

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 26 年 6 月 17 日現在

機関番号：13801

研究種目：若手研究(A)

研究期間：2011～2013

課題番号：23686041

研究課題名(和文)ベアリングレスモータの小形化・低消費電力化と次世代クリーンデバイスへの応用

研究課題名(英文)Reduction in Size and Power Consumption of a Bearingless Motor and its Application to a Next-Generation Clean Device

研究代表者

朝間 淳一 (Asama, Junichi)

静岡大学・工学(系)研究科(研究院)・准教授

研究者番号：70447522

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 18,400,000円、(間接経費) 5,520,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、ベアリングレスモータの小形化・低消費電力化、およびそのクリーンデバイスへの応用を目的として、以下の研究成果を得た。2自由度制御形ベアリングレスモータを小型遠心ポンプへ適用し、揚程1.5m、流量4L/minの出力を得た。また、その固定子鉄心をバルク鉄から圧粉磁心に変更することで鉄損を85%低減した。三相巻線1組と三相インバータ1台で駆動可能なシングルドライブベアリングレスモータを提案し、テスト機により試験を行い、その有用性を示した。さらに、三相インバータの零相電流をアクチュエータ制御に用いることを提案し、ベアリングレスモータシステムのさらなる小形化・低消費電力化の可能性を示した。

研究成果の概要(英文)：The research objective is to reduce the size and power consumption of a bearingless motor and its application to a next-generation clean device. A proposed two-dof actively positioned bearingless motor was applied to a compact centrifugal pump. A water head of 1.5 m and a flow rate of 4 L/min were available. Core loss was reduced by 85 % with stator cores made of soft magnetic composites. A novel one-dof actively positioned bearingless motor, which employs one set of three-phase winding and thus one three-phase inverter, dubbed a single-drive bearingless motor, was proposed, fabricated, and tested, and its feasibility was demonstrated. In addition, utilization of a zero-phase current for an active regulation of an actuator was proposed. The proposed method has a possibility of further downsizing and energy saving of a bearingless motor system.

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：精密機械システム 磁気浮上 ベアリングレスモータ 磁気軸受 シングルドライブ ポンプ 零相電流

1. 研究開始当初の背景

ベアリングレスモータは、一般的に、固定子に回転・磁気浮上巻線の2種類が施され、磁気力により回転主軸を非接触で支持するモータである。磁気軸受とモータを組み合わせた構造と比較して、システム全体の小形化・低コスト化が可能である。しかし、既存のベアリングレスモータは、回転子の回転方向以外の5自由度運動を安定化させるために、多くのセンサ、アクチュエータ、アンプが必要となり、小形化・低消費電力化・低コスト化が普及への課題であった。

2. 研究の目的

本研究課題では、ベアリングレスモータの制御自由度を低減することで小形化・低消費電力化・低コスト化を図る。また、提案モータを、既存の限界を打破する次世代クリーンデバイスへ適用することを目的とする。具体的には、(A) 2自由度能動位置制御式、(B) 1自由度能動位置制御式、のベアリングレスモータの研究開発を行った。

3. 研究の方法

(A) 2自由度能動位置制御式

図1に、提案構造を示す。回転子は3層構造であり、上下2層は鉄心にラジアル方向着磁の永久磁石ピース（以下、ラジアル磁石）をはめ込んだ構造である。その中間には、軸方向着磁の永久磁石リング（以下、スラスト磁石）を挿入する。上下の各層においては、ラジアル磁石は全て同じ方向に着磁され、鉄心部分はスラスト磁石により結果的にラジアル磁石と反対方向に着磁される。したがって、本回転子は8極を形成する。固定子には断面がC形状の分割コアを用い、三相2極の支持巻線と、三相8極の電動機巻線が巻回されている。半径方向の2自由度を能動的に位置決め制御し、軸方向と傾き方向の運動は受動的に支持される。

図2に、半径方向への磁気支持力発生原理を示す。永久磁石のバイアス磁束に2極の支持磁束を重畳させ、エアギャップ部で磁束の疎密を発生させる。その結果として、回転子にはラジアル方向に力（支持力）が作用する。2極の支持巻線に流す電流の方向と大きさを変更することで、支持力を能動的に調整できる。図3に、軸方向と傾き方向の受動支持原理を示す。回転子・固定子間には永久磁石のバイアス磁束で、磁気カップリングが形成されている。回転子が、軸方向・傾き方向に運動しても、復元力・復元トルクが回転子に作用するため、回転子は自動的に磁気的な中心位置に戻る。

(B) 1自由度能動位置制御式

図4に、提案構造を示す。回転子は、軸方向着磁の永久磁石を張り付けた磁性円板を2組用い、それらをシャフトで連結した構造である。固定子には、軸方向に歯が突出した鉄心を2組用いる。固定子は、回転子永久磁石

と対向して配置し、片側にのみ三相巻線を施す。図のモータでは、極数は2極、固定子歯数は6である。既存の1自由度制御形磁気軸受と比較すると、磁気浮上用の巻線が無いことが特長である。本研究課題では、三相巻線1組のみ使用し、三相インバータ1台のみで磁気浮上と回転が可能なるベアリングレスモータ（シングルドライブベアリングレスモータ、SDBelM）を提案する。Z方向の1自由度のみ能動的に位置決め制御し、残りの4自由度は永久磁石の磁気カップリングにより受動的に支持される。

図5に、Z方向への磁気支持力発生原理を示す。三相巻線が施された固定子では、三相に流れる電流を制御することで、回転子・固定子間ギャップ部にて軸方向の2極磁界を任意の角度に発生できる。例えば、回転子永久磁石のNS方向に対して90度の位置に2極を発生（トルク成分、q軸電流）させ続けることで、連続的に回転子できる。また、NS方向に対して平行位置に2極を発生（支持力成

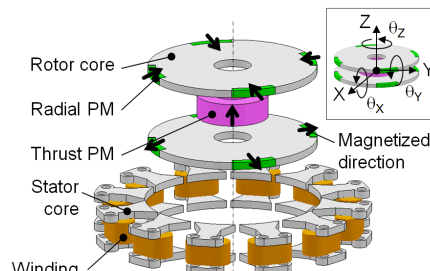


図1 提案する2自由度能動位置制御式ベアリングレスモータ

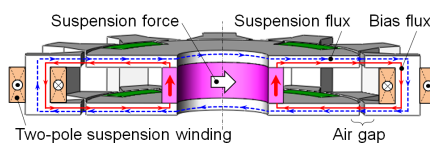


図2 半径方向への磁気支持力発生原理

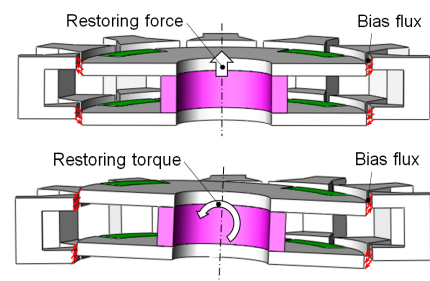


図3 軸方向と傾き方向の受動支持原理

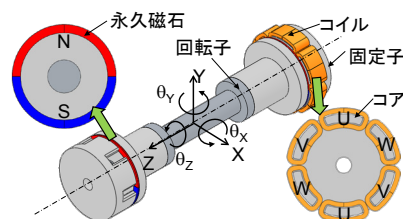


図4 提案するSDBelMの構造

分, d 軸電流) させれば, 回転子・固定子間ギャップ部における磁束の軸方向成分の強弱を調整できる. この界磁調整により両側のギャップ部磁束密度を不平衡にすることで, 回転子の軸方向に作用する支持力を調整することができる.

図 6 に, 並進方向と傾き方向の受動支持原理を示す. 永久磁石により, 固定子と回転子間には磁気カップリングが形成される. バイアス磁束により, 並進方向変位と傾きに対し復元力が作用し受動的に支持される. 図 7 に, SDBeIM の制御ブロックを示す. 所望のトルク電流 (q 軸電流) 成分と支持力電流 (d 軸電流) 成分の電流値と回転子角度から, 座標変換により三相電流値が決定される.

#### 4. 研究成果

##### (A) 2 自由度能動位置制御式

本研究課題では, これまでに提案してきた 2 自由度能動位置制御式ベアリングレスモータの, (A-1)遠心ポンプへの適用, (A-2)電動機性能評価, について検討した.

##### (A-1) 遠心ポンプへの適用

図 8 に試作ベアリングレスモータを用いた遠心ポンプを示す. 固定子はエポキシ樹脂でモールドし, 変位センサを内部に埋め込んだ. 回転子の表面はアルミ合金で覆い, 半径方向制御用および軸・傾き運動計測用の渦電流変位センサのターゲットとした. 回転子上部に 2 種類の異なるインペラ (シュラウドの有無) を取り付け, 水中で磁気浮上回転実験を行った. 図 9 に, ポンプ出力が零の時の, 回転子軸方向移動量を示す. シュラウドが無いオープンタイプのインペラでは, 回転数の増加に伴い, 上側に回転子が移動し, 2000rpm において約 0.9mm の移動が観測された. 一方, 羽根車上部にシュラウドを取り付けたところ, 回転子に作用する流体力が減少し, 軸方向移動量が減少した.

図 10 に, 測定したポンプ特性を示す. 横軸は流量, 縦軸は揚程である. 最大出力は約 1W (4L/min, 1.5m@2500rpm) であった. 3000rpm では, ポンプ出力の増加に伴い, 徐々に回転子が軸方向に移動したため, 流量が 2L/min 以上では磁気浮上が困難となった. 今後は, 数値流体解析ソフト等を用いて, 回転子に作用する流体力低減を検討する必要がある. なお, 図には示さないが, 回転子の半径方向, 軸方向, および傾き方向の振動振幅は, 可動範囲と比較して十分小さかった.

##### (A-2) 電動機性能評価

図 11 に, 空気中回転時における, 無負荷での消費電力を示す. 左と中のバーは支持力, および電動機に要した消費電力であり, 右のバーはその合計である. 無負荷にもかかわらず, 3000rpm では総消費電力が 10W であり, そのうち約 8 割が電動機である. また, 電動機消費電力のうち約 6 割が鉄損である. これは, 固定子鉄心をバルク鉄から切削加工で製作したことで, 大きな渦電流損が発生したた

めである.

そこで, 三次元加工が可能でかつ渦電流損を低減可能な圧粉磁心を固定子鉄心に適用した. 圧粉磁心とは, 絶縁コーティングされた鉄粉を樹脂バインダで圧縮熱成型した固定子材料である. 図には示さないが, 三次元有限要素電磁界解析により, 圧粉磁心を用いることで鉄損が 90%以上低減可能であるこ

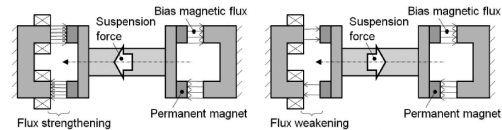


図 5 Z 方向への磁気支持力発生原理

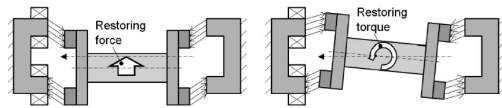


図 6 並進・傾き方向の受動支持原理

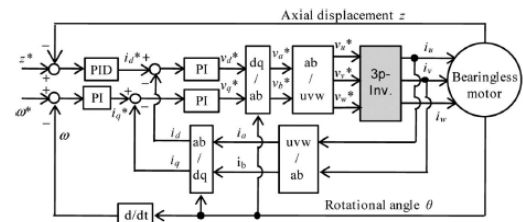


図 7 SDBeIM の制御ブロック



図 8 試作したベアリングレスポンプ

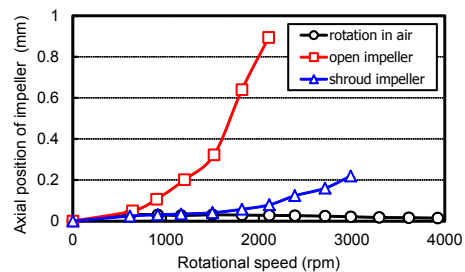


図 9 水中における回転子軸方向移動量

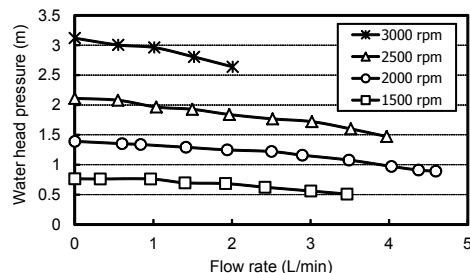


図 10 試作したベアリングレスポンプの特性

と示した。図 12 に圧粉磁心を用いて再製作したベアリングレスモータを示す。比較のため、バルク鉄を用いたテスト機も同様の設計・方法で製作した。図 13 に測定した消費電力を示す。バルク鉄と比較して圧粉磁心を用いた場合、3000rpm において 74%ほど消費電力が低減した。また、鉄損に関しては 85%低減可能であった。さらに、負荷試験を行い、効率を求めたところ、圧粉磁心を用いた場合、約 25%効率を改善した。

(B) 1 自由度能動位置制御式

図 14 に試作した SDBelM を示す。回転子長さは 75mm、直径は 25mm、磁気ギャップは 0.6mm とした。しかし、最大回転数は 700rpm 程であった。本研究課題では、(B-1)さらなる高速化と浮上安定化を目指す。また、さらなる応用拡大のため、(B-2)円板形回転子を有する SDBelM の実現を目指す。

(B-1)さらなる高速化と浮上安定化

まず、回転子が想定する共振点よりも低い回転数 700rpm でタッチダウンする原因について検討した。回転子の非制御方向振動を計測したところ、傾き方向の振動に回転数の 2 倍の成分が含まれていることに注目した。これは回転子の 2 極を、4 枚の永久磁石ピース(厚さ 0.5mm)で構成していることに起因していると考えられる。そこで、2 極磁石を 2 枚の永久磁石ピースで構成し、さらに、回転子の軽量化も検討した。図 15 に改良した回転子を示す。磁石製作の都合上、2 ピース磁石の厚みは 1mm とした。それに伴い、旧回転子の場合と同程度の剛性を得るために、磁気ギャップを 0.6mm から 1mm に拡張した。図 16 に、測定した傾き方向の振動振幅を示す。最大回転数は、700rpm から約 2000rpm まで増加した。

ここで、2 極の回転子を用いた場合、磁石の境目において磁束が小さいため、回転子の回転角度によっては、X 軸方向と Y 軸方向の剛性に大きな差が生じる。剛性による復元力の差が電磁加振力となって回転子の振動を増加させていると考えた。そこで、旧回転子の永久磁石ピースを貼り換えて、4 極を構成し、その効果を検証した。図 17 に、極数別の傾き方向の振動振幅を示す。2 極の場合、700rpm では回転しなかったが、急加速させることで 900rpm 以上での回転が可能になった。図より、4 極回転子の方がどの回転数においても振動が小さいことが明らかとなった。しかしながら 2 極よりも低い回転数で振動が増加し、タッチダウンした。これは、4 極化したことで剛性が低下し、共振点が低下したことが原因である。今後は SDBelM の共振回避方法を検討する。

(B-2) 円板形回転子を有する SDBelM

SDBelM のさらなる応用拡大のため、円板形状の回転子を有する構造を 2 種類提案した。図 18 にコアレスコイルを用いた円板形 SDBelM の構造を示す。ラジアル要素、傾き要素、およびコアレスモータの 3 要素から構

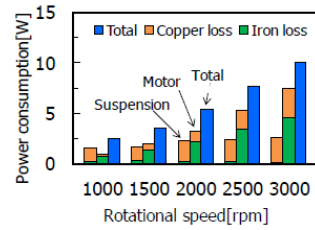


図 11 試作ベアリングレスモータの消費電力

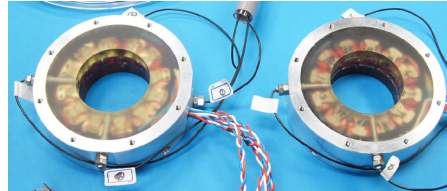


図 12 再試作したベアリングレスモータ

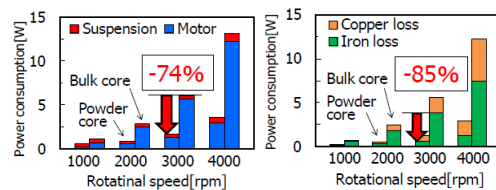


図 13 測定した消費電力 (無負荷)

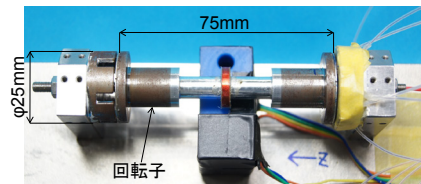


図 14 SDBelM の試作機

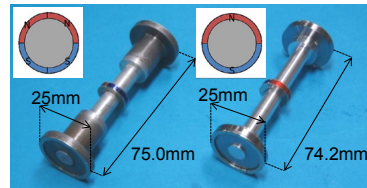


図 15 改良した新回転子 (右, 左は旧回転子)

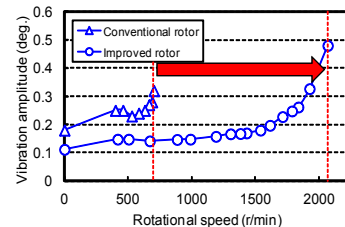


図 16 新・旧回転子別の傾き方向振動振幅

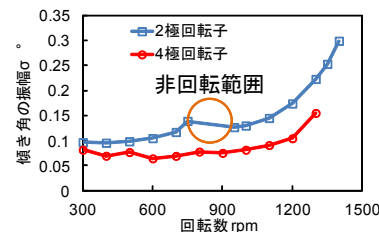


図 17 旧回転子を用いた極数別の傾き方向振動振幅

成される。ラジアル要素では、永久磁石と鉄心により固定子・回転子間に磁気カップリングが形成されている。ラジアル方向変位に対しては復元力が作用するため剛性は正となるが、傾きに対しては吸引されるため剛性は負となる。一方、反発磁石対から構成される傾き要素では、回転子の傾きに対しては斥力が作用するため剛性は正となるが、ラジアル変位に対しては変位が拡大する方向に斥力が作用するため剛性は負となる。ラジアル・傾き共に剛性が正となるように三次元有限要素電磁界解析により寸法・形状を検討した。

アーンショウの定理より結果としてスラスト方向の剛性は負となるため、能動位置制御が必要である。そこで、コアレスモータ部の  $d$  軸電流でギャップ部磁束密度を調整し、スラスト方向に磁気支持力を発生させ、スラスト方向の位置決め制御を行う。回転の制御は  $q$  軸電流を用いて行う。以上により、三相巻線 1 組と三相インバータ 1 台で磁気支持と回転が制御可能である。

また、図 19 にラジアル要素とモータを一体化して 2 要素から構成される円板形 SDBeIM の構造を示す。モータ部では  $d \cdot q$  軸電流制御のみならず、ラジアル方向の受動安定性を確保する。同様にラジアル・傾き共に剛性が正となるように、反発磁石対とモータ部の寸法と形状を三次元有限要素電磁界解析により検討した。図 20、図 21 に試作した円板形 SDBeIM を示す。しかし、安定な磁気浮上には至らなかった。この原因について検討した結果、ラジアル方向と傾き方向の運動連成により磁気的な不安定が生じたためであることが明らかとなった。具体的には、回転子が傾くとラジアル方向に不安定な並進力が作用し、また、回転子がラジアル方向に変位すると傾き方向に不安定なトルクが作用する。上記連成項を考慮した磁気的な安定条件を算出し、両試作機において検討したところ不安定であることが明らかとなった。今後は、連成安定条件を満足する新しい構造の SDBeIM の実現し、ベアリングレス冷却ファン等のクリーンデバイスへの応用を目指す。

### (C) 零相電流による磁気浮上制御の検討

本研究課題では、三相インバータ 1 台のみを用いて、 $d$  軸電流で磁気支持、 $q$  軸電流で回転を制御する方法を提案している。ここで、三相インバータ 1 台には 6 個のトランジスタ ( $Tr$ ) が組み込まれていることに着目した(図 22 参照)。 $Tr1$  と  $Tr2$  は、一方がオンの時、他方がオフである。 $Tr3$  と  $Tr4$ ,  $Tr5$  と  $Tr6$  も同様の関係でスイッチング動作を行う。したがって、スイッチングの自由度は 3 である。一方、三相 Y 結線の電流条件は  $i_u+i_v+i_w=0$ 、つまり独立変数は 2 であり、さらなる拡張が可能であると考えた。

そこで、図 22 に示すように、三相 Y 結線の中性点と、パワー回路の電源中点を結線し、その間に、例えばスラスト磁気軸受等の巻線を配置する。この負荷に流れる電流を  $i_z$  (零

相電流) とすると、 $i_u+i_v+i_w+i_z=0$  となる。すなわち独立変数を 3 に拡張できる。シンプルかつ汎用的な方法で追加のパワートランジスタ無しで制御自由度を拡張できる点が特長である。つまり、三相インバータ 1 台で 3 自由度を制御できるため、従来方式と比較して少ないパワートランジスタ数で、磁気浮上と回転を制御できる可能性があり、システム全体のさらなる小形化・低消費電力化が期待できる。

まずは、一般的な三相モータと鉄球の磁気浮上装置から構成されるシステムを念頭に置き、両装置を 1 台の三相インバータで駆動可能かを検討した。数値計算により、モータ性能に影響を及ぼさないスイッチング方法を検討した。その結果、上側のトランジスタを同時に ON あるいは OFF にして、各相の変調信号にオフセット成分を重畳させること

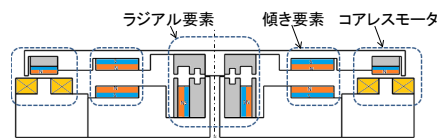


図 18 コアレスコイルを用いた円板形 SDBeIM の構造

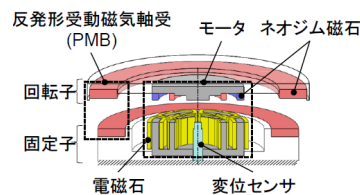


図 19 2 要素から構成される円板形 SDBeIM の構造

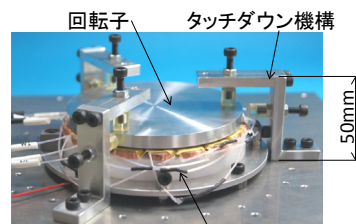


図 20 コアレスコイルを用いた円板形 SDBeIM 試作機

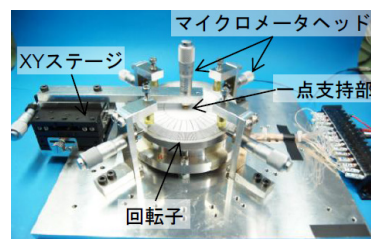


図 21 2 要素で構成される円板形 SDBeIM の試作機

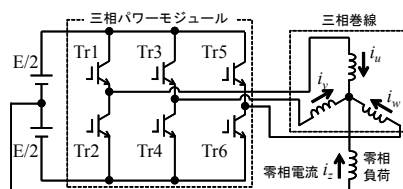


図 22 三相インバータによる零相電流制御

で、モータ性能には影響を及ぼさないことを示した。次いで、回路シミュレータにより検討を行った。零相電流を検出してフィードバック制御することで、10ms程度の応答が可能であることを示した(図23)。

## 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4件)

1. J. Asama, D. Kanehara, T. Oiwa, and A. Chiba, "Development of a Compact Centrifugal Pump with a Two-Axis Actively Positioned Consequent-Pole Bearingless Motor", *IEEE Transactions on Industry Applications*, Vol. 50, No. 1, pp. 288-295, 2014. (査読有)
2. J. Asama, D. Kanehara, T. Oiwa, and A. Chiba, "Suspension Performance of a Two-Axis Actively Regulated Consequent-Pole Bearingless Motor", *IEEE Transactions on Energy Conversion*, Vol. 28, No. 4, pp. 894-901, 2013. (査読有)
3. J. Asama, Y. Hamasaki, T. Oiwa, and A. Chiba, "Proposal and Analysis of a Novel Single-drive Bearingless Motor", *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, Vol. 60, No. 1, pp. 129-138, 2013. (査読有)
4. 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*, Vol. 36, Issue 1, pp. 10-18, January 2012. (査読有)

[国際学会発表] (計6件)

1. J. Asama, D. Kanehara, T. Oiwa, and A. Chiba, "Core Loss Reduction in Two-Axis Actively Positioned Bearingless Motor Using Soft Magnetic Composites", *IEEE Power & Energy Society General Meeting*, Jul. 21-25, Vancouver, BC, Canada, 2013.
2. J. Asama, D. Kanehara, T. Oiwa, and A. Chiba, "Performance Investigation of a Centrifugal Pump with a Consequent-Pole Bearingless Motor", *IEEE Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE) 2012*, pp. 3663-3669, Sep. 16-20, Raleigh, North Carolina, USA, 2012.
3. J. Asama, Y. Hamasaki, T. Oiwa, and A. Chiba, "Performance Improvement of a One-DOF Actively Positioned Bearingless Motor", *13th International Symposium on Magnetic Bearings (ISMB 13)*, Arlington, Virginia, USA, Aug 6-9, 2012.
4. J. Asama, T. Tamura, D. Kanehara, T. Oiwa, and A. Chiba, "Basic Performance of Two-Axis Actively Positioned Bearingless Disk Motor", 2012GM-001314, *IEEE Power & Energy Society (PES) General Meeting 2012*, Jul 22-27, San Diego, CA, USA, 2012.
5. J. Asama, Y. Hamasaki, T. Oiwa, and A. Chiba, "A Novel Concept of a Single-Drive Bearingless Motor", *IEEE International Electric Machines and Drives Conference (IEMDC 2011)*, pp. 652-656, May 15-18, Niagara Falls, Canada, 2011.
6. 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*, pp. 193-194, Apr. 24-27, Gamagori, Aichi, Japan, 2011.

[国内学会発表] (計11件)

1. 渡邊大祐, 朝間淳一, 大岩孝彰, 鳥居孝夫, 千葉明, "1自由度制御形ベアリングレスモータの運動連成

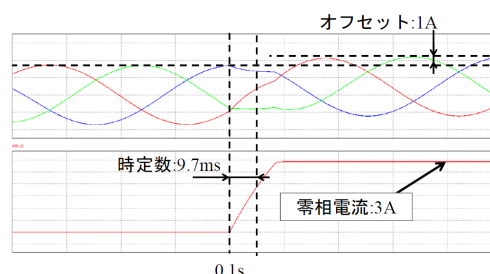


図23 回路シミュレータによる零相電流制御

と安定性に関する考察”, 2013年度精密工学会秋季大会学術講演会講演論文集, pp. 437-438, 9月12-14日, 関西大学, 2013

2. 福與将人, 朝間淳一, 大岩孝彰, 千葉明, "零相電流を用いた1自由度制御形ベアリングレスモータの新制御法", 平成25年電気学会産業応用部門大会, 3-81, CD-ROM, 山口, 8月28-30日, 2013.
3. 鈴木大貴, 朝間淳一, 大岩孝彰, 千葉明, "シングルドライブベアリングレスモータの4極化による回転子振動低減", 第25回電磁力関連のダイナミクスシンポジウム, pp. 276-277, 5月15-17日, 箱根ホテル小涌園, 2013.
4. 福與将人, 朝間淳一, 大岩孝彰, 千葉明, "スラスト磁気支持機能を備えたベアリングレスモータの提案", 平成24年電気学会産業応用部門大会, Y-117, CD-ROM, 津田沼, 8月21-23日, 2012.
5. 渡邊大祐, 朝間淳一, 大岩孝彰, 千葉明, "円板回転子形シングルドライブベアリングレスモータの提案", 平成24年電気学会産業応用部門大会, Y-116, CD-ROM, 津田沼, 8月21-23日, 2012.
6. 兼原大輔, 朝間淳一, 大岩孝彰, 千葉明, "圧粉磁心によるベアリングレスモータの鉄損低減の検討", 平成24年電気学会産業応用部門大会, Y-97, CD-ROM, 津田沼, 8月21-23日, 2012.
7. 田村智康, 兼原大輔, 朝間淳一, 大岩孝彰, 千葉明, "小形遠心ポンプ用ベアリングレスモータの磁気支持性能", 平成24年電気学会全国大会, 5-168, CD-ROM, 広島, 3月21-23日, 2012.
8. 山崎 星, 朝間淳一, 大岩孝彰, 千葉明, "コアレスコイルを用いたシングルドライブベアリングレスモータの磁気支持力", 平成24年電気学会全国大会, 5-169, CD-ROM, 広島, 3月21-23日, 2012.
9. 浜崎佑樹, 朝間淳一, 大岩孝彰, 千葉明, "シングルドライブベアリングレスモータの回転性能向上", 平成24年電気学会全国大会, 5-033, CD-ROM, 広島, 3月21-23日, 2012.
10. 田村智康, 川田亮, 朝間淳一, 大岩孝彰, 千葉明, "磁気浮上式小形遠心ポンプ用ベアリングレスディスクモータの基礎特性", 日本機械学会2011年度年次大会, S113011, 東京, 9月11-14日, 2011.
11. 浜崎佑樹, 朝間淳一, 大岩孝彰, 千葉明, "シングルドライブベアリングレスモータにおけるラジアル剛性の評価", 平成23年電気学会産業応用部門大会, Y-141, CD-ROM, 那覇, 9月6-8日, 2011.

[その他]

ホームページ等

<http://www.ipc.shizuoka.ac.jp/~tjasama/>

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

朝間淳一 (JUNICHI ASAMA)

静岡大学 工学研究科

准教授

研究者番号: 70447522