

超小型5軸制御磁気浮上モータを用いた乳幼児・小児用補助人工心臓の研究開発

*¹茨城大学工学部機械工学科, *²国立循環器病研究センター

長 真啓*¹, 増澤 徹*¹, 巽 英介*²

Masahiro OSA, Toru MASUZAWA, Eisuke TATSUMI



1. 目的

解剖学的な制限から既存の成人用補助人工心臓は10歳以上の小児にのみ適用可能であり、乳幼児、体格の小さな小児用の補助人工心臓は未だ実現されていない。しかし、小児用人工心臓には、小型、高耐久かつ優れた血液適合性等、人工心臓の中でも非常に高い要求が課せられているためその実用化は容易ではない。連続流ポンプのキーテクノロジーは血液適合性の良い軸受であり、近年では動圧軸受と磁気軸受を用いた人工心臓が製品化、研究開発されている。動圧軸受は流体力による受動支持機構であり構造が簡便となるが、支持力はインペラ回転数に依存するため使用域が限定されると共に狭血液流路による溶血が課題となる。一方、磁気軸受は必ず複雑な制御系を必要とするが、インペラ姿勢を能動制御可能で広いエアギャップをとることができる。小児用人工心臓は、小児の成長に伴い変化する血液循環量に応じてインペラ回転数を広範囲に変化させ流量を調節する必要がある。また、血液ポンプの動作点に応じて人工心臓内で生じる流体力が変化する。今後、様々な動作点に対応可能で高度な小型小児用人工心臓が必要となると考える。本研究では、超小型の5軸制御磁気浮上モータを用いた小児用人工心臓の実現へ挑戦する。

2. 方法

本研究で提案する磁気浮上型小児用人工心臓の概略図を図1に示す。本人工心臓は、同一構造を有する上部ステータと下部ステータにより浮上インペラを挟み込むダブルス

テータ型磁気浮上モータと遠心血液ポンプから構成される。浮上インペラの軸方向両表面には永久磁石が配置されている。また、上部ステータ、下部ステータの各突極には2種類の浮上ロータ姿勢制御用コイルが独立に配置されている。磁気浮上モータにベクトル制御を適用することで浮上インペラの回転数制御と軸方向位置(z)の制御を行い、 $P \pm 2$ 極理論を適用することで浮上インペラの径方向軸周りの傾き角度(θ_x, θ_y)と径方向位置(x, y)を制御する。本5軸制御原理を用いることで、血液ポンプ内で浮上インペラを非接触磁気支持、回転させる。

本研究ではこれまでに、外径28 mm、高さ41 mm、体積25 ccの磁気浮上モータの設計、製作、評価を行い、考案した5軸制御原理の有効性および製作した磁気浮上モータの十分な磁気支持回転性能を確認している。我々は、遠心ポンプ設計理論、数値流体解析をもとに製作した磁気浮上モータを組み込み可能な小型遠心ポンプを設計、製作した。遠心ポンプの設計目標を①インペラ回転数が2,000~5,000 rpmの範囲で変化するとき揚程100 mmHgに対して0.5~5 l/min以上まで流量調節可能なこと、②低プライミングボリューム(5 cc程度)であること、③様々なポンプ駆動状態において発生する流体力が磁気浮上モータ発生磁

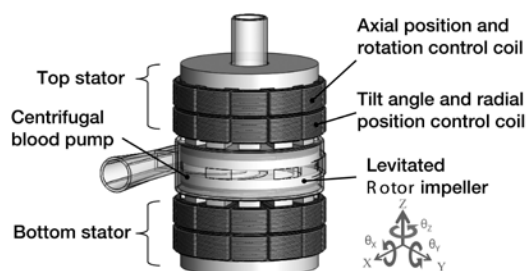


図1 磁気浮上型小児用人工心臓の構造

■ 著者連絡先

茨城大学工学部機械工学科
 (〒316-8511 茨城県日立市中成沢町4-12-1)
 E-mail. osa@mx.ibaraki.ac.jp

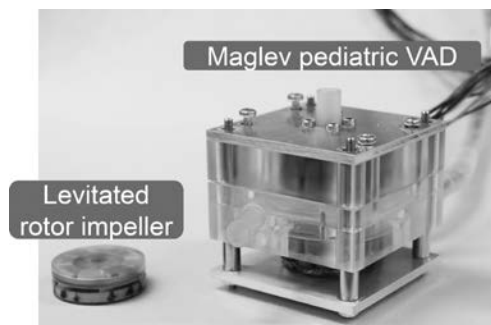


図2 製作した磁気浮上型小児用人工心臓

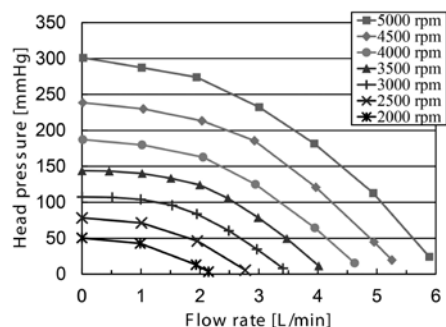


図3 製作した小児用人工心臓の圧-流量特性

気支持力に対して十分に小さいこと、④5軸制御用変位計測センサを組み込み可能な構造であることとした。

製作した遠心ポンプと製作した磁気浮上モータを組み合わせた小児用人工心臓(図2)を閉ループ循環模擬回路へ接続し、ポンプ揚程、流量特性の評価、および小児用人工心臓駆動時における浮上インペラ姿勢の計測、評価を行った。また、小児用人工心臓駆動時の消費電力とポンプの仕事率から本小児用人工心臓のエネルギー効率を評価した。

3. 結果

製作した磁気浮上型小児用人工心臓は浮上インペラを最大5,000 rpmまで非接触磁気支持、回転させることができた。図3に小児用人工心臓の発生揚程と送出流量の関係を示す。本人工心臓は、回転数3,000~5,000 rpmの範囲において揚程100 mmHgに対して流量を0.5~5.0 l/minまで調節可能であり、小児用人工心臓として十分な圧力、流量特性を得た。また、回転数5,000 rpmにおいて、最大揚程が300 mmHg、最大流量が6.0 l/minであった。人工心臓駆動時における浮上インペラの振動振幅は、ポンプケーシングと浮上インペラとの間隙の300 μmに対して100 μm程度と十分に小さかった。製作した磁気浮上モータは、人工心臓動作点に応じて変化するポンプ内流体力に対抗して十分に浮上インペラを磁気支持可能であった。また、遠心ポンプのエネルギー効率は動作点で10~30%であった。

4. まとめ

乳幼児を含む小児の体内への埋め込みを目指した人工心臓には、厳しいサイズ制限と合わせて、成長に応じた広範囲な流量調節機能と長期使用のための高い耐久性が求められる。2つのモータステータのみを用いて浮上インペラの5軸すべてを磁気支持可能な磁気浮上型小児用人工心臓を考案、製作し、小型かつ十分なポンプ性能および磁気支持

性能を有することを確認した。現在、小児用人工心臓の血液適合性評価と磁気浮上モータの更なる小型化、高効率化を行っている。

5. 独創性

本研究で提案する5軸制御磁気浮上モータは、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に2つのモータステータのみで構成できる世界で唯一のモータであり、浮上インペラ姿勢の制御軸ごとに磁気軸受が必要な従来方式に比較して大幅な小型化ができる。本人工心臓は浮上インペラ姿勢の5軸すべてを能動制御できるため、小児の体動外乱に対する支持安定性が高いのに加え、機械式接触軸受を用いた人工心臓と比較して高耐久であるだけでなく溶血、血栓形成のリスクが格段に小さい。また、製作した小児用人工心臓は、インペラ回転数を調節することで、乳幼児期に必要な低補助循環流量0.5~2.5 l/minから青年期に必要な補助循環流量5 l/minまで1つのデバイスでカバーできる特徴を有し、小児の成長に応じて人工心臓ポンプの交換が必要な小児用人工心臓との差別化を図ることができる。

本稿の全ての著者には規定されたCOIはない。

文献

- 1) 小野 稔: 補助人工心臓の現状と展望. 小児内科 **42**: 784-8, 2010
- 2) Baldwin JT, Borovets HS, Duncan BW, et al: The National Heart, Lung, and Blood Institute Pediatric Circulatory Support Program. Circulation **113**: 147-55, 2006
- 3) Hoshi H, Shinshi T, Takatani S: Third-generation blood pumps with mechanical noncontact magnetic bearings. Artif Organs **30**: 324-38, 2006
- 4) Osa M, Masuzawa T, Omori N, et al: Radial Position Active Control of Double Stator Axial Gap Self-bearing Motor for Paediatric VAD. Proceedings of 14th ISMB, p. 187-92, 2014