

科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成 24 年 6 月 8 日現在

機関番号：17104

研究種目：基盤研究(C)

研究期間：2009～2011

課題番号：21560264

研究課題名（和文） 人工心臓用血液ポンプのための1軸制御浮上型モータの試作

研究課題名（英文） Development of one-axis controlled magnetic bearing motor for artificial heart pump

研究代表者

小森 望充 (KOMORI MOCHIMITSU)

九州工業大学・大学工学研究院・教授

研究者番号：30195870

研究成果の概要（和文）：軸流ポンプ型の一軸浮上制御磁気軸受を用いた人工心臓の開発をするため、本件研究ではロータの軸方向上下に設置した浮上部のみで軸方向と半径方向を浮上制御する磁気軸受を作製し、いくつかの基礎実験を行うことで、軸受機構の評価・検討を試みた。また、その結果を基に最適な軸受を作製し、装置の小型、軽量化と制御電流の省電力化を実現した。しかし、ロータの剛性が十分でなかったため、回転駆動モータの揚程実験を行うまでには至っていない。

研究成果の概要（英文）：In order to develop an artificial heart pump with one-axis control active magnetic bearing, actual pump structure with one-axis control technique is developed. Then, some experiments for the artificial pump are performed and the performance is evaluated. Based on the results, an optimum active magnetic bearing is made, and the miniaturization, light and smaller structure, and energy saving technique are realized. However, the stiffness is not enough for driving the rotor.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2009年度	1,900,000	570,000	2,470,000
2010年度	800,000	240,000	1,040,000
2011年度	900,000	270,000	1,170,000
年度	0	0	0
年度	0	0	0
総計	3,600,000	1,080,000	4,680,000

研究分野：工学

科研費の分科・細目：機械工学・知能機械学・機械システム

キーワード：バイオメカニクス、磁気浮上軸受

1. 研究開始当初の背景

人工心臓のための血液ポンプの研究は30年以上も前からなされてきており、人間の心臓と同じような動作をする拍動流型と遠心ポンプのような定常流型とが主に研究・開発されてきている。そして、最近の研究結果から、

定常流型でも問題がないことが分かってきている。一方、人工心臓用血液ポンプへの要望として、長期にわたる耐久性、低消費電力化、小型化、抗血栓性などがある。これらの要望を満たしてくれる方向として、機械的な接触部を持たない非接触の磁気軸受を用いた定常流型の血液ポンプの研究・開発が盛んになっ

てきている。磁気軸受を用いた血液ポンプは非接触であるため、耐久性、抗血栓性という面では非常に優れた機構といえる。しかし、低消費電力化、小型化といった面では、まだまだ研究・開発の余地が残っている。この解決法として、永久磁石を組み込むことによって、浮上に必要な5つの制御軸数（方向）を減らすことができ、低消費電力化にもなる。また、日本人の体型に合うような小型の人工心臓用血液ポンプが必要である。つまり、低消費電力化と小型化は人工心臓用血液ポンプの実現のためには、非常に重要な課題となっている。

2. 研究の目的

人工心臓用血液ポンプの実現のためには、低消費電力化と小型化とが非常に重要である。現在研究開発されている世界最小のものは2軸制御型であるため、1軸制御型が可能であれば非常に大きな革新研究になる。

そこで、本研究ではこの低消費電力化と小型化を同時に満たす人工心臓用血液ポンプを提案する。この血液ポンプは、制御のための左右の電磁石、ロータから構成される。ロータには永久磁石とタービンが組み込まれている。永久磁石は回転駆動のためのもので、ポンプ外部からコイルで励磁することができる。ロータの回転時に、血液はタービンによって矢印のように搬送される。今回提案する血液ポンプは1軸方向のみを制御する磁気軸受を用いた1軸制御型となる。

本研究では1軸制御型軸受を用いた浮上型モータの研究開発を目的とする。この大目標を達成するためには、(1)本研究で提案する1軸制御型磁気軸受の構造を明らかにする。(2)1軸制御型軸受を用いた浮上モータの構造を明らかにする。(3)この1軸制御浮上型モータの回転時の動特性を評価し、人工心臓用血液ポンプへの適用可能性を明らかにする。(4)また、本研究では低消費電力化を測るため、永久磁石を用いており、上記1軸制御型軸受への永久磁石の組み込みが可能かどうかを明らかにする。

3. 研究の方法

初年度では、試作・評価を通して1軸制御浮上型磁気軸受（片側）に関する問題点を明ら

かにし、それに対する技術を確立する。2年目以降では、1軸制御浮上型磁気軸受を設計・試作し、評価・検討を行う。以下に、研究計画を示す。

(1)【設計1】ここでは、特許申請した特許「磁気吸引型非接触搬送装置」(特願2004-346842)の具体的な設計と試作・評価を行う。特許では、電磁石、浮上体、位置センサ（渦電流センサ）、他にはコントローラ、アンプなどから構成される。電磁石は円柱状であり、したがって吸引力は円柱中心周りに対称である。また、位置センサは電磁石中心に設置されているので磁場の影響を受けやすいが、特許のように磁束がセンサ部を通過しないように構成している。浮上体には、ブリキの地球儀（直径5cm程度）を用いる。磁束密度の分布も含めた事前の評価を、磁場解析ソフトを用いて行う。制御に関しては、Matlab/Simulinkを中心としたシミュレーションを行い、最適なゲインなどを求める。制御手法としては最適制御を用いる。ここでは、積分機能を備えた最適制御を行う。積分機能を導入することで、地球儀の位置決めが可能となる。ここでの目標は、1軸制御浮上型磁気軸受の基本的な特性評価を行うことである。バイアス磁束はバイアス電流によって電磁石から発生させる。

(2)【試作・評価1】必要な電磁石は作製経験があり、コイルを内蔵して直径20mm程度を考えている。ここで重要なことは、位置センサが電磁石の磁束によって、どの程度影響を受けるかである。小型の位置センサ（直径1mm）を用いて磁気軸受を構成するが、浮上時の変位センサのノイズの状況などを評価する必要がある。例えば、磁束密度とセンサノイズとの関係などが考えられる。

(3)【設計2】ここでは1軸制御浮上型磁気軸受のバイアス磁束を永久磁石によって発生させる構造を考える。このことによってバイアス磁束を発生させるための電流をコイルに常時流す必要がなくなる。永久磁石は電磁石側に組み込む。血液ポンプを想定して、組み込む永久磁石はリング状の物を選定する。浮上体は、同様のブリキの地球儀を用いる。永久磁石を用いない場合と同様に、Matlab/Simulinkを用いて制御系設計を行い、制御手法としては最適制御を適用する。

(4) 【試作・評価2】ここでは先に試作した1軸制御浮上型磁気軸受を用い、永久磁石を電磁石に組み込む。ここでも、位置センサが電磁石の磁束によって、どの程度影響を受けるかを検討・評価する。永久磁石によるバイアス磁束は、磁路の関係で設計値と異なる可能性がある。バイアス磁束は位置センサの感度に影響が無い範囲でできるだけ大きくする。また、浮上体には重力以外の反発力を与えられないので、浮上体の質量を変化させて、浮上の状況を評価する。

(5) 【設計3】永久磁石が電磁石に組み込んであるが、ロータに組み込んでも構わない。これに関しては磁場解析ソフトにより磁場解析を行い、位置センサに影響の無い構造を検討する。更に考慮する必要があるのが、ラジアル方向の安定性である。1軸制御浮上型磁気軸受の場合、ラジアル方向には基本的には不安例であるので、受動的な安定性を考慮する必要がある。これらを考慮してロータ内部に同心円状（リング状）の空洞を設ける。このリング状の空洞を設けることによって、磁路をラジアル方向に限定する。これによって、ラジアル方向の剛性を受動的に得ることができる。この形状（空洞の大きさ）は磁場解析を行うことによって評価する。磁場解析では位置センサ部での磁束の強度も評価する。また、ここで重要なこととは、軸方向とラジアル方向のそれぞれの軸受剛性のバランスを考えることである。

(6) 【試作・評価3】前述の設計に基づいて1軸制御浮上型磁気軸受を試作する。電磁石の直径は20mm程度を想定しているので、ロータは直径10mm程度、長さ40mm程度を想定している。浮上制御には最適制御を用いる。制御に必要な各種パラメータは実測によって求める。電磁石とロータとのギャップは1mmを想定している。ギャップ1mmは比較的大きいが、人工心臓用血液ポンプを想定した場合、このギャップに血栓防止のための樹脂コーティングを行う必要があるからである。また、評価として軸方向の剛性評価のみならず、軸方向の剛性評価を行う。ロータ浮上時のラジアル方向の剛性は、次のステップの回転駆動のために非常に重要な評価項目である。

(7) 【モータの設計と試作】：回転駆動のためのロータの磁石配置を設計する。ロータに6極の永久磁石、ステータ側に8個の空芯コイルをそれぞれ設ける。磁場解析ソフトを利用して、ロータに永久磁石を配置した場合の磁束の分布について評価する。さらに、空芯コイルによって回転励磁した場合、発生する駆動力を見積もる。ロータはラジアル方向に対して受動的に安定であるため、ロータのラジアル方向の振動を極力抑える必要がある。そのために、ラジアル方向の振動を発生させるトルクむらがないように駆動する必要がある。解析では、トルクのむらが発生させたときのロータの変位を見積もる。回転駆動は計算機（DSP）、電力アンプを用いて行う。空芯コイルの励磁には、駆動トルクを任意に変化させることができるようにする。ラジアル方向の剛性が軸方向に比べて小さいので、駆動開始時は小さいトルクで駆動する必要がある。計算機には、ロータ振動変位を常時監視させ、変位が一定以上大きくなると駆動トルクを小さくする機構を設ける。また、回転実験時にロータがラジアル方向に飛び出す危険性があるため、ロータ周りをガードする必要がある。

4. 研究成果

(1) 基礎実験・解析の構成と結果：本研究に当たって、新しい浮上モデル作製の参考にするため、基礎的な実験を行う。その実験装置と全体のシステム構成を図1に示す。ロータの位置をステータの中心軸上に設けた穴に納められた変位センサによって検出し、その信号を目標に近づけるためPIDコントローラで制御する。その制御された信号を、パワーアンプ回路で電圧を電流に変換し、浮上制御用の電磁石を励磁する。この浮上部のみで軸方向と半径方向の支持・制御を行う。

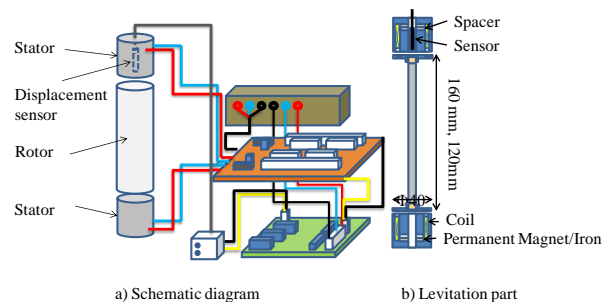


図1 システム構成

ロータの半径方向長さ（直径）を40mmとしたまま、ロータの軸方向長さを変化させ、浮上時の変位、及び加振実験の結果を図2、3に示す。この実験では、ステータ内に永久磁石を設置した場合としない場合について調べた。永久磁石を配さない場合、同形の鉄を用い、スペーサも配さない。

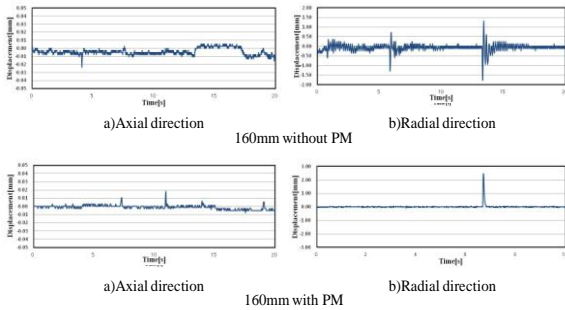


図2 インパルス応答 (160mm)

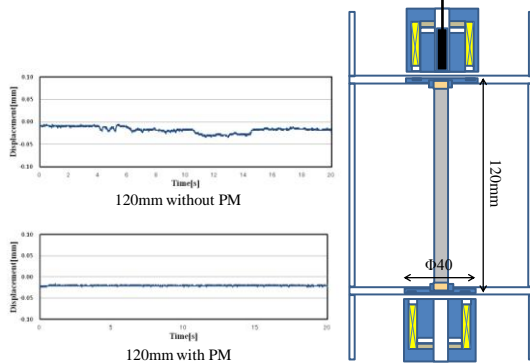


図3 インパルス応答 (120mm)

浮上実験の結果、永久磁石を用いることで、浮上が安定し、消費電力も少なくすることができた。また、ロータの軸方向長さ120mmでは安定浮上が困難だった為、図3に示すような傾き方向の支持を用いて浮上させた。また、傾き方向に支持をしている為、加振実験は行っていない。原因を詳しく調べるため、有限要素法を用いて、同様のモデルで傾き時ほどの程度力がかかっているか調べた。その結果を図4に示す。

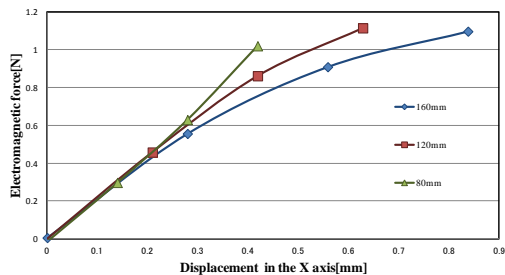


図4 X軸方向の吸引力と変位との関係

実験と解析の結果から、ロータの軸方向長さ

160mmの場合と同形のグラフが得られるように磁気軸受を作製することにした。

(2)解析による構造設計:ロータの半径方向長さ、と軸方向長さの比が1:4になるようにいくつかの磁気軸受を考案し、有限要素法を用いて調べた。考案したモデルを図5に示し、解析した結果を図6に示す。

解析の結果から、ロータの軸方向長さ112mm、コイル底部から永久磁石までの高さ2mmの場合、ロータの軸方向長さ160mmと最も近い結果となった。次章ではこのモデルを実際に行き作製し、実験を行うことにした。

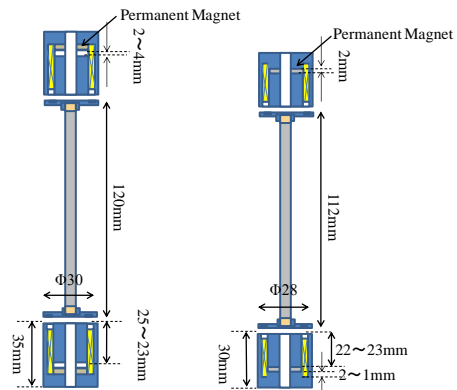


図5 ロータ寸法概要

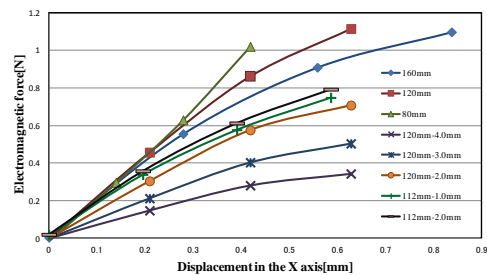


図6 X軸方向の吸引力と変位との関係

(3)浮上及び回転実験 得られた磁気軸受のモデルに回転駆動部を設け、実際に装置を作製し、浮上及び加振実験を行った。実験装置を図7に、浮上と加振実験の結果を図8に示す。

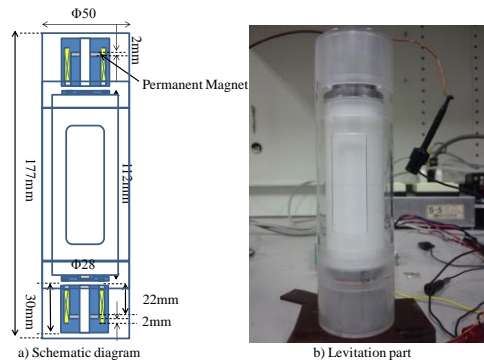


図7 システム概観

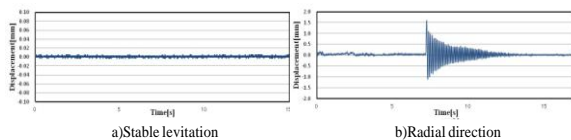


図8 インパルス応答

図8 a)に示すように、ロータの軸方向長さ160mmで永久磁石を設置した場合と同様安定して浮上することが分かった。しかし、半径方向の加振実験では図8 b)に示すように加振に対して応答出来ているものの、図2に示している程素早く応答出来ていない。

5. 主な発表論文等

[雑誌論文] (計2件)

- ① 井上淳司, 川西正美, 森井茂樹, 小森望充, 鋼板形状制御・制振装置の開発: 第1報, 要素試験結果, 日本AEM学会誌, 査読有, Vol. 17, No. 4, pp. 611-616, 2009.
- ② H. Mitsuda, A. Inoue, B. Nakaya and M. Komori, Improvement of Energy Storage Flywheel System with SMB and PMB and Its Performances, IEEE Trans. on Applied Superconductivity, 査読有, Vol. 19, no. 3, pp. 2091-2094, 2009.

[学会発表] (計6件)

- ① 廣瀬健太郎, 小森望充, 坂井伸朗, 浅海賢一, 一軸浮上制御型磁気軸受の構造に関する検討(その3), 日本機械学会九州支部講演論文集 No.128-1 (2012年3月16日, 佐賀大学) pp.247-248
- ② 廣瀬健太郎, 小森望充, 坂井伸朗, 浅海賢一, 一軸浮上制御磁気軸受の構造に関する検討(その2), 平成23年度電気関係学会九州支部連合大会公演論文集(佐賀大学, 2011年9月26-27日) p. 1(CD-ROM).
- ③ 廣瀬健太郎, 小森望充, 浅海賢一, 一軸浮上制御磁気軸受の構造に関する検討, 日本機械学会九州支部講演論文集 (2011年3月17日, 九州大学) pp. 157-158
- ④ 野中靖介, 小森望充, 一軸浮上制御した磁気軸受回転機構の評価・検討, 日本機械学会九州支部講演論文集 (2010年3月15日, 熊本大学) pp. 43-44
- ⑤ 野中靖介, 小森望充, 一軸浮上制御した磁気軸受回転機構の評価・検討, 第28回計測自動制御学会九州支部学術講演会 (2009年11月28-29日, 九州大学) pp. 127-128
- ⑥ 野中靖介, 小森望充, 一軸浮上制御した磁気軸受機構の評価・検討, 平成21年度電気関係学会九州支部連合大会 (2009年9月28-30日, 福岡県・九工大) p.1 (CD-ROM)

[その他]

ホームページ等: なし

6. 研究組織

(1) 研究代表者

小森 望充 (KOMORI MOCHIMITSU)

九州工業大学・大学院工学研究院・教授

研究者番号: 30195870