

斜流式磁気浮上人工心臓に関する研究

Maglev diagonal flow pump for an artificial heart

08NM431T 松井 寿定

指導教官：増澤 徹 教授

1. 緒言

重症心不全患者の長期治療や移植への橋渡しとして体内埋め込み可能で高耐久な人工心臓の研究開発が進められている。小型化可能なターボポンプ型人工心臓では機械的摺動部における血球破壊や血栓形成が問題である。本研究では、磁気浮上技術を応用することにより、人工心臓から摺動部を撤廃し、血液ポンプを小型化が可能かつ、低回転で高揚程が得られる斜流ポンプを用いた、小型で長寿命な磁気浮上人工心臓の開発を行った。

2. 方法

2.1 斜流式磁気浮上人工心臓

Fig.1 に斜流式磁気浮上人工心臓の概略図を示す。本人工心臓は、インペラの径方向位置とその軸周りの傾きを二対の径方向支持型磁気軸受を用いて制御する構造とした。また、軸方向に関しては、流出口側磁気軸受を軸方向も支持可能な構造にすることにより実現している。浮上インペラは、ポンプ中央に配置したモータによって回転する。血液は流入口より入り、インペラで加速され、ディフューザで整流されたのち、流出口から送血される。磁気軸受は磁気支持性能向上のため、磁気軸受突極をディフューザ内に埋め込み、血液流路を6つの磁気軸受突極間に確保している。浮上制御にはDSPを用いる。磁気軸受とモータ間及び、流入口に配置した5つの渦電流式変位センサにより浮上インペラの径方向及び軸方向位置を検出し、デジタルPID制御を行う。

2.2 磁気浮上原理

Fig.2 に本磁気軸受の概略図と浮上原理を示す。本磁気軸受は、6つの分割ステータコアと6つの永久磁石より構成されるステータ、及びインペラシュラウドから成る。各ステータコアの突極にはコイルが巻かれ、制御磁束を発生させるための電磁石となる。バイアス磁束を発生させる永久磁石は、各ステータコア間に磁極を対向して配置した。本磁気軸受は磁気回路を二次元的に形成するので、漏れ磁束が少なく、高効率期待できる。図中の破線矢印は永久磁石により発生したバイアス磁束、実線矢印は電磁石による制御磁束が流れる経路をそれぞれ示している。インペラシュラウド・磁気軸受突極間のエアギャップの磁束はバイアス磁束に制御磁束を重畳させたものとなる。よって、径方向位置制御ではFig.2(a)で示すようにシュラウド上側エアギャップの磁束を制御磁束により増加させ、下側エアギャップの磁束を減少させることで浮上インペラに図中上側方向の吸引力を発生させ径方向の位置制御を行う。軸方向位置制御ではFig.2(b)に示すように、制御磁束により流出口側磁気軸受のエアギャップ中の全磁束を増減させることにより、シュラウドに働く斜め方向の吸引力を変化させる。これにより、本吸引力の軸方向成分とポンプ駆動時に働く軸方向流体力を釣り合わせて軸方向の浮上を可能

とする。

2.3 斜流ポンプの設計

数値流体解析(CFD解析)を用いて人工心臓に適応可能な、小型斜流ポンプの設計を行った。CFD解析には汎用数値流体解析ソフトSTAR-CD(CDAJ Ltd.)を用いた。目標性能はインペラ回転数 5000 rpm、揚程 100 mmHg、流量 5L/min と設定した。計算の乱流モデルには、標準 $k-\epsilon$ モデルを使用した。Inlet 境界に流量(流速)を与え、outlet 境界を大気開放の自由流出と境界条件を設定し、ポンプ特性と浮上インペラに作用する流体力の推定を行った。作動流体は血液の物性値を使用した非圧縮ニュートン流体とした。

2.4 磁気軸受の設計

限られたサイズで最も高い磁気支持性能を実現するため、本研究室で開発された設計最適化プログラムを使用し、消費電力 2 W 以下かつ、浮上インペラが受ける軸方向流体力 6.0 N を永久磁石のみで発生可能であることを目標として磁気軸受のコアサイズやコイル巻数の設計最適化を行った。

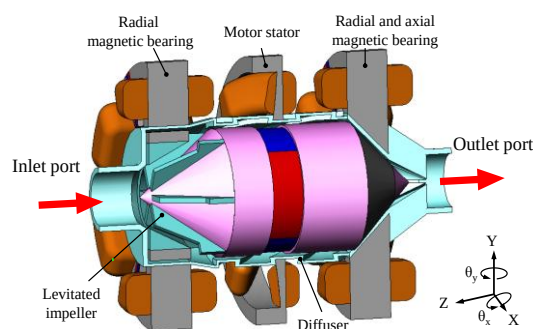


Fig.1 Maglev diagonal flow pump

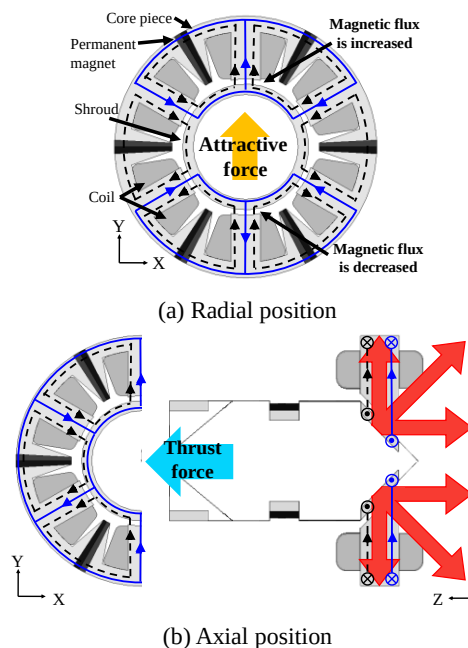


Fig.2 Maglev system

2.5 性能評価試験

専用の磁気吸引力測定実験装置を製作し、開発した磁気軸受の径方向及び軸方向発生磁気吸引力を測定した。磁気浮上システムの安定性を評価するため、FFT アナライザを用いて浮上制御時の周波数応答を測定した。浮上回転性能を評価するため、空気中でインペラを磁気浮上回転させ、インペラの径方向及び軸方向の振動振幅と磁気浮上モータの消費電力を測定した。浮上インペラとケーシング間の間隙は、径方向及び軸方向共に 0.5mm である。浮上インペラの質量は 53 g である。

3. 結果

3.1 斜流ポンプの設計

Fig.3 に本ポンプの HQ 特性の推定値と回転数 5000 rpm、流量 5 L/min の条件下のポンプ内の速度ベクトル図を示す。設計したポンプは同条件下で 94 mmHg の揚程を発生可能であることを確認した。回転数一定の時、浮上インペラに作用する軸方向流体力は揚程に依存することが分かった。使用回転数 5000 rpm において浮上インペラに作用する軸方向流体力は 3.3 N、必要トルク 12.3 mNm、ポンプ効率 16 %であった。

3.2 磁気軸受の設計

Fig.4 に設計最適化プログラムの結果より得られた磁気軸受形状を示す。外径 50 mm、長さ 8 mm、コイル巻数がそれぞれ 115 巻、114 巻となった。形状は、制御磁束を通り易くするため永久磁石が薄く、永久磁石の断面積を広くしパイアス磁束を増加させるため径方向長さが長くなった。

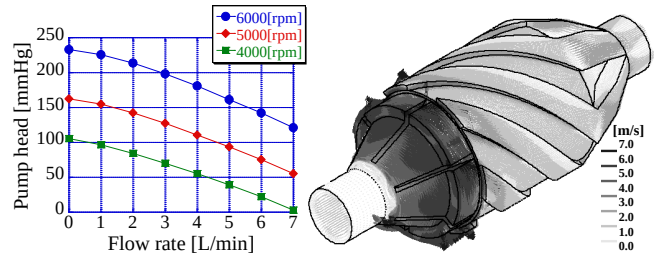
3.3 性能評価試験

Fig.5 に製作した磁気軸受の径方向及び軸方向発生磁気吸引力の測定結果を示す。本磁気軸受は径方向では、励磁電流 0.7 A（消費電力 2.0 W）において流入側で 2.3 N、流出側で 0.7 N の吸引力が発生可能であった。軸方向には、最大 11.7 N の磁気吸引力を発生可能であり、ポンプ駆動時に発生する流体スラスト力 6.0 N に十分対抗できる磁気吸引力発生能力を確認した。力係数と加速度係数はそれぞれ、流入側磁気軸受において 3.3 N/A、62 N/(A・kg)、流出側磁気軸受において径方向で 1.0 N/A、19 N/(A・kg)、軸方向で 2.7 N/A、51 N/(A・kg)であった。Fig.6 に周波数応答測定の結果を示す。

流入側と流出側の両磁気軸受における共振点での制振効果と、69 Hz までの良好な制御性能を確認した。Fig.7 に本人工心臓の各回転数における浮上インペラの径方向及び軸方向の振動振幅を示す。空気中において 6500 rpm までの浮上回転が可能であった。5000 rpm 時において、最大径方向及び軸方向振動振幅はそれぞれ 145 μ m、132 μ m であり、これは浮上インペラとケーシング間の間隙に対して十分小さく安定した磁気浮上回転が得られた。Fig.8 に空気中での各回転数における消費電力の測定結果を示す。5000 rpm において 11.2 W の消費電力で浮上回転が可能であった。

4. 結言

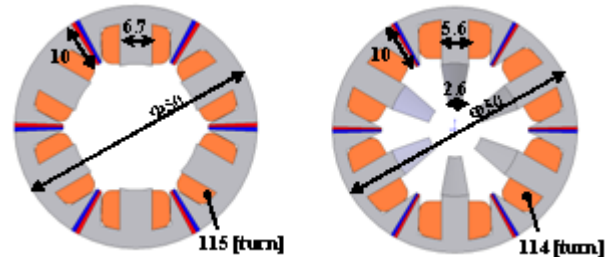
体内埋め込み可能な小型な 5 軸制御型磁気浮上人工心臓の提案及び性能評価を行った。設計した血液ポンプは人工心臓用ポンプとして十分なポンプ性能を有していることを確認した。開発した磁気浮上回転システムは十分な磁気浮上・回転性能を有していることを確認した。



(a) HQ characteristic

(b) Velocity vector diagram

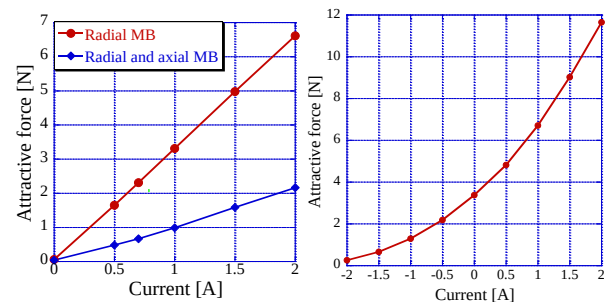
Fig.3 CFD result



(a) Inlet side magnetic bearing

(b) Outlet side magnetic bearing

Fig.4 Dimensions of the magnetic bearings



(a) Radial force

(b) Axial force

Fig.5 Measured attractive force

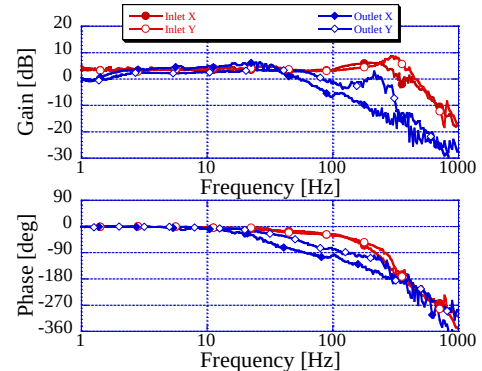


Fig.6 Frequency response

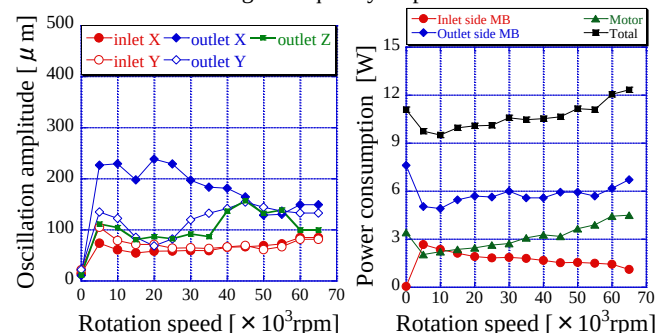


Fig.7 Oscillation amplitude

Fig.8 Power consumption