

革新的な人工心臓のための磁気粘性流体変速機の開発研究

茨城大学大学院理工学研究科

北山 文矢

Fumiya KITAYAMA



1. 背景

重篤な心疾患患者の救命には心臓移植と並んで人工心臓の適応が考えられる。HeartMate3 (Abbott社)をはじめとする体内植込み型左室補助人工心臓 (left ventricular assist device, LVAD) は臨床応用されており、心臓移植までの繋ぎや心機能の半永久的補助として用いられている。一方、LVAD 植込み患者のうちの一部は右心不全を併発することが報告されており、全置換人工心臓 (total artificial heart, TAH) の必要性が高まっている。

TAHでは、植込み可能なサイズ、高血液適合性、耐久性、自己心同様の左右心流量バランス機能が求められる。拍動型ポンプを用いたTAH、連続流ポンプを用いたTAH、補助人工心臓2台を用いたTAHの開発事例が報告されている。連続流ポンプを用いたTAH^{2)~4)}では、小形化のために、モータの回転子である単一のロータに左心・右心用羽根車を取り付けており、左心・右心ポンプの流量は原則としてモータ回転数に依存して同時に増減する。そのため、左房と右房の圧力差を駆動源としてロータ位置を軸方向に移動させ、左右心の流量を受動的に調節している。しかし、この受動的調節機能は固定された遠心ポンプの機械的特性によるものであり、患者の個人差に応じて調節できない。そこで筆者らは、能動的な流量バランス制御機能を持つ小形TAHの考案を行っている。

これまでの研究で、TAHに組み込み可能な小形の磁気粘性流体変速機 (MR流体変速機) を開発した⁵⁾。試作機を製作し、変速機単体を用いた基礎性能試験において回転数比

を0.9から1まで調整できることを示した。変速機付きTAHの構想を図1に示す。主軸・従動軸から成るロータの各軸に左心・右心用羽根車をそれぞれ取り付けている。主軸をモータで回転させ、2軸間の変速比を変速機で調整し、従動軸を回転させる。左心用羽根車の回転数はモータで、右心用羽根車の回転数は変速機で制御されるため、左心・右心ポンプの血液流量を能動的に制御できる。本研究では、変速機におけるMR流体の血液サイドへの流出状況および血栓形成状況を観察する。

2. 方法

MR流体変速機 (図2) は主軸、従動軸、軸間に充填されたMR流体 (S-002, 日本ペイント株式会社)、永久磁石を内蔵した電磁石、磁性流体シールから成る。MR流体の組成はカルボニル鉄粉末、アクリル樹脂粒子、ポリオキシプロピレン脂肪酸アミド媒体である。永久磁石付き電磁石でMR流体中の磁場強度を調整し、降伏せん断応力を2軸に与え、軸間の回転数比を制御する。

耐久性試験方法について述べる。変速機周辺に作動流体として水を充填し、モータで主軸を一定の回転数で回転させ、変速機で従動軸の回転数を間欠的に変動させる。経過日数ごとに水のサンプルを採取し、MR流体の流出量を質量分析により調査する。

血栓形成実証のための *in vitro* 試験について述べる。微小血栓や血小板をろ過したウシ、ブタなどの動物血を作動流体とし、耐久性試験と同様に入出力シャフトを回転させる。入出力シャフト以外の血液接触面はヘパリンコーティングなどの抗凝固処理を施す。恒温槽、リザーバなどを用いて血液温度を $37 \pm 2^\circ\text{C}$ に調整する。①常に主・従動軸が同じ回転数、②常に主・従動軸が異なる回転数、③間欠的に主・従動軸の回転数差を変動させるなどの実験を行い、

■ 著者連絡先

茨城大学大学院理工学研究科

(〒316-8511 茨城県日立市中成沢町4-12-1)

E-mail. fumiya.kitayama.amayatik@vc.ibaraki.ac.jp

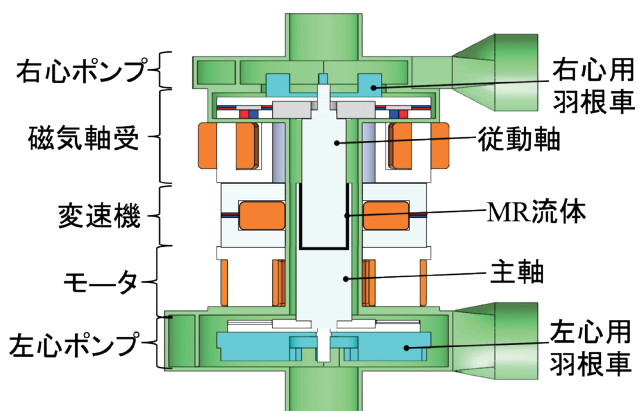


図1 変速機付きTAH

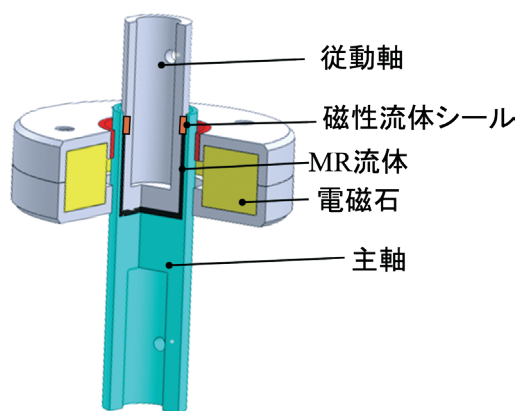


図2 MR流体変速機

変速機の血栓形成状況を観察する。

3. まとめ

本研究は「MR流体を体内で利用可能か、ならびに変速機上で血栓形成が生じるのか」を調査する初めての事例となる。変速機の耐久性・血液適合性の確保により、小形で能動的に左右心流量バランスが取れる革新的な変速機付きTAHを実現する。変速機付きTAHは、心疾患患者の救命・治療のための新しいツールとしての利用にとどまらず、生体の左右血液流量調節機構の解明にも寄与できる。加えて、本研究はMR流体を利用した人工臓器開発の加速に繋がると考えられる。

謝辞

この度は、第61回人工臓器学会大会において2023年度のYoshimi Memorial T.M.P. Grantの採択を受けましたことを光栄に存じます。株式会社東海メディカルプロダクツの皆様、選考に携われた諸先生方、関係者の皆様に厚く御礼申し上げます。

本稿の著者には規定されたCOIはない。

文献

- 1) Lampert BC, Teuteberg JJ: Right ventricular failure after left ventricular assist devices. *J Heart Lung Transplant* **34**: 1123-30, 2015
- 2) Fukamachi K, Horvath DJ, Massiello AL, et al: An innovative, sensorless, pulsatile, continuous-flow total artificial heart: device design and initial *in vitro* study. *J Heart Lung Transplant* **29**: 13-20, 2010
- 3) Emmanuel S, Jansz P, McGiffin D, et al: Anatomical human fitting of the BiVACOR total artificial heart. *Artif Organs* **46**: 50-6, 2022
- 4) Shida S, Tsushima K, Osa M, et al: Effects of biventricular shunt on pump characteristics in a maglev total artificial heart. *Int J Artif Organs* **46**: 636-43, 2023
- 5) 北山文矢, 増澤 徹, 長 真啓, 他: 人工心臓のためのMR流体トルク伝達機構. *日本AEM学会誌* **31**: 134-9, 2023