腸管構造を規範とした蠕動運動型ポンプの開発

Development of a peristaltic pump

based on bowel peristalsis using for artificial rubber muscle

○ 学 鈴木 一将 (中央大) 正 中村 太郎 (中央大)

Kazuyuki SUZUKI, Chuo University, k_suzuki@bio.mech.chuo-u.ac.jp

Taro NAKAMURA, Chuo University, nakamura@bio.mech.chuo-u.ac.jp

Abstract—Currently, we are anxious about a global water shortage. The main cause of water lack is the surplus use of the water resources by the human. Therefore, the approach on positive water saving is needed for resolution of the water shortage. On the one hand, there is much water which is used to toilet washing at general home. Consequently, it is necessary to develop the sewage disposal system that functions under water saving.

We focused on the bowel peristalsis as a model of the kind of mechanism which can convey the sludge even with the little water. In this paper, we suggested two mechanisms which unitize the whole pump, and compared the capability of them. Additionally, we made the peristaltic pump of six units with superior mechanism, and had transportation experiments.

Key Words: Biomimetics, Artificial muscle, Bowel peristalsis

1. 緒言

現在、災害時における土砂の搬送や下水処理、工場における食品や汚泥の搬送など、様々な場面において固液、粘性流体の搬送装置が必要となる。その中でも、下水処理や食品、汚泥の搬送における衛生面を考慮すると、搬送領域と人の生活環境とを分けた方がよいと考える。そのため、自動化ができ、かつ周辺環境と隔離して搬送することのできるポンプに着目した。

現在使われているポンプとしては、ターボ形、容積形が主流である^[1]。ターボ形は羽根車を持つ機構で、多量の流体（主に気体）搬送に適する特徴を持つ。一方、容積形は、空気圧もしくは油圧によるピストン運動で流体に圧力を与える機構で、高圧環境下に適する特徴を持つ。しかし、それぞれ固液搬送する際には、以下の問題がある。まず、ターボ形においては、流圧が低いこと、羽根車が破損する危険性があるということが挙げられる。一方で、容積形においては、管路が伸びていくにつれて搬送効率が著しく低下すること、潤滑性に欠けることが挙げられる。

そこで、上記の問題点を解決できる機構のモデルとして、腸の蠕動運動に着目した。腸の蠕動運動は、腸管内の側面に位置する輪走筋の収縮動作と弛緩動作の繰り返しによって行われる。動物の腸内では、この繰り返し動作を後方に次々に伝播させていくことで食塊の搬送を可能にしている。この搬送方式をポンプに用いることで、ポンプ全長に渡り、一定の圧力と効率を保った搬送が可能と考えた。本研究では腸を規範とした蠕動運動型ポンプの開発を目指す。

2. 腸の蠕動運動

図1に腸の蠕動運動の様子を示す。腸の蠕動運動^[2]は次の3段階に分かれている。まず、食塊の移動が腸の側面に配置された輪状筋を伸展させ刺激する。次に、刺激を受けた輪状筋が環状に収縮し食塊を押し出す。最後、食塊を完全に押し出した輪状筋は弛緩し元の状態に戻る。この過程が次々と繰り返されることにより、腸内の食塊を運搬することができる。これより、腸内での運搬は輪状筋の

Fig.1 Bowel peristalsis

収縮力のみを用いれば可能であることが確認できる。この観点から、腸の蠕動運動の機構を模した配管では、水の使用量が少なくても固液の搬送が行えるのではないかと考える。

3. 機構の提案

本ポンプは全体をユニット化し、各ユニットを腸の輪走筋に見立てた機構である。ユニットの断面を図2に示す。軸方向繊維強化型人工筋肉^[3]の内側に円筒チューブを配置し、それぞれの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。これより、空気穴を介してチャンバを加圧することができる。図3は加圧時のユニットの変化の様子である。人工筋肉は半径方向にのみ膨張し、ユニットの軸方向に収縮が生じる。

Fig.2 Cross-section diagram of a unit

円筒チューブは内包した4本の繊維が拘束体となり、軸方向から見ると膨張部が4分割され、拘束体を基点として折れ目が生じる。軸方向から見た円筒チューブの膨張形状は、四方から4分の1円が迫り出してくるような形状になる。なお、軸方向繊維強化型人工筋肉と円筒チューブについては以下で解説する。

Fig.3 Appearance of pressurization

3.1 軸方向繊維強化型ゴム人工筋肉

本人工筋肉を図4に示す。本人工筋肉は、低アンモニア天然ゴムラテックスをチューブ状に成形し、ゴム膜内の軸方向へカーボンシートを配置した構造を有する。カーボンシートは細いカーボンロービング繊維を束にしてシート状にしたもので、ゴム膜の変形にあわせて繊維幅も広がる。人工筋肉に空気圧を供給すると、ゴム膜は膨張するが繊維はほとんど伸びないため、膨張は軸方向のみ拘束される。

その結果、人工筋肉は半径方向に膨張して軸方向に収縮する。このときの収縮力をアクチュエータとして利用する。

Fig.4 A straight fibers muscle

3.1 円筒チューブ

本円筒チューブを図5に示す。本円筒チューブはカーボンロービング繊維を内包した低アンモニア天然ゴムラテックスであり、この繊維は軸方向に緊張させた状態で円周方向に等間隔に配置されている。円筒チューブの繊維はユニット内部の膨張変形を安定させる役割を果たし、その最適な繊維数はFig.6に示すモデル図で検討される。円筒チューブの直径を d [mm]とする。図6に示すモデルは、任意の繊維数 i を内包した円筒チューブが理想的に膨張したときの状態を、ユニットの軸方向から見た様子である。ここに、破線は膨張前、実線は膨張時、赤線は膨張後のゴム部の形状である。また繊維配置を星印で示し、円周上反時計回りに1, 2, 3, ..., i とした。ユニット内部が完全に閉鎖するためには、円筒チューブに弛みが生じてはならない。ゆえに、

$$id \geq \pi d \quad (1)$$

となる。ここに i は整数であるから、式(1)を満たす最小の整数値を求めると

$$\therefore i \geq 4 \quad (2)$$

を得る。繊維数 i は大きいほど、最終膨張形状に至るまでに必要なゴムの伸展量が多くなり、また膨張伸展角の減少によるゴム膨張部同士の干渉が強くなるため、必然的に必要な圧力が高くなる傾向がある。これより、繊維数はできるだけ小さいほうが良いと考え、本研究では繊維数 i を4とした。

円筒チューブの軸方向長さは、ゴム部に折れ目が出来ない条件とユニット内部が完全に閉鎖する条件で検討される。まず、ゴム部に折れ目が出来ない条件を考える。図6に繊維よって区画されたゴム部のモデルを示す。同図から円筒チューブの区画されたゴム部が長方形になるのは明らかである。ゴム部に折れ目が生じないためには、加圧時にこの長方形の軸方向に平行な辺が長辺であればよい。円筒チューブの軸方向長さを l [mm]、収縮量 x [mm]とすれば、

$$l > \frac{\pi d}{i} + x \quad (3)$$

となる。次に、ユニット内部が完全に閉鎖する条件を考える。図7は円筒チューブのゴム部の膨張をユニットの半径方向から見た様子である。ここで、ゴム部は円弧状を保ったまま膨張すると仮定する。ユニット内部が完全に閉鎖するためには、

$$l > d + x \quad (4)$$

となる必要がある。なお式(3)、(4)に用いる収縮量 x は、実験から得られる近似定数を用いて導出される。

Fig.5 Cylindrical tube

Fig.6 Concerning the number of fiber

Fig.6 Model of compartmental area

Fig.7 Appearance of expansion

4. ユニットの性能評価

作製した試作ユニットを図8に、仕様を表1に示す。本研究では、ユニットの性能評価パラメータとして閉口率と体積排除率を定義する。図9に閉口率と体積排除率の概要図を示す。閉口率 Ca [%]はユニットを軸方向から見たときの初期開口面積を S_0 [mm²]、加圧時開口面積を S [mm²]として式(5)で定

義する。これは、ユニットの弁としての性能を表す。

$$C_a = \frac{S_0 - S}{S_0} \times 100 \quad (5)$$

また体積排除率 E [%] は、ユニットの初期内部体積を V_0 [mm³]、加圧時内部体積を V [mm³] として式(6)で定義する。これは、ポンプの搬送効率の指標となる。

$$E = \frac{V_0 - V}{V_0} \times 100 \quad (6)$$

Fig.8 Prototype of a unit

Table 1 Specifications of a unit

Length of cylindrical tube [mm]	70
Diameter of cylindrical tube [mm]	60
Length of artificial muscle [mm]	80
Diameter of artificial muscle [mm]	89

Fig.9 Schematic diagram of parameters

まず、図 10 に圧力と閉口率の関係を、図 11 に圧力と体積排除率の関係を示す。両図から閉口率、体積排除率ともにほぼ 100 [%] に近い値を示している。また、約 0.03 [MPa] の圧力を印加することで、十分な性能が発揮できることが分かる。

次に、図 12 に立ち上がり時間と閉口率の関係を、図 13 に立ち下がり時間と閉口率の関係を示す。両図から、立ち上がり時間に約 1 [s]、立ち下がり時間に約 3 [s] かかるのが確認できる。この応答時間の差は、立ち上がり時には空気圧アクチュエータでユニットを駆動させるが、立ち下がり時には円筒チューブの弾性力のみ依存するために生じると考える。また、円筒チューブのゴム厚を変化させて実験を行ったところ、ゴム厚が高くなるほど、立ち上がりが遅くなり、立ち下がりが早くなっているのが確認できる。これは、ゴム厚が高くなるほど、円筒チューブの剛性が高くなり、ユニットが元に戻る際の弾性力が高くなるためであると考えられる。

Fig.10 Relationship between pressure and closed area rate

Fig.11 Relationship between pressure and volume exclusion rate

Fig.12 Relationship between rise time and closed area rate

Fig.13 Relationship between fall time and closed area rate

5. 蠕動運動型ポンプ

本研究で開発した蠕動運動型ポンプを図 14 に、仕様を表 2 に示す。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。このユニットの収縮をある決まったパターンに従って行うことで、ポンプは蠕動運動し内包物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。本研究では、6 ユニットの蠕動運動型ポンプを作製した。

Fig.14 Peristaltic pump

Table 2 Specifications of peristaltic pump

Maximum length [mm]	561
Minimum length [mm]	462
Mass [g]	1343

ユニットの内部構造を図 15 に、仕様を表 3 に示す。ユニットを連結する場合はチャンバ内に空気チューブを配置する。この空気チューブは、各ユニットに空気を供給するための流路であり、チャンバに配置することで省スペース化を実現する。また空気チューブは円弧を描くように配置することで、ユニット収縮時にチューブが折れ、流路が断たれるのを防ぐ。フランジ A とフランジ B は対になっており、ユニット連結時に円筒チューブの端を挟み込むことで、円筒チューブの固定を可能にする。この固定方法を採用することにより、フランジの厚さの影響による搬送ロス無くすることができる。

Fig.15 Inner structure of a unit

Table 3 Specifications of a unit

	Extension	Contraction
Length [mm]	91.5	75.1
Maximum diameter [mm]	91.3	150.1
Bore [mm]	57.8	
Mass [g]	213	
Contraction rate [%]	18.2	

6. 搬送実験

作製した蠕動運動型ポンプを用いて、液体・固液体の搬送実験を行った。図 16 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 6 つ用いることで、各ユニットに印加される圧力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決まったパターンに従って、蠕動運動型ポンプに印加することで内包物の搬送を可能にする。

Fig.16 Schematic diagram of experiment system

実験に用いる運動パターンの概略図を図 17 に示す。同図のように、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。

実験は図 18 のように、搬送対象が大量に入ったタンクを用意し、このタンクに蠕動運動型ポンプを浸け θ 度上方へ搬送する。ここに、液体搬送は水と水の 900 倍の粘度をもつ菜種油を用いて、動作間隔を変化させながら実験した。また、固液搬送には水と BB 弾（ポリプロピレン製、直径 6[mm]）の混合体を用いて、動作間隔を 2[s] に固定し、固体含有率を変化させながら実験した。ここで、それぞれ θ は 90 度とし、ポンプ上方から溢れ出る流体を計量し、流量を計測した。

Fig.17 Schematic diagram of motion pattern

Fig.18 Schematic diagram of experiment

液体搬送の実験結果として、図 19 に動作間隔と流量の関係を示す。左のグラフは蠕動周期当たりの流量を、右のグラフは 1 分間当たりの流量を示す。左図から、動作間隔が長いほど流量が高くなっており、動作間隔 4[s] 以降はほぼ一定となった。これはユニットが定常状態に至るまでに必要な時間が 4[s] であるためだと考える。右図から、流量は動作間隔が約 0.8[s] 付近で最大となり、蠕動周期当たりの流量が最大となる際の動作間隔と大きな違いが生じた。これは、蠕動周期当たりの流量は閉口率や体積排除率の影響を大きく受けるが、1 分間当たりの流量では蠕動回数の影響が大きく出るためだと考える。両図より、液体の粘性が高くなると多少流量は低くなるが、ほぼ同程度の性能を発揮でき、高粘度流体を垂直搬送できているのが確認できる。

固液搬送の実験結果として、図 21 に固体含有率と流量の関係を示す。同図から、固体含有率が高くなると流量が低くなっているのが分かる。これは、固体含有率が高くなるにつれ、BB 弾が膨張したゴム部の間に挟まりやすくなり、ユニットの閉鎖時を妨げるためであると考えられる。同図より、固液体を垂直搬送できているのが確認できる。

Fig.19 Relationship between motion interval and flow rate

Fig.20 Relationship between solid content percentage and flow rate (peristalsis cycle)

7. 結言

腸管を規範とした蠕動運動型ポンプのユニットの仕様を検討し、性能評価を行った。また、6 ユニットの蠕動運動型ポンプを作製し、高粘度流体・固液体の重力に依らない搬送が可能であることを示した。今後は、実験条件を変えながらさらに検討し、曲管の開発も行う予定である。

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
- [2] 内田ええ, 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
- [3] 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)