小児用補助人工心臓のための小型磁気浮上モータの第一試作

Prototype of Miniaturized Magnetically Levitated Motor for Paediatric VAD

大森 直樹^{*1} (学生員), 増澤 徹^{*1} (正員), 長 真啓^{*1} (学生員), 巽 英介^{*2}

Naoki OMORI (Stu. Mem.), Toru MASUZAWA (Mem.), Masahiro OSA (Stu. Mem.), Eisuke TATSUMI

A miniaturized magnetically levitated motor which can actively control 5-degrees of freedom (5-DOF) of impeller postures has been newly developed for a paediatric ventricular assist device (VAD). Developed motor consists of a top stator, a bottom stator and a levitated impeller that is set between the both stators. The diameter and the height of the motor are 28 mm and 41 mm, respectively. Magnetic field analysis with finite element method was performed in order to design the geometry of motor permanent magnets and a stator. Corners of the motor permanent magnets were cut to produce sinusoidal distribution of magnetic flux density and to reduce the cogging torque. The developed maglev motor produces sufficient suspension force and rotates the levitated impeller up to a rotating speed of 6000 rpm with sufficient posture control performance.

Keywords: 5-DOF, self-bearing motor, paediatric, ventricular assist device.

1 緒言

現在, 重症心不全患者の治療として心臓移植が行われており, 心臓移植までの橋渡しとして自己心臓に並列に装着してその心機能を補助する補助人工心臓が適用されている[1-3]。2010 年 7 月の臓器移植法の改正により, 15 歳以下の小児にも心臓移植が法的に可能になったが, 現状では小児に埋め込み可能な補助人工心臓は存在しない。そのため, (社)臓器移植ネットワークに登録している 10 歳未満の小児の待機患者 10 人に対し, 日本国内での小児の心臓移植件数は 2012 年の 1 件のみにとどまっている。日本国内の小児患者へのドナー不足と共に, 有効な循環補助手段が存在しないことは深刻な医療問題であり, 小児用の補助人工心臓の開発が望まれている[4-6]。一方, 体内埋め込み型の人工心臓は高い生体適合性と年オーダーの機械的寿命が必要であり, 機械的摺動部を撤廃できる磁気浮上モータを用いた補助人工心臓が開発されている[7-10]。しかし, 補助人工心臓を小児に適用するには更なるデバイスの小型化が必要であるが, 小型化による磁気浮上モータの磁気吸引力と回転トルクの低下が問題となる。更に磁気浮上系の低剛性化に伴い多自由度の能動制御による系の安定化が必要となる。一般に磁気浮上モ-

Fig. 1 Structure of 5-DOF control paediatric VAD.

タで多自由度の制御を行う場合は, 制御自由度ごとに磁気軸受が必要となり, 制御自由度の数だけ大型化する。小型化と磁気浮上安定化のトレードオフ問題を解決するために, 我々は 2 つの磁気浮上モータステータでインペラの 5 自由度および回転を能動的に制御可能な新しいアキシアル型セルフベアリングモータを提案する。今回, プロトタイプのアキシアル型磁気浮上モータを設計, 製作し, 評価を行ったので報告する。

2 方法

2.1 小児用補助人工心臓の概要

提案する小児用補助人工心臓を Fig. 1 に示す。小型遠心ポンプにアキシアル型セルフベアリングモータを組み込むことで小児用人工心臓を構成する。小児用補助人工心臓は上部ステータ, 下部ステータ, 浮上インペ

連絡先: 増澤 徹, 〒316-8511 茨城県日立市中成沢町 4-12-1, 茨城大学工学部機械工学科,
e-mail: masuzawa@mx.ibaraki.ac.jp

^{*1} 茨城大学 ^{*2} 国立循環器病研究センター

Fig. 2 Principle of tilt angle and radial position control.

ラ、ポンプケーシングから成る。磁気浮上モータは磁気軸受とモータを一体化した同一形状の磁気ステータを上下に配置するアキシアル型セルフベアリングモータである。12本の突極に軸方向位置・回転制御用コイルと径方向位置・傾き制御用コイルの2種類を配置することでロータの5自由度および回転を能動的に制御する。ロータは上下両表面に8極の永久磁石を配置する。浮上インペラは羽根を表面に永久磁石を設置したロータヨークで上下から挟みこみ、クローズドインペラとした。インペラとポンプケーシング内壁の軸方向のクリアランスを狭血液流路における血球破壊を回避するために0.3 mmとし、ポンプケーシングと血液流路を構成するために、磁気浮上モータのエアギャップを1.5 mmと広くとっている。小児用人工心臓の目標駆動回転数域は500 rpmから4000 rpmであり、本回転数領域においてポンプクリアランスの10%以下の振動振幅で浮上インペラを磁気支持可能であることを目標とした。

2.2 磁気浮上制御原理

2.2.1 軸方向位置・回転角度制御原理

本磁気浮上モータはアキシアルギャップ表面磁石同期モータを基本にしている。モータステータに集中巻きた軸方向位置・回転角度制御用コイルで3相8極の回転磁界を発生させる。ベクトル制御を用いて軸方向吸引力および回転トルクを独立に調節し、軸方向位置と回転速度を制御する。U相、V相、W相からなる3相交流は、ステータに固定された座標系の α 相、 β 相の2相交流に等価変換される。 $\alpha\beta$ 座標をロータと同期して回転する dq 座標に変換することで、3相交流は dq 座標系で静止したベクトルとして表される。 d 軸電流と q 軸電流から3相交流の波高値と位相を決定す

Fig. 3 Principle of tilt restoring torque and radial force control.

る。ダブルステータ構造の場合、ロータに働く軸方向吸引力 F_z は上下で発生する軸方向吸引力の差になり、回転トルク T_z は上下で発生する回転トルクの和となり、以下の式で表される。

$$F_z = \frac{\sqrt{6}(r_2^2 - r_1^2)\pi}{2\mu_0} B_p \frac{\mu_0 N I_d}{z} \quad (1)$$

$$T_z = -\sqrt{\frac{3}{2}} \frac{(r_2^2 - r_1^2)\pi M z}{2\mu_0} B_p \frac{\mu_0 N I_q}{z} \quad (2)$$

ここで、 r_1 および r_2 はモータ内径およびモータ外径、 z はエアギャップ長、 M は永久磁石の極対数、 B_p は永久磁石が発生する磁束密度の波高値、 N はコイル巻き数、 I_d 、 I_q は励磁電流の d 軸成分、 q 軸成分を示す。本式から、軸方向吸引力および回転トルクは回転角度に依存せずに発生することが分かる。

2.2.2 径方向位置・傾き角度制御原理

径方向位置・傾き角度制御ではステータ極数をロータ極数 P に対して $P \pm 2$ 極に励磁する $P \pm 2$ 極理論を用いて制御を行う。Fig. 2(a)に傾き復元トルクの発生原理について示す。ロータ磁界を8極、制御磁界を6極とした。図中、ロータ左端では、ロータ磁界のN極と制御磁界のS極が吸引力を発生する磁極配置となるように向かい合う。一方、図中、ロータの右端では、ロータ磁界のN極と制御磁界のN極が反発力を発生するような磁極配置となるように向かい合う。これらの磁気力により紙面時計回りに復元トルクが発生する。以下にシングルステータの場合の径方向X軸回りの傾き復元トルク T_x の理論式を示す。

Fig. 4 Schematic of permanent magnet.

$$T_x = \frac{r_2^3 - r_1^3}{6z} \pi B_p B_e \quad (3)$$

ここで B_e はステータコイルが発生する磁束密度の波高値を示す。本式から、傾き復元トルクはロータの回転角度に依存せずに発生することが分かる。今回、アキシアルギャップモータで $P \pm 2$ 極理論を適用すると、復元トルクが発生すると同時に径方向力が発生することを新たに発見して径方向位置制御に利用した[11]。 $P \pm 2$ 極理論に基づきステータ電磁石が発生させる制御磁界とそれにより発生する径方向磁気力について Fig. 2(b) に示す。ロータの左半分では、ロータ磁界の N 極と制御磁界の S 極が吸引力を発生する磁極配置となるように向かい合う。一方、ロータの右半分では、ロータ磁界の S 極と制御磁界の S 極が反発力を発生するような磁極配置となるように向かい合う。ロータ磁界と制御磁界の磁極配置によりロータに働く吸引力と反発力はそれぞれ紙面右向きと半径方向成分を含むため、ロータには半径方向に磁気力が発生する。ダブルステータ型とすることで、傾き復元トルクおよび径方向力を独立に制御する。ロータの Y 軸回りの傾きと X 軸方向の径方向位置を制御する場合の制御原理についての概略図を Fig. 3 に示す。 Fig. 3(a) では上部ステータと下部ステータに正方向の電流を励磁する。傾き復元トルクはロータ上面と下面においてそれぞれ時計回りに発生し、径方向磁気力はロータ上下において互いに打ち消し合う方向に発生する。このため、傾き復元トルクを発生することができる。 Fig. 3(b) では上部ステータに正方向の電流を励磁し、下部ステータに負方向の電流を励磁する。ロータの上面では時計回りの傾き復元トルクが発生し、下面では反時計回りの傾き復元トルクが発生するため傾き復元トルクは互いに打ち消し合う。

Fig. 5 Schematic of stator pole and electromagnetic coil.

Table 1 Stator pole surface area and coil turn number.

	Stator-1	Stator-2	Stator-3
Stator pole surface area [mm ²]	25.6	20.1	16.5
Coil turn number [turn]	31	45	58

2.3 磁場解析による小型磁気浮上モータの設計

2.3.1 永久磁石形状の検討

式(2)に示したトルク理論計算式はエアギャップ中に発生する磁束密度が正弦波状に分布すると仮定している。そのため、回転トルクは回転角度に依存せずに発生する。しかし、Fig. 4(a) に示す永久磁石面積が大きい扇形永久磁石を用いると、エアギャップ中の磁束密度は矩形波状に分布し、その高調波成分によりコギングトルクが発生する。高調波成分は一般的な軸付きモータでは騒音や振動の原因になるが、磁気浮上モータでも磁気浮上力、回転トルクを変動させ、磁気浮上性能、回転制御性能に影響を与える。そこで、空間磁束分布を正弦波に近づけ、磁束高調波成分を減らす永久磁石形状の検討を行った。その形状を Fig. 4(b) に示す。有限要素法による 3 次元磁場解析を用いて永久磁石の角を切除する角度を検討した。ここで、Fig. 3(b) に示すように、永久磁石の角を切除した部分の角度を切除角度 θ_{pm} と定義する。切除角度 θ_{pm} を 5 deg, 10 deg, 15 deg とした時のエアギャップ中の磁束密度分布、軸方向吸引力、コギングトルクを推定した。非励磁状態でロータを 1.25 deg 毎に回転させる。

2.3.2 ステータ突極形状の検討

本磁気浮上人工心臓では、浮上インペラはポンプ内で軸方向に ± 0.3 mm の可動域を持ち、全可動域において磁気浮上可能な力係数（励磁電流 0 A と 1 A での軸

Fig. 6 Developed rotor and stator.

Fig. 7 Magnetic flux density measurement system.

Fig. 8 Axial attractive force measurement system.

方向吸引力の差)が必要である。特にインペラがタッチダウンしている時に永久磁石による磁気吸引力が最大になり、電磁石はその吸引力に打ち勝ってインペラを浮上させなければならない。式(1)で示すように軸方向吸引力および力係数はコイル巻き数に依存する。モータを小型化しつつ力係数を増加させるためには、各突極間のスロット幅を広げてコイル巻き数を増やすことが有効であるが、各突極間のスロット幅を広げるとはステータ断面積の減少を招き、軸方向吸引力の減少、磁気飽和を招くため、本問題はトレードオフ問題となる。よって、有限要素法による3次元磁場解析を用いてコイル巻き数およびステータ突極断面積を検討した。Fig. 5にスロット幅の異なる3種類の突極幾何形状を示す。Table 1に突極断面積とコイル巻き数を示す。線径0.3 mmのコイル線を使用し、Stator-1で径方向2層のコイル、Stator-2で3層のコイル、Stator-3で4層のコイルを配置できる形状とした。ロータの可動範囲

(エアギャップが1.5 mm(浮上中心)から±0.3 mm(クリアランス幅))の軸方向吸引力と力係数を推定した。推定した力係数をもとに次式にてインペラがタッチダウンから浮上するために必要な励磁電流を求めた。

$$I_{Lev} = \frac{F_{PM\_Top} - F_{PM\_Bottom}}{F_{E\_Top} + F_{E\_Bottom}} \quad (4)$$

ここで、 I_{Lev} はタッチダウンから浮上に必要な電流、 F_{PM_Top} は上部ステータの永久磁石による軸方向吸引力、 F_{PM_Bottom} は下部ステータの永久磁石による軸方向吸引力、 F_{E_Top} は上部ステータによる力係数、 F_{E_Bottom} は下部ステータによる力係数である。

2.4 小型磁気浮上モータの製作と評価

2.4.1 小型アキシアル型セルフベアリングモータ

3次元磁場解析結果をもとに、小型アキシアル型セルフベアリングモータ試作機を製作した。Fig. 6に製作した浮上インペラヨークおよびステータを示す。ヨークおよびステータの外形は28 mm、ステータ高さは15.5 mmである。浮上インペラヨーク表面には永久磁石切除角度10 deg、永久磁石厚さ1.0 mmのネオジウム磁石(N48H)を貼り付けた。ステータは2.3.1で述べたStator-3を採用した。ステータ材料は製作の容易性から磁性軟鉄SUY-1を使用し、コイル巻き数は58巻とした。

2.4.2 磁束密度分布、軸方向吸引力測定

Fig. 7に磁束密度分布測定装置を示す。ロータとステータを向かい合わせて配置し、エアギャップは1.5 mmとする。回転ステージでロータとステータを2.5 deg毎に回転させ、ガウスメータでエアギャップ中の永久磁石による磁束密度分布を測定した。Fig. 8に軸方向吸引力測定装置を示す。励磁電流を-2 Aから2 Aまで、エアギャップを1 mmから2 mmまで変化させて軸方向吸引力をロードセルで測定した。

2.4.3 磁気浮上実験

Fig. 9に磁気浮上実験機を示す。本磁気浮上実験機はステータ、ロータおよび渦電流変位センサを保持するためのセンサホルダで構成される。幅は47 mm、高さは48 mmである。浮上ロータの可動域は軸方向位置に±0.3 mm、径方向位置に±0.5 mm、傾き角度に±1 degとした。Fig. 10に磁気浮上制御系の説明図を示す。本磁気浮上モータは軸方向位置に配置された3個の渦電

Fig. 9 Developed magnetically levitated motor.

Fig. 10 Diagram of 5-DOF control and rotation.

流変位センサ（株式会社電子応用：PU-03A）によりロータの軸方向位置および傾き角度を、ロータ側面に配置した2個の渦電流変位センサによりロータの径方向位置を検出する。また、ステータスロットに配置した3個のホールセンサによりロータの回転角度を検出する。これらの検出結果からデジタルPIDコントローラで指令制御電流を計算し、パワーアンプを介してステータコイルに制御電流を流すことでロータの5自由度および回転を能動的に制御する。

3 結果・考察

3.1 磁場解析による小型磁気浮上モータの設計

3.1.1 永久磁石形状の検討

Fig. 11にエアギャップ中の磁束密度分布（解析結果）を示す。比較対象として波高値が0.4 Tの正弦波（破線）も載せた。扇形の永久磁石の角を切除することで磁束密度の高調波が減少することを確認した。切除角度5 degでは磁束密度の高調波成分が大きい、切除角度を10 deg, 15 degとすることで、破線で示した正弦波に近い波形を示した。ロータ回転により生じるコギングトルクおよび軸方向吸引力の脈動（解析結果）

Fig. 11 Analysis result of magnetic flux density.

(a) Cogging torque.

(b) Axial attractive force.

Fig. 12 Cogging torque and axial attractive force with difference rotation angle.

Fig. 13 Analysis result of relationship between axial attractive force and exciting current.

をFig. 12(a)とFig. 12(b)に示す。コギングトルクの波高値は切除角度が10 degのときに最小となり0.15 mNmとなった。軸方向吸引力変動は切除角度が大きくなるにつれて減少した。一方、切除角度が大きくなることで永久磁石総面積が減少するため、軸方向吸引力の大きさは小さくなった。以上の結果から、コギングトルクおよび軸方向吸引力変動を小さくでき、かつ高い軸方向吸引力を得ることができる切除角度10 degの永久磁石形状を本磁気浮上モータに採用した。

Fig. 14 Relationship axial attractive force and air gap length with difference stator pole model.

3.1.2 ステータ突極形状の検討

Fig. 13に励磁電流による軸方向吸引力の変化（解析結果）を示す。力係数は Stator-1 で 1.3 N/A, Stator-2 で 1.8 N/A, Stator-3 で 2.2 N/A となった。励磁電流を増加させても電流・吸引力の線形関係が保たれていることより磁気飽和していないことが分かる。Fig. 14に軸方向吸引力とエアギャップおよび励磁電流の関係を示す。右上がりの破線で示すグラフはモータを組み立てた場合の上部ステータの軸方向吸引力、左上がりの実線で示すグラフは下部ステータの軸方向吸引力を示している。上下のステータの軸方向吸引力曲線が交わる部分が軸方向吸引力が釣り合っている点を示している。浮上中心から力が釣り合う点までの距離が可動域を示しており、最大励磁電流を 2 A とするとロータの可動域は Stator-1 で ± 0.14 mm, Stator-2 で ± 0.22 mm, Stator-3 で ± 0.30 mm である。式(4)からインペラがタッチダウンから浮上するために必要な電流は Stator-1 で 4.0 A, Stator-2 で 2.6 A, Stator-3 で 2.0 A と算出された。Stator-1 は突極面積が大きくコイル巻き数が少ないため、永久磁石の吸引力が大きく力係数が小さい。Stator-3 では突極面積が小さくコイル巻き数が多いため、永久磁石の吸引力が小さい力係数が大きい。そのため、Stator-3 は Stator-1 と Stator-2 に比べ小さい励磁電流でタッチダウンから浮上することができる。コイル抵抗によるジュール熱、ドライバ回路性能を考慮して本磁気浮上モータの瞬間最大電流は 3.0 A を想定し

Fig. 15 Magnetic flux density distribution.

Fig. 16 Relationship between axial attractive force and air gap length.

ているため、ステータ突極形状は Stator-3 を採用した。

3.2 小型磁気浮上モータの評価

3.2.1 磁束密度測定・軸方向吸引力測定

Fig. 15に磁束密度分布の測定結果を示す。比較として 3.1.2 で示した切除角度 10 deg の解析結果と波高値 0.6 T の正弦波（破線）を示す。測定結果は波高値が 0.6 T で解析結果に比べ 0.1 T 大きい結果となった。ステータスロットがある角度 0 deg 付近で磁束密度が若干減少したが、全体的に正弦波に近い磁束密度分布を実現できた。Fig. 16に実測した軸方向吸引力とエアギャップおよび励磁電流の関係を示す。浮上中心であるエアギャップ 1.5 mm では永久磁石の軸方向吸引力が 9.6 N, 力係数が 1.9 N/A であった。上下のステータに 2 A の励磁電流を流すことで最大 ± 0.3 mm ロータが変位できることが分かる。タッチダウンから浮上するために十分な軸方向吸引力を発生可能である。Fig. 14(c)に示した解析結果と比較すると、永久磁石の磁気吸引力および力係数の実測結果が約 20 %減少した。磁束密度分布および磁気吸引力の解析結果と実験結果に差が生じており、これはデバイスが小型であるため制作誤

Fig. 17 Oscillation amplitude of 5-DOF of levitated rotor.

差と測定誤差が大きく影響したと考える。しかし、今後、磁気浮上モータの改良を行うために θ の傾向を見ることができ、有意義なデータであると考ええる。

3.2.2 浮上回転試験

Fig. 17に各回転数における軸方向位置、傾き角度、径方向位置の最大振動振幅を示す。製作した磁気浮上モータで空気中で回転数 6000 rpm までの磁気浮上回転に成功した。回転数 4000 rpm において最大振動振幅は軸方向位置 0.028 mm、傾き角度 0.29 deg、径方向位置 0.018 mm であり、各自由度において十分に小さい振動振幅で制御できた。

今後、製作した磁気浮上モータを小型遠心ポンプに組み込み、送液時のインペラの浮上安定性について評価を行う。

3.3 開発中の磁気浮上人工心臓の位置づけ

現在、臨床応用開始されている成人用補助人工心臓の体積が 50 cc から 180 cc であるのに対し、小児用人工心臓は体積 10 cc 程度まで小型化が求められる。本研究で開発した小児用人工心臓用 5 軸制御磁気浮上モータ試作機は、体積 25 cc と目標サイズと比べて若干大きいですが、試作機として十分小型な磁気浮上モータを製作することができたと考える。今後、更なる小型化

を行う。また、成人用補助人工心臓の駆動電力 10 W から 15 W 程度に対して、小児用人工心臓の目標駆動電力が 2 W 程度であることからバッテリーサイズについてもポンプ本体と同程度まで小型化が可能であると考ええる。

4 結言

小児用補助人工心臓のための小型アキシアル型セルフベアリングモータを提案した。3 次元磁場解析を用いてコギングトルクの小さい永久磁石形状を設計した。製作した磁気浮上モータは小児用人工心臓に用いるために十分なロータの回転数と安定性を有することを確認した。

(2014 年 3 月 14 日受付, 2014 年 10 月 5 日再受付,
2014 年 11 月 21 日再々受付)

参考文献

- [1] 増澤 徹, 医療アクチュエーションの最前線, ヘルスケアとバイオ医療のための先端デバイス, pp. 316-325, 2009.
- [2] 増澤 徹, 医用アクチュエーション技術に関する共同研究委員会編 医用アクチュエーション技術の現状, 電気学会産業応用部門リニアドライブ委員会, pp. 35-38, 2008.
- [3] 小野稔, 補助人工心臓の現状と展望, 小児内科, vol.42, No. 5, pp. 784-788, 2010.
- [4] Setsuo Takatani, Hideo Hoshi, Kennichi Tajima, Katsuhiro Ohuchi, Makoto Nakamura, Tadahiko Shinshi, Masaharu Yoshikawa, Feasibility of a Miniature Centrifugal Rotary Blood Pump for Low-Flow Circulation in Children and Infants, ASAIO Journal, Vol. 51, No. 5, pp. 557-562, 2005.
- [5] David J. Farrar, Kevin Bourque, Charles P. Dague, Christopher J. Cotter, Victor L. Poirier, Design Features, Developmental Status, and Experimental Results With the Heartmate III Centrifugal Left Ventricular Assist System with a Magnetically Levitated Rotor, ASAIO Journal, Vol. 53, No. 3, pp. 310-315, 2007.
- [6] 小西 義昭, 人工心臓 人工すい臓, 日本機械学会誌, Vol. 107, No. 1033, pp. 6-9, 2004.
- [7] 増澤 徹, 体内埋め込み型人工心臓の設計, 設計工学, Vol. 36, No. 7, pp. 7-14, 2001.
- [8] 丸山 修, 人工心臓(基礎), 人工臓器, 41 巻, 3 号, pp. 172-175, 2012.
- [9] Daniel L. Timms, Nobuyuki Kurita, Nicholas Greatrex, Toru Masuzawa, BiVACOR A Magnetically Levitated Biventricular Artificial Heart, Proc. of MAGDA conference in Pacific Asia, pp.482-487, 2011.
- [10] Hideo Hoshi, Tadahiko Shinshi, Setsuo Takatani, Third-generation Blood Pumps With Mechanical Noncontact Magnetic Bearings, Artificial Organs, Vol. 30, No. 5, pp. 324-338, 2006.
- [11] Masahiro Osa, Toru Masuzawa, Naoki Omori, Eisuke Tatsumi, Radial Position Active control of Double Stator Axial Gap Self-bearing Motor for Paediatric VAD, Proceedings of ISMB14, pp. 187-192, 2014.