低い点が問題点として挙げられる。

既存の特殊流体搬送装置にはスクィーズポンプ⁽²⁾がある。スクィーズポンプは弾力性の高いチューブをローラーで押し潰しながら流体を絞り出す機構で、一定の流量を断続的に吐出する流体搬送に適する。しかし、一方で機構が複雑で液中に不純物が混入した流体を搬送することができず、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。

そこで、本研究では腸管の蠕動運動に着目し、これまでに腸管構造を規範とした蠕動運動型ポンプの開発、特殊流体の搬送に成功している⁽³⁾。しかし、このポンプは搬送中外径と全長が変化してしまう、また新たに配管を作製する必要があるといった問題点があった。そこで、我々は既存の配管を用いることで腸管のような蠕動運動による流動を起こすことができれば、これらの問題を解決しながら同様に特殊流体を搬送できるのではないかと考えた。

本論では、同じ蠕動運動を行うミミズ状の装置を配管内に取り付ける管内挿入型蠕動運動ポンプの設計・開発を行い、実際に高粘度流体と固液混合流体の搬送実験を行ってゆく。

2. 蠕動運動型ポンプの機構

管内挿入型蠕動運動ポンプは膨張ユニットと関節ユニットの2種類のユニットから構成される。本研究で開発した管内挿入型蠕動運動ポンプを Fig.1 Expansion Unit, Joint Unit, Air tube, Cap に示す。ポンプの各膨張ユニットをある決まったパターンに従って膨張させることで、管内挿入型蠕動運動ポンプは配管内で蠕動運動し流体を搬送することができる。なお、ユニットの数は3以上であれば自由に増減させる事ができる。流体の搬送の模式図を Fig.2 に示す。

(a), (b)...(f)の順番に膨張箇所をずらすことで流体を搬送する。

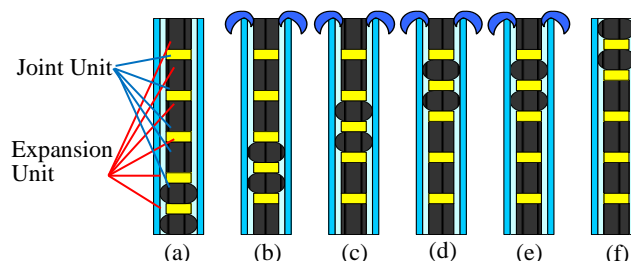


Fig.2 Overview of transport of Insertion-type peristaltic pump

2.1 膨張ユニットの概要

膨張ユニットの断面図を Fig.3 に示す。軸方向繊維強化型人工筋肉（以下、人工筋肉）⁽⁴⁾の内側に天然ラテックスゴム製円筒チューブ（以下、円筒チューブ）を配置し、両端をフランジに接合させる構造をとる。このとき、人工筋肉

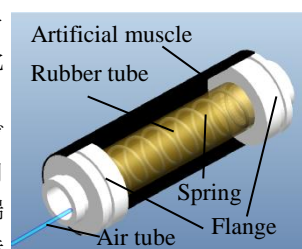


Fig.3 Overview of Expansion Unit

と円筒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。円筒チューブの内側には円筒チューブの内径と同じ外径の圧縮バネが配置されており、これによりエアチューブ、片方のフランジにある空気穴を介してチャンバを加圧することでユニット内部の膨張を阻害しユニット外部の軸方向繊維強化型人工筋肉のみを膨張させることができ、圧縮バネの内側にエアチューブが通るための十分な隙間を確保している。フランジの端には雄ねじが切られており、関節ユニット側の雌ねじと接続できるようになっている。

2.2 関節ユニットの概要

関節ユニットの断面図を Fig.4 に示す。天然ラテックスゴム製円筒チューブの内側に圧縮バネを配置し、両端をフランジに接合させる構造をとる。関節ユニットはバネを用いるこ

とで、本体が展開した際の伸縮性と内部に通るエアチューブの空間の確保を行っている。

フランジの端には雌ねじが切られており、ジョイントユニット側の雄ねじと接続できるようになっている。全長 45 [mm]、直径 24 [mm]となっている。

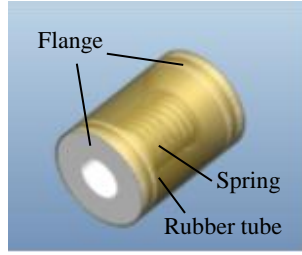


Fig.4 Overview of Joint Unit

3. 膨張ユニットの性能評価

3.1 膨張ユニットの設計

R_{max} を膨張ユニットの最大膨張径、 Φ_f を膨張ユニットのフランジ直径、完全に膨張した際に、人工筋肉が半円になると仮定すると半径 R_m の半円の外周が人工筋肉の膨張箇所長さ L_m となり、(1)式で表される。

$$L_m = \left(\frac{R_{max} - \Phi_f}{2} \right) \times 2 \times \pi \times \frac{1}{2} \quad (1)$$

ポンプは、50A 配管で用いると仮定して作製した。膨張ユニットの最大膨張径 R_{max} は 50A 配管の最大内径 57.2 [mm] の 110% の 63 [mm]、 Φ_f に 22 [mm] を代入して L_m を求めると $L_m \approx 64.37$ より、人工筋肉の膨張部の長さ L_m は 65 [mm] とする。

3.2 膨張ユニットの性能評価

作製した膨張ユニットの圧力応答と時間応答の計測を行った。最初に圧力応答実験を行った。空気圧はユニットの最大直径が十分に膨張するまで印加し、ユニットの直径をノギスで計測

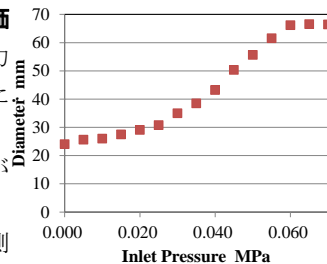


Fig.5 Relationship between applied pressure and maximum diameter

した。Fig.5 に実験結果を示す。空気圧を 0.060 [MPa] 以上印加すると膨張径が目標の 63 [mm] を超えた。よって管内挿入型蠕動運動ポンプの印加圧力を 0.060 [MPa] と決定した。次いで印加圧力 0.060 [MPa] の時の時間応答実験を行った。ユニットを地面に対し垂直に配置し、ユニットの真上からビデオカメラで直径の変化を撮影する。撮影した動画をフレームごとに分解し、画像から直径を算出した。Fig.6 に実験結果を示す。

ユニットの直径は時間とともに増加しており、徐々に増加量が少なくなっている。約 4.0 [s] で 64.0 [mm] となり、以降は直径の変化が見られなかった。つまり、4.0 [s] 以上印加することでユニットの膨張を十分に得ることが出来る。

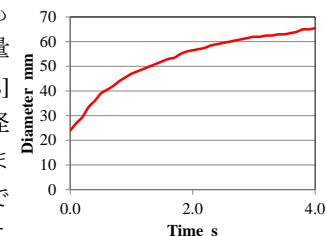


Fig.6 Time response of maximum diameter

4. 吐出量計測実験

作製した蠕動運動型ポンプを用いて基礎特性の計測や高粘度流体・固液混合流体の垂直搬送実験を行った。

4.1 実験システム概要

Fig.7 に実験システムの概要を示す。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。比例電磁弁を用いて印加圧力を、ON・OFF 弁を複数用いることで、各ユニットへの印加をそれぞれ独立して制御することができる。これらの制御された圧力のある規則的なパターンに従って、蠕動運動型ポンプに印加することで流体の搬送を可能にする。搬送実験では各ユニットの印加圧力を 0.060 [MPa] に設定した。吐出量の計測方法は、吐出口より吐出された流体を、ポンプ全体の動作の 2 サイクル分ビーカーで受け取り、電子ばかりで重さを計測し、平均値を記録する。

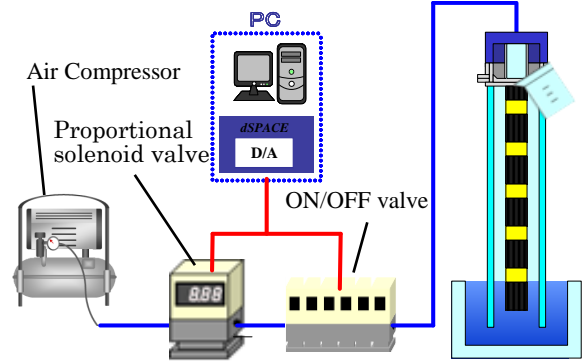


Fig.7 Discharge measurement experiment with the straight pipe

4.2 動作パターン

実験に用いる動作パターンの概略図を Fig.8 に示す。一定の動作間隔において加圧するユニットをずらしていくことで、内包物を運搬する。蠕動運動には、波長・送り・波数の 3 つの要素

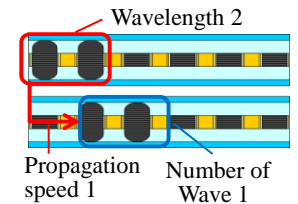


Fig.8 Motion pattern 2-1-1

がある。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際に伸張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である。Fig. 8 は波長 2・送り 1・波数 1 の場合を示す。以後、波長・送り・波数の 3 つの要素を l - s - n と表す。

4.3 体積効率

体積効率 η_v [%] は、幾何学的に算出できる理論最大吐出量を Q_{th} [m³/cycle]、実験から得られる体積吐出量を Q [m³/cycle] として(2)式で定義される。

$$\eta_v = \frac{Q}{Q_{th}} \times 100 \quad (2)$$

管内挿入型蠕動運動ポンプは理論上膨張ユニットの膨張体積と同じ体積の流体が 1 サイクル中に吐出される。

よって 1 ユニットの膨張体積 V_u に 1 サイクル中膨張ユニット数を掛けたものが Q_{th} となり全ユニットの数を N とすると(3)式で表される。

$$Q_{th} = V_u(N - l \times n) \quad (3)$$

(3)式を(2)式に代入すると体積効率 η_v [%]は(4)式で表される。

$$\eta_v = \frac{Q}{V_u(N-l \times n)} \times 100 \quad (4)$$

4. 4 水の搬送実験

ここでは、蠕動運動型ポンプの基礎特性を得るために、基本的な搬送流体として水の吐出量計測実験を行った。

4. 4. 1 水の垂直搬送実験

実験では、管内挿入型蠕動運動型ポンプを水で満たされたプールの中に垂直に配置し吐出量を計測した。実験結果をFig.9に示す。搬送可能となる動作間隔は3-1-1が一番短い時間となっている。これは実験した3パターンの中で波長が一番長く、把持するまでの時間に余裕が出来たためであると考えられる。吐出量が収束するのは、ユニットが十分に膨張し、押し出す水の量が等しくなったためである。次に体積効率に直した結果をFig.10に示す。2-1-1では86.0 [%], 3-1-1は91.4 [%]をそれぞれ記録した。一方2-1-2では50.0 [%]と他の2パターンに比べて低い値を記録した。これは、2-1-2では隣接したユニットが膨張と収縮を同時に行っているため、収縮完了前に下のユニットが管を塞いでしまい、結果、吸い上げる水の量が減ったためと考える。また、体積効率の指標が最も良かった3-1-1を管内挿入型蠕動運動ポンプの基準の動作パターンとし、以降の比較に利用する。

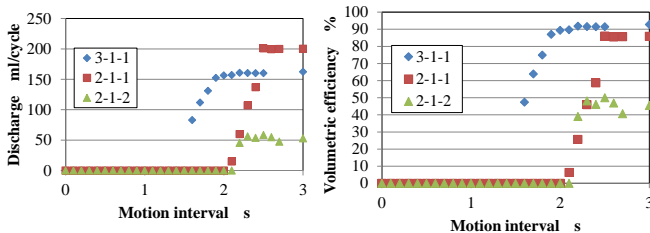


Fig.9 Relationship between Motion interval and discharge

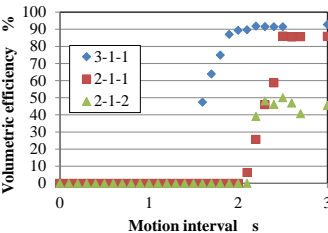


Fig.10 Relationship between Motion interval and Volumetric efficiency

4. 4. 2 水のエルボ管搬送実験

次に曲管で流体を搬送する際、流路の差で吐出量にどのような影響が生じるかを調べるためにエルボ管を用いて水を搬送した。管路の様子をFig.11に示す。図の H_p , L_p を変化させて実験を行った。実験結果をFig.12に示す。管路は H_p [mm]- L_p [mm]と表記する。 H_p が小さい場合は、搬送可能となる動作間隔が短くなる。これは、エルボ管の位置が低いため、直管での搬送に比べ、流体を持ち上げる必要のある距離が短くなり、小さい負圧で搬送できるようになったためであると考えられる。一方 H_p が一定であると L_p が大きくなるほど体積効率

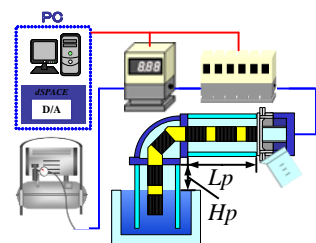


Fig.11 Discharge measurement experiment with the pipe elbow

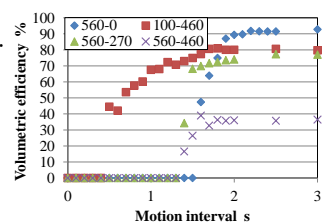


Fig.12 Relationship between Pipe line and Volumetric efficiency

が減少している。これは、水平に流体を搬送する際に流体が管路の先に流れていくことでいつまでも管内全体が流体で満たされないためであると考えた。そこでFig.13のように水平方向に搬送するとき管路に流体が満たされるように水平方向の先にもう一つエルボ管を付け搬送したところ体積効率は79 [%]と体積効率が向上した。

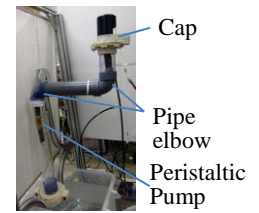


Fig.13 Double elbow Pipe line

4. 5 特殊流体の垂直搬送実験

ここでは、高粘度流体や固液混合流体といった特殊流体の垂直搬送実験を行う。実験方法は水の搬送と同様である。

高粘度流体の垂直搬送を行う。粘性流体には、菜種油(900 [mPa · s])及び、ポリアクリル酸ナトリウム水溶液(19000 [mPa · s])を用いる。

Fig.14に実験結果を示す。搬送可能となる動作間隔は粘性が高いほど短い動作間隔となっている。

これは粘性が高いと搬送中に配管壁面との粘性摩擦が働き、水に比べて流体が下部に落下しにくいためであると考えられる。一方収束値を比較すると、粘性が高いほど体積効率が低くなっていることがわかる。この原因として吸込部の力の釣り合いによるものが考えられる。粘性が高くなると、流体の粘性摩擦力が大きくなるため、力が釣り合い、ユニットが完全に開くことなく静止していると考えられる。これにより、蠕動運動型ポンプは、本来の吸い込み量よりも少ない量しか吸込できない状態になり、水に比べ吐出量が減ったと考える。吐出量を増やすためには、ユニットを復元するための補助が必要となる。強制排気システムの構築や、十分な復元力を有するバネを用いることによって、高粘性流体の搬送時でも水の搬送時と同等の吐出量が可能になると考える。

次に固液混合流体の垂直搬送実験を行った。

固体としてペレット(ポリエチレン製 直径 3.5 [mm])を使用した搬送は不可能であった。実験を開始直後固液混合流体は搬送されたが、固体が膨張ユニット・配管間に挟まることによって隙間が生じてしまい、その隙間から流体のみが落下する現象が生じた。この現象を繰り返すことによって配管内に固体のみが残り最終的には膨張ユニットが膨張できなくなってしまった。Fig.15に搬送実験の様子を示す。よって固液混合流体の搬送を行うためには搬送する固体を十分に包み込むことができるような柔らかさを持った適切な素材・厚みの外装部を作製が必要であると考えられる。

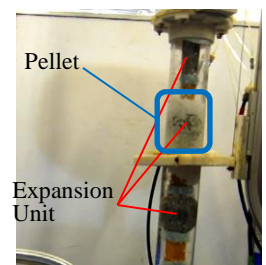


Fig.15 Solid-liquid mixture transport experiment

5. エネルギー効率の算出

この章ではポンプの評価基準として一般に用いられている揚程とエネルギー効率の導出を行う。

5.1 揚程の算出

ポンプの性能を示す全揚程 H [mH₂O] は一般に式(5)で表される⁽⁵⁾。

$$H = H_{sa} + H_{sf} + H_{da} + H_{df} \quad (5)$$

Fig.16 に揚程の概要を示す。 H_{sa} [mH₂O] は吸込実揚程, H_{sf} [mH₂O] は吸込配管抵抗, H_{da} [mH₂O] は吐出し実揚程を, H_{df} [mH₂O] は吐出し配管抵抗をそれぞれ示す。 Fig.17 に管内挿入型蠕動運動ポンプの吸込み揚程の概要を示す。管内挿入型蠕動運動ポンプの基準面を固定されている高さとする, Fig.17 では一番上のユニットの上部となる。この時吸込み側の水面高さから基準面までの高さが H_{sa} となる。

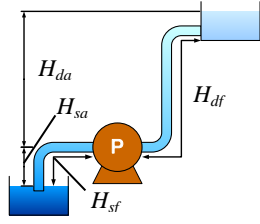


Fig.16 Head

管内挿入型蠕動運動ポンプが完全に性能を発揮するためには, Fig.17 の H_i [m] まで流体が吸い込めればよい。管内挿入型蠕動運動ポンプは真空によって流体を吸い上げているので, 常に流体が完全に吸い込まれると仮定すると大気圧は 10.336 [mH₂O] より,

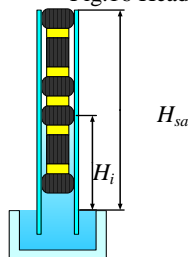


Fig.17 Head of Insertion-type Peristaltic Pump

$$H_i + H_{sf} = 10.336 \quad (6)$$

となる。ここで関節ユニットの長さは変化しないものと仮定すると, 全ユニットの長さ L [m] は全膨張ユニットの数を N , 膨張ユニットの最大長さ L_{emax} , 最小長さ L_{emin} , 関節ユニット長さを L_j とすると

$$L = (N - l \times n) \times L_{emax} + l \times n \times L_{emin} + (N - 1) \times L_j \quad (7)$$

で表される。また, 波の間の長さ L_w [m] とすると, 吸込実揚程 H_{sa} , 吸込配管抵抗 H_{sf} は式(8)のように表すことができる。

$$H_{sa} + H_{sf} = L - (L_w + L_{emin}) + H_i + H_{sf} \quad (8)$$

次に H_{da} , H_{df} を求める。管内挿入型蠕動運動ポンプは印加圧力 P_{in} , 大気圧中で配管を密閉できる最低圧力を P_{min} とすると以下の式を満たす範囲の印加圧力で流体を搬送することができる。

$$P_{in} - (H_{da} + H_{df}) - P_{min} \geq 0 \quad (9)$$

(9)式より H_{da} , H_{df} の合計は P_{in} と P_{min} の差圧となる。

5.2 エネルギー効率の算出

電動ポンプの水動力 P_w [kw] は液体の流量を Q [m³/min], 液体の密度 ρ とすると

$$p_w = 9.8 \times \frac{QH}{60} \rho \quad (10)$$

と表すことができる⁽¹⁾。ポンプのエネルギー効率 η [%] は駆動に必要な軸動力を P [kw] で表すと

$$\eta = \frac{P_w}{P} \times 100 \quad (11)$$

と表すことができる⁽⁵⁾。管内挿入型蠕動運動ポンプの軸動力は, 1 サイクル中に印加する空気圧の平均値となる。印加圧力 0.060 [MPa], 膨張ユニットに流入する空気の量は印加圧力 0.060 [MPa], パターン 3-1-1, 動作間隔 2.2 [s] の時の実測値と仮定し計算を行うと Fig.18 となる。3-1-1 の場合 $\eta = 77$ [%] 程度で収束し一般的なポンプと同程度の値を記録した⁽⁶⁾。またそれぞれ 2-1-1 の場合は 95 [%], 2-1-2 の場合は 12 [%] 程度で収束をした。

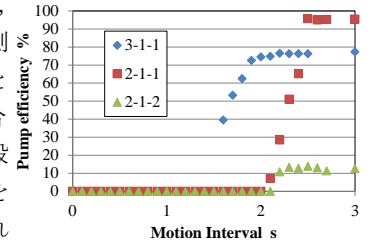


Fig.18 Pump efficiency

6. 結言

管内挿入型蠕動ポンプの機構を開発した。実験の結果水の垂直搬送, エルボ管搬送, 高粘度流体の垂直搬送に成功した。また, ユニットの性能評価, 及び全揚程・エネルギー効率の算出を行った。その結果パターン 3-1-1 動作間隔 2.2 [s] の場合, 全揚程は 11.5 [m], エネルギー効率 76.5 [%] となり, 一般的なポンプと同程度の効率となった。

今後は, 搬送流体に応じた外装を作製し, 特殊流体の搬送を可能にする予定である。

7. 参考文献

- (1) 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, 東京
- (2) M. Hu, H. Du, and S. Ling, "A Digital Miniature Pump for Medical Applications", Proc. IEEE/ASME, VOL. 7, NO. 4, 2002, pp. 519-523.
- (3) Taro Nakamura, Kazuyuki Suzuki, "Development of a Peristaltic Pump Based on Bowel Peristalsis using Artificial Rubber Muscle", Advanced Robotics, Vol.25, No.3, pp. 371-385, (2011)
- (4) Taro Nakamura and Hitomi Shinohara, "Position and Force Control Based on Mathematical Models of Pneumatic Artificial Muscles Reinforced by Straight Glass Fibers", Proceedings of IEEE International Conference on Robotics and Automation pp. 4361-4366(2007)Conference on Robotics and Biomimetics
- (5) 一般財団法人日本規格協会, JIS ハンドブック 16 ポンプ, 一般財団法人日本規格協会, 東京(2012)
- (6) 梶原滋美, 新版 ポンプとその使用法, 丸善, 東京(1997)