

磁気浮上型治療用血液ポンプの研究開発

Magnetically levitated therapeutic rotary blood pump

09NM414Y 北郷 将史

指導教員：増澤 徹 教授

1. 緒言

補助人工心臓装着中に心不全が回復する症例が報告され, "bridge to recovery" という新しい人工心臓の適用方法が注目されている. 急性心不全患者を対象として, 自己心機能回復に主眼をおいた磁気浮上型治療用血液ポンプの開発を目的とした. 心機能回復には高流量補助による冠動脈血流量増加や負荷軽減および心臓の状態に合わせた負荷調節機能が必要である. そのような血液ポンプは数カ月にわたる治療に適用可能で最大流量 20 L/min 以上送出可能であることが求められる. そこで, 本血液ポンプに適用可能な磁気浮上モータと遠心ポンプの開発を行った.

2. 方法

2.1 磁気浮上型治療用血液ポンプ

Fig.1 に提案する磁気浮上型治療用血液ポンプの構成を示す. 本血液ポンプは浮上インペラ, 磁気軸受, モータ, ポンプケーシングによって構成される. インペラの上下両面に永久磁石とヨークを設置し, 磁気軸受ステータとモータステータによってインペラを軸方向に挟み込む構造とした. インペラにかかる磁気軸受とモータの軸方向磁気吸引力を釣り合わせることで軸方向に磁気支持する. 心臓の負荷調節は心臓の拍動に同期させ駆動させることで拍出量を変化させて行う.

2.2 アキシアル型磁気浮上モータ

Fig.2 にアキシアル型磁気浮上モータを示す. 本磁気浮上モータは, ロータ, 磁気軸受, モータから構成される. 磁気浮上制御を行う磁気軸受と回転制御を行うモータによってロータを軸方向に挟み込む構造とした. 強力な磁気支持能を実現するために, 磁気軸受には本研究で考案したダブルバイアス磁束型磁気軸受を採用した. 本磁気軸受は 90 度間隔に設置した 4 個の電磁石, ロータに設置した 3 つの永久磁石とヨークからなる. 径方向に着磁した 1 次永久磁石と軸方向に着磁した 2 次永久磁石を用い, バイアス磁束の重量と 1 次永久磁石が発生するバイアス磁束の電磁石磁束経路迂回の防止を図る. 電磁石によってロータの軸方向位置 Z と径方向軸回りの傾き θ_x , θ_y の計 3 自由度を能動的に制御する. 隣り合う電磁石間に設置した 4 つの渦電流式変位センサによりロータの軸方向位置及び傾きを検出し, デジタル PID 制御を行う. モータ側のロータには 8 枚の永久磁石を設置し, 12 突極のステータにより 3 相 8 極の回転磁界を発生させて回転させる.

2.3 磁気浮上モータの設計

高剛性な磁気浮上モータを設計するために磁気等価回路による理論磁場解析と有限要素法による 3 次元数値磁場解析を行った. 数値磁場解析には汎用有限要素法解析ソフト ANSYS11.0 (ANSYS Inc.)を用いた. 磁気軸受内における 2 次永久磁石の軸方向厚みを変化させたときの磁気吸引力と力係数, 加速度係数を評価した. 力係数とは電流 ± 1 A 間における磁気吸引力の変化の割合, 加速度係数は力係数を

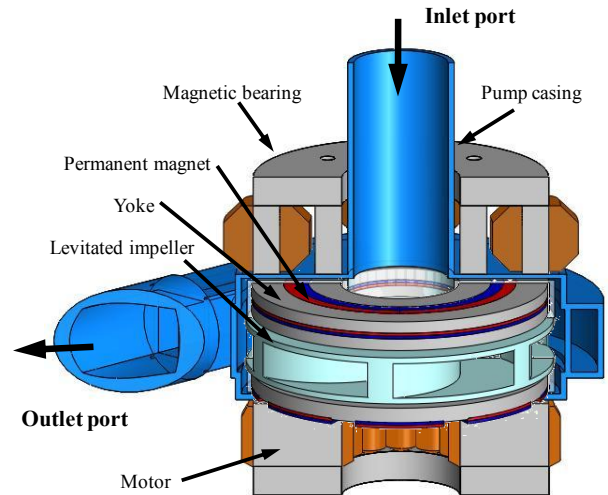
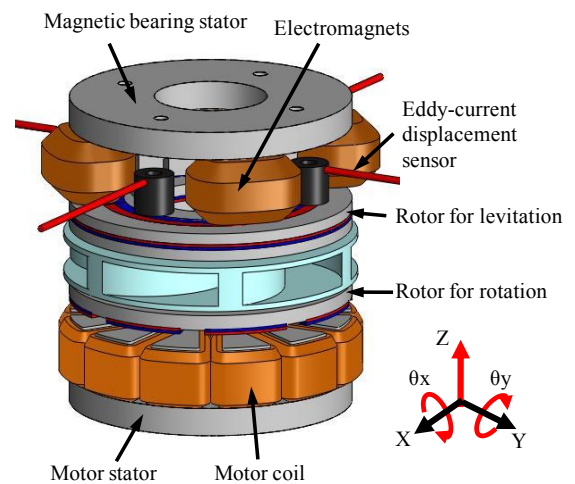


Fig.1 Magnetically levitated therapeutic rotary blood pump



(a) Exterior view

(b) Cross sectional view

Fig.2 Axial type maglev motor

インペラ質量で除したものと定義する。

2.4 遠心ポンプの設計

経験的設計理論と有限体積法による数値流体解析を用いて遠心ポンプの設計を行った。数値流体解析には汎用数値流体解析ソフト STAR-CD (CDAJ Ltd.)を用いた。目標性能を回転数 2000 rpm 時に流量 20 L/min 拍出可能とし、インペラの形状及びボリュート形状について検討した。

2.5 性能評価試験

専用の磁気吸引力測定装置を製作し、本磁気軸受とモータの軸方向磁気吸引力を測定した。また、開発した磁気浮上モータの磁気浮上回転性能を評価するために空気中において磁気浮上回転性能測定を行った。さらに、閉ループモック回路に開発した磁気浮上型遠心ポンプを接続し、水中下におけるポンプ拍出性能評価実験を行った。

3. 結果及び考察

3.1 磁気浮上モータの設計

設計した磁気軸受は外径 50 mm, 内径 20 mm である。2 次永久磁石の軸方向厚みを 2 mm としたときに理論計算、数値磁場解析共に加速度係数は最大となることを確認した。モータとの磁気吸引力の釣り合いを考慮し、軸方向厚みは 2 mm に決定した。モータは外径 50 mm のときに 88.5 mNm であり、十分なトルクを発生可能であることがわかった。

3.2 遠心ポンプの設計

設計した遠心ポンプは回転数 2000 rpm において、揚程 80 mmHg, 流量 20 L/min 拍出可能であることを確認した。設計を基に試作機の寸法を決定した。Fig.4 に開発した磁気浮上型遠心ポンプを示す。流入口径と流出口径ともに 16 mm のダブルボリュートポンプとした。インペラ径は 52 mm とし、羽根枚数 6 枚、羽根高さ 6 mm, 羽根入口角 47 deg, 羽根出口角 23 deg のクローズドインペラとした。血液の流路幅はインペラの上下共に 300 μ m とした。

3.3 性能評価実験

Fig.5 に軸方向磁気吸引力の測定結果を示す。磁気軸受の間隙 2.0 mm, モータの間隙 2.0 mm において磁気浮上モータを構成できることが分かった。励磁電流値 0 A における磁気軸受の磁気吸引力は 44 N, 力係数 11 N/A, 加速度係数 85 $\text{m}/(\text{s}^2 \cdot \text{A})$ を有することを確認した。開発した磁気浮上モータは外径 50 mm, 高さ 56.7 mm であり、インペラの質量は 129 g である。空気中において最大回転数 4000 rpm までの磁気浮上・回転を確認した。回転数を 1000 rpm の幅で変化させたときの整定時間は 0.3 sec であることを確認した。Fig.6 に本ポンプの HQ 特性を示す。開発した磁気浮上型遠心ポンプは水中において、回転数 3000 rpm までの浮上回転を確認し、最大揚程 300 mmHg, 最大流量は 24 L/min のポンプ拍出性能を有することを確認した。回転数 1800 rpm において、揚程 100 mmHg, 流量 5 L/min を達成可能であることを確認した。Fig.7 に回転数 3000 rpm まで軸方向の振動振幅は 38 μ m 以下、傾きは 0.14 deg 以下であり、血液の流路幅に対して十分に小さかった。流量 20 L/min 拍出時の消費電力は磁気軸受が 5.2 W, モータが 62.4 W であることを確認した。モータステータの材料に圧粉磁心またはアモルファスを使用することで渦電流損を低減できると考える。

4. 結言

急性心不全患者を対象とした磁気浮上型治療用血液ポンプを提案し、専用の磁気浮上モータと遠心ポンプの開発を

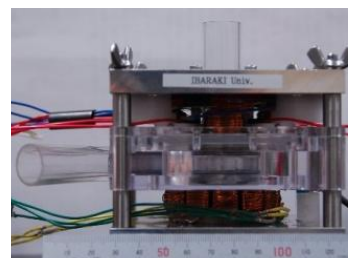


Fig.4 Developed magnetically levitated pump

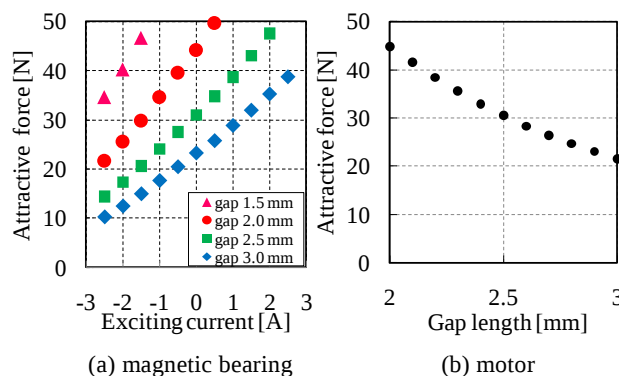


Fig.5 Measured magnetic attractive force

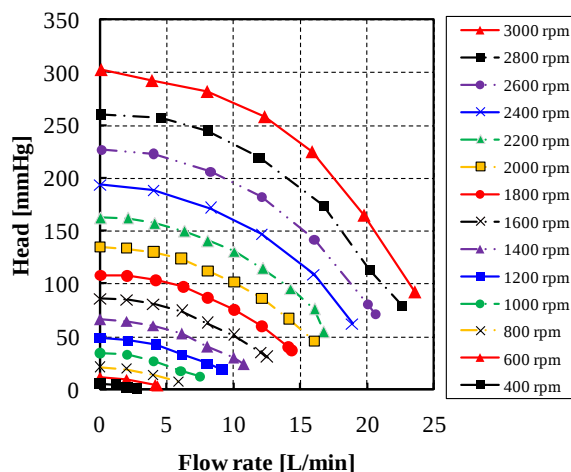


Fig.6 HQ characteristics

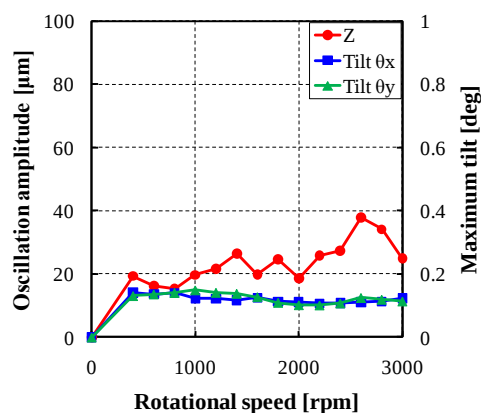


Fig.7 Oscillation amplitude and maximum tilt

行った。開発した磁気浮上型遠心ポンプは、十分な磁気支持性能と拍出性能を有しており、磁気浮上型治療用血液ポンプへ応用可能であることを確認した。