

**科学研究費助成事業 研究成果報告書**

平成 28 年 6 月 2 日現在

機関番号：12101

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2013～2015

課題番号：25420208

研究課題名(和文) 両心補助人工心臓用小型・高性能5軸制御セルフベアリングモータに関する研究

研究課題名(英文) Study on small and high performance self-bearing motor for biventricular assist device

研究代表者

松田 健一 (Matsuda, Kenichi)

茨城大学・工学部・准教授

研究者番号：30302326

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,300,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、両心補助人工心臓に適用可能な小型・高性能5軸制御セルフベアリングモータ開発のため、3次元磁場解析に基づく試作機を製作し実験を行った。当初の方式では、軸方向と径方向の制御力に相互干渉が生じることから、干渉の生じない方式を提案した。現在、新試作機による浮上回転を実施中であるが、モータ効率が低いため、現方式の3倍のトルク特性改善が可能な、ホモポーラ・コンシクエント統合型構造を新たに提案した。

研究成果の概要(英文)：In this study, a small and high-performance 5-DOF self-bearing motor is proposed and developed for a biventricular assist device. It possesses the function of a motor, two radial magnetic bearings, and an axial magnetic bearing. The rotor consists of two reluctance type rotors, two homopolar permanent magnets and a circular disc located in the middle position. The homopolar PMs generate high bias magnetic fluxes. Furthermore, in the radial control and the axial control, the fluxes don't interfere at simultaneous control and the radial direction forces can be controlled without any rotating magnetic field information. The proposed motor models are analyzed by three dimensional finite element methods. From the results, the experimental setup are made and tested. The levitation tests are going on. However, the result of motor efficiency is low. Then a homopolar-consequent integrated type 5-DOF self-bearing motor is newly proposed.

研究分野：メカトロニクス

キーワード：磁気浮上 磁気軸受 セルフベアリングモータ 補助人工心臓

### 1. 研究開始当初の背景

人工心臓ポンプの長期使用が避けられない現状において、拍動流補助人工心臓は機械的信頼性や小柄な患者への適応が困難、感染症等の問題が明らかになっている。

国内では、この問題点を克服する連続流方式補助人工心臓として、メカニカルシールを用いた遠心ポンプであるサンメディカル技術研究所のEVAHEARTや、世界初の磁気浮上技術を用いた遠心ポンプ方式を採用したテルモ社のDuraHeartが、平成23年3月に保険医療として承認されている。現在DuraHeartはセンサコードの不具合により使用が中断しているが、磁気浮上システムの本質的な有効性や安全性が変わることはない。さらに、小児にも適用可能な動圧軸受を用いた軸流ポンプ方式の小型補助人工心臓の開発が、国立循環器病研究センター、産業技術総合研究所、三菱重工(株)、ニプロ(株)により進められている。

一方海外では、機械軸受を用いた軸流ポンプ方式のHeartMate IIやJarvik 2000などがよく知られているが、近年、動圧軸受をアキシアル側に永久磁石磁気軸受をラジアル側に用いたHeartWare社のHVADが急激に臨床例を増やしている。また磁気軸受を用いた小型の軸流ポンプ方式として、Berlin Heart社のINCORが製品化されている。

日本では、欧米に比べ補助人工心臓を長期に使用する傾向にあり、ポンプの長期的な安全性、信頼性が重要になっている。磁気浮上方式の人工心臓は、長期使用が可能であるが、これまで開発されてきた製品は全て部分的に受動安定性に依存しており、信頼性の面より改善が必要と思われる。現在のところ、5軸全てを能動的に制御し小型化を達成しているのは、世界的に見ても申請者らが提案している5軸制御セルフベアリングモータ以外に見当たらず、研究継続の重要性を感じている。

補助人工心臓に依存する対象者の増加に伴い、左心、右心の同時補助が必要な事例が生じており、小型の両心補助人工心臓の開発が重要課題になってきている。2005年頃、米国においてHeartMate IIIやJarvik2000を2台使用した全人工心臓手術や、最近では、大阪大において、左心室にDuraHeartを、右心室にJarvik 2000(RV型)を使用した両心補助手術の例が報告されている。装置が小型化してきたとはいえ、2台のポンプを体内に埋め込むことは患者にとって大きな負担になる。そのため、最近1台のアクチュエータで両心を補助する人工心臓ポンプ(BiVAD)が、QUTと茨城大学のグループにより提案されている。使用するモータは、軸方向と傾きを制御可能な3軸制御方式を採用し小型化を実現している。

本研究では、長期使用を想定し小型でより信頼性の高い両心補助人工心臓を実現するために、5軸全てを能動的に制御する、ホモ

ポラ型ハイブリッド5軸制御セルフベアリングモータを開発する。

### 2. 研究の目的

本研究は、両心補助人工心臓に適用可能な、小型、高性能ホモポラ型ハイブリッド5軸制御セルフベアリングモータ(磁気浮上モータ)の開発を目的としている。

ホモポラ型モータは基本的に2ロータシステムであるが、申請者らが提案している新方式の軸方向制御ユニットを組み込むことで、小型、高性能に加え、両心補助に重要な軸方向のサーボ機能を持つ5軸制御セルフベアリングモータが実現可能となる。

2ロータの両側にポンプインペラを取り付け、ロータの軸方向変位と回転数を制御することで、両心の流量と吐出圧力を独立して制御できるため、小型で信頼性の高い両心補助人工心臓を開発することができる。

### 3. 研究の方法

(1) 解析対象である両心補助人工心臓は、左心13,300Pa(100mmHg)、右心2,660Pa(20mmHg)の吐出圧力と、定常的に5L/minという流量を確保する必要がある。この場合、ポンプ効率を考慮しても、40から50mN・mのモータトルクがあれば十分と考えられる。また支持性能としては、安全性を考慮し自重の5倍、5Gの加速度に耐えられる制御力を目標値として設定する。

有限要素法ソフトANSYSを用いた3次元磁場解析により、以下の項目について検討する。

- ・バイアス用永久磁石とバイアス磁束経路
- ・必要モータトルク発生のための突極数やステータ形状
- ・必要径方向力、軸方向力発生のためのロータ・ステータの形状

検討後、有力な形状を用いて5軸制御セルフベアリングモータの基本設計を行う。

(2) 基本設計が決定次第、積層鋼板コアの発注を行うと共に、モータホルダやタッチダウン等のモータ周辺の関連する装置部品についても発注を行う。部品が到着次第、試作機の組み立てに取りかかり、この試作機を用いて浮上回転実験により本モータの実現性を検証する。

(3) 実験による検証結果をふまえて、人工心臓用アクチュエータとして適用するために必要な、制御特性、負バネ特性、コギングトルク特性等のより最適な形状について検討する。最適な形状が決定次第、積層鋼板コアの発注を行い、2号機の製作に取りかかるとともに、試作機による浮上回転実験により本モータの実現性を検証し評価を行う。

### 4. 研究成果

(1) 当初の解析モデルとして、ステータ外径60mm、幅37mm、ロータ外径30mm、幅35mmを採用した。ロータ中央には、ネオジウム磁石N-42(保磁力915kA/m)を用い、両側の突極

部も含めロータ質量は 135g である。ステータ巻線の最大起磁力は、径方向巻線 30Aturn、軸方向巻線 100Aturn、回転巻線 80Aturn とした。解析は、有限要素法による汎用解析ソフト ANSYS を用い、各巻線それぞれに最大励磁したとき、回転トルク、制御力ともに人工心臓の要求性能を達成できることを確認した。(2) 解析に基づき、試作機を制作した。回転・径方向力発生部分のロータとステータはどちらも渦電流を抑える積層ケイ素鋼板を用い、軸方向力発生部分のロータとステータは、形状的にどちらも電磁軟鉄を使用した。巻線は高い占積率を実現できる平角線を使用し、回転巻線は 16 巻、径方向・傾き制御巻線は 6 巻、軸方向制御巻線は 20 巻とした。この実験装置で、トルクメータを用いてモータ効率測定実験を行った。測定結果は、目標であった回転数 3000rpm において 30mNm を達成することができた。またモータ効率は、3500rpm において 44%程度の効率を得ることができた。(3) 浮上制御の検討により、中央に 1 個の永久磁石を配置するロータ構造では、径方向制御と軸方向制御において構造的に制御磁束の干渉が生じるということが分かった。そのため、ロータ両端部と中央の軸方向制御ユニット間にそれぞれ永久磁石を挟む構造とすることで、干渉をなくし、かつ目標性能を達成可能なホモポラ型ハイブリッド 5 軸制御セルフベアリングモータを提案した。モータの概要を図 1 に、製作したモータの写真を図 2 に示す。(4) 新たに提案した実験装置は、静磁場解析の結果、径方向は起磁力 160Aturn で、軸方向制御は 100Aturn で、回転制御は 90Aturn で目標性能を達成できることを確認した。本モータを用いた特性実験の結果、回転速度 3000rpm でモータ効率が 35%であった。原因

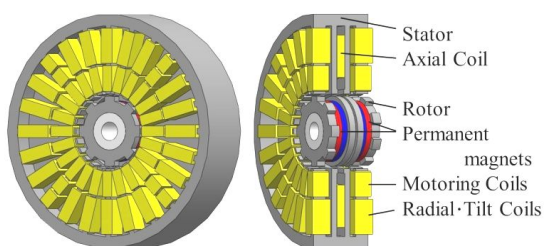


Fig. 1 Configuration of homopolar type hybrid 5-DOF self-bearing motor

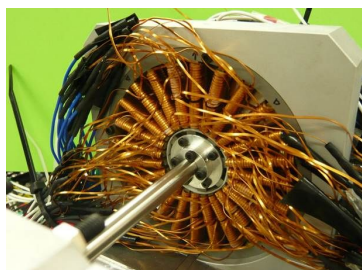


Fig. 2 Photo of the experimental setup

としては、ステータ中央の電磁軟鉄部の鉄損や、巻線抵抗による銅損の増加が挙げられる。現在、浮上制御試験を継続中であるが、モータ効率改善は大きな課題で有るため、現在の方式より 3 倍のトルク特性改善が可能なホモポラ・コンシクエント統合型構造を新たに提案した。

#### 5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

〔雑誌論文〕(計 20 件)

原田誠, 松田健一, 近藤良, 増澤徹, コンシクエントポール型 5 軸制御セルフベアリングモータの基本特性解析, 第 23 回茨城講演会講演論文集, 35-36, 2015, 査読無

徳井春彦, 松田健一, 近藤良, 増澤徹, IPM 型 5 軸制御セルフベアリングモータに関する研究, 第 23 回茨城講演会講演論文集, 33-34, 2015, 査読無

鈴木力, 松田健一, 岡田養二, 近藤良, 増澤徹, ホモポラ型ハイブリッド 5 軸制御セルフベアリングモータに関する研究, 第 23 回茨城講演会講演論文集, 31-32, 2015, 査読無

藤野允基, 松田健一, 岡田養二, 戸高孝, ターボ機械用磁気軸受の基礎研究, 第 23 回茨城講演会講演論文集, 21-22, 2015, 査読無

松田健一, 鈴木力, 岡田養二, 近藤良, 増澤徹, ホモポラ・コンシクエント統合型 5 軸制御セルフベアリングモータの開発, 日本機械学会 [No.15-7] Dynamics and Design Conference CD-ROM 論文集, 1-8, 2015, 査読無

Y. Okada, H. Suzuki, K. Matsuda, R. Kondo, M. Enokizono, Development of highly efficient hybrid magnetic bearing and application to ultra-low temperature fluid pump, Bulletin of JSME Mechanical Engineering Journal Vol.2, No. 4, 1-10, 2015, 査読有  
DOI:10.1299/mej.15-00086.

松田健一, 熊谷渉, 近藤良, 増澤徹, IPM 型 5 軸制御セルフベアリングモータの小型化とコギングトルク特性改善に関する研究, 日本機械学会論文集, Vol.81, No.827, 1-12, 2015.7.25, 査読有  
DOI: 10.1299/transjsme.

Yohji Okada, Masaki Touno, Ken-ichi Matsuda<sup>1</sup>, Ryou Kondo, Takashi Todaka, Proposal of Hybrid type Active Magnetic Bearing for Turbo Machinery, 9-th

Japanese- Mediterranean Workshop on Applied Electromagnetic Engineering for Magnetic, Superconducting and Nano Materials JAPMED '9, 48-49, 2015, 査読無

松田健一, 藤野允基, 岡田養二, 近藤良, 戸高孝, ターボ機械用ハイブリッド磁気軸受の提案, 第 14 回「運動と振動の制御」シンポジウム USB 論文集, 289-292, 2015, 査読無

松田健一, 宮嶋要, 近藤良, 磁気軸受の新しい制御方法の提案, 第 23 回 MAGDA コンファレンス講演論文集, 137-140, 2014, 査読無

加藤正寛, 松田健一, 岡田養二, 近藤良, 増澤徹, ホモポラ型ハイブリッド 5 軸制御セルフベアリングモータの開発, 第 23 回 MAGDA コンファレンス講演論文集, 119-122, 2014, 査読無

松田健一, 宮嶋要, 岡田養二, 近藤良, 高効率超ワイドギャップ磁気軸受に関する研究, 第 22 回茨城講演会講演論文集, 37-38, 2014, 査読無

松田健一, 平根龍也, 近藤良, 増澤徹, アウターロータ型 5 軸制御セルフベアリングモータに関する研, 日本 AEM 学会誌, Vol.22, No.3, 386-392, 2014, 査読有

Y. Okada, H. Suzuki, K. Matsuda, R. Kondo and M. Enokizono, Development of Highly Efficient Magnetic Bearing and Application to Ultra-Low Temperature Fluid Pump, Proc. of The 12th International Symposium on Magnetic Bearings, 180-185, 2014, 査読無

岡田養二, 松田健一, 近藤良, 歩行補助用高トルク偏平モータの計算例, 第 26 回「電磁力関連のダイナミクス」講演会講演論文集, 307-310, 2014, 査読無

松田健一, 平根龍也, 近藤良, 増澤徹, アウターロータ型 5 軸制御セルフベアリングモータに関する研究, 第 22 回 MAGDA コンファレンス講演論文集, 289-294, 2013, 査読無

松田健一, 佐々木聡, 岡田養二, 戸高孝, 高速ターボ機械用磁気軸受の基礎研究, 第 22 回 MAGDA コンファレンス講演論文集, 63-64, 2013, 査読無

加藤正寛, 松田健一, 岡田養二, 近藤良, 増澤徹, コンシクエントポール型セルフベアリングモータの基本特性解析, 茨城講演会講演論文集, 157-158, 2013, 査読無

松田健一, 玉置将也, 岡田養二, 近藤良, 増澤徹, ホモポラ型ハイブリッド 5 軸制御セルフベアリングモータのモータ基本特性, 日本機械学会[No.13-18]第 13 回「運動と振動の制御」シンポジウム USB 論文集(13th MOVIC), 2013, 査読無

松田健一, 鈴木浩成, 岡田養二, 麻生公通, 榎園正人, 極低温ポンプ用磁気軸受の開発と特性試験, 第 25 回「電磁力関連のダイナミクス」講演会講演論文集, 280-281, 2013, 査読無

〔学会発表〕(計 17 件)

原田誠, コンシクエントポール型 5 軸制御セルフベアリングモータの基本特性解析, 第 23 回茨城講演, 2015/ 8/28, 茨城大学(茨城県・日立市)

徳井春彦, IPM 型 5 軸制御セルフベアリングモータに関する研究, 2015/ 8/28, 茨城大学(茨城県・日立市)

鈴木力, ホモポラ型ハイブリッド 5 軸制御セルフベアリングモータに関する研究, 第 23 回茨城講演, 2015/ 8/28, 茨城大学(茨城県・日立市)

藤野允基, ターボ機械用磁気軸受の基礎研究, 第 23 回茨城講演会, 2015/ 8/28, 茨城大学(茨城県・日立市)

松田健一, ホモポラ・コンシクエント統合型 5 軸制御セルフベアリングモータの開発, 日本機械学会[No.15-7] Dynamics and Design Conference, 2015/8/26, 弘前大学(青森県・弘前市)

Yohji Okada, Proposal of Hybrid type Active Magnetic Bearing for Turbo Machinery, 9-TH Japanese-Mediterranean Workshop on Applied Electromagnetic Engineering for Magnetic, Superconducting and Nano Materials, 2015.7.5, Sofia (Bulgaria)

松田健一, ターボ機械用ハイブリッド磁気軸受の提案, 第 14 回「運動と振動の制御」シンポジウム, 2015/6/22, 栃木県総合文化センター(栃木県・宇都宮市)

松田健一, 磁気軸受の新しい制御方法の提案, 第 23 回 MAGDA コンファレンス, 2014/12/4, サンポートホール高松(香川県・高松市)

加藤正寛, ホモポラ型ハイブリッド 5 軸制御セルフベアリングモータの開発, 第 23 回 MAGDA コンファレンス, 2014/12/4, サンポートホール高松(香川県・高松市)

宮嶋要, 高効率超ワイドギャップ磁気軸受に関する研究, 第 22 回茨城講演会, 2014.9.5, 茨城大学(茨城県・日立市)

Y. Okada, Development of Highly Efficient Magnetic Bearing and Application to Ultra-Low Temperature Fluid Pump, Proc. of The 12th International Symposium on Magnetic

Bearings, 2014.8.11, Linz (Austria)

岡田養二, 歩行補助用高トルク偏平モータの計算例, 第 26 回「電磁力関連のダイナミクス」講演, 2014.5.22, アイーナ岩手県民情報交流センター(岩手県・盛岡市)

松田健一, アウターロータ型 5 軸制御セルフベアリングモータに関する研究, 第 22 回 MAGDA コンファレンス, 2013.12.02, 宮崎観光ホテル(宮崎県・宮崎市)

松田健一, 高速ターボ機械用磁気軸受の基礎研究, 第 22 回 MAGDA コンファレンス, 2013.12.02, 宮崎観光ホテル(宮崎県・宮崎市)

加藤正寛, コンシクエントポール型セルフベアリングモータの基本特性解析, 第 21 回茨城講演会, 2013.9.6, 茨城大学(茨城県・日立市)

松田健一, ホモポーラ型ハイブリッド 5 軸制御セルフベアリングモータのモータ基本特性, 日本機械学会[No.13-18]第 13 回「運動と振動の制御」シンポジウム, 2013.8.27, 九州産業大学(福岡県・福岡市)

松田健一, 極低温ポンプ用磁気軸受の開発と特性試験, 第 25 回「電磁力関連のダイナミクス」講演会, 2013.5.15, 箱根小涌園ホテル(神奈川県・箱根町)

〔産業財産権〕

出願状況(計 1 件)

名称:「磁気軸受」

発明者:松田健一

権利者:茨城大学

種類:特許

番号:特願 2014-105356

出願年月日:平成 26 年 5 月 21 日

国内外の別: 国内

〔その他〕

ホームページ等

<http://info.ibaraki.ac.jp/scripts/websearch/index.htm>

6. 研究組織

(1)研究代表者

松田 健一(MATSUDA KENICHI)

茨城大学・工学部・准教授

研究者番号: 30302326

(2)研究分担者

近藤 良(KONDO RYOU)

茨城大学・工学部・教授

研究者番号: 90186867