

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 27 年 6 月 4 日現在

機関番号：12608

研究種目：基盤研究(A)

研究期間：2012～2014

課題番号：24246046

研究課題名(和文) ワイドギャップをもつベアリングレスモータの安定化と低コスト方式の研究開発

研究課題名(英文) Suspension and cost down of bearingless motor with wide gap length

研究代表者

千葉 明 (Chiba, Akira)

東京工業大学・理工学研究科・教授

研究者番号：30207287

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 35,700,000円

研究成果の概要(和文)：埋込型補助人工心臓、半導体製造装置、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と非接触磁気力支持を一体化した電磁機械である。ポンプとして応用する用途では、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。

しかし、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。そこで、本研究では、従来のベアリングレスモータを超える新しい構造を考案した。回転子半径 R とギャップ長 g の比 g/R をモータギャップ長評価指標とし、従来モータの10倍程度大きい0.1以上を実現するベアリングレスモータの研究開発を行った。

研究成果の概要(英文)：In the applications of implantable blood pumps, semiconductor and pharmacy process, needs of bearingless motor has been enhanced recent years. Bearingless motor combines motor and magnetical suspension systems. In pump applications, wide magnetic gap length is required between a rotor and a stator.

In general, motor and magnetic suspension performance become inferior if the gap length is enlarged. Thus, new structures in bearingless motors have been investigated. The gap ratio g/R , where g and R are a gap length and a rotor radius, respectively, more than 0.1, that is about 10 time the conventional motor has been researched and developed.

研究分野：磁気支持、磁気浮上工学

キーワード：ベアリングレスモータ 磁気支持 磁気浮上 非接触

1. 研究開始当初の背景

埋込型補助人工心臓、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非接触磁気力支持を一体化した電磁機械である。

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隔壁が構成されている。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に漏れる問題がある。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ー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。そこで、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。

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、回転子半径 R とギャップ長 g の比 g/R をモータギャップ長評価指標として用いる。たとえば、回転子半径が 32mm 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 0.16 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 0.01 から 0.003 であるので、

0.16 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が従来の 10 倍程度大きく、 g/R が 0.1 以上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、スイスにおいて、モータギャップ長評価指標 0.07 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、アメリカ、ドイツ、イギリス、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、0.1 以上のワイドギャップを実現したとの論文は見あたらない状況にある。

国内では、茨城大学、立命館大学、高知工科大学、諏訪東京理科大学、群馬大学などでベアリングレスモータの研究開発が活発に行われているが、ギャップ長は小さいものが試作されている状況にあり、ワイドギャップに関する研究は少ない。

申請者らは 20 年前にベアリングレスモータの統一理論を発表し、各種電動機のベアリングレス化を検討し、国内外に先駆けて研究開発を行ってきた。特に、3 年前よりワイドギャップのベアリングレスモータの研究開発に着手している。しかし、モータの力率向上、支持に必要な電圧電流の軽減、小型軽量化、低価格化のニーズが高く、さらなる研究開発が必要な状況にある。

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) 大型で安定なワイドギャップのベアリングレスモータポンプの研究開発。
- (2) 中型で能動位置制御が 2 軸へ低減したワイドギャップのベアリングレスモータの研究開発。
- (3) 小型で能動位置制御が 1 軸の極低価格ワイドギャップのベアリングレスモータの研究開発。

3. 研究の方法

(1) では、ギャップ評価指標が 0.15 以上で有りながら、モータの力率を 0.8 以上に高めたベアリングレスモータを設計する。ホモポラでかつ表面磁石貼り付け構造と融合する新しい構造を提案し、3 次元有限要素法

磁界解析を行う。さらに、巻線に新たに中点電流注入形を適用することにより銅損を低減し、効率を向上、小型軽量化する。試作機を試作し、ポンプ化し、水中で運転する。水中で安定に運転するために、気体中、水中を連続的に対応可能なコントローラの設計と制御対象の同定を行う。

(2)では、ギャップ評価指標が0.1以上のワイドギャップベアリングレスモータを試作する。特殊なホモポーラ構造の永久磁石を配置し、より少ない電流で大きな支持力を発生する構造を検討する。さらに、能動制御位置をx、yの2軸とすることによりコストを1の4割に削減する。この際、ワイドギャップ化により、受動支持軸の剛性が低下する恐れがある。そこで、受動支持軸の剛性を高める新たな受動型永久磁石支持機構を提案する。さらに、試作機を製作し、安定な磁気浮上と回転を確認する。

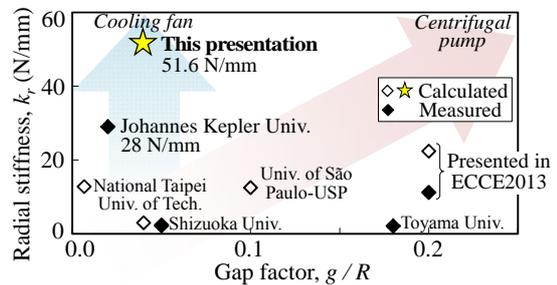
(3)では、1の2割あるいはそれ以下にコストを削減する一軸能動制御のベアリングレスモータを試作する。ギャップ評価指標は0.1以上のワイドギャップとする。

このワイドギャップのベアリングレスモータにおいても世界各国をリードする研究成果が予測され、一流ジャーナル誌へ論文が数通掲載になると予測される。さらに、大学発ベンチャー等を介して実用化することにより、国内半導体、液晶産業の高品質化、歩留まりの向上などが期待される。

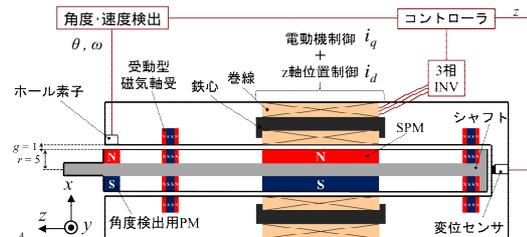
4. 研究成果

東京工業大学においては、ワイドギャップの1軸ベアリングレスモータを試作し、安定な磁気浮上を実現するとともに、数千rpmまでの駆動を実現した。また、比較用としてギャップが小さい1軸シングルドライブベアリングレスモータを試作し、回転、浮上に成功した。

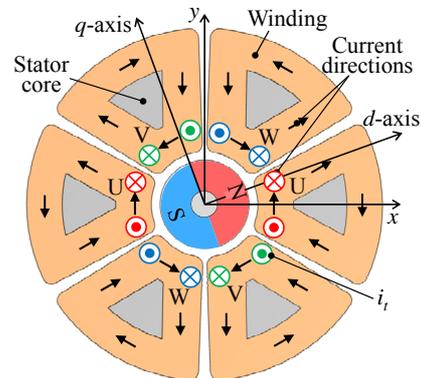
図1(a)は従来型との比較で有り、本研究の試作機は $g/R=0.2$ では飛び抜けた剛性を実現している。また、 $g/R=0.04$ でも剛性が高い。図1(b)はワイドギャップの試作機のz方向断面を示している。図1(c)はxy断面を示している。



(a) ギャップファクターと剛性



(b) z 方向断面



(c) x y 方向断面

図1 小型1軸制御ワイドギャップベアリングレスモータ

静岡大学の中型2軸制御ベアリングレスモータについては、回転半径 $R=40\text{mm}$ 、磁気ギャップ $g=8\text{mm}$ ($g/R=0.2$) のワイドギャップベアリングレスモータの新構造を提案した(図2参照)。固定子にはC形分割鉄心を用い、回転子はコンシクエントポールとホモポーラを組み合わせた構造とした。ワイドギャップでも十分な磁気支持力とトルクを得るために、三次元有限要素法を用いた電磁界解析により寸法・形状を検討した。次いで、テスト機を試作し(図3参照)評価試験を行った。回転時に、永久磁石の漏れ磁束が渦

電流変位センサにノイズとして作用するため、ノッチフィルタによりノイズを除去した。これにより、6000r/minでの回転、およびフィルタ導入前と比較して最大で83%の低消費電力化を実現した。ワイドギャップ下においても安定した支持力と剛性を得られることを実験により検証した。

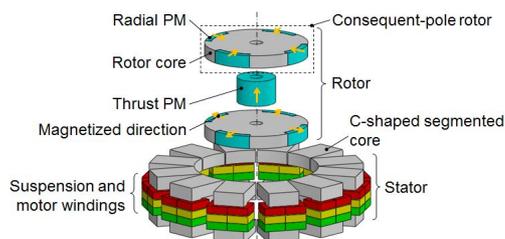


図2 ワイドギャップベアリングレスモータの新構造

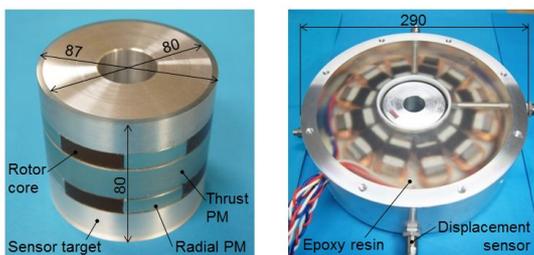


図3 テスト機

北海道大学では、大型（出力 2.56kW）4軸制御超高速ワイドギャップベアリングレスモータ（ $g/R=0.106$ ）の研究を行った。具体的には、まず、3D-FEM解析を用いて、試作機を詳細に解析・設計し、実際に試作機を製作した。図4は、製作した試作機の写真を示す。製作した試作機は、10万 r/minの超高速回転下で実負荷試験を実施するために、同じベアリングレスモータのユニットを2個備えており、それらがタンデムに接続された構成となっている。次に、40kHzの高周波スイッチングに対応可能なインバータドライブシステムを作成した。そして、製作した試作機とインバータドライブシステムを組み合わせることで、10万 r/minでの回転浮上実験及び実負荷試験を実施した。図5は、風損を

損失に含めない電磁機械単体の電動機効率、風損を損失に含めた電動機のみ効率、軸支持電力を損失に含めたベアリングレスモータ全体の総合効率を示す。1ユニットあたりの最大出力 1.28kWの時に、風損を損失に含めない電動機効率は91.8%、風損を含めた電動機効率は90.7%、さらに、軸支持電力を含めたベアリングレスモータ全体の総合効率は90.1%であった。したがって、超高速モータの使用用途で最も多用する最大出力時の効率は、ベアリングレスモータ全体の総合効率で評価しても、90%を超えていることから、10万 r/minの超高速回転下での出力の発生と安定した磁気浮上回転の両立に加えて、高効率を達成することができた。

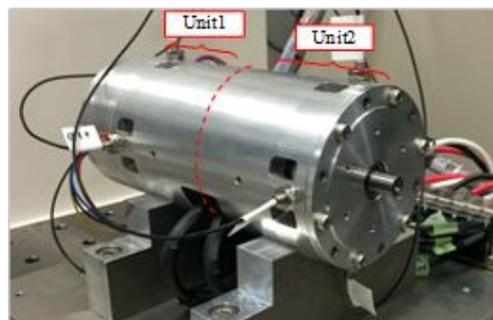


図4 試作機

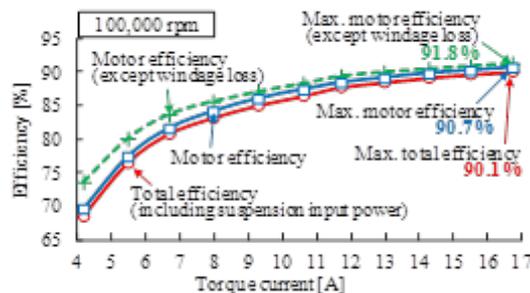


図5 10万 r/min 負荷試験結果

東京都市大学では、構造的に高トルクの発生可能なバーニアモータや磁気ギアードモータに着目し、これらに磁気浮上の機能を付加した低速高トルク向けのベアリングレスモータについて研究を行った。図6は、提案するベアリングレスバーニアモータ例であり、その断面図を示している。固定子と回転子にはそれぞれ小スロットが設けられており、その数は固定子が136個、回転子が132

個となっている。また、モータの極数は4極機であり、固定子には4極の電動機巻線と2極の軸支持巻線が巻かれている。図6では、4極の励磁磁束と2極の軸支持磁束の重ね合わせにより磁束密度の不均衡を作り出し、回転子には右方向に軸支磁力が作用している。本年度は、3D-FEM解析を用いてベアリングレスパーニアモータの構造について検証を行い、高トルクの発生と磁気浮上が両立できることを確認した。

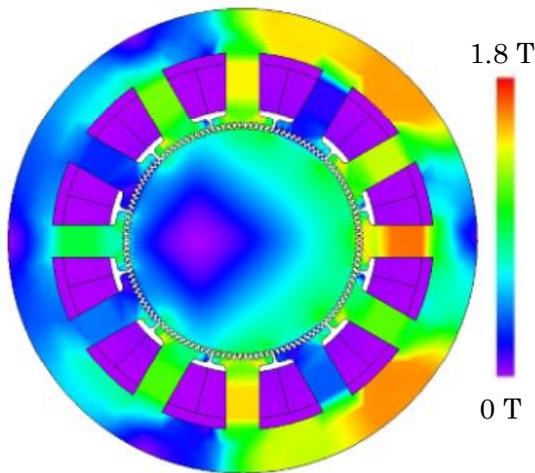


図6 ベアリングレスパーニアモータ

まとめ

紙面が限られているため、すべてを喜寿することはできなかったが、以下の主な発表論文等に詳細を記載している。主な発表論文は一流国際ジャーナルを中心として研究成果の発表を行った。

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 12 件)

Hiroya Sugimoto, Seiyu Tanaka, Akira Chiba, and Junichi Asama "Principle of a Novel Single-Drive Bearingless Motor with Cylindrical Radial Gap", IEEE Transactions on Industry Applications, September/October 2015 査読有(掲載決定) DOI: 10.1109/TIA.2015.2424883

Hiroya Sugimoto, Seiyu Tanaka, Akira Chiba, and M. A. Rahman, "Fold Angle of Winding Arrangement in Single-Drive Bearingless Motor with Radial Gap", IEEE Journal of Industry

Applications, vol.4, no.4, 8 pages, 2015 査読有(掲載決定) <http://www.iee.or.jp/> 三好将仁, 杉元紘也, 千葉明 「2軸制御ベアリングレスモータに関する軸方向振動の抑制方法の提案」日本AEM学会誌 Vol.23 No.1, pp199-205, 査読有 2015 www.jsaem.gr.jp/

Junichi Asama, Daisuke Kanehara, Takaaki Oiwa, and Akira Chiba, "Development of a Compact Centrifugal Pump With a Two-Axis Actively Positioned Consequent-Pole Bearingless Motor", IEEE Transaction on Industry Applications, vol.50, no.1, pp.288-295, January, 2014. 査読有, DOI:10.1109/TIA.2013.2270452

Hiroya Sugimoto, and Akira Chiba, "Stability Consideration of Magnetic Suspension in Two-Axis Actively Positioned Bearingless Motor With Collocation Problem", IEEE Transaction on Industry Applications, vol.50, no.1, January 2014, pp.338-345 DOI:10.1109/TIA.2013.2271251

Junichi Asama, Daisuke Kanehara, Takaaki Oiwa, and Akira Chiba, "Suspension Performance of a Two-Axis Actively Regulated Consequent-Pole Bearingless Motor", IEEE Transaction on Energy Conversion, VOL.28, NO.4, pp.894-901, DECEMBER 2013 査読有, DOI:10.1109/TEC.2013.2283724

Hiroya Sugimoto, Yusuke Uemura, Akira Chiba and M.A.Rahman, "Design of Homopolar Consequent-pole Bearingless Motor with Wide Magnetic Gap", IEEE Transaction on Magetics, vol.49, no.5, May 2013, pp.2315-2318 査読有, DOI: 10.1109/TMAG.2013.2243420

Ryohei Oishi, Satoshi Horima, Hiroya Sugimoto and Akira Chiba, "A Novel Parallel Motor Winding Structure for Bearingless Motors", IEEE Transactions on Magnetics, vol.49, no.5, May 2013, pp. 2287-2290 査読有, DOI: 10.1109/TMAG.2013.2240279

Junichi Asama, Yuki Hamasaki, Takaaki Oiwa, and Akira Chiba, "Proposal and Analysis of a Novel Single-drive Bearingless Motor", IEEE Transactions on Industrial Electronics, vo.60, no.1, pp.129-138, 2013 January. 査読有, DOI: 10.1109/TIE.2012.2183840

杉元紘也, 朝間淳一, 千葉明, 「トロイダル巻を用いた多極コンシクエントポール型ベアリングレスモータの磁気支持特性」電気学会論文誌 D(産業応用部

門誌) 132 卷 No.12, 2012 年 12 月 pp.1112-1120 査読有
Akira Chiba and Junichi Asama, "Influence of Rotor Skew in Induction Type Bearingless Motor", *IEEE Transaction on Magnetics*, vol.48, no.11, Nov. 2012, pp.4646-4649 査読有, DOI:10.1109/TMAG.2012.2198872
J. Asama, R. Natsume, H. Fukuhara, T.Oiwa, and A. Chiba, "Optimal Suspension Winding Configuration in a Homo-Polar Bearingless Motor", *IEEE Transaction on Magnetics*, vol.48, no.11, Nov. 2012, pp.2973-2976 査読有, DOI:10.1109/TMAG.2012.2196501

[学会発表](計 12 件)

J. Asama, T. Tatara, T. Oiwa, and A. Chiba, "Suspension Performance of a Two-DOF Actively Positioned Consequent-Pole Bearingless Motor with a Wide Magnetic Gap", *The IEEE International Electric Machines and Drives Conference 2015* May 11, 2015 Coeur d'Alène, Idaho, USA.

林 正大, 松崎 達也, 竹本 真紹, 小笠原 悟司, 千葉 明, 「2 極電動機・4 極軸支持構造を持つ超高速ベアリングレスモータの運転特性」平成 27 年電気学会全国大会 2015 年 3 月 24 日 東京都市大学, 東京都 世田谷区

中尾正裕, 杉山昂司, 土方規実雄, 田中康弘, 「ベアリングレスパーニアモータの提案」平成 27 年電気学会全国大会 2015 年 3 月 24 日 東京都市大学, 東京都 世田谷区

杉元 紘也「シンプルな 1 軸制御シングルドライブベアリングレスモータ」平成 27 年電気学会全国大会 2015 年 3 月 24 日 東京都市大学, 東京都 世田谷区

三好将仁「2 軸制御ベアリングレスモータの軸方向振動抑制による減衰性と D ゲインの比較」平成 27 年電気学会全国大会 2015 年 3 月 24 日 東京都市大学, 東京都 世田谷区

本戸達也「ベアリングレスモータのホール素子を用いたスラスト変位検出方法の検討」平成 27 年電気学会全国大会 2015 年 3 月 24 日 東京都市大学, 東京都 世田谷区

志村樹「高剛性 1 軸制御シングルドライブベアリングレスモータの能動的な軸方向支持力の測定」平成 27 年電気学会全国大会 2015 年 3 月 24 日 東京都市大学, 東京都 世田谷区

田中誠祐「V 字巻線を施したシングルドライブベアリングレスモータのトルク向上の検討」平成 27 年電気学会全国大

会 2015 年 3 月 24 日 東京都市大学, 東京都 世田谷区

J. Asama, T. Tatara, T. Oiwa and A. Chiba, "A Two-Axis Actively Regulated Consequent-Pole Bearingless Motor with Wide Magnetic Gaps", *IEEE Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE) 2013*, pp. 1541-1546, Sep. 18, Denver, Colorado, USA, 2013.

多々良朋慶, 朝間淳一, 大岩孝彰, 千葉 明, "分割 C 形鉄心を有するベアリングレスモータのワイドギャップ化", 平成 25 年電気学会産業応用部門大会 2013 年 8 月 28 日 山口大学, 山口県 山口市

多々良朋慶, 朝間淳一, 大岩孝彰, 千葉 明, "ワイドギャップベアリングレスモータの三次元 FEM による支持力・トルク解析", 第 25 回電磁力関連のダイナミクスシンポジウム 2013 年 5 月 16 日 箱根ホテル小涌園, 神奈川県 足柄下郡

朝間淳一, 多々良朋慶, 大岩孝彰, 千葉 明, "ワイドギャップベアリングレスモータの三次元有限要素解析による性能評価", 電気学会モータドライブ/リニアドライブ合同研究会, MD-12-83/LD-12-103, 2012 年 12 月 14 日, 高知工科大学, 高知県 香美市

6. 研究組織

(1) 研究代表者

千葉 明 (Chiba, Akira)
東京工業大学・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・理工学研究科・助教
研究者番号: 60613552

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

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

土方 規実雄(Hijikata, Kimio)
東京都市大学・工学研究科・助教
研究者番号: 70710507