

科学研究費助成事業（学術研究助成基金助成金）研究成果報告書

平成 25 年 05 月 25 日現在

機関番号：10101

研究種目：若手研究（B）

研究期間：2011～2012

課題番号：23760250

研究課題名（和文） 円筒形回転子を備えた 3 軸能動制御型磁気軸受の開発

研究課題名（英文） Development of a 3-axis Active Control Type Magnetic Bearing with a Cylindrical Rotor

研究代表者

竹本 真紹 (TAKEMOTO MASATSUGU)

北海道大学・大学院情報科学研究科・准教授

研究者番号：80313336

研究成果の概要（和文）：近年、モータへの高効率化・高出力化の要望が年々高まっている。その解決策の一つがモータの高速化であり、モータを高速化する際に必要となるのが、組立性が良い小型の磁気軸受の開発である。そこで、研究代表者は、円筒形回転子を備えることで組立性を大きく向上し、半径方向の 2 軸と軸方向の 1 軸をそれぞれ支持する 2 種類の磁気軸受を一体化することで大幅な小型化を実現する「円筒形回転子を備えた 3 軸能動制御型磁気軸受」を提案している。本研究では、提案する磁気軸受の試作機を実際に製作し、その有効性を実験により検証した。

研究成果の概要（英文）：In recent years, high efficiency and high output power are demanded for electrical motors. One of solution is improvement in the speed of motors. Owing to realizing high speed motors, development of a small magnetic bearing with sufficient assembly characteristic is needed. Accordingly, the research representative have proposed a novel structure of a 3-axis active control type magnetic bearing with the cylindrical rotor. This novel magnetic bearing are characterized by integration of the thrust magnetic bearing without the large disk rotor and the 2-axis active control type radial magnetic bearing. It is found with experimental results that the novel magnetic bearing is equipped with the sufficient performance.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
交付決定額	3,400,000	1,020,000	4,420,000

研究分野：工学

科研費の分科・細目：電気電子工学 電力工学・電力変換・電気機器

キーワード：磁気浮上, 磁気支持, 磁気軸受

1. 研究開始当初の背景

近年、省エネルギー・省資源対策などから、モータへの高効率化・高出力化の要望が年々高まっている。その解決策として注目されているのがモータの高速化である。大型の空調や冷凍設備といった大型のターボ機械では、高速化することによるシステムとしての高効率化・小型化の効果が非常に高いため、高速化への要望は極めて強い。そこで、モータを高速化する際に必要となるのが、回転子主

軸を電磁力で非接触支持できる磁気軸受である。磁気軸受は、非接触・無摩擦・低騒音・メンテナンスフリーといった特長を持つため、スイス工科大学 (ETH) や茨城大学、そして、立命館大学などの研究グループ、さらには、三菱重工業 (株) や (株) 荏原製作所、そして、Sulzer 社などの企業に所属する国内外の研究者によって、盛んに研究・開発されている。

磁気軸受を用いて回転子主軸を 5 軸能動制

御で完全非接触支持を行う場合について考えてみる。従来の磁気軸受を用いた一般的なシステムでは、半径方向の2軸を支持するラジアル磁気軸受をモータの両側にそれぞれ設置し、軸方向の1軸を支持するために、大径のディスク形回転子を備えたスラスト磁気軸受をターボ機械などの負荷機とは反対の反側に設置する構成となっている。したがって、システム全体として4ユニット構造となっている。しかし、従来のスラスト磁気軸受は、大径のディスク形回転子のために、組立を行う際、回転子主軸を反側から挿入した後、負荷機を後付けで直側から装着するといった組立性の悪さや負荷機を含めた回転子主軸のバランス取りの難しさ、さらには、大径のディスク形回転子部分の周速上昇による回転速度の制限といった問題があった。そして、システム構成が4ユニット構造のため、大型化・高価格化し、これらの問題が磁気軸受システムの普及の障害、すなわち、モータの高速化の障害になっていた。

2. 研究の目的

そこで、研究代表者は、大径のディスク形回転子の代わりにモータ部分の回転子と同じ直径を持つ円筒形回転子を備えることで組立性を従来型に比べ大きく向上し、そして、ラジアル磁気軸受とスラスト磁気軸受の機能を一体化することで大幅な小型化を実現する「円筒形回転子を備えた3軸能動制御型磁気軸受」を新たに提案している。提案する磁気軸受を用いた場合、負荷機を予め装着してバランス取りを行った回転子主軸を直側から直接挿入できるといった組立性の良さやバランス取りの取り易さといった利点を持つ。そして、全体のシステム構成を4ユニットから3ユニットに減少することができ、装置の小型化、低価格化、さらには、軸長の短縮によるさらなる高速化が期待できる。

また、研究代表者は、これまで、モータとラジアル磁気軸受の機能を一体化したベアリングレスモータの研究開発を一貫して行ってきた。ベアリングレスモータは、一つの固定子内に電動機用と軸支持用の2種類の巻線を備えることで、トルクの発生と回転子主軸の非接触支持を同時に実現できるモータである。したがって、これまでに開発したベアリングレスモータと新たに提案する磁気軸受を組み合わせれば、5軸能動制御の完全非接触支持を従来型に比べ僅か半分の2ユニット構成で実現できる。これにより、装置の大幅な小型化、低価格化をさらに進めることができ、磁気軸受システムの普及の促進、すなわち、モータの高速化による省エネルギー

化・省資源化を推し進めることができる。

以上のことから、新たに提案する円筒形回転子を備えた3軸能動制御型磁気軸受を開発することは、極めて重要である。

昨年度までに、提案する磁気軸受に対して、3次元有限要素法非線形磁界解析を行い、(1)定格電流通電時に、想定される回転子主軸の総重量に対して、半径方向、軸方向ともに十分な軸支持力を発生できる、(2)すべての電流条件において、半径方向と軸方向の軸支持力の間に干渉が発生せず、独立して制御可能である、という非常に優れた特性を持つことを確認した。しかし、実機による検証はまだ行われていない。

そこで、本研究の目的は、円筒形回転子を備えた3軸能動制御型磁気軸受の試作機を実際に製作し、高速回転での安定な軸支持運転を実現する。そして、高速回転試験と負荷試験を通じて、その有効性を実験により検証することである。

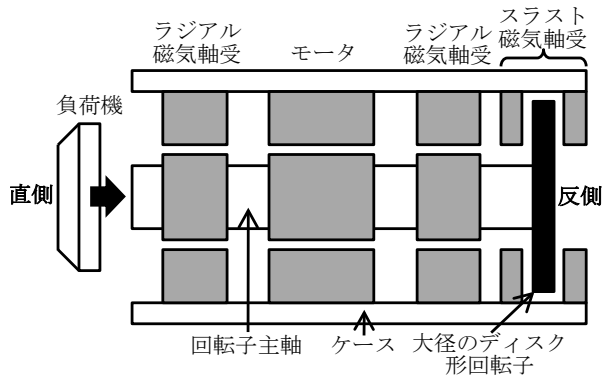
3. 研究の方法

(1)提案する磁気軸受の構造と動作原理

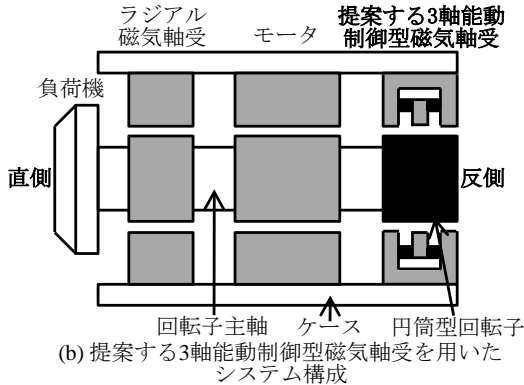
図1に、磁気軸受を用いて回転子主軸を5軸能動制御で完全非接触支持を行う場合のシステム構成を示す。図1(a)は、従来の磁気軸受を用いた場合のシステム構成である。先に述べたように、従来構造の磁気軸受を用いた場合、システム全体として4ユニット構造となる。そして、スラスト磁気軸受で用いられる大径のディスク形回転子のために、組立性の悪さや負荷機を含めた回転子主軸のバランス取りの難しさ、さらには、大径のディスク形回転子部分の周速上昇による回転速度の制限といった問題があることがわかる。

図1(b)に、提案する磁気軸受を用いた場合のシステム構成を示す。提案する磁気軸受は、1ユニット内で3軸の能動制御ができるため、全体のシステム構成を4ユニットから3ユニットに減少できる。さらに、提案する磁気軸受は、円筒形回転子を備えているため、負荷機を予め装着してバランス取りを行った回転子主軸を直側から直接挿入できるといった組立性の良さやバランス取りの取り易さといった利点を持つ。

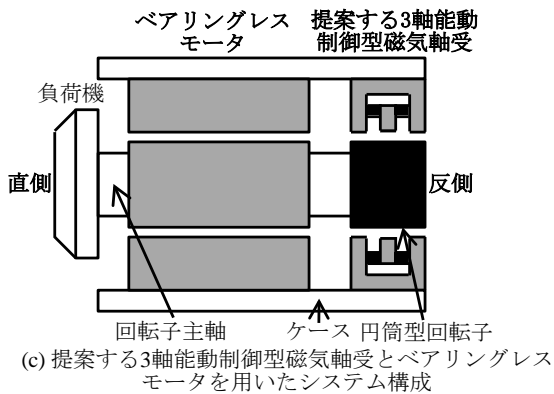
そして、図1(c)は、ベアリングレスモータと提案する磁気軸受を組み合わせた場合のシステム構成を示す。5軸能動制御を従来型に比べ僅か半分の2ユニット構成で実現でき、装置の大幅な小型化、低価格化を進めることができ、磁気軸受システムの普及の促進、すなわち、モータの高速化による省エネルギー化・省資源化を推し進めることができる。



(a) 従来型の磁気軸受を用いたシステム構成



(b) 提案する3軸能動制御型磁気軸受を用いたシステム構成



(c) 提案する3軸能動制御型磁気軸受とベアリングレスモータを用いたシステム構成

図1 磁気軸受を用いたシステム構成

図2に、その基本構造の断面図を示す。円筒形の非常にシンプルな形状の回転子が中心にあり、その外側に半径方向の2軸を制御するために、4個の突部にそれぞれ集中巻で巻かれた2組のラジアル巻線を備えたラジアル制御用固定子が設置されている。このラジアル制御用固定子のヨーク部分は、図2に示すように、軸方向に向きあうように着磁された片側4個の計8個のスラスト永久磁石によって挟み込まれている。さらに、ラジアル制御用固定子とスラスト永久磁石を覆うように、コの字型の断面をもつスラスト制御用の固定子が一番外側に設置されている。また、スラスト制御用固定子のコの字型断面の一番内側には、軸方向の1軸を制御するために、周方向に巻かれたスラスト巻線が配置されている。以上のような構造により、スラスト

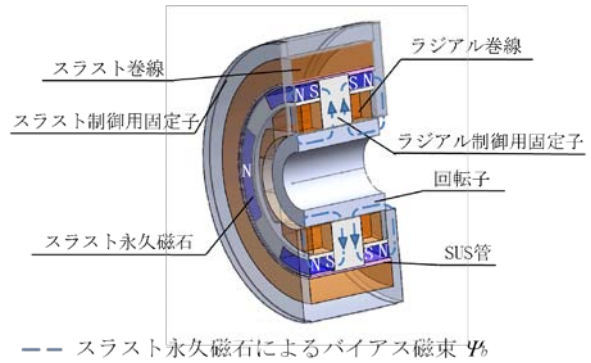


図2 提案する円筒形回転子を備えた3軸能動制御型磁気軸受の断面構造

永久磁石によって発生するバイアス磁束 Ψ_b とラジアル巻線との相互作用により、半径方向の2軸を制御するための軸支持力が発生でき、そして、バイアス磁束 Ψ_b とスラスト巻線との相互作用により、軸方向の1軸を制御するための軸支持力がそれぞれ発生できる。この結果、1ユニットで3軸の軸支持が可能となる。

(2)2011年度

①試作機の設計&製作

新たに提案する円筒形回転子を備えた3軸能動制御型磁気軸受とベアリングレスモータを組み合わせることで、図1(c)に示す2ユニット構成で5軸能動制御による完全非接触支持を実現できる試作機を設計・製作する。

提案する磁気軸受の基本的な磁気回路設計については、昨年度までに行った3次元有限要素法非線形磁界解析によりすでに終了している。しかし、昨年度までは、カットアンドトライで解析を行った状況であり、提案する磁気軸受に対する各部形状の最適化に関してはまだ不十分であると思われる。そこで、本年度は、昨年度までの解析により得た回転子・固定子の各部形状と軸支持特性との関係に基づいて、各部形状の最適化を行い提案する磁気軸受を設計する。

一方、ベアリングレスモータに関しても、提案する磁気軸受の形状に合わせて、2極電動機・4極軸支持構造の埋込永久磁石型ベアリングレスモータを設計する。

上記の設計に基づいて、図1(c)に示す2ユニット構成で5軸能動制御による完全非接触支持を実現できる試作機を製作する。

②提案する磁気軸受の軸支持特性の測定

製作した試作機を用いて、半径方向・軸方向の荷重試験を実施し、提案する磁気軸受が、解析結果どおりに、(1)回転子主軸の総重量に対して、実用に耐えられるだけの十分な軸支持力を発生できる、(2)すべての電流条件において、半径方向と軸方向の軸支持力の間



(a) 製作した試作機



(b) 製作した高性能ドライブシステム

図3 製作した試作機と高性能ドライブシステムの写真

に干渉が発生せず、独立して制御可能である、という非常に優れた軸支持特性を備えているか実験により検証する。

(3)2012年度

①高速回転用高性能ドライブシステムの開発と高速回転の実現

前年度に測定した軸支持特性に基づいて、提案する磁気軸受とベアリングレスモータの軸支持制御がお互いにリンクし、高速回転に対応可能な専用の高性能ドライブシステムを製作する。

そして、製作した試作機とこの高性能ドライブシステムを組み合わせることで、高速回転での安定な軸支持運転を実現する。

4. 研究成果

図3に製作した試作機と高性能ドライブシステムを示す。製作した試作機と高性能ドライブシステムを用いて、新たに提案する円筒形回転子を備えた3軸能動制御型磁気軸受の軸支持特性を測定した結果を以下に示す。

図4は、提案する円筒形回転子を備えた3軸能動制御型磁気軸受のラジアル軸支持特

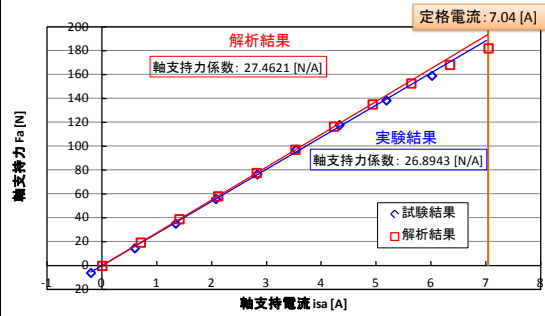


図4 提案する円筒形回転子を備えた3軸能動制御型磁気軸受のラジアル軸支持特性の測定結果

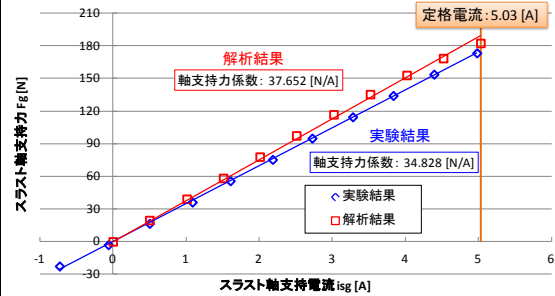


図5 提案する円筒形回転子を備えた3軸能動制御型磁気軸受のスラスト軸支持特性の測定結果

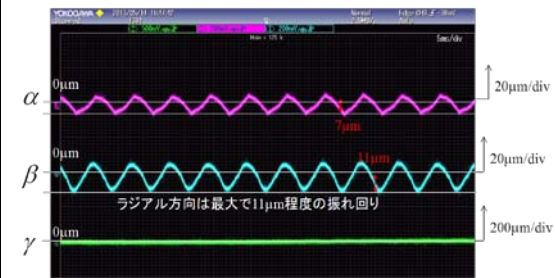


図6 提案する円筒形回転子を備えた3軸能動制御型磁気軸受の回転浮上試験時の回転子変位波形

性の測定結果を示す。測定結果より、軸支持電流とラジアル軸支持力には、非常に良好な線形性の関係があり、すぐれた制御性がそなわっていることがわかる。そして、軸支持力係数は、測定結果が 26.9 N/A であるのに対して、解析結果は 27.5 N/A である。実験結果と解析結果の誤差は、僅かに 2.11% であり、設計通りの実機が製作できている。さらに、試作機の回転子重量 6.3 kg (61.7 N) に対して、十分なラジアル軸支持力が発生できている。

図5は、提案する磁気軸受のスラスト軸支持特性の測定結果を示す。測定結果より、スラスト軸支持力に対しても、軸支持電流に対して、非常に良好な線形性の関係があり、すぐれた制御性がそなわっていることがわかる。そして、軸支持力係数は、測定結果が 34.8 N/A であるのに対して、解析結果は 37.7 N/A である。実験結果と解析結果の誤差は、8.11% であり、設計通りの実機が製作できている。さらに、スラスト軸支持力に対しても、試作

機の回転子重量 6.3 kg (61.7 N) に対して、十分な力が発生できている。

図 6 は、回転浮上試験を行った際の、提案する磁気軸受の回転子変位波形を示す。この時の回転速度は、13,000 r/min である。ラジアル方向の回転子変位は、タッチダウン幅に対して $\pm 200 \mu\text{m}$ に対して、最大で僅か $11 \mu\text{m}$ に収まっている。そして、スラスト方向の回転子変位に関しても、タッチダウン幅に対して $\pm 1 \text{ mm}$ に対して、ほぼ変位は発生していない。このことから、提案する磁気軸受は、高速回転時においても安定した回転浮上運転を実現できている。そして、このような非常に安定した 3 軸の能動軸支持制御ができていのは、ラジアル方向とスラスト方向の軸支持力の間に干渉が発生しないからであると考えられる。

以上の結果より、提案する磁気軸受は、(1) 回転子主軸の総重量に対して、実用に耐えられるだけの十分な軸支持力を発生できる、(2) ラジアル方向とスラスト方向の軸支持力の間に干渉が発生しないため、高速回転時においても安定した回転浮上運転を実現できる、ことが実機試験の結果より検証できた。

また、試作機を製作するにあたり、設計・検討を行った 2 極電動機・4 極軸支持構造の埋込永久磁石型ベアリングレスモータに関しても、非常に優れた研究成果を挙げることができた。

本研究を通じて得た研究成果を学会などで報告すると同時に、これら積極的に発表する予定である。

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 0 件)

[学会発表] (計 4 件)

- (1) 松崎 達也, 竹本 真紹, 小笠原 悟司, 太田 智, 大井 一伸, 松橋 大器: 「2 極電動機・4 極軸支持構造を持つ埋込永久磁石型ベアリングレスモータにおける提案する軸支持力脈動抑制法の検証試験」, 平成 25 年電気学会全国大会講演論文集 vol. 5, No. 5-078, pp. 133-134, 2013 年 3 月 22 日, 名古屋大学, 査読無
- (2) T. Matsuzaki, M. Takemoto, S. Ogasawara, S. Ota, K. Oi, and D. Matsubashi, "A Study for Suppression Force Ripple in an IPM Type Bearingless Motor with 2-pole Motor Windings and 4-pole Suspension Windings," in Proceedings of the 2012 XXth International Conference on Electrical Machines (ICEM 2012), pp.

742-748, 3 Sept. 2012, Palais des Congrès et des Expositions de Marseille, France, 査読有.

- (3) 松崎 達也, 竹本 真紹, 小笠原 悟司, 太田 智, 大井 一伸, 松橋 大器: 「2 極電動機・4 極軸支持構造を持つ高速埋込磁石型ベアリングレスモータの軸支持力脈動の抑制に関する検討」, 電気学会 モータドライブ・リニアドライブ合同研究会, MD-11-078 & LD-11-102, pp. 25-30, 2011 年 12 月 16 日, 静岡大学, 査読無
- (4) 松崎 達也, 竹本 真紹, 小笠原 悟司, 太田 智, 大井 一伸, 松橋 大器: 「埋込磁石型ベアリングレスモータの軸支持力脈動の抑制に関する基礎検討」, 平成 23 年度電気・情報関係学会北海道支部連合大会, No. 23, 2 pages (CD-ROM), 2011 年 10 月 22 日, 公立ほこだて未来大学, 査読無

[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]

ホームページ等 特になし

6. 研究組織

(1) 研究代表者

竹本 真紹 (TAKEMOTO MASATSUGU)
北海道大学・大学院情報科学研究科・准教授
研究者番号: 80313336

(2) 研究分担者

なし

(3) 連携研究者

なし