

空気圧人工筋肉を用いた腸管構造を模した蠕動運動型ポンプによる高粘性流体およびマイクロ粒子混合実験

○伴遼介(中央大) 吉浜舜(中央大) 中村太郎(中央大) 岩崎祥大(総研大) 羽生宏人(JAXA)

1. 緒言

近年、宇宙産業の発展のために、比較的lowコストである固形燃料ロケットの高頻度な運用が期待されている。そのため、固体推進薬製造プロセスの改良による更なるlowコスト化が望まれている。

現在、固体推進薬の製造は、金属製の羽の回転による混合を行う装置を用いることで行われている。しかし、この装置では混合中の摩擦等による発火の危険性から、監視の必要性が生じ、一度に大量生産が出来ないため、高コスト化の要因となっている。

また、現在の製造プロセスはバッチプロセスであり、混合器への材料の搬送および混合器から注型する工程を自動で連続的に行うことが難しく、lowコスト化が困難となっている。

そこで、固体推進薬の新しい製造プロセスのモデルとして、著者らは人間の腸管に着目した。腸管には大きな力を必要とせず搬送と混合を行う動作がある。^{[1][2]}この動きを再現することで安全な搬送と混合を1つの装置内で連続的に行うプロセスを作成することが可能であると考えた。

著者らはこれまでに腸管構造を模した蠕動運動型ポンプの開発を行い、高粘性流体や固液混合流体の搬送の有用性を示してきた。^[3]そこで、蠕動運動型ポンプで腸管の混合動作を再現することで混合装置として応用できると考えた。

本論では蠕動運動型ポンプを用いて腸管の混合動作を再現し、高粘性流体やマイクロ粒子の混合が可能であるかを確認する。

2. 蠕動運動型ポンプ

蠕動運動型ポンプは、腸管の輪走筋を見立てた同形状のユニットの組み合わせで構成されている。Fig. 1に蠕動運動型ポンプの外観を示す。

蠕動運動ユニットの断面図をFig. 2に示す。単一ユニットの内側には閉口チューブ、外側には軸方向繊維強化型人工筋肉を用いる。これらの間のチャンバに空気を印加することでユニットを膨らませ、管を閉塞することで管内の流体を押し出す。



Fig. 1 Peristaltic pump

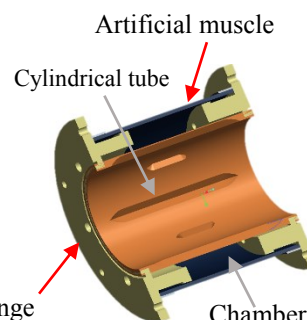


Fig. 2 Cross-section diagram of a pump unit

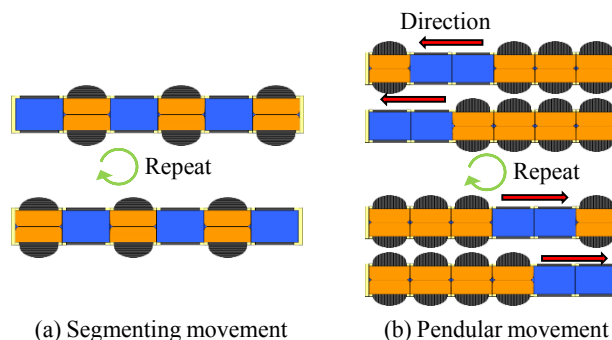
3. 蠕動運動型ポンプを用いた混合手法

3.1 蠕動運動型ポンプを用いた混合手法

腸の混合動作には分節運動と振り子運動の2種類の動作がある。分節運動とは、腸管の輪走筋と呼ばれる筋肉が一定の間隔で閉塞、復元を繰り返す運動である。この動作で内容物は分割、再結合を繰り返し、混合されていく。

振り子運動は、蠕動運動のように筋肉の収縮などで内容物を押し出すことで搬送し、腸管内で往復させる動作である。この動作の過程で、内容物は押し出しや腸壁との摩擦で変形を繰り返し、徐々に混合されていく。

著者らはこれらの動作を、空気圧を印加するユニットを変えることで、蠕動運動型ポンプで再現した。蠕動運動型ポンプによる分節運動および振り子運動の概要をFig. 3に示す。



(a) Segmenting movement (b) Pendular movement
Fig. 3 Overview of the mixing movement by peristaltic pump

3.2 高粘性流体同士の混合実験

高粘性流体の混合が可能であることを確認するために、高粘性流体同士の混合実験を行う。

Fig. 4に実験装置を示す。高粘性流体として、ポリアクリル酸ナトリウム水溶液(19000 [mPa·s])を白と黒に着色したものを250 [g]ずつ用意し、白、黒の順

にポンプ内に入れて混合動作を 3 [h] 行った。印加空気圧は 60 [kPa] に設定し、この時のユニットの排気時間から動作間隔は 6 [s] に設定した。

混合動作は下端を閉塞し上端は開放した状態で垂直に設置した場合の分節運動と振り子運動(パターン 1, 2), 両端を完全閉塞し、横向きに設置した場合の分節運動と振り子運動(パターン 3, 4)の 4 種類を行った。

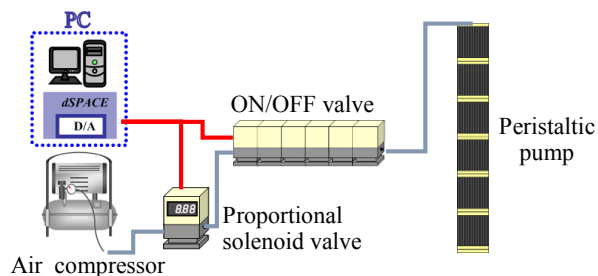


Fig. 4 Mixing experiment using peristaltic pump

それぞれの混合物をなるべく同じ環境下で撮影した写真から求めた輝度値ヒストグラムを Fig. 5 に示す。参考として、著者らが手で 10 分ほど混ぜた場合のヒストグラムを追加した。

Fig. 5 より全ての動作で混合が可能だとわかる。また、この中で輝度の範囲が最も小さいパターンはパターン 4 である事がわかり、最も均一に混ぜられていると考える。これは振り子運動は分節運動の場合よりも大きく流体が移動する運動であるため、流体が全体的に混合されたと考える。

これらから、蠕動運動ポンプによる流体混合には振り子のような流体全体が滞りなく大きく動く動作が効果的であると考える。

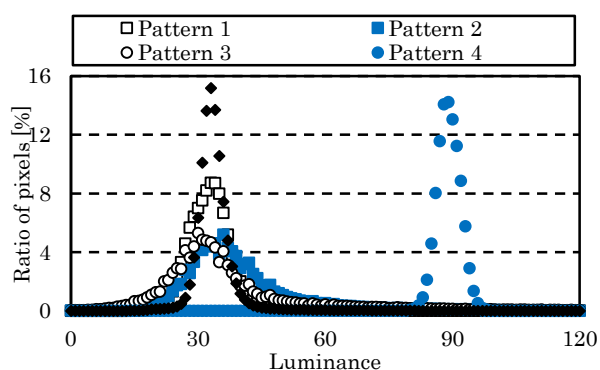


Fig. 5 Luminance value histogram

3.3 高粘性流体とマイクロ粒子の混合実験

蠕動運動型ポンプを用いて高粘性流体(ポリアクリル酸ナトリウム水溶液)と固体(ガラスビーズ ($\phi 400$ [μm]))の混合を行なう。高粘性流体と固体の割合が 50 [wt%] になるように高粘性流体 250 [g], 固体 125 [g] を管内に入れ、混合動作を行う。実験装置は Fig. 4 と同じものを使用し、混合時間、印加圧力、動

作間隔は 3.2 節での実験と同様にする。動作パターンは 3.2 節において良い結果の得られたパターン 1 と 4 を用いる。実験後に混合物中から 10 点を無作為に取り出し、液体と固体の割合を測定する。

実験結果を Fig. 6 に示す。どちらのパターンでも全ての点で固体を含んでおり、混合が確認できた。パターン 1 の平均値は 35.8 [wt%] であり、全体的に 50 [wt%] よりも低い。また、標準偏差は 9.31 となっており混合にムラがあると考えられる。実験後、下端部に固体を多く含む混合物が確認された。このことから分節運動では流体の動きが滞る地点が存在し、その点に固体が蓄積していったことが考えられる。

一方、パターン 4 は平均 53.0 [wt%] と 50 [wt%] に近く、標準偏差も 2.21 と小さいため比較的均一であると考えられる。これらのことから、固液混合においても振り子運動が有効であることがわかった。

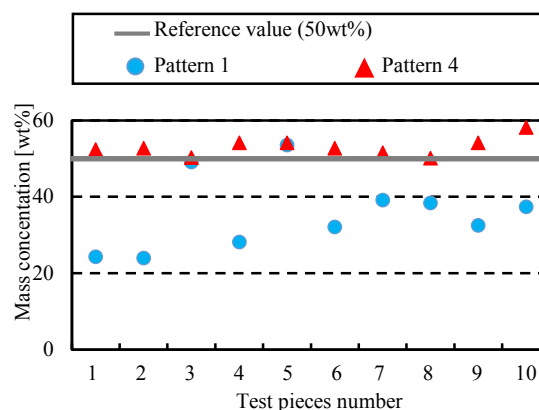


Fig. 5 Luminance value histogram

4. 結言

蠕動運動型ポンプを応用し、高粘性流体同士と固液混合を行った。実験から、液体同士の混合、および固液混合が可能であることを示した。今後はさらなる効率向上のために適切な設計を行なう。

5. 参考文献

- [1] 横山正松(1985), 消化管収縮運動各論, 消化管運動機能調節剤-基礎と臨床-, pp.193-212, 三好秋馬・伊藤漸偏, 初版, 医薬ジャーナル社, 大阪.
- [2] 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.
- [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).