

## 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 3 月 5 日現在

機関番号：12608

研究種目：基盤研究（B）

研究期間：2009～2011

課題番号：21360135

研究課題名（和文） ワイドギャップベアリングレスモータの研究開発

研究課題名（英文） Research and development of wide gap bearingless motor

研究代表者

千葉 明 (CHIBA AKIRA)

東京工業大学・大学院理工学研究科・教授

研究者番号：30207287

研究成果の概要（和文）：回転子半径  $R$  と固定子回転子間のギャップ長  $g$  の比  $g/R$  が 0.1 以上のベアリングレスモータをワイドギャップと定義することを提案した。ワイドギャップでありながら、支持力、トルク、力率の改善を実現する方法を明らかにした。さらに、全く新しい電動機と支持の巻線を共通化する方式を発明した。

研究成果の概要（英文）：In this research, the wide gap is defined as  $g/R$  must be more than 0.1, where  $g$  is the gap length between a stator and a rotor,  $R$  is the rotor radius. Developments are focused on improving suspension force, torque and power factor. A novel winding structure, which combines motor windings and suspension windings, has been proposed.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2009 年度	6,700,000	2,010,000	8,710,000
2010 年度	4,100,000	1,230,000	5,330,000
2011 年度	1,800,000	540,000	2,340,000
年度			
年度			
総計	12,600,000	3,780,000	16,380,000

研究分野：工学

科研費の分科・細目：電力工学・電力変換・電気機器

キーワード：ベアリングレスモータ、ワイドギャップ、磁気浮上

## 1. 研究開始当初の背景

埋込型人工心臓、半導体製造装置、真空装置、薬液搬送などの分野で、ベアリングレスモータのニーズが高まっている。ベアリングレスモータはモータ機能と磁気軸受機能を一体化した電磁機械である。たとえば、半導体を洗浄する超純水ポンプでは、ベアリングレスモータによるキャンドポンプが適用されつつある。このキャンドポンプでは、羽根車とベアリングレスモータが一体化されており、モータの回転子と固定子表面に樹脂による 0.5 から 1.5mm のキャンが構成されてい

る。しかし、回転子内に用いられる希土類元素の永久磁石のイオンが樹脂層を通して超純水中漏れる問題がある。希土類元素のイオン漏れを避けるためには樹脂層を厚くする必要があり、数 mm のワイドギャップを隔てて回転子と固定子が対向する必要がある。

一方、デジタルカメラのレンズのコーティング、あるいは半導体ウエハの加工を行う真空装置では、真空装置内で回転するテーブルが必要である。従来、真空装置用の低蒸発グリースを用いたベアリングとモータにより構成されている。しかし、グリースによる

汚染が問題になりつつある。真空チャンバー内のテーブルを、真空チャンバー外に設置したベアリングレスモータにより磁気支持して回転駆動できれば、歩留まりの向上、品質の向上が実現できる。しかし、真空チャンバーの圧力隔壁を隔てて磁気支持、回転駆動を行う必要があり、数 mm あるいはそれ以上のワイドギャップで動作するベアリングレスモータが必要になる。

しかし、一般に、ギャップ長を大きくすると、モータ出力は低下し、磁気支持に必要な電磁力も低下してしまう。このため、従来のベアリングレスモータを超える新しい構造が必要になる。

本研究は固定子、回転子間に数 mm 以上のギャップがある状況下で、トルク、電磁支持力を向上するベアリングレスモータの新しい構造を提案し、テスト機製作により確認する物である。一般に、直径が大きなモータのギャップ長は大きくすることが容易である。そこで、本研究では、固定子外径  $D$  とギャップ長  $g$  の比  $D/g$  をモータギャップ長評価指標として用いる。たとえば、固定子外径が 190mm であり、回転子と固定子の片側ギャップ長が 5mm であれば、モータギャップ長評価指標は 38 である。一般のモータではこのモータギャップ長評価指標は 200 から 500 であるので、38 はワイドギャップであると評価することができる。本研究はモータギャップ長評価指標 25 から 50 を実現するベアリングレスモータの研究開発を行う。

既に、国外では、スイス国において、モータギャップ長評価指標 65 程度のベアリングレスモータが開発され、超純水、薬液などのキャンドポンプに適用されている状況にある。その他、国外ではオーストリア、米国、独、英国、フランスなどでもベアリングレスモータの研究は行われているものの、50 以下のワイドギャップに関する研究は見あたらない状況にある。

## 2. 研究の目的

交付期間 3 年間では、以下の点を明らかにする。

(1) 真空チャンバーテーブル駆動用のワイドギャップのベアリングレスモータの研究、設計、テスト機の開発。モータギャップ長指標 40 - 50 程度を実現する。

(2) 超純水などのポンプ用にワイドギャップのベアリングレスモータの研究、設計、テスト機の開発。モータギャップ長指標 30 - 38 程度を実現する。

(3) ワイドギャップを経て主軸の動きを検出するセンサの研究、設計、テスト機の開発。

## 3. 研究の方法

(1) では、既にテーブル駆動用のベアリン

グレスモータを開発しているが、モータギャップ長指標は 300 程度とギャップ長が小さい。このため、真空チャンバーの隔壁の外から駆動できない状況下にある。そこで、本研究では、極数の低減、スラスト永久磁石の配置、補極の構成、数段のタンデム構成など基本的な回転機の構成と永久磁石の配置を工夫して解決を図る。

(2) では、既に試作したポンプ用のベアリングレスモータの出力特性の向上、磁気支持力の向上、小形軽量化を検討する。さらに、1 kW から 4 kW に出力増加時の回転機の構成方法も検討する。主軸の長軸化、スラスト磁石の配置の方法、多段構成、巻線巻回方法、モータ部分と支持力発生部分の長さの調整方法など回転機の基本的な設計を行い、永久磁石の適切な配置、鉄心形状の最適化、巻線形状のコンパクト化などを工夫して解決を図る。

(3) では数ミリのギャップを介して主軸の動きを検出するセンサの小型化、電動機との一体化をめざし、センサの構成方法を新たに発明し、設計、テストを行う。

## 4. 研究成果

まず、各種文献を調査した結果、ギャップ長指標として、 $D/g$  ではなく、 $g/R$  を用いることが適切であることが明らかになった。ここで  $R$  は回転子の外半径である。各種ベアリングレスモータを調査した結果、特殊な固定子形状があり、固定子外径  $D$  より、回転子半径  $R$  が適切であることが明らかになった。この  $g/R$  を用いると 0.1 以上がワイドギャップであると定義できる。

図 1 は目的(1)のワイドギャップベアリングレスモータの構成を示している。新しく、軸方向に永久磁石を配置するホモポーラコンシクエント構造で有り、薄型化するため、巻線はトロイダル巻線が施されている。 $g/R=0.1$  であり、従来方式に比較して、力/電流が高く、また、スラスト方向、コンカル方向のスティフネスが高い特長がある。

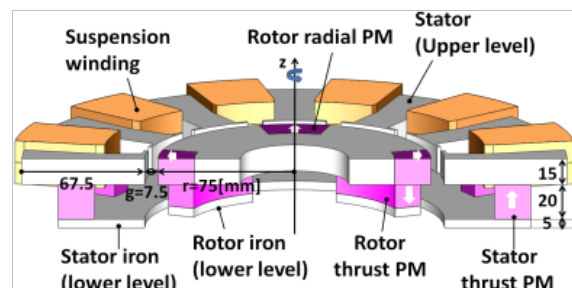


図 1 ワイドギャップ 2 軸制御

図 2 はさらに研究を進めた構造で有り、上下対称の構成としている。機械的なダイナミクスの解析の結果、能動に軸制御において、

力の作用点、重心、センサ検出点がz方向にずれると安定化がこんなになることが明らかになった。このため、上下に対称な構成をもつベアリングレスモータのワイドギャップ構成を新たに提案した。当初の目的を達成された。

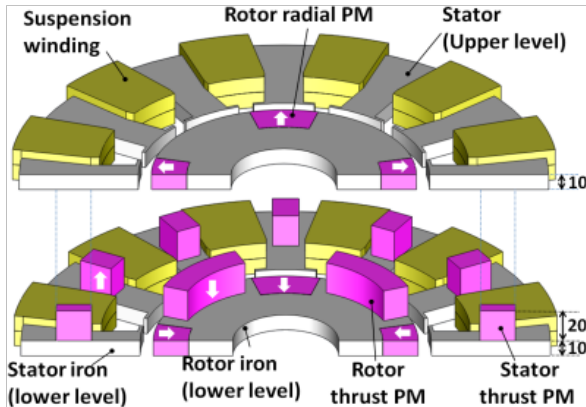


図2 対称型ワイドギャップ2軸制御

図3は目的(2)に対応する新しい巻線構造を示している。このマシンでは、回転子構造をコンシクエントポール型からSPM型に変更し、干渉電磁力を低減して力率を0.3から0.9程度まで向上した。さらに、ワイドギャップで問題となる支持巻線の断面積の増加を根本的に改善するため、支持巻線と電動機巻線を共通化する方式を新たに発明した。図に示すように、モータ巻線を並列化し、一端を中性点、片端を支持巻線電流制御インバータに接続する方式である。この方式では、すべてのコイルがトルクの発生と支持力の発生に有効に作用する。しかも、支持巻線には速度起電力が発生しないように工夫されている。

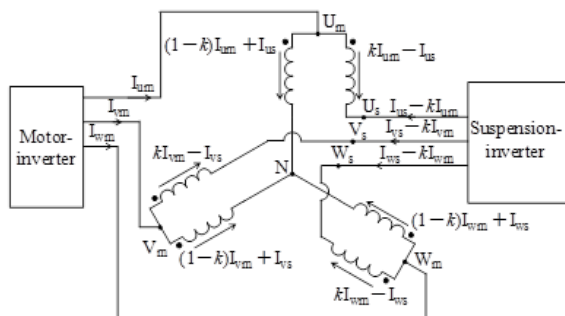


図3 巻線共通型ベアリングレスモータ

この新しい巻線方法による実現方式の一つを図4に示す。回転子は8極のSPM構造と軸方向にずれてコンシクエントポールホモポラ構造の回転子がタンデムに接続されている。トルクを発生するためには8極の磁界を発生する必要がある。一方、磁気支持用

の電磁力を発生するためには2極の磁界を発生する必要がある。UmからN、Usに向かう電流により8極の磁界を発生することができトルクが発生する。一方、UsからNに向かうIsによって2極の磁界が発生し、ホモポラ磁束との相互作用によって半径方向の電磁力を発生する。2極の磁界を効果的に発生するために、右端のまん中のコイルと、左端の両端のコイルを直列接続している。これらのコイルは図に○×で示した電流方向が等しいコイル群である。一方、その他の3つのコイル群は○×が反転しており、これらのコイルを直列接続し、負の電流成分を流すことによってすべてのコイルの起磁力が加算されて効果的に2極の磁界を発生することができるように設計されている。

当初の目的を達成するとともに、新しく基本的な巻線構成を発明した。

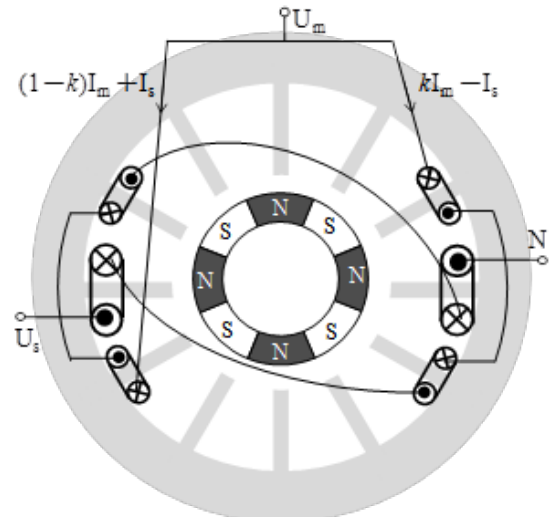


図4 巻線共通型の構成例

目的(3)については図5に示す5軸制御型ベアリングレスモータポンプのワイドギャップセンサの構築を行った。下の図は1, 2のユニットをもつベアリングレスモータで4軸能動制御を行い、右端のスラスト磁気軸受でスラスト軸制御を行う方式である。すなわち、5軸を能動的に制御する方式で有り、安定性が高く、高出力化できるメリットがある。超純水、あるいは危険な薬品などの流体が左端から入り、上方向に吐出される。インペラーの位置をフィードバック制御により、非接触で磁気支持する。

回転子の外側と固定子の内側にはパーティションが構成される。このパーティションの間には流体が入り込む。シールが不要であるため信頼性が高いメリットがあるが、一方、回転子と固定子の間に流体とパーティションが構成されるため、ワイドなギャップ長が必要になる問題点がある。さらに、パーティションの厚みが厚いほど信頼性が高くなる

ため、ワイドギャップのベアリングレスモータが必要にされている。

図中に上下方向の変位を検出するセンサが二つ描かれている。このセンサはパーティションの外側から内側の回転子の距離を計測している。原理的に渦電流、あるいはインダクタンスの変化を検出して、距離に比例した電圧を発生する物である。このセンサは円筒状の形状をしており、円筒の直径は計測するギャップ長にほぼ比例する。このため、ワイドギャップであると、直径が大きいセンサが必要になる。たとえば、7mmの距離を計測するには直径20mmのセンサが必要になる。断面図でも、センサがしめる大きさが大きく、全体の大型化につながってしまう問題点が明らかである。このセンサを、サーチコイルをベアリングレスモータの固定子鉄心部に埋め込むことができれば、小型軽量化が実現できる。

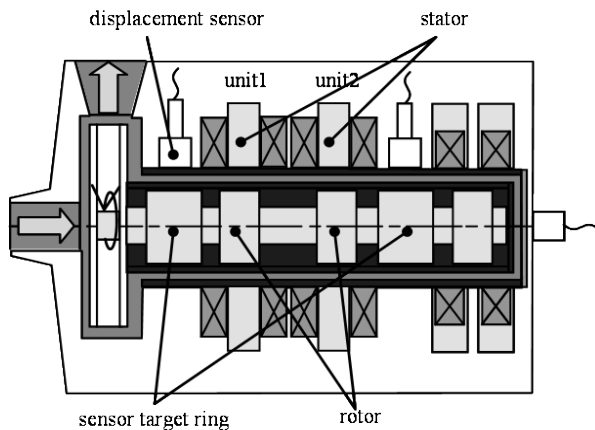


図5 試作5軸制御ポンプの構成

新しく差動型の構成のサーチコイルを固定子歯に施す方式を提案した。すなわち、電動機の回転磁界を打ち消し、支持巻線の磁束を打ち消すように図6に示すようにコイルを配置している。サーチコイルを施した回転

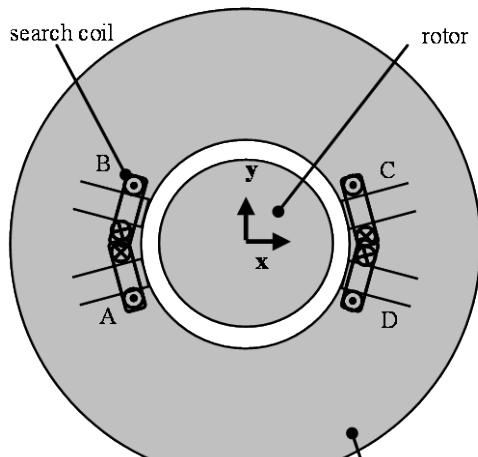


図6 変位検出用コイルの構成

子は円筒状のホモポーラ型回転子で有り、円筒形状をしているため、回転に伴う変動がほとんど無い特長がある。差動型構成と同相型の構成を比較し、差動型構成が外乱磁界を除去することが可能であることを明らかにした。さらに、実際、磁気浮上可能であることを実験的にも明らかにした。

変位の検出の感度を向上するため、図7のように共振回路を構成し、さらに、差動型増幅器で信号を処理する方式を提案した。すなわち、高周波電圧源と増幅器で高周波電圧をサーチコイルに印加する。サーチコイルの一端は共振用コンデンサCに接続されている。この共振用コンデンサの電圧を検出する。さらに、差動増幅器に入力することにより差分電圧を検出する。差分電圧はほぼ回転子の変位に比例する。この差分電圧に移相変化量を加えた高周波電圧を復調に用い、出力端からは回転子の半径方向に比例する電圧を得る。以上のように、当初の目的を達成した。

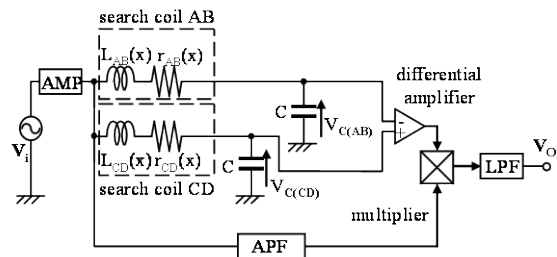


図7 サーチコイル型センサの復調器

以上のように当初の目的を達成するとともに、今までに無い新しい巻線構成を發明し、今後の発展が期待できる。新しい發明については特許を出願した。

さらに、この3年間では、以下の発表論文に示すように、最も難関な IEEE Transaction に8件論文が掲載になり、その他のジャーナル誌が3件掲載になった。学会発表は13件であるが、これらの発表のほとんどは予稿として査読なしの論文の発表を伴っている。

## 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11件)

- ① Akira Chiba, Kazuki Sotome, Yuto Iiyama, and M. Azizur Rahman, "A Novel Middle-Point-Current-Injection-Type Bearingless PM Synchronous Motor for Vibration Suppression", IEEE Transactions on Industry Applications,



- vol.47, no.4, July/August, 2011, pp.1700-1706 査読有
- ② 浅見哲朗、今川聖、朝間淳一、千葉明、中島厚 「2軸制御アウターロータ型ベアリングレスモータにおける受動磁気軸受の効果」日本AEM学会誌 vo.19, no.2, pp.395-400, 2011 査読有
- ③ Junichi Asama, Tetsuro Asami, Takashi Imakawa, Akira Chiba, Atsushi Nakajima and M. Azizur Rahman, "Effects of Permanent-Magnet Passive Magnetic Bearing on a Two-Axis Actively Regulated Low-Speed Bearingless Motor", IEEE Transaction on Energy Conversion, vol.26, no.1, pp.46-54, 2011 査読有
- ④ Junichi Asama, Miya Amada, Norimasa Tanabe, Naoya Miyamoto, Akira Chiba, Satoru Iwasaki, Masatsugu Takemoto, Tadashi Fukao and M. Azizur Rahman, "Evaluation of a Bearingless PM Motor With Wide Magnetic Gaps", IEEE TRANSACTIONS ON ENERGY CONVERSION, VOL. 25, NO. 4, DECEMBER 2010 pp.957-964 査読有
- ⑤ Naoki Tsukada, Takayoshi Onaka, Junichi Asama, Akira Chiba and Tadashi Fukao, "Novel Coil Arrangement of an Integrated Displacement Sensor With Reduced Influence of Suspension Fluxes for a Wide Gap Bearingless Motor", IEEE TRANSACTIONS ON INDUSTRY APPLICATIONS, VOL. 46, NO. 6, NOVEMBER/DECEMBER 2010 pp.2304-2310 査読有
- ⑥ 朝間淳一、千葉明、深尾正 「円筒磁石可動形コアレスラスト磁気軸受の設計と性能評価」電学論D,129巻、11号、pp.1085-1091 2009年11月 査読有
- ⑦ Miya Amada, Naoya Miyamoto, Takehiro Enomoto, Norimasa Tanabe, Junichi Asama, Akira Chiba, Tadashi Fukao, Satoru Iwasaki, and Masatsugu Takemoto, "A Case Study of Suspension Characteristics of a Bearingless Motor Supplied by Inverters Having Different Voltage and Current Ratings", JSME Journal of System Design and Dynamics, vol.3, no.4, pp.506-518, 2009 査読有
- ⑧ Yoshihiro Asano, Akira Mizuguchi, Miya Amada, Junichi Asama, Akira Chiba, Masahide Ooshima, Masatsugu Takemoto, Tadashi Fukao, Osamu Ichikawa, and David G Dorrell, "Development of a 4-axis Actively Controlled Consequent-Pole Type Bearingless Motor", IEEE Transaction on Industry Applications, vol.45, no.4, pp.1378-1386, July 2009 査読有
- ⑨ Junichi Asama, Miya Amada, Masatsugu Takemoto, Akira Chiba, Tadashi Fukao, Azizur Rahman, "Voltage Characteristics of a Consequent-Pole Bearingless PM Motor With Concentrated Windings", IEEE Transaction on Magnetics, vol.45, no.6, pp.2823-2826, 2009 査読有
- ⑩ Hiroya Sugimoto, Kousuke Kamiya, Ryo Nakamura, Junichi Asama, Akira Chiba, and Tadashi Fukao, "Design and Basic Characteristics of Multi-Consequent-Pole Bearingless Motor with Bi-Tooth Main Poles", IEEE Transaction on Magnetics, vol.45, no.6, pp.2791-2794, 2009 査読有
- ⑪ Naoya Miyamoto, Takehiro Enomoto, Miya Amada, Junichi Asama, Akira Chiba, Tadashi Fukao, Satoru Iwasaki and Masatsugu Takemoto, "Suspension Characteristics Measurement of a Bearingless Motor", IEEE Transaction on Magnetics, vol.45, no.6, pp.2795-2798, 2009 査読有
- [学会発表] (計13件)
- ① 大石陵平、杉元紘也、千葉明 「モータ巻線並列型ベアリングレスモータと従来型の比較」平成24年度電気学会全国大会 於広島工業大学 2012年3月21日
- ② 杉元紘也、千葉明 「2軸制御ベアリングレスモータの回転子重心位置に対する積分ゲイン決定法」平成24年度電気学会全国大会 於広島工業大学 2012年3月23日
- ③ 杉元紘也、朝間淳一、千葉明 「2軸制御ベアリングレスモータの磁気支持定数測定」電気学会リニアドライブ、モータドライブ合同研究会 MD-11-77, LD-11-101, pp.19-24, 2011.12.15 於静岡大学
- ④ 大石陵平、杉元紘也、千葉明 「モータ巻線並列型新ベアリングレスモータの提案」電気学会リニアドライブ、モータドライブ合同研究会 MD-11-76 LD-11-100 pp.13-18, 2011.12.15 於静岡大学
- ⑤ 杉元紘也・朝間淳一・千葉明、 「2軸制御ベアリングレスモータの磁気支持制御と安定性に関する検討」電気学会平成23年産業応用部門大会 3-76, 6 pages, 2011.9 於琉球大学
- ⑥ Ryo Nakamura, Junichi Asama, Akira Chiba, "Investigation of Suspension

Force Difference between Experiment and FEM in Consequent-Pole Bearingless Motor”, IEEE InterMag 2011. 5. 11 於 Taipei

- ⑦ 浅見哲朗、今川聖、朝間淳一、千葉明、中島厚 「2 軸制御アウターロータ型ベアリングレスモータにおける受動磁気軸受の効果」第 19 回 MAGDA コンファレンス於札幌 OS2-TA6 pp. 71-76 2010 年 11/22
- ⑧ 塚田 尚樹、千葉明、朝間 淳一、深尾 正、「ワイドギャップ型ベアリングレスモータ組み込み式変位センサにおける変位推定用サーチコイルに生じる電磁的干渉の考慮」電気学会半導体電力変換・リニアドライブ研究会 SPC-09-187, LD-09-077 2009. 12. 17 @浜松
- ⑨ Ryo Nakamura, Kosuke Kamiya, Akira Chiba, Junichi Asama, Tadashi Fukao, “Stator Design of a Multi-Consequent-pole Bearingless Motor with Toroidal Winding”, IEEE Energy Conversion Conference and Exposition (ECCE) Proceedings, pp. 2403-2408 @San Jose 2009 Sept. 20
- ⑩ Naoki Tsukada, Takayoshi Onaka, Junichi Asama, Akira Chiba, Tadashi Fukao, “Novel Coil Arrangement of an Integrated Displacement Sensor with Reduced Influence of Suspension Fluxes for a Wide Gap Bearingless Motor”, IEEE Energy Conversion Conference and Exposition (ECCE) Proceedings, pp. 2474-2480 @San Jose 2009 Sept. 20
- ⑪ Junichi Asama, Naoya Miyamoto, Takehiro Enomoto, Miya Amada, Akira Chiba, and Tadashi Fukao, “A Novel Design of a Thrust Magnetic Bearing with a Cylindrical-Shaped Rotor”, IEEE 2009 PES General Meeting, PESGM2009-000804, 4 pages, 2009/7/26 Calgary
- ⑫ 榎本偉大、宮本直哉、朝間淳一、千葉明 「5 軸制御型ベアリングレスポンプの軸支持特性」第 2 1 回「電磁力関連のダイナミクス」シンポジウム講演論文集 電気学会 20B2-1 pp. 143-148 2009. 5. 20 @メルパルク長野
- ⑬ 塚田尚樹、益子明宏、千葉明、深尾正、朝間淳一「ワイドギャップ型ベアリングレスモータ組み込み式変位センサにおける軸支持巻線による誘起電圧の低減法」電気学会回転機研究会 RM-09-33 pp. - @電気学会本部 平成 2 1 年 5 月 1 5 日

〔図書〕(計 0 件)

〔産業財産権〕

○出願状況 (計 1 件)

名称：電動機、この電動機の固定子、およびこの電動機を備える電動機システム  
発明者：大石陵平、杉元紘也、千葉明  
権利者：東京工業大学  
種類：特許  
番号：特願 2 0 1 1 - 2 7 2 6 7 7  
出願年月日：2 0 1 1 年 1 2 月 1 3 日  
国内外の別：国内

○取得状況 (計 0 件)

〔その他〕

ホームページ等

<http://www.chiba.ee.titech.ac.jp/index.html>

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

千葉 明 (CHIBA AKIRA)

東京工業大学・大学院理工学研究科・教授  
研究者番号：30207287

### (2) 研究分担者

杉元 紘也 (SUGIMOTO HIROYA)

東京工業大学・大学院理工学研究科・助教  
研究者番号：60613552

### (3) 連携研究者

竹本 真紹 (TAKEMOTO MASATSUGU)

北海道大学・情報科学研究科・准教授  
研究者番号：80313336

### (4) 連携研究者

朝間 淳一 (ASAMA JUNICHI)

静岡大学・工学部・機械工学科・准教授  
研究者番号：70447522

### (5) 連携研究者

大島 政英 (MASAHIDE OSHIMA)

諏訪東京理科大学・システム工学部・教授  
研究者番号：70233103