

1. 研究の目的

近年、モータドライブの高速化・小形化が進んでいる。モータ出力は、回転数とトルクの積であるので、高速化により、モータの単位体積当たりの出力（出力密度）を向上することができる。また、出力密度一定の場合、高速化によりモータの小形化が可能である。地球温暖化ガスの排出量低減のためには、モータの小形化・高効率化は日本が世界を先導して解決すべき重要な課題である。一般的なモータでは、回転主軸と軸受間の機械的摩擦が発生するため、さらなる高速化・高効率化には技術的ブレイクスルーが必要である。表1に、超高速モータドライブの主な課題と解決策を示す。

課題解決のため、回転主軸を磁気力により非接触で支持可能なベアリングレスモータの、超高速モータへの適用を検討する。また、高周波域での鉄損低減が可能な圧粉磁心を超高速ベアリングレスモータに適用することで、さらなる高効率化を目指す。さらに、ホモポーラモータを採用することで、回転子が鉄心のみで構成されるため、機械的・熱的に堅牢な回転子構造となる。

本研究では、超高速モータの、マイクロガスタービン、プロア、コンプレッサ、ターボ分子ポンプ、歯科用切削モータ、スーパーチャージャ等への応用を見据え、ベアリングレスモータの超高速化・高効率化、を目的とする。

表1 超高速モータドライブの主な課題と解決策

課 題	解決策
①軸受（ベアリング）の高速化対応	ベアリングレス（磁気浮上）化による高速ドライブ実現
②高速化に伴う損失低減と高効率化	高機能性材料圧粉磁心の適用による高周波域での損失低減
③高速回転に耐えうる回転子構造	回転子に永久磁石を用いないホモポーラモータ構造

2. 研究の内容(手法、経過、評価など。)

2.1 ベアリングレスモータとは

ベアリングレスモータは、図1(a)に示すように、1ユニットで回転と非接触磁気支持が同時に可能である。このため、図1(b)の磁気軸受とモータを組み合わせた構造と比較して、軸長を短縮できる。すなわち、曲げ振動の固有振動数（危険速度）が高くなるため、最大回転数を高く設定できる。

2.2 ホモポーラ形ベアリングレスモータ

現在報告されている機械式軸受を用いた超高速モータの回転子構造は、シャフトに2極の永久磁石を取り付け、高速回転に耐えうるように飛散防止保護管が取り付けられている。この構造をベアリングレスモータに適用した場合、①組立工程が複雑、②永久磁石の熱減磁等の問題がある。

このため、回転子が鉄心のみで構成され、堅牢な構造を有し、さらに磁気浮上制御に回転子の角度検出が不要な、ホモポーラモータを適用する。 図2に提案するホモポーラ形ベアリングレスモータの構造を示す。固定子間には、軸方向に着磁された永久磁石が配置されている。この永久磁石のバイアス磁束は、固定子鉄心、エアギャップ、回転子鉄心を通り、一方の回転子突極部はN極に、他方はS極に着磁される。回転子鉄心部は、各ユニットで半ピッチずれた構造で、正面から見ると6極となる。固定子には、三相6極のモータ巻線が共通に、三相2極の支持巻線が各ユニットに施されている。いずれも小形化のため集中巻とする。

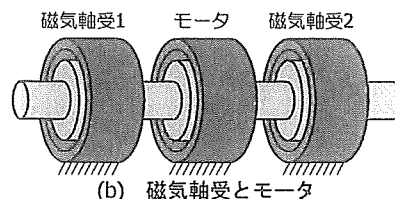
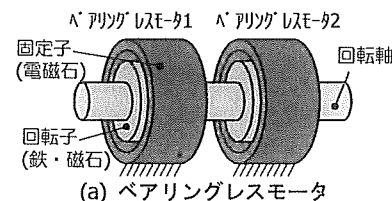


図1 ベアリングレスモータと磁気軸受の比較

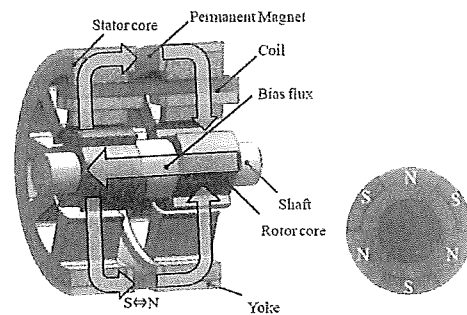


図2 ホモポーラ形ベアリングレスモータ

2. 研究の内容(続き)(書ききれない場合には、同一形態のページを追加しても結構です。)

2.3 設計・試作

ホモポーラ形モータにおいて、固定子鉄心の背面に磁性ヨークを設けることで、漏れ磁束の減少、および磁束鎖交数の増加を電磁界解析により検討した。図3に解析結果を示す。ヨーク無しの場合、鎖交磁束は0.70mWbであったのに対し、ヨークを設け厚さ2mm以上の場合約10%鎖交磁束が増加した。その結果、磁性ヨーク設置前と比較し、同出力で体積34%削減と出力密度52%向上が可能となった。

提案する9スロット6極構造では、回転子の回転位置がX軸対称の場合、X軸電流を流した時に、原理的にX軸方向のみに支持力 F_x が発生する。一方、図2(b)のような非対称位置では、Y軸方向への干渉力 F_{yx} も発生し、支持力の発生方向に誤差(図4)が生じる恐れがある。そこで、発生方向誤差を低減するため、支持巻線構造を理論計算、および有限要素電磁界解析により検討した。最終的に決定した支持巻線構造を図5に示す。

試作したベアリングレスモータを示す。一次試作の目標出力は100W、回転数10000rpmとした。回転子の直径は20mm、磁気ギャップは1mmである。

2.4 磁気浮上・回転試験

PID制御により回転子の非接触磁気支持を実現した。図7に、磁気支持力の方向誤差の実験値と解析値を示す。実験と解析では最大2度程誤差があるが、傾向は一致し、実験値の最大誤差は4.5度と小さい。

次いで、オープンループ駆動での回転試験を行った。図8に、10000rpm時の回転子の振動波形、および図9に回転数に対する振動振幅を示す。並進方向、および傾き方向の振動振幅は 3σ で $24\mu\text{m}$ 、および 0.5mrad であり、それぞれの可動範囲 0.2mm 、および 4.5mrad と比較して十分小さい。

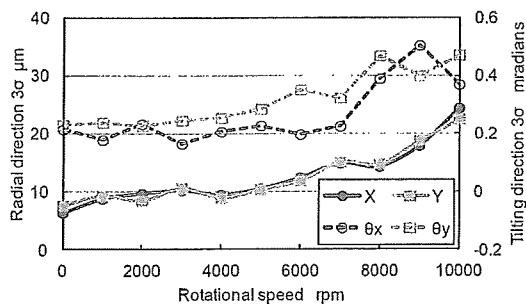


図9 回転数に対する振動振幅

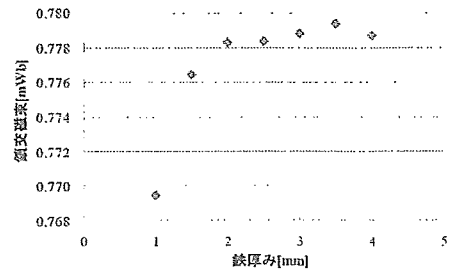


図3 磁性ヨークの厚みに対する磁束鎖交数

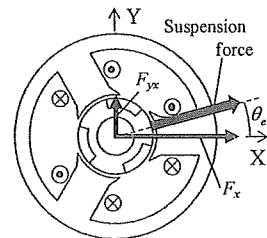


図4 支持力の発生方向誤差

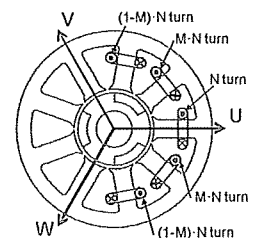


図5 提案支持巻線 (U相)

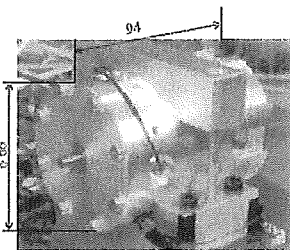


図6 試作したベアリングレスモータ

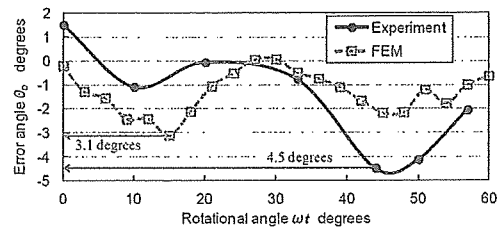
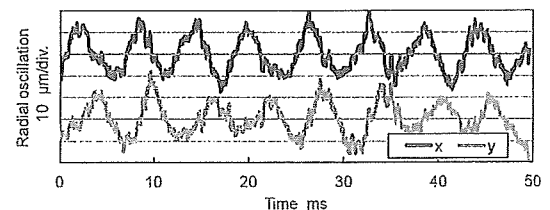
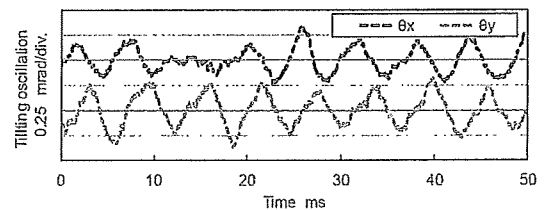


図7 支持力方向誤差の実験値と計算値



(a) Radial direction.



(b) Tilting direction.

図8 10000rpmでの回転子振動

3. 研究の結論、今後の課題

3.1 結論

100W・100000rpm のホモポーラ形ベアリングレスモータの実現を目指し、以下の結論を得た。

- 9 スロット 6 極，集中巻構造の超高速回転用ホモポーラ形ベアリングレスモータ構造を提案した。
- 磁性ヨークを設けることで，出力密度が向上することを，電磁界解析により示した。
- 磁気支持力の方向誤差を低減する 2 極磁気支持巻線構造を提案し，テスト機による実験により，提案構造の効果を実証した。
- オープンループ駆動で 10000rpm までの非接触磁気支持回転を実現した。
- 10000rpm での振動振幅は，可動範囲と比較して十分小さいことをしめした。

3.2 今後の予定

- 閉ループ制御で目標とする 100000rpm 駆動を目指す。
- 軸受の有無でモータ効率等を測定し，ベアリングレス駆動の有用性を示す。

4. 成果の価値(とくに判りやすく書いてください。)

1. 社会的価値

- 超高速ベアリングレスモータの実現：次世代の新しいモータを世界に先駆けて登場させることにより、日本の科学技術を世界に発信し、日本の経済発展に貢献する。
- 超高速ドライブによる出力密度向上：小形化により部品点数・体積が減少することで、ごみ発生量も減少し、環境にやさしく地球環境問題対策に貢献する。
- 超高速モータの高効率化：地球温暖化ガス排出量の低減と、今後の電気自動車社会へ技術的に貢献する。

2. 学術的価値

ベアリングレスドライブは、21世紀になってようやく実用化され、今後ますます進展すると予想される。ベアリングレスモータの回転数の限界、高速回転中の磁気浮上回転子の挙動、コントローラ・ドライブ回路など、未だ明らかにされていない点が多く、研究成果は学術的にも新規性がある。また、超高速化・高効率化の際の問題点を明らかにすることで、今後の設計指針を示すことができる。ベアリングレスドライブは、日本が世界をリードしている研究分野である。数多くの学会発表、論文投稿を通して研究成果を公表することで、世界最先端の日本の科学技術を全世界に向けて発信する。