

令和 2 年 7 月 3 日現在

機関番号：12301

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2017～2019

課題番号：17K06223

研究課題名（和文）単一ロータで両心を補助または置換可能な人工心臓用磁気浮上血液ポンプの開発

研究課題名（英文）Development of a maglev blood pump for a total artificial heart which can assist or replace both hearts with a single rotor

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） 3,600,000円

研究成果の概要（和文）：一般に人工心臓とは左心室補助装置を指し、左心室の補助を目的に設計されているが、本研究では単一のロータで両心を補助または置換可能な人工心臓の開発に取り組んだ。本研究では主に磁気浮上型のポンプを研究開発を行った。製作した磁気浮上ポンプは、回転数 1800 r/minにおいて、揚程 100 mmHg、流量 5.8 L/min を達成し、両心室補助可能なポンプ性能を有することを明らかにすることができた。

研究成果の学術的意義や社会的意義

一般的な人工心臓は左心室の補助を目的としている。しかし、左心室と右心室の両心が不全な患者も少なくない、そこで本研究では左心室と右心室の両方を1つの人工心臓で補助または置換することを目的とした。ポンプ特性試験を行い、製作した磁気浮上ポンプが両心室を補助可能な性能を有することを明らかにした。また、高性能な人工心臓開発への取り組みは、重症心不全患者の生活の質の向上に直結するため、社会的意義も高い。

研究成果の概要（英文）：Generally, the artificial heart refers to the left ventricular assist device, designed to assist the left ventricle. In this study, however, we worked on the development of an artificial heart that can support or replace both ventricular with a single rotor. In this research, we mainly researched and developed a magnetic levitation pump. We clarified that the manufactured magnetic levitation pump achieved a pumping capacity of 100 mmHg and a flow rate of 5.8 L/min at a nominal rotation speed of 1800 r/min. We clarified the pump could support both ventricles.

研究分野：自動制御，パワーエレクトロニクス，医用工学

キーワード：磁気浮上モータ 磁気浮上ポンプ 人工心臓

様式 C-19、F-19-1、Z-19（共通）

1. 研究開始当初の背景

重度の心臓疾患者の救命・延命を目的に様々な種類の連続流式血液ポンプが臨床に広く使用されている^[1]。現在使用されているほぼすべての人工心臓は、左心室の補助を目的に設計・開発が行われているため、特に左心室補助装置（Left Ventricular Assist Device, LVAD）と呼ばれている。そして近年、LVADの信頼性は向上し、使用期間が延長化している。LVADの長期使用に伴い、LVADを適用した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きた^[2]。しかし、両心室を補助するためにはLVADを2台使用する必要があるが、(i) サイズが大きくなり体内への埋め込みが難しいこと、(ii) 2回目の人工心臓埋め込み手術というリスクがあること、(iii) 循環系の中に2つの独立したポンプを入れるため、流量調整が難しいことなど、多くの問題点がある。両心室を補助または置換可能な全人工心臓は、この問題を解決することができると思われるが、このよう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。

2. 研究の目的

重度の心臓疾患者の救命・延命のために両心室を補助または置換することが可能な人工心臓用血液ポンプを開発することを目的とする。本研究で提案する磁気浮上ポンプはディスク形状のロータの両面に、左心室用と右心室用のインペラを装備することにより、単一ロータで両心室を補助することができるという特徴がある。この磁気浮上ポンプを実現するために、まずは磁気浮上モータを開発し、その後、磁気浮上モータをポンプに応用し、磁気浮上ポンプを開発する。

3. 研究の方法

(1) 磁気浮上モータの構造

図1に磁気浮上モータの概略図を示す。片側のステータは12極の突極をもち、同形状のステータでロータを挟み込む構造としている。1つのステータは2種類の独立した巻線A、Bを有しており、巻線Aがロータの傾き(θ_x, θ_y)を制御し、巻線Bがロータの軸方向変位(z)と回転(θ_z)を制御する。

(2) 磁気浮上ポンプの構造

磁気浮上モータを用いて、全人工心臓への応用のための磁気浮上ポンプを設計・製作した。図2に設計した磁気浮上ポンプの概略図を示す。ポンプケーシングの製作には3Dプリンタを用いた。ケーシング内には磁気浮上モータのロータのみを封入する。モータのステータ、変位センサ、角度検出用のホールセンサはポンプケーシングの外部に配置した。ポンプのインレットはステータの中央の穴を通過する。ポンプのアウトレットは上下のステータの間にある。インレットから流入した流体はロータディスクの流路孔を通過し、2枚のロータディスクの内側に設置したインペラにより加速され、アウトレットから流出する。上部と下のポンプケーシング内の流体は仕切板によって隔離し、上下の流体の混合量を減らす。提案する磁気浮上ポンプには、左心用と右心用に2組のインレットとアウトレットがある。そして、人体に応用する場合には、左心室に必要な血圧の平均値 100 mmHg と右心室に必要な血圧の平均値 25 mmHg の圧力を生み出す必要があるため、左右のインペラの形状を所定の血圧に合わせて設計する必要がある。しかし、本装置では、簡単のため左右のインペラの形状を同じにした。

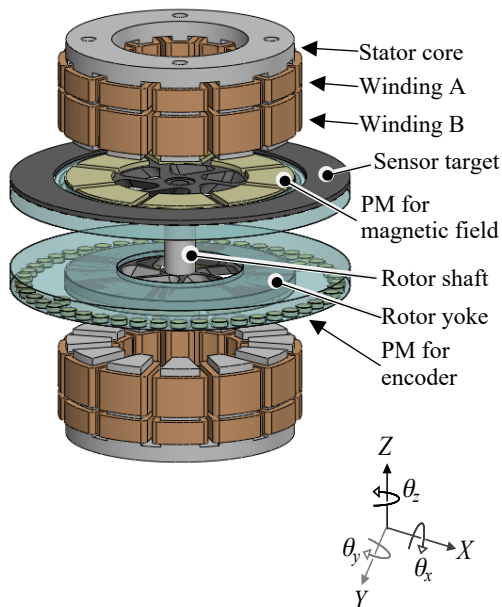


図1 提案する磁気浮上モータの概略図

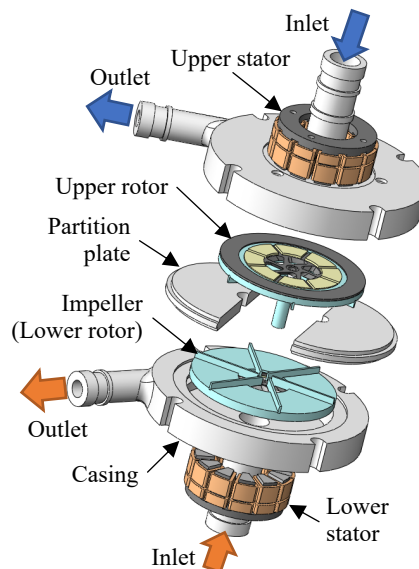


図2 提案する磁気浮上ポンプの概略図

4. 研究成果

(1) 磁気浮上回転特性

磁気浮上回転特性を明らかにするために、空気中と水中において振動振幅を測定した。渦電流式変位センサにより軸方向の変位と傾きを測定し、レーザ変位計により径方向の変位を測定した。回転速度は、 0 min^{-1} から 4000 min^{-1} まで 100 min^{-1} ずつ段階的に上げた。それぞれの回転数においてロータが定常速度に達した後、ロータの振動振幅を記録した。図3と図4は、それぞれ空気中と水中での測定結果を示している。

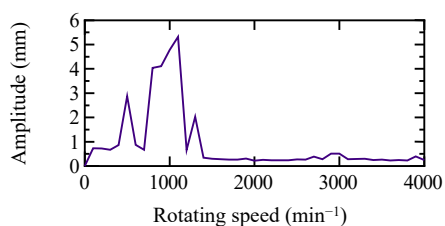
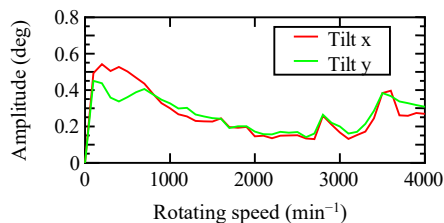
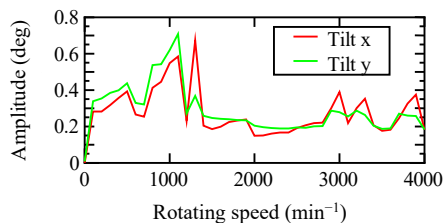
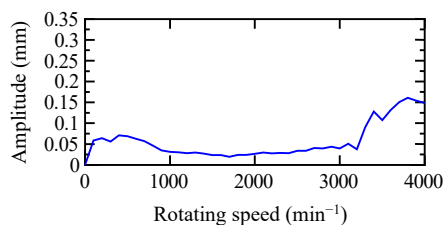
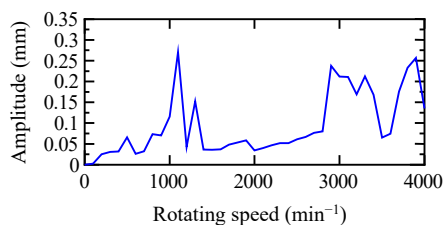


図3 空気中における振動振幅特性

図4 水中における振動振幅特性

図3では、 3000 min^{-1} より速い回転速度において、軸方向および傾きの動きの振幅が大きくなっています。また、図3(c)において、半径方向のパッシブ制御の復元力剛性が弱いため、 1000 min^{-1} の低回転速度で半径方向の回転子軌道が大幅に増加した。本ロータの質量は 98 g である。一方、シミュレーションにより得られた半径方向のパッシブ剛性は 0.96 N/mm である。したがって、共振周波数は 15.75 Hz となり、これは回転速度で表すと 945 min^{-1} となる。共振周波数の計算値は、測定値とよく一致している。ロータはこの回転数において径方向に非常に強く振動するため、半径方向だけでなく、軸方向や傾斜方向にも振動の影響が見られる。図4では、ポンプケーシングを取り付け、ケーシング内部を水で満たした状態で同様の実験を行った。ケーシングを取り付けたため、径方向の変位は測定できなかった。しかし、空気中における測定結果で顕著であった、 1000 min^{-1} および 3000 min^{-1} における振動振幅の増加は観測されなかった。これは、液体（水）の粘度がロータの振動を減衰させたからであると考えられる。以上により、本磁気浮上モータは、水中（または血液中）において動作することにより、受動安定制御を行っている径方向の振動振幅が低減し、軸方向と傾き方向の制御も安定的に磁気浮上回転制御できることを明らかにした。

次に、ポンプ特性を測定した。磁気浮上ポンプのロータ/インペラを回転させると、2つのインレットから水が流入し、それぞれのアウトレットから排出される。片側のアウトレットを完全に開放し、もう片側のアウトレットの流量と揚程を測定した。実験結果を図5に示す。実験は4種類の速度（ $1200, 1400, 1600, 1800 \text{ min}^{-1}$ ）で行った。最大圧力水頭および流量は、 1800 min^{-1} のときに得られ、それぞれ約 170 mmHg および 8.3 L/min であった。 100 mmHg の圧力ヘッドに対する流量は、回転数 1800 min^{-1} において、 5.7 L/min であった。左心室の生理的循環に必要な設計条件（ 5 L/min , 100 mmHg ）を達成可能であることを明らかにした。

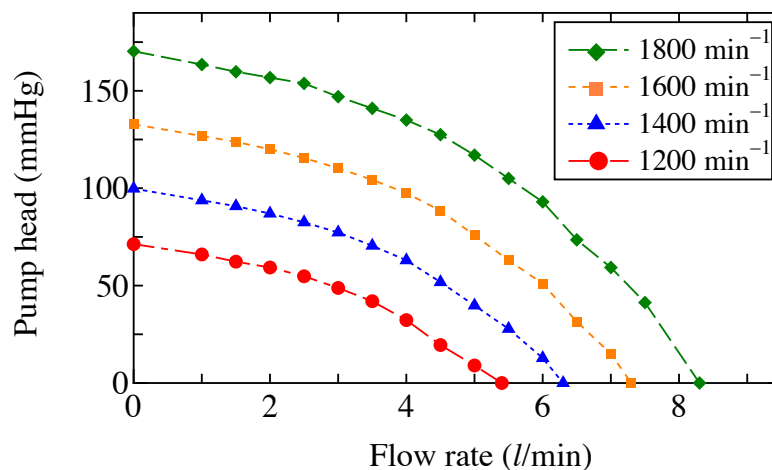


図5 磁気浮上ポンプのポンプ性能曲線

<引用文献>

- [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, Yuguo Weng, et. al., “Experience with over 1,000 implanted Ventricular Assist Devices”, J Card Surg, Vol. 23, No. 3, pp. 185-194 (2008)

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計3件（うち査読付論文 3件/うち国際共著 1件/うちオープンアクセス 0件）

1. 著者名 Kurita Nobuyuki, Kamada Hayato, Ishikawa Takeo	4. 巻 59
2. 論文標題 Analysis and basic design of the magnetically levitated motor with five actively controlled degrees of freedom	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 International Journal of Applied Electromagnetics and Mechanics	6. 最初と最後の頁 549 ~ 555
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3233/JAE-171094	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Kurita Nobuyuki, Ishikawa Takeo, Saito Naoki, Masuzawa Toru, Timms Daniel Lee	4. 巻 55
2. 論文標題 A Double-Sided Stator Type Axial Bearingless Motor Development for Total Artificial Heart	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 IEEE Transactions on Industry Applications	6. 最初と最後の頁 1516 ~ 1523
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1109/TIA.2018.2884609	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する

1. 著者名 中村 拓海, 栗田 伸幸, 石川 赴夫	4. 巻 25
2. 論文標題 磁気浮上型水力発電機に適用する低消費電力渦電流式センサの開発	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 日本AEM学会誌	6. 最初と最後の頁 230-235
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) https://doi.org/10.14243/jsaem.25.230	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

〔学会発表〕 計9件（うち招待講演 2件/うち国際学会 6件）

1. 発表者名 一場雄太, 栗田伸幸, 石川赴夫, 高橋洋平
2. 発表標題 磁気浮上搬送装置の提案
3. 学会等名 第27回MAGDAコンファレンス
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Nobuyuki Kurita, Walter Bauer, Gerald Jungmayr, Wolfgang Gruber and Wolfgang Amrhein
2. 発表標題 Analysis and Design of a Bearingless Axial- Force/Torque Motor with Flex-PCB Windings
3. 学会等名 The 2018 International Power Electronics Conference (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Nobuyuki Kurita, Takeo Ishikawa, Naoki Saito, Toru Masuzawa, Daniel Timms
2. 発表標題 A Double-Sided Stator type Axial Self-bearing Motor Development for Total Artificial Heart
3. 学会等名 The 1st Mechanical Circulatory Support Symposium (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Nobuyuki Kurita, Tomonobu Abe, Yaxin Wang and, P. Alex Smith
2. 発表標題 Magnetic levitation to improve hemocompatibility of a minimally invasive left ventricular assist device for early intervention
3. 学会等名 5th International Symposium on Gunma University Medical Innovation (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Nobuyuki Kurita, Takeo Ishikawa, Naoki Saito, Toru Masuzawa, Daniel Timms
2. 発表標題 A double-sided stator type axial self-bearing motor development for total artificial heart
3. 学会等名 IEEE International Electric Machines and Drives Conference (IEMDC), 2017 (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 Nobuyuki KURITA, Hayato KAMADA, Takeo ISHIKAWA
2. 発表標題 Analysis and Basic Design of the Magnetically Levitated Motor with Five Actively Controlled Degrees of Freedom
3. 学会等名 18th International Symposium on Applied Electromagnetics and Mechanics (ISEM), 2017 (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 Nobuyuki Kurita, Jun Mohara, Takeo Ishikawa, Kamada Hayato
2. 発表標題 Magnetically levitated artificial heart that can assist or replace bi-ventricular with a single rotor
3. 学会等名 4th International Symposium of Gunma University Medical Innovation (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 茂木 拓夢, 栗田 伸幸, 石川 赴夫
2. 発表標題 磁気浮上型水力発電機の回生回路の特性試験
3. 学会等名 平成29年度第8回栃木・群馬支所合同研究発表会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 一場雄太, 栗田伸幸, 石川赴夫
2. 発表標題 磁気浮上型搬送装置の検討
3. 学会等名 平成29年度第8回栃木・群馬支所合同研究発表会
4. 発表年 2018年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
--	---------------------------	-----------------------	----