

小型磁気浮上摩擦血液ポンプの研究開発

Development of micro maglev regenerative blood pump

10NM407G 浮田啓悟

指導教員：増澤徹 教授

1. 緒言

現在重症心不全患者の救済法の一つとして、補助人工心臓の適用が行われている。これに対し、軽症心不全患者の治療は薬物治療が主となっている。本研究では軽症心不全患者を対象に、血液ポンプによって心機能回復を目指す新しい治療法を提唱する。より小型化、薄化した磁気浮上型摩擦ポンプ実現し、胸部筋層下に埋め込むことで定期的な交換を可能とし、経済性、簡便性、長期信頼性を実現する。

2. 方法

2-1. 磁気浮上摩擦血液ポンプ

Fig. 1 に小型磁気浮上摩擦血液ポンプの概略図及び試作機を示す。本血液ポンプは磁気浮上技術を適用することで高耐久、低溶血、抗血栓性に優れた血液ポンプとする。ロータインペラの内側円周部に磁気軸受ステータを形成したアウターロータ型の構造とした。ポンプケーシングは外径 50 mm、軸方向厚み 10 mm とし、胸部筋層下に埋め込み可能な小型で薄い形状とした。

血液ポンプの駆動部には径方向支持方式の磁気浮上モータを採用した。ステータを 12 突極とし $P \pm 2$ 極理論を採用し、3 相 8 極の回転制御用コイルと 2 相 6 極の磁気支持制御用コイルを別々に配置することにより、ロータの回転と径方向位置の磁気支持を独立に制御することを実現している。また、ロータを薄型とすることにより、永久磁石の磁気吸引力で軸方向の変位および傾きを受動安定支持している。

デバイスをより小型にするために血液ポンプ形状には流入口、流出口が同一平面上に配置できる摩擦ポンプを採用した。またインペラ両面に羽根を設けることでインペラにかかる軸方向流体力発生を防止した。

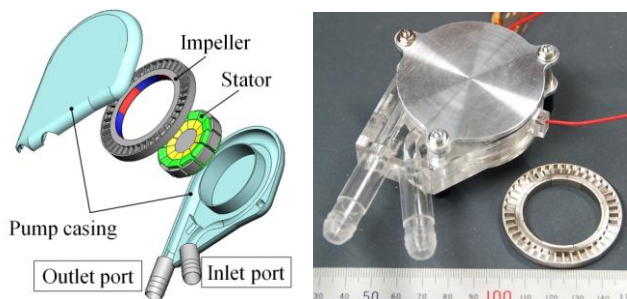


Fig.1 Maglev regenerative blood pump

2-2. 血液ポンプの設計

軽症心不全患者の心機能を部分的に補助することから、血液ポンプの目標性能を揚程 100 mmHg 発生時、流量 2 L/min 送出可能とした。設計目標を基に、数値流体解析を用いたポンプ設計を行った。外径 48 mm、軸方向厚み 4 mm、羽根枚数 40 枚の血液ポンプを設計した。設計したポンプの性能を評価するため、

DC モータ駆動のポンプ試験機を製作した。

2-3. 小型磁気浮上モータの設計

先行研究で設計されたポンプの数値流体解析結果を基に磁気浮上モータの径方向吸引力及びトルクの目標値をそれぞれ 0.7 N、10 mNm と設定し径方向支持型磁気浮上モータの設計を行った。磁気浮上モータの磁気支持磁界極数と回転磁界極数の組み合わせは、静磁場解析を利用し、最適な組合せを選択した。

設計した磁気浮上モータの磁気支持性能、モータ性能、磁気浮上回転性能を評価するため、Fig. 2 に示す小型磁気浮上モータ試作機を製作し、評価実験を行った。磁気浮上モータはロータ外径 37.6 mm、軸方向高さ 5 mm、ステータ外径 30 mm とした。ロータ、ステータ間の径方向エアギャップは 0.8 mm である。ロータの質量は 12 g である。



Fig. 2 Radial type self-bearing motor

2-4. 実験方法

設計したポンプの性能を評価するため、ポンプ試験機を閉モック回路に接続し、HQ 特性を評価した。

本磁気浮上モータの径方向磁気支持性能評価のため、径方向吸引力測定実験を行った。モータ性能の評価のため、トルク消費電力、トルク効率の測定を行った。本磁気軸受の安定性を評価するため、FFT アナライザを用いて周波数応答を測定した。測定時の浮上制御コントローラ PID 制御ゲインは $K_p = 16$ A/mm, $K_i = 0$ A/mm/s, $K_d = 0.015$ A · s/mm とした。磁気浮上モータの浮上回転安定性を評価するため、各回転数における最大振動振幅を測定した。またその時の径方向支持コイルの消費電力を測定した。

3. 実験結果および考察

Fig. 3 にポンプ試験機によるポンプの HQ 特性を示す。回転数 1600 rpm、流量 2 L/min 送出時、108 mmHg 発生可能であり、目標値を達成した。

Fig. 4 に各励磁電流における径方向磁気支持力とロータ変位の関係を示す。磁気浮上モータ試作機は、励磁電流 3 A で 5.3 N 発生可能であり、目標径方向吸引力 0.7 N を達成した。ここで、励磁電流 1 A あたりに発生できる力を力係数、力係数と質量で除したものを加速度係数定義すると、本磁気浮上モータの力係数は 1.6 N/A、加速度係数は 141.0 m/sec²A と確認した。加速

度係数から、本磁気軸受は 14 G の衝撃に対抗できる。径方向吸引力と負ばね力の関係から、浮上ロータを制御可能な中心位置からの変位は ± 0.25 mm とわかった。本磁気軸受の十分な磁気支持力を確認した。また、励磁電流に対して吸引力が線形に比例して発生していることで、線形 PID 制御による磁気支持制御が可能となっている。

モータトルクは 1000~5000 rpm まで 30 mNm 発生可能なことを確認し、目標値を達成した。使用想定回転数 1600 rpm、負荷トルク 10 mNm において消費電力 3.3 W、効率 51 %であった。モータ効率が同様な大きさのモータと比較して低いのは、ロータ、ステータ間に血液ポンプケーシングの壁が存在するため、エアギャップが一般的なモータと比較にて非常に大きいためである。

Fig. 5 に磁気軸受の X 方向および Y 方向周波数応答を示す。結果から、240 Hz に共振点を確認した。本磁気軸受の径方向磁気支持制御は十分な位置制御能を有していることを確認した。

空気中での浮上回転において回転数 5000 rpm までの安定した浮上回転を確認した。本磁気浮上モータの血液ポンプ駆動部としての十分な性能を確認した。Fig. 6 に各回転数における X 方向および Y 方向の最大振動振幅を示す。回転数 2200 rpm 時、共振を確認した。その時の最大振動振幅は 93 μ m であり、制御可能範囲に対して十分に小さい。振動の原因はロータ永久磁石の保磁力の不均等かモータの幾何学的不均衡による、軸方向もしくは径方向軸周りの傾きの振動と考えられる。実際の血液ポンプでは流体のダンピング効果により振動振幅は大きく減少すると考えられる。この振動振幅の減少効果は先行研究でも確認されている。

使用想定回転数におけるモータと径方向位置制御の消費電力はそれぞれ 3.3 W、1.5 W で合計 5 W 以下と、体内埋込み型血液ポンプとして十分小さい消費電力であった。実際の血液ポンプではロータにかかる径方向流体力に対抗するため、径方向位置制御消費電力は増加すると考えられる。しかし、この問題はゼロパワー制御によって解消できる。ゼロパワー制御とは、ロータの径方向位置を意図的に変位させ、変位したことによって発生する負ばね力と径方向流体力をつりあわせることで、消費電力を最小にする位置にロータを制御する方法である。

4. 結言

軽症心不全患者を対象とした小型、薄型な磁気浮上摩擦血液ポンプを提案した。磁気浮上ポンプの実現のため、血液ポンプおよび小型磁気浮上モータの設計開発を行った。外径 48 mm のインペラをもつポンプを設計し、ポンプ試験機により十分なポンプ性能を確認した。製作した磁気浮上モータ試作機は 5000 rpm までの安定した浮上回転を確認し、血液ポンプ駆動部として十分な性能を確認した。今後、磁気浮上血液ポンプ試作による溶血性能の評価を行う。

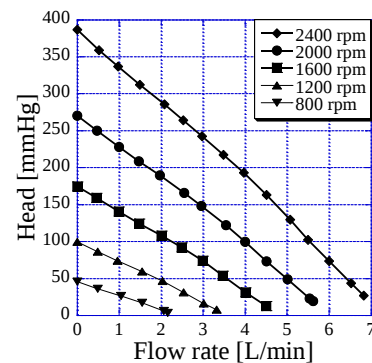


Fig. 3 HQ Characteristics

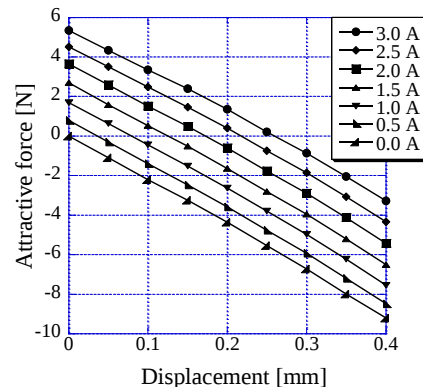


Fig. 4 Radial attractive force and displacement characteristic

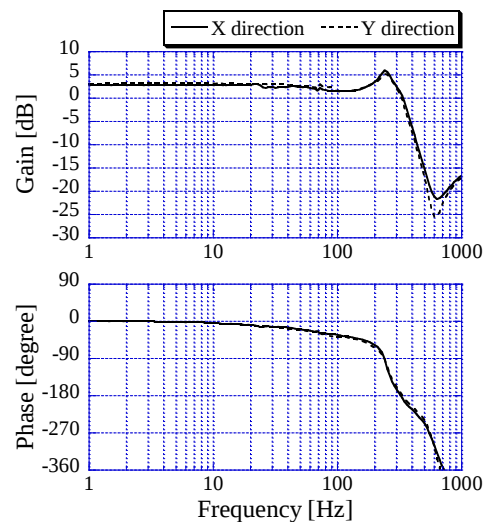


Fig. 5 Frequency response

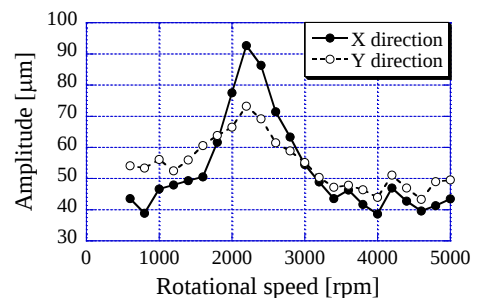


Fig. 6 Maximum oscillation amplitude