

磁気浮上モータを用いた両心補助人工心臓に関する研究

Bi-ventricular assist device with a magnetically levitated motor

07NM416X 佐々木 瑛祐

指導教員：増澤 徹 教授

1. 緒言

重篤な心不全患者への治療に補助人工心臓の適用があり、本邦でも開発、製品化が進められている。それらの多くは左心または右心の一方を補助する片心補助人工心臓である。しかし、両心室不全や左心補助人工心臓適用後に右心室不全を併発した場合、両心補助人工心臓が必要となる。左心補助人工心臓適用患者の10%から15%は右心補助が必要になるという報告があり、左心補助人工心臓の適用数が増加するにつれ、両心補助人工心臓へ移行が必要な患者数も増加する。そこで、本研究では体内埋め込みが可能な小型両心補助人工心臓の提案及びその磁気浮上モータの開発を行った。

2. 方法

2.1 両心補助人工心臓

Fig.1 に提案する両心補助人工心臓の構成を示す。本人工心臓は両心用一体型インペラ、磁気軸受、モータ、ポンプケーシングから構成される。インペラにかかる磁気軸受とモータの軸方向吸引力をつり合わせることで、インペラを軸方向に磁気支持する。インペラを軸方向に変位させることによって羽根・ケーシング間の距離を調節し、左右心それぞれの遠心ポンプの二次流れ量を調節することで左右拍出量のバランスを制御する。両心補助人工心臓のための2種類の磁気浮上モータを考案した。

2.2 分離型磁気浮上モータ

Fig.2 に分離型磁気浮上モータを示す。本磁気浮上モータは、磁気軸受、モータ、ロ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を採っている。Fig.3 に分離型磁気浮上モータの磁気軸受を示す。本磁気軸受は90度間隔に設置した4つの制御用電磁石、ロータに設置したリング型永久磁石及びヨークから構成される。断面図の実線は永久磁石によるバイアス磁束、破線は電磁石による制御磁束を示す。電磁石によって電磁石・ロータの間隙中の磁束密度を調節することで、ロータの軸方向位置及び径方向軸まわりの傾きの計3自由度を能動的に制御する。ロータのモータ側には4枚の回転用永久磁石を貼り付け、6スロットを有するモータステータとともに3相4極のブラシレスモータを形成している。Fig.1 は分離型磁気浮上モータを用いた人工心臓の図である。

2.3 一体型磁気浮上モータ

Fig.4 に一体型磁気浮上モータを示す。本磁気浮上モータは一体型となっている磁気軸受とモータ、ロータから構成される。2つのロータディスクによって一体型磁気軸受・モータを軸方向に挟み込む構造を採っている。両ロータディスクを軸によって連結する。一方のディスクを磁気浮上制御、他方を回転制御することによってロータを磁気浮上・回転制御する。Fig.5 に一体型磁気浮上モータの磁気軸受を示す。本磁気軸受は90度間隔に設置した制御用電磁

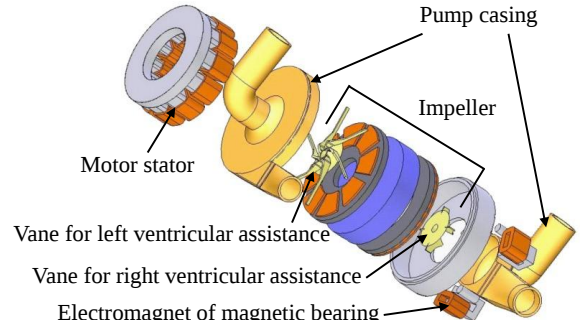


Fig.1 Bi-ventricular assist device

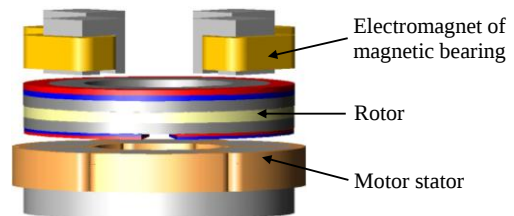


Fig.2 Separated type magnetically levitated motor

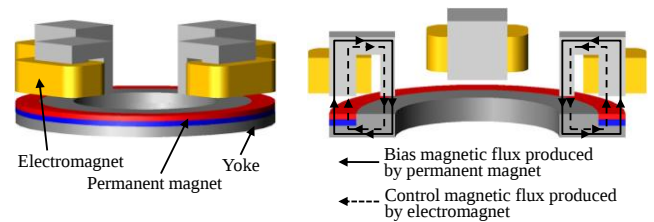


Fig.3 Magnetic bearing of Separated type magnetically levitated motor

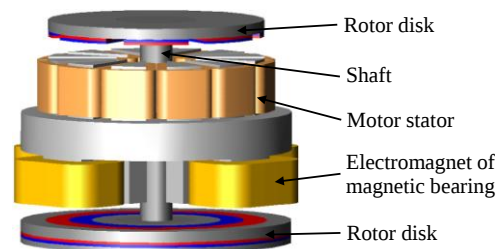


Fig.4 Combined type magnetically levitated motor

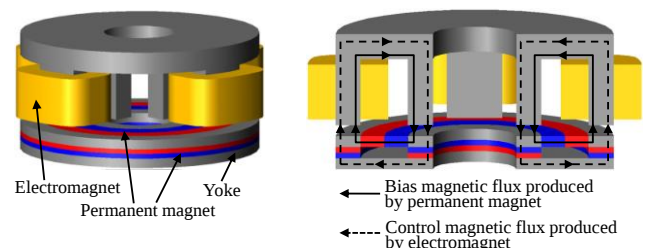


Fig.5 Magnetic bearing of Combined type magnetically levitated motor

石、3つのリング型永久磁石及びヨークからなる。ロータの内外側それぞれに軸方向に着磁された永久磁石を設置し、その間に径方向に着磁された永久磁石を設置する。断面図の実線は永久磁石によるバイアス磁束、破線は電磁石による制御磁束を示す。分離型磁気浮上モータと同様に電磁石によってロータの磁気浮上制御を行う。モータ側は分離型磁気浮上モータ同様、ブラシレスモータとなっているが、一体型磁気浮上モータは12スロット3相8極を採用している。両磁気浮上モータの制御にはDSPを用いる。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。両磁気浮上モータを設計、製作した。外径は共に50mm、高さは分離型が47.4mm、一体型が39.5mmとした。

2.4 軸方向吸引力評価試験

磁気軸受の評価として、軸方向吸引力を測定した。制御用電磁石を固定し、荷重変換器を組み込んだマイクロメータスライダにロータを接続した。荷重変換器によりインペラにかかる磁気軸受の軸方向吸引力を測定した。力係数を $\pm 1A$ の範囲における電流の変化に対する軸方向吸引力の変化の割合と定義する。

2.5 磁気浮上・回転性能評価試験

磁気浮上モータの評価として、空気中でロータを浮上回転させ、ロータの軸方向の振動振幅、傾き及び磁気浮上モータの消費電力を測定した。クリアランスは軸方向0.5mm、径方向1.0mm、傾きの余裕は1.2degである。

3. 結果及び考察

3.1 軸方向吸引力評価試験

励磁電流0Aにおいて分離型は7.5N、一体型は23.5Nと一体型は分離型の3倍以上の軸方向吸引力を発生した。力係数も分離型は3.0N/A、一体型は8.0N/Aと一体型のほうが大きな結果となった。分離型は構造上、人工心臓へ応用すると、磁気軸受の内側に右心用羽根が入り込むため、ロータの磁気軸受として割ける面積が小さくなってしまふ。一方、一体型は遠心ポンプの広い面積を磁気軸受として割くことができる。そのため、一体型のほうが大きな軸方向吸引力となった。

3.2 磁気浮上・回転性能評価試験

Fig.6 に分離型磁気浮上モータの各回転数におけるロータの軸方向の振動振幅及び傾きを示す。空気中において1400rpmまでの浮上回転が可能であった。最大の軸方向振動振幅と傾きはそれぞれ0.11mm、0.36degであった。これはクリアランスに対して十分に小さく安定した浮上回転が得られた。Fig.7 に一体型磁気浮上モータの各回転数におけるロータの軸方向の振動振幅及び傾きを示す。空気中において4800rpmまでの浮上回転が可能であった。使用を想定している2000rpmにおいて軸方向振動振幅、傾きはそれぞれ0.027mm、0.26degと非常に小さく、安定した浮上回転が実現できた。Fig.8 に両磁気浮上モータの消費電力を示す。分離型は最大可能回転数である1400rpmにおいて4.6W、一体型は2000rpmにおいて5.0Wと低消費電力での浮上回転が可能であった。分離型磁気浮上モータの最大可能回転数が1400rpmとなったのはトルク不足のためである。磁気軸受とモータの軸方向吸引力をつり合わせるため、モータ側のギャップを4.0mmと大きくとったことが原因である。一方、一体型の磁気軸受は分離型に比べ大きな軸方向吸引

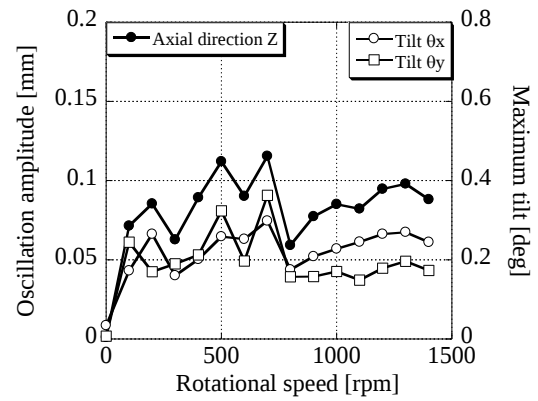


Fig.6 Oscillation amplitude and maximum tilt of the rotor with Separated type magnetically levitated motor

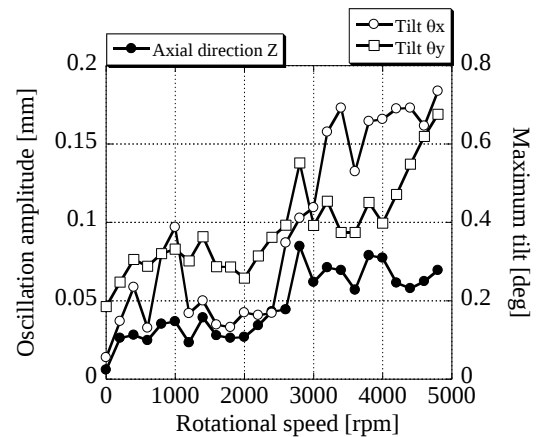


Fig.7 Oscillation amplitude and maximum tilt of the rotor with Combined type magnetically levitated motor

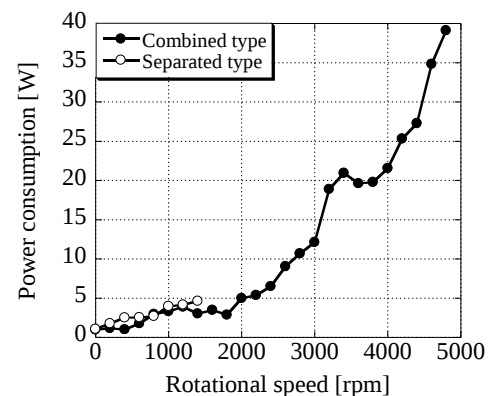


Fig.8 Power consumption of both magnetically levitated motors

力が発生可能であるため、モータ側のギャップ1.5mmで軸方向吸引力をつり合わせられ、4800rpmまでの浮上回転が可能であった。また、分離型磁気浮上モータは $\pm 0.3mm$ 、一体型は $\pm 0.5mm$ ロータを軸方向に変位可能であり、左右拍出量の制御も十分可能であることを確認した。

4. 結言

体内埋め込みが可能な小型両心補助用人工心臓の提案及びその磁気浮上モータの開発を行った。開発した磁気浮上モータは十分な磁気浮上・回転性能を有していることを確認した。また、ロータを軸方向に十分変位可能であり、両心補助用人工心臓へ応用可能な磁気浮上モータが開発できた。