

令和 5 年 6 月 19 日現在

機関番号：32657

研究種目：基盤研究(B)（一般）

研究期間：2020～2022

課題番号：20H02136

研究課題名（和文）ベアリングレスモータの磁気支持損失発生メカニズムの解明と高効率駆動システムの開発

研究課題名（英文）Developments of High-Efficiency Bearingless Drive System with Reduced Magnetic Suspension Losses

研究代表者

杉元 紘也（Sugimoto, Hiroya）

東京電機大学・工学部・准教授

研究者番号：60613552

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 13,600,000円

研究成果の概要（和文）：試作機を用いて加速試験を行い、タッチダウンせずに安全に危険速度を通過し、30,000 r/minまでの安定な浮上回転可能な1軸制御形ベアリングレスモータを実現した。また、14,000 r/min付近の入力電力に対する磁気支持損失の割合は0.02%であり、磁気支持損失を限りなく0に近づけることが可能であることを実証した。さらに、低速域での磁気支持損失を実質的に0にする反磁性体グラファイト回転子を用いた5軸受動安定ベアリングレスモータを提案し、原理検証用試作機を製作した。実機試験を行い、パッシブに磁気浮上することを示し、従来のベアリングレスモータと比較して浮上回転損失が極めて小さいことを実証した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究成果は、提案構造の1軸制御形ベアリングレスモータと反磁性体グラファイト回転子を持つベアリングレスモータの基礎的な設計コンセプトがモータの低損失化に寄与することが実証された点であり、今後のモータの効率向上に大きく貢献することが期待されるため、社会的意義が非常に高い。また、実機試験の過程で培った磁気支持損失および回転損失の評価方法は、ベアリングレスモータの性能評価に広く適用可能である。さらに、理論に基づく数式の構築やダイナミクスモデルを作成し、計算結果と実験結果の比較を行い、理論検証を行っているため、研究成果の学術的意義は非常に高い。

研究成果の概要（英文）：A proposed one-axis actively positioned bearingless motor successfully passes through critical speeds without touch-down up to 30,000 r/min by high acceleration. It has quite low suspension losses at 14,000 r/min, and it is 0.02% in the input power. This achievement demonstrates that the suspension loss can be reduced close to zero. In another idea of a diamagnetic graphite bearingless motor, it is very simple because the graphite rotor can be passively levitated above permanent magnet stator. It does not require any suspension powers, and rotating losses are also quite small compared to conventional bearingless motors. These achievements can be applied to bearingless motors, high-speed motors and electric machines for improving efficiencies.

研究分野：電気機器工学，ベアリングレスモータ，磁気軸受

キーワード：ベアリングレスモータ 磁気軸受 磁気支持損失 高速モータ 反磁性体

様式 C-19、F-19-1、Z-19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

カーボンニュートラル実現に向けてモータの高効率化は必要不可欠であり、銅損および鉄損を低減する研究が世界中で行われている。さらにモータの効率を向上するために、回転軸とベアリングの機械的接触による損失を大幅に低減する必要がある。従来技術では、モータを高速化すると、機械的ベアリングで発生する機械損が著しく増加するため、高速化と高効率化はトレードオフの関係にあり、同時に向上することは不可能であった。一方、ベアリングレスモータは、非接触であるため、高速化と高効率を同時に実現することが可能な革新的技術の一つである。

研究代表者のこれまでの研究により、一般的なベアリング付きモータと比較して、ベアリングレスモータは回転速度 2500 r/min 以上の中速域以上の速度領域で高効率であることが明らかになっている。一方、危険速度で回転子の振動が増大しタッチダウンするため、振動を低減し危険速度を安全に通過する新しい理論が必要である。また、現状は回転軸を磁気支持するために電力が必要であるため、ベアリングの機械損が小さい低速域では、ベアリング付きモータと比較してベアリングレスモータの効率は低い。したがって、低速域での磁気支持損失を低減する新しいベアリングレスモータの構成を提案する必要がある。

2. 研究の目的

ベアリングレスモータは、磁気軸受機能が一体化されたモータであり、回転軸を非接触で磁気浮上させることができる。申請者のこれまでの研究により、ベアリングレスモータは、ベアリングによる機械損が発生しないため、効率が高く、省エネルギー効果があることが実機検証で明らかになり、低消費電力化が要求されるファン、ブローア、コンプレッサ、ポンプなどへの応用を中心に、研究開発が進展しつつある。本研究では、ベアリングレスモータの効率向上効果をさらに高めるため、磁気支持に必要な電力を大幅に低減する新しいベアリングレスモータの構成を提案し、試作機を用いた実験を行い、その有効性を実証する。

3. 研究の方法

1 軸制御形ベアリングレスモータのダイナミクスのモデル化を行い、タッチダウンせずに危険速度を安全に通過するための条件を導出する。試作機を用いて加速試験を行い、タッチダウンせずに安全に危険速度を通過し、30,000 r/min までの安定な浮上回転を実証する。ベアリングレスモータの磁気支持損失とベアリング付きモータのベアリング損を測定し、回転速度に対する損失全体の磁気支持損失の割合を明らかにする。さらに、低速域の磁気支持損失を 0 にするため、反磁性体グラファイト回転子を用いた新しいベアリングレスモータを提案する。グラファイト回転子は、アクティブな制御なしでハルバツハ配列永久磁石の上部でパッシブに安定するため、磁気支持損失は 0 である。反磁性体グラファイト回転子を突極形に加工し、固定子永久磁石と反対側にアキシアルフラックス固定子を配置することで、安定に浮上回転する原理を実証する。

4. 研究成果

図 1 に、1 軸制御形ベアリングレスモータの加速に対する危険速度でのラジアル振動の最大値を示す。モータの加速を増加させることでラジアル振動は減少し、タッチダウンせずに危険速度を通過することが可能になる。

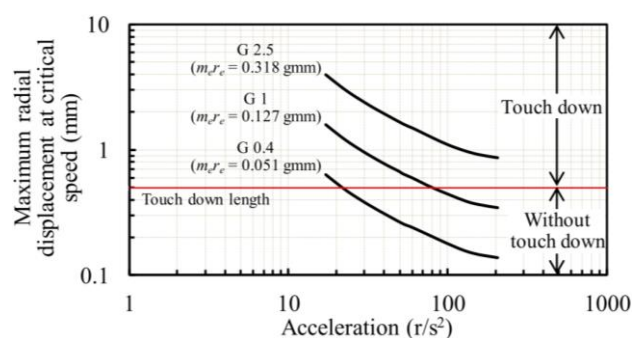


図 1 危険速度を安全に通過するための 1 軸制御形ベアリングレスモータのギャップとアンバランス量の設計ガイドライン

また、回転子のアンバランス量と振動の関係も解明し、1軸制御形ベアリングレスモータの機械的ギャップの設計ガイドラインとして有用性の高い成果が得られた。

図2に本研究で導出した設計ガイドラインに基づき、機械的ギャップを2.5 mmに設計した1軸制御形ベアリングレスモータの提案構造を示す。一般的に高速モータの設計において、鉄損低減のためにギャップを広くするため、提案構造は高速モータに適した設計である。

図3に、提案構造の試作機を用いた急加速試験結果を示す。これまでタッチダウンせずに安定に加速する最高回転速度は、研究代表者が実証した20,000 r/minであったが、本研究で30,000 r/minまで向上することに成功し、1軸制御形ベアリングレスモータの世界最速を更新した。

図4にベアリングレスモータとベアリング付きモータの入力電力に占める磁気支持損失およびベアリング損の割合を示す。14,000 r/min付近のベアリング付きモータのベアリング損の割合は20%以上であるのに対し、ベアリングレスモータの磁気支持損失の割合は0.02%であり、磁気支持損失を限りなく0に近づけることが可能であることを実証した。一方、6000 r/min以下の低速域の磁気支持損失の割合は、ベアリング付きモータと比較して大きく、低速域の磁気支持損失の低減が課題であることが明確になった。

図5に、提案構造の反磁性体グラファイト回転子を用いた5軸受動安定ベアリングレスモータを示す。固定子は上下に分かれており、上側は三相巻線が施されているアキシアルフラックス形固定子であり、下側は反磁性体回転子を浮上させると同時にバイアス磁束を発生させるためのリングハルバッハ配列永久磁石である。

図6に、アキシアルフラックス形固定子を除いた試作機を横から見た写真を示す。グラファイト回転子は、下側永久磁石固定子の上面から1.3 mm上部でパッシブに磁気浮上している。磁気支持に電力が不要であるため、実質的に磁気支持損失は0である。

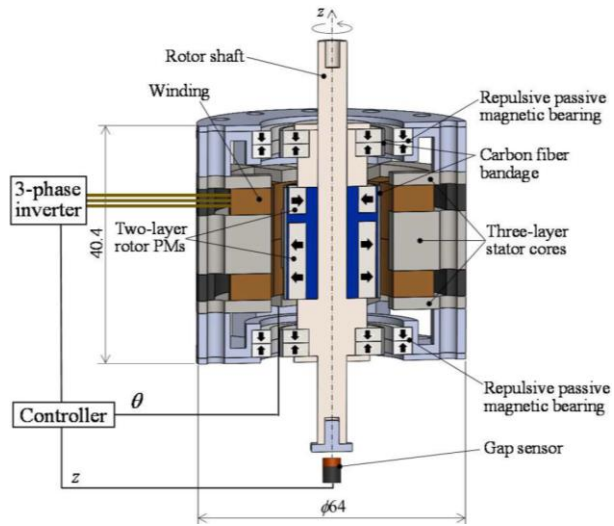


図2 30,000 r/minまで安全に急加速可能な1軸制御形シングルドライブベアリングレスモータの提案構造

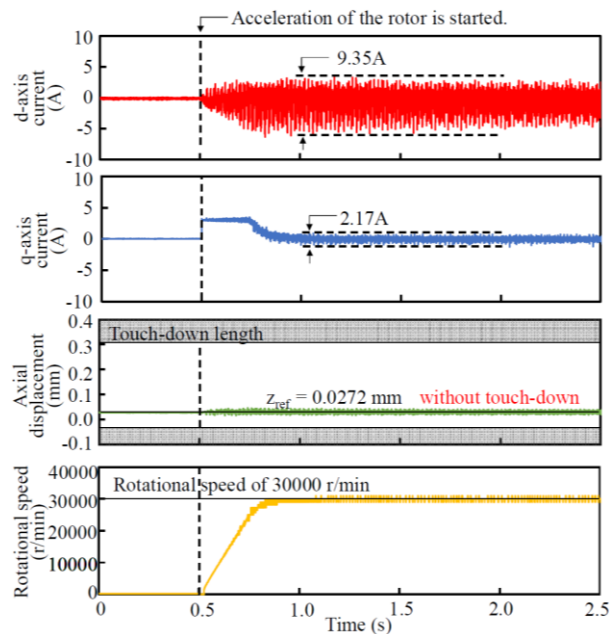


図3 急加速による危険速度通過の実験結果

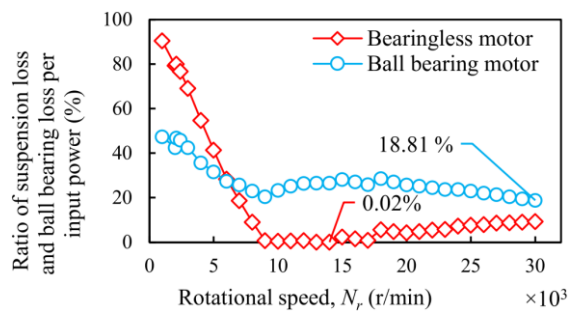


図4 ベアリングレスモータとベアリング付きモータの入力電力に占める磁気支持損失およびベアリング損の割合

図 7 に、グラファイト回転子がパッシブに磁気浮上しながらフリーランで減速したときの波形を示す。回転速度は 20.9 rad/s, 15.7 rad/s, 10.5 rad/s および 5.24 rad/s からそれぞれ減速した時の波形を示している。この実験結果は 200 r/min からフリーランで減速したとき、約 120 秒間回転が継続することを示しており、従来のベアリングレスモータと比較して、無負荷回転損失が約 10 倍小さいことを実証した。したがって、低速域での磁気支持損失を実質的に 0 にする新しいベアリングレスモータを提案し、その原理と有効性を実証した。

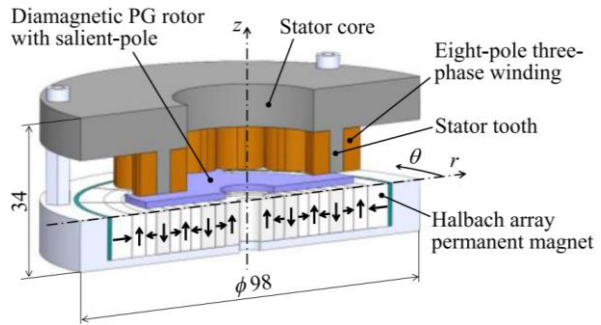


図 5 5 軸受動安定形グラファイトベアリングレスモータの提案構造

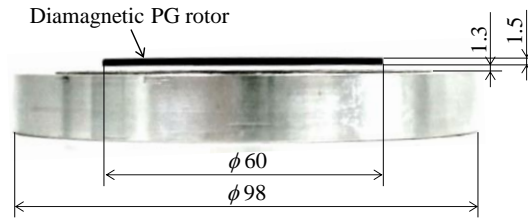


図 6 パッシブに磁気浮上する反磁性体グラファイト回転子

主な研究成果

- [1] H. Sugimoto and A. Chiba, "Dynamic Modeling and Experimental Validations of Passing Through Critical Speeds by High Acceleration in One-Axis Actively Positioned Bearingless Motors," *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol. 57, no. 6, pp. 6956-6964, Nov.-Dec. 2021, doi: 10.1109/TIA.2021.3079169.
- [2] T. Srichiangsa, H. Sugimoto, Y. Fujii and A. Chiba, "Design, Development, and Experimental Results of a 30 000-R/Min One-Axis Actively Positioned Single-Drive Bearingless Motor," *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol. 57, no. 6, pp. 6783-6791, Nov.-Dec. 2021, doi: 10.1109/TIA.2021.3090736.
- [3] T. Srichiangsa et al., "Comparison of Acoustic Noise and Vibration in Ball-Bearing-Supported Motors and One-Axis Actively Positioned Single-Drive Bearingless Motor With Two Radial Permanent-Magnet Passive Magnetic Bearings," *IEEE Open Journal of Industry Applications*, vol. 4, pp. 35-48, 2023, doi: 10.1109/OJIA.2022.3232116.
- [4] Theeraphong Srichiangsa, Hiroya Sugimoto, Yusuke Fujii, Kyohei Kiyota, and Akira Chiba, "Estimation of Magnetic Suspension Loss and Efficiency in a 30 000 r/min One-Axis Actively Positioned Single-Drive Bearingless Motor", *IEEJ Journal of Industry Applications*, Volume 12, Issue 3, pp. 295--302, 2023.
- [5] H. Sugimoto, T. Hashimoto, T. Arai, H. Suzuki and A. Chiba, "Novel Bearingless Motor Topology With Diamagnetic Salient-Pole Rotor," *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol. 59, no. 2, pp. 1639-1647, March-April 2023, doi: 10.1109/TIA.2022.3227527.

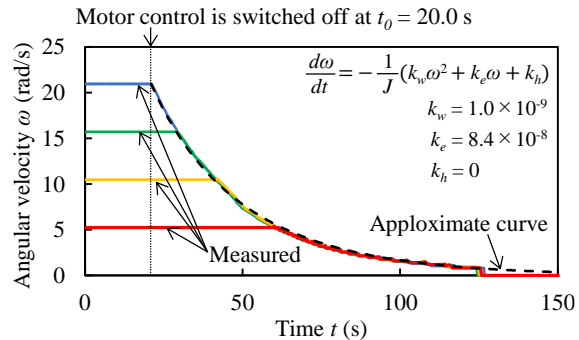


図 7 グラファイトベアリングレスモータの減速波形

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計5件（うち査読付論文 5件 / うち国際共著 0件 / うちオープンアクセス 0件）

1. 著者名 H. Sugimoto and A. Chiba	4. 巻 57
2. 論文標題 Dynamic Modeling and Experimental Validations of Passing Through Critical Speeds by High Acceleration in One-Axis Actively Positioned Bearingless Motors	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 IEEE Transactions on Industry Applications	6. 最初と最後の頁 6956-6964
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1109/TIA.2021.3079169	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -
1. 著者名 T. Srichiangsa, H. Sugimoto, Y. Fujii and A. Chiba	4. 巻 57
2. 論文標題 Design, Development, and Experimental Results of a 30 000-R/Min One-Axis Actively Positioned Single-Drive Bearingless Motor	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 IEEE Transactions on Industry Applications	6. 最初と最後の頁 6783-6791
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1109/TIA.2021.3090736	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -
1. 著者名 T. Srichiangsa et al.	4. 巻 4
2. 論文標題 Comparison of Acoustic Noise and Vibration in Ball-Bearing-Supported Motors and One-Axis Actively Positioned Single-Drive Bearingless Motor With Two Radial Permanent-Magnet Passive Magnetic Bearings	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 IEEE Open Journal of Industry Applications	6. 最初と最後の頁 35-48
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1109/OJIA.2022.3232116	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -
1. 著者名 Theeraphong Srichiangsa, Hiroya Sugimoto, Yusuke Fujii, Kyohei Kiyota, and Akira Chiba	4. 巻 12
2. 論文標題 Estimation of Magnetic Suspension Loss and Efficiency in a 30 000 r/min One-Axis Actively Positioned Single-Drive Bearingless Motor	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 IEEJ Journal of Industry Applications	6. 最初と最後の頁 295-302
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1541/ieejjia.22007118	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 H. Sugimoto, T. Hashimoto, T. Arai, H. Suzuki and A. Chiba	4. 巻 59
2. 論文標題 Novel Bearingless Motor Topology With Diamagnetic Salient-Pole Rotor	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 IEEE Transactions on Industry Applications	6. 最初と最後の頁 1639-1647
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1109/TIA.2022.3227527	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

〔学会発表〕 計7件 (うち招待講演 0件 / うち国際学会 1件)

1. 発表者名 渡邊 実 (東京電機大学), 杉元 紘也 (東京電機大学)
2. 発表標題 1軸制御形シングルドライブベアリングレスモータの0 - 30,000r/min急加速試験結果
3. 学会等名 2021年電気学会産業応用部門大会講演論文集
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 渡邊 実 (東京電機大学), 杉元 紘也 (東京電機大学)
2. 発表標題 1軸制御形シングルドライブベアリングレスモータの時間遅れ補償及びdq軸非干渉制御による振動抑制
3. 学会等名 産業応用部門 モータドライブ / 【D】産業応用部門 家電・民生合同研究会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 橋本 琢朗 (東京電機大学), 杉元 紘也 (東京電機大学)
2. 発表標題 突極形反磁性体回転子を用いた5軸受動安定ベアリングレスモータの半径方向剛性測定
3. 学会等名 2021年電気学会産業応用部門大会講演論文集
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 近藤 匠馬 (東京電機大学), 杉元 紘也 (東京電機大学)
2. 発表標題 突極形反磁性体回転子を用いたベアリングレスモータのギャップ短縮によるトルク向上の検討
3. 学会等名 2021年電気学会産業応用部門大会講演論文集
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 H. Sugimoto, T. Arai, H. Suzuki and A. Chiba
2. 発表標題 New Configuration of Five-Axis Passively Stabilized Bearingless Machine With a Diamagnetic Pyrolytic Graphite Rotor
3. 学会等名 2020 23rd International Conference on Electrical Machines and Systems (ICEMS) (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 橋本琢朗・杉元紘也
2. 発表標題 突極形反磁性体回転子を用いた 5 軸受動安定形ベアリングレス モータのトルク発生原理および理論計算
3. 学会等名 令和3年電気学会全国大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 森 光正・杉元紘也
2. 発表標題 反磁性体グラファイト板回転子とデュアルステータを持つ 5 軸受 動安定形アキシシャルギャップベアリングレスモータの磁気浮上力 の計算
3. 学会等名 令和3年電気学会全国大会
4. 発表年 2021年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究 分担者	朝間 淳一 (Asama Junichi) (70447522)	静岡大学・工学部・准教授 (13801)	
研究 分担者	高村 陽太 (Takamura Yota) (20708482)	東京工業大学・工学院・助教 (12608)	

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------