

乳児用小型磁気浮上人工心臓の研究開発

Magnetically levitated artificial heart for use in infant patients

09NM410A 長 真啓

指導教員：増澤 徹 教授

1. 緒言

本邦では年間 3000 人の乳児が死亡しており、その死因の 33%は循環器系あるいは呼吸器系の疾患である。その治療手段として補助循環デバイスの適用は有効であると考えられるが、年オーダーの機械的寿命および優れた生体適合性に加え小型、低充填量な乳児用補助循環デバイスは未だ存在しない。磁気浮上技術を応用し機械的摺動部分を撤廃することにより、高い耐久性と血液適合性を有する乳児用人工心臓を開発することを本研究の目的とし、本稿では乳児用人工心臓専用の遠心血液ポンプの設計および小型磁気浮上モータの試作とその制御方式の提案、評価を行ったので報告する。

2. 方法

2.1 乳児用磁気浮上人工心臓の概要

Fig. 1 に乳児用磁気浮上人工心臓の構造図を示す。本人工心臓は、上部ステータ、下部ステータ、浮上インペラ、ポンプハウジングにより構成される。乳児用人工心臓の目標性能は回転数 4000 rpm において、100 mmHg に対し流量 1 L/min 発生可能であることとした。磁気浮上モータは、同一構造の 6 突極のモータステータにより浮上インペラを軸方向上下から挟み込むダブルステータ構造とした。ダブルステータ構造とすることにより制御系の単純化とトルクの増加を図った。浮上インペラの軸方向両面には 2 極の回転用永久磁石を配置しており、モータステータの各突極には 3 相 2 極の回転磁界を発生する軸方向位置・回転制御用コイルと、傾き制御用コイルを独立に配置している。回転用永久磁石と 2 種類の制御用電磁石を用いて浮上インペラの軸方向位置、回転および径方向軸回りの傾きの 4 自由度を能動制御する。

2.2 磁気浮上・回転制御原理

浮上インペラの軸方向位置と回転制御について、ベクトル制御方式を提案する。本方式は、制御用コイルへ与える電流ベクトルを制御することにより、軸方向吸引力と回転トルクをそれぞれ制御する方法である。回転用永久磁石が発生する磁束密度を B_p 、軸方向位置・回転制御用コイルが発生する回転磁界を B_e とし、エアギャップ中に正弦波状に分布すると仮定する場合、回転磁界 B_e は dq 変換することにより回転座標系として扱うことができ、d 軸成分 B_d と q 軸成分 B_q に分けることができる。このとき、 B_d と B_q は d 軸電流および q 軸電流の大きさに線形に比例する。この磁束密度 B_p 、 B_d 、 B_q により浮上インペラ上下にはそれぞれ軸方向吸引力および回転トルクが発生する。ダブルステータの場合、軸方向吸引力は浮上インペラ上下に働く磁気吸引力の差となり、回転トルクは浮上インペラ上下で働く回転トルクの和となる。ここで、浮上インペラ上下のエアギャップのうち一方で磁界を強め、もう一方で磁界を弱めることにより浮上インペラ上下に働く軸方向吸引力をプッシュプル制御する場合、軸方向吸引力と回転トルクは次式

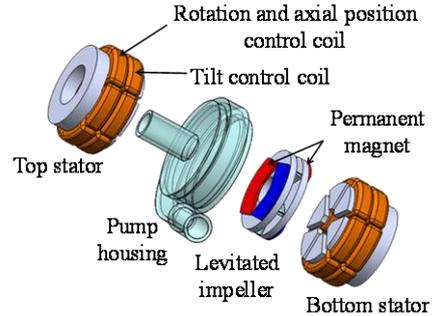


Fig.1 Magnetically levitated artificial heart for use in infant

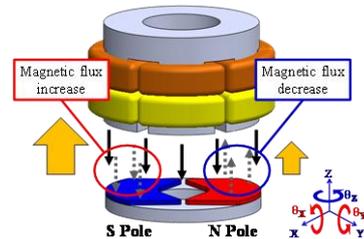


Fig.2 Tilt control principle

としてそれぞれ表すことができる。

$$F = \frac{(r_2^2 - r_1^2)\pi}{\mu_0} B_p B_d \quad (1)$$

$$\tau = -\frac{z(r_2^2 - r_1^2)\pi}{\mu_0} B_p B_q \quad (2)$$

上式において、 μ_0 は真空の透磁率、 z は永久磁石の厚さを含むエアギャップ長、 r_1 、 r_2 はモータステータの有効内外径を表している。式 (1)、式 (2) より、制御用コイルへ与える d 軸電流および q 軸電流により軸方向吸引力と回転トルクをそれぞれ独立かつ線形に制御可能である。このため、回転用磁界のみを用いて浮上インペラの軸方向位置および回転を同時に制御できる。

Fig.2 に傾き制御の原理図を示す。本モータの傾き制御用コイルはそれぞれが直列につながれており、直流電流を励磁することにより同一方向に一樣な制御磁束を発生させる。Fig.2 の破線矢印が浮上インペラ表面に配置した永久磁石から発生する磁束、実線矢印が制御用コイルにより発生する制御磁束を示している。ステータと浮上インペラ間のエアギャップ中の磁束密度は、永久磁石の S 極側では強めあり、N 極側では弱めあり、浮上インペラに働く磁気吸引力には不均衡が生じる。磁気吸引力の不均衡により発生する復元トルクにより浮上インペラの傾きを制御する。浮上インペラの上下で回転用永久磁石を 90 deg ずらして配置し、上部ステータ、下部ステータに傾き制御用コイルを配置することにより径方向 2 軸回りの傾きを制御することを可能とする。

2.3 数値流体解析による血液ポンプの設計

Fig.3 に設計したポンプの概略図を示す。設計したポンプは、インペラ高さ 8.4 mm、直径 25 mm、羽根高さ 2 mm、ポンプ室内の血液充填量が 3 mL とした。乳児用血液ポンプとするため入口および出口径はそれぞれ 6 mm とした。数値流体解析を用いてポンプ性能の推定を行った。

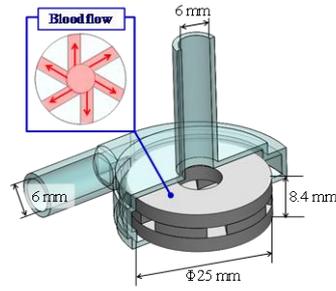


Fig.3 designed pump

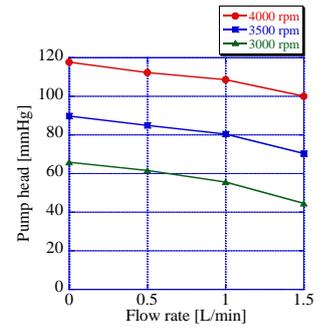
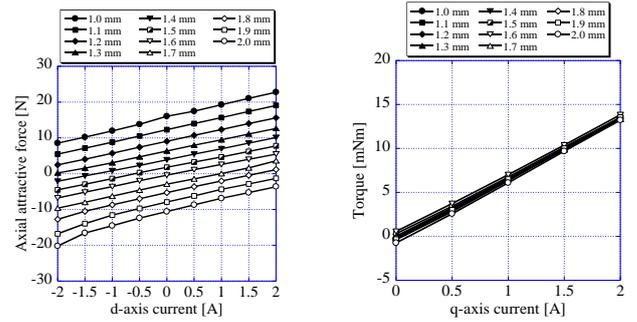


Fig.4 H-Q characteristic

2.4 ダブルステータ型磁気浮上モータの性能評価実験

外径 24 mm、高さ 43 mm の磁気浮上モータを製作し、提案したベクトル制御方式によりモータが発生する軸方向吸引力、回転トルクの評価および磁気浮上、回転性能の評価を行った。軸方向吸引力と回転トルクは、モータステータにより浮上インペラを挟み込むダブルステータ型として測定した。モータステータに荷重変換機を取り付け、浮上インペラと一体化した回転軸にトルク変換器を取り付けることにより測定した。モータステータと浮上インペラ間のエアギャップはマイクロメータを用いて調節できる構造とした。測定は、エアギャップを変化させ、軸方向吸引力をプッシュプル制御した場合の d 軸電流に対する軸方向吸引力と q 軸電流に対する回転トルクを測定した。磁気浮上、回転性能の評価は、磁気浮上回転時の浮上インペラの軸方向振動振幅および径方向軸回りの傾き変動を測定した。エアギャップはそれぞれ 1.5 mm とし、クリアランスは 0.25 mm とした。浮上インペラの軸方向位置および傾き角度、回転数の制御にはデジタル PID 制御を採用した。浮上インペラの軸方向位置および傾き角度は、浮上インペラ上面に 90 deg 間隔に 4 つ配置した渦電流変位センサにより検出した。PID 制御のサンプリング周波数は 10 kHz とした。



(a) attractive force

(b) torque

Fig.5 Axial force and torque by using vector control

3. 結果および考察

3.1 数値流体解析による血液ポンプの設計

Fig.4 に数値流体解析より得られた乳児用血液ポンプの H-Q 特性を示す。設計したポンプは、使用回転数 4000 rpm において揚程 100 mmHg、流量 1.5 L/min 発生可能であり、乳児用血液ポンプの目標性能を満足した。

3.2 ダブルステータ型磁気浮上モータの性能評価実験

Fig.2 (a) に軸方向吸引力の測定結果を示す。製作した磁気浮上モータは、エアギャップ 1.5 mm において、-2 A から 2 A までの d 軸電流の変化に対して -4.5 N から 7.7 N まで軸方向吸引力を変化できることを確認した。Fig.2 (b) にトルクの測定結果を示す。エアギャップ 1.5 mm において、q 軸電流 2 A に対し 13.5 mNm のトルクを発生可能であることを確認した。Fig.3 に浮上インペラの回転数に対する軸方向振動振幅および最大傾き角度を示す。空気中において 1000 rpm までの磁気浮上、回転を確認した。磁気浮上、回転時の浮上インペラの最大振動振幅は 104 μm であった。最大傾き角度は 1.2 deg であった。使用回転数まで至らなかった点について、400 rpm 以上の回転数で浮上インペラの傾き変動を抑制できず、浮上インペラの軸方向振動振幅が増加する。本点は傾き制御の磁気回路に開閉路を用いているためであると考え。この浮上インペラの軸方向位置の変動に対し、位置制御のために軸電流が増加するが、d 軸と q 軸の電流値の合計には上限があるため回転に必要な q 軸電流を流すことができなくなりトルク不足を起きていると考える。そこで、傾き復元トルクの測定と併せて、Fig.7 に示す閉磁路を用いた傾き制御方式について 3 次元磁場解析による評価を行った。Fig.8 にその結果を示す。エ

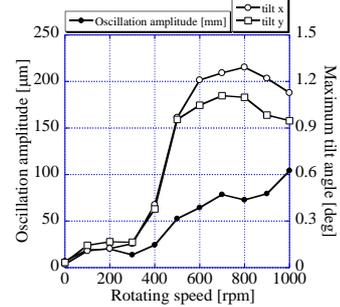


Fig.6 Oscillation amplitude and maximum tilt angle

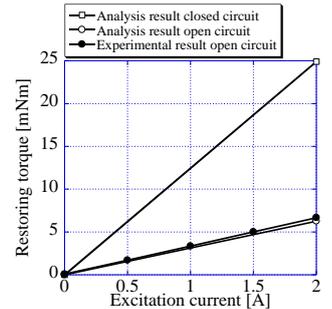
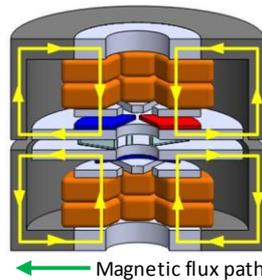


Fig.7 Closed tilt control circuit Fig.8 Restoring torque

アギャップ 1.5 mm、励磁電流 2 A における開閉路を用いた傾き復元トルクの実測値は 6.7 mNm、解析値は 6.3 mNm と同程度の値を示した。これに対し、閉磁路を用いることで 24.9 mNm と 4 倍程度の傾き復元トルクが得られるため、閉磁路を用いることにより性能向上が望めると考える。

4. 結言

乳児用人工心臓を提案し、専用血液ポンプの設計を行った。また、ダブルステータ型磁気浮上モータを設計、製作し、その駆動方式としてベクトル制御方式を提案した。ベクトル制御方式を用いて、浮上インペラの磁気浮上、回転に成功し、その有効性を確認した。