

# 卒業論文要旨

## ローレンツ力を用いた磁気浮上モータの浮上回転機構の統合化

### -力とトルクの解析-

#### Integration of horizontal and rotation control mechanism of using Lorentz force -Analyses of force and torque-

知能機械システム工学コース

機械・航空システム研究室 1200132 藤井佑貴

### 1. 緒言

近年、真空中やクリーンルーム等の環境下での作業において、摩擦や塵埃などの問題を解決することのできる磁気浮上機構は分子ターボポンプの軸受けや浮上搬送装置に利用されている。

それらの具体例は電磁石の吸引力等を利用した磁気浮上方法であり、ローレンツ力を利用した磁気浮上機構の使用例は乏しい、しかしローレンツ力を利用した磁気浮上方式では、その他の方式に比べて装置に対して可制御域を広くとれることから、小さい機構においての有用性があると考えられる。

先行研究では、回転子の浮上位置制御、回転制御を行うことができた。しかし、この機構では回転子の鉛直、水平、回転制御にそれぞれ異なる巻線と電磁石を使用しており、機構や制御の複雑であることが課題であった。本研究では、機構、制御の簡素化を図るため、水平と回転の制御を1つの巻線で行う統合化した機構を検討した。本発表では回転制御時に回転子にかかるトルクと水平力の解析を行い、回転制御と浮上位置制御の非干渉化について考察する。

### 2. 磁気浮上モータ

#### 2.1 浮上回転機構の概要

新しく設計した機構を図1に示す。なお、図1中の番号は1-回転子、2-回転・水平制御用電磁石、3-鉛直制御用電磁石、4-浮上用永久磁石、5-水平方向用測定センサ、6-鉛直方向用測定センサを表している。次に回転子の平面図を図2に、コイルと電磁石の位置関係を図3に示す。新機構では水平制御と回転制御を一種類の電磁石から制御するため、コイルを図2中黄線のように八角形に近い星型に巻くことにより1つのコイルで回転と水平制御を可能にしている。

固定子に磁界が発生したときの回転子に発生するローレンツ力を図4に示す。なお、この図は簡略化のためコイルの形状、固定子の配置を変更している。回転子のコイルに垂直に発生したローレンツ力の、回転子の中心を通る線成分を水平制御に用い、その線に垂直な成分を回転制御に用いている。

向かい合う固定子のコイルに図4中に示したローレンツ力と同方向の力を発生させると水平制御、逆方向に力を発生させると回転制御をすることができる。

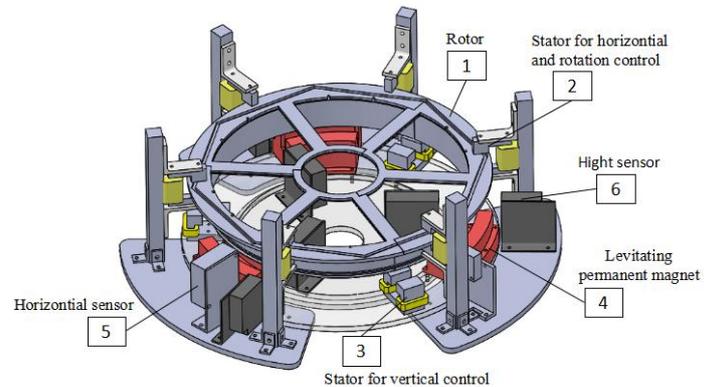


Fig.1 Model for magnetically levitated motor

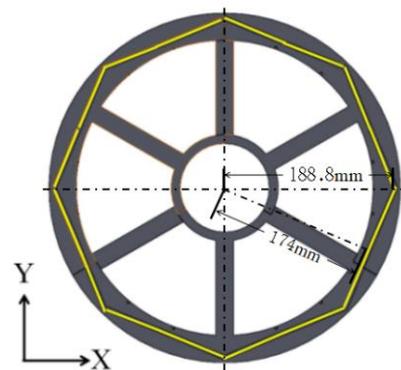


Fig.2 Rotor shape

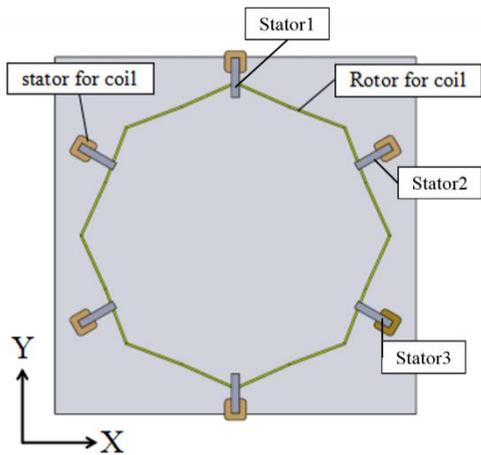


Fig.3 Positional relationship between stator and rotor

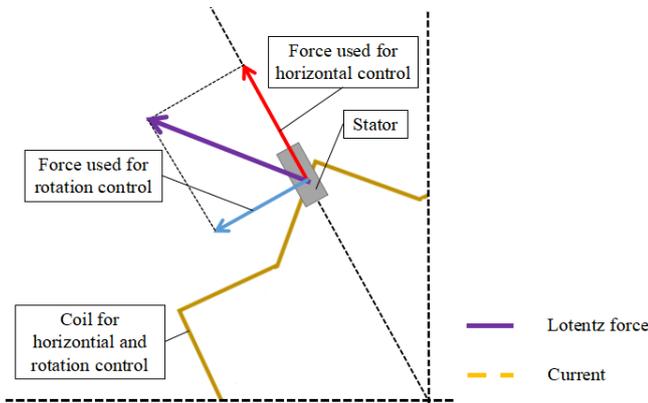


Fig.4 Force generated in coil during control

## 2.2 トルク、水平力の解析

新機構で回転制御が可能か確認するため、3次元有限要素法を用いて回転制御時に回転子にかかるトルクと水平方向のローレンツ力を解析し、安定点の推移と回転時の回転子の中心位置の変化を確認した。安定点とはトルクが正から負に変化する点の事を表しており、回転子は安定点上で回転する。解析には電磁界解析ソフト JMAG を用いた。

解析に使用した機構のモデルは図3のモデルを用いた。回転子のコイルの巻き数は30回巻、固定子の300回巻とし、回転子コイルには1.2[A]の電流を流し、固定子のコイルに最大値3[A]の三角波を流した場合と最大値3[A]の三相交流を流した場合の解析を行った。

固定子のコイルに三角波を流した場合の、回転子にかかるトルク、X方向の水平力をそれぞれ図5、図6に同条件の三相交流を流した時のトルクとX方向の水平力を図7、図8に示す。このX方向は図2、図3に対応している。

まず、回転制御時に回転子に発生するトルクを比較する。図5、図7は横軸が電流の位相、縦軸が回転子の回転角、カラーバーは反時計回りを正とした回転子に発生するトルクを表している。図5、図7より安定点が連続であることから、三角波、三相交流を流すことで連続な回転が可能であ

ることがわかる。しかし、電流の位相に対する安定点の推移の傾きが大きく変化している部分があり、角速度は一定にならない。そのため回転制御時に回転子は、角速度増減しながら回転すると考える。

三角波と三相交流の安定点の推移を比較すると、三角波を流した時のほうがわずかに滑らかになっているので、流す電流の波形は三角波のほうが適していると考えられる。この安定点の推移は周期的に発生している。そのため、流す三角波、三相交流の周期を長くとることによって、この急な安定点の推移が滑らかになり、角速度の変化がおおよそ一定な回転をすることができると考える。

次に、回転制御時に回転子に発生する水平方向の力を比較する。図6、図8は横軸を電流の位相、縦軸を回転子の回転角、カラーバーはX軸方向を正とした回転時に回転子に発生する力を表している。図6、図8より回転制御中に回転子が回転角度45°を一周期として、正負のローレンツ力を受けており、微振動が発生すると考えられる。Y方向にもこの微振動同様に発生すると考える。これにより、回転制御時に回転軸の偏心が発生し、浮上位置が変化するため、水平制御が行われる。回転制御と水平制御は1つの巻き線の電磁石を使用しているため、回転と水平制御の力が干渉し、トルクが失われ回転制御ができなくなる可能性が考えられる。この振動を抑えるため、加える三角波、三相交流の振幅を小さくするという方法がとれるが、その場合回転子にかかるトルクも小さくなり回転が安定しない可能性が考えられる。これらの水平方向の力の変化は回転子の回転角に依存しているため、回転子の回転角度を検出することができれば角度に対応したローレンツ力を発生することで振動を抑制できると考える。

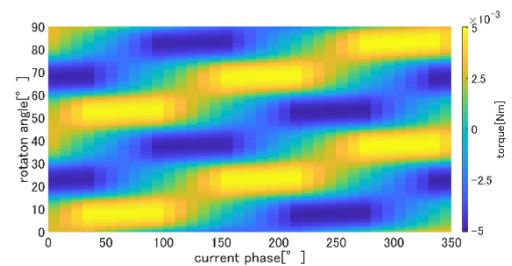


Fig.5 Torque of triangle wave

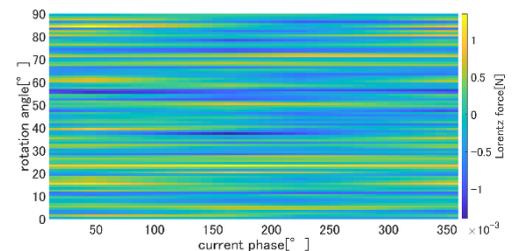


Fig.6 Lorentz force of triangle wave

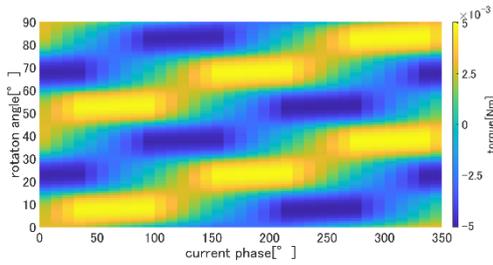


Fig.7 Torque of three phase alternating

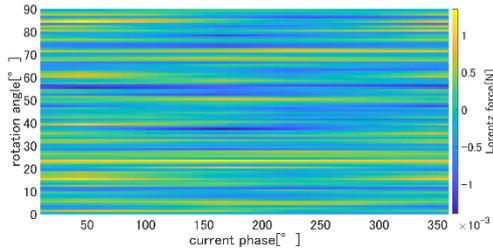


Fig.8 Lorentz force of three phase alternating

次に、以下の数式を用いて最大値 3[A]の三相交流を流した場合でのトルクを計算した。用いた数式を(1)から(5)、諸元を表 1、計算結果のグラフを図 9 に示す。式中にある下付文字は図 3 中の固定子 1, 2, 3 を表している。向かい合う固定子では同値のローレンツ力、トルクが発生しているため、計算は省略している。磁束密度の係数  $b$ 、回転子のコイルに流れる電流  $I$  をともに 1 として計算しているため、図 5、図 7 よりも計算値が大きくなっているため、図 5、図 7 よりも計算値が大きくなっている。

$$F_i = I b i_i \quad (1)$$

$$T_1 = F_i L \sin\{180 - (\theta_1)\} \quad (2)$$

$$T_2 = F_i L \sin\{180 - (\theta_2)\} \quad (3)$$

$$T_3 = F_i L \sin\{180 - (\theta_3)\} \quad (4)$$

$$T = 2T_1 + 2T_2 + 2T_3 \quad (5)$$

Table.1 each variables

Lorentz force generated between each stator[N]	$F_i$ ( $i = 1,2,3$ )
Torque received by rotor[Nm]	$T$
Torque generated between each stator[Nm]	$T_i$ ( $i = 1,2,3$ )
Current flowing through rotor[A]	$I = 1$
Rotation angle[° ]	$\theta$
Distance from rotor center to stator[mm]	$L = 184$
Magnetic flux density coefficient[-]	$b = 1$
Current flowing though each stator[A]	$i_i$

図 9 より、回転角度  $15^\circ$ 、 $30^\circ$  の時にトルクが小さくなり、安定点が不連続になっている事がわかる。これは、先ほど述べた回転角度のときに一部の固定子の磁界と回転子のコイルの角が重なってしまい、周方向に働くローレンツ力が打ち消されてしまい、どの位相でもトルクが発生しないからだと考える。このトルクの打ち消しは回転角度に依存しているので、角と重なる時にその他の固定子に流す電流をあげる等の回転角度に 対応した電流制御を行う事で回避できると考える。また、電流の位相  $100^\circ$  から  $150^\circ$  の時と  $240^\circ$  から  $290^\circ$  間でもトルクの減少が見られるのでその位相での電流値を増減させることで、安定点の推移がよりなめらかになると考える。

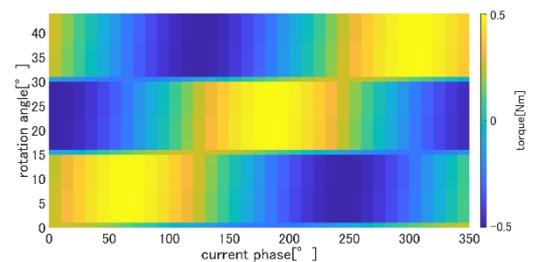


Fig.9 Torque of three phase alternating

### 3. 結言

水平制御、回転制御を統合化した機構を検討し、固定子に電流を加えた場合の回転子にかかるトルク、水平力を解析することによって、この制御方法での回転制御の検証をすることができた。そして、従来の機構を通じて新機構での位置制御の線形化の可能性を示すことができた。

今後は回転制御時に新たに加える電流パターンを検討し、解析によって微振動の抑制の可能性を示していく。

## 文献

(1)小栗佑斗, 岡宏一, 原田明徳 “共鳴型非接触給電を用いた MC 型磁気浮上システム-回転制御機構の開発-” 高知工科大学 機械学会論文集 2019 年 57 巻 909 ページ

(2)伊佐川晃平, 増澤徹 “ローレンツ型磁気浮上人工心臓の研究開発” 茨城大学

<http://www.mech.ibaraki.ac.jp/masuzawa-lab/research/abstract/21isakawa.pdf>