小径ラジアル型セルフベアリングモータの開発のための ステータのスロット数の検討

Study on Slot Number of Stator for Development of Small Diameter Radial Type Self-Bearing Motor

小沼 弘幸^{*1}(正員), 吉村 優人^{*1}

Hiroyuki ONUMA (Mem.), Yuto YOSHIMURA

Magnetic levitation technology is applied for durability enhancement of ventricular assist device. We have developed a pediatric magnetic levitated ventricular assist device using a radial type self-bearing motor. The radial type self-bearing motor consist of a stator and a rotor which has 4 permanent magnet on the inner surface of the rotor. The minus two-pole algorithm is adopted to levitate and rotate the rotor. Radial position of the rotor is controlled actively, and axial position of it is passively stable within the thin rotor structure. In this paper, two-dimensional magnetic field analysis of the self-bearing motor using 5 slots stator, 6 slots stator and 7 slots stator were performed, and an optimal slot number of stator for development of small diameter radial type self-bearing motor was examined. As a result, 5 slots stator is good slot number for the radial type self-bearing motor which has 4-pole rotor.

Keywords: magnetic levitation, magnetic bearing, self-bearing motor, permanent magnet motor.

(2016 年 11 月 24 日受付, 2017 年 4 月 24 日再受付)

1 緒言

ターボポンプは、半導体分野の製造装置や医療分野の補助人工心臓などにおいて、超純水、血液などを送液するのに使用されている。補助人工心臓は、自己の心臓に並列に装着され心臓のポンプ機能を補助する装置である。開発されている多くの補助人工心臓は、主に左心室のポンプ機能を補助する装置である[1]。日本において 2010 年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可能となったが、2016 年 8 月の時点で 15 歳以下の 2016 年の待機患者 28 人に対して、1 件の心臓移植に留まっている。小児心臓疾患患者へのドナー不足は深刻である。心臓移植への橋渡しとして空気駆動による拍動流型ポンプの小児用補助人工心臓が用いられているが、体外設置補助人工心臓であるため感染症などのリスクが懸念されることや生活の質の向上のためにも体内埋込型が望ましい。そのため、体内埋込可能な小型小児用磁気浮上補助人工心臓の開発が必要であると考えられる。

これまで成人用重症心不全患者を対象としたラジアル型セルフベアリングモータを用いた磁気浮上補助人工心臓の開発を行ってきた[2-5]。文献[2]では、効率化のためにステータスロット数を 12 としたセルフベ

アリングモータの回転磁界と磁気支持磁界の極数の組合せに関する研究を行い、最適な組み合わせがあることを明らかにした。文献[3]では、文献[2]で明らかとなった回転磁界 8 極と磁気支持磁界 6 極の組み合わせのセルフベアリングモータの磁気支持力の簡易推定式を提案した。文献[4]では、文献[3]で提案した磁気支持力推定式を用い異なる磁気支持特性を持つロータを開発し同一のステータを用いたときのセルフベアリングモータの磁気浮上性能の比較実験を行い、磁気浮上性能を向上させるための設計指針を得た。文献[5]では、文献[2]~[4]の研究成果を基にしてロータ外径 46 mm 程度のラジアル型セルフベアリングモータを用いた磁気浮上補助人工心臓の試作機を開発しポンプ性能と磁気支持特性の評価を行い、成人用補助人工心臓の目標ポンプ性能の揚程 100 mmHg, 流量 5 L/min を回転数 2,300 rpm, 消費電力 7.2 W で達成し、補助人工心臓として十分な性能を有することを確認した。このようにステータスロット数を 12 とし、ロータ外径 46 mm 程度のラジアル型セルフベアリングモータを開発してきたが、小児用磁気浮上補助人工心臓に用いるために更なる小型化、小径化を行う必要がある。モータ外径（本ラジアル型セルフベアリングモータではロータ外径）として $\phi 30$ mm 以下を目標とする。ラジアル型セルフベアリングモータにおいて、これほど小さなものの研究開発は見当たらない[6]。目標の大きさが実現できれば世界最小のラジアル型セルフベアリングモータになると

連絡先：小沼 弘幸, 〒312-8508 茨城県ひたちなか市中根 866, 茨城工業高等専門学校電子制御工学科,
e-mail: onuma@ss.ibaraki-ct.ac.jp

^{*1} 茨城工業高等専門学校

考える。ラジアル型セルフベアリングモータにおいて、12 スロットのまま小径化するとコイルを巻く領域を確保することは難しいためスロット数を減少させる必要がある。本ラジアル型セルフベアリングモータは、ロータの径方向位置と軸方向回りの回転をステータにより能動的に制御しているが、軸方向位置および径方向軸回りの傾きについてはロータの永久磁石の磁気吸引力により発生する復元力で静的に支えている。ここで、同一のロータであればロータの永久磁石によりロータとステータ間のエアギャップ中に発生する磁気エネルギーは同じであるから、ロータの軸方向の変位と傾きの受動安定性能は、スロット数が異なってもあまり変化しないと考える。そこで本研究では、有限要素法を用いた 2 次元静磁場解析を行い径方向磁気支持特性と回転トルク特性から適したステータスロット数の検討を行った。

2 方法

2.1 ラジアル型セルフベアリングモータ

ラジアル型セルフベアリングモータの概略図を Fig. 1 に示す。ラジアル型セルフベアリングモータは、径方向磁気軸受とモータの機能を一つのステータで行う磁気浮上モータである。小型化のためアウターロータ構造を採用した。同じロータ外径としたときインナーロータ型はロータの外径側にステータを配置するため、アウターロータ型モータと比較して装置の外径が大きくなるためである。ロータ外径 $\phi 30\text{ mm}$ と小径化するため、ロータの磁極数をできる限り少なくする。アウターロータ構造として内壁面に 4 枚の永久磁石を貼り合わせた 4 極ロータとロータの内側に配置したステータにより構成することとした。ロータの回転には、ステータにより極数 4 極を発生させ回転制御を行う。ロータの径方向の磁気支持の磁界には、 $P \pm 2$ 極理論を用いる。 $P \pm 2$ 極理論とは、永久磁石による界磁磁界の

Fig. 1 Schematic of radial type self-bearing motor.

極数 P に対し磁気支持磁界として $+2$ 極または -2 極の磁界をステータにより発生させることにより回転制御と磁気支持制御の独立性が示されている理論である[7]。また、これまでの研究成果からアウターロータ構造の場合、 $P-2$ 極とした方が磁気支持力の発生特性が良いことが判明している[2]。このことから磁気支持磁界として極数 2 極を発生させ磁気支持制御を行う。また、ロータを薄型にすることで、ステータとロータの強い磁気結合力によりロータの軸方向の変位および傾きを静的に磁気支持（受動安定）する機構を採用する。これにより、デバイスの小型化、薄型化、制御系の簡略化を図ることができる。

2.2 検討するステータ形状

ラジアル型セルフベアリングモータの小径化のためステータ外径を $\phi 20\text{ mm}$ とする。ステータで回転制御用の 4 極磁界と磁気支持制御用の 2 極磁界を発生させられることとロータ永久磁石の極数 4 極のモータを回転させられることからステータのスロット数は 5 スロット以上とする。4 スロットではコギングトルクが大きく、ステータにより発生できる回転トルクでは静止時からの回転ができないと考えられるため 5 スロット以上必要である。小径化のためには、ステータのスロット数は少ない方が良い。そこで、ステータスロット数の検討のため、5 スロット、6 スロット、7 スロットの検討を行うこととした。各突極傘の間に約 $2.8\text{ mm} \times 1\text{ mm}$ の空間を回転角検出用ホール素子の設置のために設けることとした。Fig. 2 に 5 スロットステータの形状を示す。Fig. 3 に 6 スロットステータの形状を示す。Fig. 4 に 7 スロットステータの形状を示す。突極での磁気飽和を避けるため 5 スロットでは幅 4 mm 、6 スロットでは幅 3.5 mm 、7 スロットでは幅 3 mm とした。スロット数が少ないほどロータ永久磁石の磁束が一つの突極に集中してしまうと考えたため、スロット数が少ないほど突極幅を太くした。ロータとステータ間のエアギャップは 2 mm である。

2.3 磁場解析によるステータのスロット数の検討

磁場解析を用いて径方向の磁気支持性能と回転トルク特性を推定し、ステータスロット数の検討を行うこととした。磁場解析としては、市販の有限要素解析ソフトウェアの ANSYS EMAG を用い 2 次元静磁場解析を行った。

径方向の磁気支持性能の評価のため、磁気支持力と

負ばね力（ロータの永久磁石によるステータへの径方向磁気吸引力によって生じる磁気支持を破たんさせる力）を推定する。コイルに電流を与え磁気支持力が $+y$ 方向に発生するように2極の磁気支持磁界を作り、磁気支持力としてロータに作用する x 方向及び y 方向の磁気吸引力を推定した。また、磁気支持磁界により発生する軸方向回りへの干渉トルクも推定した。磁気支持磁界は波高値 100 A の起磁力を磁気支持磁界が正弦波に近似するように各コイルに振り分けて励磁した。また、ロータを $-x$ 方向と $-y$ 方向に変位させたときの磁気吸引力も同様に推定し、ロータの径方向位置制御可能域を検討した。

Fig. 2 5 slot type self-bearing motor.

Fig. 3 6 slot type self-bearing motor.

Fig. 4 7 slot type self-bearing motor.

回転トルク特性の評価のため、回転制御磁界をロータの永久磁石の磁界と位相差を電気角 90° として $+ \theta$ 方向に発生するように4極の回転制御磁界を作り、そのとき発生する軸方向回りのトルクを推定する。また、回転制御磁界により発生する径方向への干渉力も推定した。回転制御磁界は波高値 100 A の起磁力を回転制御磁界が正弦波に近似するように各コイルに振り分けて励磁した。

解析に用いたステータとロータのヨークの磁性材のB-H特性をFig. 5に示す。また、永久磁石は保磁力 692000 A/m, リコイル透磁率 1.09 とした。また、2次元磁場解析からは単位長さ当りの径方向磁気支持力、負ばね力、回転トルクが推定される。

3 結果と考察

3.1 磁束密度分布の推定結果

磁場解析により得られた磁束密度分布の例として、ロータがFig. 2～Fig. 4の回転角度位置にあるときの永久磁石のみによる5スロット、6スロット、7スロットのステータとロータ間のエアギャップ中心の磁束密度分布の推定結果をそれぞれFig. 6, Fig. 7, Fig. 8に示す。 x 軸上のエアギャップを 0° として反時計回りに取った径方向の磁束密度分布である。このときの磁束密度分布のコンター図をFig. 9に示す。

エアギャップ中心の磁束密度分布は、各スロット数での波高値に差はなく 0.3 T であった。各スロット数の結果においてスロット影響でスロットの位置の角度で磁束密度が減少していることを確認した。磁束密度分布は、 y 軸 (90° , 270°) を中心としたときに左右対称であった。磁束密度分布のコンター図から永久磁石の中心とステータ突極の中心が向かい合っている y 軸上の突極部の磁束密度は、各スロット数で 0.9 T 程度であった。スロット数が少ないほど突極幅を太くす

Fig. 5 B-H characteristic of magnetic material

ることで磁束密度を同じようにすることができていることを確認した。小径とするため、ロータヨークの径方向厚みを 2 mm と薄くしている。ロータヨーク部の永久磁石の磁極が切り替わる継ぎ目付近の一部で磁束密度が 1.4 T 程度であった。これ以上薄くすると磁気飽和が発生し磁気支持力と回転トルクの発生に大きく影響すると考える。

3.2 径方向の磁気支持性能の推定結果

ロータが中心位置にありロータを一回転させたときロータの回転角度位置において発生する x 方向、 y 方向の磁気吸引力および軸方向回りの回転トルクの 5 スロット、6 スロット、7 スロットの推定結果をそれぞれ Fig. 10, Fig. 11, Fig. 12 に示す。そして、磁気支持磁

Fig. 6 Flux density distribution in air gap of 5 slot type.

Fig. 7 Flux density distribution in air gap of 6 slot type.

Fig. 8 Flux density distribution in air gap of 7 slot type.

(a) 5 slot type (b) 6 slot type (c) 7 slot type

Fig. 9 Contour map of flux density.

界をコイルに励磁したときロータの回転角度位置において発生する x 方向、 y 方向の磁気吸引力および軸方向回りの回転トルクの 5 スロット、6 スロット、7 スロットの推定結果をそれぞれ Fig. 13, Fig. 14, Fig. 15 に示す。

5 スロットと 7 スロットの場合、ロータが一回転する間に永久磁石磁界のみで径方向に大きな磁気吸引力が発生することが分かった。この径方向の磁気吸引力の発生する原因は、 x 軸に非対称なステータ形状のためであると考え。 x 軸と y 軸ともに対称なステータ形状である 6 スロットではロータが一回転する間に永久

Fig. 10 Estimated attractive force and torque of 5 slot type without stator magnetic field.

Fig. 11 Estimated attractive force and torque of 6 slot type without stator magnetic field.

Fig. 12 Estimated attractive force and torque of 7 slot type without stator magnetic field.

磁石磁界のみで径方向の磁気吸引力は発生していない。一方、6 スロットの場合、ロータが一回転する間に永久磁石磁界のみで大きな回転トルク(コギングトルク)が発生することが分かった。コギングトルクは、ロータ永久磁石の磁極数とステータスロット数の最小公倍数が小さいほど大きく発生することが知られている。5 スロット, 6 スロット, 7 スロットのその値は、それぞれ 20, 12, 28 である。

磁気支持磁界を励磁し y 方向に磁気支持力を発生させた場合、5 スロット, 6 スロット, 7 スロットともにロータの回転位置により発生する磁気支持力の大きさ

Fig. 13 Estimated attractive force and torque of 5 slot type with levitation magnetic field.

Fig. 14 Estimated attractive force and torque of 6 slot type with levitation magnetic field.

Fig. 15 Estimated attractive force and torque of 7 slot type with levitation magnetic field.

が変動することが分かった。また、ロータの回転位置により x 方向にも磁気吸引力が発生した。5 スロットが 3 つの中でそれらの磁気吸引力の発生が小さかった。磁気支持磁界を励磁し y 方向に磁気支持力を発生させたときの回転トルクを見てみると、6 スロットでは、永久磁石のみでの回転トルクと同じ大きさであった。5 スロットと 7 スロットでは、永久磁石のみでの回転トルクは小さかったが磁気支持磁界により大きな回転トルクが発生した。5 スロットと 7 スロットでは、回転制御に干渉するトルクが発生することが分かった。この原因は、 x 軸に非対称なステータ形状のためであると考え。

ロータの径方向位置制御可能域の検討のため、 x 方向および y 方向にそれぞれロータを変位させたときの磁気吸引力(負ばね力)、 x 方向変位させときにその変位を戻す x 方向に磁気支持力を発生させたときの磁気吸引力、 y 方向変位させときにその変位を戻す y 方向に磁気支持力を発生させたときの磁気吸引力の 5 スロット, 6 スロット, 7 スロットの推定結果を Fig. 16, Fig. 17, Fig. 18 に示す。

5 スロットでは、起磁力 100 A の波高値を持つ磁気支持磁界で ± 0.45 mm のロータ位置制御域を持つことが分かった。6 スロットでは、起磁力 100 A の波高値を持つ磁気支持磁界により発生する x 方向と y 方向の磁気支持力の大きさが異なることが分かった。ロータ位置制御域は、 x 方向で ± 0.5 mm, y 方向で ± 0.4 mm であった。7 スロットでは、ロータが中心位置にある場合でも永久磁石磁界のみで y 方向に大きな負ばね力が発生することが分かった。また、この負ばね力によって磁気支持磁界により発生する x 方向と y 方向の磁気支持力の大きさも異なっていた。ロータ位置制御域は、 x 方向で ± 0.47 mm, y 方向で ± 0.51 mm であった。

3.3 回転トルク特性の推定結果

ロータが中心位置にあり回転制御磁界をコイルに励磁したときロータの回転角度位置において発生する x 方向, y 方向の磁気吸引力および軸方向回りの回転トルクの 5 スロット, 6 スロット, 7 スロットの推定結果をそれぞれ Fig. 19, Fig. 20, Fig. 21 に示す。

5 スロットと 7 スロットではトルクリップルは小さいが 6 スロットでは大きなトルクリップルを持って回転トルクが発生した。6 スロットはコギングトルクが大きいためであると考え。

5 スロットと 7 スロットの場合、回転制御磁界によ

りロータが一回転する間に径方向に大きな磁気吸引力が発生した。6 スロットでは、発生していなかった。5 スロットと7 スロットでは、回転制御磁界は径方向位置制御に干渉することが分かった。この原因は、 x 軸に非対称なステータ形状のためであると考えられる。

3.4 ステータスロット数の検討

ロータの一回転分の径方向の磁気支持性能の推定

Fig. 16 Controllable area of the rotor position in the radial direction of 5 slot type.

Fig. 17 Controllable area of the rotor position in the radial direction of 6 slot type.

Fig. 18 Controllable area of the rotor position in the radial direction of 7 slot type.

結果と回転トルク特性の推定結果から x 方向、 y 方向および軸方向回りのトルクそれぞれの平均値と振幅（半幅）をまとめた表として、磁気支持磁界を励磁した結果、回転制御磁界を励磁した結果を Table 1, Table 2 に示す。

磁気支持磁界を加えているときの平均の磁気支持力は3種類ともほぼ同じ大きさであった。磁気支持力の振幅は5 スロットが一番小さかった。また、干渉と形状から発生する回転トルクも5 スロットが一番小さかった。

Fig. 19 Estimated attractive force and torque of 5 slot type with rotation magnetic field.

Fig. 20 Estimated attractive force and torque of 6 slot type with rotation magnetic field.

Fig. 21 Estimated attractive force and torque of 7 slot type with rotation magnetic field.

Table 1 Attractive force and torque with levitation magnetic field.

Slot number	Attractive force in the radial direction [N/m]				Torque around the axial direction [Nm/m]	
	Average		Amplitude		Average	Amplitude
	x	y	x	y		
5	0	252	19	18	0	0.18
6	0	250	28	28	0	0.27
7	0	252	35	34	0	0.27

回転制御磁界を加えているときの平均の回転トルクは7スロットが一番大きく発生していた。スロット数が多いほど大きくなっていった。5スロットと7スロットは回転トルクの振幅が小さかった。また、5スロットと7スロットは干渉から大きな振幅を持つ径方向磁気吸引力が発生していた。

これらの結果と径方向の磁気支持性能の推定結果、回転トルク特性の推定結果から磁気支持磁界と回転制御磁界の干渉はあるものの5スロットが本ラジアル型セルフベアリングモータの小径化に適していると考えられる。径方向位置制御によりロータの径方向変位が小さければ径方向に使用する電力も少なく、磁気支持磁界による回転トルクへの干渉トルクも小さいと考える。また、スロット数が多くなるとそれぞれのスロットのコイルへの励磁を制御する駆動アンプの数も増加することと5スロット、6スロット、7スロットの各スロット間に巻くコイル巻き数を同じとすればコイル全抵抗も大きくなる。そのため、スロット数がより少ない方が良いと考える。

4 結言

小児用磁気浮上補助人工心臓に用いる世界最小の小径ラジアル型セルフベアリングモータの開発のため、ステータのスロット数の検討を行うため2次元静磁場解析を用いて径方向の磁気支持性能と回転トルク特性を推定した。ロータ永久磁石の極数4極のセルフベアリングモータで、回転制御用の4極磁界と磁気支持制御用の2極磁界を発生させる5スロット、6スロット、7スロットのステータを検討した。ロータの回転角度位置で発生する磁気支持力と回転トルクが変動すること、回転制御磁界と磁気支持制御磁界それぞれで磁気

Table 2 Attractive force and torque with rotation magnetic field.

Slot number	Attractive force in the radial direction [N/m]				Torque around the axial direction [Nm/m]	
	Average		Amplitude		Average	Amplitude
	x	y	x	y		
5	0	0	56	54	1.73	0.05
6	0	0	0	0	1.84	0.28
7	0	0	51	51	1.93	0.01

支持力と回転トルクに干渉すること、スロット数でそれらの特性が異なることを明らかとし、その結果、5スロットが本ラジアル型セルフベアリングモータの小径化に適しているとの結論を得た。

謝辞

本研究はJSPS科研費16K18044の助成を受けたものである。

参考文献

- [1] 許俊銳, 人工心臓開発の歴史と現状, 植込型補助人工心臓治療の社会基盤, 医学のあゆみ, Vol.239, No.3, pp.193-198, 2011.
- [2] 小沼, 浮田, 増澤, 人工心臓のための12突極ラジアル型磁気浮上モータにおける最適極数の検討, 日本 AEM 学会誌, Vol.20, No.1, pp.59-65, 2012.
- [3] 小沼, 増澤, 12 突極ラジアル型セルフベアリングモータの磁気支持特性の推定, 日本 AEM 学会誌, Vol.22, No.2, pp.88-95, 2014.
- [4] Hiroyuki ONUMA and Toru MASUZAWA, Evaluation of Magnetic Suspension Characteristics and Levitation Performance of A Centrifugal Blood Pump Using Radial Type Self-Bearing Motor, The 14th International Symposium on Magnetic Bearings, pp.174-179, 2014.
- [5] Hiroyuki ONUMA, Toru MASUZAWA and Michiko MURAKAMI, Development of radial type self-bearing motor for small centrifugal blood pump, The 15th International Symposium on Magnetic Bearings, S2C1-10116, 2016.
- [6] Wolfgang GRUBER and Siegfried SILBER, 20 years bearingless slice motor – its developments and applications, The 15th International Symposium on Magnetic Bearings, pp.91-98, 2016.
- [7] 大石, 出島, 岡田, 磁気浮上回転モータの研究, 日本機械学会論文集(C 編), Vol.58, No.556, pp.3695-3700, 1992.