

機関番号：10101  
 研究種目：若手研究（B）  
 研究期間：2009～2010  
 課題番号：21760211  
 研究課題名（和文） 2極電動機・2極軸支持構造を持つ超高速永久磁石型ベアリングレスモータの開発  
 研究課題名（英文） Development of a Super-High-Speed Bearingless Motor Equipped with 2-pole Motor Windings and 2-pole Suspension Windings  
 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）：ベアリングレスモータは、電動機と磁気軸受の機能を一体化したモータである。そのため、磁気軸受を用いた場合よりもコストダウン、小型化、高速化などが期待されているが、超高速回転を実現できるベアリングレスモータは未だ実現されていない。そこで、研究代表者が新たに提案する2極電動機・2極軸支持構造を持つ超高速永久磁石型ベアリングレスモータの試作機とそのドライブシステムを実際に製作し、超高速回転を実現する。

研究成果の概要（英文）：Bearingless motors (BelMs) are characterized by integration of electrical motors and magnetic bearings. Driving in high-speed rotation and maintenance free are expected to these motors. However, super-high-speed bearingless motors are not still developed. This research project develops a prototype of a novel super-high-speed bearingless motor with 2-pole motor windings and 2-pole suspension windings. In addition, it is confirmed that the prototype can realize the stable operation at the super-high-speed rotation.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2009年度	2,300,000	690,000	2,990,000
2010年度	1,100,000	330,000	1,430,000
年度			
年度			
年度			
総計	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：電気機器工学，制御工学，ベアリングレスモータ，永久磁石同期電動機

#### 1. 研究開始当初の背景

ベアリングレスモータは、一つの固定子に電動機用と軸支持用の2種類の巻線を備えることで、電動機と磁気軸受の機能を一体化したモータである。ベアリングレスモータ単体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し、機械ベアリングや磁気軸受などの回転子主軸を支持するための構造を必要としない。従って、高速化、高出力化、メンテナンスフリー化といった磁気軸受の

利点に加えて、電動機と磁気軸受を併用した場合よりもコストダウン、小型化、軸長の短縮による危険速度の向上、すなわち、さらなる高速化などが期待される。このように、ベアリングレスモータは、近年高まっている電動機の高速度化、高出力化、メンテナンスフリー化といった要求を、磁気軸受を用いた場合よりも低コストで実現できる非常に付加価値の高いモータである。そのため、誘導機型、シンクロナスリラクタンス型、永久磁石型な

ど様々な種類のベアリングレスモータが、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、Levitronix 社 や (株) 荏原製作所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。

一方、研削スピンドルやターボ分子ポンプなど様々な分野において超高速モータが用いられている。現在使用されている超高速モータは、機械ベアリング、もしくは、磁気軸受を用いて、回転子主軸を支持するのが一般的である。前者の場合は、潤滑油とその潤滑油用ポンプが必要となり、定期的なメンテナンスを欠かすことができない。また、後者の場合は、先に述べたように、大型化、高価格化といった問題点がある。これらの問題点を解決するために、ベアリングレスモータで超高速回転を実現することが期待されている。しかし、研究代表者の知る限り、60,000 r/min までの回転速度を実現した事例は報告されているが、これ以上の超高速回転と呼ばれる回転速度で、実際にベアリングレスモータを運転した報告は未だされていない。

## 2. 研究の目的

そこで、研究代表者は、ベアリングレスモータによる超高速回転を実現するために、新たなモータ構造として、図 1 に示す「2 極電動機・2 極軸支持構造を持つ超高速永久磁石型ベアリングレスモータ」を前年度までに提案している。超高速回転を実現するために注意すべき点は、電動機の駆動周波数が非常に高くなること、そして、ベアリングレスモータの構造によっては、軸支持の駆動周波数も電動機と同じ周波数となるため非常に高くなること、である。これは、モータの基本構造に起因する注意点であり、この注意点を解決するために、新たに提案するモータ構造は以下に示す特徴を備えている。

### (1) 直流電流による軸支持制御

ベアリングレスモータの構造は、大きく分けて、軸支持制御を行う際、電動機の駆動周波数と等しい周波数の交流電流を軸支持巻線に流す交流軸支持タイプと、電動機の駆動周波数に関係なく直流電流を軸支持巻線に流す直流軸支持タイプの 2 種類に大別される。超高速回転下での軸支持制御を考えた場合、交流軸支持タイプでは、電動機の駆動周波数と等しい非常に高い周波数の交流電流を軸支持巻線に流す必要がある。一方、安定な軸支持制御を実現するには、高精度な電流制御が軸支持電流に要求される。高周波電流の高精度な電流制御が難しいことを考えると、交流軸支持タイプによって超高速回転下の安定な軸支持制御を実現することは難しい。したがって、電動機の駆動周波数に関係なく直流電流による軸支持制御が可能な直

流軸支持タイプの構造とする必要がある。

### (2) 2 極電動機・2 極軸支持構造

これまでに提案されている直流電流による軸支持制御が可能な直流軸支持タイプのコンシクエントポール型やホモポーラ型といった構造は、どれも 2 極の軸支持巻線に対して、電動機巻線の極数は 8 極以上である。そのため、100,000 r/min 以上の超高速回転で駆動させた場合、その駆動周波数は 6.7 kHz 以上となり、現実的でない。インバータドライブなどのコントローラの製作コストを考慮すると、電動機巻線は 2 極とし、可能な限りモータの駆動周波数を下げる必要がある。一方、直流電流による軸支持制御を考えた場合、軸支持巻線も 2 極とする必要がある。したがって、新たに提案するモータは、2 極電動機・2 極軸支持構造とする。ただし、電動機巻線と軸支持巻線の極数が等しいことから、電動機制御と軸支持制御の間に相互干渉が生じる恐れがあるため、図 2 に示すように、同一ユニット内の固定子コアを軸方向に分割し、その固定子間に軸方向に着磁された永久磁石を挿入する。そして、軸支持巻線を、各ユニット内で、8 の字コイル形状に巻くことで、電動機制御と軸支持制御を非干渉化する構造としている。

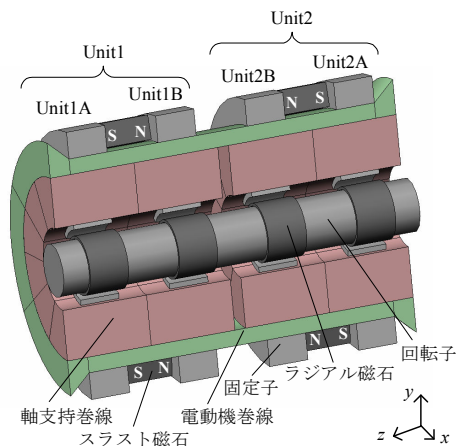


図1 2極電動機・2極軸支持構造を持つ超高速永久磁石型ベアリングレスモータの構造

Fig. 1. The structure of proposed motor

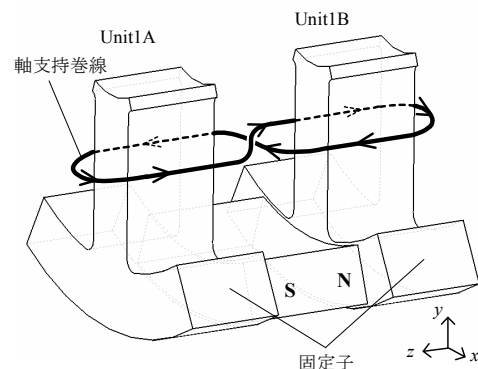


図2 軸支持巻線の構造(Unit1側)

Fig. 2. The structure of suspension windings

現在までに、3次元有限要素法非線形磁界解析(3D-FEM)を用いた磁場解析により、提案するモータ構造のトルク・軸支持力特性を検討した結果、(1)直流電流による軸支持制御が可能、(2)電動機制御と軸支持制御の非干渉化が可能、(3)安定な軸支持運転を実現するのに必要なトルクと軸支持力を十分に発生可能、といった超高速回転を実現する上で良好な特性を備えていることを明らかにした。しかし、実機による検証は未だされていない。

そこで、本研究の目的は、提案する2極電動機・2極軸支持構造を持つ超高速永久磁石型ベアリングレスモータの試作機とそのドライブシステムを実際に製作し、超高速回転を実現することである。

### 3. 研究の方法

#### (1) 2009年度

##### ① 試作機的设计&製作

新たに提案した「2極電動機・2極軸支持構造を持つ超高速永久磁石型ベアリングレスモータ」の試作機を設計・製作する。今回、製作予定の試作機では、超高速回転下での試験を実施する予定である。そこで、回転子形状をリング磁石を用いた表面貼付型(SPM型)構造とし、リング磁石の外側に保護材を設け、回転子強度を高める予定である。一方、回転子強度が増すように保護材を設けると、一般的に、磁気的なギャップ長が増加するため漏れ磁束が増加し、トルク・軸支持力特性の低下を引き起こす。そこで、本研究では、有限要素法による構造解析(静解析)と磁界解析の連成解析を行い、十分な回転子強度を保ちつつ、最もトルク・軸支持力特性の良い最適な回転子形状、そして、その性能を引き出す固定子形状を明らかにする。

##### ② トルク・軸支持力特性の測定

製作する試作機を用いて、提案する「2極電動機・2極軸支持構造を持つ超高速永久磁石型ベアリングレスモータ」のトルク・軸支持力特性について検討することで、下記の特長を持つことを実機においても実証する。

- (1) 直流電流による軸支持制御が可能、
- (2) 電動機制御と軸支持制御の非干渉化が可能、
- (3) 安定な軸支持運転を実現するのに必要なトルクと軸支持力を十分に発生可能、の3つの特長についてである。

#### (2) 2010年度

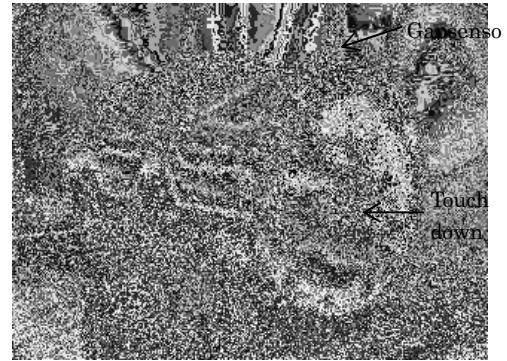
##### ① 超高速回転用のドライブシステムの開発と超高速回転の実現

前年度までに明らかにした試作機のトルク・軸支持力特性に基づいて、超高速回転に対応可能な電動機速度制御系と軸支持制御系の2つからなるコントロールシステムを構

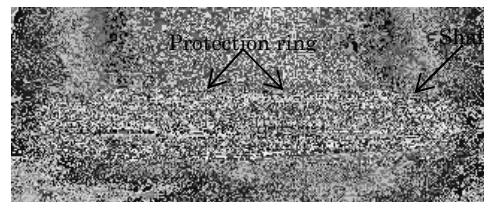
築する。さらに、デジタルコントローラに同期するインバータドライブも製作し、超高速回転下において安定な軸支持運転を実現できる高性能ドライブシステムを開発することで、超高速回転を実現する。

### 4. 研究成果

図3に製作した試作機の写真を示す。試作機のギャップ長は0.3mmであり、タッチダウン幅は0.1mmとなっている。また、Unit1,2



(a) 試作機全体の写真



(b) 回転子の写真

図3 試作機の写真

Fig. 3 The photographs of the prototype.

(a) The photograph of the prototype.

(b) The photograph of the rotor shaft.

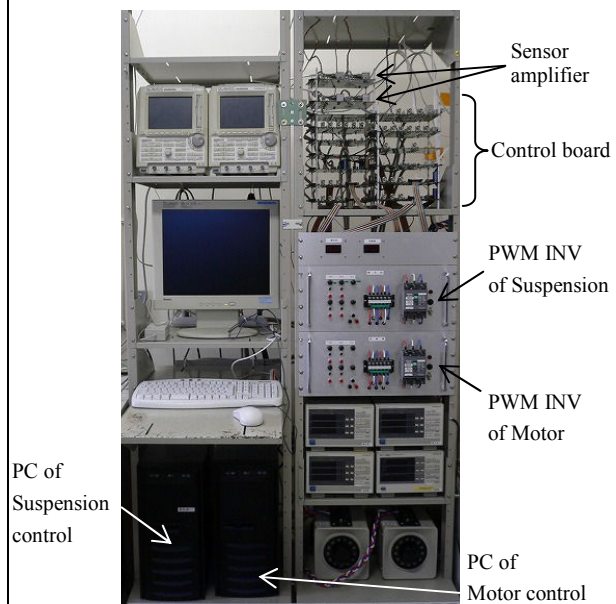


図4 制御システムの写真

Fig. 4 The photograph of the control system.



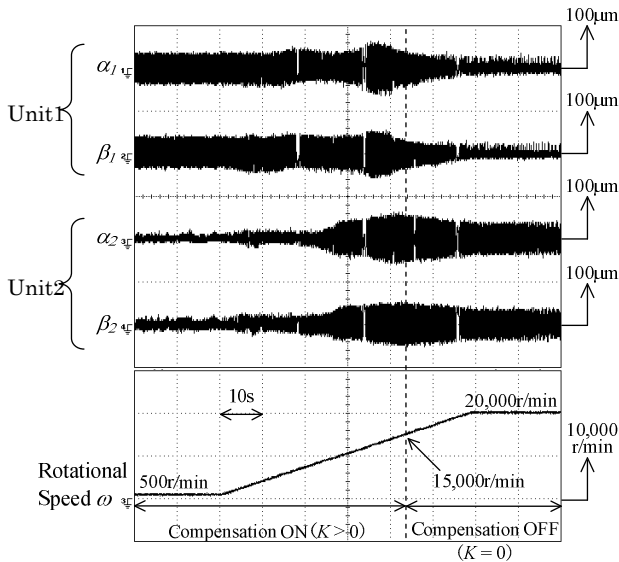


図5 500r/min から 20,000r/min へのランプ加速試験時の回転子変位波形

Fig. 5 Rotor displacement profiles on acceleration from 500 r/min to 20,000 r/min.

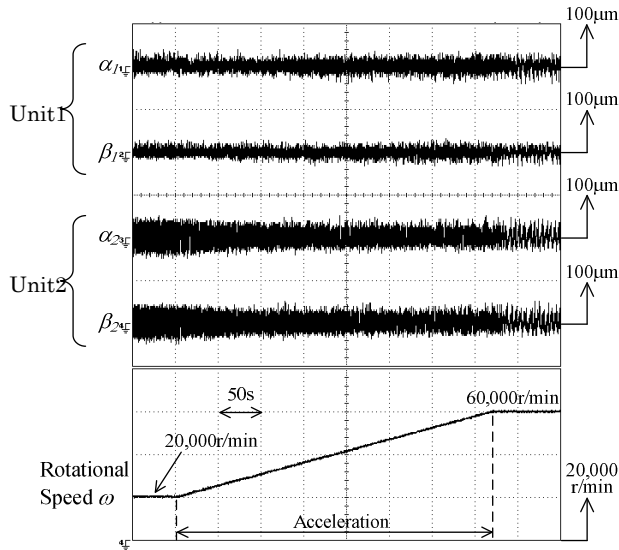


図6 20,000r/min から 60,000r/min へのランプ加速試験時の回転子変位波形

Fig. 6 Rotor displacement profiles on acceleration from 20,000 r/min to 60,000 r/min.

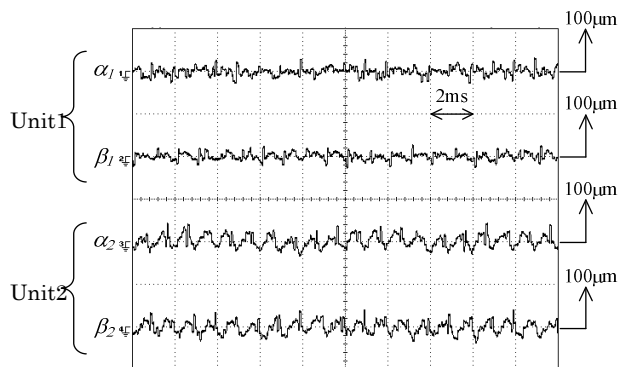


図7 60,000r/min 定速時の回転子変位波形

Fig. 7 Rotor displacement profiles under 60,000r/min.

の水平( $\alpha$ ),鉛直( $\beta$ )方向には,渦電流式変位センサ(ギャップセンサ)が計4本設置されており,これにより回転子の変位を非接触で検出することができる構造となっている。図4に開発したドライブシステムの写真を示す。試作機のドライブシステムは軸支持用,電動機用の2つの制御系から構成されている。

低速回転から高速回転まで常に安定した軸支持制御が可能であるか確認を行うため500r/min から 20,000r/min へのランプ加速試験を行った。図5にランプ加速試験を行った際の回転子変位波形を示す。なお, $\alpha_1, \beta_1$ はUnit 1,  $\alpha_2, \beta_2$ はUnit 2における回転子のラジアル変位波形である。この試験ではランプ状の回転速度指令値 $\omega^*$ を入力し回転子を加速させている。また,500r/min から 15,000r/min までは,トラッキングフィルタなどの補償制御も行っており,15,000r/min 以上の回転速度では補償制御を切って軸支持制御を行っている。この変位波形から500r/min から 20,000r/min まで,制御中心から $\pm 60\mu\text{m}$ の範囲で安定な回転浮上運転が行えており,補償制御を切っている高速回転時においても低速回転時と変わらず安定した軸支持制御が行えていることが確認できる。よって,低速回転時では無視できない干渉力の影響が,高速回転時には小さいことが確認できた。このことから,15,000r/min 以上の回転速度では複雑な演算が必要な補償制御を用いず,PID制御のみで制御可能であるといえる。

図6に20,000r/min から 60,000r/min へのランプ加速試験を行った際の回転子変位波形,図7に60,000r/min 定速状態の回転子変位波形を示す。図6から20,000r/min から 60,000r/min まで,制御中心から $\pm 50\mu\text{m}$ の範囲で安定な回転浮上運転が行えていることが確認できる。また,図7から60,000r/min 時では,制御中心から $\pm 40\mu\text{m}$ の範囲で安定な回転浮上運転が行えている。これは,本試作機のタッチダウン幅 $\pm 100\mu\text{m}$ の半分以下であるため,提案するモータは60,000r/min という超高速回転時においても安定した回転浮上運転が実現できているといえる。

また,超高速回転を実現するうえで必要な,円筒型回転子を備えた新たな構造の磁気磁受についても検討した。

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 0 件)

[学会発表] (計 2 件)

- (1) 松崎 智史, 田中 康寛, 竹本 真紹, 千葉明, 深尾 正: 「2 極電動機・2 極軸支持構造を持つ永久磁石型超高速ベアリングレスモータの浮上試験」, 平成 21 年電気学会産業応用部門大会ヤングエンジニアポスターコンペティション講演論文集, Y-125, pp. [Y-125], 2009 年, 査読無
- (2) K. Tsuchida, M. Takemoto, and S. Ogasawara, “A Novel Structure of a 3-axis Active Control Type Magnetic Bearing With a Cylindrical Rotor,” in Proceedings of the 2010 International Conference on Electrical Machines and Systems (ICEMS 2010) , Incheon, Korea, Oct. 2010, pp. 1695-1700. 査読有

[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