

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 29 年 6 月 15 日現在

機関番号：12301

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2014～2016

課題番号：26820071

研究課題名(和文)ダブルステータ型アキシヤル磁気浮上モータを用いた両心室補助人工心臓

研究課題名(英文)Bi-ventricular assist device using double-side stator type axial magnetic levitation motor

研究代表者

栗田 伸幸(Kurita, Nobuyuki)

群馬大学・大学院理工学府・准教授

研究者番号：60435493

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,100,000円

研究成果の概要(和文)：ダブルステータ型アキシヤル磁気浮上モータの開発と、開発したモータを用いた遠心型血液ポンプの開発を行った。まず、提案する磁気浮上モータの開発を行い、開発した磁気浮上モータが人工心臓に適用可能な性能を有することを明らかにした。次に、両心室補助人工心臓ポンプの開発に取り組み、開発した磁気浮上モータをベースに、ポンプ全体の設計と製作を行った。そして、製作した磁気浮上ポンプが、揚程 100 mmHg のとき、流量 5.8 L/min (回転数 1800 r/min) の流量特性を有することを確認した。これにより、製作した磁気浮上ポンプが両心室補助可能なポンプ性能を有することを明らかにした。

研究成果の概要(英文)：We have developed a double stator type axial magnetic levitation motor and developed a centrifugal type blood pump using the developed motor. Firstly, we developed the proposed magnetic levitation motor and clarified that the magnetic levitation motor has the performance applicable to the ventricular assist device. Next, we developed bi-ventricular assist artificial heart pumps. The prototype was designed and fabricated based on the magnetic levitation motor. Then, we confirmed that the produced magnetic levitation pump had a flow rate of 5.8 L/min and a head of 100 mmHg (rotation number 1800 r/min). As a result, we clarified that the magnetic levitation pump produced has pumping capability that can support both ventricles.

研究分野：メカトロニクス

キーワード：磁気浮上モータ 磁気ベアリング 人工心臓 心室補助装置

1. 研究開始当初の背景

重度の心臓疾患患者の救命・延命を目的に様々な種類の連続流式血液ポンプが使用されはじめている[1]。多くの心室補助装置(Ventricular Assist Device: VAD)は左心室補助を目的に開発が行われているが、左心室不全患者の約30%が後に右心室不全を患うという報告がなされている[2]。しかし、両心室を補助・置換できる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。

- [1] Mark S. Slaughter, Joseph G. Rogers, et. al., “Advanced Heart Failure Treated with Continuous Flow Left Ventricular Assist Device”, N Engl J Med, Vol. 361, No. 23, pp. 2241-2251 (2009).
- [2] Evgenji V. Potapov, Antonio Loforte, Yuguang Weng, et. al., “Experience with over 1,000 implanted Ventricular Assist Devices”, J Card Surg, Vol. 23, No. 3, pp. 185-194 (2008)

2. 研究の目的

重度の心臓疾患患者の救命・延命のために人工心臓用血液ポンプを開発することを目的とする。まず人工心臓に適用可能な磁気浮上モータを開発する。次に、磁気浮上モータを適用した遠心型血液ポンプを開発する。提案する血液ポンプはロータの両側にインペラを配置することで、1つのアクチュエータで両心室を補助することができるという特徴を持つ。

3. 研究の方法

提案する磁気浮上モータの概略図を図1に示す。本磁気浮上モータは片側に2極の永久磁石を持つロータを、8突極を有するステータで挟み込む構造とする。軸方向に配置した変位センサによりロータの軸方向変位と傾きを検出し、ステータ突極間に配置したエンコーダによりロータの回転速度と角位置を検出する。検出した信号をフィードバックすることにより、回転トルク・軸方向変位・傾きを能動的に制御する。安定な磁気浮上回転制御を達成するために、有限要素法磁場解析により、永久磁石・ステータ形状・コイル巻数などを詳細に検討する。また、磁場解析結果に基づいて、3次元CADソフトを用いて目標サイズを満たす実験装置を設計する。

実験装置の製作と並行して制御器の設計を行う。磁場解析結果を元に磁気浮上モータの数値モデルを作成し、数値解析ソフトを用いて動特性のシミュレーションを実施する。

試作機が完成し次第、制御器を実装し、磁気浮上回転制御を実施し、試作機の静特性・動特性を測定することで、磁気浮上モータとしての基本性能を明らかにする。

製作した試作機を血液ポンプに改造する。ロータの上下にRVAD用・LVAD用のインペラを取り付ける。そして、インペラ全体をポ

ンプケーシングにより覆う構造とする。試作機が完成し次第、水中における磁気浮上制御を実施して試作機の血液ポンプとしての性能を明らかにする。

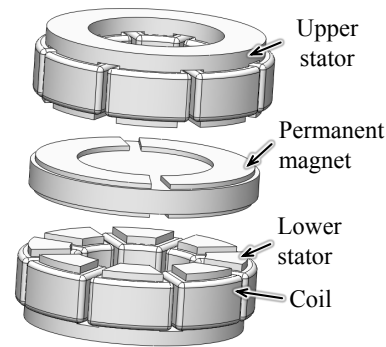


図1: 磁気浮上モータの概略図

4. 研究成果

(1) 実験装置 磁場解析結果を元に実験装置を設計・製作した。主要な寸法を表1に示す。実験装置の寸法は体内埋込型全人口心臓に適用可能なサイズを目的にロータ外径φ67mm、高さ67mmとした。また、ロータとステータのエアギャップは3mmである。

また、図2に製作した実験装置の写真を示す。ステータは12突極を有し、それぞれに2種類の巻線(巻線A:3相8極,巻線B:2相6極)を施してある。図3はロータの上面図である。8極の永久磁石をロータヨークに取り

表1: 製作した磁気浮上モータの主な寸法

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

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

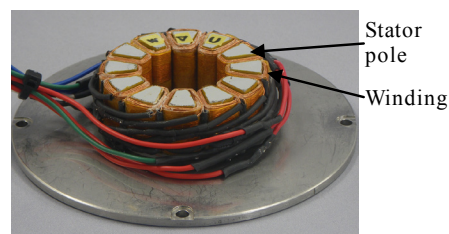


図2: 製作したステータ

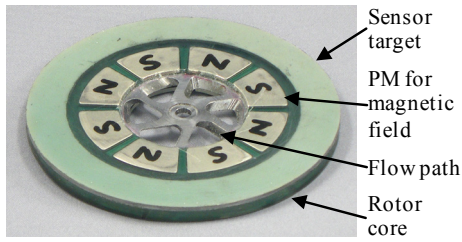


図 3: 製作したロータ (上部)

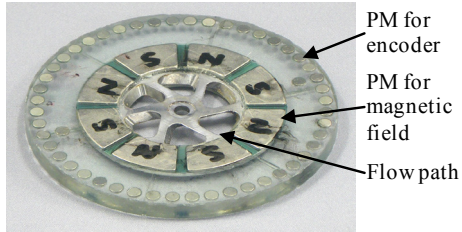


図 4: 製作したロータ (下部)

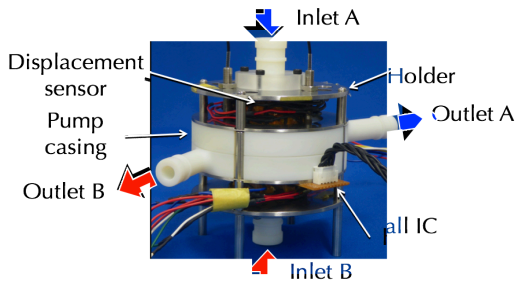


図 5: 製作した磁気浮上ポンプ

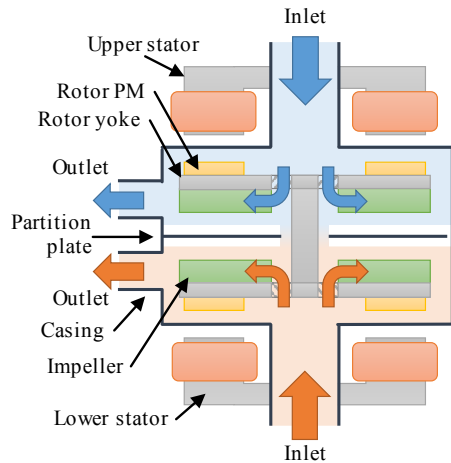


図 6: 磁気浮上ポンプの流路の概略図

付けた。そして、センサターゲットを外周に配置した。図 4 はロータの下面図である。 $\phi 3 \text{ mm}$ の永久磁石を配置し、Hall IC により磁極を検出することでロータの角度を算出する。

図 5 に製作した磁気浮上ポンプを示す。ポンプケーシングの製作は 3D プリンタを用いた。ポンプケーシング内にはロータのみが配置される。ステータやセンサはケーシングの外部に配置した。

また、図 6 に流路の概略図を示す。流体は上下のインレットからポンプ内部に流れ込む。そして、ロータヨークに空けられた流路を通り、ロータの内側に流入する。そして、ロータ・インペラの回転により加速され、アウトレットから流出する。上部ポンプチャンバと下部ポンプチャンバは仕切り板により隔てられ、容易には混じり合わない構造となっている。

(2) 実験結果 製作した磁気浮上モータの浮上制御特性を確認するために、空気中におけるインパルス外乱応答を測定した。図 7 は軸方向に外乱を印加した場合、図 8 は傾き方向に外乱を印加した場合の結果である。どちらの場合も、外乱を印加した後に、振動振幅が最大値の 5% 以下に収まるまでに要した時間は 0.01 sec 程度と短く、速応性がよいことが明らかになった。また、軸方向位置制御と傾き制御は互いに独立であり、干渉がないことを明らかにした。

さらに、結果は省略するが、 0 min^{-1} から 4800 min^{-1} までの範囲で浮上回転制御を行った際の振動振幅特性を確認した結果、全速度域で安定に浮上制御できていることも明らかにした。

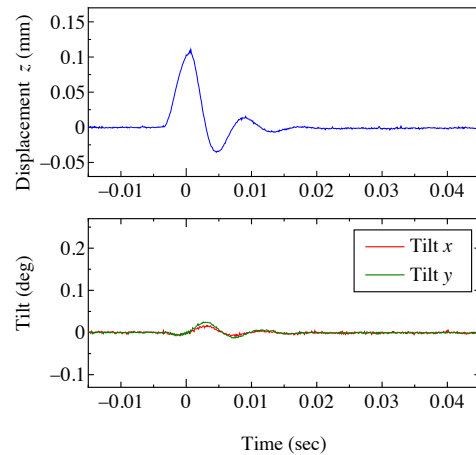


図 7: インパルス外乱応答 (軸方向外乱)

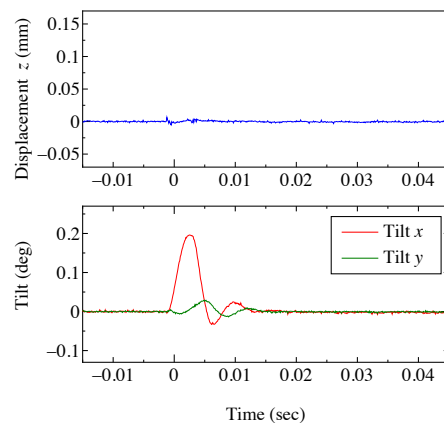


図 8: インパルス外乱応答 (傾き方向外乱)

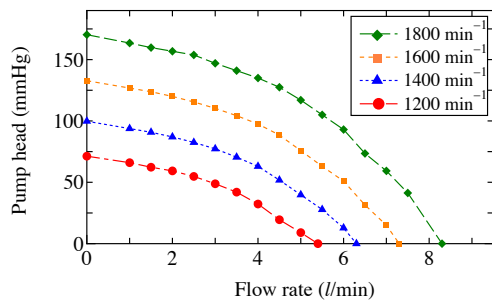


図9: 磁気浮上ポンプの流量特性

製作した磁気浮上ポンプの流量特性を確認した。片側のポンプを完全に開放した状態で、もう一方のポンプを測定した。測定は 1200 min^{-1} 、 1400 min^{-1} 、 1600 min^{-1} 、 1800 min^{-1} について行った。結果を図9に示す。最大揚程・流量は、 170 mmHg 、 8.3 l/min (1800 min^{-1})であった。また、揚程 100 mmHg における流量は 5.7 l/min (1800 min^{-1}) であり、左心補助に必要な条件 (5 l/min 、 100 mmHg) を満たす性能が得られたこと明らかにした。

5. 主な発表論文等

[雑誌論文] (計4件)

1. Nobuyuki Kurita, Takeo Ishikawa, Naoki Saito, Toru Masuzawa, “A double sided stator type axial self-bearing motor development for left ventricular assist devices,” International Journal of Applied Electromagnetics and Mechanics Vol. 52, pp. 199-206 (2016) (査読有)
2. Takeo Ishikawa, Shota Mizuno, Nobuyuki Kurita, “Characteristics of a Permanent Magnet Synchronous Machine Designed by a Topology Optimization Method,” Materials Science Forum, Vol. 856, pp 172-177 (2016) (査読有)
3. 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) (査読有)
4. Nobuyuki Kurita, Takeo Ishikawa, Hiromu Takada, Genri Suzuki, “Proposal of a Permanent Magnet Hybrid-type Axial Magnetically Levitated Motor,” IEEJ Journal of Industry Applications, Vol. 4, No. 4 p. 339-345 (2015) (査読有)

[国際学会発表] (計9件)

1. 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)
2. Nobuyuki Kurita, Jun Mohara, Takeo Ishikawa, Naoki Saito, “A magnetically levitated left ventricular assist device,”

Proceedings of the 2nd International symposium of Gunma University Medical Innovation, Paper No. P20 (2015)

3. Nobuyuki Kurita, Takeo Ishikawa, Naoki Saito, Toru Masuzawa, “A Double side Stator type Axial Self-bearing Motor Development for the Left Ventricular Assist Device,” Proceedings of The 17th ISAEM, Paper No. 1P2-A-3 (2015)
4. Nobuyuki Kurita, Takeo Ishikawa, Genri Suzuki, “Proposal of the two-pole type shaded pole self-bearing motor,” Proceedings of JAPMED'9, pp. 77-78 (2015)

他5件

[学会発表] (計9件)

1. 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)
2. 齊藤 直希, 栗田 伸幸, 石川 赴夫, “ダブルステータ型磁気浮上モータを用いた磁気浮上ポンプの諸特性評価,” 平成28年電気学会 栃木支所・群馬支所合同研究発表会論文集, Paper No. ETG-16-79 (2016)
3. 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磁気浮上ポンプの提案,” 平成27年電気学会産業応用部門大会論文集, Paper No. Y-120 (2015)
4. 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ー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)

他5件

[図書] (計0件)

[産業財産権]

○出願状況 (計0件)

○取得状況 (計0件)

[その他]

ホームページ等

<https://sites.google.com/gunma-u.ac.jp/nkurita/>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

栗田 伸幸 (Nobuyuki Kurita)

群馬大学・大学院理工学府・電子情報部門・准教授

研究者番号：60435493