

2018年度 永守財団 研究助成 研究報告書

所属機関名	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 -磁気浮上人工心臓システムの構築と有効性検証-

2. 研究目的

Berlin Heartr の EXCOR pediatric が臨床応用開始され、体外設置型拍動流式補助人工心臓による小児心不全治療が可能となった。しかし、送脱血管での感染症や、血液凝固療法等の拍動流式特有の課題に苦慮しており、インペラをモータにより回転させる連続流式補助人工心臓による体内植え込み型デバイス実現の機運が高まっている。一方、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、体格の



	EXCOR Pediatric	Jarvik 2015	Next generation pediatric VAD
機器サイズ	10, 15, 25, 30 mL 体外設置型拍動流	10 mL 体内埋込型連続流	18 mL 体内埋込型連続流
流量範囲	~3.0 L/min (ポンプ交換で実現)	0.5-3.0 L/min (10,000-30,000 rpm)	0.5-2.0 L/min (4,000-6,000 rpm)
機械的耐久性	可動部の低耐久性 (ダイヤフラム, 弁)	摺動部の低耐久性 (接触支持型軸受)	摺動部がなく高耐久 (完全磁気浮上型)
血液適合性	血液滞留による 血栓形成	摺動部での 溶血, 血栓形成	非接触支持による 低溶血, 抗血栓

図 1 国内外で開発されているポンプの比較

小さな小児に供せる補助循環デバイスは未だに実現されていない。世界的に唯一、米国では 2010 年より連続流式補助人工心臓 Jarvik 2015 の研究開発が継続されているが、血液に浸潤された接触式軸受でインペラを支持するため、軸受部分での血球破壊と血液凝固の課題を克服するに至っていない。このため、次世代型の非接触式人工心臓開発が強く望まれる(図 1)。

本申請では、①2017 年度助成で改良した磁気浮上モータを用いて、ポンプ駆動時の流体力、粘性減衰、ダイナミクス特性の検証結果をもとにポンプ駆動時のダイナミクス解析を行い、目標体積 10 cc サイズ(外径 20 mm, 全高 30 mm)の磁気浮上モータ実現を目指す。②超小型化したモータと流体機械(血液ポンプ)を融合することで非接触磁気支持の限界を拡大し、世界初、世界最小の次世代型小児用磁気浮上人工心臓実現へ挑戦する。

3. 研究内容及び成果

2017年度助成で改良設計を行い製作した磁気浮上モータ(外径 25 mm. 全高 33 mm, 体積 13 cc)を用いて, 磁気浮上回転制御性能, 周波数応答特性評価を行い, モータの高支持力・高トルク化, 省エネルギー化について改良の有効性を実証した(図 2). また, 周波数スイープによる磁気浮上系の周波数応答特性の評価を行い, 軸方向位置制御において 200 Hz 以上の周波数帯域を有していることを確認した. 改良モータの評価と合わせて, 更なる磁気浮上制御系の安定化と省エネルギー化を目指し, ロータ製作方法の検討を行った. 本項目では主に, 製作時に上下モータのロータ永久磁石について磁気バランスを調節すること, 上下ロータの中心, 平行度を調節することを考慮した. 浮上ロータの製作精度を検討することで, 磁気浮上回転時の振動振幅および傾き角度は, 改良前ロータの時と比べて約半分程度に抑制された. また, 磁気支持特性の改善および磁気バランスの改善により, 最大消費電力(ポンプ駆動条件:揚程 100 mmHg, 流量 2.5 L/min, 回転数 5500 rpm)が改善前では 13 W であったのに対して, 改良後では 6 W 以下まで低減された(図 3).

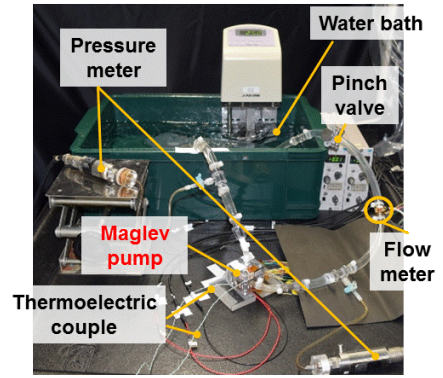


図 2 性能評価実験回路

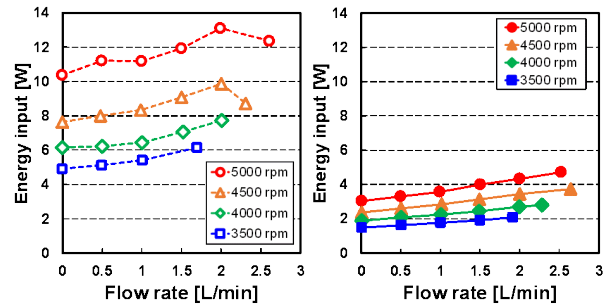


図 3 改良前後のポンプ駆動電力の比較

モータ磁気回路の改良, 浮上ロータの製作精度の改善の有効性を確認するために, 血液を循環させたときの磁気支持性能および溶血性能を評価した. 本測定では, 溶血性能も評価するため, 不安定な 3 軸(軸方向位置および傾き角度)を制御した. 血液の粘性は空気や水よりも高いため, 浮上インペラの振動振幅は全ての駆動条件において非常に小さく抑制できた. 軸方向振動振幅は 20 μ m 程度, 最大傾き角度は 0.3 度程度であった. ポンプ駆出流量が 1.0 L/min と比較的低流量の場合に溶血は見られず, 非常に良好な抗溶血性能を示した. 一方で, 2.5 L/min の高流量駆出時には, モータ消費電力は 6 W 程度と非常に低かったものの, 小体積のモータでは発熱(38-42 $^{\circ}$ C程度)が十分に抑制できず, 溶血を惹起する可能性があることが示唆された.

開発磁気浮上モータの適用対象が小児用人工心臓であり血液適合性担保が必須となる. そこで, まずは発熱抑制について検討を行った. 本項目では, モータの銅損および鉄損低減を目指し, 制御巻線の線径と銅損の関係調査, 磁性コア材料変更による鉄損低減を行った. 制御巻線径調査について, 線径を小さくして巻き数を増加させることで励磁電流を減少させると, コイル部の銅損は一定のまま配線ケーブルでの銅損が減少して高効率化が図れた. また, 磁性材料を純鉄無垢材(SUY-1)から圧粉磁心(EU-69)へ変更することで, 鉄損を 1-3 W 程度減少できた. モータ効率を 28 %から 40 %程度まで向上可能であることを実証した(図 4).

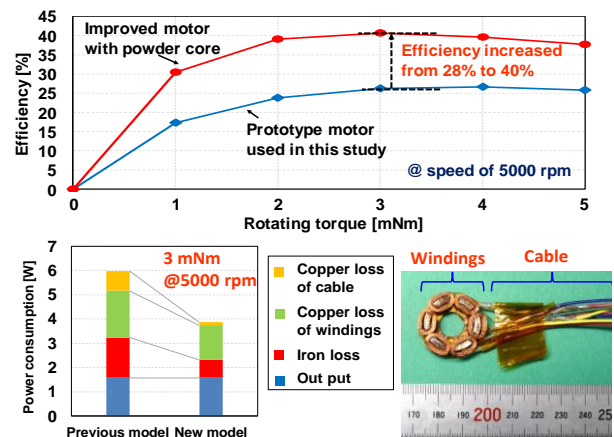


図 4 損失低減モータの製作とその評価結果

4. 今後の研究の見通し

【小児用人工心臓用5軸制御磁気浮上モータの超小型化】

モータ効率向上のために導線径を減少させたことにより抵抗が増加するため、磁気浮上のスタートアップ時、突発的な外乱抑制時に大電流を流すことができなくなること、磁性材料変更により透磁率が低下して磁気支持力が若干減少することが課題として考えられる。このため、現在は、モータ巻き数、磁性コア材料を変更した磁気浮上モータを用いて磁気浮上回転時の動特性の評価、およびその時の発熱評価を行っている。低損失モータの評価が完了したら、速やかに研究計画の本流に戻り、モータの超小型化に取り掛かる。

上記と並行して、圧粉磁心による材料磁気特性低下と巻線構成の検討結果を反映させた小型モータの設計を行っている。モータ損失が低減可能な圧粉磁心材料を使用することを想定し、磁気回路の理論計算に基づくモータ発生磁気支持力およびトルクを算出し、PID制御系を含む磁気扶助運動モデルをもとに小型化の限界を模索している。あわせて三次元磁場解析を用いて、モータ小型化における漏れ磁束や磁気飽和の影響を調査している。試算では、外径 20 mm、高さ 30 mm 程度までモータを小型化できることを見積もっている。今後、詳細な幾何学形状決定、磁場解析による性能推定を実施し、小型化モータの設計、製作を行う。

【世界最小の磁気浮上型小児用人工心臓の実現】

小型化前の実験機を用いて引き続き、血液を用いた循環特性評価実験、動物実験等を実施し、人工心臓実現に必要な要素技術の知見を蓄える。最終的に、人工心臓応用が可能な磁気浮上モータ、血液ポンプの形状を決定し、どこまで人工心臓用磁気浮上モータが小型化できるかを明らかにするとともに、世界初、世界最小の磁気浮上型小児用人工心臓実現を目指す。

5. 助成研究による主な発表論文、著書名

学術論文

- [1] M. Osa, T. Masuzawa, R. Orihara, E. 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, 27 (1), pp. 55-60, 2019
- [2] 織原涼雅, 増澤徹, 長真啓, 巽英介, 小児用人工心臓のための超小型磁気浮上モータの改良, 日本 AEM 学会誌, 27 (2), pp.219-225, 2019

学会発表

- [3] 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, ISMCS2018
- [4] Masahiro Osa, Toru Masuzawa, Ryoga Orihara, Eisuke Tatsumi, Dynamic Suspension Characteristics of A Compact Double Stator Axial Gap Motor with Full Magnetic Levitation During Rotary Blood Pump Operation, JAPMED11
- [5] 長真啓, 増澤徹, 織原涼雅, 巽英介, 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, 日本機械学会 D&D2018
- [6] 長真啓, 増澤徹, 織原涼雅, 築谷朋典, 巽英介, 磁気浮上型遠心式小児用補助人工心臓の溶血性能評価, LIFE2019