

2019年度 永守財団 研究助成 研究報告書

所属機関	国立大学法人茨城大学・工学部
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 -超小型磁気浮上人工心臓の実現への挑戦-

2. 研究目的

体外設置型拍動流式補助人工心臓である Berlin Heartr の EXCOR pediatric が小児心不全治療に臨床応用可能となったが、感染症予防や、抗凝固療法、術後管理の課題を克服するために、インペラをモータにより回転させる体内埋込型連続流式補助人工心臓の実現への機運が高まっている。しかし、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、体格の小さな小児に供せる連続流式の補助循環デバイス開発は容易ではない。現在、最も研究開発が進んでいるのが、2010年より米国で国策的に研究開発支援を受けた Jarvik Heart の Jarvik 2015 であるが、血液流路内で接触式軸受を用いてインペラを支持するため、軸受部での溶血と血栓形成が課題であり、未だ高い技術的障壁が存在する。

申請者は、軸受の耐久性や、血液適合性の課題を撤廃できる、完全磁気浮上型の小児用補助人工心臓を提案する。本研究では、磁気浮上システムにダブルステータ型のアキシヤルギャップモータを用いた全く新規な 5 軸制方式を考案、活用しており、小型な形状で優れた支持安定性と高トルク生成を実現できる。これまでに、本 5 軸制御磁気浮上モータを体積 13 cc まで小型化、小児用人工心臓試験機を製作、ポンプ駆動時に流体による粘性減衰を併用して十分な磁気支持性能を実証した。2017-2018 年度の永守財団研究助成では、モータ磁気回路改良により、体格 (13 cc) を維持したまま磁気支持力、トルクを増強可能であることを見出した。また、モータ材料を無垢材から圧粉磁心へ変更することで、大幅なモータ効率向上を確認した。

申請者は、軸受の耐久性や、血液適合性の課題を撤廃できる、完全磁気浮上型の小児用補助人工心臓を提案する。本研究では、磁気浮上システムにダブルステータ型のアキシヤルギャップモータを用いた全く新規な 5 軸制方式を考案、活用しており、小型な形状で優れた支持安定性と高トルク生成を実現できる。これまでに、本 5 軸制御磁気浮上モータを体積 13 cc まで小型化、小児用人工心臓試験機を製作、ポンプ駆動時に流体による粘性減衰を併用して十分な磁気支持性能を実証した。2017-2018 年度の永守財団研究助成では、モータ磁気回路改良により、体格 (13 cc) を維持したまま磁気支持力、トルクを増強可能であることを見出した。また、モータ材料を無垢材から圧粉磁心へ変更することで、大幅なモータ効率向上を確認した。



	EXCOR Pediatric	Jarvik 2015	開発中の人工心臓
サイズ	対外設置 (10 mL~60 mL)	体内埋込 (10 mL)	体内埋込 (ポンプ: 18 mL)
機械的耐久性	ダイヤフラム・逆止弁	接触式軸受機構	非接触支持機構
血液適合性	血液滞留部の血栓	軸受部の溶血・血栓	低血栓・低溶血

図 1 小児用人工心臓開発現状と各人工心臓の特徴

当年度は、これまでに得た知見をもとに、磁気浮上モータを更に小型化し、世界初の小児用磁気浮上人工心臓の実現を計画している。①ポンプ駆動時の流体力、粘性減衰、ダイナミクス特性をもとに、運動モデルの同定、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)の磁気浮上モータを実現する。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

【ダイナミクス解析に基づく5軸制御磁気浮上モータの小型化設計・製作】

研究助成 2018 で構築、検証してきた5軸制御磁気浮上モータの運動モデルに基づく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。磁路断面積および電磁石コイル巻き数に比例してモータ発生磁気支持力が決まるため、モータ小型化に際しては、モータ外径および高さが主要なパラメータとなる。このため、まずはアキシヤ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。理論解析の結果、モータ高さを維持してモータ外径を小径化することで、デバイス体積を小さくしながら非接触インペラ支持のための磁気支持力を担保できることが分かった。本研究では、i)ポンプ内における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をバランスできること、ii)インペラが磁気浮上中心位置にあるときに5 G以上の外乱加速度に対抗できることを設計指針とし、外径 20 mm, 高さ 33.6 mm をモータの基本寸法として決定した。なお、理論上更なる小径化も図れたが、ステータ突極および永久磁石寸法における加工限界を考慮して、上記寸法とした。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(コア材料の磁気特性)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、モータ形状の詳細決定および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機実験による支持力計測結果との誤差(解析精度)を考慮することで、実機において十分な磁気支持性能を担保できるか検証している。解析の結果、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のに必要な磁気支持力を発生可能であることを確認し、図2に示す磁気浮上モータを製作した。



図2 製作した小型化モータ

【流体機械融合のための血液ポンプ製作と人工心臓駆動時の磁気浮上動特性評価】

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。モータの磁束密度は、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。測定結果を図3に示す。発生磁束密度の波高値は0.25 Tであり、従来モータと比べておよそ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。軸方向吸引力測定では、ステータへの励磁電流を0-2 A で変化させた際の発生磁気吸引力をロードセルで計測した。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0.7 N/A であり(図4)、従来モータよりも支持力が64%低下した。モータ小型化に伴い、発生磁束密度が減少したが、本支持力とインペラ質量から7 Gまでの加速度外乱に耐えられることが計算でき、インペラ非接触支持可能であると考えられる。回転トルク測

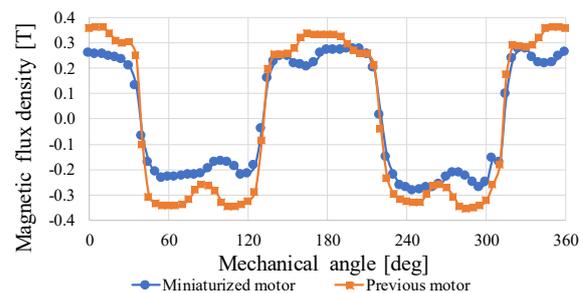


図3 磁束密度分布

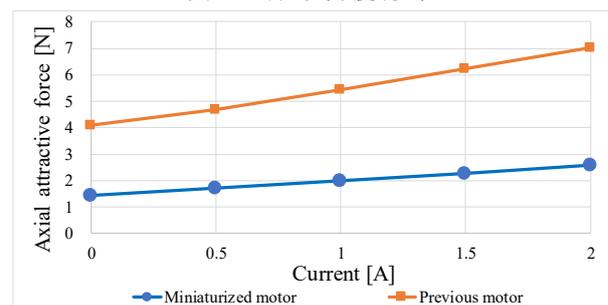


図4 発生軸方向吸引力

定では、ロータをベアリングで支持された回転軸に取り付け、回転方向のみに自由度を持つ実験系を用いた。ヒステリシスブレーキにより負荷をかけることで、モータが発生する回転トルクを変更し、その時の入力電力を計測した。回転数制御には PI 制御を用いた。回転トルクと入力電力、エネルギー効率の関係を図 5 に示す。製作したモータは想定している実使用回転数 5000 rpm で 4 mNm の回転トルクを発生可能であった。また、モータの最高効率は 16% であった。モータ効率が低かった原因は、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。モータへの入力電力増加は、機器発熱の要因の一つとなるため、インペラを磁気支持、回転させてポンプを駆動した際の総合的な消費電力の評価が必要である。

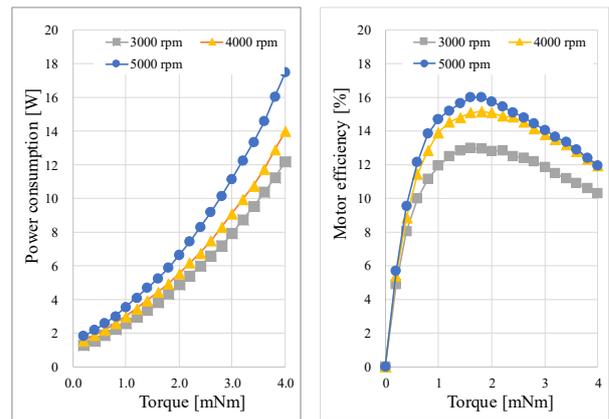


図 5 入力電力とエネルギー効率

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】

磁気吸引力の理論計算および三次元磁場解析を用いて、モータの小径化を図ることで体積 10 cc サイズまでの小型化を実現した。モータ小型化により磁束密度が低下することで、発生磁気吸引力および回転トルクが減少した。耐加速度性能の推定結果、最大回転トルクの結果から、血液ポンプと組み合わせても、インペラを非接触磁気支持、回転可能であると考察しているが、今後は、磁気浮上血液ポンプ実機を用いて、磁気浮上回転性能、ポンプ駆出性能を評価していく必要がある。

【世界最小の磁気浮上型小児用人工心臓の実現】

小型化した磁気浮上血液ポンプで十分な磁気支持性能、ポンプ性能を実証できたら、血液を用いた循環特性評価実験、動物実験等を実施して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] 小児用補助人工心臓用磁気浮上モータにおける省エネルギー化の評価(日本 AEM 学会誌, 掲載決定)

国際会議(査読付き)

- [2] Dynamic suspension performance of an ultra-compact 5-DOF controlled axial gap type self-bearing motor for use in pediatric ventricular assist devices, proceedings of ISMB17(投稿中, 2021 へ延期)

学会発表

- [3] 小児用人工心臓用磁気浮上モータの小型化に関する研究(日本機械学会 2020 年茨城講演会, 2020 年 8 月 21 日)
- [4] 小児用補助人工心臓用磁気浮上モータにおける省エネルギー化の評価(SEAD32, 開催中止, 投稿のみ(予稿集発行あり))
- [5] 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おける有効性の評価(MAGDA コンファレンス 2020 発表予定, 2020 年 12 月 22, 23 日開催予定)
- [6] 乳幼児用体内植込み型補助人工心臓に適した遠心ポンプ形状の最適化に関する研究(第 58 回日本人工臓器学会年次大会, 2020 年 12 月 12-14 日開催)