

5 自由度能動制御型磁気浮上モータを用いた全人工心臓の開発

Artificial heart by use of a 5 DOF active controlled maglev motor

2151012



研究代表者

群馬大学大学院 理工学府
電子情報部門

准教授

栗田 伸 幸

[研究の目的]

重度の心疾患患者の救命を目的に、様々な心臓補助装置 (Ventricular Assist Device: VAD) が使用され始めている。国内外において臨床応用されている VAD のほとんどは左心室補助を目的にした左心室補助装置 (Left VAD, LVAD) である。しかしながら、LVAD を適用した患者の約 20% が後に右心室不全を患うという報告がなされている。この様な状況においても、両心室を補助・置換可能な人工心臓は臨床的にはまだ存在していないため開発が求められている。

上記の問題に対し、国内外で完全置換型人工心臓 (Total Artificial Heart: TAH), または両心室補助人工心臓 (Bi-VAD) の研究が行われている。Hassan らは 2 つの独立した血液ポンプを用いている。しかし、両 VAD からの流量を常に調整しなければならず、ポンプの回転速度調節のために手動での調整、または複雑な制御システムが必要になる。Kiyotake らはロータの半径方向を動圧軸受で制御し、軸方向を受動的に制御している。しかし、ロータの軸方向位置は循環系によって生成された圧力に依存して受動的に変位するため、左右心室に必要な血流量補償が難しい。

申請者らは、ロータの制御に磁気ベアリングを用いることで、両方のアウトレットからの血

流量を自動調整可能な TAH の開発に取り組んでおり、現在までに複数回の動物実験に成功した。しかし、磁気ベアリングとアキシアルギャップモータの吸引力の平衡点とロータの定常浮上位置を完全に一致させることが非常に困難であり、消費電力が増加するという問題があった。

そこで、上下のステータ形状を同一とすることで低消費電力な磁気浮上型血液ポンプの開発を目的として研究に取り組んだ。

[研究の内容, 成果]

本申請課題では、全人工心臓を実現するための方法として 5 自由度能動制御型磁気浮上モータを適用すること前提に研究を進めていた。しかし、軸方向と傾き方向を能動的に制御し、径方向は受動的に制御するタイプの磁気浮上モータでも全人工心臓に適用可能な性能を満たすことがわかってきたため、1. 5 自由度能動制御型磁気浮上モータと 2. ダブルステータ型アキシアル磁気浮上モータの 2 種類の磁気浮上モータの開発に取り組み、それぞれを人工心臓用血液ポンプに適用することを検討した。

1. 5 自由度能動制御型磁気浮上モータ

提案する 5 自由度能動制御型磁気浮上モータのロータは上下 2 枚のロータディスクとそれら

を連結するロータシャフトによって構成する。ロータディスクの内側表面にはバイアス磁束を発生させるリング状永久磁石を上下で2枚、ロータシャフト表面には永久磁石を4枚配置し、4極の磁界を発生する。ステータはアキシヤル磁気ベアリング用ステータと、セルフベアリングモータ用ステータを組み合わせることで構成する。内部スペースには、軸方向と径方向の変位を読み取るセンサを配置し、ロータの回転角度検出は、下部ロータディスクに円形に配置する永久磁石とホールセンサによって行う。

1.1 磁場解析による制御性能の確認

磁場解析モデルを図1、解析条件を表1に示す。解析モデルは、ロータとステータを含む装置全体である。ロータとステータ間のエアギャップは軸方向・径方向共に片側2.0 mmである。

ロータの変位は、可動範囲である0 mmから±1.8 mmまで0.9 mm刻み、また、制御電流は0 Aから±3.0 Aまで1.0 A刻みで解析を行った。アキシヤル磁気ベアリングの軸方向磁

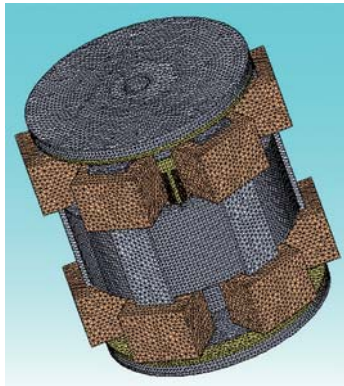


図1 5自由度能動制御型磁気浮上モータの有限要素法磁場解析モデル

表1 解析モデルの主要パラメータ

Material of rotor and stator	SUY-1
Permanent magnet	N48H
AMB coil	ϕ 0.4 mm×325 turn
RMB coil	ϕ 0.25 mm×200 turn
Motor coil	ϕ 0.25 mm×256 turn
Max mesh size	1.0 mm
Outer diameter of rotor	ϕ 60 mm
Height of rotor	70.8 mm

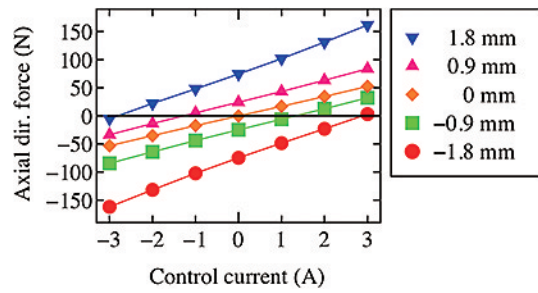


図2 軸方向力の磁場解析結果



図3 製作した5自由度能動制御型磁気浮上モータの試作機

気支持力の解析結果を図2に示す。ロータ変位0 mm時に17.6 N/A、変位±1.8 mm時に27.5 N/Aの力係数が得られた。これは、ロータが中心位置から変位すると上下どちらか一方のエアギャップが小さくなり力係数が増加するためである。そして、変位+1.8 mm時に-2.80 A、また、変位-1.8 mm時に2.88 Aの制御電流を用いることで負バネ力を相殺し、逆方向の磁気支持力を発生できることが分かった。ラジアル方向の支持力と回転トルクについても同様に解析を行い、十分な結果が得られたが、ここには記載しない。

1.2 製作した実験装置

磁場解析結果に基づき、実験装置を製作した。製作した実験装置の写真を図3に示す。今後、本実験装置を浮上回転制御し、動特性を明らかにする。さらに、血液ポンプに応用する。

2. ダブルステータ型アキシヤル磁気浮上モータ

提案するダブルステータ型アキシヤル磁気浮上モータを用いた磁気浮上ポンプの概略図を図

4に示す。また、主要なパラメータを表2に示す。ポンプケーシングは右心と左心用に、インレットとアウトレットを2組配置する。上下のロータディスクはシャフトで接続されており、内側にインペラを配置する。ロータは仕切り板を挟んで接続することで、右心用インレット (RVAD Inlet) と左心用インレット (LVAD Inlet) から流入した血液が容易には混ざり合わない構造となっている。ステータに電流を流すことでケーシング内のロータインペラが浮上回転し、ポンプとして動作する。磁気浮上モータはダブルステータ型の構造とすることで、小

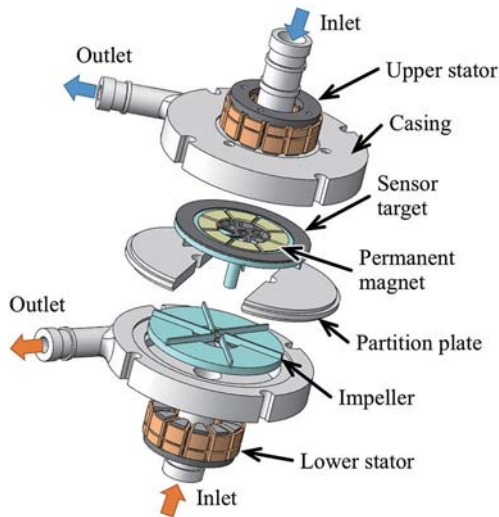


図4 ダブルステータ型磁気浮上モータを用いた血液ポンプの概略図

表2 ダブルステータ型アキシヤル磁気浮上モデルの主な寸法

Rotor	
Outer diameter (Rotor disk, PM)	ϕ 45 mm
Inner diameter (Rotor disk, PM)	ϕ 27 mm
Rotor disk thickness	2 mm
PM thickness	1 mm
PM grade	N48H
Sensor target outer diameter	ϕ 67 mm
Sensor target inner diameter	ϕ 50 mm
Sensor target thickness	1 mm

Stator	
Stator outer diameter	ϕ 45 mm
Stator inner diameter	ϕ 27 mm
Stator pole height	16 mm
Stator base height	3 mm
Number of winding A	50 turns/pole
Number of winding B	100 turns/pole

型ながらも高い制御性能と回転トルクを得ることができる。扁平なロータディスクを二つのステータの間に位置し、ロータには上下に永久磁石を8枚ずつ配置する。ステータは12極の突極を有し、それぞれの突極には2種類 (ロータの傾き制御用コイル, 回転制御及びアキシヤル軸方向変位制御用コイル) の集中巻コイルを施している。下側のコイルはロータの傾き制御用コイル, 上側のコイルは回転制御及びアキシヤル軸方向変位制御用コイルである。ロータは、上部ステータおよび下部ステータにより発生するアキシヤル方向吸引力を釣り合わせることで支持される。ロータの軸方向位置, 回転および径方向軸まわりの傾きを能動的に制御し、径方向位置は受動的に支持する。

2.1 試作機の浮上性能評価

製作した実験装置の磁気浮上制御性能を明らかにするために空気中でインパルス応答の確認を行った。ロータを上下ステータの中央位置で安定に磁気浮上制御した状態でロータが約0.1 mm 変位するインパルス外乱を印加したとき、軸方向変位 z と傾き θ_x, θ_y をそれぞれ測定しプロットした。測定結果を図5に示す。ロータの変位が最大値の $\pm 5\%$ 以内に収束するまでに要した時間は約0.0142 sec と短く、高い速応性を有することを明らかにした。また、軸方向に

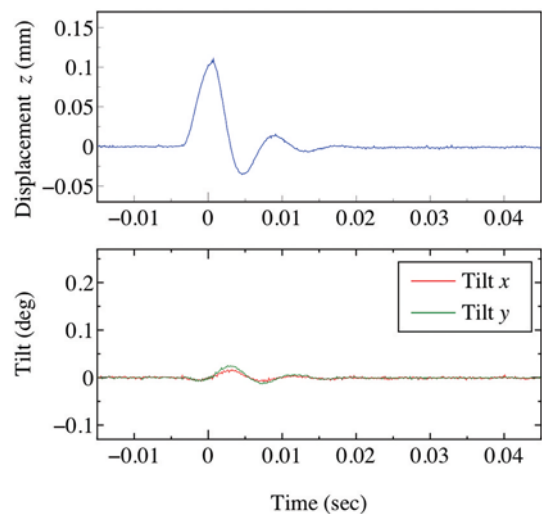


図5 ダブルステータ型アキシヤル磁気浮上モータのインパルス応答測定結果

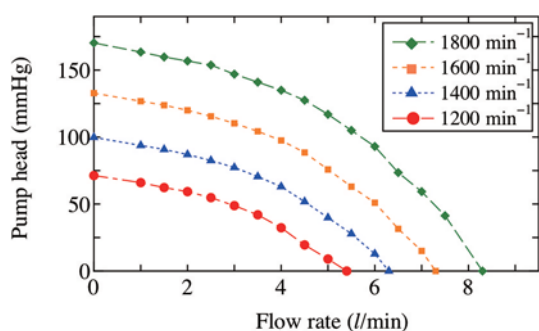


図6 ダブルステータ型アキシヤル磁気浮上モータを用いた磁気浮上ポンプの流量特性

外乱が印加されたときに半径方向の傾き、にはほとんど影響を与えていないことを確認した。

結果は省略するが、同様に傾き方向に外乱を印加した場合の応答も測定した。良好な速応性と傾き制御の独立性を確認した。

2.2 ポンプ試験結果

ダブルステータ型アキシヤル磁気浮上モータを血液ポンプに応用し、そのポンプ特性を確認した結果を図6に示す。一方のポンプを完全に開放した状態で、もう片方のポンプの特性を調べた。回転数 1800 min^{-1} のときに 100 mmHg , 5.5 L/min を達成し、本血液ポンプが両心室補助可能な性能を有することを明らかにした。

しかしながら、体内埋め込みを考慮した場合、モータの消費電力が大きいことが問題となる。今後、モータの低消費電力化に取り組む。

[今後の研究の方向、課題]

今後は、5自由度能動制御型磁気浮上モータを磁気浮上制御し、磁気浮上モータとしての性能を評価する。その後、ポンプハウジングを製作し、磁気浮上ポンプを製作する。そして、ポンプ試験を行い、磁気浮上ポンプとしての性能を評価する。一方、ダブルステータ型アキシヤル磁気浮上モータについては、さらなる高性能

化のために、モータ形状・インペラ・ハウジング形状の最適化を行う。さらに、両磁気浮上ポンプのハウジングとインペラ等血液に触れる部分をチタン合金で製作し、血液適合試験を行う。

[成果の発表、論文等]

国内会議論文集

1. 齊藤直希, 栗田伸幸, 石川赴夫, “ダブルステータ型アキシヤルセルフベアリングモータを用いたクロズドインペラ型磁気浮上ポンプ,” 第14回「運動と振動の制御」シンポジウム論文集, pp. 293-296 (2015)
2. 齊藤直希, 栗田伸幸, 石川赴夫, “両心室補助人工心臓用巻線分割型アキシヤル磁気浮上モータの浮上特性,” 第25回 MAGDA コンファレンス論文集, Paper No. OS-02-7 (2016)
3. 鎌田隼人, 栗田伸幸, 石川赴夫, “5自由度能動制御型セルフベアリングモータの提案,” 第28回「電磁力関連のダイナミクス」シンポジウム講演論文集, Paper No. 20A5-4 (2016) 他6件

国際会議プロシーディングス

1. Nobuyuki Kurita, Takeo Ishikawa, and Hayato Kamata, “Magnetically Levitated Motor with Five Actively Controlled Degrees of Freedom,” Proceedings of ICEMS2016, Paper No. DS6G-3-4 (2016)
2. Nobuyuki Kurita, Takeo Ishikawa, Naoki Saito, Toru Masuzawa, “Basic design of the maglev pump for total artificial heart by using double stator type axial self-bearing motor,” Proceedings of the 15th ISMB, pp. 509-514 (2016) 他5件

査読付き論文

1. Nobuyuki Kurita, Takeo Ishikawa, Naoki Saito, Toru Masuzawa, “A double sided stator type axial self-bearing motor development for left ventricular assist devices,” Int. of AEM, Vol. 52, pp. 199-206 (2016)
2. Nobuyuki Kurita, Takeo Ishikawa, Genri Suzuki, “Development of the two-pole type shaded pole self-bearing motor,” Materials Science Forum, Vol. 856, pp. 196-201 (2016) 他1件