

電磁誘導原理を利用したベアリングレスモータの電磁力特性

松江 仁*

Electromagnetic Property of Bearingless Motor Based on Electromagnetic Induction

Hitoshi MATSUE

We introduce a new type bearingless motor whose magnetic bearing is based on electromagnetic induction. This new type motor generates torque by the same way as permanent magnet synchronous motor. Although many bearingless motors apply the active control method for their magnetic bearings, this new type motor applies passive electromagnetic induction method for the magnetic bearings. Therefore it has a high potential to be simple, reliable and reasonable bearingless motor. In this paper we explain the principal of the new type bearingless motor and introduce the calculated and measured results of its electromagnetic characteristics.

キーワード：ベアリングレスモータ，電磁誘導，同期モータ

1. はじめに

電気モータと磁気ベアリングを一体化した機器はベアリングレスモータと呼ばれ、いろいろな応用に向けての開発、実用化が進められている¹⁾が、磁気軸受としての電磁力は、能動的な制御を用いて発生させるのが一般的である。本論文では、一般的なベアリングレスモータと異なり、電磁誘導により受動的に力を発生する磁気軸受と永久磁石同期モータを組み合わせたベアリングレスモータの構成及び電磁力の発生原理について述べるとともに、電磁力の数値計算結果と測定結果の例を紹介する。

2. ベアリングレスモータの原理

2.1 構成

図1は提案するベアリングレスモータ(以下、提案モータ)の概略である。図1のように、永久磁石ロータの周囲に三相交流を通電するための空心の銅導体電機子コイルを2列に配置するだけの単純な構成となっている。永久磁石ロータは、図2のように、単純にN極とS極が交互になるように着磁するだけである。電機子コイルは、図3の上図のように接続する。図3では、煩雑にならないようにU相の電機子コイルのみ示しているが、V相及びW相の結線もU相と同じになる。2列に並んでいる電機子コイルは巻き方向が逆になるように、ちょうど数字の「8」の字を描くように接続している。以下、トルク、

スラスト力、ラジアル力の発生原理について、それぞれ説明をするが、基本的には、この提案モータは、超電導磁気浮上式鉄道用の推進浮上案内兼用システム²⁾において、車両にある超電導磁石を永久磁石ロータに置き換え、直線上に配置されるリニアモータの地上コイルを、通常の回転モータのように回転形状に構成したものであると考えればよい。

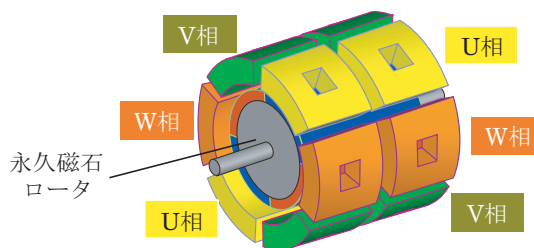


図1 ベアリングレスモータの構成

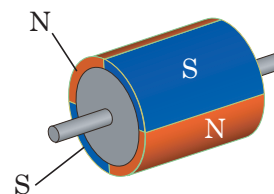


図2 永久磁石ロータ

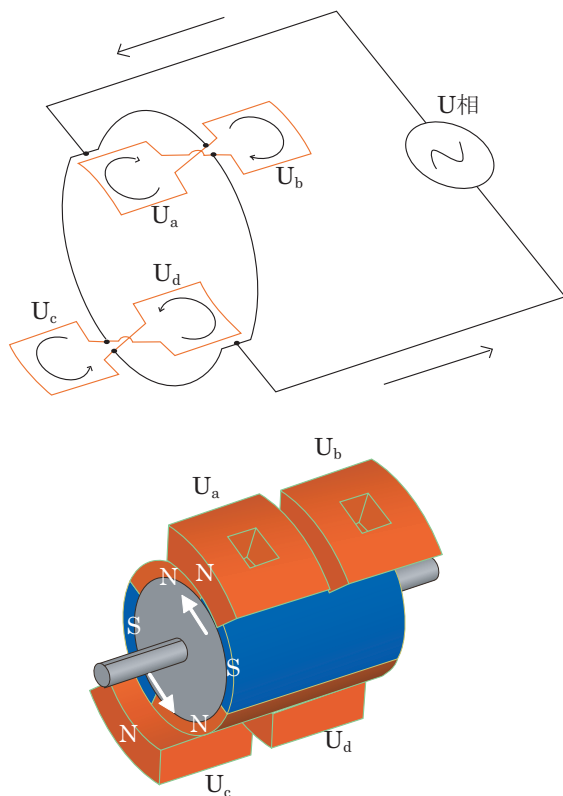
2.2 トルク発生原理

提案モータのトルク発生原理は、通常の永久磁石同期モータと同じである。図3はトルク発生原理の説明図である。説明のためにU相の4つのコイルをそれぞれU_a, U_b, U_c, U_dと呼ぶ。永久磁石ロータの周囲に配置された

* 浮上式鉄道技術研究部(電磁路技術)

特集：浮上式鉄道技術と在来鉄道への応用

三相の電機子コイルに、永久磁石ロータの回転角度に同期した交流電流を通電することにより、永久磁石ロータと同じ速度で進む回転磁場を発生させて、トルクを発生させる。トルクを発生させる電流は図3の上図のような方向に流れるため、U相の電機子コイルは図3の下図のように励磁される。結線の仕方を工夫することにより、ロータ側からみるとU相の4つの電機子コイル U_a 、 U_b 、 U_c 、 U_d の極性が同じ極性となるようにしているため、永久磁石同期モータと全く同じ原理でトルクを発生させることができる。



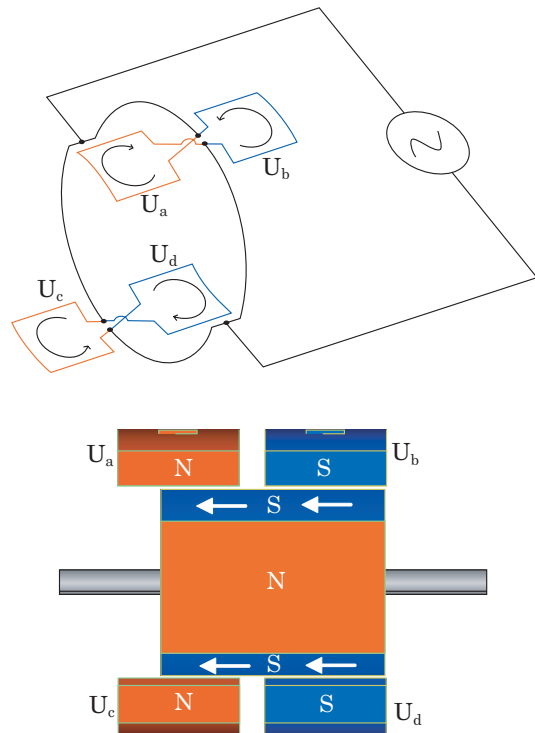
(上図：U相電流の流れ、下図：U相電機子コイル励磁状態)

図3 トルク発生原理

2.3 スラスト力発生原理

提案モータでは、電磁誘導により発生するローレンツ力がスラスト力となる。図4は提案モータのスラスト力発生原理の説明図である。N, S, N, Sと交互に着磁された永久磁石ロータが回転すると、電機子コイルを鎖交する永久磁石ロータの磁束量が変化するため、永久磁石ロータの回転数に比例する電圧が電機子コイルに誘導される。図4の下図のように永久磁石ロータが電機子コイル U_b と U_d の方へずれた場合は、電機子コイル U_b と U_d の方が電機子コイル U_a と U_c よりも永久磁石ロータからの鎖交磁束が大きくなるので、その誘導電圧の差に比例した電流が、図4の上図において黒矢印で示したような方向に流れる。従って、電機子コイルは、図4の下図のような励磁状態になり、白矢印で示したように、電機子コイル

U_a 及び U_c と永久磁石ロータとの間には吸引力が、電機子コイル U_b 及び U_d と永久磁石ロータとの間には反発力が働いて、永久磁石ロータを中心位置に戻そうとする復元力が発生する。これが、スラスト力発生原理である。V相、W相の電機子コイルにおいても同様である。

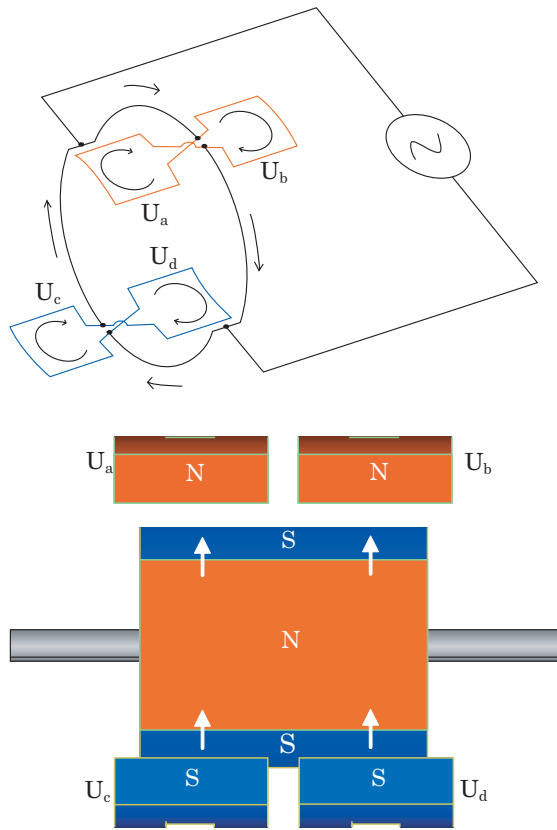


(上図：U相電流の流れ、下図：U相電機子コイル励磁状態)

図4 スラスト力発生原理

2.4 ラジアル力発生原理

提案モータのラジアル力の発生原理も、スラスト力発生原理と同様に電磁誘導により発生するローレンツ力による。図1のように、U相電機子コイルは、180度反対側に互いに向き合う位置に配置している。そして、各U相電機子コイル (U_a 、 U_b 、 U_c 、 U_d) は、電源からみて並列に接続している。V相、及びW相の電機子コイルも同様である。並列に接続しているために、互いに向き合っているU相電機子コイルで閉回路が構成される。従って、図5の下図のように、永久磁石ロータが電機子コイル U_c 及び U_d の方向へずれた場合には、電機子コイル U_c 及び U_d の方が電機子コイル U_a 及び U_b よりも永久磁石ロータからの鎖交磁束が大きくなるので、その誘導電圧の差に比例した電流が、図5の上図において黒矢印で示したような方向に流れる。従って、電機子コイルは、図5の下図のような励磁状態になり、白矢印で示したように、電機子コイル U_a 及び U_b と永久磁石ロータとの間には吸引力が働き、電機子コイル U_c 及び U_d と永久磁石ロータとの間には反発力が働いて、永久磁石ロータを中心位置に戻そうとする復元力が発生する。これが、ラジ



(上図：U相電流の流れ，下図：U相電機子コイル励磁状態)
図5 ラジアル力発生原理

アル力発生原理である。V相，W相の電機子コイルにおいても同様である。

3. 提案モータの特徴

一般のベアリングレスモータでは、ロータ位置をフィードバックする制御が必要となるため、高速回転になるほど永久磁石ロータの位置制御が難しくなると考えられるが、提案モータの磁気軸受は、2章で説明したように、電磁誘導を適用した受動的なものであるため、磁気軸受の制御が不安定になる心配はなく、むしろ、永久磁石ロータが高速に回転するほど、大きな電磁力を得られる。従って、高速回転を必要とする用途への応用に適している。また、例えば、瞬時停電発生時のような極端な異常時であっても、提案モータの場合は、慣性力によりロータが回転し続ける限りは急激に電磁力がなくなることはなく、磁気軸受の制御がフェイルしない、信頼性の高いベアリングレスモータとなる。

さらには、永久磁石ロータの変位を計測する必要もなく、かつ、各変位軸方向の制御用インバータを必要としない。このため、安価なベアリングレスモータとなる。また、提案モータの電機子コイルは、すべてのコイルが、トルクとスラスト力とラジアル力の3つの力を発生する機能を兼

表1 長所と短所

	提案モータ	一般のベアリングレスモータ
高速性	高速回転するほど大きな電磁力が得られる	高速回転になるほど磁気軸受の制御が難しい
信頼性	磁気軸受がフェイルしない	制御フェイル時のバックアップ対策が必要
コスト	インバータは回転制御用の1台だけでよい	トルク発生用と磁気軸受用に複数のインバータが必要
構成	1つのコイルが機能を兼用している	トルク発生用と磁気軸受用のコイルがそれぞれ必要
低速回転時	補助支持機構が必要	回転しない時も非接触となる
電磁力	電磁力が小さい	電磁力の大きさを制御できる

用しているため、図1のように、電機子コイルが2列に並んでいる点を除けば、提案モータは、一般的な永久磁石同期モータと同様の簡単な構成となっている。従って、提案モータはコンパクトなベアリングレスモータとなる。

提案モータが発生する磁気軸受の電磁力は、モータの回転数に依存する。すなわち、高速回転するほど大きな電磁力が得られるが、回転していない時の磁気軸受の力はゼロとなる。そのため、低速回転時に永久磁石ロータを支持する補助機構が必要となる。また、電磁誘導を基本原理としているため、発生できる電磁力もあまり大きくないという短所があり、発生できる電磁力を大きくするためには、永久磁石ロータの表面磁束密度をできる限り大きくする必要がある。表1に以上で述べた長所及び短所をまとめる。

4. 実験

2章で示した原理を確認するために、試作品を製作し、電機子コイルに発生する誘導電圧，誘導電流，電磁力を測定した。

4.1 試作品の仕様

試作品の概要について、以下に説明する。

4.1.1 永久磁石ロータ

永久磁石には、熱減磁に強く、比較的大きな磁束密度

表2 永久磁石ロータの仕様

最大表面磁束密度	0.27 T	
外直径	48 mm	
質量	212.9 g	
材料	永久磁石材料	ネオジム系
	永久磁石の厚み	2.6 mm
	シャフト	S45C
	表面保護リング	GFRP (0.5mm厚)
極数	8極	

特集：浮上式鉄道技術と在来鉄道への応用

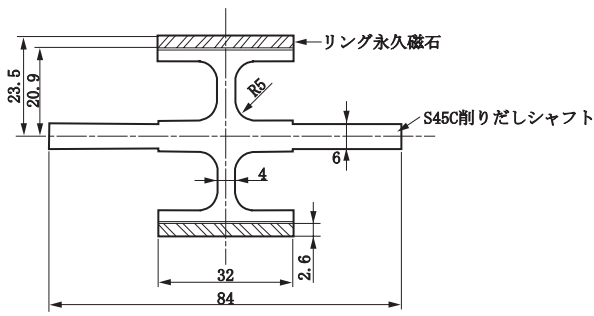


図6 永久磁石ロータの寸法 (単位はmm)

が得られるネオジウム系磁石を選定した。極数は8極であり、最大表面磁束密度は0.27Tである。今回の試験に用いた永久磁石ロータの主な仕様を表2に、外形を図6に、それぞれ示す。

4.1.2 電機子コイル

電機子は12個のコイルを2列に配置する構成とした。

表3 電機子コイルの仕様

電機子全体	形状	円筒
	内径	φ 52mm
	外径	φ 71mm
	長さ	42mm
	単位コイル数	24 個
単位コイル	含浸樹脂	エポキシ樹脂
	断面	4.0mm × 6.6mm
	巻数	100 巻
	使用電線	φ 0.5PEW 銅線 (円形断面)
	電気抵抗	383m Ω (平均値)
	自己インダクタンス	78 μ H (平均値)

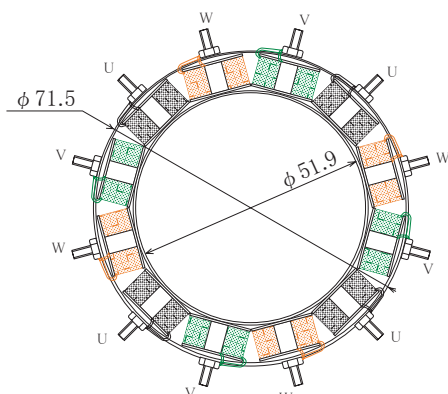


図7 電機子コイルの外形 (単位はmm)

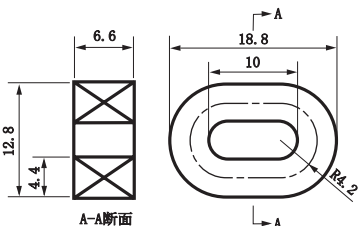


図8 電機子の単位コイルの寸法 (単位はmm)

電機子コイルの主な仕様を表3に、外形を図7に、単位コイルの寸法を図8に示す。

4.2 測定装置

測定装置の構成を図9に示す。今回の試験では、電磁誘導により発生する電磁力を測定することを第一としたため、永久磁石ロータを自ら回転させる構成ではなく、外部モータと永久磁石ロータとロータリーエンコーダを1つの軸で直結して、外部モータにより、永久磁石ロータの回転速度を調整する構成とした。図10のように、電機子コイルは、スライドベアリング上においており、電動シリンダにより、一方向に位置を変更できるようになっている。電機子コイルを支えている台と電動アクチュエータとの間にロードセルを取り付けており、電機子コイル全体に働く、電磁力を測定できるようにしている。

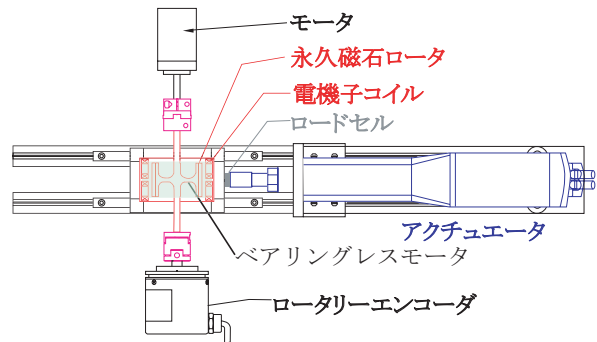


図9 上から見た電磁力測定装置

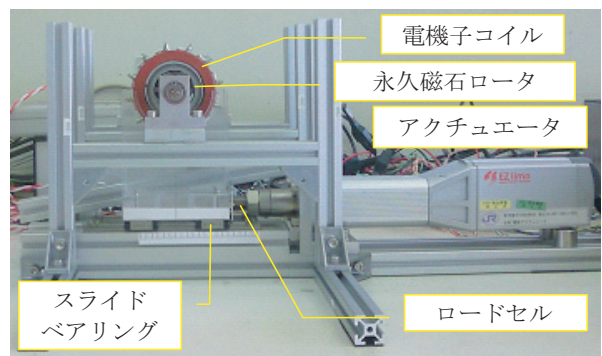


図10 側面から見た電磁力測定装置

4.3 測定結果

4.3.1 誘導電圧

各電機子コイル間の接続をすべて取り外した状態で、永久磁石ロータを1000回転/分の速度で回転させた時に、電機子コイルのそれぞれの単位コイルに発生した誘導電圧を図11及び図12に示す。図11及び図12には、理論的には同じ誘導電圧が発生すると考えられる電機子コイルを、それぞれ橙色と緑色に色分けして示しており、色分けされた電機子コイル毎の平均値を示している。誘導電圧の測定結果と計算結果はよく一致している。

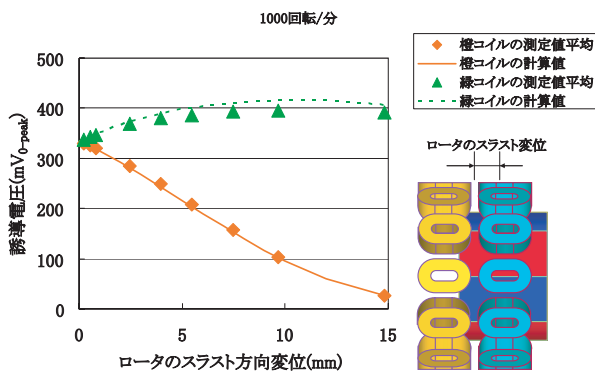


図11 永久磁石ロータのスラスト変位と電機子コイルに発生する誘導電圧との関係

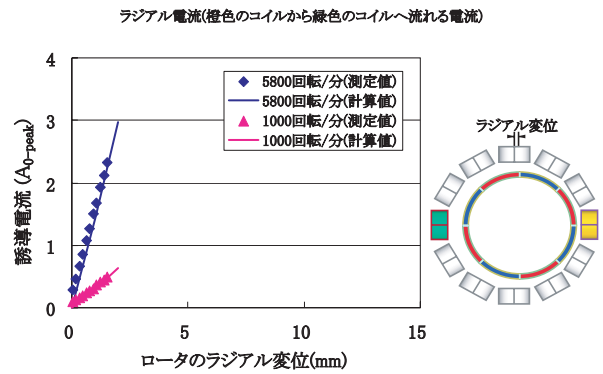


図14 永久磁石ロータのラジアル変位と電機子コイルに誘導される電流との関係

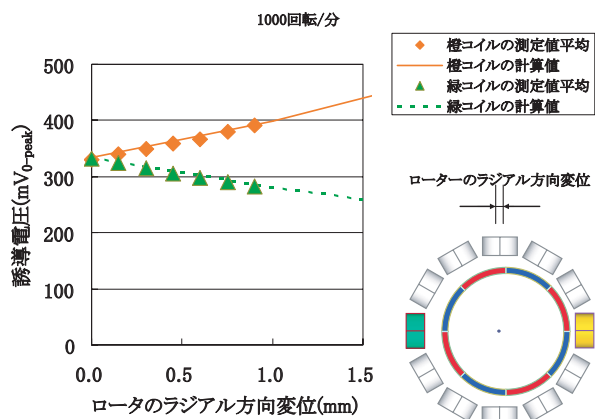


図12 永久磁石ロータのラジアル変位と電機子コイルに発生する誘導電圧との関係

4.3.3 電磁力

電磁力を測定した結果を図15及び図16に示す。今回の測定では、スライドベアリングの摩擦力が、電磁力に対して大きかったため、十分な検証とは言えず、今後、電磁力特性を改善したモータでの電磁力の再評価が必要であるが、平均値ととると、測定結果と計算結果は、ほぼ近い値となった。

4.3.2 誘導電流

電機子の各単位コイル間を接続した状態で、永久磁石ロータを回転した時の誘導電流を図13、図14に示す。図13と図14では誘導電流を測定した8の字回路の電機子コイルを橙色と緑色で示している。測定結果と数値計算結果はよく一致している。

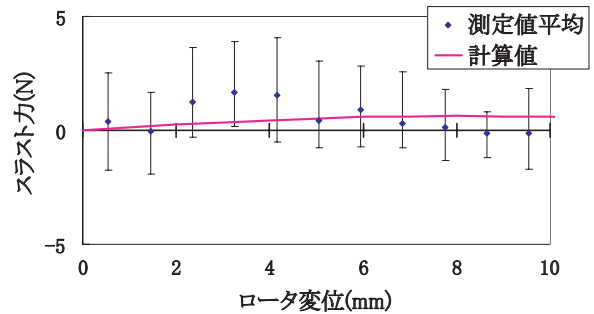


図15 スラスト力測定結果

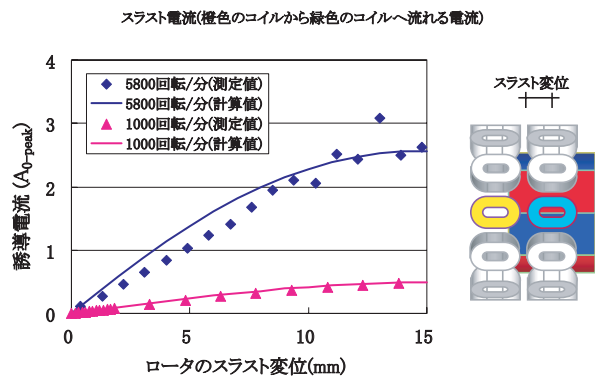


図13 永久磁石ロータのスラスト変位と電機子コイルに誘導される電流との関係

ラジアル力, 5700回転/分

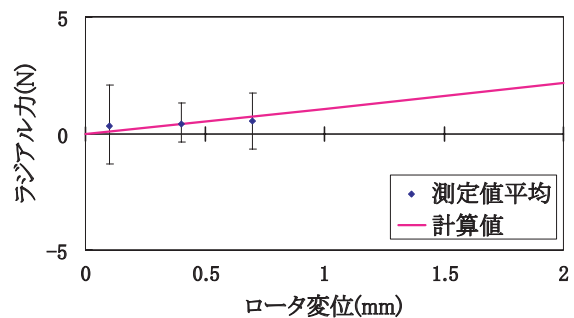


図16 ラジアル力測定結果

5. 考察

今回試作したモータで、あまり大きな電磁力を得られなかった原因としては、①ネオジム系材料の特性を十分に活かさず、永久磁石ロータの表面磁束密度が小さ

特集：浮上式鉄道技術と在来鉄道への応用

表4 改善モータの主な仕様

永久磁石 ロータ	表面磁束密度	0.5T
	極数	8極
電機子 コイル	導体	銅
	占積率	90%

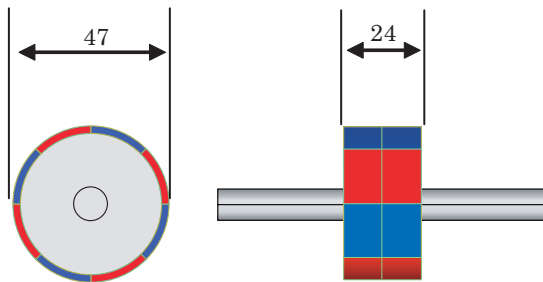


図17 改善モータの永久磁石ロータ寸法（単位 mm）

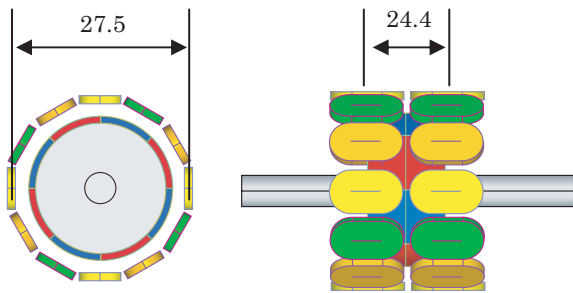


図18 改善モータの電機子寸法（単位 mm）

かったこと、②電機子コイルに丸断面線材を使ったため、電機子コイルの導体占積率を上げられなかったことなどがある。そこで、表4のように、永久磁石ロータの表面磁束密度を0.5T、電機子コイルの導体占積率を90%と仮定し、かつ、ロータ及び電機子コイルの寸法も図17と図18のように変更したモータ（以下、改善モータ）の電磁力を計算した。その結果を図19に示す。この予測によれば、35000回転/分の高速回転において、永久磁石ロータの自重を支えるのに十分な電磁力を発生できるものと考えられる。

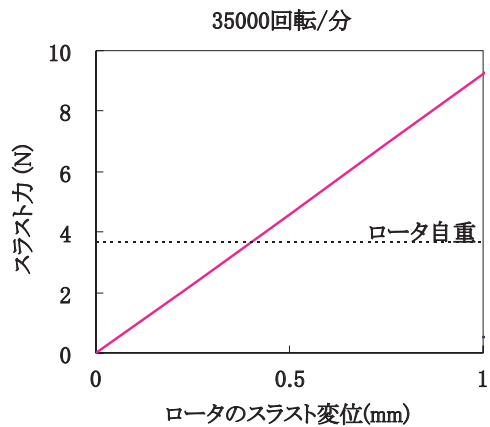


図19 改善モータのスラスト力計算結果

6. まとめ

電磁誘導の原理に基づく受動的な磁気軸受と永久磁石同期モータを組み合わせた新しいベアリングレスモータを提案した。この提案モータは、発生できる電磁力が小さいという欠点があるが、高速回転に適用可能で、信頼性が高く、安価で、コンパクトなベアリングレスモータとなりうる可能性をもっている。電機子コイルの誘導電圧及び誘導電流については、測定結果と計算結果がよく一致することが確認できた。一方、電磁力に関しては、発生できる電磁力が小さすぎたため十分な評価ができなかった。ただし、数値計算結果によれば、本ベアリングレスモータの改善の余地は充分にあり、永久磁石ロータの自重を上回る電磁力が得られる可能性があるものと考えられる。今後、電磁力特性を改善したモータで引き続き検証を続けていく予定である。

文献

- 1) 市川修, 千葉明, 岡宏一, 岡田養二: ベアリングレスモータの試作例と応用機器, 平成15年電気学会全国大会, 5-S19-2, 2003
- 2) 村井敏昭: 推進・浮上・案内を兼用するリニア同期モータの特性, 電気学会論文誌, Vol.114-D, No.7/8, pp.746~752, 1994