

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 28 年 5 月 27 日現在

機関番号：12101

研究種目：研究活動スタート支援

研究期間：2014～2015

課題番号：26889012

研究課題名(和文)世界最小を目指した小児用人工心臓用5軸制御磁気浮上モータの超小型化に関する研究

研究課題名(英文)Miniaturized 5-DOF controlled magnetically levitated motor for pediatric VAD

研究代表者

長 真啓(Osa, Masahiro)

茨城大学・工学部・助教

研究者番号：30735105

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 2,100,000円

研究成果の概要(和文)：既開発小児用磁気浮上人工心臓試作機のポンプ駆動時におけるロータダイナミクスを参照して流体影響を考慮しつつ、三次元磁場解析を用いて小児用人工心臓用の5軸制御磁気浮上モータの形状、コイル巻き数、永久磁石形状・極数の最適化を行った。外径22 mm、高さ33 mmまで5軸制御磁気浮上小型化し、本モータの発生磁気支持力の静特性評価、発生回転トルクとモータ効率評価を行った。静特性評価の結果をもとにロータ姿勢の5軸制御システムを構築し、ロータ磁気浮上回転時の動特性評価を行った。得られた知見をもとに、5軸制御磁気浮上モータの高度化を行い、世界最小の5軸制御磁気浮上モータを用いた小児用人工心臓を実現する。

研究成果の概要(英文)：A rotor dynamics simulation considering effect of fluid dynamics was carried out to design a 5-DOF controlled magnetically levitated motor for pediatric ventricular assist device (VAD). A geometric parameter, number of coil turns and pole number of permanent magnets were optimized based on a three dimensional magnetic field analysis. A miniaturized 5-degrees of freedom (5-DOF) controlled maglev motor which has an outer diameter of 22 mm and height of 33 mm was developed. Motor static suspension performances and rotating torque capacity were examined. A magnetic levitation and rotation performances were evaluated with a developed test rig. The rotor was magnetically levitated and rotated up to 4500 rpm without mechanical contact. The developed 5-DOF controlled maglev motor indicated sufficient magnetic levitation and rotation performance for use in pediatric VAD.

研究分野：機械力学・制御

キーワード：磁気浮上モータ 人工心臓 ロータダイナミクス 5軸制御

1. 研究開始当初の背景

解剖学的な制限から既存の成人用補助人工心臓は10歳以上の小児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。米国では、国立心臓呼吸器血液研究所が小児用補助循環プログラムにより小児用補助循環デバイスの開発補助が開始された。現在では、血液浸潤型の接触式ピボット軸受により軸流ポンプのインペラを支持する Pediatric Jarvik2000 のみが研究開発されている。しかし、小児用人工心臓には、小型、高耐久、かつ優れた血液適合性等、人工心臓の中でも非常に高い要求が課せられているためその実用化は容易ではない。一方、申請者は、小児用人工心臓のために、遠心ポンプのインペラ姿勢の5軸を能動制御可能なダブルステータ型磁気浮上モータ(図1)を考案し、外径28mm、高さ41mm、体積25ccの小児用人工心臓試作機(図2)を製作して本方式の有効性を実証した。本人工心臓試作機は、十分な磁気支持性能、ポンプ特性(インペラ回転数3500rpm時に揚程100mmHg、流量2.5L/min発生)を示したが、成人用人工心臓に比べて小型ではあるものの、乳児を含めた小児の体内に埋め込むには体積10cc程度まで更なる小型化が必要である。小型な人工心臓を実現するためには超小型磁気浮上モータの研究開発が必要不可欠であるが、超小型磁気浮上モータの研究は世界的に見ても例がなく新規な課題

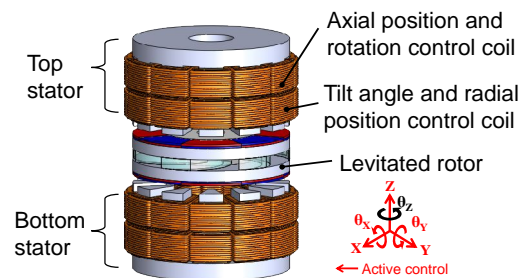


図1 5軸制御磁気浮上モータの概要

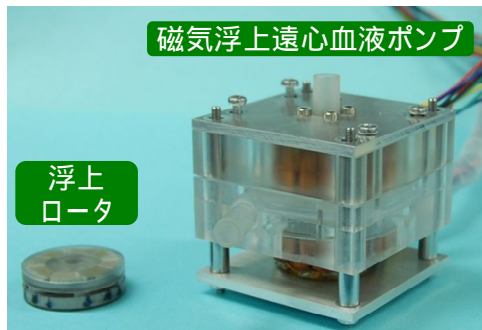


図2 製作した小児用人工心臓試験機

である。そこで、本研究では、有限要素法三次元磁場解析、数値流体解析をもとに浮上インペラのダイナミクスモデルを構築し、5軸制御磁気浮上モータをどこまで小型化できるか理論的に解明することで、世界最小の小児用磁気浮上人工心臓へ挑戦する。

2. 研究の目的

本研究課題では、外径20mm、高さ30mm、体積10ccの小型5軸制御磁気浮上モータ(図3)の実現を目指す。三次元磁場解析、数値流体解析、により種々の人工心臓動作点での磁気力、流体力を推定し、浮上ロータダイナミクスシミュレーションを活用してどこまで小児用人工心臓用5軸制御磁気浮上モータを小型化できるか検討する。ロータダイナミクスシミュレーションと実機実験の結果をもとに超小型5軸制御磁気浮上モータを開発する。超小型化した5軸制御磁気浮上モータに組み込み可能な遠心血液ポンプを開発し、世界初・世界最小の小児用磁気浮上人工心臓を実現する。



図3 磁気浮上モータ小型化の目標

3. 研究の方法

小児用人工心臓用の超小型磁気浮上モータは、発生磁気吸引力と回転トルクが小さくエネルギー効率が低くなるうえ、出力が小さいため低効率な動作点での駆動が強いられる。体内埋め込み型人工心臓の場合、デバイスの温度上昇を避けるため入力エネルギーには制限があり、如何にモータを高性能化し、エネルギーを効率よく浮上ロータ姿勢制御と回転制御に使えるかが小型化のカギとなる。磁気浮上モータを高性能化するために、三次元磁場解析を用いて、永久磁石材料検討による高磁束密度化、永久磁石形状検討、突極断面積(スロット幅)とコイル巻き数最適化、モータ極数と永久磁石極数の組み合わせ最適化によるコギングトルク低減と磁気吸引力、トルク増大の検討を行った。

人工心臓用磁気浮上モータでは、ポンプ駆

動時に発生する流体力が浮上インペラに働く。発生流体力の大きさ、方向は人工心臓動作点により様々に変化する。更に、流体粘性による振動減衰効果の影響も考慮する必要がある。このため、超小型磁気浮上モータを設計するにあたり流体力、粘性の影響を調査し、小児用人工心臓用磁気浮上モータの形状の最適化を行った。流体力や粘性影響は、既開発試験機に用いる5軸制御磁気浮上モータの実験結果を参照することで調査した。

外径 22 mm、高さ 33 mm、体積 13 cc の超小型5軸制御磁気浮上モータ(図4)を設計、製作し、本モータの磁気支持、回転性能の静特性評価を行った。軸方向磁気支持力、径方向磁気支持力、傾き復元トルク、回転トルクを測定した。各測定では、モータステータとロータ間のエアギャップを 1.5 mm とし、モータへ励磁する電流値を 0 から 2 A まで変化させた。

人工心臓駆動のための入力電力、およびデバイス効率を評価した。モータを駆動し、回転数を 1000 から 5000 rpm まで変化させ、各回転数においてモータ発生トルクを 0 ~ 10 mNm に変化させたときの、モータ消費電力、エネルギー効率を評価した。

開発した5軸制御磁気浮上モータの磁気浮上回転性能を確認するために、専用に磁気浮上システム(図5)、実験装置(図6)を構築した。本システムでは、浮上ロータ5軸を渦電流変位センサにより計測し、回転角度をホールセンサにより検出する。各センサの信号を、A/D変換器とD/A変換器を内蔵したマイクロプロセッサボードで取得し、デジタルPID制御を行うことで、ロータ姿勢の5軸制御を行った。サンプリングおよびコントロール周波数を 10 kHz とした。また、流体粘性の影響を考慮するために浮上ロータを水中で磁気浮上、回転させた。磁気浮上回転時の浮上ロータの軸方向および径方向の振動振幅、最大傾き角度を評価した。



図3 開発した5軸制御磁気浮上モータ

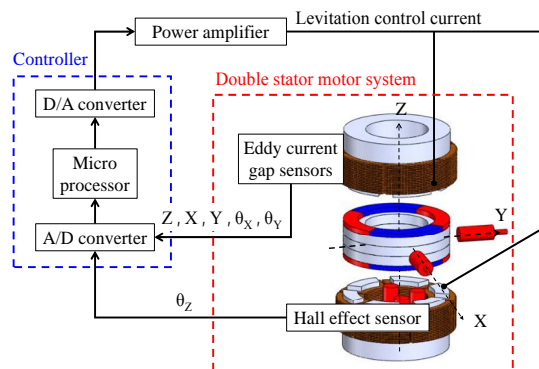


図5 磁気浮上回転制御システム

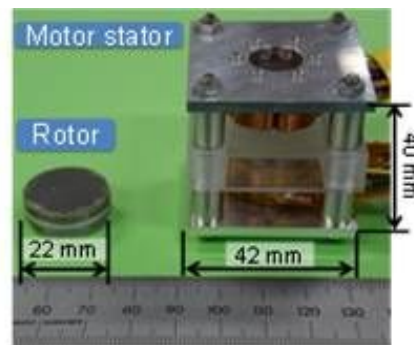


図6 磁気浮上回転性能評価実験系

4. 研究成果

流体影響を考慮しつつ、三次元磁場解析を用いて、既開発5軸制御磁気浮上モータ(外径 28 mm、高さ 41 mm、体積 25 cc)を外径 22 mm、高さ 33 mm、体積 13 cc まで超小型化した。本モータのサイズは米国で研究開発されている Pediatric Jarvik2000 と同等な体積であり、小児心疾患患者に埋め込み可能なサイズである。また、磁気浮上技術を用いているため、接触支持機構と比べて、耐久性、血液適合性が向上することが期待できる。

開発した5軸制御磁気浮上モータの静特性評価を行った。測定した軸方向磁気支持力を図7、径方向磁気支持力を図8、傾き復元トルクを図9、回転トルクを図10に示す。本モータは、励磁電流に対して線形な支持力、回転トルク発生性能を有していた。軸方向および径方向磁気支持力はロータを磁気浮上するに十分な性能を示した。本サイズのモータを用いた血液ポンプが揚程 100 mmHg に対して流量 1.5 L/min を回転数 4000 rpm で発生するために必要な回転トルクは 2 mNm と計算できる。これに対して、開発デバイスは小児用人工心臓用モータとして十分な回転トルクを発生可能であった。

モータ駆動時の発生回転トルクと消費電力の関係を図11に示す。モータエネルギー効率を図12に示す。ロータ回転時にモータが

発生可能な最大回転トルクは 10 mNm であった。使用想定動作点 (4000 rpm, 発生トルク 2 mNm) において, モータ消費電力は 4.5 W, エネルギー効率は 18.6% であった。モータの最高効率は回転数 5000 rpm, 発生トルク 2 mNm 時に 19.3% であった。血液ポンプの仕事率が小さいため, 低効率モータでも入力電力は小さくなるが, 更なる高効率化が今後の課題となる。本課題については, モータ磁性材料変更による鉄損低減と永久磁石材料, 形状の最適化による高磁束密度化により改善が可能であると考え。

浮上ロータを水中で磁気浮上回転させた時の, 軸方向および径方向振動振幅, 最大傾き角度を図 13, 図 14 に示す。本磁気浮上モータは超小型サイズながら, 5000 rpm までの高速回転を実現可能であった。軸方向および径方向の振動振幅はすべての駆動回転数において浮上ロータ可動域よりも小さく, 非接触支持できていることが分かる。一方, 5000 rpm まで回転できているものの, 傾き角度について, 4500 rpm 以上の回転数領域で浮上ロータの傾きが増長され若干の接触が見られた。本点について, 本磁気浮上モータの使用想定回転数は最大 4000 rpm であるため, ポンプ動作点において十分に浮上ロータを磁気支持回転可能である。また, 血液により更なる粘性減衰が期待できるため, 振動が抑制されると考える。浮上ロータ形状の最適化, コイル巻き数増加などによる傾き制御性能の高度化が今後の検討項目だと考える。

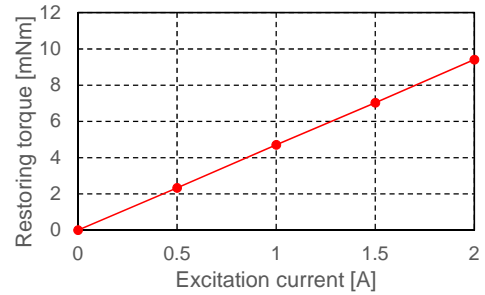


図 9 傾き復元トルク

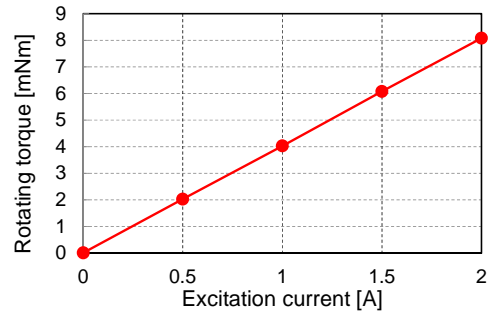


図 10 回転トルク

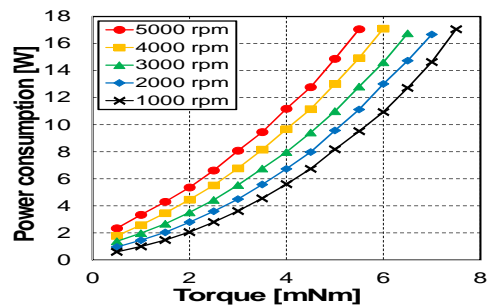


図 11 モータ消費電力

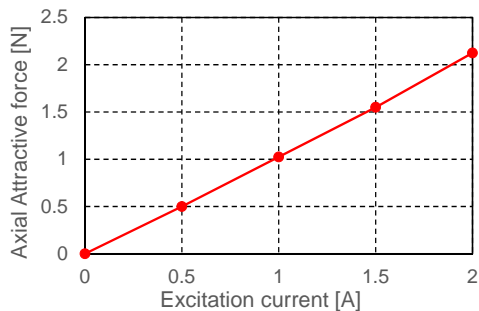


図 7 軸方向磁気支持力

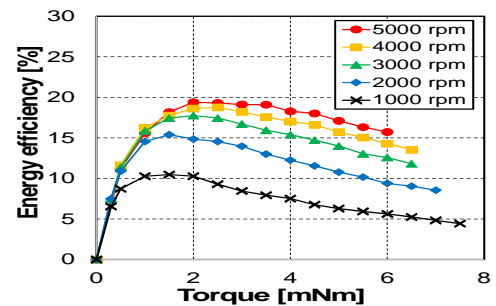


図 12 モータエネルギー効率

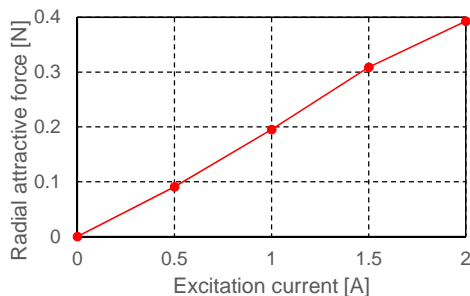


図 8 径方向磁気支持力

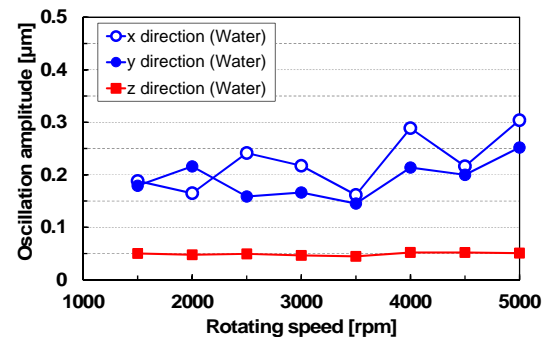


図 13 軸方向および径方向の振動振幅

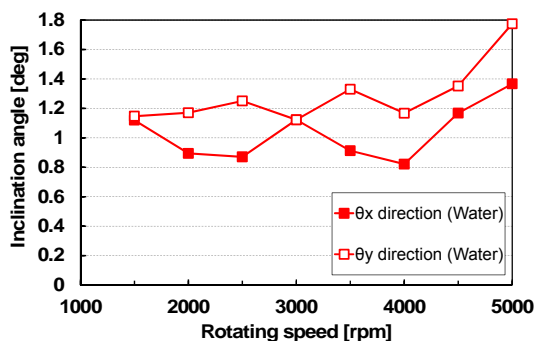


図 14 最大傾き角度

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計 4 件)

Masahiro Osa, Toru Masuzawa, Takuya Saito, Eisuke Tatsumi, Miniaturizing 5-DOF fully controlled axial gap maglev motor for pediatric ventricular assist devices, International Journal of Applied Electromagnetics and Mechanics, 掲載決定, 査読有

Masahiro Osa, Toru Masuzawa, Naoki Omori, Eisuke Tatsumi, Radial position active control of double stator axial gap self-bearing motor for pediatric VAD, Mechanical Engineering Journal, 2 巻, 1-12, 2015, 査読有

大森直樹, 増澤徹, 長真啓, 巽英介, 磁気浮上治療用血液ポンプへのセンサレスモータ制御の適用, 日本 AEM 学会誌, 23 巻, 393-399, 2015, 査読有

大森直樹, 増澤徹, 長真啓, 巽英介, 小児用人工心臓のための小型磁気浮上モータの第一試作, 日本 AEM 学会誌, 23 巻, 41-47, 2015, 査読有

〔学会発表〕(計 15 件)

長真啓, 増澤徹, 齋藤拓也, 巽英介, 連続流式小児用補助人工心臓の研究開発, 人工心臓と補助循環懇話会学術集会, 2016.3.4, ホテル松島(宮城県・松島市)

長真啓, 増澤徹, 巽英介, 次世代型磁気浮上式小児用人工心臓の開発現状, 第 53 回日本人工臓器学会大会, 2015.11.21, 東京ドームホテル(東京都・文京区)

長真啓, 増澤徹, 下堀拓己, 西村隆, 許俊鋭, センサレスモータ制御を用いた磁気浮上血液ポンプの回転数変調, 第 58 回自動制御連合講演会, 2015.11.14, 神戸大学(兵庫県・六甲市)

Masahiro Osa, Toru Masuzawa, Takumi Shimohori, Takashi Nisimura, Shunei Kyo, Pulsatile Flow Regulation of Extracorporeal Magnetically Levitated Rotary Blood Pump for Acute

Heart Failure, International Society for Rotary Blood Pumps 2015, 2015.9.28, Hotel Excelsior (Croatia・Dubrovnik)

Masahiro Osa, Toru Masuzawa, Naoki Omori, Eisuke Tatsumi, Miniaturizing 5-DOF fullycontrolled axial gap maglev motor for pediatric ventricular assist devices, The 17 th International symposium on Electromagnetics and Mechanics, 2015.9.15, 淡路夢舞台(兵庫・淡路市)

Masahiro Osa, Toru Masuzawa, Naoki Omori, Eisuke Tatsumi, Characterizing Magnetically Levitated Pediatric VAD and Further Miniaturization of Magnetic System, The 61st Annual Conference of American Society for Artificial Internal Organs, 2015.6.25, Hilton (USA・Chicago)

長真啓, 増澤徹, 大森直樹, 巽英介, 小児用人工心臓のための 5 軸制御磁気浮上モータの回転速度センサレス制御, 第 26 回電磁力関連のダイナミクスシンポジウム, 2015.5.15, 長崎ハウステンボス(長崎県・佐世保市)

増澤徹, 長真啓, Mechanical Circulatory Support Device の最新研究, 第 54 回日本生体医工学会大会, 2015.5.7, 名古屋国際会議場(愛知県・名古屋市)

齋藤拓也, 増澤徹, 長真啓, 大森直樹, 巽英介, 小児用磁気浮上人工心臓の小型化設計, 第 24 回ライフサポート学会フロンティア講演会, 2015.3.5, 東京電機大学工学部(東京都・足立区)

長真啓, 増澤徹, 齋藤拓也, 巽英介, 乳幼児・小児用補助人工心臓のための磁気浮上モータの小型化, 第 43 回人工心臓と補助循環懇話会学術集会, 2015.2.20, 熱海後楽園ホテル(静岡県・熱海市)

長真啓, 増澤徹, 大森直樹, 巽英介, 5 軸制御磁気浮上モータを用いた乳幼児・小児用補助人工心臓の開発, 第 52 回日本人工臓器学会大会, 2014.10.19, 京王プラザホテル(北海道・札幌市)

Masahiro Osa, Toru Masuzawa, Naoki Omori, Eisuke Tatsumi, A Magnetically Levitated Rotary Centrifugal Pump for Pediatric Ventricular Assist Device, International Society for Rotary Blood Pumps 2014, 2014.9.26, Hotel Nikko (USA・San Francisco)

Toru Masuzawa, Masahiro Osa, Naoki Omori, Eisuke Tatsumi, Pediatric VAD with five degrees of freedom control maglev motor, The 41st Annual European Society for Artificial Organs, 2014.9.17, Centro Congressi Giovanni

XXIII (Italy・Rome)

長真啓, 増澤徹, 大森直樹, 巽英介, 小
児用磁気浮上人工心臓のインペラ浮上
安 定 性 , Design and Dynamics
symposium 2014 , 2014.8.27 , 上智大学
(東京都・千代田区)

Masahiro Osa , Toru Masuzawa , Naoki
Omori , Eisuke Tatsumi , Radial position
Active Control of Double Stator Axial
Gap Self-Bearing Motor for Pediatric
VAD , The 14th International Symposium
on Magnetic Bearings , 2014.8.14 ,
Johannes Kepler University (Austria・
Linz)

〔その他〕

無し

6 . 研究組織

(1)研究代表者

長 真啓 (Osa MASAHIRO)

茨城大学・工学部・助教

研究者番号 : 30735105

(2)研究分担者

無し

(3)連携研究者

無し

(4)研究協力者

無し