

2018年11月30日

2017年度 永守財団 研究助成 研究報告書

所属機関名 (大学、大学院、研究所名)	茨城大学 工学部 機械システム工学科
職位または役職	助教
氏名	長 真啓

1. 研究題目

世界初・世界最小の次世代型小児用人工心臓実現を目指したダブルステータ型 5 軸制御磁気浮上モータの超小型化

2. 研究目的

補助人工心臓は重篤な心不全患者への心臓移植に代わる強力な治療手段である。しかし、解剖学的制限から体格の小さな小児に供せる体内埋め込み型の連続流式補助循環デバイスは未だに実現されていない。米国では2010年より国策的に連続流式補助人工心臓 Jarvik 2015 の研究開発を行っているが、血液に浸潤された接触式円錐軸受でインペラを支持するため、機械的耐久性や軸受部分での血球破壊と血液凝固の課題に未だ苦慮している。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ておりその実用化が容易ではない。

本研究では、全く新規な5軸制御磁気浮上モータの構造と制御方式を考案、体積13ccまで小型化した磁気浮上モータを用いた小児用人工心臓試験機を製作して十分なポンプ特性と磁気支持性能を実証している。現在、モータが持つ磁気支持力にポンプ内流体力、粘性減衰を積極的に併用してインペラ支持安定性を高めることで、人工心臓用磁気浮上モータの超小型化の限界に挑戦している。この申請課題では、超小型小児用磁気浮上人工心臓の実現を目指す。

本研究を遂行するにあたり、超小型、高性能な磁気浮上モータの設計手法確立は最も重要な役割を担う。本申請課題では以下の項目を研究目的とする。①理論計算および三次元磁場解析を用いて、永久磁石および電磁石それぞれが最も高い性能を発揮できるモータ幾何学形状(モータ磁気回路)を追求し、高トルク(高効率)かつ高磁気支持安定性を有するモータの設計手法を確立する。②流体機械(血液ポンプ)融合による流体力、粘性減衰を活用した非接触磁気支持について、運動モデルを用いたダイナミクス解析を行い体積10cc以下の磁気浮上モータを実現する。③最終的に、超小型モータに血液ポンプを組み合わせ、世界初、世界最小の次世代型小児用磁気浮上人工心臓を実現する。

3. 研究内容及び成果

本年度の研究では、モータ磁気回路の改良設計による超小型 5 軸制御磁気浮上モータの高磁気支持力化、高トルク化を行った。非励磁時にモータが高い磁気吸引力を発生できると径方向支持の受動安定性が高まる一方で、磁気浮上系（軸方向位置制御系、傾き角度制御系）を不安定化する要因の負のばね剛性を増長する。このため、磁気浮上系を不安定化する要素（負のばね剛性）を可能な限り変更せずに、制御電流によるモータ発生磁気支持力を増強するモータ磁気回路設計を行った。i) 現行モータの体格（外径 22 mm, 高さ 34 mm, 体積 13 cc）を担保し, ii) 軸方向負剛性を変化させずに（現行モータの負ばねの±10%以内とする）, iii) 制御コイル励磁時にモータが発生する磁気支持力を最大化することを設計指針とした。

はじめに、ステータバックヨークと突極の磁気飽和を起こさないことを考慮しながら、バックヨーク厚さを 2 mm 減らした分突極を延長した。併せて、突極断面積を 20.3 mm² から 17.0 mm² へと変更した。これにより、モータ体格を維持、負のばね剛性の変化を抑えつつ、コイル巻き数を 66 巻きから 105 巻きへ増加させてモータ発生磁気支持力を増強した。次に、磁気吸引力の理論計算と三次元磁場解析を用いて、エアギャップ長さ と 永久磁石厚さの最適な組み合わせを模索した。実機製作および、狭血液流路による溶血回避を念頭に、変更パラメータの変更範囲を、永久磁石厚さを 0.8 mm~1.2 mm（0.1 mm 間隔）、エアギャップ長さを 1.3 mm~1.7 mm（0.1 mm 間隔）と決定した。上記の幾何学寸法の範囲内ですべての組み合わせにおいて数値計算を行い最適なモータ形状を決定した。理論計算の結果、エアギャップ長さが 1.3 mm, 永久磁石厚さが 0.8 mm の時が最もモータの磁気支持性能が高いことを見出した。最適形状と決定したモータについて、三次元磁場解析で磁気支持力とトルクを推定し、軸方向磁気支持力が 65%, 径方向磁気支持力が 8%, 傾きトルクが 53%, 回転トルクが 48% 増加することが分かった。本結果より、磁気回路の再設計が本 5 軸制御磁気浮上モータの磁気支持性能、回転性能を増強するに有効であることが明らかになった。

図 1 に示す設計改良したモータを製作し、本磁気回路設計手法を用いて発生磁気支持力を 30-50% 向上できること、モータ効率が最大 7% 向上すること（図 2）を確認した。また、磁気浮上回転制御性能評価にて、回転数 8000 rpm まで浮上ロータを非接触磁気支持しながら回転可能であることを確認した。磁気支持力を増強させた改良モータが軸方向振動振幅および傾き角度を十分に抑制可能であることを実証した（図 3）。



図 1 製作した改良型磁気浮上モータ

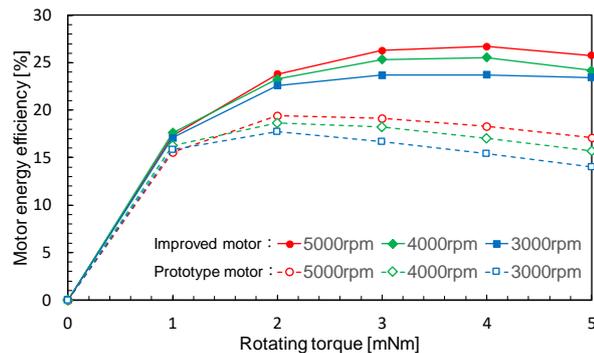
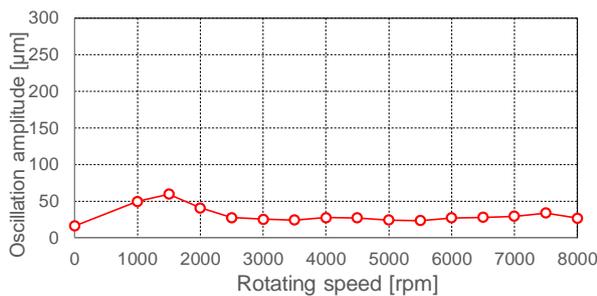
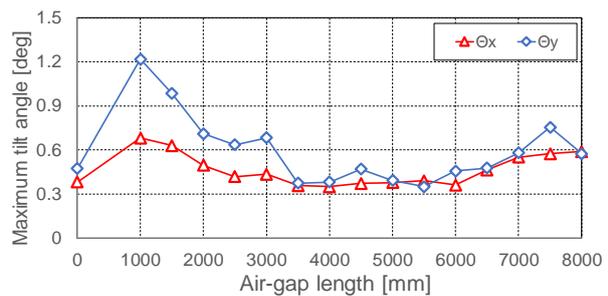


図 2 改良モータのモータ効率



(a) 軸方向振動振幅



(b) 最大傾き角度

図 3 改良モータの磁気支持性能

4. 今後の研究の見通し

【ポンプ内流体影響を非接触磁気支持に活用するためのモータ構造の検討】

遠心血液ポンプと組み合わせて、流体力推定、粘性減衰効果検証（周波数スイープを用いた FFT 解析による伝達関数導出）、これらから得たパラメータを用いた運動モデル構築とダイナミクス解析を行う。本知見に基づき、負ばね、磁気支持力、流体力、粘性減衰をどのように設計すれば、人工心臓ポンプで十分な磁気支持性能を得られるかを追求し、モータの超小型化に資する。

【小児用人工心臓用の 5 軸制御磁気浮上モータの小型化】

実機検証結果、ダイナミクス解析を活用して、必要な負ばね剛性、磁気支持力、粘性減衰効果を見積り、小型化の見通しを立てる。本設計指針に基づき、①モータ全高削減を検討する。2017 年度申請で改良した磁気浮上モータの支持力特性から、全高を 30 mm 以下まで落としても、十分な磁気支持特性が得られる見通しが立っている。②モータ外径の低減を検討する。磁路断面積は外径の 2 乗に比例することから、モータの小径化は高磁気支持力、高トルク発生に不利に働く。一方、インペラ質量が減少するため、磁気浮上動特性にとって有利となる。発生磁気支持力によるポンプ駆動時の外乱抑制ができ、かつ十分な動特性を実現可能な寸法までモータの小径化を行う。理想的には、外径 20 mm 以下まで小径化して体積 10 cc サイズのモータを目指す。

【世界最小の磁気浮上型小児用人工心臓の実現】

目標体積 10 cc サイズまで超小型化した磁気浮上モータに組み込み可能な血液ポンプを製作し、2017 年度申請で開発した磁気浮上人工心臓の更なる小型化を行う。模擬循環閉回路を用いて、小児用人工心臓動作時（駆動回転数 4000-5000 rpm、揚程 100 mmHg、流量 0.5-2.5 L/min）における非接触磁気支持を実証する。

5. 助成研究による主な発表論文、著書名

学術論文

1. 長真啓, 増澤徹, 斎藤拓也, 巽英介, 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性能評価, 日本 AEM 学会誌, Vol. 26, No. 1, pp. 95-101, 2018
2. Masahiro Osa, Toru Masuzawa, Ryoga Orihara, Eisuke Tatsumi, Characterizing a compact 5-DOF controlled self-bearing motor with modified magnetic circuit to improve suspension performance for pediatric VAD, 日本 AEM 学会誌投稿中

学会発表

1. Masahiro Osa, Toru Masuzawa, Ryoga Orihara, Eisuke Tatsumi, Characterizing a compact 5-DOF controlled self-bearing motor with modified magnetic circuit to improve suspension performance for pediatric VAD, Asia-Pacific Symposium on Applied Electromagnetics and Mechanics (APSAEM)
2. Masahiro Osa, Toru Masuzawa, Ryoga Orihara, Eisuke Tatsumi, Magnetic suspension performance enhancement of ultra-compact 5-DOF controlled self-bearing motor for rotary pediatric ventricular assist device, The 16th International Symposium on Magnetic Bearing (ISMB16)
3. 長真啓, 増澤徹, 織原涼雅, 巽英介, 小児用人工心臓用 5 軸制御磁気浮上モータの高性能化, 日本機械学会 D&D2018
4. Masahiro Osa, Toru Masuzawa, Ryoga Orihara, Eisuke Tatsumi, Next Generation Ultra-Compact Centrifugal Pediatric VAD Using Maglev Motor with Improved Design to Enhance Energy Efficiency, 26th International Society for Mechanical Circulatory Support (ISMCS2018)