14-82-13 人工心臓のための超小型磁気浮上システムの開発 Micro magnetically suspended system for an axial flow artificial heart

○齋藤 喬, 増澤 徹*, 岡田 養二*, 小沼 弘幸, 児嶋 次郎

茨城大学大学院 理工学研究科

*茨城大学 工学部

T.SAITO, H.ONUMA, J.KOJIMA, Graduate School of Engineering, Ibaraki University

*T.MASUZAWA, Y.OKADA, Faculty of Engineering, Ibaraki University

1. はじめに

軸流ポンプは羽根車の揚力のみで流体を送出するため、羽根車の径を抑えることができ、最も小型化が可能なターボポンプである。小型であることが望ましい人工心臓において、その応用が期待される中、人工心臓用軸流ポンプでは回転軸軸受の耐久性や血栓形成が問題となっている^[1]。今回、磁気浮上技術を応用し、機械的摺動部品を完全に撤廃することで、高耐久かつ血栓形成防止を図る軸流ポンプ用の超小型磁気浮上システムを開発したので報告する。

2. 方法

2.1 磁気浮上システムの概要

Fig.1に本磁気浮上システムの概略を示す。本磁気浮上システムは4つの電磁石から構成される磁気軸受を2つ用いることでアキシャル方向およびラジアル方向の位置制御と傾き制御の5軸制御を行う。さらに磁気軸受間に回転用ステータを設置することで、回転制御を実現している。磁気軸受の吸引力増加のため、2つの磁気軸受間にはバイアス磁束発生用の永久磁石を配置している。

Fig.1 Magnetically levitated system for an axial flow pump

Fig.2に本磁気浮上システムにおけるロータ位置制御方法について示す。図中の実線は永久磁石によるバイアス磁束を示し、この磁束に対し、破線で示す電磁石から発生する磁束の向きを制御することでロータ位置制御を行う。例えばアキシャル方向の位置制御では、ロータが図中で左軸方向にずれた場合、右側のギャップ中の磁束を強め、左側のギャップ中の磁束を弱めるような向きに電磁石の磁束を発生させる。その結果、左軸方向にずれたロータを中心に戻す力が発生する。これによりロータ位置制御が可能となる。

Fig.2 Magnetic flux pass way for axial position control

Fig.3に本磁気浮上システムにおける5軸制御のための制御線図を示す。各制御にはデジタルPID制御を用いている。高速なデジタル信号処理を実現するためdSPACEを用いた。ロータ位置を検出するための渦電流センサの信号をA/Dコンバータを介してdSPACE内に取り込み、各コイルの制御電流値を計算した後D/Aコンバータを介してアンプに出力する。

Fig.3 Control diagram

2.2 磁気軸受の開発

磁気浮上軸流ポンプにおいては、流体力によるスラスト力と逆方向に同等の磁気吸引力を発生させながら浮上回転させる必要がある。ロータ外径が20[mm]の場合、目標揚程を200[mmHg]とすると8.4[N]のスラスト力の発生が予想される。そこで有限要素法解析シミュレータANSYS（以下ANSYS）を用いて3次元磁場解析を行い、目標吸引力が発生可能で、可能な限り小型な磁気軸受の設計を行った。

2.3 モータの開発

磁気浮上型モータにおいては、ロータが中心からずれた際にロータの回転用永久磁石によって磁気浮上を破綻させる方向に吸引力が働く。モータ磁石のラジアル方向吸引力が磁気軸受の制御電流による吸引力と比較し、小さくなければ浮上回転は不可能である。そこで、ANSYSによりモータ磁石のラジアル方向吸引力の2次元磁場解析を行った。Fig.4に解析モデルを示す。モデルはロータがステータ中心から上方に0.5[mm]だけずれたものとした。さらに、人工心臓用軸流ポンプに必要とされる仕事出力より、本モータでは回転数10000[rpm]において9[mNm]の発生トルクが要されると予想しモータ設計を行った。モータステータは積層珪素鋼板製とし、3層4極の回転用コイルを設置した。ステータ外径を38[mm]、1相あたりのコイル巻数を22[巻]とした。ロータのモータ部分には厚さ1[mm]の回転用永久磁石を4枚貼り付けた。これらを用いてモータ磁石ラジアル方向吸引力測定、およびトルク測定を行った。

Fig.4 Simulation model for the magnetic field analysis

2.4 磁気浮上性能の評価

開発した磁気浮上システムを用いて空気中での浮上回転試験を行い、磁気浮上性能の評価を行った。本磁気浮上システムは最大外径38[mm]、全長81[mm]である。

3. 結果および考察

ANSYSによる3次元磁場解析の結果、軸受外径38[mm]、軸受高さ26[mm]とすることで、制御電流2[A]において9.5[N]の磁気吸引力が発生可能であることが明らかになった。実際に製作した磁気軸受で吸引力を測定した結果、電流2.5[A]において9.9[N]の吸引力が発生可能であり、目標とする磁気吸引力が発生可能であることを確認した。さらに、2次元磁場解析の結果、0.5[mm]だけ中心からずれたモータ磁石ラジアル方向の吸引力は1.8[N]で、それに対する制御電流2.5[A]による吸引力はおよそ2.3[N]となっており、ラジアル方向に関しても制御可能であることが明らかになった。実際にラジアル方向吸引力を測定したところANSYSによる解析結果とほぼ同等の値を得ることができ、浮上回転が可能であった。Fig.5に各回転数におけるトルクの関係を示す。

目標である10000[rpm]において発生トルク9[mNm]は達成できなかったが8000[rpm]でトルク8[mNm]が発生可能であり、人工心臓としての利用は可能であると考え、Fig.6に空気中浮上回転時におけるロータのアキシャル方向、ラジアル方向の最大振動振幅を示す。本磁気浮上システムは12000[rpm]まで磁気浮上回転が可能であった。高回転域において、アキシャル方向、ラジアル方向の最大振動振幅はそれぞれ0.1[mm]以内、0.05[mm]以内であり、非常に安定した浮上回転が可能であることを確認した。

Fig.5 Relationship between motor torque and rotating number

Fig.6 Maximum oscillation amplitude in axial direction(Z) and radial direction(X,Y) during rotation in the air

4. まとめ

軸流ポンプ用の超小型磁気浮上システムの開発を行った。開発した磁気浮上システムは、人工心臓用軸流ポンプに必要な性能を十分に有していることを確認した。今後、軸流ポンプを本磁気浮上システムに組み込み、ポンプ拍出性能試験、および液体中での磁気浮上性能、消費電力の測定を行う。

5. 参考文献

- [1]赤松 映明 ターボ型ポンプ BME Vol.10, No.10, 1996
- [2]機械学会編 磁気軸受の基礎と応用 養賢堂, 1995