

氏名	長 真 啓		
学位の種類	博士 (工学)		
学位記番号	甲博理工第465号		
学位授与年月日	平成26年3月25日		
学位授与の要件	学位規則第4条第1項該当		
学位論文題目	小児用人工心臓のための5軸制御ダブルステータ型磁気浮上モータに関する研究		
審査会	主査	増 澤 徹	委員 栗 原 和 美
	委員	近 藤 良	委員 尾 関 和 秀
	委員	田 中 伸 厚	

## 論文内容の要旨

機械的循環補助は心不全患者の増加とドナー不足の観点から心臓移植への橋渡しや心臓移植の代替治療として成人患者に臨床応用が開始されている。特に、近年10年間に補助人工心臓は著しく進歩し、患者の数か月以上の生存が実現されている。小児心不全患者の救命においても補助人工心臓の適用は有効であるが、解剖学的な制限から既存の補助人工心臓は10歳以上の小児にのみ装着可能であり、乳幼児、小児に適用可能な補助人工心臓は実現されていない。小児用人工心臓には、①年オーダの機械的寿命を持つこと、②血球破壊や血栓形成が少ないこと、③体内に埋め込むため小型であることなど、人工心臓の中でも非常に高い性能が要求される。これらの要求を満たす工学技術として磁気浮上モータが注目されている。磁気浮上モータは、デバイスから機械的摺動部分を完全に撤廃でき、高寿命かつ優れた血液適合性を有する人工心臓を実現できる。しかし、人工心臓用の磁気浮上モータでは、狭い血液流路における血球破壊を避けるために浮上ロータとステータ間のエアギャップを広くする必要がある。このため、磁気浮上モータが発生する磁気支持力と回転トルクが著しく低下し、磁気浮上制御系の不安定性や、モータ効率の低下を引き起こす可能性がある。本研究では、浮上ロータの5自由度 ( $X, Y, Z, \theta_x, \theta_y$ ) を能動的に磁気支持可能なダブルステータ型アキシヤルギャップ磁気浮上モータを新規に提案する。これにより、磁気浮上モータのエアギャップを広くすることで低下する発生磁気支持力と回転トルクを補い、安定した磁気浮上、回転を実現する。本論文では、提案する5軸制御原理を確立するとともに、小児用人工心臓に適用可能な5軸制御磁気浮上モータを開発することを目的とする。

提案する5軸制御磁気浮上モータは、上部ステータ、下部ステータ、浮上ロータから構成される。浮上ロータを同一構造のモータステータにより挟み込むダブルステータ構造を採用することで、高トルクの生成と浮上ロータの5軸制御を実現する。上下のモータステータの各突極には二種類の集中巻きコイルが巻かれている。一方は、浮上ロータ

の軸方向位置および回転数制御用のコイル，もう一方は，浮上ロータの径方向軸周りの傾き角度および径方向位置制御用のコイルである．浮上ロータの軸方向両表面には軸方向に着磁された永久磁石を配置している．浮上ロータの軸方向位置，回転数制御にはベクトル制御を用い，浮上ロータの径方向軸周りの傾き角度，径方向位置制御には $P\pm 2$ 極理論を用いる．本モータは，追加的な能動型磁気軸受や受動型磁気軸受を必要とせず，モータステータのみを用いて5軸制御を行うため，構造の単純化とデバイスの小型化が可能である．

理論解析により磁気浮上モータが発生する磁気支持力と回転トルクを導出した．有限要素法三次元磁場解析を用いて，理論解析より導出した発生磁気支持力と回転トルクを定量的に推定し，提案した5軸制御原理を確認した．また，三次元磁場解析では，5軸制御磁気浮上モータに最適なステータ突極数，突極断面積，制御磁界極数，永久磁石極数，永久磁石形状を決定した．設計した磁気浮上モータに合わせて，小児用人工心臓のための遠心血液ポンプを設計した．数値流体解析を用いてポンプボリュート形状，インペラの羽根形状を決定し，設計した遠心血液ポンプのポンプ駆出性能およびポンプ駆動時にインペラに働く流体力と負荷トルクを推定した．その結果，インペラ回転数が3500 rpmにおいて，揚程131 mmHgに対して目標流量1.5 L/minを発生可能である遠心血液ポンプの設計が行えた．また，そのときにインペラに働く軸方向流体力は0.5 N，径方向流体力は0.6 N，負荷トルクは3.2 mNmと推定された．

三次元磁場解析の結果に基づき，12スロット，8極のダブルステータ型磁気浮上モータを製作した．磁気浮上モータの外径を28 mm，高さを41mmとし，エアギャップ長を1.5 mmとした．製作した磁気浮上モータと専用に構築した性能評価装置を用いて，磁気浮上モータが発生する軸方向磁気支持力，径方向磁気支持力，傾き復元トルクおよび回転トルクを評価した．また，小児用人工心臓ポンプの駆動回転数において磁気浮上回転制御性能を評価した．その結果，提案した5軸制御原理通りに磁気支持力と回転トルクを発生可能であること，ポンプ駆動時に人工心臓内で生じる流体力に対して，十分大きな磁気支持力が発生可能であること，回転数6400 rpmまでロータの非接触磁気支持，回転が可能であることを確認した．

本研究では，小児用人工心臓のために浮上ロータの5自由度を能動制御可能なダブルステータ型磁気浮上モータを新規に考案した．理論解析，有限要素法磁場解析により，提案した5軸制御ダブルステータ型磁気浮上モータの5軸制御原理と基礎的な性能を理論的に明らかにした．実機を用いた評価を行い，小児用人工心臓ポンプの駆動回転数に対して浮上ロータを磁気浮上，回転できることを示した．これより，新規に提案した5軸制御原理を確立するとともにその有効性を示した．

## 論文審査の結果の要旨

補助人工心臓は心不全患者の増加とドナー心不足から研究開発が進められ、心臓移植への橋渡しや永久使用として成人患者への臨床応用が開始されている。小児心不全患者救命においても補助人工心臓の適用は有効であるが、既存の補助人工心臓の適用患者は、解剖学的制限から10歳以上の小児に限られており、乳幼児、体格の小さな小児に適用可能な補助人工心臓は実現されていない。本研究では、小型、高耐久、かつ溶血、血栓を惹起しない小児用人工心臓を実現するために、5軸制御ダブルステータ型磁気浮上モータを新規に考案した。浮上ロータの軸方向位置、回転制御にはベクトル制御を用い、径方向軸周りの傾き、径方向位置制御には $P\pm 2$ 極理論を用いる。有限要素法三次元磁場解析をもとにロータ永久磁石形状とモータステータ突極形状を決定し、小児用人工心臓の駆動部として十分な磁気支持、回転性能を有する磁気浮上モータを設計した。数値流体解析をもとに磁気浮上モータを組み込み可能な遠心ポンプを設計した。製作した磁気浮上モータを用いて、原理通りに磁気支持力を発生できること、人工心臓内で生じる流体力に対して十分大きな磁気支持力を発生可能であること、回転数6400 rpmまで非接触磁気支持、回転可能であることを確認した。5軸制御下と3軸制御下における磁気支持、回転性能の比較を行い、5軸制御の有効性を実証した。開発した磁気浮上ポンプは小児用人工心臓として十分なポンプ性能を有することを確認した。

学位を授与するに値する論文の特色、学術上の寄与は、5軸制御かつ小型化可能な磁気浮上モータを新たに考案した点にある。同一構造のモータステータによるダブルステータ型とすることで、モータ形状と制御システムが簡単化でき、かつ高トルクを得られる構造を考案し、ダブルステータ構造に $P\pm 2$ 極理論を適用することで、ロータ径方向軸周りの傾きと径方向位置を独立に制御でき、簡単構造にも関わらず5軸制御が可能であることを見出した。これにより、追加的な能動型や受動型磁気軸受を必要とせず、構造の簡単化と装置の小型化を実現できた。新規に考案した構造と原理を用いて、小児用人工心臓のための磁気浮上モータを十分に小型化かつ高性能化することができた。

本論文の研究成果は、学術誌論文2編、国際会議論文2編、特許出願1編にまとめられており、修得単位と在学時の研究業績は生産科学専攻の博士号取得条件を満たしている。以上より、博士学位論文としての水準に達していると判定する。