

磁気浮上型人工心臓の流量推定に関する研究

Pump flow rate estimation of magnetically levitated artificial heart

06NM407S 石塚 健太郎

指導教官：増澤 徹 教授

1. 緒言

人工心臓の駆動状態を監視するため、運転中の流量を計測することは重要である。しかし現存の流量計では装置が大きく、体内埋め込みが不可能である。そのため、流量計に代わる流量推定法の開発が求められている。一方、心不全患者の救命方法の一つに体内埋め込み型人工心臓の永久使用があるが、ポンプの寿命が大きな問題となっている。その解決策として、磁気浮上技術を応用し、長寿命化を実現した磁気浮上ポンプが開発されている。我々はサークルボリュートを採用した径方向磁気支持タイプの磁気浮上ポンプを開発している。サークルボリュートのポンプは、拍出流量に比例してインペラに働く径方向流体力が増加する特徴を持っている。本研究では流体力を利用した拍出流量の推定を目的とし、様々な流体力学的環境で磁気浮上ポンプのインペラ挙動の解析とインペラにかかる流体力の推定を行った。

2. 方法

2.1 ラジアル型磁気浮上遠心ポンプ

Fig. 1 に磁気浮上型遠心ポンプの構造図を示す。本磁気浮上型遠心ポンプはステータの外周にインペラと一体化したロータを配置したアウトロータ型の構造をとっている。12 突極ステータに 3 相 4 極の回転制御用と 2 相 6 極の浮上制御用の 2 種類のコイルを配置している。これにより、回転制御と浮上制御を独立に実現するセルフベアリングモータを構成している。ロータはステータの浮上用コイルにより径方向に動的に支持されている。また、ロータを薄型にすることで軸方向の変位と傾きを受動安定性で静的に支持し、制御系の簡略化を図っている。本ポンプの直径は 78.5 mm、高さは 41.5 mm であり、十分に体内埋め込める大きさである。また、最大揚程は 250 mmHg、最大流量は 14.9 L/min であり、補助人工心臓として十分応用可能である。

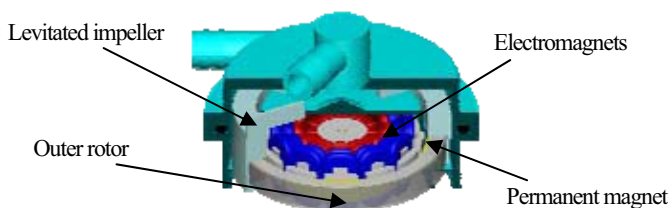


Fig.1 Magnetically suspended centrifugal pump

2.2 循環系シミュレータ

生体と同様な流体力学的環境で拍出流量推定を行うために循環系シミュレータを開発した。シミュレータは、φ25 mm の円管で配管された 8 つのチャンバーと空気駆動装置、ピンチバルブおよび逆止弁で構成されている。本シミュレータの心臓部は自然心と同じく、2 つの心房と 2 つの心室から構成した。左右心室はダイアフラムと 2 つの逆止弁で構成された φ100 mm の空気駆動型拍動流ポンプとした。心室収縮期に圧縮空気を送出することで、心室ダイアフラムを押す。拡張期には大気開放とすることでパッシブフィリングを可能

とした。抹消血管抵抗はコンピュータ制御可能なピンチバルブを用い、コンプライアンスチャンバと心房間に閉塞部を設けることにより実現した。体の各部位の弾性係数はコンプライアンスチャンバ内に所定の空気体積を閉じ込めることで模擬した。本シミュレータでは心室駆動条件、循環系抵抗をコンピュータ制御可能で、様々な生理学的条件を模擬可能である。

2.3 流体力と制御方法

通常、インペラは流体がボリュート内を流動する際にインペラ径方向及び軸方向の流体力を受ける。特にサークルボリュートの場合、径方向流体力は流量に比例して増加するという特徴を持っている。Fig.2 に本磁気浮上系の制御方法の概念図を示す。本磁気浮上系は 2 つの制御方法を実施している。一つはインペラ浮上位置を中心に維持する定位置制御である。定位置制御時は、径方向流体力に相対する磁気浮上制御力を発生させる(Fig.2(a))。このため、電磁石に流れる電流を観察することで、インペラに働く流体力を推定することができる。もう一つの制御方法はインペラ回転中心をわざと偏心させることで、永久磁石の吸引力を発生させ、径方向流体力を打ち消すために必要な消費電力を抑えるゼロパワー制御である(Fig.2(b))。ゼロパワー制御時は、本インペラは流体力の大きさに伴いインペラ回転重心位置を推移させるため、インペラ回転重心から流量が推定できる。

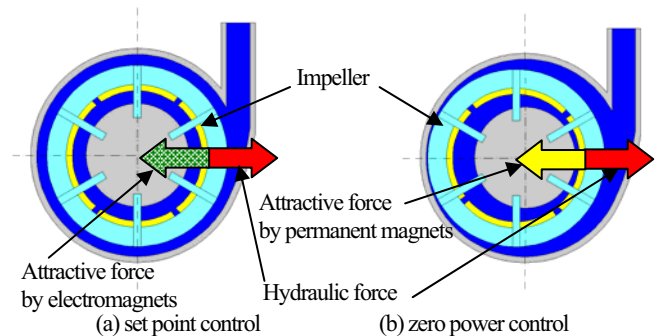


Fig.2 Control methods

2.4 実験

2.4.1 閉モック回路を用いた定常流下での磁気浮上ポンプ実験

ポンプを閉モック回路に接続し、流量、揚程、どちらかを一定として他方を変化させ、ポンプ駆動状態と浮上インペラの挙動の関係を検討した。定位置制御時に制御電流から流体力を推定し、ゼロパワー制御時にインペラの回転重心からポンプ流量の推定を行った。

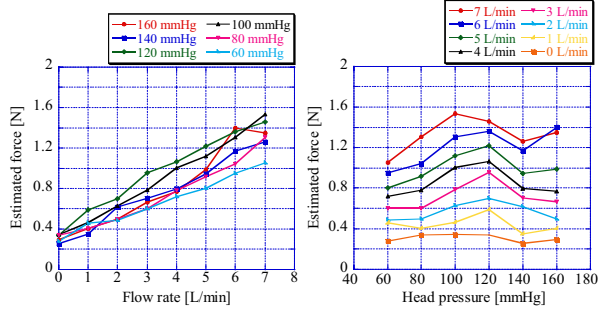
2.4.2 循環系シミュレータを用いた拍動流下での磁気浮上ポンプ実験

ポンプの流入口を左心室に接続、流出口を大動脈へ接続することで、本ポンプを補助人工心臓として循環系シミュレータに接続した。循環系シミュレータで様々な流体力学的環境を再現し、定位置制御時の制御電流から流体力を推定した。また、ゼロパワー制御時の浮上インペラの回転重心からポンプ流量の推定を行った。

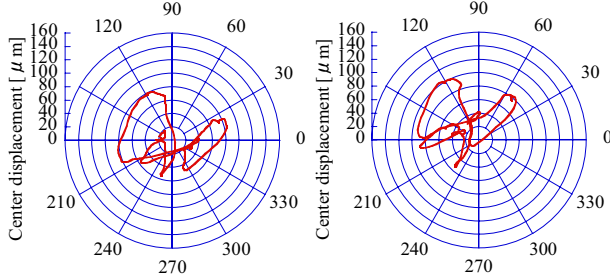
3. 結果及び考察

3.1 閉モック回路を用いた定常流下での磁気浮上ポンプ実験

Fig. 3, 4, 5 に推定流体力の推移、インペラ中心軌跡、インペラ回転重心の変位を示す。定位置制御時の制御電流から推定した流体力は拍出流量に比例して増加した(Fig.3(a))。また、ゼロパワー制御時の 1 回転分のインペラ中心軌跡は流量変化に応じてインペラ浮上位置を移動した(Fig.4)。このことから、流体力の大きさに伴いインペラ浮上位置が移動することを確認した。また、データのばらつきを考慮し、10 回転分のインペラ回転重心で評価したところ、ゼロパワー制御時の浮上インペラは拍出流量に比例して回転重心位置を推移させることがわかった。一方、流量を一定とし、揚程を変化させた場合は流量を変化させた場合に比べ、インペラ回転重心位置の推移量は少なかった。このことから、揚程変化に比べ、流量変化の方が感度良くインペラ回転重心位置の推移に反映されることがわかった。また、本データを用いて、インペラ回転重心位置から拍出流量の推定を行った。Fig. 5(a)を線形近似し、インペラ回転重心位置から推定流量を求め、実際の流量と比較した。その結果、推定流量と実測流量の相関係数は 0.97 であり、流量 4~7 [L/min]の範囲において測定値と推定値の差は最大 14.2%であった。

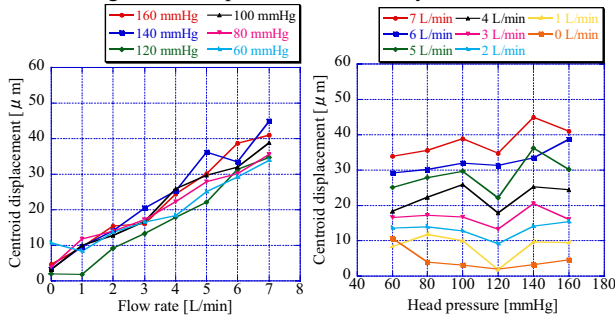


(a) response to flow rate (b) response to head pressure
Fig.3 Estimated hydraulic force under steady flow condition



(a) 100 mmHg, 0 L/min (b) 100 mmHg, 7 L/min

Fig.4 Center displacement under steady flow condition

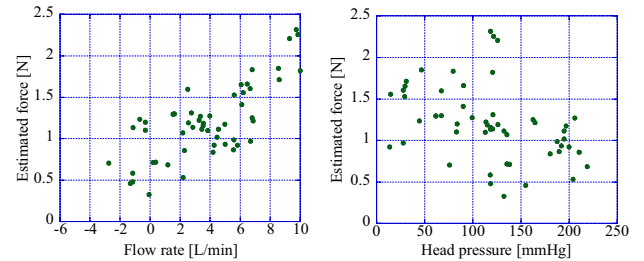


(a) response to flow rate (b) response to head pressure

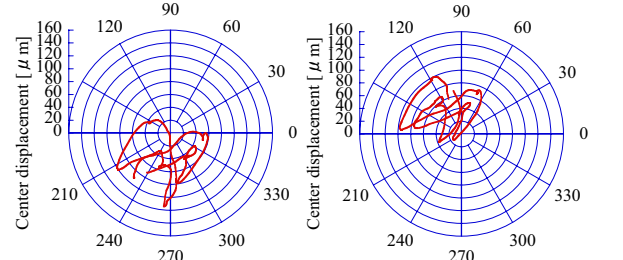
Fig.5 Centroid displacement under steady flow condition

3.2 循環系シミュレータを用いた拍動流下での磁気浮上ポンプ実験

Fig.6, 7, 8 に推定流体力の推移、インペラ中心軌跡、インペラ回転重心の平均変位を示す。1 心周期を 5 等分し、細かい間隔でインペラの挙動を調べた。定位置制御時に推定した流体力は動的な環境においても拍出流量に依存していた。(Fig.6)。同様にゼロパワー制御時の 1 回転分のインペラ中心軌跡を調べたところ、心室の状態に依存し、浮上位置を移動させた(Fig.7)。これはインペラの挙動に拍動流の動的成分が含まれるためである。そこで、1 心周期という長い間隔でインペラの挙動を調べたが、拍動成分の影響でインペラ回転重心の平均変位はポンプ駆動状態に対してばらつきがあらわれた(Fig.8)。今後、拍動流による外乱成分を取り除けば、より正確な流量推定が可能になると考える。

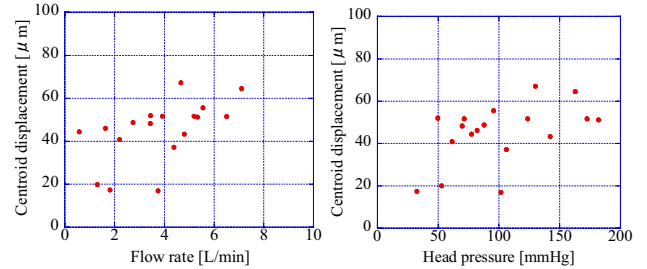


(a) response to flow rate (b) response to head pressure
Fig.6 Estimated hydraulic force under pulsatile flow condition



(a) systole (b) diastole

Fig.7 Center displacement under pulsatile flow condition



(a) response to flow rate (b) response to head pressure

Fig.8 Centroid displacement under pulsatile flow condition

4. まとめ

本研究では流体力を利用してポンプ流量の推定方法の検討を行った。定常流下では揚程変化に比べ、流量変化の方が流体力を感度良くインペラ回転重心の推移に反映させることがわかった。インペラ回転重心から流量を推定したところ、高流量域では十分に流量を推定することができた。一方、拍動流下ではインペラの挙動に拍動流の動的成分が含まれている。このため、インペラ回転重心が流量変化に対してばらついてしまい、流量推定の精度が落ちた。今後、インペラの挙動に含まれる拍動成分を差し引くことで、流量推定精度の向上を目指す。