

令和 2 年 7 月 7 日現在

機関番号：32657

研究種目：若手研究(A)

研究期間：2017～2019

課題番号：17H04916

研究課題名（和文）ベアリングレス化による革新的省エネルギーモータドライブ技術の基盤構築

研究課題名（英文）A Novel Bearingless Motor Drive Technology for Energy-Saving

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） 18,260,000円

研究成果の概要（和文）：ベアリングレスモータの省エネルギー効果向上のため、定格回転速度7200 r/minの従来試作機の損失を分析し銅損が支配的であることが明らかになったため、高速・低トルク化し銅損を低減することで、小形・効率化する新しいドライブシステムの基盤構築を行った。新しい高速1軸制御形シングルドライブベアリングレスモータの試作機とコントローラを開発し、30,000 r/minでの安定な浮上回転の実現と高効率化を実証した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

温室効果ガス排出量削減および省エネルギー化において、モータの高効率化は必要不可欠である。一方、一般的なベアリング付きモータは、機械的な接触があるため、小形・高速化と高効率化の間にはトレードオフがあり両立は困難である。本研究成果は、従来技術では実現困難であったモータの小形・高速化と高効率化を両立する新しいベアリングレスモータドライブシステムの有効性を実証した点であり、学術的および社会的価値が高い。

研究成果の概要（英文）：A novel bearingless motor drive system has been developed for improving energy-saving of bearingless motors. The proposed high-speed single-drive bearingless motor has possibility of high efficiency because the copper loss is reduced. The prototype machine and the dedicated controller have been developed and tested. In the experimental results, high rotational speed up to 30,000 r/min and high efficiency have been successfully demonstrated.

研究分野：ベアリングレスモータ

キーワード：ベアリングレスモータ 磁気軸受 永久磁石モータ 高速モータ 省エネルギー

科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属されます。

## 様式 C-19、F-19-1、Z-19 (共通)

### 1. 研究開始当初の背景

温室効果ガス排出量削減および省エネルギー化において、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ことでモータを高効率化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できる可能性がある。

現状のベアリング付きモータと研究代表者が開発したベアリングレスモータの回転速度に対する無負荷入力電力の測定結果から、ベアリングレスモータは、機械的接触がないため損失が小さく、速度が上がるにつれて、ベアリングレスモータの低消費電力化の優位性が顕著になることが明らかになっている。一方、高速化と高効率化の両立を実現するためには、さらに高速回転可能で、且つ低損失の新しいベアリングレスモータの試作し、有効性を実証する必要がある。

### 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、効率がよく、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、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、革新的ベアリングレスモータの体系的な理論構築を行い、省エネルギー効果を増大させるためのモータ構造及び制御方法を明らかにする。

### 3. 研究の方法

パワーメータで入力電力と銅損を測定し、銅損と鉄損の割合を計算した結果、銅損が支配的であることが明らかになった。そこで、高速・低トルク化し、銅損を低減することで、同一出力での効率向上を図るための新しい高速 1 軸制御形シングルドライブベアリングレスモータの試作機的设计を行った。さらに、ベアリングレスモータ専用のコントローラを新たに開発し、1 軸制御形ベアリングレスモータの中での世界最高速度 30,000 r/min での安定な浮上回転の実証を目指して研究を推進した

### 4. 研究成果

図 1 に、高速・高効率仕様で設計した新しいベアリングレスモータの試作機と回転速度に対する無負荷入力電力を示す。ベアリング付きモータの無負荷入力電力は、15,000 r/min で約 9 W であったが、図 1 の新試作機の 20,000 r/min での無負荷入力電力は 1.4 W であり、高速化と低損失化の両立を実験的に証明することに成功した。

図 2 に試作機と同一タイプの 1 軸制御形ベアリングレスモータの最大回転速度を示す。従来の最高回転速度は 16,000 r/min であったが、研究代表者が開発した試作機が 20,000 r/min を実現し、1 軸制御形ベアリングレスモータの中で世界最速となった。

世界最速を実現するためには、タッチダウンせずに危険速度を通過する必要がある。従来技術では、ダンピング材料や追加のアクチュエータを用いて、振動を低減する方法が提案されている。一方、研究代表者は、

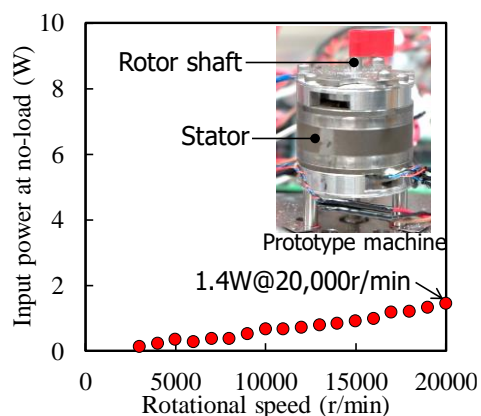


図 1 新試作機の回転速度と無負荷入力電力

部品を追加することなく、モータの急加速により、タッチダウンせずに危険速度を通過する方法を提案し、試作機を用いて提案方法の有効性を実証した。図3に、モータの急加速による危険速度通過の実験結果を示す。実験は定格回転速度7,200 r/minの従来試作機を用いて行った。モータの加速が遅い場合、危険速度の5,000 r/min付近に近づくにつれて半径方向の変位が大きくなり、タッチダウンしている。一方、モータの加速が速い場合、ダンピングなしにも関わらず半径方向の振動は低減され、タッチダウンせずに危険速度を通過可能であることが明らかになった。

本研究で培った危険速度通過の方法を用いてさらに高速化に挑戦した。回転子は、表面を炭素繊維で覆った新しい回転子を用い、固定子は組み立てを改良することにより、安定に磁気浮上しながら回転可能な最高回転速度は、20,000 r/minから30,000 r/minに向上し、1軸制御形ベアリングレスモータの世界最高回転速度をさらに更新することに成功した。また、回転軸の上下両端にファンブレードを取り付け、30,000 r/minまでの負荷試験を行い、負荷時でも安定に磁気浮上して高速回転することが可能であることを実証した。30,000 r/minでの効率も、従来試作機と比較して2%以上向上可能であり、銅損と鉄損を低減した改良試作機はさらに効率向上が期待される。

また、電圧方程式を用いて、1軸制御形シングルドライブベアリングレスモータのトルクおよび能動的な軸方向力の理論式の導出を行い、さらに電気エネルギーからトルクおよび軸方向力の機械エネルギーに変換するエネルギー変換の理論を明らかにした。

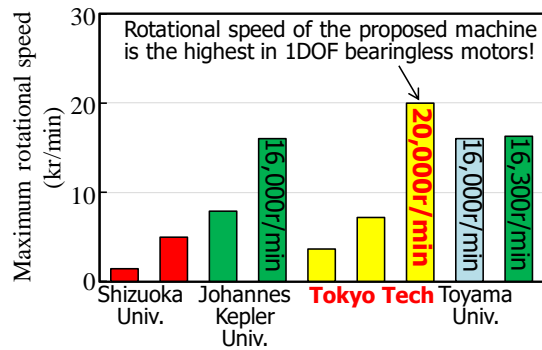
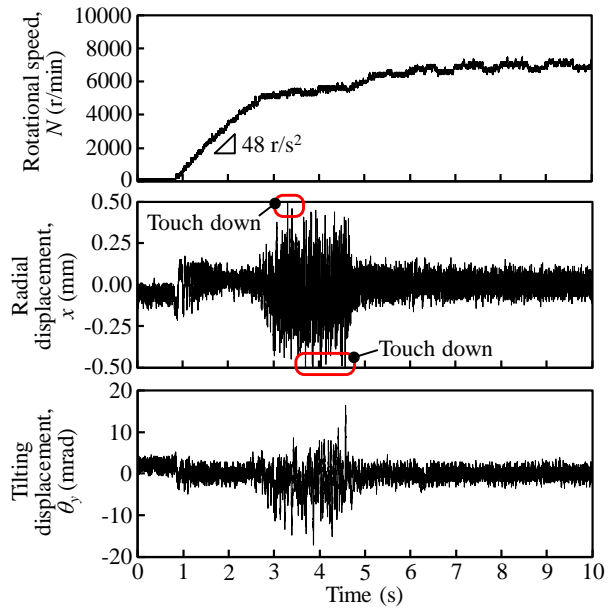
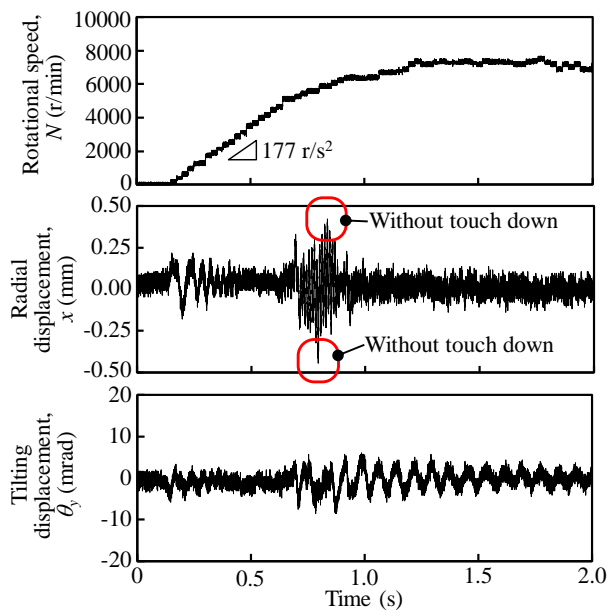


図2 1軸制御形ベアリングレスモータの回転速度



(a) Low acceleration of 48 r/s<sup>2</sup>



(b) High acceleration of 177 r/s<sup>2</sup>

図3 急加速による危険速度通過の実験結果

## 5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計4件（うち査読付論文 1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 Hiroya Sugimoto, and Akira Chiba	4. 巻 vol. 55, no. 5
2. 論文標題 Parameter Identification of Current-Force Factor and Torque Constant in Single-Drive Bearingless Motors With Back EMF	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 IEEE Transactions on Industry Applications	6. 最初と最後の頁 4754-4761
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1109/TIA.2019.2926673	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 Hiroya Sugimoto, and Akira Chiba	4. 巻 -
2. 論文標題 Parameter Identifications of Current-Force Factor and Torque Constant in Single-Drive Bearingless Motors	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 2018 International Power Electronics Conference (IPEC-Niigata 2018 -ECCE Asia)	6. 最初と最後の頁 3627 - 3631
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.23919/IPEC.2018.8507407	査読の有無 無
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, and Akira Chiba	4. 巻 -
2. 論文標題 Torque Density Improvement of a One Axis Actively Positioned Single-Drive Bearingless Motor	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 2018 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE)	6. 最初と最後の頁 6908 - 6913
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1109/ECCE.2018.8557413	査読の有無 無
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 Hiroya Sugimoto, and Akira Chiba	4. 巻 -
2. 論文標題 Experimental Results Passing Through Critical Speeds of Radial and Tilting Motions in a One-Axis Actively Positioned Single-Drive Bearingless Motor	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 2018 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE)	6. 最初と最後の頁 4392 - 4397
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1109/ECCE.2018.8558121	査読の有無 無
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5件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 4件）

1. 発表者名 Hiroya Sugimoto
2. 発表標題 Parameter Identifications of Current-Force Factor and Torque Constant in Single-Drive Bearingless Motors
3. 学会等名 2018 International Power Electronics Conference (IPEC-Niigata 2018 -ECCE Asia) (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Theeraphong Srichiangsa
2. 発表標題 Torque Density Improvement of a One Axis Actively Positioned Single-Drive Bearingless Motor
3. 学会等名 2018 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE) (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Hiroya Sugimoto
2. 発表標題 Experimental Results Passing Through Critical Speeds of Radial and Tilting Motions in a One-Axis Actively Positioned Single-Drive Bearingless Motor
3. 学会等名 2018 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE) (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 杉元紘也, 千葉明
2. 発表標題 冷却ファン用1軸制御ベアリングレスモータのジャイロ効果と傾き方向の安定性
3. 学会等名 電気学会MAG/MD/LD合同研究会
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 Hiroya Sugimoto
2. 発表標題 Comparison of Bearing Loss and Magnetic Suspension Power in Single-Drive Bearingless Motor
3. 学会等名 IEEE Power & Energy Society General Meeting 2017 (国際学会)
4. 発表年 2017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
--	---------------------------	-----------------------	----