

機関番号：13801

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2009～2010

課題番号：21760205

研究課題名(和文) 極薄形遠心ポンプ用3次元ベアリングレスモータの基礎研究

研究課題名(英文) A three-dimensional bearingless motor for a disk-shaped centrifugal pump

研究代表者

朝間 淳一 (ASAMA JUNICHI)

静岡大学・工学部・准教授

研究者番号：70447522

研究成果の概要(和文)：本研究では、体内植込式人工心臓・工業用ベアリングレスポンプへの応用が可能な、極薄形ベアリングレスモータの実現を目的とし、主に以下の成果を得た。理論計算をもとに、磁気支持力の発生方向の誤差が最小となる新しい巻線構造を提案した。また、実験により、提案構造が方向誤差の最大値を90%、定格回転数での振れ回り、および消費電力をそれぞれ16%、44%低減可能であることを実証した。

研究成果の概要(英文)：The research objective is to realize a bearingless disk motor intended for use as centrifugal pumps, such as implantable artificial hearts, chemical pumps, etc. Based on the numerical calculation, a novel suspension winding configuration to minimize an error of the suspension force direction was proposed. In comparison to the conventional winding configuration, the proposed one significantly reduced the direction error, vibration and power consumption at a rated speed by 90%, 16%, and 44%, respectively.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2009年度	1,700,000	510,000	2,210,000
2010年度	1,800,000	540,000	2,340,000
総計	3,500,000	1,050,000	4,550,000

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：ベアリングレスモータ, 磁気軸受, 磁気浮上, 遠心ポンプ

## 1. 研究開始当初の背景

ベアリングレスモータは、磁気力により回転子を非接触で支持するモータであり、高耐久性、無摩耗・無発塵、メンテナンスフリーなどの利点を有する。このため、遠心式血液ポンプ(以下、人工心臓)への応用が提案されている。人工心臓は、腹部に縦置きで植え込まれるため、薄形構造が望まれる。さらに、人工心臓に限らず、設置面積が小さい工業用ベアリングレスポンプの需要も近年増加している。そこで本研究では、体内植込式人工心臓・工業用ベアリングレスポンプへの応用が可能な、極薄形ベアリングレスモータの実現を目的としている。

研究開始当初までに、コイルエンドが軸方向に広がらない小形・高剛性・低消費電力の新しい2軸能動制御形(x,y)ベアリングレスディスクモータを提案した(図1)。また、3次元有限要素法による電磁界解析、設計、および試作(図2)を行い、0rpmでの磁気浮上に成功した。モータ外径、および有効高さは、それぞれ70mm、10mm、回転子の変位センサーターゲットを含めた高さは16mmである。さらに、回転子の回転角度が変動した時の、一軸の一定制御電流に対する磁気支持力の方向と大きさの変動(支持力干渉、支持力脈動)を低減する新しい巻線構造を提案した(図3)。

しかし、図3に示す提案巻線構造において、

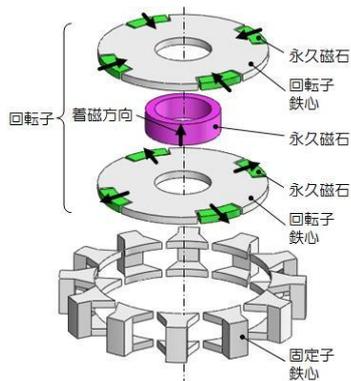


図1 ベアリングレスディスクモータの構造

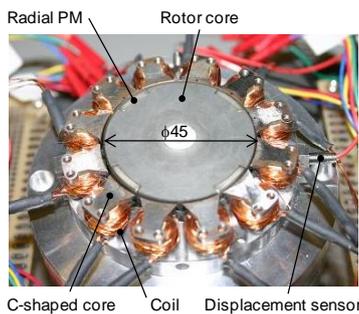


図2 試作ベアリングレスディスクモータ

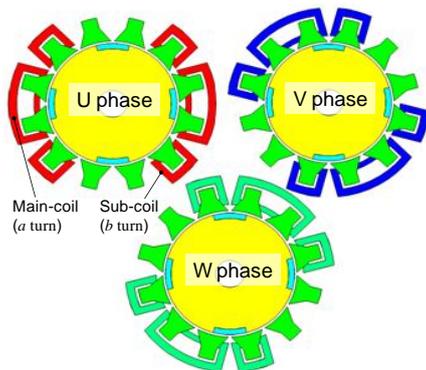


図3 支持力干渉・脈動を低減する新しい巻線構造

支持力干渉・脈動を極小にするメインコイルとサブコイルの巻線比  $N=b/a$  は明確ではなかった。また、安定な磁気浮上回転が実現されず、提案巻線構造の効果、磁気支持・回転性能、消費電力・効率等は不明であった。

## 2. 研究の目的

本研究の目的を以下に示す。

- 磁気支持力の理論計算を基に、支持力干渉・脈動を極小にする巻線比  $N$  を明らかにし、図2に示す試作機で実証する。
- 安定な磁気浮上回転を実現し、新しい巻線構造の回転特性への効果を検証する。
- 提案するベアリングレスディスクモータを小形遠心ポンプに適用する。

## 3. 研究の方法

「2. 研究の目的」の各項目に対応させ、本研究の方法を以下に示す。

### A) 最適巻線比 $N$ の同定

図4のように、支持力の  $X$ 、 $Y$  軸方向成分  $F_x$ 、 $F_{yx}$  の逆正接を干涉角  $\phi_e$ 、回転角度に対する  $F_x$  の変動を支持力脈動と定義する。 $X$  軸制御電流  $i_x$  を流した時に発生する磁気支持力  $F_x$ 、 $F_{yx}$  を、起磁力分布を基にした理論計算により算出し、 $\phi_e$  と支持力脈動が極小となる巻線比  $N$  を同定する。また、試作ベアリングレスディスクモータにおいて、回転子の回転角度を変えて、同定した巻線比と  $b=0$  ( $N=0$ ) の従来巻線比での支持力を測定し、比較検討を行う。

### B) 提案線構造の効果検証

図2では、回転子下側に変位センサターゲットを取り付けた。この場合、読み取り誤差の影響で安定な磁気浮上回転ができない恐れがある。そこで回転子上部にセンサターゲットを追加し、差動検出することで磁気浮上回転の安定化を図る。次いで、ベアリングレスディスクモータの回転試験を行う。提案・従来巻線比で、回転子の振動振幅、磁気支持巻線の消費電力を測定し、比較検討する。

### C) 小形遠心ポンプへの応用

先述した構造では、ポンプに適用した場合、サイズが大形化する。そこで、変位センサを固定子間に配置し、回転子の中心部をターゲットとすることで、システムの小型化を図る。また、回転子と固定子を樹脂成型することで、ベアリングレスディスクモータのポンプ化を図る。

## 4. 研究成果

「2. 研究の目的」の各項目に対応させ、本研究の成果を以下に示す。

### A) 最適巻線比 $N$ の同定

本研究で使用するベアリングレスモータは、8極12スロットのコンシクエントポール構造である。 $X$  軸制御電流  $i_x$  を流した時に発生する磁気支持力  $F_x$ 、 $F_{yx}$  は、起磁力分布  $A$

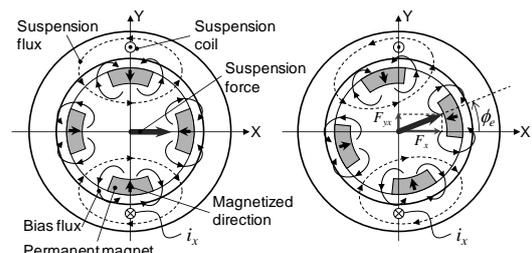


図4 回転角度による支持力の大きさと方向の変動

を用いて表わせる。その結果、回転子の永久磁石の孤角  $\phi_p$  が  $30^\circ$  で、巻線比  $N$  が  $1/(\sqrt{3}+1) \approx 0.366$  の時、干渉角  $\phi_e$  はどの回転角度においても零であり、さらに X 方向への支持力は回転角度によらず一定値となり、支持力脈動が発生しないことを明らかにした。

図 5 に、理論計算により求めた干渉角  $\phi_e$  を示す。  $N=0$ 、 $\phi_p=45^\circ$  の従来のコンシクエントポールモータ構造では、回転角度が  $22.5^\circ$  付近でピークが観察された。  $\phi_p=30^\circ$  として鉄心極部分を広げても、ピーク値は 32% 低減に留まった。一方、  $N=0.366$  の場合、  $\phi_p=45^\circ$  においても 80% 低減可能であり、  $\phi_p=30^\circ$  とすると全ての回転角度において干渉角  $\phi_e$  は  $0^\circ$  であった。

図 6 に、理論計算により求めた支持力脈動を示す。  $N=0$ 、 $\phi_p=30^\circ$  の平均値を 1N としている。  $N=0$  の場合、  $\phi_p=30^\circ$ 、 $45^\circ$  においても脈動が観察され、平均値からの最大誤差は約 12% であった。一方、  $N=0.366$  にすると、  $\phi_p=45^\circ$  でも脈動はほとんど観察されず、  $\phi_p=30^\circ$  では、脈動成分は零であり、回転角度によらず、支持力は一定であった。

図 7 に、  $\phi_p=30^\circ$  での有限要素法と実験により求めた干渉角  $\phi_e$  を示す。有限要素法と実験結果は同様の傾向を示している。  $N=0$  の時、理論計算同様、回転角度が  $15^\circ$  近傍でピークが観察されたが、絶対値が 2 倍程異なった。これは、理論計算を簡略化するための計算仮定に起因する。一方、  $N=0.366$  の時、有限要素法、および実験により求めた干渉角はほぼ

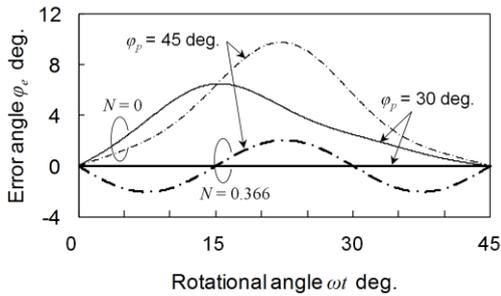


図 5 理論計算により求めた干渉角

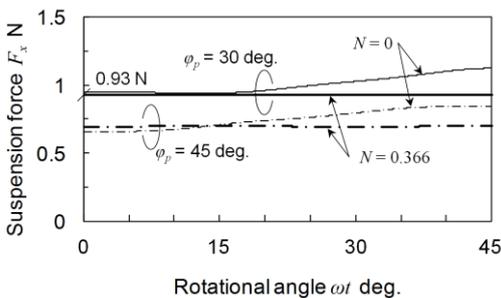


図 6 理論計算により求めた支持力脈動

零であった。

図 8 に、  $\phi_p=30^\circ$  での有限要素法と実験により求めた支持力脈動を示す。  $N=0$  の時、実験では平均値から最大 21% の誤差が生じたが、  $N=0.366$  の時、支持力は全ての回転角度においてほぼ一定であった。以上より、提案する巻線構造において、磁石孤角  $\phi_p=30^\circ$ 、巻線比  $N=0.366$  とすると、干渉角、および支持力脈動が極小となることを実証した。

## B) 提案線構造の効果検証

回転子上部にセンサターゲットを追加し、差動検出することで磁気浮上回転の安定化を図った。その結果、定格回転数 3,000rpm での安定な磁気浮上回転を実現した。図 9、図 10 に、巻線比を  $N=0$ 、および  $N=0.366$  の時の、無負荷で 3,000rpm における回転子の半径方向の振動をそれぞれ示す。  $N=0$  の時、X 軸、および Y 軸の振動振幅は  $3\sigma$  で  $38\mu\text{m}$  であった。一方、  $N=0.366$  の時は  $3\sigma$  で  $32\mu\text{m}$  であり、16% 振動低減可能であった。

図 11 に、巻線比を  $N=0$ 、および  $N=0.366$  の時の、無負荷で 3,000rpm における磁気支持消費電力を示す。  $N=0$  の時、銅損、鉄損、および合計の消費電力は、それぞれ 4.8W、0.6W、および 5.4W であった。一方、  $N=0.366$  の時は、2.7W、0.3W、および 3.0W であり、消費電力を 44% 低減した。以上の実験結果より、提案する巻線構造（巻線比：  $N=0.366$ ）の有用性を実証した。

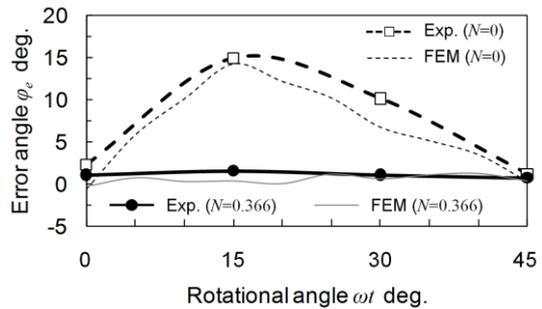


図 7 FEM と実験により求めた干渉角 ( $\phi_p=30^\circ$ )

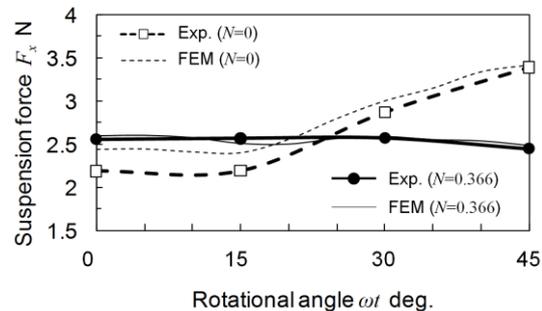


図 8 FEM と実験により求めた脈動 ( $\phi_p=30^\circ$ )

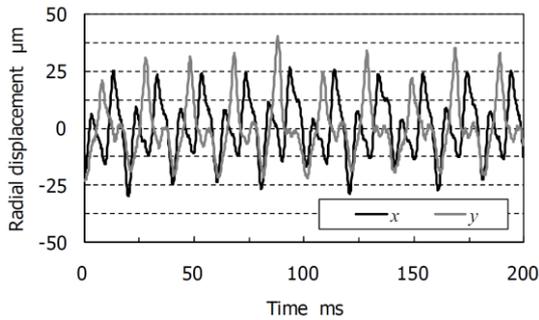


図9 3,000rpmでの回転子半径方向振動 (N=0)

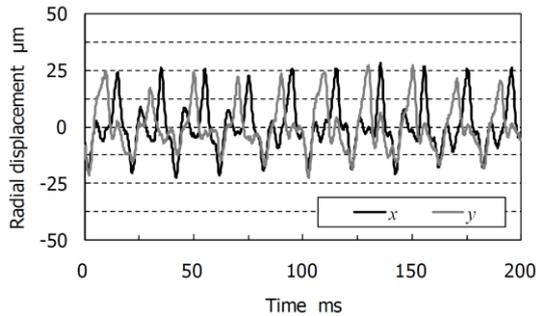


図10 3,000rpmでの回転子半径方向振動 (N=0.366)

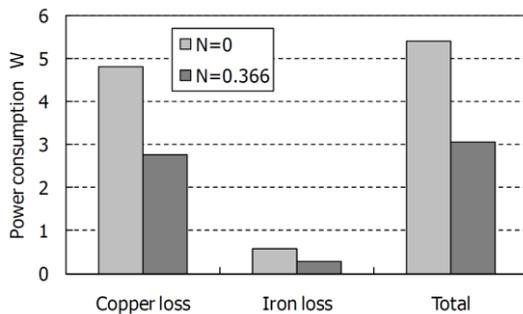


図11 3,000rpmでの磁気支持消費電力

### C) 小形遠心ポンプへの応用

図12, 図13に, 樹脂成型したベアリングレスディスクモータの回転子, および固定子をそれぞれ示す. 回転子外形は 45.6mm, 流体隙間は 0.25mm である. 回転子の外壁は, 渦電流式変位センサのターゲットとするため, 金属に変更した. このため上下のセンサターゲットが不要となり, 高さを 12.9mm に低減した. この変更に伴い, ターゲット部での渦電流損の増加が懸念されるが, 損失測定等に関しては今後検討する予定である. 固定子部を樹脂成型することで, 流体をポンプ室内に密封することができる. 渦電流変位計は, 固定子コア間に設置し, 樹脂内に埋め込んだ. 今後は, モータの負荷試験と電動機性能評価, ポンプ特性の測定等を予定している.



図12 遠心ポンプ用回転子



図13 遠心ポンプ用固定子

### 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 5 件)

- ① J. Asama, R. Kawata, T. Tamura, T. Oiwa, and A. Chiba, "Reduction of Force Interference and Performance Improvement of a Consequent-Pole Bearingless Motor", Precision Engineering (accepted). 査読有り
- ② R. Kawata, T. Tamura, J. Asama, T. Oiwa, and A. Chiba, "Performance Improvement of a Bearingless Motor with Harmonics Reduction in Magneto-Motive-Force Distribution", Proceedings of the 4th International Conference on Manufacturing, Machine Design and Tribology (ICMDT 2011), pp. 193-194, 2011. 査読無し
- ③ 田村智康, 川田亮, 朝間淳一, 大岩孝彰, 千葉明, "ベアリングレスモータの支持力干渉の低減", 2010 年度精密工学会秋季大会学術講演会講演論文集, pp. 895-896, 2010. 査読無し
- ④ J. Asama, M. Amada, A. Chiba, M. Takemoto, T. Fukao, and M. A. Rahman, "Voltage Characteristics of a Consequent-pole Bearingless PM Motor with Concentrated Windings", IEEE Transactions on Magnetics, Vol. 45, Issue 6, pp. 2823-2826, June 2009. 査読有り

- ⑤ J. Asama, A. Chiba, T. Oiwa, T. Fukao, and M. A. Rahman, "A Design Consideration of a Novel Bearingless Disk Motor for Artificial Hearts", Proceedings of the IEEE Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE) 2009, pp. 1693-1699, 2009. 査読無し

〔学会発表〕 (計 3 件)

- ① R. Kawata, T. Tamura, J. Asama, T. Oiwa, and A. Chiba, "Performance Improvement of a Bearingless Motor with Harmonics Reduction in Magneto-Motive-Force Distribution", 4th International Conference on Manufacturing, Machine Design and Tribology (ICMDT 2011), Apr. 24-27, Gamagori, Aichi, Japan, 2011.
- ② 田村智康, 川田亮, 朝間淳一, 大岩孝彰, 千葉明, "ベアリングレスモータの支持力干渉の低減", 2010 年度精密工学会秋季大会, 9 月 27-29 日, 名古屋, 2010.
- ③ J. Asama, A. Chiba, T. Oiwa, T. Fukao, and M. A. Rahman, "A Design Consideration of a Novel Bearingless Disk Motor for Artificial Hearts", IEEE Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE) 2009, Sep. 19-24, San Jose, California, USA, 2009.

〔図書〕 (計 0 件)

〔産業財産権〕

- 出願状況 (計 0 件)  
○取得状況 (計 0 件)

〔その他〕

なし

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

朝間 淳一 (ASAMA JUNICHI)  
静岡大学・工学部・准教授  
研究者番号：7 0 4 4 7 5 2 2

### (2) 研究分担者

なし

### (3) 連携研究者

大岩 孝彰 (OIWA TAKAAKI)  
静岡大学・工学部・教授  
研究者番号：0 0 2 2 3 7 2 7

千葉 明 (CHIBA AKIRA)

東京工業大学・理工学研究科・教授  
研究者番号：0 0 2 2 3 7 2 7