

令和 3 年 6 月 17 日現在

機関番号：12101

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2016～2020

課題番号：16K18036

研究課題名(和文)磁気浮上・流体機械システム融合による小児用人工心臓用磁気浮上モータの超小型化

研究課題名(英文)Miniaturization of magnetically suspended motor integrated with blood pump for pediatric ventricular assist device

研究代表者

長 真啓(Osa, Masahiro)

茨城大学・理工学研究科(工学野)・助教

研究者番号：30735105

交付決定額(研究期間全体):(直接経費) 3,400,000円

研究成果の概要(和文):小児心不全治療には対外設置型拍動流式補助人工心臓に頼らざるを得ず、優れた血液適合性を有する体内植え込み可能な連続流式補助人工心臓が切望される。本課題では、ダブルステータ構造を有するアキシアル型5軸制御磁気浮上モータを用いた連続流式小児用人工心臓を提案し、血液ポンプ駆動時の流体粘性や流体力を積極的に活用した磁気浮上系のインペラダイナミクスを構築して磁気浮上モータの超小型化に挑戦した。具体的に、外径22mm、高さ35mmのモータで運動システム同定を行った。磁気支持力の理論計算、三次元磁場解析を基に外径20mm、高さ34.6mmまでモータを小型化し、非接触ポンプ駆動に十分な支持力とトルクを確認した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

体格の小さな小児の体内植え込みに供せる連続流式補助人工心臓の研究開発における技術的障壁は、高い耐久性と血液適合性を有するインペラ支持機構(軸受機構)の実現と超小型化である。本研究で開発した磁気浮上モータは、インペラ姿勢のすべてを能動的に完全非接触で支持可能な特徴を有する。本課題を通じ、10ccサイズの磁気浮上モータを用いて、ポンプの非接触駆動の実現可能性を示すことができた。人工心臓用磁気浮上モータの小型化に関する限界と課題を追求することで、世界に先駆けて体内植え込み型の小児用人工心臓の早期実現へ貢献することができる。

研究成果の概要(英文):This study investigated miniaturization of 5 degrees of freedom controlled magnetically levitated motor which has double stator structure for a continuous flow pediatric ventricular assist device. Impeller dynamics considering a fluid damping and a fluid thrust force during pump operation was established to determine design specifications of magnetic suspension force for impeller suspension with a miniaturized maglev motor. The miniaturized maglev motor which has 20 mm in diameter and 34.6 mm in total height was designed and fabricated based on theoretical calculation and three-dimensional FEM analysis. The developed motor demonstrated sufficient suspension force and rotating torque for pump operation for pediatric circulatory support.

研究分野：機械力学・制御

キーワード：磁気浮上モータ 5軸制御 小児用人工心臓 小型化 インペラダイナミクス

1. 研究開始当初の背景

重篤な心不全患者の心臓移植の代替治療として連続流式補助人工心臓が臨床応用されている。しかし、解剖学的制限から既存の補助人工心臓は 10 歳以上の患者にのみ適用可能であり、乳幼児、体格の小さな小児用の補助人工心臓は未だ実現されていない。このため、小児心不全治療には、体外設置型の拍動流式補助人工心臓である EXCOR pediatric のみが臨床応用されている。拍動流式ポンプの課題として、血液鬱滞による血栓形成、送脱血管刺入部の感染症リスクがあることから、2010 年に米国の国立心臓呼吸器血液研究所が PumpKIN (Pump for Kids, Infants, and Neonates) プログラムを実施し、連続流式埋め込み型補助人工心臓である PediaFlow VAD (体積 13 cc)、Pediatric Jarvik 2000 (現在の Jarvik 2015 : 体積 15 cc) の研究開発のサポートが開始された。PediaFlow VAD は磁気浮上型を採用しているが、インペラの軸方向 1 軸のみを能動制御し、非制御軸を永久磁石軸受により受動的に支持するため、体動外乱や人工心臓内で生じる流体力外乱に対する支持安定性が低いことが課題となり、現在では開発が中止されている。Pediatric Jarvik 2000 は血液浸潤型の接触式円錐軸受を用いてインペラを支持する構造を採用してポンプの小型化に成功している。しかし、軸受の機械的耐久性が低いことや摺動部における血球破壊や血栓形成が課題である。小児用人工心臓には小型、高耐久かつ良好な血液適合性等、人工心臓の中でも非常に高い要求が課せられるためその実用化は容易ではない。そこで本課題では、磁気浮上モータを超小型化し、非接触駆動可能な連続流式補助人工心臓の研究開発を行っている (図 1)。

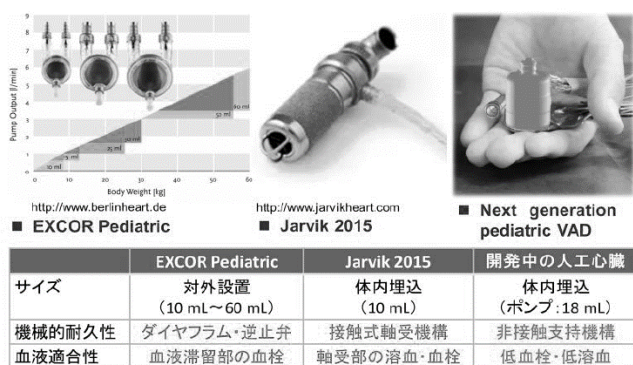


図 1 世界で研究開発されている小児用補助人工心臓

2. 研究の目的

平成 24 年度より全く新規な方法で浮上ロータ姿勢の 5 軸を能動制御可能なダブルステータ型の磁気浮上モータを考案し、外径 28 mm, 高さ 41 mm, 体積 25 cc の磁気浮上型小児用人工心臓第一試作機を製作して本方式の有効性を実証した (図 2 左図)。更に、平成 26, 27 年度に本 5 軸制御磁気浮上モータを外径 22 mm, 高さ 33 mm, 体積 13 cc まで小型化 (図 2 右図) し、提案原理を用いて浮上ロータを非接触支持可能であることを実証してきた。これまでの研究では、ポンプ駆動時の流体力外乱に対抗して十分に浮上インペラを磁気支持できる 5 軸制御磁気浮上モータを小型化設計してきたが、本課題では、磁気浮上モータおよび血液ポンプ設計の発想を変え、血液ポンプ内で生じる流体力や粘性ダンピングをインペラ支持に積極的に応用することによる 5 軸制御磁気浮上モータの更なる小型化の可能性へ着眼した。本研究課題では、磁気浮上モータの流体機械融合により生じるポンプ内流体力によるインペラ支持、流体粘性による振動抑制を活用して 5 軸制御磁気浮上モータの超小型化の限界を追求し、世界初・世界最小の小児用磁気浮上人工心臓へ挑戦する (図 3)。



図 2 先行研究で開発した磁気浮上モータ



図 3 磁気浮上人工心臓の目標サイズ

### 3. 研究の方法

#### (1) インペラダイナミクスに基づく磁気浮上モータの小型化設計

5軸制御磁気浮上モータの運動モデルを構築、検証し、ダイナミクスシミュレーションを活用してモータの小型化設計を行った。モータ発生磁気支持力は磁路断面積および電磁石コイル巻き数に比例して決定されるため、モータ外径および高さがモータ小型化のための主要パラメータとなる。まずはアキシアルギャップ型磁気浮上モータの磁気回路理論計算を用いて、異なる外径、高さのモータモデルについての発生磁気支持力を推定し、小型化設計の指針を立てた。モータ高さを維持してコイル巻き数の減少を抑えつつモータ外径を小径化することで、非接触インペラ支持のための磁気支持力を担保しながらデバイスの体積をより減少させられることが分かった。そこで、本研究では i) ポンプ内の任意のインペラ浮上位置で上下のモータが発生する磁気支持力がバランス可能であること、ii) インペラが磁気浮上中心位置にあるときに 5 G 以上の加速度外乱に対抗可能なことを設計指針とした。

#### (2) 有限要素法三次元磁場解析によるモータ発生支持力の推定と最終形状決定

理論解析により決定した基本寸法のモータについて、漏れ磁束および磁気飽和の影響を考慮可能な有限要素法三次元磁場解析を用いて、モータの詳細形状の決定、支持力推定を行った。本解析では、先行研究で得た磁場解析の推定結果と実験による支持力計測結果との誤差を補完することで、実機において十分な磁気支持性能を担保できるかを詳細に検証した。最も過酷な励磁条件においてモータの磁気飽和がないこと、小型化モータがインペラを非接触で支持するために必要な磁気支持力を発生可能であることを確認した。

#### (3) 小型磁気浮上モータの製作と基礎性能評価

従来機よりも小型な外径 20 mm、高さ 33.6 mm の磁気浮上モータを製作した (図 4)。理論上更なる小径化も図れたが、ステータ突極や永久磁石の加工限界を考慮して、上記を最終寸法と決定した。製作した小型化モータのエアギャップ中の発生磁束密度、軸方向吸引力の静特性、回転トルクおよび入力電力を評価した。すべての評価において、モータステータとロータ間のエアギャップを 1.3 mm に調整した。エアギャップ中にガウスメータを挿入することで磁束密度を計測した。ステータへの励磁電流を 0-2 A で変化させて発生する磁気吸引力をロードセルで計測した。ロータをベアリング支持して回転方向のみに自由度を持つ実験系を用いて、モータ発生トルクに対する入力電力とエネルギー効率を評価した。回転数制御には PI 制御を用いた。

### 4. 研究成果

発生磁束密度の測定結果を図 5 に示す。エアギャップ中の磁束密度波高値は 0.25 T であり、従来モータの約 70% の値であった。磁束密度の減少は、モータの小径化に伴い磁石体積が減少したためである。小型化モータの単位電流あたりのモータ発生軸方向吸引力は 0.6 N/A であり (図 6)、従来モータよりも支持力が 56% 低下した。一方、本支持力とインペラ質量から 6.5 G までの加速度外乱に耐えられることが計算でき (図 7)、インペラ非接触支持の実現可能性を示すことができた。回転トルクと入力電力の関係を図 8 に示す。製作したモータは想定する実使用回転数 5000 rpm、トルク 2 mNm を 5 W 程度の入力電力で発生可能であった。モータの最高効率は 25% であった。効率が低い原因はモータ小型化に伴う磁束密度低下により入力電流が増加し、銅損が大きいためだと考える。本課題では、モータの更なる小型化を実現し、小児用人工心臓駆動時の非接触インペラ支持の実現可能性を実証した。一方、モータへの入力電力増加は、機器発熱を引き起こす可能性が在るため、今後はインペラを非接触磁気支持、回転させた際の総合的な消費電力およびその時の機器発熱の評価が必要である。



図 4 製作した小型化磁気浮上モータ

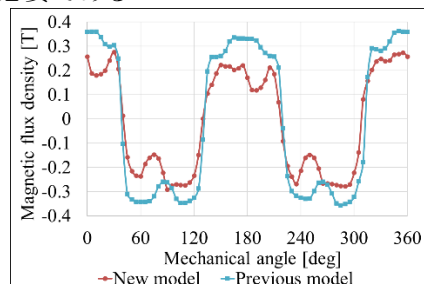


図 5 エアギャップ中の磁束密度

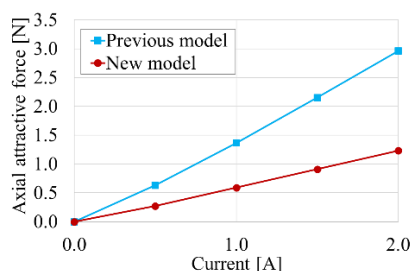


図 6 発生軸方向磁気支持力

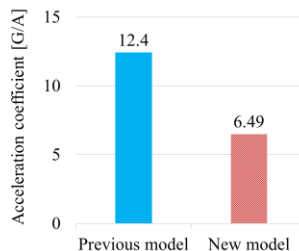


図 7 対抗可能加速度

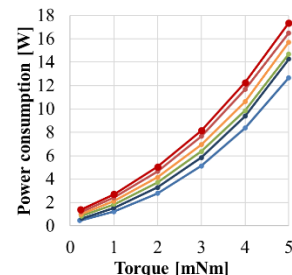


図 8 モータ消費電力

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計6件（うち査読付論文 6件/うち国際共著 0件/うちオープンアクセス 2件）

1. 著者名 織原涼雅, 増澤徹, 長真啓, 巽英介	4. 巻 27
2. 論文標題 小児用人工心臓のための超小型磁気浮上モータの改良	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 日本AEM学会誌	6. 最初と最後の頁 219-225
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	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 Masahiro Osa, Toru Masuzawa, Ryoga Orihara, Eisuke Tatsumi	4. 巻 27
2. 論文標題 Characterizing A Compact 5-DOF Controlled Self-Bearing Motor with Modified Magnetic Circuit to Improve Suspension Performance for Pediatric VAD	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 日本AEM学会誌	6. 最初と最後の頁 55-60
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	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 Masahiro Osa, Toru Masuzawa, Ryoga Orihara, Eisuke Tatsumi	4. 巻 8
2. 論文標題 Performance Enhancement of a Magnetic System in a Ultra Compact 5-DOF-Controlled Self-Bearing Motor for a Rotary Pediatric Ventricular-Assist Device to Diminish Energy Input	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Actuators	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3390/act8020031	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている(また、その予定である)	国際共著 -
1. 著者名 長真啓, 増澤徹, 斎藤拓也, 巽英介	4. 巻 26
2. 論文標題 ダブルステータ型アキシヤルギャップ磁気浮上モータの5軸制御方式を活用した小児用人工心臓循環補助時の外乱力推定と磁気浮上特性評価	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 日本AEM学会誌	6. 最初と最後の頁 95-101
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	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 斎藤拓也, 増澤徹, 長真啓, 巽英介	4. 巻 25
2. 論文標題 超小型磁気浮上式小児用人工心臓の開発	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 日本AEM学会誌	6. 最初と最後の頁 198-204
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	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 Masahiro Osa, Toru Masuzawa, Takuya Saito, Eisuke Tatsumi	4. 巻 Vol. 52, No. 1-2
2. 論文標題 Miniaturizing 5-DOF fully controlled axial gap maglev motor for pediatric ventricular assist devices	5. 発行年 2016年
3. 雑誌名 International Journal of AEM	6. 最初と最後の頁 191-196
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3233/JAE-162224	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

〔学会発表〕 計27件 (うち招待講演 0件 / うち国際学会 10件)

1. 発表者名 Masahiro Osa, Toru Masuzawa, Eisuke Tatsumi
2. 発表標題 Dynamic Suspension Characteristics of A Compact Double Stator Axial Gap Motor with Full Magnetic Levitation During Rotary Blood Pump Operation
3. 学会等名 11th Japanese-Mediterranean Workshop on Applied Electromagnetic Engineering for Magnetic, Superconducting, Multifunctional and Nanomaterial (JAPMED11) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Masahiro Osa, Toru Masuzawa, Ryoga Orihara, Nobumasa Katagiri, Tomonori Tsukiya, Eisuke Tatsumi
2. 発表標題 Hemolysis Testing and Adute Animal Experiment of Next Generation Ultra-Compact Centrifugal Pediatric VAD with Full Magnetic Levitation
3. 学会等名 The 27th Annual Meeting of International Society for Mechanical Circulatory Support (ISMCS2019) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 山口清, 増澤徹, 長真啓, 巽英介
2. 発表標題 小児用補助人工心臓用磁気浮上モータの省エネルギー化に関する研究
3. 学会等名 日本機械学会2019年度茨城講演会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 長真啓, 増澤徹, 織原涼雅, 巽英介
2. 発表標題 小児用補助人工心臓のための5軸制御磁気浮上モータのインペラ支持性能評価
3. 学会等名 Dynamic and Design Conference 2019
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 長真啓, 増澤徹, 織原涼雅, 築谷朋典, 巽英介
2. 発表標題 磁気浮上型遠心式小児用補助人工心臓の溶血性能評価
3. 学会等名 LIFE 2019
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 長真啓, 増澤徹, 山口清, 片桐伸将, 水野敏秀, 築谷朋典, 西中知博, 巽英介
2. 発表標題 超小型な磁気浮上モータを用いた遠心式小児用補助人工心臓の高性能化
3. 学会等名 第48回人工心臓と補助循環懇話会学術集会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Masahiro Osa, Toru Masuzawa, Ryoga Orihara, Eisuke Tatsumi
2. 発表標題 Characterizing A Compact 5-DOF Controlled Self-Bearing Motor with Modified Magnetic Circuit to Improve Suspension Performance for Pediatric VAD
3. 学会等名 Asia-Pacific Symposium on Applied Electromagnetics and Mechanics 2018
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Masahiro Osa, Toru Masuzawa, Ryoga Orihara, Eisuke Tatsumi
2. 発表標題 Magnetic suspension performance enhancement of ultra-compact 5-DOF controlled self-bearing motor for rotary pediatric ventricular assist device
3. 学会等名 The 16th International Symposium on Magnetic Bearings (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 長真啓, 増澤徹, 織原涼雅, 巽英介
2. 発表標題 小児用人工心臓用5軸制御磁気浮上モータの高性能化
3. 学会等名 D&D2018
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Masahiro Osa, Toru Masuzawa, Ryoga Orihara, Eisuke Tatsumi
2. 発表標題 Next Generation Ultra-Compact Centrifugal Pediatric VAD Using Maglev motor with Improved Design to Enhance Energy Efficiency
3. 学会等名 International Society for Mechanical Circulatory Support (国際学会)
4. 発表年 2018年



1. 発表者名 織原涼雅, 増澤徹, 長真啓, 巽英介
2. 発表標題 小児用人工心臓のための超小型磁気浮上モータの改良
3. 学会等名 MAGDAコンファレンス
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 山口清, 増澤徹, 長真啓, 織原涼雅, 巽英介
2. 発表標題 小児用補助人工心臓用磁気浮上モータの省エネルギー化に関する研究
3. 学会等名 第28回フロンティア講演会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 長真啓, 増澤徹, 織原涼雅, 巽英介
2. 発表標題 超小型磁気浮上モータを用いた次世代型遠心連続流式小児用人工心臓の血液循環性能評価
3. 学会等名 第47回人工心臓と補助循環懇話会学術集会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 長真啓, 増澤徹, 斎藤拓也, 巽英介
2. 発表標題 5軸制御磁気浮上モータを用いた遠心式小児用人工心臓の開発
3. 学会等名 第29回「電磁力関連のダイナミクス」シンポジウム
4. 発表年 2017年



1. 発表者名 織原涼雅, 増澤徹, 長真啓, 巽英介
2. 発表標題 磁気支持安定性向上を目指した三次元磁場解析による小児用人工心臓用5軸制御磁気浮上モータの構造検討
3. 学会等名 第25回茨城講演会
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 織原涼雅, 増澤徹, 長真啓, 巽英介
2. 発表標題 小型5軸制御磁気浮上モータを用いた小児用人工心臓のポンプ性能評価
3. 学会等名 第55回日本人工臓器学会大会
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 Masahiro Osa, Toru Masuzawa, Ryoga Orihara, Eisuke Tatsumi
2. 発表標題 Compact maglev motor with full DOF active control for miniaturized rotary blood pumps
3. 学会等名 The 11th International Symposium on Linear Drives for Industry Applications (LDIA2017) (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 Masahiro Osa, Toru Masuzawa, Ryoga Orihara, Eisuke Tatsumi
2. 発表標題 Performance evaluation of a magnetically levitated centrifugal pediatric VAD and motor design optimization for improvement of a maglev motor
3. 学会等名 The International society for mechanical circulatory support (ISMCS) (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 Masahiro Osa, Toru Masuzawa, Ryoga Orihara, Eisuke Tatsumi
2. 発表標題 Next generation ultracompact centrifugal pediatric VAD with full axis controlled maglev motor
3. 学会等名 ESA0 / IFA0 2017 (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 長真啓, 増澤徹, 斎藤拓也, 巽英介
2. 発表標題 小児用人工心臓用5軸制御磁気浮上モータのセンサレスモータ制御
3. 学会等名 第28回電磁力関連のダイナミクスシンポジウム
4. 発表年 2016年

1. 発表者名 Masahiro Osa, Toru Masuzawa, Takuya Saito, Eisuke Tatsumi
2. 発表標題 Magnetic Levitation Performance of Miniaturized Magnetically Levitated Motor with 5-DOF Active Control
3. 学会等名 the 15th International Symposium on Magnetic Bearings (国際学会)
4. 発表年 2016年

1. 発表者名 Masahiro Osa, Toru Masuzawa, Takuya Saito, Eisuke Tatsumi,
2. 発表標題 Improvement in A Next Generation Maglev Centrifugal Pediatric VAD
3. 学会等名 the 24th International Society for Rotary Blood pumps (国際学会)
4. 発表年 2016年

1. 発表者名 Takuya Saito, Toru Masuzawa, Masahiro Osa Eisuke Tatsumi
2. 発表標題 Miniaturization of Pediatric Ventricular Assist Device with Double Stator Maglev Motor
3. 学会等名 the 24th International Society for Rotary Blood pumps (国際学会)
4. 発表年 2016年

1. 発表者名 長真啓, 増澤徹, 斎藤拓也, 巽英介
2. 発表標題 小児用人工心臓用超小型アキシアルギャップセルフベアリングモータの高性能化
3. 学会等名 自動制御連合講演会2016
4. 発表年 2016年

1. 発表者名 長真啓, 増澤徹, 斎藤拓也, 巽英介
2. 発表標題 超小型磁気浮上式小児用人工心臓の開発
3. 学会等名 第54回日本人工臓器学会大会
4. 発表年 2016年

1. 発表者名 斎藤拓也, 増澤徹, 長真啓, 巽英介
2. 発表標題 超小型磁気浮上式小児用人工心臓の開発
3. 学会等名 第25回MAGDAコンファレンス
4. 発表年 2016年

1. 発表者名 長真啓, 増澤徹, 斎藤拓也, 巽英介
2. 発表標題 磁気浮上型小児用人工心臓の研究開発
3. 学会等名 第45回人工心臓と補助循環懇話会学術集会
4. 発表年 2017年

〔図書〕 計1件

1. 著者名 Toru Masuzawa, Masahiro Osa, Martin Mapley	4. 発行年 2017年
2. 出版社 Elsevier, Academic press	5. 総ページ数 818
3. 書名 Mechanical Circulatory and Respiratory Support: Chapter 11 “Motor design and impeller suspension”	

〔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

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関