

## 2023 年度 永守財団 研究助成 研究報告書

所属機関	東京科学大学 工学院 電気電子系
職位または役職	准教授
氏名	清田 恭平

### 1. 研究題目

1 軸制御型アキシヤルギャップリラクタンスベアリングレスモータの高出力化

### 2. 研究目的

現在、回転子が磁気的な力により完全非接触で回転可能なモータの内、磁気浮上部がモータと一体のモータであるベアリングレスモータの研究が盛んに行われている。ベアリングレスモータは、機械的な接触がないため潤滑油レス、無摩擦、無摩耗で粉塵が発生せず、省メンテナンスであるという利点がある。そのため、超純水用ポンプ、コンプレッサ等の超高速モータ、長寿命冷却ファン等への応用が期待されている。特に、シングルドライブベアリングレスモータと呼ばれるタイプのベアリングレスモータは、軸方向以外の 4 自由度 ( $x, y, \theta_x, \theta_y$ ) を反発型磁気軸受により受動安定させ、軸方向のみを能動制御するため、コントローラ及び軸方向制御用変位センサがそれぞれ 1 台ずつで動作可能であるため低コストである。しかし他研究機関にて行われてきた例では最大でも数十 W クラスの出力しか実現できておらず、より高出力が要求されるポンプ・コンプレッサ用には不適合である。また、モータ部及び磁気軸受部双方に永久磁石を用いているため、レアアース問題(価格高騰、調達リスク)を抱えやすい。

報告者はこれまで、トルクと軸方向の力が同時に発生可能であり、かつモータ部に永久磁石が不要な、アキシヤルギャップ型シングルドライブベアリングレスリラクタンスモータ(AxG-SDBeIRM)を提案した。このモータは、アキシヤルギャップ型三相スイッチトリラクタンスモータ(以下、AxG-SRM)と反発受動型磁気軸受(以下、RPMB)から構成される。AxG-SRM では、アキシヤルギャップ構造とすることによりトルクと下向きのスラスト力を発生させる。RPMB では、4 自由度を受動安定にすると同時に上向きのスラスト力を発生させている。RPMB のスラスト力を AxG-SRM にて制御することにより、安定した磁気浮上を実現している。他研究機関と異なり、スイッチトリラクタンスモータ構造を採用しているため、不平衡吸引力と呼ばれる磁気浮上を不安定にさせる電磁力が小さく、このため他の研究例と比較して RPMB を小型化可能である。モータ部でも永久磁石が不要である為、モータ

全体でレアアースレスが実現可能である。また、モータ部をアキシシャルギャップ型とすることにより、モータトルクとスラスト力を同一箇所で発生可能であり、小型化や高トルクにも有利な構造としている。しかし、従来構造では起磁力を確保するために固定子部の軸長を長くする必要があり、アキシシャルギャップ型モータとしては不利となる形状となっている。一方で、従来研究では初期検討として数十Wクラスのモータとして設計したため、本モータをポンプ用に用いられる750W以上の出力を有するモータに再設計する必要があるが、RPMBとAxG-SRMとで寸法変更による電磁力の感度が異なるため、最適な形状が従来構造から変化する。

本研究課題では、本モータをポンプ用に用いられる750W以上の出力に大出力化することを目指し、上記2つの問題を同時に解決することが可能なAxG-SRMの形状を明らかにする。具体的には、AxG-SRMの極数(特に固定子側)を再検討することによりAxG-SRM部の扁平化を実現させ、同体積あたりの出力を向上させる。

### 3. 研究内容及び成果

---

本研究では目標を達成するために4つの事項(1.磁気飽和による影響の検討, 2.試作機の設計, 3.試作機による実験, 4.圧粉鉄心使用時の特性)を検討する必要がある。現状ではそのうち1., 2.および4.について主に検討した。

1.および4.については、扁平形状を達成するために、鉄心材料を電磁鋼板から圧粉磁心に変更し、ヨーク厚を薄くすることで更なるモータの扁平化を目指した。なお、一般的にSRMはモータ体積が小さいほどトルク密度が低下する方向であるため、本検討では同一のトルク密度をより小さい体積において実現することを目的とした。昨年度提案した電磁鋼板を使用したモデルに対して、同じモータ外径に対して軸長を31.5 mmから25.5 mmとより扁平な形状とした上で、トルク密度が0.382 Nm/Lから0.398 Nm/Lとわずかに向上することを明らかにした。また、電磁鋼板から圧粉磁心に変更した際に歯幅を拡大する等飽和磁束密度が電磁鋼板より低下する分を補償する設計を行った結果、トルクリプルを42%から13%に、スラスト力リプルを31%から8%に、それぞれ低減可能であることを明らかにした。さらに歯幅拡大により磁気飽和領域を積極的に使用することなくスタートアップが可能であることを明らかにした。

2.については、現行の試作機における課題を同時に解決することを目指して新たな構造を検討した。すなわち、従来構造では省スペース化を目指してAxG-SRM部の内側にすべてのRPMBを配置する設計としていたが、これをAxG-SRMの両端にRPMBを配置することを検討した。これによりAxG-SRMの鉄心をさらに内径側に拡大可能となり、ギャップ部の断面積を従来構造から1.5倍に増加可能であることを明らかにした。

なお、同時並行で進めていた、RPMB部の回転子とAxG-SRM部の回転子の両方を考慮した安定性の検証の結果、現行の試作機の構造では安定した浮上回転が不可能であることが明らかとなった。これは、現行の試作機構造では回転子重心とRPMB部による力の作用点との間に距離が発生していたためである。これにより回転子の傾き方向と半径方向との間に干渉力が発生し、これにより偏心等の外乱により不安定になるためである。2.の検討結果について同様の解析を実施した結果、現行の試作機において課題となっていた、RPMB部とAxG-SRM部との間に発生していた傾き方向等の干渉を抑制可能であることを明らかにした。

このため、現行の試作機に2.の知見を反映させた改良を施すことにした。従来構造ではRPMBが回転子の重心の下方に配置され、回転子の重心とRPMBの重心は16.7 mm離れている。一方、提案モデルではRPMBを回転子の上下に配置し、回転子の重心とRPMBの中心を一致させた。また、RPMBの間の距離は従来モデルでは24 mmであったが、提案モデルでは80 mmとしている。提案モデルではRPMBの間の距離を十分確保しているため、傾き方向剛性を強化しており、そのため、安定した回転と5000 min<sup>-1</sup>までの加速が可能であることを、MATLABを用いた数値シミュレーションにより明らかとした。また、従来モデルはギャップセンサを回転子の重心付近に配置するためにアウターロータ型としていたが、アウターロータ型のケース設計は困難であるため、提案モデルではインナーロータ型を採用した。なお、永久磁石の使用量を一定とするために、

提案モデルにおいて上下の永久磁石の寸法は従来モデルから変更していない。このほか、現行の試作機では RPMB に使用する永久磁石を、接着剤を用いて固定していたため、磁気浮上性能に影響を与える RPMB 部をはじめとした各部位の寸法精度確保に課題があった。このため今回の改良の際に永久磁石の固定をねじ止めとし、また各部位の寸法の調整方法を確保することにより、寸法誤差の確保が容易となる構造とした。

#### 4. 今後の研究の見通し

---

本研究では、モータ全体の体積を低減するための手法を検討し、RPMB 部を AxG-SRM 部の外側に配置することによりモータの小型化と磁気浮上性能の確保の両立が可能であることを明らかにした。しかし、前述した通り、本来今年度実施すべきであった現行の試作機を用いた磁気浮上試験については、磁気浮上性能に重大な瑕疵があったため、本研究の成果を先行して取り入れた改良を施すことが必要となった。この際現行の試作機に存在した組み立て精度上の課題についても解消している。ただし、現時点では解析上でのみ浮上安定の評価を行っているため、今後本実機を用いて浮上試験を行い、上記検討に誤りがあるかの実機検証を行う必要がある。この一環として、これまで未検証であった磁気飽和発生時の影響についても改めて実機検証を行い、トルク密度と磁気浮上性能の両立が可能な AxG-SRM 部の設計指針についての確立を進めていく必要がある。

また、磁気浮上性能は回転子の重心位置に依存することが明らかとなった。このため今後、ファン等の負荷を取り付けた際の重心の変化を考慮した上で実機を設計する必要がある。

さらに、現行の試作機は上記の検討を反映させた上で確実に磁気浮上が可能となる様に設計した結果、さらに軸方向にモータ体積が増加する結果となった。これは本研究の目指すべき方向である扁平化とは逆の方向である。今後、上記 2.にて行った検討結果を改めて検証し、モータが安定する RPMB 部の設計と、モータ部の扁平化によるトルク密度の向上とが両立可能となるような設計指針を検討し確立する必要がある。

#### 5. 助成研究による主な発表論文、著書名

---

国際会議(査読付)

A. Shiratsuki and K. Kiyota, "Speed Enhancement of Vector-Controlled Axial Gap Type Single-Drive Bearingless Reluctance Motor by Adjustment of Rotor Suspension Position," 2023 26th International Conference on Electrical Machines and Systems (ICEMS), Zhuhai, China, 2023, pp. 1260-1265.

K. Sato and K. Kiyota, "Torque Density Improvement of Axial Gap Type Single-Drive Bearingless Reluctance Motor by Reducing the Number of Stator Poles," 2023 26th International Conference on Electrical Machines and Systems (ICEMS), Zhuhai, China, 2023, pp. 1324-1329.

国際会議(査読なし)・国内会議

白築・清田, 「最大スラスト力/電流制御によるアキシヤルギャップ型シングルドライブベアリングレスリラクタン্সモータにおける電流実効値の低減」, 電気学会 全国大会, 5-118, 2024年3月16日

小寺・清田, 「アキシヤルギャップ型シングルドライブベアリングレスリラクタン্সモータの反発型磁気軸受の配置検討」, 「電磁力関連のダイナミクス」シンポジウム, OS3-3-9, 2024年6月25日~27日