

論文 / 著書情報  
Article / Book Information

題目(和文)	
Title(English)	Extracorporeal Centrifugal Blood Pump Employing a Bearingless Slice Motor with a PM-free Rotor
著者(和文)	YangRen
Author(English)	Ren Yang
出典(和文)	学位:博士(工学), 学位授与機関:東京工業大学, 報告番号:甲第12685号, 授与年月日:2024年3月26日, 学位の種別:課程博士, 審査員:進士 忠彦,吉田 和弘,西迫 貴志,菅原 雄介,土方 亘
Citation(English)	Degree:Doctor (Engineering), Conferring organization: Tokyo Institute of Technology, Report number:甲第12685号, Conferred date:2024/3/26, Degree Type:Course doctor, Examiner:,,,,
学位種別(和文)	博士論文
Category(English)	Doctoral Thesis
種別(和文)	審査の要旨
Type(English)	Exam Summary

## 論文審査の要旨及び審査員

報告番号	甲第	号	学位申請者氏名	YANG Ren	
論文審査 審査員		氏名	職名	氏名	職名
	主査	進士 忠彦	教授	土方 亘	准教授
	審査員	吉田 和弘	教授		
		菅原 雄介	准教授		
西迫 貴志		准教授			

### 論文審査の要旨 (2000 字程度)

本論文は、「Extracorporeal Centrifugal Blood Pump Employing a Bearingless Slice Motor with a PM-free Rotor」と題し、全6章から構成されている。

第1章「Introduction」では、心疾患やコロナウイルスによる重症肺炎などの治療に用いる補助循環システムや人工心肺システムの現状と課題を概観し、その構成要素の一つである体外設置使い捨て血液ポンプの開発において、小形、高耐久、低溶血、低血栓、低コスト化が求められていることを述べている。また、既存の磁気浮上システムを搭載した遠心血液ポンプは、摩擦・摩耗がない羽根車の非接触支持・回転を実現できるため、耐久性、溶血、血栓の観点では、各種血液ポンプの中で最も優れていることが臨床的に実証され、小形化には、羽根車を非接触支持する磁気軸受と回転するモータを統合したベアリングレスモータ (BELM) が有効であると述べている。更に、使い捨て遠心血液ポンプにおいて BELM を低コストで運用するには、単回使用のロータに永久磁石を用いず、鉄のみで構成することが必要であると述べている。以上から、本研究の目的を、ロータに永久磁石を用いない使い捨て遠心血液ポンプ用 BELM の開発とその血液ポンプでの有効性の検証としている。

第2章「Principle and design」では、使い捨て遠心血液ポンプに適用可能な BELM を提案・設計している。ロータのステータ上方からの脱着を可能とするため、ステータ上部は完全に開放され、外周に配置された電磁石を用いてロータを非接触支持・回転する構造が採用されている。ロータは使い捨てを想定し、希土類磁石は用いず、鉄心のみの突極構造となっている。半径方向の位置制御のみでロータの安定浮上を実現するため、ロータ上下部にフランジ、ステータ上下部に永久磁石リングを設け、両者間に磁気カップリングを形成することで、ロータの上下変位・傾きに伴い、復元力・トルクを発生する構造としている。ロータ径 50mm、ロータ 8 スロット、ステータ 12 スロット、コイルは集中巻きを前提として、従来の磁気浮上遠心血液ポンプと同等の非制御方向の剛性と最大モータトルクを有することを目標値とし、有限要素法による静磁場解析を用いて BELM の設計がなされている。また、ロータの半径方向に働く電磁力は、ロータの回転角に依存しないことが数値解析結果から明らかにされ、ロータの回転速度制御と半径方向位置決めが、それぞれ独立した単純な制御系で実現可能であることが示されている。

第3章「Prototype fabrication」では、使い捨てポンプ部と BELM の設計・試作、さらに BELM、変位・角度センサ、パワーアンプおよび補償器を含んだシステム構成が述べられている。使い捨てポンプ部は、直径 50mm の純鉄製ロータが取り付けられた羽根車、それを包み込む上部と下部ハウジングからなる。半径方向 2 自由度の変位計測には、温度ドリフトとセンサノイズを低減するため、3つの渦電流変位計による差動計測が行われている。回転角度計測のため、モータ電流により発生する漏れ磁束の影響を受けにくいホール素子が選択されている。ステータに設置した 12 個のコイルには、それぞれ独立して、位置制御と回転制御に必要な電流を合計したものがリニアアンプにより供給されている。

第4章「Performance evaluation」では、血液粘度を模擬する 40wt% のグリセリン溶液で満たした模擬循環回路に試作ポンプを接続した状態で、磁気浮上の安定性、ロータの回転精度、ポンプの吐出流量・吐出圧力などを評価している。ロータは安定浮上を実現し、非回転時の浮上精度は十数 $\mu\text{m}$ 程度、0 rpm から 2,400rpm まで非接触回転を達成、半径方向の最大変位は 100 $\mu\text{m}$  以下であった。最

大吐出流量・圧力は、それぞれ 4.6L/min, 215.5mmHg, ポンプ最大効率 は 5.3%であった。目標の 5L/min, 250mmHg には、アンプの飽和を原因としたロータ回転数不足により到達できず、ポンプ効率は従来の磁気浮上遠心ポンプと比べ低いためその原因を考察している。

第5章「Radial displacement measurement using ECD sensor below the rotor」では、血栓発生に影響を与えるポンプ底面から上面に還流する2次流れの抵抗減少を目的に、位置決め制御用の渦電流変位計をロータ内側からロータ下側に移動し、ロータ側面に渦電流変位計を対向せず半径方向変位を計測する新たな手法を提案・検証している。通常、渦電流変位計は、プローブとターゲット間の距離に依存して出力電圧が変化するが、ターゲットが小さい場合、その横ずれ量も出力電圧に影響を及ぼす。この影響を積極的に利用するため、変位計のプローブをロータの内径エッジ近傍に配置して、ロータの半径方向変位計測を目指している。ロータの傾きや非線形性の影響をセンサ出力は受けるため、5から7個の変位計をロータ下部に配置し、その出力と機械学習を用いて、半径方向変位を高精度に推定する方法を提案・検討している。その結果、 $\pm 150\mu\text{m}$ の変位推定範囲、推定変位を用いた磁気浮上・回転が可能であることを確認している。

第6章「Conclusion」では、本論文で得られた結果を総括し、今後の課題を述べている。

以上要するに、本論文は、小形、高耐久、低血栓、低溶血、低コスト使い捨て遠心血液ポンプ用のBELMの開発を目指し、機構、制御、変位計測法の提案や、設計、試作を行い、ポンプと統合してその性能と課題を明らかにしたもので、工業上ならびに工学上貢献するところが大きい。よって、本論文は、博士（工学）の学位論文として十分価値のあるものと認められる。

注意：「論文審査の要旨及び審査員」は、東工大リサーチポジトリ(T2R2)にてインターネット公表されますので、公表可能な範囲の内容で作成してください。