

小児用人工心臓のための小型磁気浮上モータにおけるロータ永久磁石形状の検討

Design of permanent magnet self-bearing motor for paediatric VAD

○ 大森直樹 (茨城大) 増澤徹 (茨城大) 長真啓 (茨城大) 巽英介 (国循)

Naoki OMORI, Ibaraki University
Toru MASUZAWA, Ibaraki University
Masahiro OSA, Ibaraki University

Eisuke TATSUMI, National Cerebral and Cardiovascular Center

Abstract: A miniaturized axial gap self-bearing motor which can generate both suspension force and rotating torque with double motor stator has been developed for a paediatric ventricular assist device (VAD). A levitated rotor is set between both stators which have an identical structure. This research investigated two motors with different shape of motor permanent magnet (PM). One of these PMs has a sector shape which can reduce a thickness of PM on account of large cross sectional area of PM. Hence, both a reluctance of magnetic circuit and a weight of the rotor become smaller. The other PM achieve sinusoidal magnetic flux density by cutting four corners of the sector shape. Cogging torque can be then reduced. Each developed motor successfully rotate the rotor up to a rotating speed of 5000 rpm with a rotating torque of 10 mNm. And it indicated sufficient rotating performance of the motor for paediatric VAD.

Key Words: Ventricular Assist Device, Self-Bearing Motor, Paediatric, Cogging Torque, Permanent Magnet

1. 序論

現在、重症心不全患者への治療では心臓移植が行われており、心臓移植までの橋渡しとして補助人工心臓が適用されている。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。しかし、(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は深刻であり、小児用の補助人工心臓の開発が望まれている。しかし、小児に適用可能な人工循環デバイスは高い生体適合性、年オーダーの機械的寿命に加え、小型、低充填量等の要求があり、小児用循環デバイスの研究は遅れている。我々は機械的摺動部を撤廃できる磁気浮上モータを用いた小児用人工心臓を提案する。本稿では小児用人工心臓のために永久磁石形状の異なる2種類の小型なアキシヤ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 アキシヤル型磁気浮上モータの概要

Fig.1 にアキシヤル型磁気浮上モータを示す。浮上ロータを軸方向から同一形状の磁気ステータで挟み込むダブルステータ型を採用する。浮上ロータには軸方向両表面に8極の永久磁石を配置する。12突極からなる上部ステータおよび下部ステータには、軸方向位置・回転制御用の3相8極、径方向位置・径方向軸回りの傾き制御用の2相6極の回転磁界を発生させるコイルを巻く。2種類のコイルにより浮上ロータの軸方向位置 Z 、径方向位置 X 、 Y 、径方向軸回りの傾き θ_x 、 θ_y の5自由度および回転 θ_z を能動的に制御する。ロータの軸方向位置および回転の制御はベクトル制御により行う。上下のモータステータが発生する磁束の波高値と位相を調節することにより回転用磁界のみでロータの軸方向位置と回転を同時に制御する。ロータの径方向位置および径方向軸回りの傾きはロータ極数 P に対してステータ極数を $P \pm 2$ 極とすることで発生する径方向力と径方向軸回りの傾き復元トルクを用いて制御する。

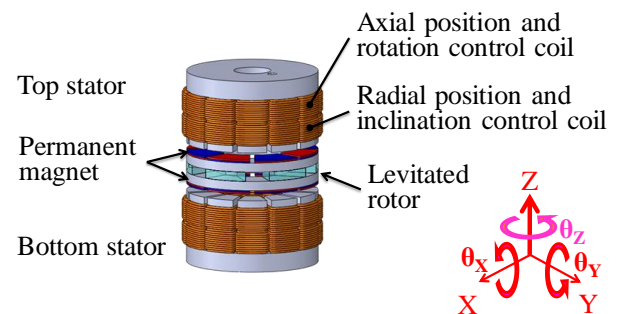
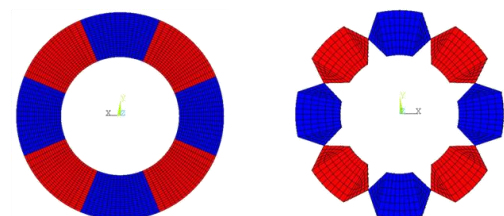


Fig. 1 Structure of magnetically levitated motor



(a) Type1

(b) Type2

Fig. 2 Schematic of permanent magnet

2.2 三次元磁場解析による磁気浮上モータの設計

三次元磁場解析を用いて磁気浮上モータを設計した。ロータに配置する永久磁石に、Fig.2 に示す2種類の形状を提案した。Type1 は永久磁石断面積が最大となる形状をとる。永久磁石断面積が大きい磁石厚さの薄い磁石を製作でき、ロータの軽量化および制御磁束に対する磁気抵抗の低減において有効である。Type2 はエアギャップ中に正弦波状の磁束密度分布を発生する形状をとる。磁束の高調波を減らすことにより、非励磁状態でロータを回転させた時のコギングトルクの低減をはかった。Type1 の永久磁石厚さを 0.7 mm とした。Type2 は Type1 に比べ、永久磁石断面積が小さくなり、磁束が減少する。磁束を増加させるために Type2 の永久磁石厚さは 1.0 mm とした。永久磁石断面積は Type1 で 408 mm^2 、Type2 で 321 mm^2 である。簡単化のため

解析モデルにシングルステータモデルを使用した。Type1 および Type2 の永久磁石形状のモータにおいて、0 deg から 90 deg のエアギャップ中の磁束密度分布を推定した。非励磁状態でロータを回転させ、コギングトルクを推定した。

2.3 アキシアル型磁気浮上モータの製作・評価

モータ外径が 28 mm, モータ高さが Type1 で 42 mm, Type2 で 42.6 mm の磁気浮上モータを製作した。本磁気浮上モータの目標性能は回転数 4000 rpm において、揚程 100 mmHg, 流量 1.5 L/min を達成可能な 4.0 mNm の回転トルクを発生可能であることとした。製作した磁気浮上モータの磁束密度分布の測定, および回転トルクと消費電力の関係の評価を行った。磁束密度分布の測定範囲は解析条件と同様に 0 deg から 90 deg とする。Fig.3 に回転トルク測定系を示す。ステータを土台に固定し、シャフトを介してロータをトルク変換器に接続する。ヒステリシスブレーキを用いてロータに負荷を加える。ロータの回転数を 1000 rpm から 5000 rpm まで 1000 rpm ごとに変化させ、モータへ負荷をかけた時の消費電力を測定した。負荷は 5 mNm ごとに変化させた。

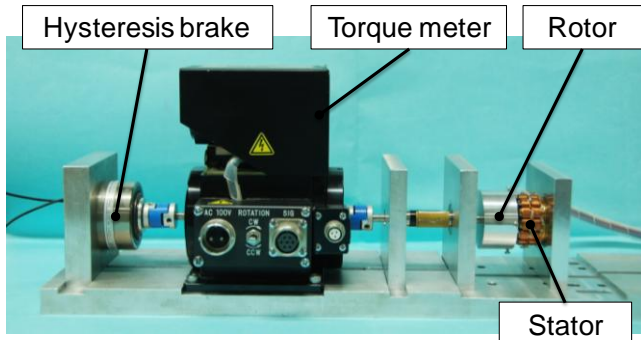


Fig.3 Experimental system of torque measurement

3. 結果

Fig.4(a)に Type1, Fig.4(b)に Type2 の永久磁石によるエアギャップ中の磁束密度分布を示す。Type2 の永久磁石による磁束密度分布は Type1 に比べ高調波が減少し、正弦波に近づいた。Type1 の磁束密度分布では実験結果が解析結果に対し同程度となった。Type2 の磁束密度分布では実験結果が解析結果に対し 20%程度大きくなった。

Fig.5 にロータの回転角度に対するコギングトルクの解析結果を示す。コギングトルクはロータ回転角度に対して 15 deg の周期で発生し、最大値は Type1 で 2.1 mNm, Type2 で 0.2 mNm となった。

Fig.6 にロータ回転時の負荷トルクに対するモータの消費電力を示す。Type1, Type2 共に目標性能である回転数 4000 rpm において 4.0 mNm の回転トルクを発生した。さらに、最大 5000 rpm までの回転を確認しており、小児用人工心臓に用いる動力として十分なモータ回転性能を有していることを確認した。Type2 は Type1 に比べ全ての回転数において発生トルクが大きくなった。また、高回転域(4000 rpm から 5000 rpm)において消費電力が大きくなった。使用回転数 4000 rpm, 回転トルク 5 mNm において Type1 では消費電力が 9.7 W, Type2 では 11.4 W であった。

4. 考察

コギングトルクの解析結果から、エアギャップ中の磁束密度分布を正弦波状になる Type2 の永久磁石を用いることでコギングトルクを低減できることが分かる。コギングトルクはロータが 1 回転する間にロータ極数とステータ極対数の最小公倍数の分だけ脈動して発生する。本モータはロータ 8 極, ステータ 12 突極であるため、ロータが 1 回転す

る間に 24 回脈動するコギングトルクが発生する。つまり、ロータ回転角に対する周期は 15 deg であり、これは解析で得られたコギングトルクの周期と一致する。

Type2 は Type1 に比べ磁束密度が大きいため、発生可能な回転トルクが大きくなったと考える。Type2 について高回転域における消費電力の上昇は鉄損が大きいためであると考えられる。鉄損は磁束密度の大きさおよびロータの回転周波数に比例する。Type2 は磁束密度が大きくなったため、高回転域の消費電力が Type1 に比べ大きいと考える。Type1, Type2 共に使用回転数において 10 W 程度であり、小児用人工心臓の消費電力として大きいと考える。本点について、鉄損を軽減できる圧粉磁心等の磁性材料でステータを製作することで、消費電力の低減ができると考える。

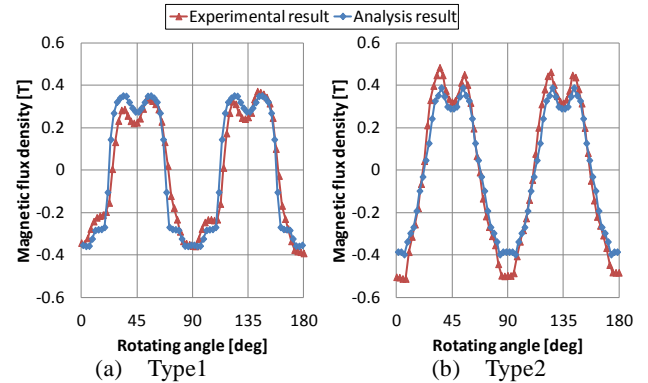


Fig. 4 Magnetic flux density

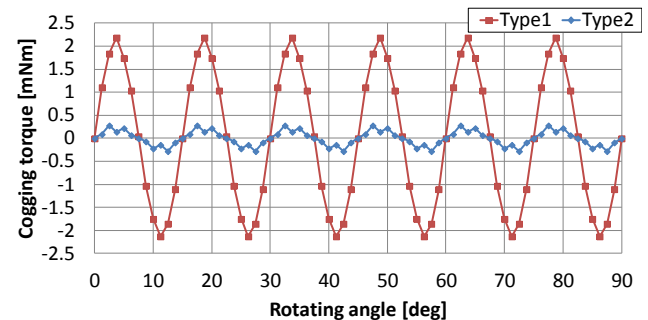


Fig. 5 Analysis result of cogging torque

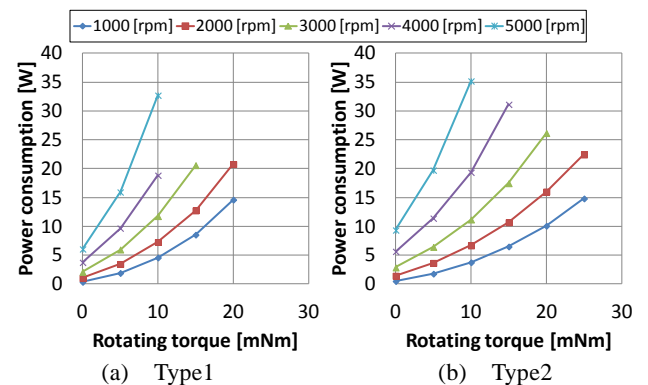


Fig. 6 Relationship between rotating torque and power consumption

5. 結言

小児用人工心臓のための小型アキシアル型磁気浮上モータを提案した。永久磁石形状の異なる 2 種類のアキシアル型磁気浮上モータを製作し、Type1, Type2 共に十分な回転性能を有していることを確認した。Type1 では薄型化, Type2 ではコギングトルクの減少や大きな回転トルクの発生が可能であることを確認した。今後、磁気浮上モータとしての浮上回転の制御特性の評価を行う。