

令和元年6月6日現在

機関番号：12608

研究種目：基盤研究(A) (一般)

研究期間：2016～2018

課題番号：16H02324

研究課題名(和文) 一軸制御ベアリングレスモータの高度化に関する研究

研究課題名(英文) Developments of bearingless motors with one axis active regulation

研究代表者

千葉 明(chiba, akira)

東京工業大学・工学院・教授

研究者番号：30207287

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 34,100,000円

研究成果の概要(和文)：平成元年に研究代表者が提案したベアリングレスモータの基本概念は、二十数年を経て、世界各国に浸透し、MIT、ETHなどの工学系トップ大学を含めて世界各地の大学、研究機関で研究が行われている状況にある。研究代表者は、諸外国の研究機関に先駆けた研究を行ってきたが、特に、欧州では多額の研究費を得て研究を行っており、我が国の優位性を確保するのは容易でない状況にあった。

このような状況下で、今後1軸だけを能動的に制御するベアリングレスモータの高剛性化、高出力化、共振回避などが重要テーマと位置づけ研究を行った。研究協力者、共同研究者と有機的に連携し、先駆的な研究を行うことができた。

研究成果の学術的意義や社会的意義

山梨リニア新幹線、上海マグレブなどで磁気浮上して推進するシステムが実用化しつつある。これらは直進運動をする方式であるため、ある程度の浮上距離が得られれば良く、また、低速時はタッチダウンしてもよい。しかし、産業の米と言われるモータは、回転運動を行うため、磁気浮上は精密でなければならず、また、コスト要求も高い。

このような状況下で、シンプルに1軸だけを能動的に制御する方式の高剛性化、高出力化など、世界に先駆けた研究を行なった。学術的な意義は高く、今後は、ファン、ポンプ、ブロワ、コンプレッサ、補助人工心臓等への応用が期待され、社会的意義は高い。

研究成果の概要(英文)： The basic concept of bearingless motor proposed by the representative researcher has been wide spread in the world including notable universities such as MIT and ETH for 26 years since the beginning of the Heisei era. In European countries, there are active involvement of research with considerable funding, thus, it is not easy to have top quality researches in this country.

In this situation, this research focus on the active one or two axis position regulation system, especially high stiffness, high torque, and resonance suppression. Active involvement of research members resulted in top quality research in the world.

研究分野：パワーメカトロニクス

キーワード：ベアリングレスモータ 磁気支持 磁気軸受 1軸能動制御 シングルドライブ シングルドライブベアリングレスモータ

1. 研究開始当初の背景

平成元年に研究代表者が提案したベアリングレスモータの基本概念は二十数年を経て、世界各国に浸透し、工学系のトップクラスの MIT, ETH などの大学を含め、オーストリアのヨハネスケプラー大学、英国のノッティンガム大学、フィンランドの Alato 大学、ラッペンラッタ大学、米国のケンタッキー大学、韓国の慶星大学、シンガポール国立大学、その他、ブラジル、中国などの大学、また、国内では、茨城大学、立命館大学、群馬大学、北海道大学、高知工科大学などで、活発な研究が行われる状況に至っていた。研究代表者は、これらの諸外国、国内の研究機関に先駆けた研究を行ってきたが、特に、欧州の研究機関が多額の補助金を得て、多くの研究者でベアリングレスモータの研究開発を行っており、我が国の優位性を確保するのは容易ではない状況にあった。

このような状況下で、本補助金支援を受け、研究代表者と、研究協力者 1 名、共同研究者 4 名と、各大学の大学院生らによって、十数名のかかわる研究を企画した。そのテーマは、世界に先駆けた 1 軸だけを能動的に制御するベアリングレスモータの研究であった。

2. 研究の目的

本研究の目的は、1 軸だけを能動的に制御し、非接触で磁気浮上して、トルクを出して回転するベアリングレスモータの各種形式、構造を検討し、新しい概念を生み出すことである。特に、高剛性化、高出力化、共振回避などが世界のトップレベルの研究テーマになることを念頭に置き研究を進める。研究代表者、研究協力者、共同研究者とその大学院生等で有機的に連携を行い、情報を交換し、次世代のベアリングレスモータの新しい概念を生み出し、検証し、超一流国際ジャーナル、国際会議等で発表する。

東京工業大学においては、世界で最も高い 100N/mm の半径方向の受動剛性を持つ、新しい 1 軸制御ベアリングレスモータの構造を提案し、3 次元有限要素法磁界解析を用いて設計を行う。回転子を扁平構造にすることで、回転トルクと能動的な軸方向力を発生させるベアリングレスモータ部の半径方向の不均衡吸引力を最小限に抑えることができ、受動型磁気軸受を小型化できることを明らかにする。最終的に、トルク密度が従来のベアリングレスモータと同等程度に向上することが可能であることを明らかにする。

東京都市大学では、シングルドライブベアリングレスモータとしては世界で最も高出力である 750W をめざし、シングルドライブベアリングレスモータの設計・製作を実施した。具体的には、回転子を大径化するとともに永久磁石型バーニアモータの構造を取り入れ、トルクの向上による高出力化を図った。また、大径化した回転子を支持するためには受動磁気軸受も大型化する必要があるが、それにとまって永久磁石による大きなスラスト方向の排斥力が発生することが事前の調査で明らかになっていた。したがって、試作機の機械設計の際には安全性を確保した構造や組み付けの方法を併せて検討した。

静岡大学では、これまでの三相インバータ 1 台のみで駆動可能なベアリングレスモータにおいては、電流制御自由度数は d - q 軸の 2 自由度のみであった。このモータに、スイッチング素子を追加せずにさらにもう 1 自由度の電流制御数が増やせれば、高速駆動時の共振回避に利用できると考えた。そこで、静岡大学では、三相インバータ 1 台のみで、3 自由度の電流を制御する新たな駆動回路を提案し、その数学モデルの構築、設計、および実機による提案手法の実証を目的とした。

富山大学では、シングルドライブベアリングレスモータのトルク密度向上を目的として、アキシヤルギャップ型のスイッチドリラクタンスモータ型一軸制御ベアリングレスモータ（以下、AxG-SDBelRM）を新たに考案する。AxG-SDBelRM はモータ部に永久磁石を使用しないため不均衡吸引力を低減可能であり、磁気軸受部の縮小が期待される。本研究では、解析によりモータ部の諸特性を明らかにした。具体的には、磁気浮上時のスラスト力とトルクの制御方法およびスタートアップ時の特性を明らかにした。また、モータ部に巻きコアを使用した実機の試作を行った。

3. 研究の方法

図 1 に世界で最も剛性が高いシングルドライブベアリングレスモータの新しい構造を示す。図中の破線で囲われている部分はモータ部で、36 スロットの固定子鉄心と三相巻線、24 極永久磁石回転子から構成される。モータ部の内側にある点線で囲われた部分は、反発受動型磁気軸受であり、軸方向に着磁されたリング型永久磁石が同心円状に配置され、同極同士が対向するように 8 段積層されている。軸方向変位は中心部に配置された渦電流型変位センサによって検出する。回転子の回転角度は回転子 24 極永久磁石の下部に配置されたホールセンサによって検出する。半径方向の剛性目標値は 100 N/mm であり、回転子質量の 0.125 kg に対し十分高い剛

性である。従って、回転軸を横向きにした場合でも自重による沈み込みはおよそ $12\ \mu\text{m}$ であり、機械ギャップ $500\ \mu\text{m}$ に対して十分小さい。

図2に回転子 SPM の x - y 平面図を示す。ただし、ここでは反発受動型磁気軸受は図示していない。永久磁石は樹脂製ホルダに固定されている。回転子外径は $\phi 90\ \text{mm}$ 、半径方向の磁石厚は $6\ \text{mm}$ である。ここで、磁石の角度を θ_{PM} とする。

図3にモータ全体の x - z 平面図を示す。固定子鉄心は、外径 $\phi 129\ \text{mm}$ であり、 $0.35\ \text{mm}$ の積層鋼板によって構成される。24極回転子永久磁石の軸方向の高さは $5.3\ \text{mm}$ であり、固定子鉄心と回転子永久磁石は $1.8\ \text{mm}$ のみ対向している。半径方向の磁気ギャップは $0.8\ \text{mm}$ である。

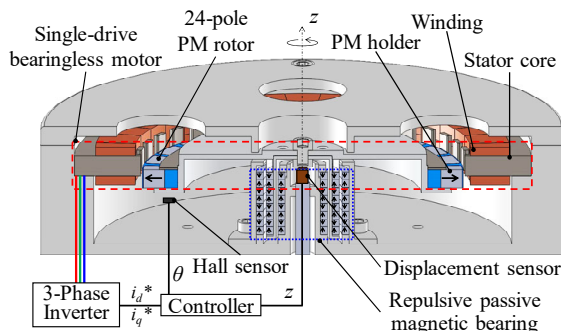


図1 構造

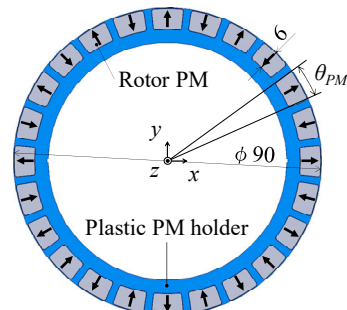


図2 回転子

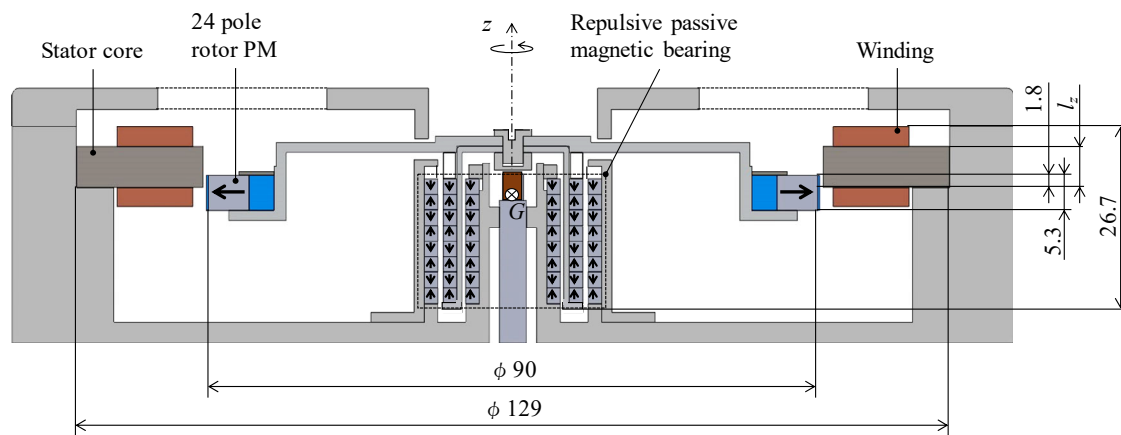


図3 断面

図4には東京都市大学で新しく考案した世界で最も高出力のシングルドライブベアリングレスモータの概形を示す。また、表1にその諸元を示す。ベアリングレスモータは永久磁石型バーニアモータの構造を有し、固定子歯数 $Z_s=12$ 、回転子極対数 $Z_r=10$ 、電機子巻線極数 $P_w=4$ である。また、固定子外径 $200\ \text{mm}$ 、積厚 $7\ \text{mm}$ の扁平大径な構造とし、バーニアモータの構造を採用することでトルクの向上を図り、定格トルクはこれまではない $3.0\ \text{Nm}$ となっている。定格回転数 $2400\ \text{min}^{-1}$ において $750\ \text{W}$ を達成する設計となっている。

図5に回転子の半径方向および傾き方向の支持を行うための受動磁気軸受を示す。受動磁気軸受とベアリングレスモータを組み合わせたとき、全体の受動的な半径方向剛性は $-94.5\ \text{N/mm}$ 、全体の受動的な傾き剛性は $-0.179\ \text{Nm/deg}$ であり、回転子を受動的に支持可能であることが有限要素法解析によって確認されている。能動的に制御を行うスラスト方向については、ベアリングレスモータの回転子永久磁石と固定子間の軸方向の吸引力 $53.4\ \text{N}$ と、受動磁気軸受で発生するスラスト方向の排斥力がおおよそ相殺するように設定されており、小さな電流で回転子を浮上させることができる。磁気支持電流に対するスラスト方向磁気支持力は $12.3\ \text{N/A}$ である。

また、受動磁気軸受は、受動磁気軸受の回転子と固定子のみでユニット化して、あらかじめ機械構造的に安定な状態としてベアリングレスモータに組み付けができる構造とした。従来構造では、モータの組み立て時には受動磁気軸受の永久磁石によって生じる不安定で大きなスラスト方向の排斥力に打ち勝つような大きな力で回転子を固定子に挿入する必要があった。このスラスト方向の排斥力は受動磁気軸受のサイズに依存するため、特にシングルドライブベアリングレスモータの大型化においては、スラスト方向の排斥力による回転子の飛び出し防止など安全性を確保した構造や組み付けの方法の検討が課題であった。ユニット構造の受動磁気軸受は、あらかじめネジを利用した治具により安全に組み立てが可能である。また、ベアリングレスモータへの組み付け前にあらかじめ安定な状態のユニットに組み立てられるので、回転子の飛び出し等も生じない安全な構造である。

図6に製作した試作機の固定子と回転子の外観を示す。製作後の検査により、試作機は設計通りに完成していることを確認している。今後、実機試験により性能を確認する必要がある。

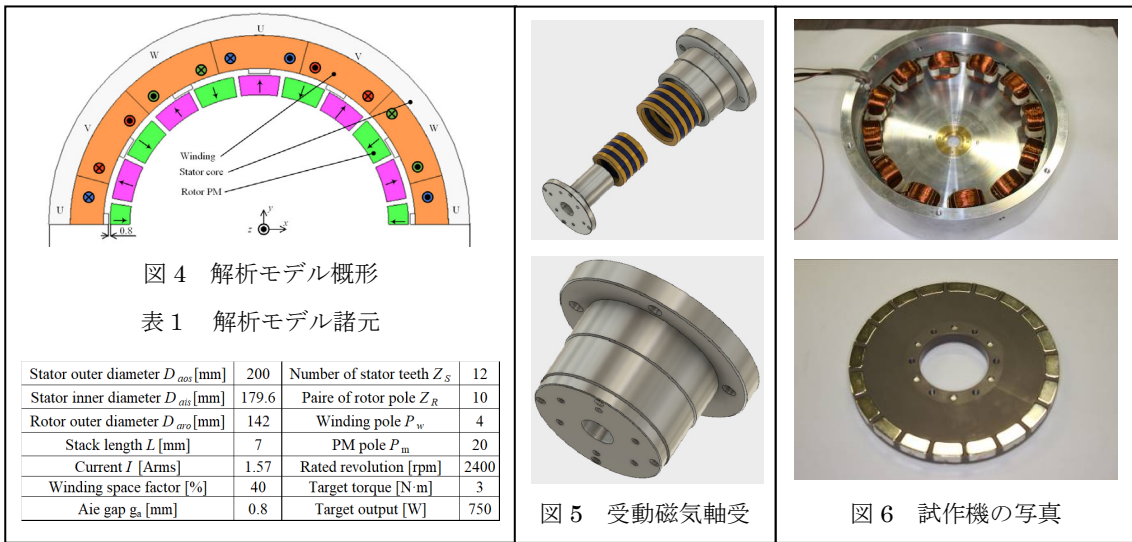


図 7 に静岡大学で新たに提案したシングルドライブベアリングレスモータの回路構成を示す。三相 Y 結線中性点と電源中性点間（零相）に、磁気浮上巻線を結線することで、 $i_u+i_v+i_w=i_z$ （独立変数 3）の関係式が成り立ち、三相インバータ 1 台で、d-q-0 軸の 3 自由度の電流制御を可能にする。 i_z を制御することによる共振を回避できる。

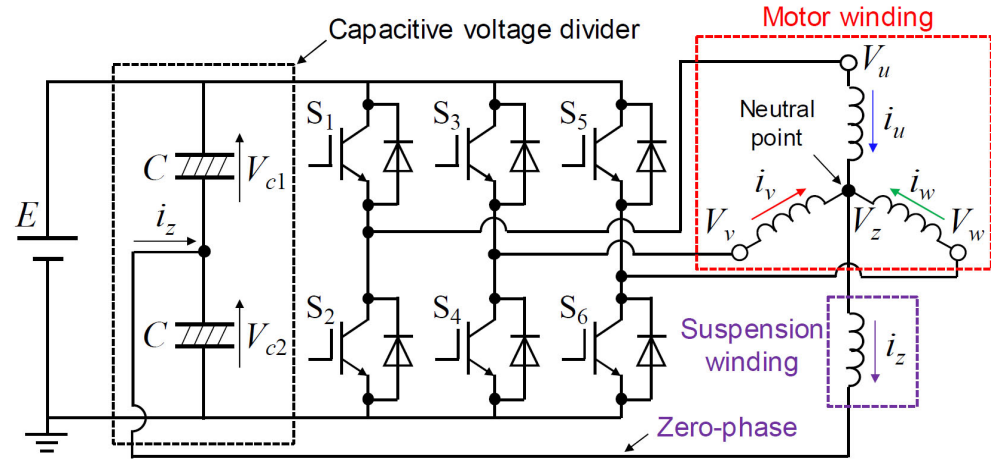


図 7 零相電流を磁気浮上制御に利用する新しい回路構成

図 8 は富山大学で新たに設計したシングルドライブベアリングレスモータのアキシシャルギャップのスイッチドリフトモータ AxG-SDBelRM である。AxG-SDBelRM の全長は 45.5mm、直径は 60mm である。軸の部分に配置された反発受動型磁気軸受(以下、RPMB)により、4 自由度(x, y, θ_x, θ_y)を受動安定させる。しかし、RPMB の z 軸方向が不安定となるため、モータ部で能動的に制御する必要がある。RPMB の不安定方向である z 軸方向は、外側のアキシシャルギャップ型の 3 相スイッチドリフトモータ (以下、AxG-SRM) により制御する。AxG-SRM では、トルクを出力すると同時に z 軸負方向にスラスト力が発生する。

AxG-SRM のトルク及びスラスト力はトルク係数 k_t またはスラスト力係数 k_{th} と電流の 2 乗に比例する。

図 9 に電流 1 A 時の k_t および k_{th} を示す。トルク波形を黒線、スラスト力波形を赤線で示す。トルクは正弦波状、スラスト力は正弦波に直流成分が重畳した形状に近似可能である。電流波形は、直流成分 i_0 及び電流基本波成分 i_1 を重畳させた形状とする。このとき、平均トルク T_{ave} および平均スラスト力 F_{th_ave} は式(1)(2)で表される。

$$T_{ave} = k_{t1} i_0 i_1 \quad (1)$$

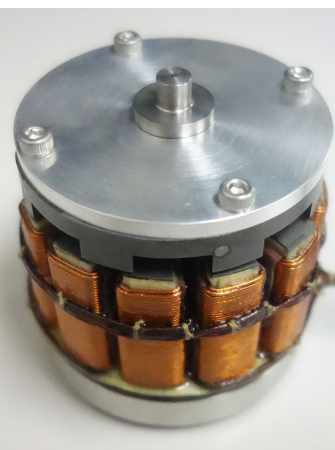
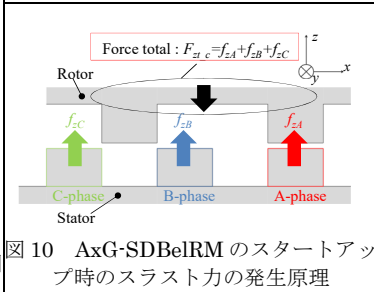
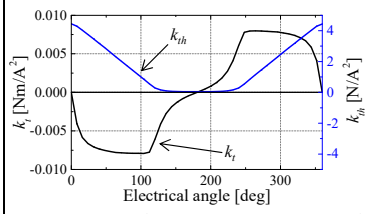
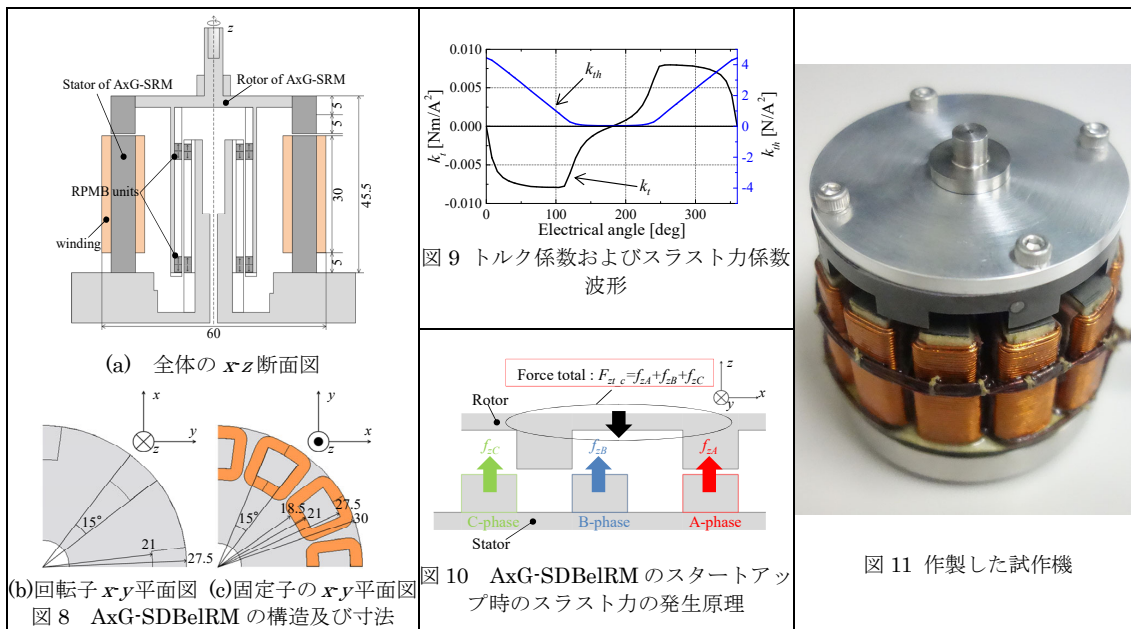
$$F_{th_ave} = k_{th0} i_0^2 + k_{th1} i_1^2 / 2 \quad (2)$$

本モータにおいて、 k_{t1} は -0.008、 k_{th0} は 2.2、 k_{th1} は 2.2 となる。式(1)(2)より、 i_0 と i_1 の組み合わせによりトルクを一定にしてスラスト力を制御することが可能である。

図 10 に AxG-SDBelRM のスタートアップ時のスラスト力の発生原理を示す。A 相に電流を励磁することによって、スラスト力 f_{zA} が発生する。B、C 相も同様に電流を励磁することによって、スラスト力 f_{zB} 、 f_{zC} を発生させることができる。AxG-SDBelRM は、駆動を行う際に SRM

用のインバータを用いるため、それぞれの相を独立して制御を行うことができる。そのため、3 相同時に直流電流を印加することによって、回転子に三相のスラスト力の和と等しい、負方向のスラスト力 $F_{zt,c}$ を発生させることができる。

図 11 に作製した試作機を示す。アキシアルギャップ型モータは三次元的な構造を有するためパウダーコアを使用する例が多いが、比透磁率が低い磁性材料には不適合である。このため、試作機では変圧器等で使用される巻きコアを使用した。なお、本試作機は AxG-SRM 部の特性を確認するために、ボールベアリングを使用している。今後、AxG-SRM 部の特性を実機にて確認したのち、ボールベアリング部を反発型磁気軸受に置き換えて浮上実験を行う必要がある。



4. 研究成果

東京工業大学においては、3 次元有限要素法磁界解析を用いて、トルク、能動的な磁気方向力、受動安定方向の剛性を計算した。初期値として、固定子鉄心の積厚 $l_2 = 4.9 \text{ mm}$ と定め、磁石角度を 1 deg. 毎に変更し、 11 deg. , 12 deg. , 13 deg. の 3 種類で比較した。解析の結果、平均トルクは磁石角度の増加に伴って増加したが、トルクリプルに関しては、磁石角度 12 deg. において、最小値 1.54% となった。そのため、磁石角度 $\theta_{PM} = 12 \text{ deg.}$ を採用する。しかし、このときの平均トルクは 0.50 Nm であるため、トルクを向上させる必要がある。固定子鉄心の積厚を 4.9 mm から 5.95 mm の範囲で変化させた。積厚を増加させると、トルクも増加する傾向が見られ、 $l_2 = 5.95 \text{ mm}$ を固定子積厚として採用する。これにより、平均トルクは 0.515 Nm となった。提案構造について、剛性、不平衡吸引力、タッチダウン幅及び始動時に要求される軸方向力を示す。半径方向剛性は負剛性であり、 -48 N/mm である。全体の半径方向剛性は、世界で最も高い 100 N/mm となり、目標値を満足する設計を実現した。

東京都市大学においては、高出力化を目的として永久磁石型バーニアモータの構造を取り入れたシングルドライブベアリングレスモータの設計・製作を行った。その結果として、(1)有限要素法解析によって、シングルドライブベアリングレスモータとして世界で最も高出力である 750 W を達成する設計を完了した、(2)永久磁石の排斥力を考慮した安全な構造や組み立て方法を検討し試作機の製作を完了した。今後は、実機試験を実施し試作機の性能を確認する必要がある。

静岡大学では、提案回路の数学モデルを構築し、三相・零相電流の制御法を提案した。また、図 12 に示す三相 IPM モータと 1 自由度鉄球磁気浮上から構成される実験装置により、モータ負荷運転時においても安定した磁気浮上制御（鉄球振動 $10 \mu\text{m}$ 以下）が可能であることを示し、提案手法の有用性を実証した。さらに、キャパシタ電圧のセンサレス安定化方法、キャパシタ容量の低減方法、およびキャパシタには交流電流が流れるように零相負荷に直流電流を供給する方法、を考案し、いずれも実機により実証した。

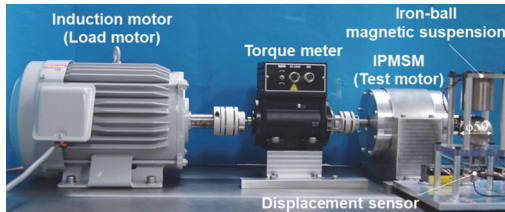


図 12 三相モータと 1 自由度磁気浮上から構成される実験装置

富山大学においては、高トルク化を目標として新たにスイッチドリラクタンスモータ型一軸制御ベアリングレスモータを考案し、設計および製作を行った。この結果として、(1)有限要素法解析によりトルクおよびスラスト力を同時に制御可能であることを明らかにした、(2)三相同時に電流を流すことでスタートアップが可能であることを明らかにした、(3)巻きコアを使用した試作機の製作を完了した。今後は実機試験を実施し、試作機の性能を確認する必要がある。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 (計 5 件)

1)藤井 勇介, 朝間 淳一, 大岩 孝彰, 千葉 明, "永久磁石モータの零相電流を用いた磁気浮上システムにおける浮上位置決め精度の改善", 電気学会論文誌D (産業応用部門誌), 2019 年 139 巻 3 号 p. 322-329 <https://doi.org/10.1541/ieejias.139.322> 査読有り

〔学会発表〕 (計 35 件)

1)Hiroya Sugimoto "Design of a Novel Disk-Shaped Single-Drive Bearingless Motor with High Torque Density", *IEEE International Electric Machines and Drives Conference (IEMDC)*, 2017

〔図書〕 (計 0 件)

〔産業財産権〕 出願状況 (計 0 件)

6. 研究組織

(1) 研究分担者

研究分担者氏名： 土方 規実雄

ローマ字氏名： Kimio Hijikata

所属研究機関名： 東京都市大学

部局名： 工学部機械システム工学科

職名： 講師

研究者番号 (8 桁)： 70710507

研究分担者氏名：朝間 淳一

ローマ字氏名： Junichi Asama

所属研究機関名： 静岡大学

部局名： 工学部

職名： 准教授

研究者番号 (8 桁)： 70447522

研究分担者氏名：清田 恭平

ローマ字氏名： Kyohei Kiyota

所属研究機関名： 富山大学

部局名： 大学院理工学研究部 (工学)

職名： 助教

研究者番号 (8 桁)： 10796519

(2) 研究協力者

研究協力者氏名： 杉元 紘也

ローマ字氏名： Hiroya Sugimoto