

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 28 年 6 月 20 日現在

機関番号：52101

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2013～2015

課題番号：25820077

研究課題名(和文)磁気浮上型人工心臓の力学的特性の解明と磁気浮上制御系の開発

研究課題名(英文) Study on mechanical characteristics of magnetic levitated artificial heart and development of magnetic levitation control

研究代表者

小沼 弘幸 (Onuma, Hiroyuki)

茨城工業高等専門学校・電子制御工学科・助教

研究者番号：90520841

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)：小柄な患者にも埋め込み可能な高耐久な補助人工心臓を実現するため、磁気浮上型補助人工心臓の力学的特性(能動制御力、負バネ力、受動安定性および流体力)、小型化に関する研究を行った。ロータ・インペラに作用する磁気的力を推定するため、セルフベアリングモータの能動制御力と負バネ力、軸方向復元力の推定式を導出した。数値流体解析を用いてインペラに作用する流体力とポンプ性能を推定し、遠心ポンプを設計した。そして、小型セルフベアリングモータと小型磁気浮上遠心血液ポンプを開発し、その基本性能の評価を行ったので報告する。

研究成果の概要(英文)：In order to develop an implantable ventricular assist device that has high durability for a small adult patient, studies on mechanical characteristics and miniaturization of the magnetically levitated ventricular assist device were performed. To estimate magnetic attractive forces acting on the rotor-impeller, the estimate equation of magnetic suspension force in the radial direction, the estimate equation of negative spring force in the radial direction and the estimate equation of the restoring force in the axial direction were derived. The pump performance and the fluid force acting on the rotor-impeller using a computational fluid dynamics were estimated, and a centrifugal pump was designed. The small self-bearing motor and the small magnetically levitated centrifugal blood pump were developed, and basic performances of these were evaluated.

研究分野：工学

キーワード：セルフベアリングモータ 磁気浮上 磁気軸受 人工心臓 遠心ポンプ

1. 研究開始当初の背景

体内埋め込み型人工心臓は年オーダーの機械的寿命、血液破壊(溶血)や凝固(血栓)が生じない血液適合性が望まれるため、非接触でインペラを支えることが出来る磁気浮上技術や動圧浮上技術を応用した人工心臓が研究・開発されている。磁気浮上型人工心臓としては、人工心臓をお腹の中に埋め込むものが製品化されている。また、人工心臓を直接心臓に取り付ける小柄な患者にも埋め込み可能な動圧浮上型人工心臓も開発されている。動圧による浮上力は流路が非常に狭くなければ強く発生しないので、血液流路が狭いため溶血などの血液適合性が低いことが懸念される。磁気浮上型人工心臓のほうが血液流路を広くとることができるため、血液適合性が良いと考える。このことから、より小型な磁気浮上型人工心臓が開発できれば、血液適合性が良く、直接心臓に取り付けられ埋め込みに対する体の負担が軽減でき、なおかつ小柄な患者にも埋め込み可能な人工心臓が実現できると考える。

2. 研究の目的

直接心臓に取り付けられ埋め込みに対する体の負担が軽減でき、なおかつ小柄な患者にも埋め込み可能な磁気浮上型人工心臓の実現を目指し、これまで開発してきた1つのステータで浮上ロータの磁気浮上と回転を実現できる径方向支持回転型セルフベアリングモータを用いた磁気浮上型人工心臓の小型化、磁気支持の信頼性の向上を図ることが本研究課題の目的である。

具体的には、磁気支持特性の推定式の検討、力学的特性と磁気浮上性能の関係の検討、ロータ・インペラの変動によるポンプ性能の変化と流体力の変化の検討、小型な磁気浮上人工心臓の開発と力学的特性を考慮した磁気浮上制御の検討を行った。

3. 研究の方法

径方向支持回転型セルフベアリングモータの概要を図1に示す。本セルフベアリングモータは、アウターロータ構造で内壁面に等角度に分割され互い違いに着磁された8つのセグメント型永久磁石が配置されたロータとロータの内側に配置した突極の先端に傘がある12突極ステータにより構成される。各セグメント型永久磁石は、異方性磁石として磁石の中央を基準として平行に着磁されている。ロータの回転と径方向の磁気支持を独立に制御するため、 $P \pm 2$  極理論を採用し回転制御用コイル(3相8極)と磁気支持用コイル(2相6極)を別々に設けている。各相のコイルは集中巻として巻かれている。またロータとステータの軸方向厚みを薄型にすることで、ロータとステータ間の強い磁気結合によりロータの軸方向の変位および傾きを静的に磁気支持している。これにより、デバイスの小型化、薄型化、制御系の簡略化を

図っている。

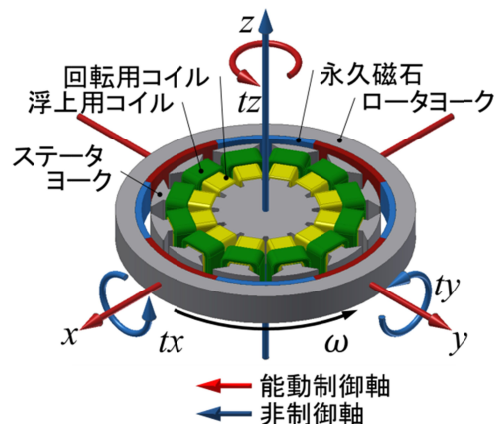


図1 径方向支持回転型セルフベアリングモータの概要

(1) 磁気支持特性の推定式

径方向磁気支持力の推定式、負ばね力の推定式、軸方向復元力の検討を行った。導出に当たって、磁束密度分布の検討と推定式で得られる力の検証のため磁場解析を行った。径方向磁気支持力と負ばね力では、ロータとステータ間のエアギャップ中の周方向の磁束密度分布を矩形波状と仮定した。磁束密度分布の径方向成分をフーリエ級数展開し推定式を導出した。軸方向復元力では、軸方向の磁束密度分布形状を磁束密度の径方向成分は台形波、軸方向成分は線形に近い分布に仮定した。ロータの軸方向変位に伴い磁束密度の変化が激しい部位の変化の傾向を考慮して変化させた磁束密度分布を用いて軸方向復元力推定式を導出した。

(2) 力学的特性と磁気浮上性能の関係

磁気支持特性の磁気浮上性能への影響を検討するため、これまでに開発している磁気浮上遠心血液ポンプ(図2)を用いて磁気支持特性の異なる3種類のロータ(表1)を用いた比較実験を行った。

比較実験は、径方向磁気支持力および負ばね力の測定、軸方向復元力の測定、傾き復元トルクの測定、モータトルク測定、磁気浮上性能およびポンプ性能の測定を行った。

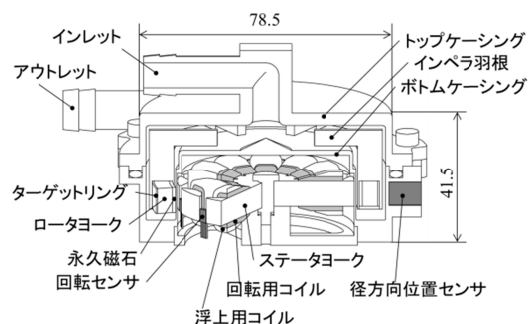


図2 これまでに開発している磁気浮上遠心血液ポンプ

表1 ロータの主要パラメータ

タイプ	A	B	C
内径(mm)	58	58	59
エアギャップ(mm)	1.5	1.5	2
磁石 径方向厚み(mm)	1	1	1.5
磁石 保磁力 (kA/m)	756	692	692
磁石 残留磁束密度 (T)	1.03	0.95	0.95
エアギャップ磁束密度 (T)	0.392	0.360	0.387

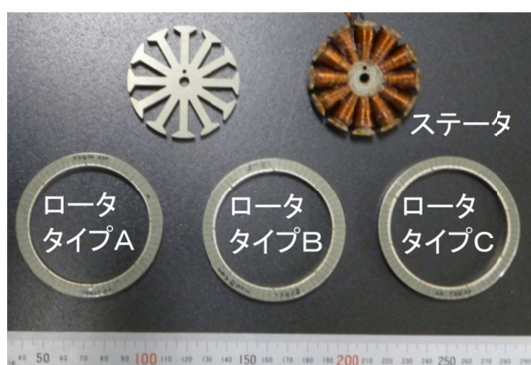


図3 比較したロータ

(3) ロータ・インペラの変動によるポンプ性能の変化と流体力の変化

数値流体解析を用いて、インペラ形状の検討とロータ・インペラの変動によるポンプ性能の変化と流体力の変化の検討を行った。これまで、インペラをオープンインペラとしていたが、インペラの軸方向と傾きの変動を変位センサで計る検出面とするためとポンプ効率の向上のためにクローズドインペラとすることとした。インペラ形状の検討として、6枚羽のオープンインペラ、8枚羽のオープンインペラ、8枚羽のクローズドインペラのポンプ性能と流体力を検討した。8枚羽のクローズドインペラにおいて、ロータ・インペラの変動によるポンプ性能の変化と流体力の変化を検討した。

(4) 小型な磁気浮上人工心臓の開発

小型セルフベアリングモータを試作した(図5)。ステータは12突極とし、外径は35mmである。回転用コイルとして各突極に50巻の3相8極を設けた。浮上用コイルとして各突極に80巻の2相6極を設けた。ロータ内面に8極の永久磁石を配置した。ロータの外径は45.6mm、内径は37.6mmである。ステータとロータの軸方向厚みは5mmである。ロータとステータ間のエアギャップは1.3mmである。

図4に試作した小型磁気浮上遠心血液ポンプの概略図を示す。図5に試作した小型磁気浮上遠心血液ポンプの部品の写真を示す。試作したセルフベアリングモータをポンプ中央に配置し、ステータを覆うようにボトムケーシングがある。ロータはターゲットリン

グと樹脂製のケースで覆い、ロータの上部に8枚の羽根を持つクローズドインペラを設け、ロータインペラを構成した。ロータインペラの径方向変位測定用にロータの外半径側のボトムケーシングに渦電流センサを配置している。ロータインペラの回転角を測定するためにステータの溝にホール素子を配置している。ロータインペラの軸方向変位測定用にトップケーシング上部に渦電流センサを配置している。ポンプ室の内径は48mm、内側軸方向高さは19.5mmである。ロータインペラの外径は47mm、軸方向高さは16.6mm、重さは33gである。

試作したセルフベアリングモータの評価として、径方向磁気支持力と負ばね力の測定、軸方向復元力の測定、傾き復元トルクの測定、モータトルク測定を行った。試作した小型磁気浮上遠心血液ポンプの評価として、磁気浮上性能とポンプ性能の測定を行った。

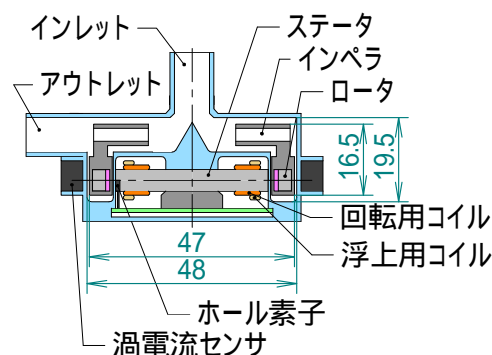


図4 試作した小型磁気浮上遠心血液ポンプの概略図

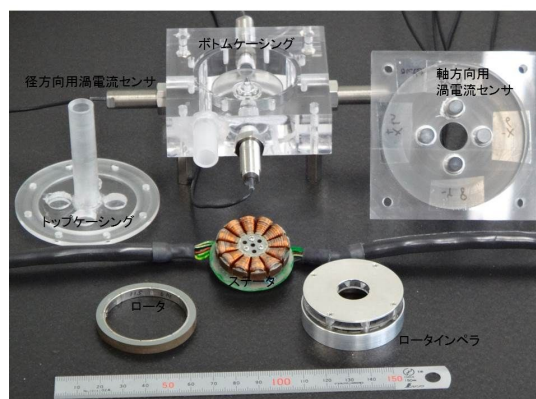


図5 試作した小型磁気浮上遠心血液ポンプの写真

(5) 力学的特性を考慮した磁気浮上制御

回転磁界により軸方向の復元力を制御できることが磁気支持特性の推定式の検討で明らかとなった。そこで、試作した小型磁気浮上遠心ポンプを用いて、回転磁界の位相差を変更する制御を考案し、同一回転で位相差と磁気浮上性能の関係を確認した。

4. 研究成果

(1) 磁気支持特性の推定式

径方向磁気支持力の推定式として次式を得た。

$$F_x = \frac{B_M B_E z R \pi}{2\mu_0} \left(1 + \frac{3g}{R}\right) (a_{m4} c_{e3} - a_{m20} c_{e21} + \dots) \cos(\varphi) \quad (1)$$

ここで、 $B_M$ は永久磁石の磁束密度の波高値、 $B_E$ は浮上磁界の磁束密度の波高値、 $z$ はロータとステータの軸方向厚み、 $R$ はエアギャップ中心の座標中心からの径方向長さ、 $g$ はエアギャップ長、 $\varphi$ は永久磁石の磁束密度分布のN極の中心と浮上磁界の磁束密度分布のN極の中心との相対角度、 $\mu_0$ は真空の透磁率、 $(a_{m4} c_{e3} - a_{m20} c_{e21} + \dots)$ は磁束密度分布を矩形波および階段状の形状としてフーリエ級数展開して得られる係数である。得られた推定式から、 $B_E$ と $\varphi$ を変化させることで、任意の強さと方向に磁気支持力を発生できることを確認した。本径方向磁気支持力の推定式により誤差15%程度で推定することが可能となった。

負ばね力の推定式として次式を得た。

$$F_{rdx} = \frac{zR\pi}{2\mu_0} (a_0 a_1 + a_1 a_2 + \dots) \quad (2)$$

ここで、 $(a_0 a_1 + a_1 a_2 + \dots)$ は磁束密度分布を矩形波状としてフーリエ級数展開して得られる係数である。本負ばね力の推定式により誤差9%程度で推定することが可能となった。

軸方向復元力の推定式として次式を得た。

$$F_z = F_z(B_{Mr} B_{Mz}) + F_z(B_{Lr} B_{Lz}) + F_z(B_{Rr} B_{Rz}) - F_z(B_{Mr} B_{Rz}) \cos(\psi) - F_z(B_{Rr} B_{Mz}) \cos(\psi) \quad (3)$$

ここで、永久磁石による磁束密度分布の径方向成分を $B_{Mr}$ 、軸方向成分を $B_{Mz}$ 、浮上磁界による磁束密度の径方向成分 $B_{Lr}$ 、軸方向成分 $B_{Lz}$ 、回転磁界による磁束密度の径方向成分 $B_{Rr}$ 、軸方向成分 $B_{Rz}$ 、回転磁界の位相角を $\psi$ とする。得られた推定式から、浮上磁界では位相差 $\psi$ の値に関係なく磁束密度の波高値の大きさにより復元力が増加すること、回転磁界では磁束密度の波高値の大きさと位相差 $\psi$ の値により復元力が増減することが分かった。また、永久磁石による磁束密度に比べて浮上磁界と回転磁界の磁束密度を低く設計すれば、浮上磁界と回転磁界による復元力への影響を抑えられること、回転磁界の磁束密度の大きさと位相差 $\psi$ を制御することで復元力を制御できることも分かった。本軸方向復元力の推定式により誤差30%程度で推定することが可能となった。

## (2) 力学的特性と磁気浮上性能の関係

タイプA、B、Cの径方向磁気支持力はそれぞれ起磁力100 Atで6.8 N、6.2 N、5.2 Nとなった。タイプA、B、Cの負ばね力は径方向に0.1 mm変位時に2.1 N、2.0 N、1.2 Nとなった。タイプA、B、Cの軸方向復元力は軸方向に1 mm変位時に3.3 N、2.8 N、3.0 Nとなった。タイプA、B、Cの傾き復元トルクは、1度の傾きで0.009 Nm、0.006 Nm、0.008 Nmとなった。タイプA、B、Cのモータトルク性能として、回転数1400 rpmで40 mNmのトルク負荷時の回転消費電力は8.0 W、8.6 W、8.0 Wとなった。タイプA、B、Cのポンプ

性能として、それぞれ回転数1500 rpmで流量5 L/min、揚程100 mmHgを発生し、総消費電力は10.9 W、13.9 W、10.0 Wとなった。タイプA、B、Cの磁気浮上性能として径方向の振動振幅は0.13 mm、0.15 mm、0.076 mmとなり軸方向の振動振幅は0.058 mm、0.036 mm、0.047 mmとなった。

これらの結果から負ばね力、軸方向復元力と傾き復元トルクの関係は比例関係になっていないことが分かった。このことから設計により負ばね力が小さくても受動安定性を高くすることが可能であると考えられる。径方向磁気浮上は負ばね力が小さい方が安定していた。このことから負ばね力を小さくする設計が重要であると考えられる。

## (3) ロータ・インペラの変動によるポンプ性能の変化と流体力の変化

数値流体解析により回転数3000 rpm、流量5 L/minとしたとき、6枚羽のオープンインペラが発生する揚程は112 mmHg、8枚羽のオープンインペラが発生する揚程は120 mmHg、8枚羽のクローズドインペラが発生する揚程は131 mmHgであった。羽根枚数が多くシュラウドのある8枚羽のクローズドインペラが良いポンプ性能を発揮すると考える。また、8枚羽のクローズドインペラにおいて、ロータ変位(径方向 $\pm 0.1$  mm、軸方向 $\pm 0.5$  mm)による揚程の変化は2%程度であり、ロータ変位の揚程への影響は小さいと考える。8枚羽のクローズドインペラにおいて、中心位置における径方向と軸方向の流体力の最大値は0.77 Nと-3.3 Nであった。ロータ変位(径方向 $\pm 0.1$  mm、軸方向 $\pm 0.5$  mm)による揚程の変化は径方向変位時には39%の増加、軸方向プラス変位時には軸方向マイナス方向に9%の増加であったが、マイナス変位時には軸方向マイナス方向に0.2%の増加であった。軸方向マイナス方向に大きな流体力が発生していることが分かった。

## (4) 小型な磁気浮上人工心臓の開発

試作したセルフベアリングモータの径方向磁気支持力は起磁力80 Atで2.3 N、負ばね力は径方向変位0.1 mmで1.2 Nとなり十分な径方向位置制御ができることを確認した。軸方向復元力は軸方向変位1 mmで2.7 Nとなり、回転磁界により復元力を増減させることができることを確認した。傾き復元トルクは1度の傾きで5.7 mNmとなった。モータトルク性能として回転数2300 rpmで10 mNmのトルク負荷時の回転消費電力は6.7 Wであった。

試作した小型磁気浮上遠心血液ポンプのポンプ性能は回転数2300 rpmで流量5 L/min、揚程100 mmHgを発生し、そのときの総消費電力は7.1 Wであった。このときの磁気浮上性能としての径方向の振動振幅は0.014 mm、軸方向の振動振幅は0.039 mmであった。補助人工心臓として十分なポンプ性能と磁気

浮上性能を有することを確認した。しかし、軸スラストが大きくポンプ締切時にロータインペラが軸方向に大きく変位しボトムケーシングに接触していた。今後、バランスホールを設ける等して軸スラスト低減を図る必要があると考える。

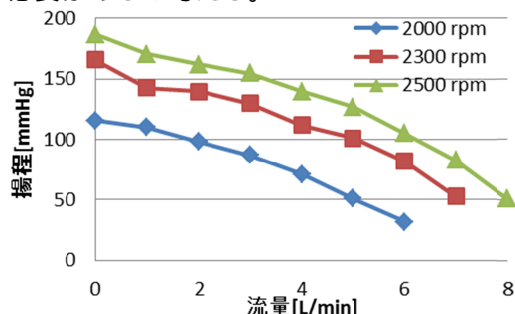


図6 ポンプ性能

(5) 力学的特性を考慮した磁気浮上制御

回転数2300 rpm、流量5L/min、揚程100 mmHgにおいて回転磁界と永久磁石磁界の位相差90度するとき、ロータインペラの軸方向平均位置は-0.50 mmであった。そこから位相差を減少させると変位が減る方向に上昇し、逆に位相差を増加させると変位が増加する方向に移動した。また、径方向の振動振幅は位相差を変化させてもあまり変化しないが、軸方向の振動振幅は位相差を増加させると大きくなった。回転の消費電力は位相差90度で最小となり、ずれるほどに大きくなり位相差60度以下および120度以上では急激に大きくなった。浮上の消費電力は位相差が小さいほど小さかった。これは回転磁界により軸方向の復元力が増加しステータとロータの軸方向のずれが少なくなることで径方向の磁気浮上特性が改善されることが要因であると考えられる。これらの結果から位相差を60度から90度の範囲で制御することが磁気浮上性能に適している可能性があることが分かった。

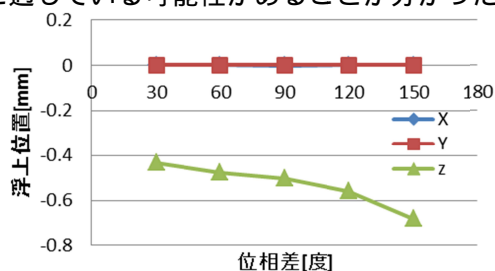


図7 浮上位置

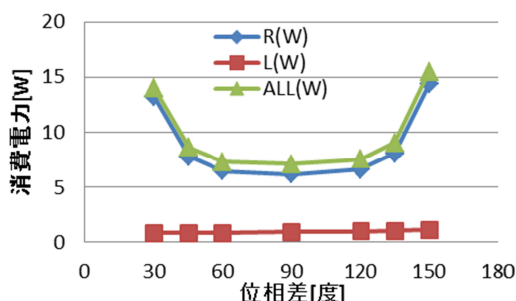


図8 消費電力

5. 主な発表論文等

[雑誌論文](計1件)

小沼弘幸、増澤徹、12突極ラジアル型セルフベアリングモータの磁気支持特性の推定、日本AEM学会誌、査読有、Vol.22、No.2、2014、pp. 88-95

[学会発表](計5件)

Hiroyuki Onuma, Toru Masuzawa and Michiko Murakami, Development of radial type self-bearing motor for small centrifugal blood pump, Proceedings of The 15th International Symposium on Magnetic Bearings, 2016.8.3~6, Kitakyushu, Japan

小沼弘幸、増澤徹、村上倫子、ラジアル型セルフベアリングモータにおける受動安定性の簡易推定式の検討、第24回MAGDAコンファレンス in Tohoku 講演論文集、pp.53-58、2015年11月12日~14日、宮城県仙台市 東北大学

小沼弘幸、磁気浮上遠心血液ポンプに用いるラジアル型セルフベアリングモータの小型化、平成26年電気学会電子・情報・システム部門大会 講演論文集、pp.1394-1395、2014年9月3日~6日、島根県松江市 島根大学

Hiroyuki Onuma and Toru Masuzawa, Evaluation of Magnetic Suspension Characteristics and Levitation Performance of A Centrifugal Blood Pump Using Radial Type Self-Bearing Motor, Proceedings of The 14th International Symposium on Magnetic Bearings, pp.174-179, 2014.8.11-14, Johannes Kepler University, Linz, Austria

小沼弘幸、増澤徹、12突極ラジアル型セルフベアリングモータの磁気支持特性の推定、第22回MAGDAコンファレンス in 宮崎 講演論文集、pp.79-84、2013年12月2日~3日、宮城県宮崎市 宮崎観光ホテル

6. 研究組織

(1)研究代表者

小沼 弘幸 (ONUMA, Hiroyuki)  
 茨城工業高等専門学校・電子制御工学科・助教  
 研究者番号：90520841