2018（平成 30）年度　　修士学位論文

非接触給電を用いたベアリングレスモータにおける回転制御方法の検討と試作機による検証

Rotation control method of bearing-less motor with non-contact Power supply and Verification of prototype

2019 年 3 月 8 日

高知工科大学大学院　工学研究科基盤工学専攻
知能機械システム工学コース

1215016　　谷井　勲

指導教員　　岡　宏一　原田　明徳

論文要旨

現在，一般的に使用されているモータは，固定子と回転子から構成されており，回転子は主に軸受（ベアリング）によって機械的に支持されている．軸受では接触が生じるために，摩擦，摩耗が生じる．この問題を解決するために，潤滑油などを用いて回転部の接触を防ぐ方法などがとられている．しかし，クリーンルーム内や人工心臓用ポンプなど，クリーンな環境にモータを応用する場合には，潤滑油を使用することができない．そこで，軸受としての機能を磁力によって担う，磁気軸受モータが開発された．これは，回転子を機械的に支持するのではなく，磁力を利用し，非接触で支持するモータである．磁気軸受モータでは，非接触で回転子を支持するために軸受を持つモータに比べ高速・高回転を実現することができる他，摩擦・摩耗の対策を考える必要が生じないため，潤滑油も必要ない．現在，応用例としてはタービンを高速回転させることによって真空状態を作り出す分子ターボポンプ，クリーンな特性などから補助人工心臓などのポンプなどが考えられている[1]．しかし磁気軸受モータは，軸受部と駆動部が分かれて存在するために，軸方向に大型化するというデメリットがある．この問題により，ローターの危険速度が低くなる他，人工心臓用ポンプとして使用できない可能性がる．そこで，考案されたのがベアリングレスモータである．ベアリングレスモータとは磁気軸受機能を磁気的に一体化したモータとして定義されているモータである[2]．つまり，回転運動を行うモータとしての機能と磁気軸受としての機能を同じユニットで行うことができるモータのことである．これまでにもベアリングレスモータは，開発されてきた．しかし，それらはいずれも永久磁石を使用したものであった．永久磁石を使用することによって，外部の磁界によって減磁する問題や使用温度の限界などの問題が考えられる．そこで，本研究では，永久磁石を使用せず電磁石のみによってベアリングレスモータを構成することによって，使用可能な環境を拡大した新しいベアリングレスモータを提案し[3][4]，この新しい方式のベアリングレスモータに関する構成部品の形状や浮上および回転の制御に関する基礎研究を行い，実用化に向けての基礎を築くことを目的とした．

特に，本論では電磁石のみによって構成されたベアリングレスモータの回転制御方法について述べる．本研究で取り扱うベアリングレスモータは先に述べたように，回転子，固定子ともに電磁石のみによって構成されているため，回転子に対して吸引力しか発生せず，回転トルクを発生させることが困難であった．そこで，回転子コイルの巻き数を交互に変更することで，回転子コイルに磁力の差を発生させ，回転を制御することを考えた．そして，新しく回転子を製作し，回転実験を行い回転を実現した．

しかし，今回製作した試作機では，回転子の重量，歯数，全体の直径など，電磁石のみを使用したベアリングレスモータの実用化を目指すために解決すべき課題が多く存在することも分かったため，今後は小型化を目指すとともに，高速高回転を実現するために設計を見直すことが必要である．

目次

第１章　序論　1

1.1　研究背景と目的　1

1.2　ベアリングレスモータとは　2

1.3　非接触給電機構　3

1.4　本研究のベアリングレスモータ　6

第２章　実験装置　7

2.1　試作機の概要　7

2.2　構成部品　8

2.2.1 回転子　8

2.2.2 固定子　8

2.2.3 浮上制御用コントローラ　10

2.2.4 回転制御用コントローラ　11

2.2.5 浮上制御用アンプ　11

2.2.6 回転制御用アンプ　12

2.2.7 透過型レーザーセンサ　12

2.2.8 渦電流センサ　14

2.2.9 安定化電源　15

2.2.10 非接触給電用アンプ　15

2.2.11 発振器　15

2.3　回転子および固定子の歯数　16

2.4　非接触給電機構　17

2.5　センサの設置と計測方法　17

2.5.1 渦電流センサ　17

2.5.2 レーザーセンサ　19

第３章　ベアリングレスモータの制御　22

3.1　制御原理　22

3.2　浮上制御方法　22

3.2.1 制御軸　23

3.2.2 水平位置制御　24

3.2.3 傾き制御　24

3.2.4 高さ制御　24

3.3　回転原理　25

3.4　回転制御方法　25

第４章　実験結果 26
4.1　浮上実験方法 26
4.2　浮上実験結果 26
4.3　回転実験方法 27
4.4　回転実験結果 27
4.5　考察 28

第５章　回転子の特性改善 29
5.1　回転子の問題 29
5.2　回転特性の改善 31
5.3　最適な回転子コイルの巻き数比較 31
5.3.1 安定点 31
5.3.2 浮上力 35
5.5　回転制御電流 36

第６章　新しい回転子を用いた回転実験結果 43
6.1　新しい回転子を用いた浮上実験 43
6.2　回転実験結果 46
6.3　新しい回転電流を用いた回転実験 48

第７章　結論 50
7.1　まとめ 50
7.2　今後の課題 50

謝辞 50

参考文献 51

第１章　序論

1.1　研究背景と目的

現在，一般的に使用されているモータは，固定子と回転子からなり回転子は主に軸受（ベアリング）によって機械的に支持されている．軸受では接触が生じるために，摩擦，摩耗が生じる．この問題を解決するために，潤滑油などを用いて回転部の接触を防ぐ方法などがとられている．しかし，クリーンルーム内や人工心臓用ポンプなど，クリーンな環境にモータを応用する場合には，潤滑油を使用することができない．そこで，軸受としての機能を磁力によって担う，磁気軸受モータが開発された．これは，回転子を機械的に支持するのではなく，磁力を利用し，非接触で支持するモータである．磁気軸受モータでは，非接触で回転子を支持するために軸受を持つモータに比べ高速・高回転を実現することができる他，摩擦・摩耗の対策を考える必要がないため，潤滑油も必要ない．現在，応用例としてはタービンを高速回転させることによって真空状態を作り出す分子ターボポンプ，クリーンな特性などから補助人工心臓などのポンプなどが考えられている．しかし磁気軸受モータは，軸方向に巨大化するというデメリットがある．この問題により，ローターの危険速度が低くなる他，人工心臓用ポンプとして使用できない可能性がる．そこで，考案されたのがベアリングレスモータである．ベアリングレスモータとは磁気軸受機能を磁気的に一体化したモータとして定義されているモータである．つまり，回転運動を行うモータとしての機能と磁気軸受としての機能を同じユニットで行うことができるモータのことである．

これまでにもベアリングレスモータは，開発されてきた．しかし，それらはいずれも永久磁石をしようしたものであった．しかし，外部の磁界によって減磁する問題や使用温度の限界などの問題が考えられる．そこで，本研究では，永久磁石を使用せず電磁石のみによってベアリングレスモータを構成することによって，使用可能な環境を拡大した新しいベアリングレスモータを提案し，この新しい方式のベアリングレスモータに関する構成部品の形状や浮上および回転の制御に関する基礎研究を行い，実用化に向けての基礎を築くことを目的とした．

1.2　ベアリングレスモータとは

先ほども述べたが，ベアリングレスモータとは，磁気的結合により軸受機能とモータ機能を持つモータである．

ベアリングレスモータには，その方式によって様々なものがある[6]．

a)　誘導機型ベアリングレスモータ
b)　永久磁石型ベアリングレスモータ
c)　同期リラクタンス型ベアリングレスモータ
d)　ホモポーラ型・コンクシエント型ベアリングレスモータ

a)　誘導機型ベアリングレスモータ

誘導機とは，固定子巻線に三相交流電流を流すことにより，回転磁界を発生させることで，回転子巻き線に誘導電流が流れ回転子がトルクを発生して回転するモータのことである．世界中で最も多用されているモータであり，50Hz，または 60Hz などの商用電源に直接接続して運転することも可能であり，安価に動力を得る事ができるなどのメリットがある．その誘導機の原理を応用しベアリングレスモータ化している．

b)　永久磁石型ベアリングレスモータ

永久磁石型ベアリングレスモータは永久磁石の界磁磁束に支持磁束を重畳し，ギャップ磁束密度を不平衡にすることで磁気支持力を発生するために，単位電流当たりの支持力が大きく，効率的であるなどのメリットがある．

c)　同期リラクタンス型ベアリングレスモータ

リラクタンスモータとは，回転子には永久磁石やコイルなどを使用せず，強磁性のコアのみを持つモータのことである．巻き線や永久磁石を使用しないために安価で堅牢であるという特徴があり，高温・極低温環境下でのアプリケーションなどに使用することができる．

d) ホモポーラ型・コンクシエント型ベアリングレスモータ

永久磁石型モータでは，支持電流を制御する際に，回転角を計測し支持電流を流す必要があるため支持電流が必然的に交流となる問題があった．しかし，ホモポーラ型では，回転角を計測せずに，2 極の直収磁界で支持力を制御できる．つまり磁気支持制御に回転角度情報が不要な方式である．

1.3　非接触給電機構

近年，ワイヤレスでの電力伝送とその充電に関心が高まっている．非接触給電により電源コードを使わず，無線で電力を伝送することができれば，配線や充電端子をなくすことができるため，機器を防水・防塵対応にしやすく，接触不良による故障のリスクを低減できるというメリットがあるので，様々なものが実用化・製品化されている．

非接触による給電方法として，電磁誘導方式，磁界共鳴方式，電界共鳴方式，電波方式が，さかんに研究されている（表 1.1）．以下のような特徴がある．

Table 1.1　Type of non-contact power supply method [7]

	電磁誘導方式	磁界共鳴方式	電界結合方式	電波受信方式
送電できる距離	数 mm～10cm 程度	数 cm～数 m	数 mm～数 cm	数十 cm～数 m
送電できる電力	数 W～数 kW	数 W～数 kW	数 W～数百 W	1W 以下
電力の利用効率	70～90%	40～60%	60～90%	かなり低い
使用する周波数	10kHz～数百 kHz	数百 kHz～数十 MHz	数百 kHz～数十 MHz	中波～マイクロ波
取り組んでいる企業	三洋電機，セイコー， エプソン，昭和飛行機工業など多数	Qualcomm 社， ソニー， WiTricity 社など	竹中工務店， 村田製作所など	Intel 社， 日本電業工作， Powercast 社

(1) 電磁誘導方式

電磁誘導方式では，対向させたコイル間で磁界による誘導電流で電力送電する方式である．表 1.1 より，伝送距離は短いが近距離において高効率な電力伝送が可能である．ケータイを置くだけで充電する「おくだけ充電」や電動歯ブラシ電気シェーバーの充電等に応用されており，実用化に向けて最も進んでいる方式である．

しかし，図 1.1 のように電磁誘導方式の非接触給電は，空隙のある変圧器のようなものであるため，空隙が大きいと漏れ磁束が増え伝送効率が低下してしまう．また，位置ずれによる効率の低下などの問題がある．

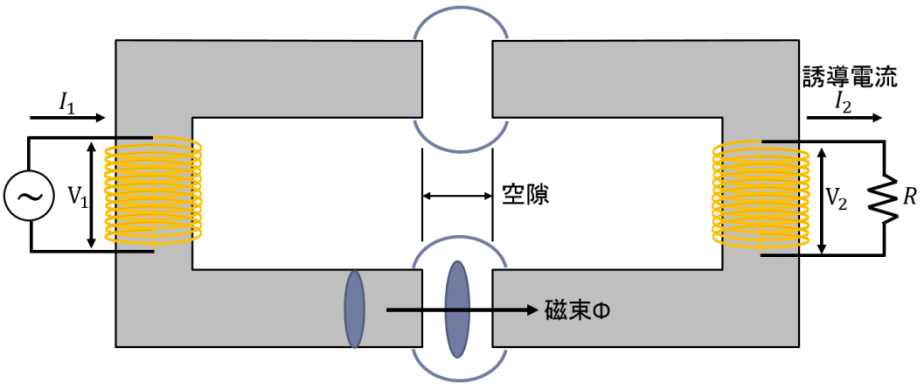

Fig. 1.1　Electromagnetic induction

(2) 磁界共鳴方式

磁界共鳴方式とは，原理は電磁誘導と同じであるが，共鳴現象を利用して空間距離を離して送電する方式である．

2006 年 MIT の研究者が提唱し，2007 年に MIT の研究チームは直径 60cm のコイルを約 2 メートルの距離で配置し，60W の白熱電球を点灯させることに成功したことで有名である．

共鳴とは，音叉 A をたたくと音叉 B が鳴る現象と同じである(図 1.2)．音波は空気の疎密波で，圧力が高いところと低いところが交互に入れ替わりながら伝わっていき， 叉 B に音波が到達すると，音叉 B を押したり引いたりする．このとき音叉 B の固有振動数と同じ周期で押したり引いたりすると，音叉 B の振動がどんどん大きくなる．これが共鳴である．音叉 A と音叉 B の固有振動数が同じときだけ共鳴が起こる．

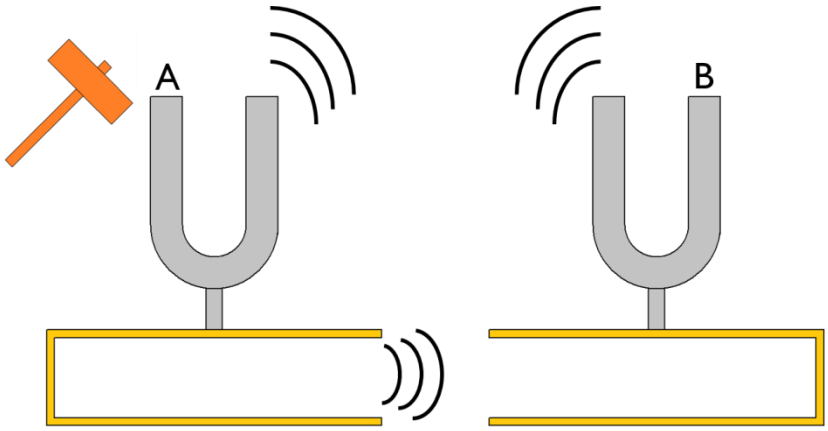

Fig. 1.2　Tuning fork.

これを電気回路に置き換えると図 1.3 のようになる．同じ共振周波数をもつ二つの共振回路において，給電側を共振周波数で駆動させると強い電磁界が生じる．その電磁界の中に受電側の共振回路を置くと，磁界結合と電界結合が同時に起こり共振器に振動電流が流れ，共振が起こり効率よくエネルギーが伝わっていく．この方式を磁界共鳴方式という．

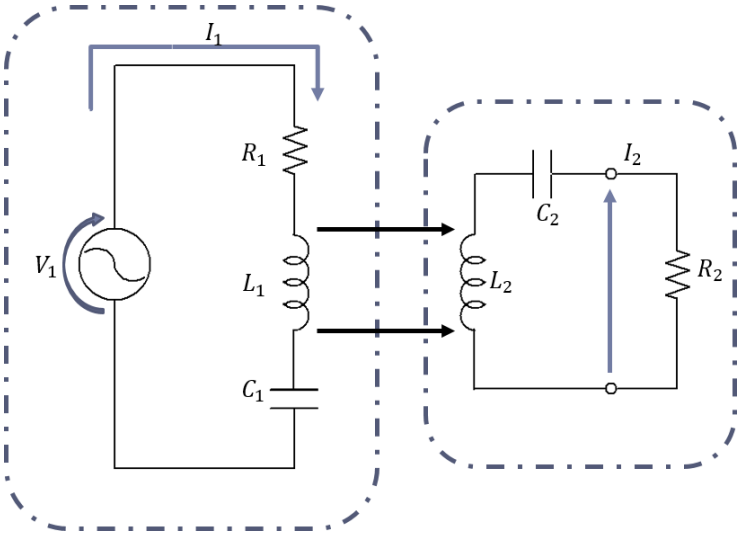

Fig. 1.3　Resonance of electro circuit

等価回路上は，電磁誘導と磁界共鳴は酷似している．現実のトランスでも，コンデンサを付加すること力率を改善する対策が取られており，コンデンサを回路のどこに加えるかについては多くの選択肢があり，直列コンデンサを両側に配置する方式も存在する．これは磁界共鳴の等価回路と基本的に同じである．共鳴を重視するかどうかという点が一番の違いである．

磁界共鳴方式は，位置合わせの自由度の高さ，特に送電コイルに対して垂直方向（Z 方向）の自由度の高さが最大の特徴であり，電気自動車へのワイヤレス給電にも注目されている．

(3) 電界結合方式

電解結合方式とは平面電極を対向させて容量結合により電力送電する方式である．

電解結合方式の特徴には，次の三つがある．①充電時のフリーポジションが実現できること．②電極が薄いこと．③電極部の温度上昇がないこと．電解結合方式の他の方式と大きく異なる点は電圧の推移である．

例えば，村田製作所が開発した電界結合方式のタブレット向けワイヤレス充電装置は，入力電圧が 5V の AC アダプターで送電モジュールに電力を供給する場合，まず増幅器で少し電圧を持ち上げてから，昇圧回路で一気に 1.5kV 程度まで高める．その電圧で電力を伝送した後は，実際に使う直流電圧まで降圧回路や整流回路で変換する．

電解結合方式は，水平方向の自由度が高いというメリットがあるが，高電圧を使用するため，安全対策が必須となる．

(4) 電波方式

電波方式とは，アンテナで受信した電波を電力として取り出す方式であり，マイクロ波送電とレーザ送電がある．マイクロ波送電は，レーザと比べ安全性を確保しやすく，宇宙空間において太陽光での発電を行い，その電力をマイクロ波に変換してエネルギーとして地球へ伝送する宇宙太陽発電や電気自動車への非接触充電，遠隔地・離島への無線電力伝送など注目されている．しかし，現在は他の非接触給電方式に比べ伝送効率が低い．

1.4　本研究のベアリングレスモータ

先に述べたように，これまでに開発されてきたいずれの種類のベアリングレスモータはいずれも回転子・固定子のいずれかに永久磁石を使用していた．永久磁石を使用することによって，小型ながらも強力な支持力やトルクを得ることができるというメリットがあるが[7]，永久磁石には経年劣化や外部の磁界による減磁などのデメリット，また高温環境下では使用できないなどの問題が内在する．そこで，本研究では，永久磁石を一切使用せず，電磁石のみによって使用可能な環境を拡大した新たなベアリングレスモータを提案した．本研究で取り扱うベアリングレスモータの概要図を図 1.4 に示す．本研究で取り扱うベアリングレスモータの種類としては，ホモポーラ型であり回転機能としてはステッピングモータ型である．

永久磁石を使用しないため，回転子，固定子ともに電磁石によって構成している．回転子を電磁石によって構成するために回転子に対して電力を給電する必要があるために，電磁誘導方式をもちいて非接触にて回転子に電力を給電している．

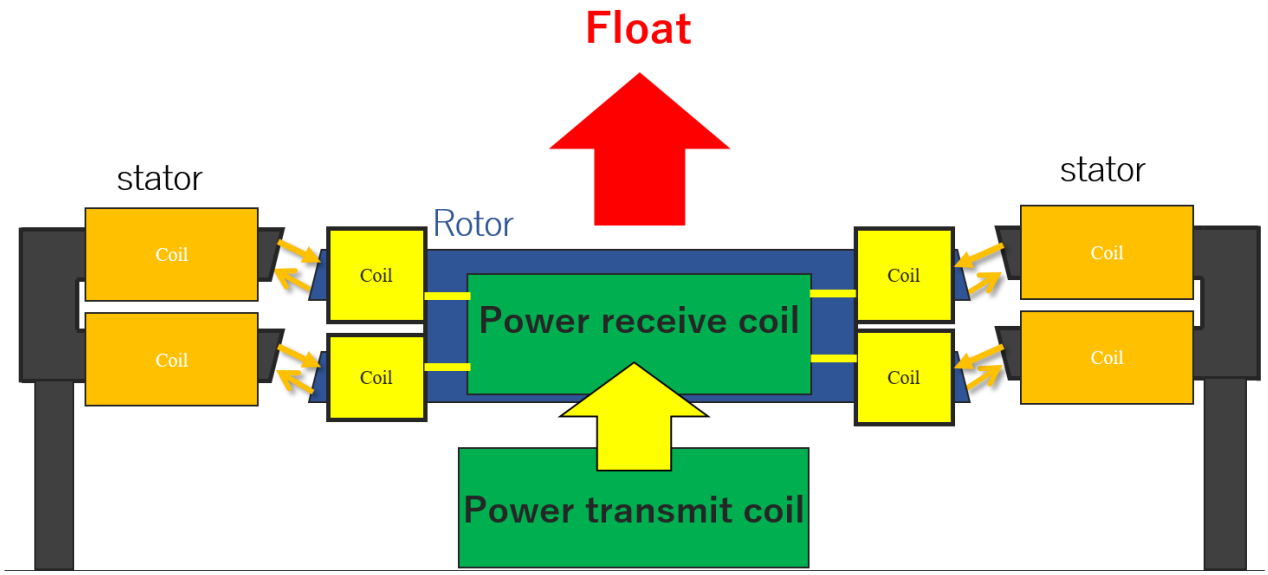

Fig.1.4 The schematic view of bearing-less motor

第２章　実験装置

2.1　試作機の概要

試作した，ベアリングレスモータの全体図を図 2.1 に示す．本研究で提案するベアリングレスモータは，内側にローターを有するインナーロータ型のベアリングレスモータである．ローター，ステータともに電磁石によって構成するために，ローター中心部に非接触給電機構を取り付け，一定電流が回転子コイルに流れる構造になっている．ローターは能動的に制御を行う必要性があるため，固定子コイルに流れる電流を制御することによって，ローターの浮上・回転を行っている．また，このローターの姿勢を正確に計測するために，透過型レーザーセンサを用いて回転子の X 軸，Y 軸方向の変位を計測し，回転子の X 軸，Y 軸回りの傾きと鉛直軸方向の高さを計測するために渦電流センサを 3 個使用している．

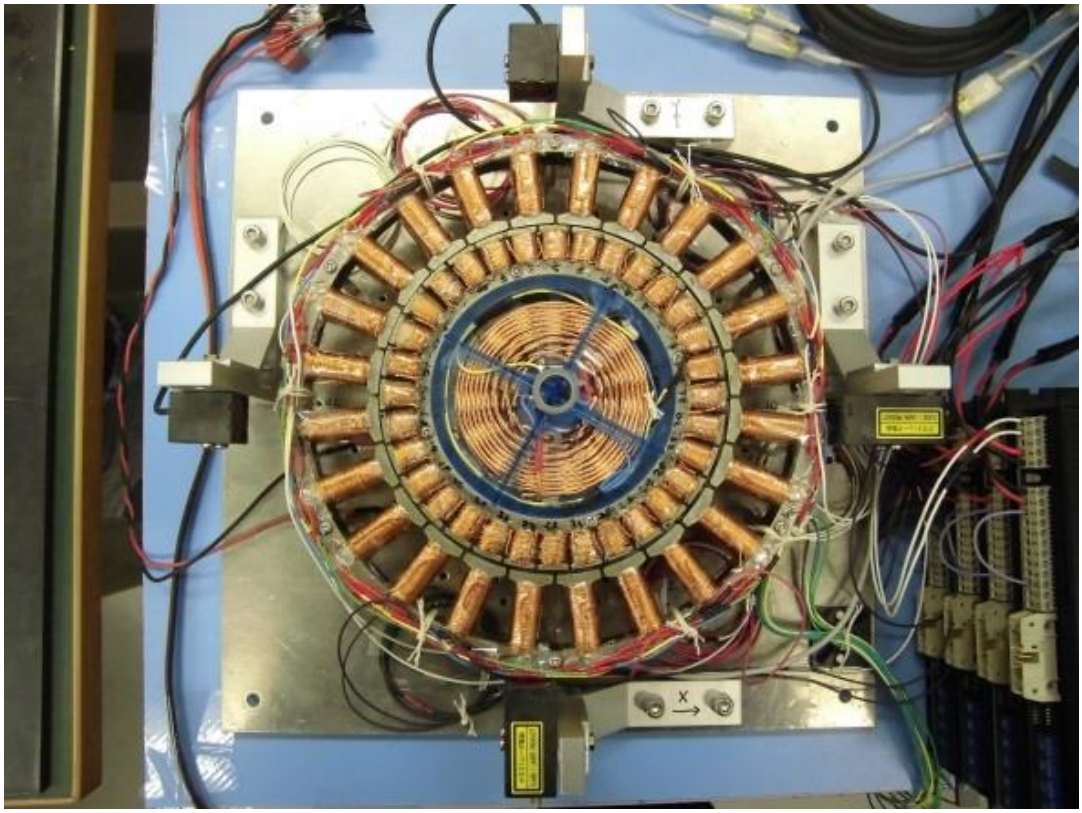

Fig. 2.1 The over view of bearing-less motor

ベアリングレスモータの側面図を図 2.2 に示す．本研究で取り扱うベアリングレスモータの歯は少ない電流で大きなトルクやコギングトルクを小さくするなどの目的から２層構造になっており，ラジアル方向には同一磁極を持ち，アキシャル方向には異なる磁極を持つホモポーラ型である．回転子内部に受電用コイル，回転子直下に送電用コイルを設置し，非接触給電を行うことで，回転子に電力を給電している．

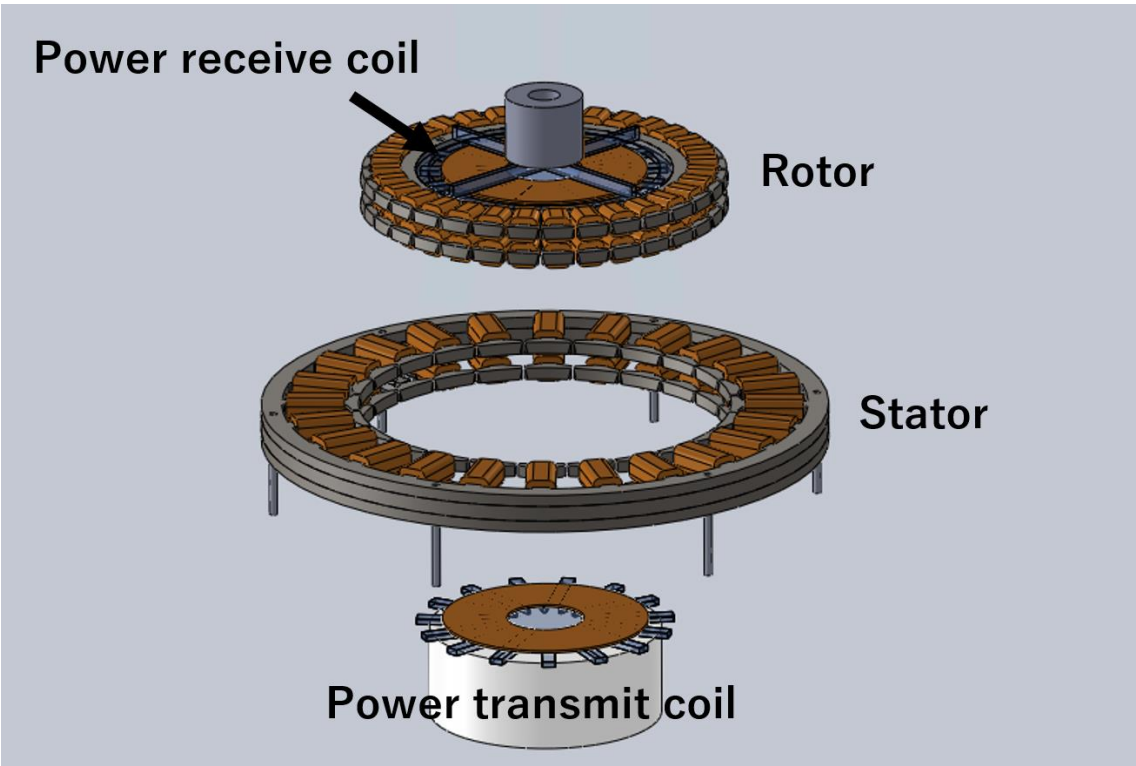

Fig. 2.2 The schematic view of bearing-less motor

2.2 構成部品

2.2.1 回転子

ベアリングレスモータの回転子を図 2.3 示す．回転子は軸方向に２層構造であり，歯数は 32 としている．歯先端のテーパは 7.2° である．コイルはφ4.5mm を使用し，それぞれ 100 回巻である．回転子内部には受電用コイルがあるが,これはφ0.3mm 7 本撚りのリッツ線をコアにスパイラル巻きで約 60 回(84[μH])巻いている．

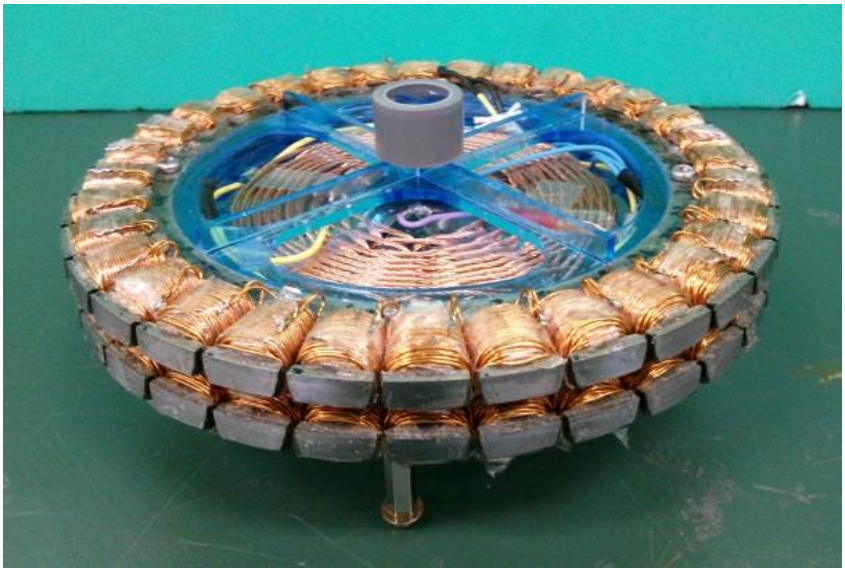

Fig. 2.3 Rotor

Table. 2.1 Specification of rotor

Material	SS 400
Teeth number	32×2
Winding number of coil	100
Mass	772 g
Outside diameter	142 mm
Inside diameter	100 mm
Suction force coefficient	2.56 $Nmm^2/A2$
Bias current	1.2 A
Air gap	1 mm
Taper angle of teeth edge	7.6 degree

2.2.2 固定子

ステータを図 2.4 に示す．固定子も回転子同様に鉛直軸方向に 2 層構造であり，歯数は 24，歯先端のテーパは 7.2°である．コイルはφ5mm のものを使用し，浮上制御用のコイルと回転制御用のコイルの二種類を交互に巻いている．

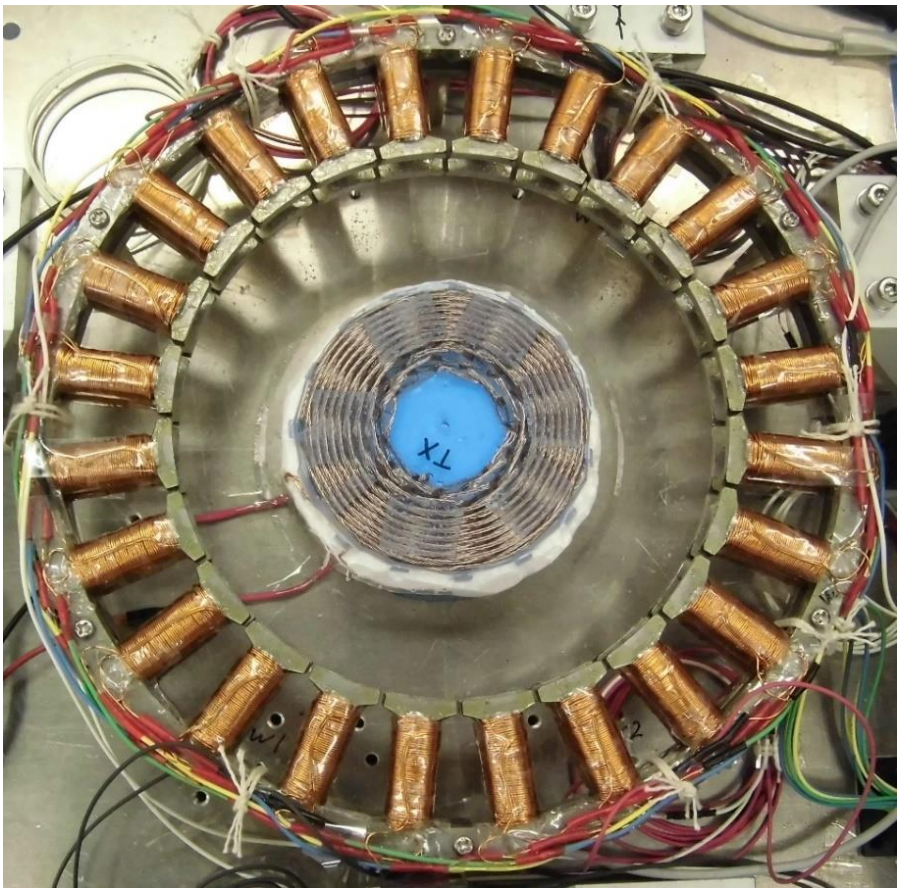

Fig. 2.4 Stator

Table.2.2 The specification of stator

Material	SS 400
Teeth number	24×2
Winding number of coil	100＋100
Mass	―
Outside diameter	220 mm
Inside diameter	100 mm
Suction force coefficient	2.56 $Nmm^2/A2$
Air gap	1 mm
Taper angle of teeth edge	7.6 degree

2.2.3 浮上制御用コントローラ

コントローラには，固定子コイルの電流を上層と下層で個々に制御するために，エムティティ株式会社製の sBOXⅡを２台使用している．サンプリング周波数は 1kHz である．

Fig. 2.5 sBOXⅡ

1. **回転制御用コントローラ**

回転制御用コントローラとして，PC(Personal Computer)を使用する．コントローラと信号の入出力には d-SPACE 社製の Signal R&D Controller Board (D.S.P Board) DS1104 を使用する．コントローラー上での計算や，プログラミングについては，Matlab(2007b)を用いた．

Fig. 2.6 DS1104

2. **浮上制御用アンプ**

回転子の浮上制御用のアンプとして，MAXON 社製のモータコントローラ ADS50/10,ADS50/5 ,EPOS2 を電流制御モードにして使用した．

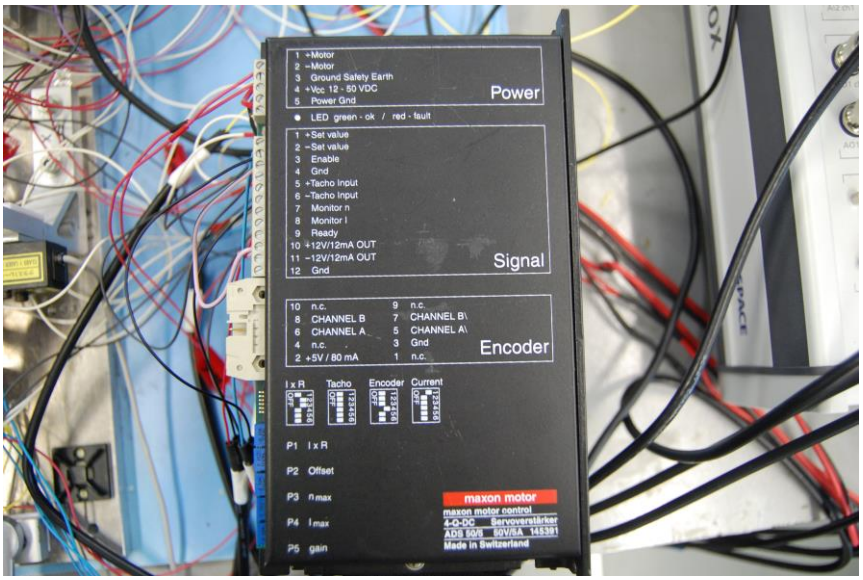

Fig. 2.7 ADS50/5

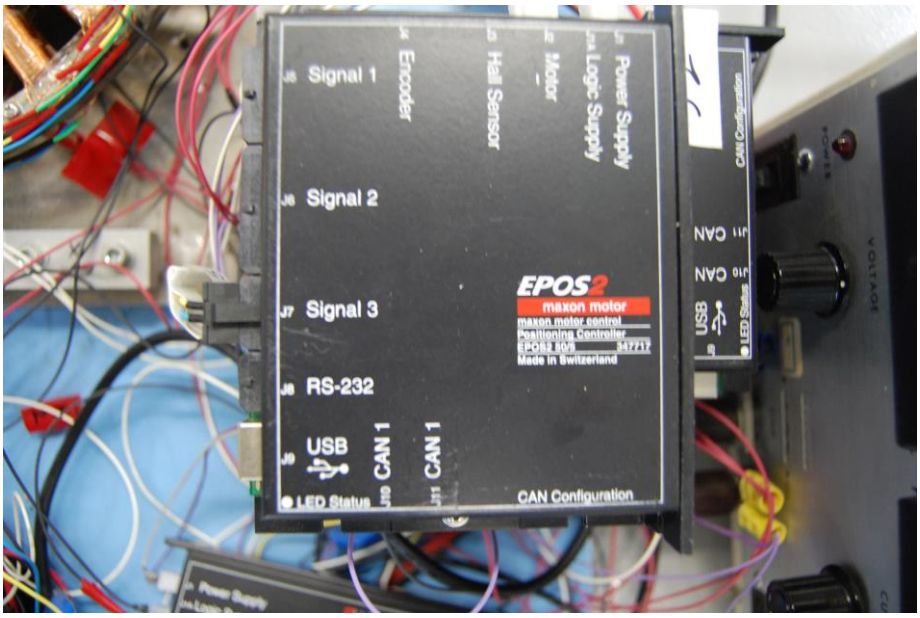

Fig. 2.8 EPOS2

3. 回転制御用アンプ

株式会社高砂製作所製の多機能４現象バイポーラ電源 BPS120-5 を使用した.

Fig. 2.9 BPS-120-5

4. 透過型レーザーセンサ

回転子の水平位置を計測するために，オムロン株式会社製透過型レーザーセンサを用いた．センサヘッドは ZX-LT10，アンプユニットは ZX-LDA11-N を使用した．センサターゲットはアルミ製である．

Table.2.3 Specification of laser sensor

型番	センサヘッド部（透過型）	ZX-LT010（透過型）
	アンプユニット部	ZX-LDA11-N
電源電圧		DC12V～24V±10％
消費電流	センサヘッド部（透過型）	電源電圧 12Ｖ時，消費電流 60mA 以下
	アンプユニット部	電源電圧 24Ｖ時，消費電流 140mA 以下
検出距離		0～500mm
検出幅		10mm
最小検出物体		Φ0.1mm　不透明体
質量		約 220g
分解能		4μm　※平均回数 2 回
測定周期		150μs
設定可能平均回数		1/2/4/8/16/32/64/128/256/512/1024/2048/4096 回

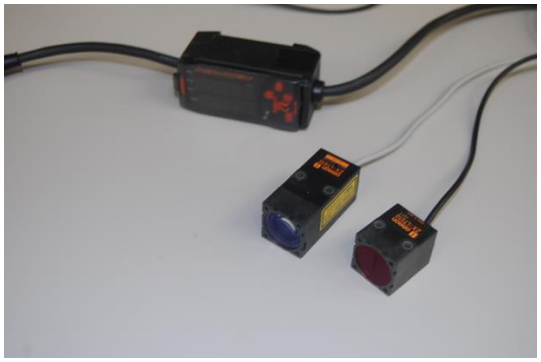

Fig. 2.10 Laser sensor

5. 渦電流センサ

回転子の水平軸回りの回転，鉛直軸方向の高さを計測するために渦電流センサを３つ使用した．渦電流センサ用のアンプとして，Shinkowa Electronic 社製 MODEL9083-018 を使用した．

Fig. 2.11 Eddy current sensor head

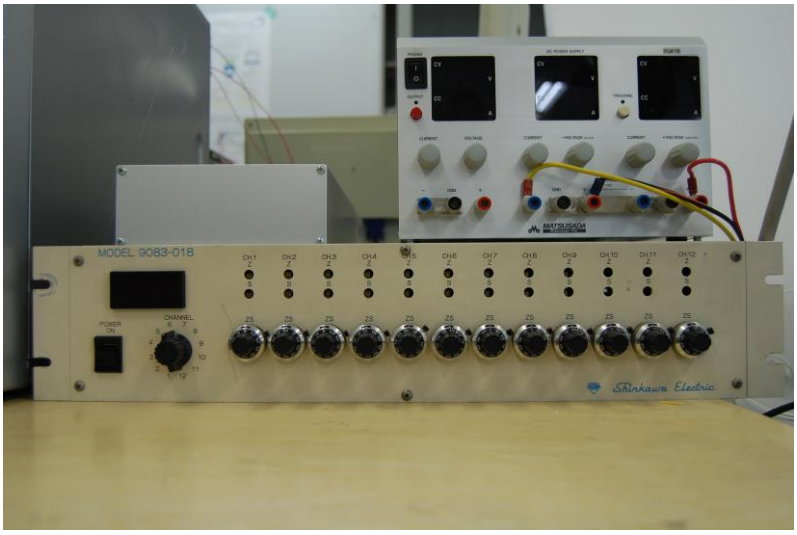

Fig. 2.12 Eddy currentse sensor amplifer

6. 安定化電源

浮上制御用，回転制御用のアンプを使用するために Metronix 社製 MSV70A-10 を使用した．

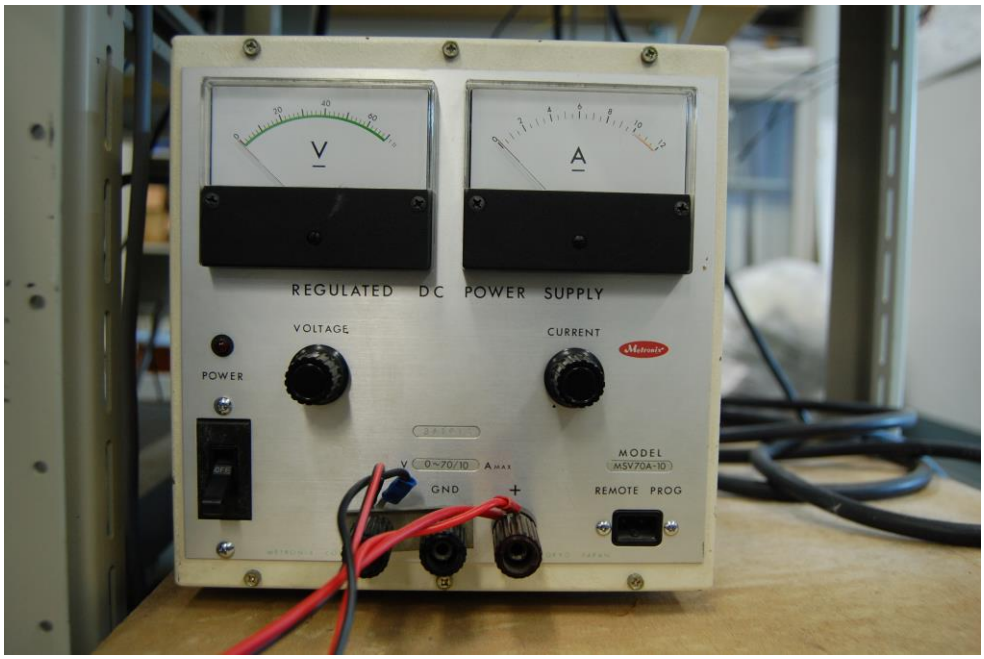

Fig. 2.13 Power supply

7. 非接触給電用パワーアンプ

株式会社高砂製作所製の多機能４現象バイポーラ電源 BPS120-5 を使用した．

8. 発振器

発振器には，株式会社エヌエフ回路設計ブロック社製の E-1011 を使用する．

Fig. 2.14 E-1011

2.3 回転子および固定子の歯数

回転子および固定子の比率を求めることから，回転子と固定子の歯数を決定した．現在汎用インバーターや回転制御 IC の主力は 3 相での制御である．このことから制御相数を 3 相と決定すれば，歯数は回転子と固定子の歯数の比率は 2:3 もしくは 3:4 とすることになる．また，2.4 節で述べるが，回転子の位置制御を３軸で行うためには，固定子の歯数は 12,18,24,30 など 6×n から選ぶことになる．この条件の中で，回転子コイル 1 個あたりの巻き数を 100 回，電流を 1[A]程度とすることを考えると，回転子コイルの巻き数が多いほうが回転子の磁力を高めることができるため，固定子と回転子の歯数の比率を 3:4 と定め，歯数を 24：32 と決定した．

固定子コイルには，浮上位置制御用コイルと回転制御用コイルの２種類のコイルが図 2.15 のように巻かれている

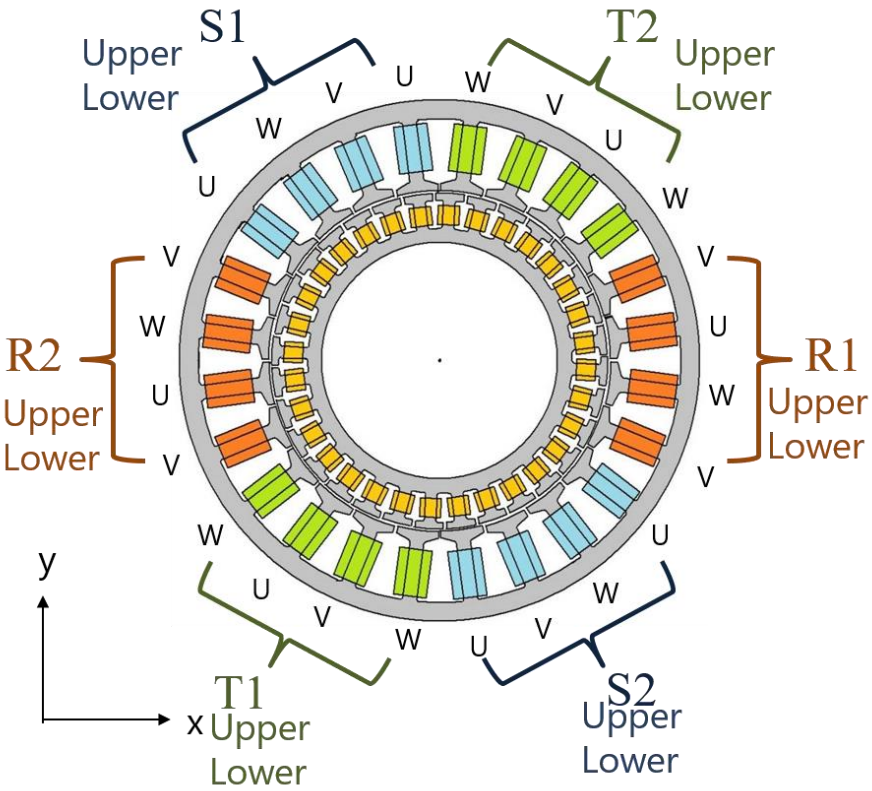

Fig.2.15 Winding of stator

浮上位置制御用のコイルは R・S・T の３軸となるように配置されている．R1,R2,S1,S2,T1,T2 はそれぞれ直列に接続されているため，浮上位置制御はそれぞれに場がれる電流を調節することによって制御する．上下層で別々に制御を行うために，12 個のアンプを用いて制御することになる．

回転制御用コイルには，U,V,W のような３相のステッピングモータと同様な巻き方をしている．

2.4 非接触給電機構

今回，非接触給電方法として電磁誘導方式を用いた．電磁誘導方式とは対向させたコイル間で磁界による誘導電流で電力を送電する方式である．伝送距離は短いが，近距離においては効率的な電力伝送が可能である．本研究では，発振器を使用して送電側のコイルを駆動し，コイル間で起こる電磁誘導現象を用いて受電側に電力を給電する方法を用いた．受電側に流れた電流は，ブリッジダイオードを用いて整流されることで，回転子コイルに流れる電流を制限し，回転子全体の磁極を固定している．

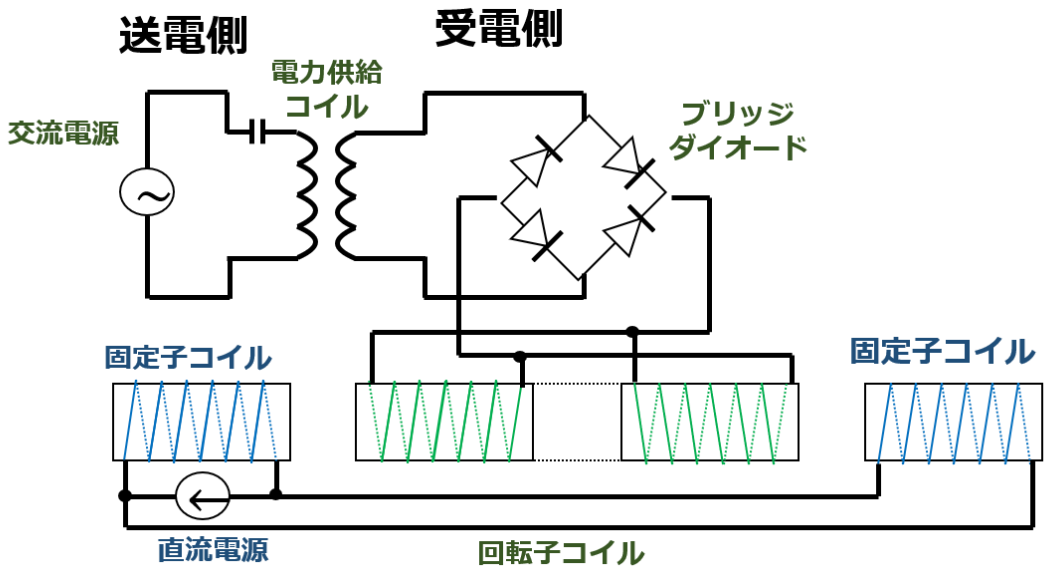

Fig. 2.16 Non-contact power supply

2.5 センサの設置と計測方法

回転子の正確な位置，姿勢を判断するために，レーザーセンサと渦電流センサを用いることを考えた．

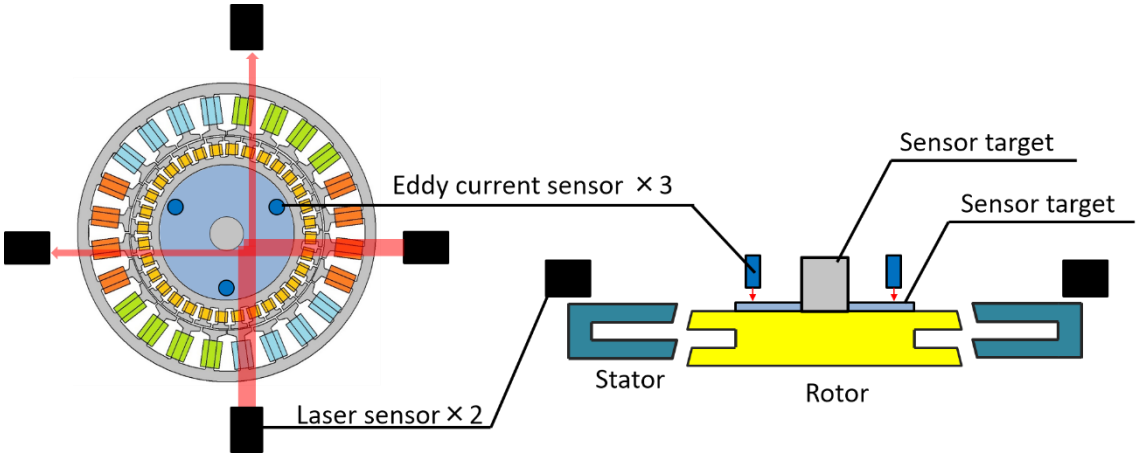

Fig.2.17 Sensor position

1. 渦電流センサ

回転子の鉛直軸方向ならびに，X 軸，Y 軸回りの回転を検出するために，回転子上部に渦電流センサを 3 個設置した．センサターゲットは，3D プリンタを用いて，回転子上部に基台をつくり，その上に 0.1mm のステンレス薄板を接着剤によって張り付けている．渦電流センサは，センサヘッド内で高周波電流を流し，

高周波磁界を発生，電磁誘導作用によって対象物表面に磁束の通過と垂直方向の渦電流が流れ，センサコイルのインピーダンスが変化することによって対象物との距離を計測している．そのため，透磁率の高い金属を使用すると渦電流センサ同士が干渉しあう可能性があるため，ステンレス薄板を使用している．

それぞれの渦電流センサで計測した距離から，回転子の姿勢への変換は次式を使用して，DSP ボード内で処理をしている．

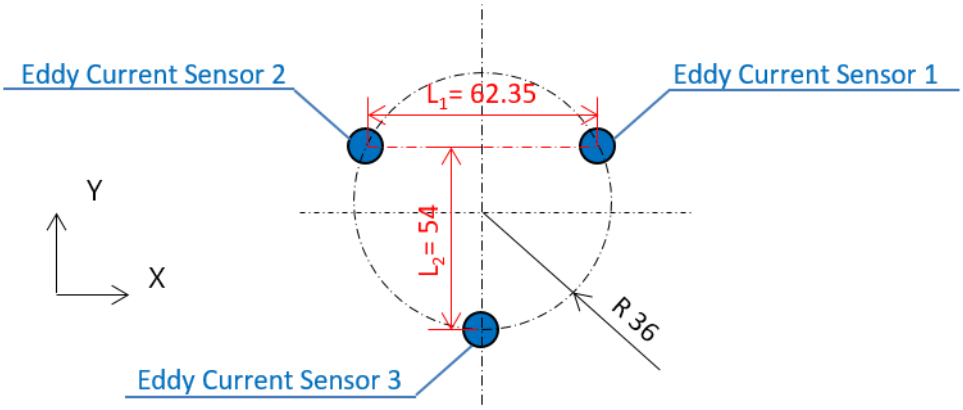

Fig. 2. 18 Position of eddy current sensor

$$\theta_X = \frac{\frac{d_1+d_2}{2}-d_3}{l_2} \tag{2.1}$$

$$\theta_Y = \frac{d_2-d_1}{l_1} \tag{2.2}$$

$$z = \frac{d_1+d_2+d_3}{3} - x\tan\theta_Y + y\tan\theta_X + Z_0 \tag{2.3}$$

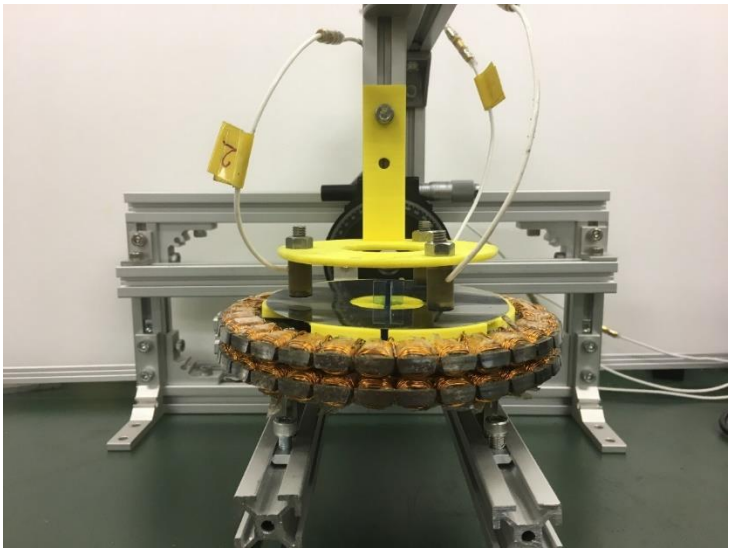

Fig. 2. 19 Examination of eddy current sensors

以上の式を用いて，回転子の X 軸回り，Y 軸回りの回転を正確に計測することができることを確かめるため，回転子を測定用分度器に取り付け，1°ずつ回転子を回転させながら，渦電流センサを用いて計測した結果を図 2. 21 に示す．X 軸，Y 軸において正確な値が算出されていることがわかる．誤差は最大で 0. 2 度であった．いずれの場合でも，回転を与えない方向で±0. 1 度，Z 軸方向に対して±0. 1mm 程度の誤差が確

認できた．この誤差は，渦電流センサは測定物に対して垂直に取り付けなければいけないが，回転子に傾きが生じた場合，渦電流センサと回転子上部に取り付けたセンサータゲットの関係は垂直ではなくなってしまう．そのため，各渦電流センサで計測した距離に誤差が生じ，結果的に角度を算出する際にも誤差が生じているのではないかと考えられる．

しかし，実際に使用する±1.5 度の範囲では誤差は 0.08 度以内となることが確認されたため、精度は十分であると考えた．

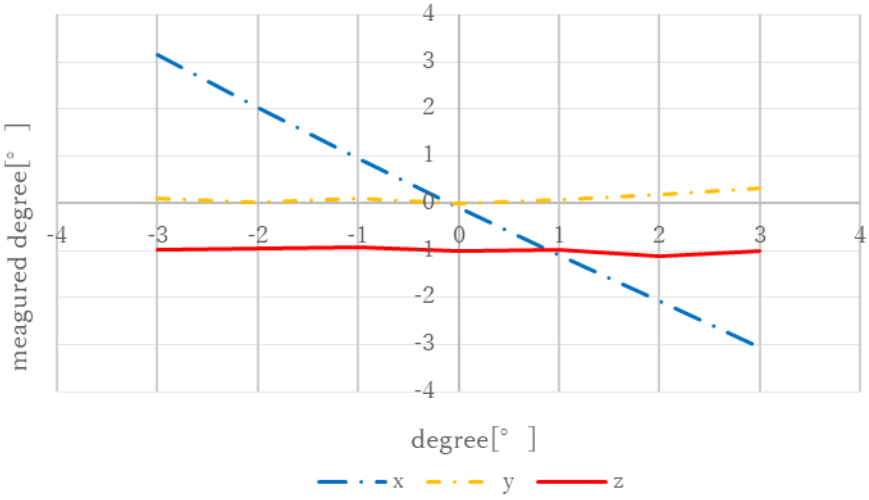

Fig.2.20 Result of sensor experiment

2. レーザーセンサ

回転子上部に設けた筒状のアルミ製のセンサターゲットの位置を読み取ることによって，回転子の水平位置を計測する．用いたレーザセンサは透過型であるため，センサターゲットによってレーザーが遮られ，光量が減少，または増加することによって X 軸方向，Y 軸方向の変位を計測することができる．

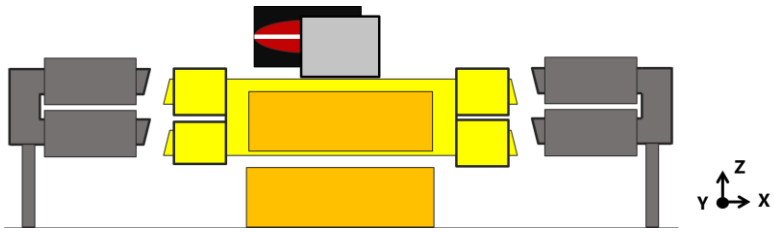

Fig.2.21 Method of leazer mesurement

しかし，レーザーセンサでは，受光部が受け取る光量によって，水平位置を計測しているが，回転子が傾いた際にも受光量が減り，正しい回転子の位置を計測できない可能性があることが考えられた．そこで，レーザーセンサ用のセンサターゲットを図 2.22 のように測定用分度器に取り付け，傾きを与えることで，水平位置の計測にどれほどの誤差を与えるのかを調べた．

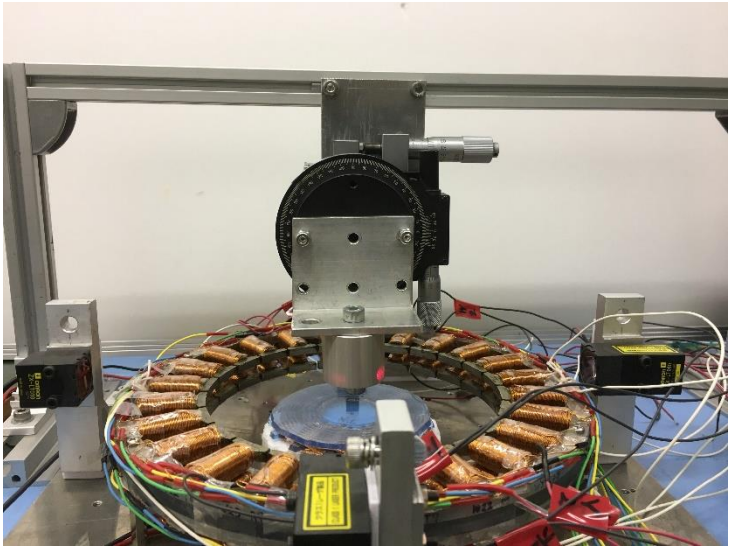

Fig. 2. 22 Examination of lezer sensors

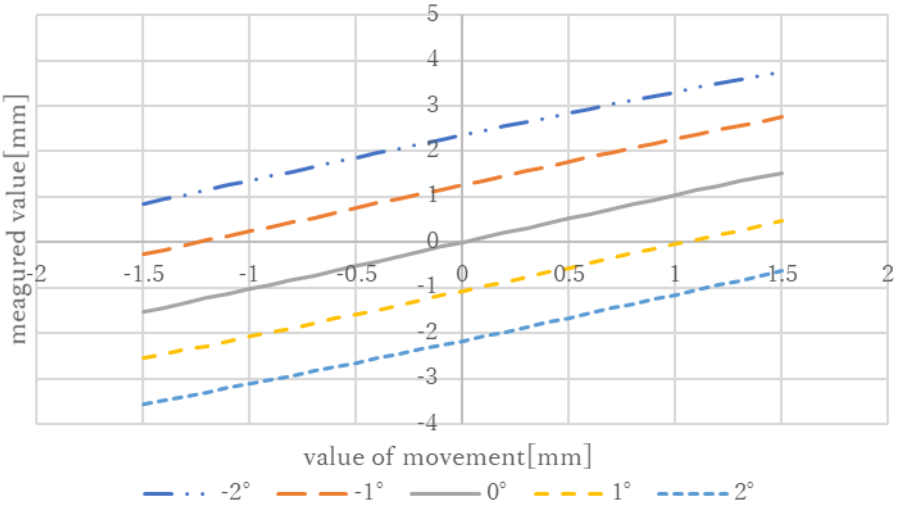

Fig. 2. 23 The result of lezer sensors

実験結果より，回転子のセンサターゲットが大きく傾くにつれ，レーザーセンサでは，誤差が大きくなっていることが分かる．最大で，2° 傾けた時に約 2㎜ の誤差が発生することが分かった．
図 2. 23 の結果より，角度を大きくしていくほど誤差も増加していることが分かる．しかし，傾きを与えることによって測定部も水平方向へ移動することが考えられる．今回は，センサターゲットの移動をセンサターゲット中心部の移動と捉え，ロータの回転中心とセンサターゲット測定部中心の長さを**L**，水平方向への移動量を**x**とし

$$x = L \times \sin\theta \tag{2.4}$$

と近似することにより，測定部の移動量を考慮した．その結果を図 2.24 に示す．

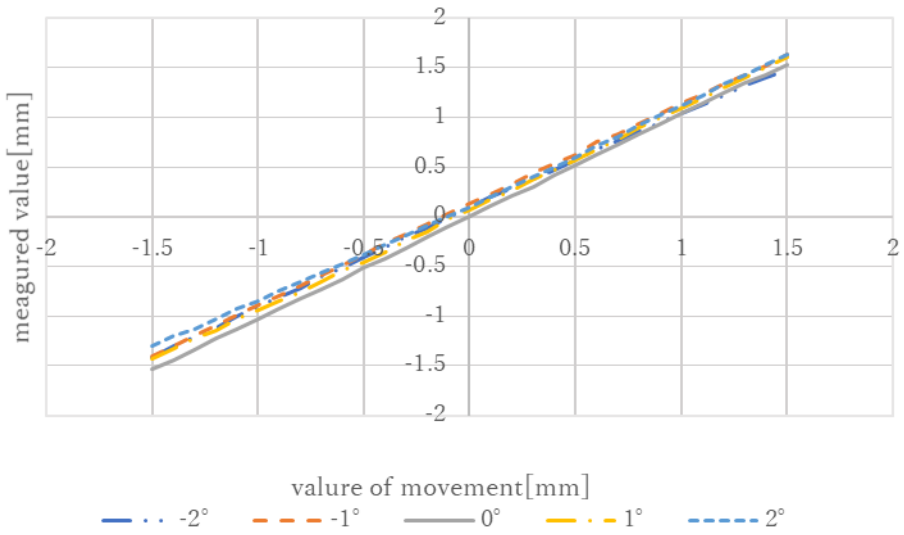

Fig.2.24 The result of lezer sensors considering inclination

誤差は 2 度傾けた時に最大で 0.15mm 確認された．しかし，過去の実験結果と渦電流センサを用いた水平軸回りの回転の検出精度より，1.5 度以上回転することはほぼ考えられないため，実際に使用する範囲での誤差は 0.1mm 以下であると考えられる．精度は十分であると考えられる．

第３章　浮上・回転制御

3.1 浮上原理

ベアリングレスモータの構造については，2 章にて報告したとおりである．一般的には，回転子と固定子の先端部は，回転軸方向に対して平行にするが，永久磁石に比べて磁気力の小さな電磁石を本研究では使用しているため，十分に回転子を浮上させることが難しい．そこで本研究では，回転子と固定子にタオレをつけることで，回転子に対する鉛直軸方向の浮上力を得る構造を考えた．回転子と固定子の空隙部では，磁束線の向きは着磁方向の端部に垂直であるため，図 3.1 のように，回転子は右斜め上に引っ張られるような力を受ける．この力は，X 軸方向と Z 軸方向の力の合成ベクトルで表されることができ，回転子は浮上力を得ることができる．つまり，固定子により回転子を吊り上げる形で支持する．

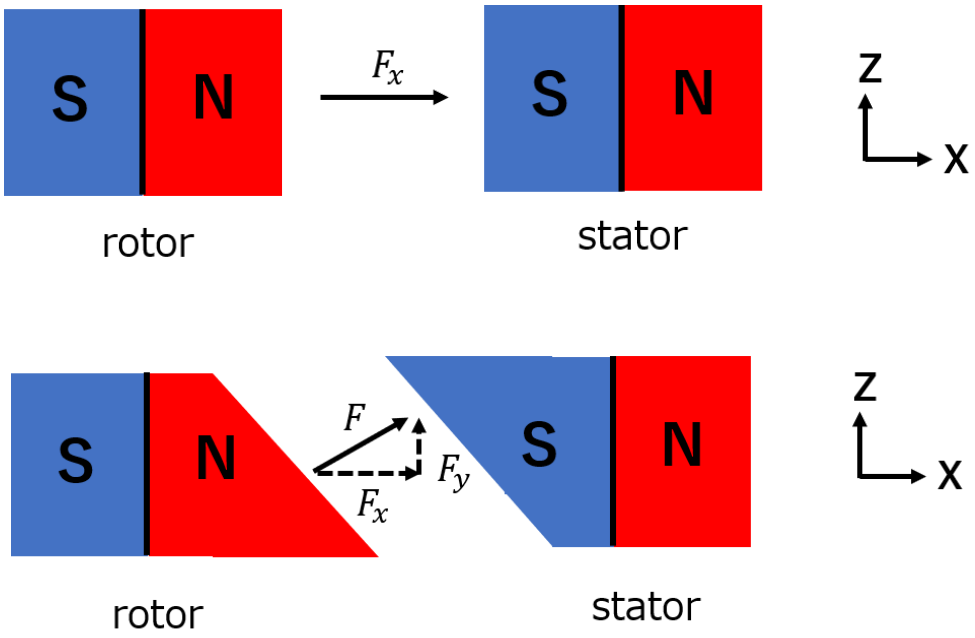

Fig. 3.1 Principle of levitation

3.2 浮上制御方法

動作中に回転子に流れる電流は一定であるため，固定子の浮上制御用コイルの電流を能動的に制御する必要がある．タオレをつけていない場合では，回転子が X 軸まわり，Y 軸まわりに回転した際には，回転子には平衡に戻ろうとする復元力が発生するが，タオレをつけたことで，復元力が弱まり，回転子の安定した浮上を成功させるためには，鉛直軸まわりの回転を除く 5 自由度について能動的に制御を行う必要性が先行研究より示されていたため，今回は水平位置制御，傾き制御，高さ制御を行う方法を考えた[8].

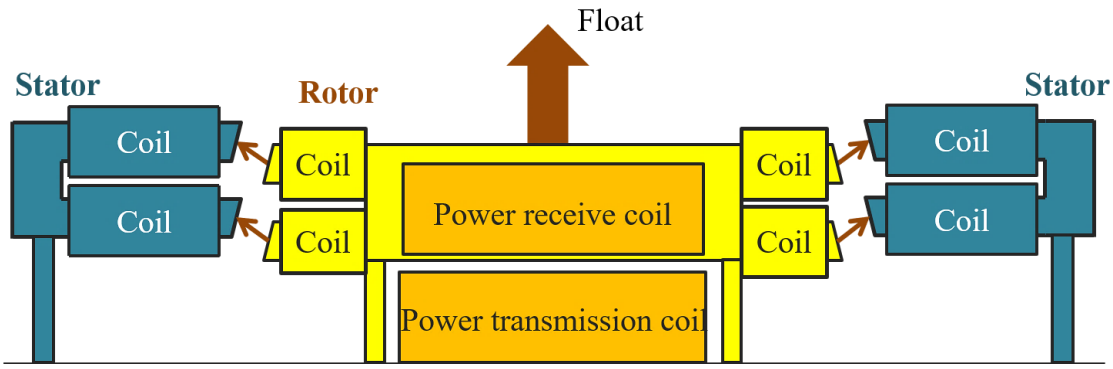

Fig. 3.2 The schematic view of bearing-less motor

3.2.1　制御軸

固定子に巻いている浮上制御用コイルは４箇所ずつ同じ電流が流れるように設計している．これは，回転子を精度よく制御するために，水平位置の制御を２軸の XY 軸ではなく３軸の RST 軸によって制御するためである．

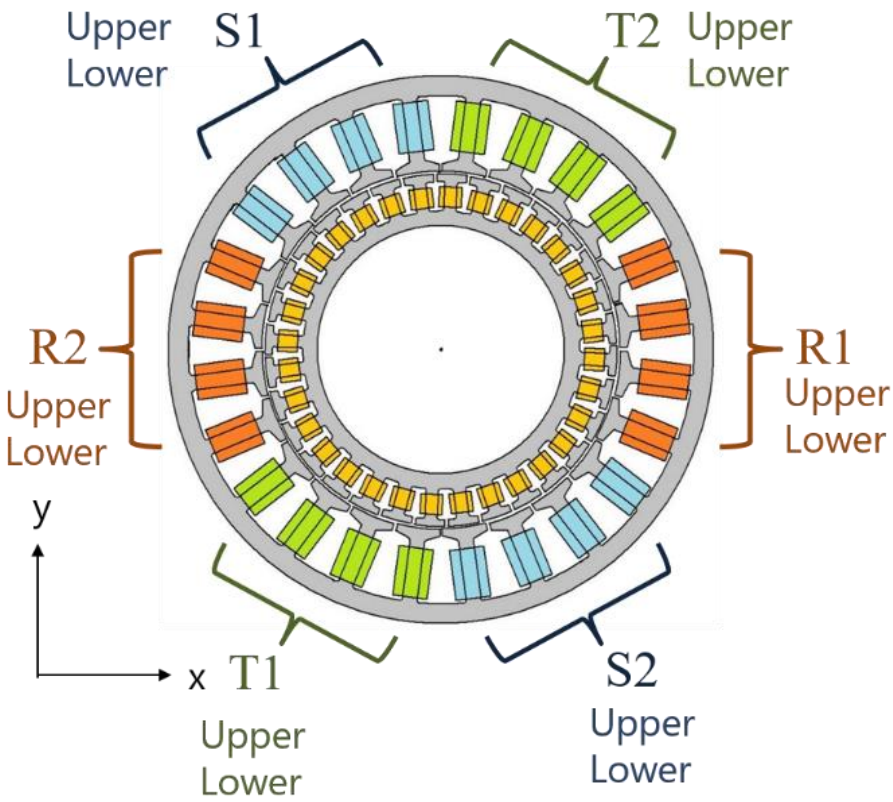

Fig. 3.3 Levitation control axis

3.　水平位置制御

回転子の水平位置の制御方法には PD 制御を用いた．PD 制御を用いることにより偏差が増加したり，減少したりする際に，その先を見越して制御量を素早く目標値に収めることができるため，PD 制御を用いた．

4.　傾き制御

タオレを付けたことにより，回転子の復元力が弱まり，X 軸回り，Y 軸回りについて制御をする必要性があるが，その制御方法として，２層構造の固定子の上層と下層を別々に制御することによって，回転方向とは逆方向に力を発生させるように磁力を発生させる方法を考えた．

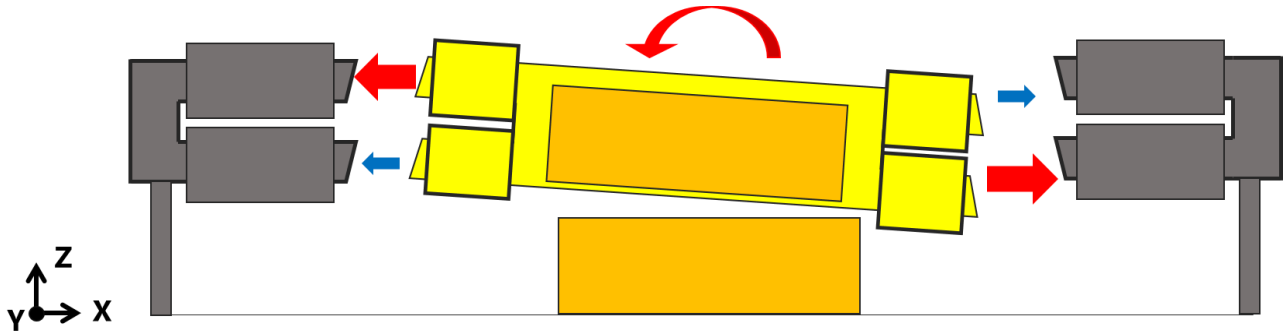

Fig.3.4 Inclination control

5.　高さ制御

回転子の高さ制御は，固定子全体に印可するバイアス電流によって行う．バイアス電流は 1.5A 印可することで，回転子を目的の位置まで浮上させることができることが示されている．

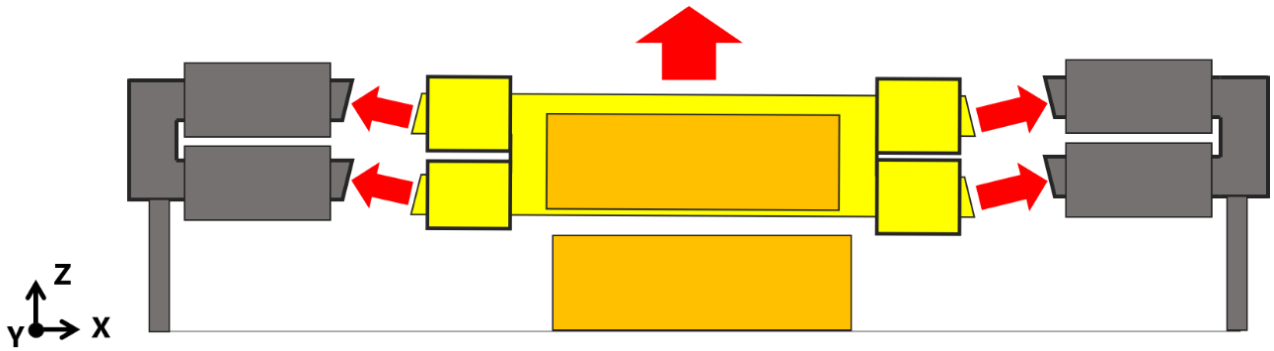

Fig.3.5 Hight control

3.3　回転原理

本研究で提案するベアリングレスモータはホモポーラ型であるために，回転時に極の位置を判別する必要がない．そのため逐次，励磁する相を変更していくことにより，回転を実現することができると考えた．以下に，その様子を示す．

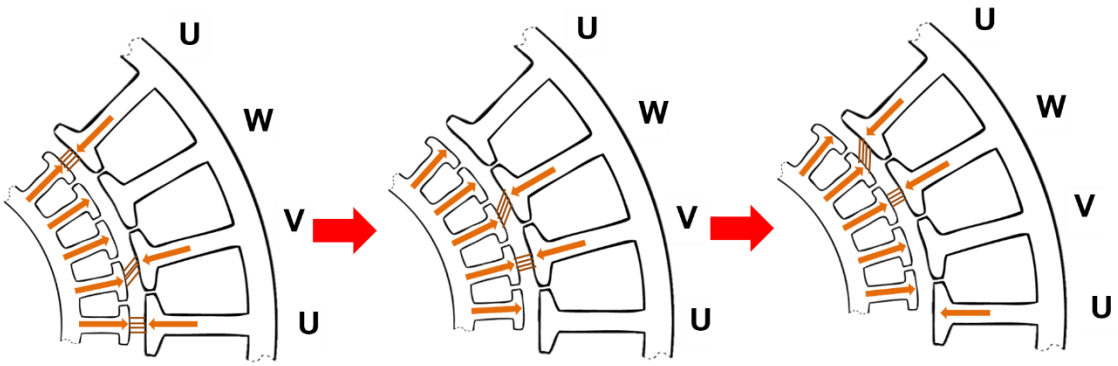

Fig. 3.6 Principle of rotation

図 3.6 は，回転子が浮上した状態を表しており，図の左側の状態では，回転用電流が U 相から V 相へ変更されるタイミングを表している．U 相から V 相へ励磁する相が変わることで，回転子の V 相に一番近い歯が引き寄せられ，中央の図のように回転する．このように，励磁相を逐次切り替えていくことで，回転子を回転させることができる．

3.4 回転制御方法

回転用電流の波形としては，回転子をステッピングモータのように動かすことのできる矩形波と，三相誘導電動機と同様の３相交流波形の２種類が考えられた．実験では，この２種類の波形を用意し，それぞれの周波数やピーク電流の値などを変更し，回転制御の有用性などについて調べることとした．

第４章　浮上実験結果

4.1　浮上実験方法

第 3 章で述べた，回転子の浮上位置制御原理，理論をもとに浮上制御プログラムを製作した．そのプログラムのブロック線図を図 4.1 に示す．

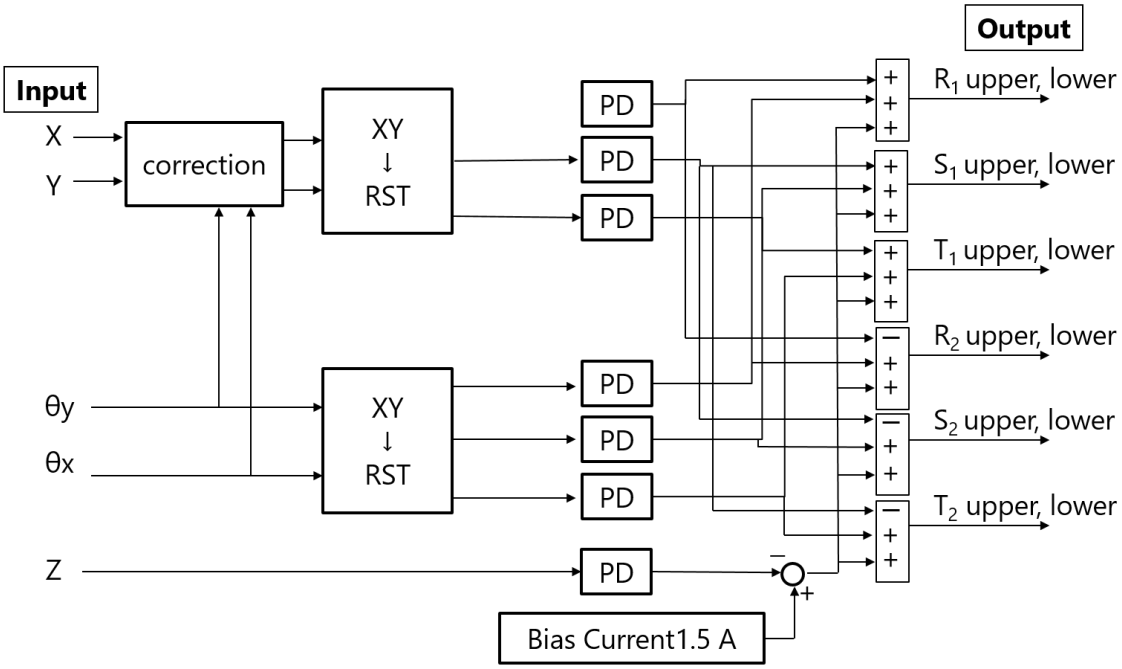

Fig. 4.1 Levitation program

レーザーセンサ，渦電流センサを用いて計測した回転子の位置を R, S, T 軸で表現できるように座標変換を行うことで，回転子の位置を R, S, T, Z のパラメータで表現できるようにする．その後，それぞれの変位に対して PD 制御を行い，それぞれのコイルに印可する電流を決定する．この時に使用した，PD 制御のパラメータは水平位置制御 $K_P = 5$ A/mm, $K_D = 0.025$ As/mm，傾き制御 $K_P = 10$ A/rad, $K_D = 1.5$ As/rad, 高さ制御 $K_P = 0$ A/mm, $K_D = 0.1$ As/mm, とした．このパラメータは，手動で調節しながら決定した．

4.2　浮上実験結果

回転子の浮上実験結果を行った結果を図 4.2 に示す．今回の実験では，３秒付近でベアリングレスモータの浮上位置制御を開始し，７秒付近で回転子に対して非接触給電を開始している．徐々に回転子が浮上しているのは，非接触給電の電圧を手動で調整しながら上げているためである．15 秒，20 秒付近では回転子に外乱を与えているが，平衡位置に回転子が復元していることが分かる．また 23 秒付近からは回転子に外部から力を与えて回転させている．この時，それぞれの変位に乱れが生じているのは，回転子上部に取り付けたセンサターゲットの精度が悪く，渦電流センサの計測距離に誤差が生じているためであると考えられる．また，Z 軸方向の変位より，初期位置より 2mm 浮上していることが分かる．よって，十分な浮上力を発生させることができていると考えられる．

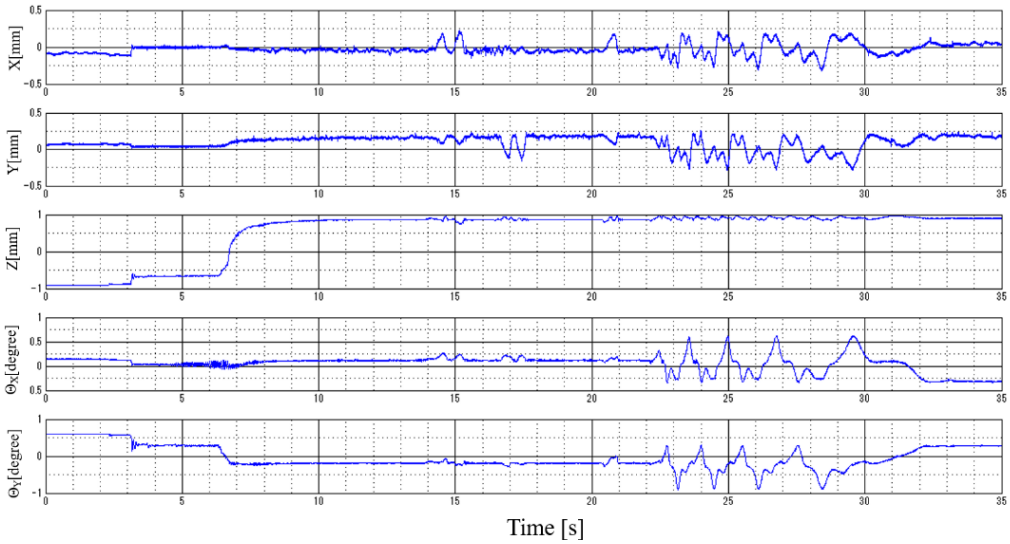

Fig. 4.2 The result of Levitation experiment

次に，回転子の目標値に対する追従性を確認するために，X 軸方向の目標平衡位置を 0.1mm ずつ変化させることによって，回転子の目標値追従性を確認した．その実験結果を図 4.3 に示す．緑の線で示すものが目標値であるが，その目標値に回転子が追従していることが分かる．

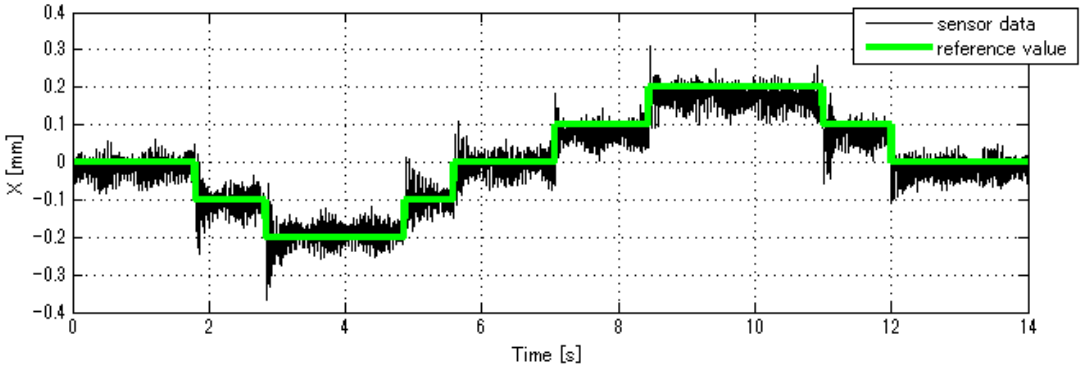

Fig. 4.3 The result of forowability

4.3 回転実験方法

ベアリングレスモータが浮上した状態で，回転制御を行う．回転に関しては，センサレスのオープン制御にて行っているため，回転のデータは取得していない．

4.4 回転実験結果

上記の回転実験方法を用いて，回転実験を行った．しかし，回転用電流としてパルス波の周波数を 0.1Hz～3Hz まで変更しても回らなかった．そこで，U 相→V 相→W 相と手動で励磁相を変えていくことで，回転しない原因を調べた．しかし，手動で励磁相を変えていった場合，次の相へ回転子が移動する場合もあるが，しない場合もあった．また逆方向に回転する場合もあった．

4.5 考察

回転子がうまく回らない原因は，当初考えていたベアリングレスモータの回転原理としては，回転子の歯と固定子の歯が向き合うところで磁力が最大になると考えていた．しかし，実際に実験を行うと，回転子の歯と歯のエッジ部分の磁束密度が大きくなることによって，励磁している固定子の歯と，回転子の歯と歯の中心で引き合うという現象が見られた．しかし，励磁している歯と回転子の歯同士が向き合う場合で引き合う現象もみられたため，回転子全体が一様な磁束密度を持つことにより，磁力の差を設ける事ができていないために回転子が回転させることができないということが考えられた[8]．

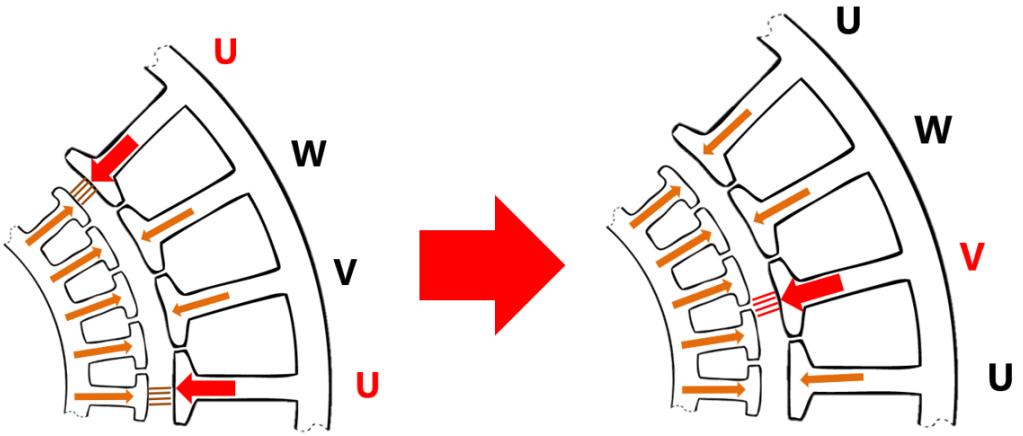

Fig. 4.4 Magnetic flux

第５章　回転子の特性改善

5.1 回転子の問題

回転子が回転しない原因を調べるために電磁界解析ソフト JMAG を用いて，解析を行った．主な解析条件を表 5.1 に示す．

Table. 5.1 Simulatin situation

解析ソフト	JMAG
解析手法	3D-FEM
最小サイズ	0.1mm

回転子と固定子のモデルを製作した上で，回転子に流れる電流は 1A，浮上用コイルに流れる電流は，1mm 浮上した状態で浮上制御用の電流が約 2A 流れていることが分かっているので，固定子すべてのコイルに 2A 流し，更に 1 相のみには回転用電流である 2A を印可した計 4A の電流が流れる状態を再現した．このモデルの回転子を 0.5 度刻みで回転させ，それぞれの場合での回転トルクを算出し，回転子が 2 周期進んだ時の回転トルクがどのように出力されるかを調べた．

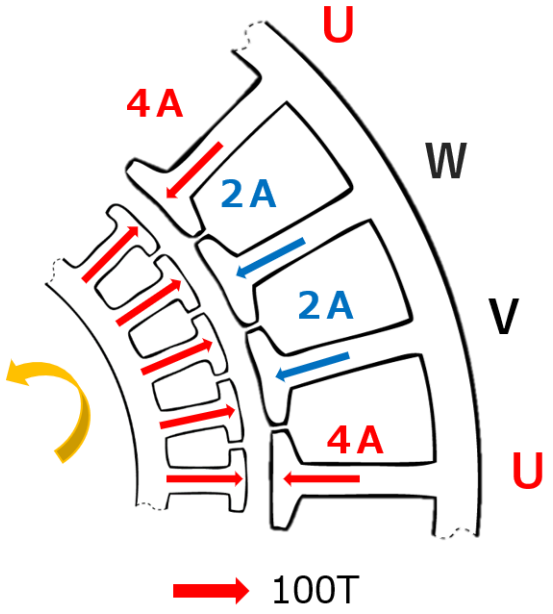

Fig. 5.1 Simulation situation 100T-100T

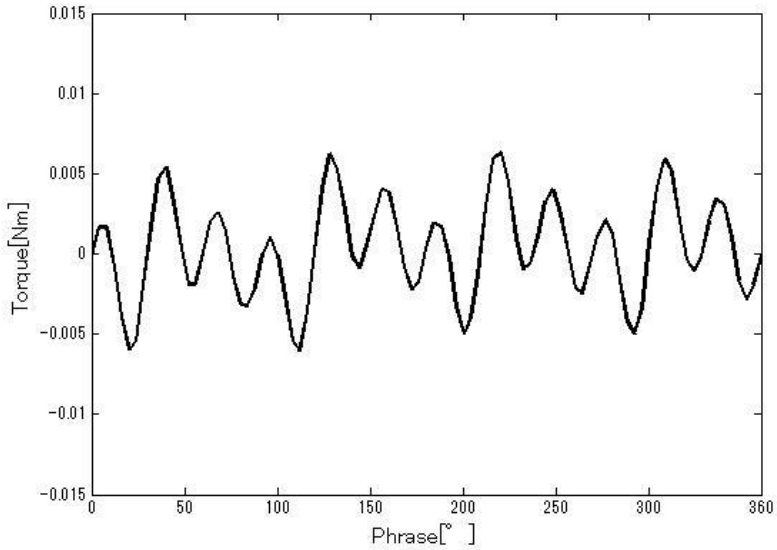

Fig. 5.2 The result of simulation 100T-100T

解析結果を図 5.2 に示す．プラス方向のトルクは正回転方向である右回りを示し，反対にマイナス方向のトルクは逆回転である左周りに力が発生していることを示している．図 5.2 の結果より，回転子全体でほぼ一様なトルク配置になることが分かった．また，モータの理想的な周期は，180° で一周期であるが，今回の結果では，約 90° ごとに同じ波形を確認することができ，この状態では回転を制御できないことが考えられた．また，モータには安定点と呼ばれる，復元力が働く点があり，電流の位相が進むことにより，この安定点が移動，回転すると考えられる．図 5.3 を用いて説明をする．安定点とは位相が進むと，戻ろうとする力が発生し，位相が戻ると回転子が進もうとする場所である．つまり，その点から位相が進むとトルクがマイナスとなり，位相が戻るとトルクがプラスの点である．図 5.3 においては，③の場合が安定点であり，従来の回転子を用いて，解析を行った場合を表した図 5.2 では，トルクがプラスからマイナスに代わる 0Nm の点である．180° の周期の中で，この場合 6 回安定点が出現することになる．1 周期の間に回転子が吸引される点が多く存在するために,例えばU相からV相へ回転用電流を印加する相が進んだ際，逆回転する方向に吸引される場合や，そのまま動かない場合，正方向へ回転する場合などが生じる可能性があることが分かった[8].

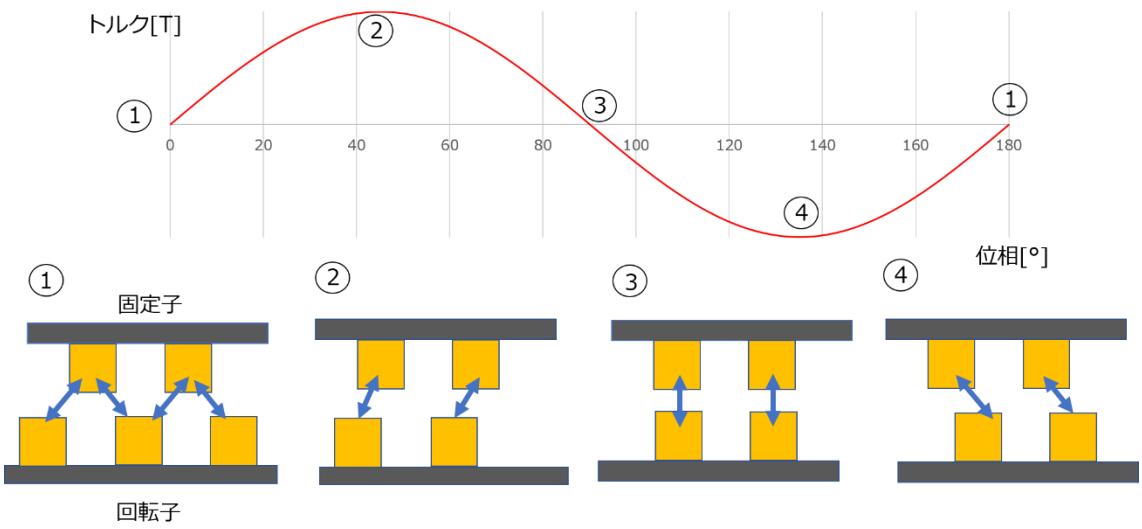

Fig.5.3 Example of stable point

5.2 回転特性の改善

本研究のベアリングレスモータの回転特性を改善するために，回転子を再設計することとした．回転特性を改善するためには，

① 回転子の歯数を減らし，エッジ部の磁束密度が小さくなるようにする．
② 回転子の歯と歯の間を広げ，エッジ部の磁束密度が小さくなるようにする．
③ 回転子コイルの巻き数を交互に変更することで，磁力の差を設ける．

などの方法が考えられた．しかし，歯数を減らす，歯の形状を変更したりした場合，浮上力が足りなくなり，回転子が浮上しない，また浮上制御の制御性に問題が起こる可能性が考えられた．そこで，今回は，回転子のコアの形状は変えずに，回転子コイルの巻き数を交互に変更することで，回転特性の改善を図ることとした．

5.3 最適な回転子コイルの巻き数

5.3.1 安定点

最適な回転子コイルの巻き数を探すために，従来の回転子と同じシミュレーション条件下で解析を行った．100 巻き-75 回巻き，100 回巻き-50 回巻き，100 回巻き-25 回巻きをそれぞれ交互に行う場合を考えた．今後，それぞれの巻き数を，100T-75T，100T-50T，100T-25T と表現する．

回転子の巻き数を交互に変更した場合，100T-100T の従来の回転子に比べて，最大トルクと最小トルクが大きくなっていることが分かった．また，巻き数の差を大きくすることで，このトルクも大きくなることも解析より判明した．しかし，全体の傾向としては，ほぼ同じ傾向を示すことが分かった．また，回転の位相が 60° と 240° の急峻に増加している点に着目すると，従来の回転子との大きな違いが，180° 毎に同じ波形を確認することができることが分かる．これは，100T-75T のように，巻き数の差が小さい場合でも見られることから，交互に回転子コイルの巻き数を変更することで磁力の差を設けることができるということが分かった．今回，示した場合では，同じような波形を示すことから，浮上力，制御性の面から，最

適な回転子コイルの巻き数を決定していく事とした.

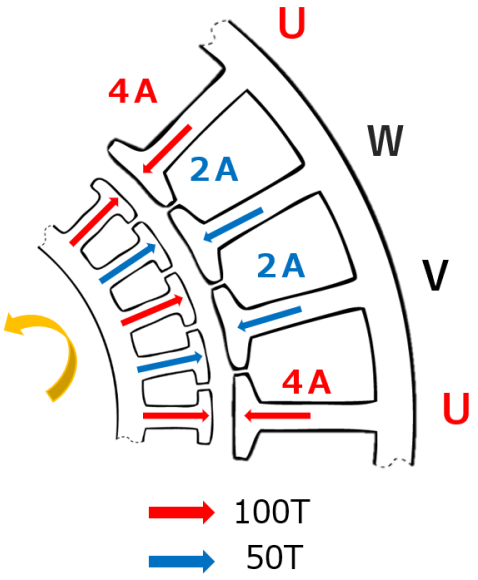

Fig.5.4　Simulation situation 100T-50T

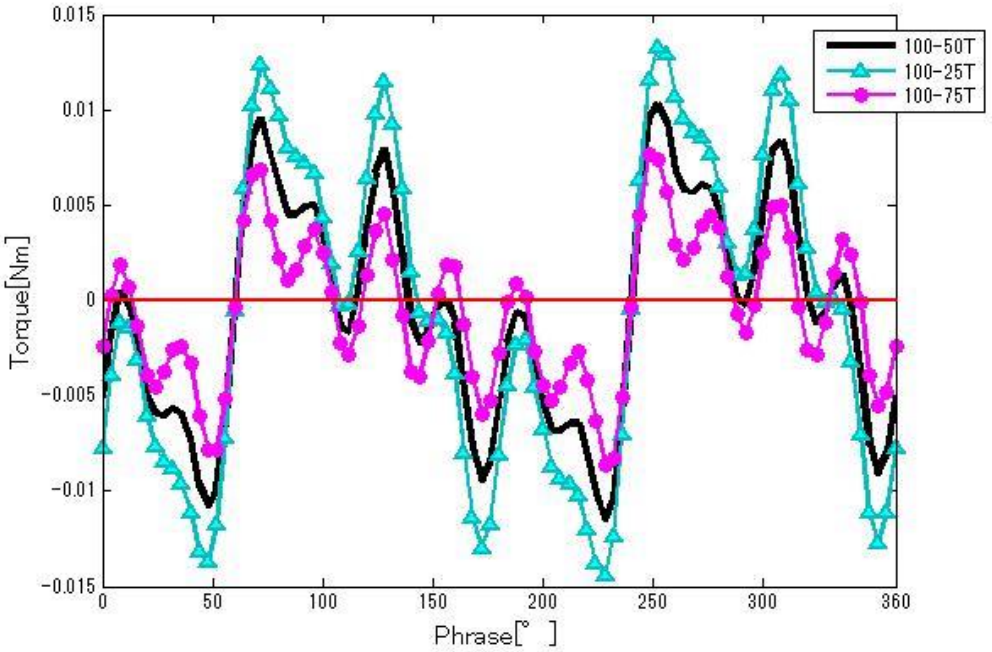

Fig.　5.5 comparison of winding number

本章では 100T-50T の場合の安定点について，詳細に記述する．Fig.5.5 において，回転子の位相が 10°の時の解析結果を Fig.5.6 に示す.

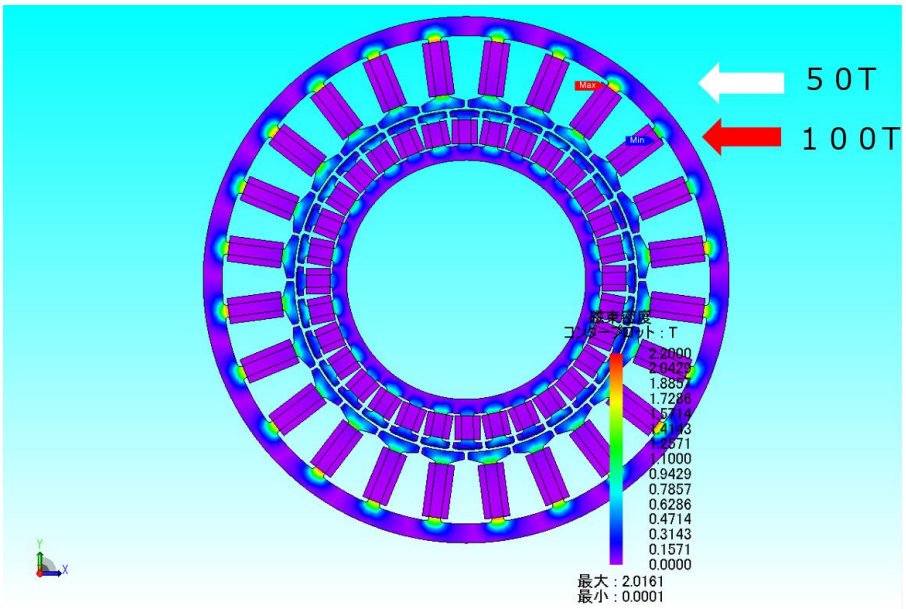

Fig.5.6 10°

4A を印加している相に,100 回巻きのコイルと 50 回巻きのコイルのエッジ部が合致していることが分かる．回転子の磁力線は，本来ならば上層の歯から下層の歯に向けてのみ存在するのが理想であるが，歯と歯のエッジ部では，100 回巻きの上層のコイルから，50 回巻きの下層のコイル，また 50 回巻きの上層のコイルから 100 回巻きの上層のコイルに向けての磁力線が存在すると考えられる．つまり，隣り合うコイル同士が磁力を強めあう関係にあると，推定される．そのため，磁力が強くなり，安定点となると考えられる．

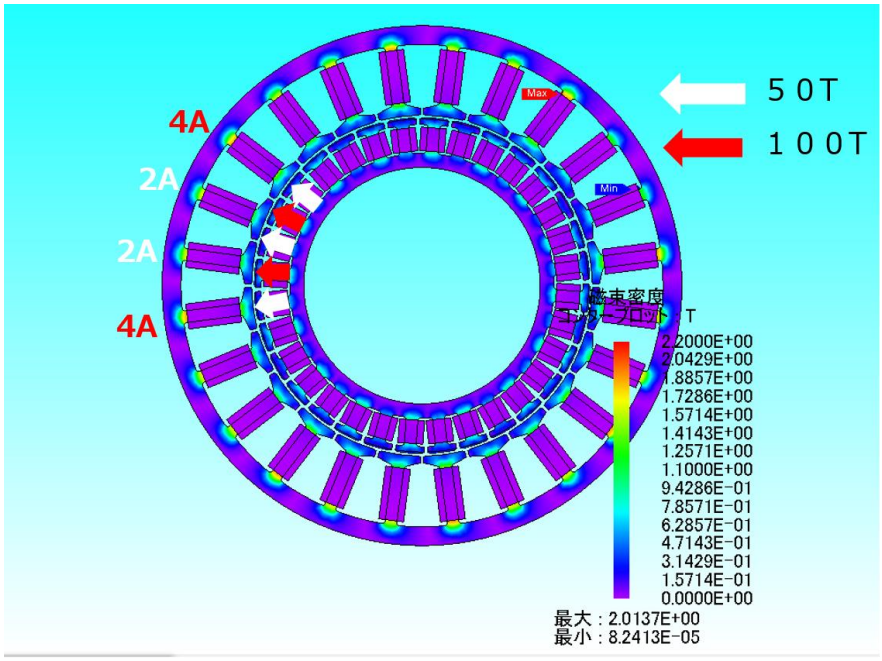

Fig.5.7 60°

この場合は，不安定点であると考えられる．10° の解析結果を示した時に述べたが，回転子の歯と歯のエッジ部では，磁力が強まる．60° の場合は，4A を印加している相に向けて，100 回巻きと 50 回巻きのエッジ部が強く引き寄せられようとしている．4A を印加している相に着目すると，50 回巻きの歯と対向し，この歯と歯のエッジ部が両方向に存在しているため，回転子は，両方向に回転する可能性があることが分かる．よって，60° の場合は不安定点であると結論付けた．

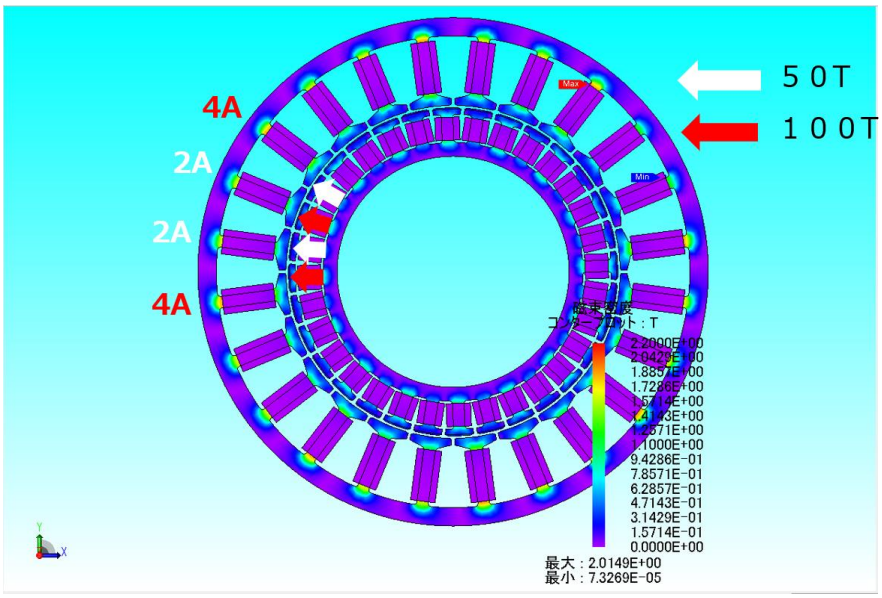

Fig. 5. 8 110°

110° の時の解析結果より，4A を印加している相に対して，回転子の歯と歯のエッジ部が対向していることが分かる．そのため，回転子がどちらの方向に回転した場合でも，回転子はこの 110° の位相の位置に戻ると考えられる．

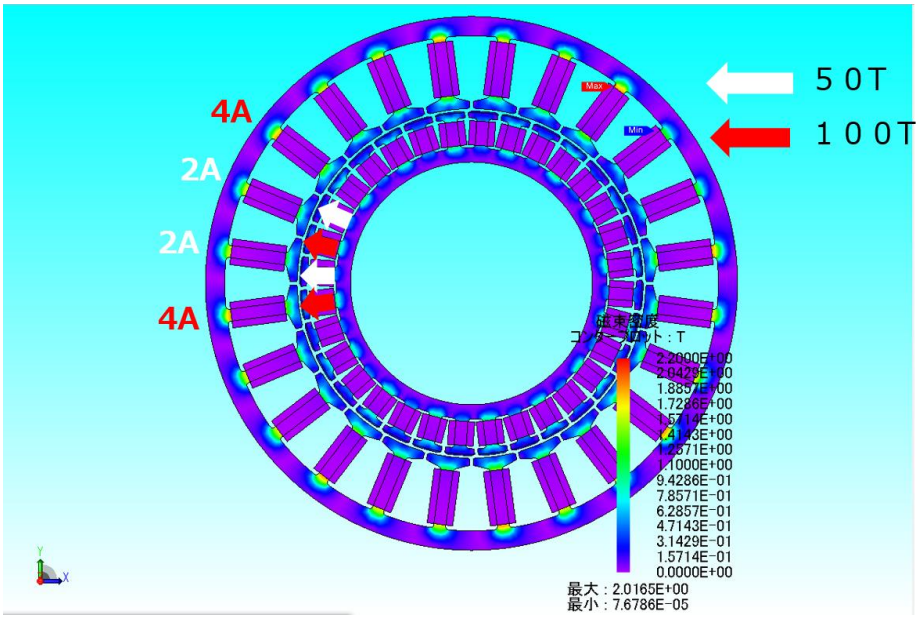

Fig. 5. 9 160°

位相が 160° の時の解析結果では，4A を印加している相に対して，100 回巻きの回転子コイルが対向していることが分かる．これまでの場合では，回転子の歯と歯のエッジ部で磁力が強まる傾向があるために安定点となると説明してきたが，回転子コイルの巻き数を交互に変更することで，磁力の差を設けることができ，巻き数の多い歯に対して 4A を流している相が大きな吸引力を発生，回転子に復元力を働かせることができると確認した．

5.3.2 浮上力

より強い電磁力を必要とする場合は，電磁石に巻くコイルの巻き数を多くする必要がある．しかし，今回は電磁力の差を設けるために，回転子コイルの巻き数を減らすことになるため，従来機に比べて浮上力が足りない可能性が考えられた．そこで，新しい回転子の概算の重量見積りと，J-MAG を用いた浮上力解析の結果から，従来機と等しい浮上力を得られるかを計算した．

回転子の概算の見積もりの方法としては，回転子コイルの巻き数を 100 回巻いたところから 50 回巻き減らし，その時の重さを計測し，回転子コイルの巻き数を減らした場合の重さを計算した．回転子の巻き数を 25 回減らす場合，75 回減らす場合は，それぞれ，50 回巻き分減らした時の重さを基準にそれぞれ 1/2 倍，3/2 倍した重さを計算した．また，回転子コイルの巻き数を 50 回減らした場合のコイルの重さは，約 1.15g となることが分かった．

Table.5.2 rotor mass and force

	質量(g)	必要な力(N)
100T-100T	772	7.56
100T-75T	735.2	7.20
100T-50T	698.4	6.84
100T-25T	661.6	6.48

表 5.1 は，これまでに記述した条件をもとに求めた，回転子の重さと，その回転子を支えるために必要な力を表している．

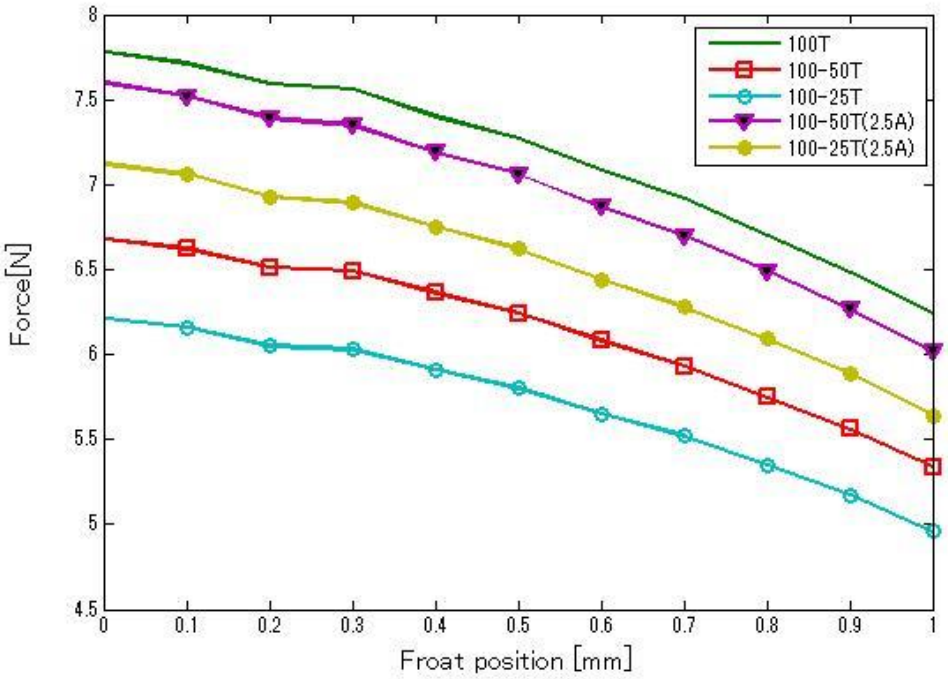

Fig.5.10 Levitation force

今回の解析では，回転子が固定子と同じ高さで浮上している位置から回転子の位置を 0.1mm ずつ下げていくことで，浮上力がどのように変化していくのかを示している．

回転子の巻き数を変更することで，先に述べた通り，発生させることのできる浮上力が減少することが分かった．浮上位置が，0mm の時は，回転子が固定子と同じ高さに浮上している時のことであり，1mm と示している所が，回転子が固定子よりも 1mm 低い位置にある場合を示している．今回の解析では，回転子が固定子と同じ高さで浮上している位置から回転子の位置を 0.1mm ずつ下げていくことで，浮上力がどのように変化していくのかを示している．

100T-50T，100T-25T の場合の最大浮上力はそれぞれ 6.7N，6.3N となり回転子が必要とする浮上力には及ばないことが分かった．そこで，浮上時に固定子に流れている電流を 2.5A に変更した場合を示したのが，100T-50T(2.5A)，100T-25T(2.5A)で示したものである．この場合，回転子は 100T-25T(2.5A)の場合は 0.5mm の位置以上で十分な浮上力を得る事ができ，100T-50T(2.5A)の場合は，0.7mm 以上の位置で十分な浮上力を得られることが分かった．

浮上制御では，回転子の水平方向位置，傾き，高さについてそれぞれ制御しているため，常時 2.5A 程度流すことができるようにバイアス電流を調節する必要性がある．

5.5 回転制御用電流

現在，回転制御用電流として矩形波を用いている．矩形波を使用した場合，回転子の安定点は U 相の安定点から V 相の安定点に移動する必要があり，5.2 章で解析したように新しく，回転子コイルの巻き数を変更した場合の回転子を用いても，安定点の位置が多く存在する場合では，任意の回転子の歯を引き付けることができず回転制御上の問題が多数発生すると考えられた．そこで，回転用電流を変更することで，回転特性の向上を図ることを目指した．そこで着目したのが誘導機に用いられている 3 相交流電流である．本来，かご型など，固定子コイルを回転軸に対して平行に設置した場合に用いられる電流の方式である．本研究で扱うベアリングレスモータは回転軸に対して固定子が垂直方向に設置されているステッピングモータ型であるため，3 相交流電流を用いると，ステッピングモータ型のパルス角を制御できるという利点はなくなるが，矩形波に比べて，安定点の推移を円滑化できると考えられたため，採用した．

３相交流制御を行うことで，5.3 節で示した不要な安定点が回転制御に与える影響を改善できるかを解析を用いて調べた．解析の条件としては，5.3 節と同様であるが，回転子に流す回転用電流を次のように変更した．

Table.5.3 simulattion current

U 相	$2\sin(\theta + 0)$ [A]
V 相	$2\sin(\theta + 120)$ [A]
W 相	$2\sin(\theta + 240)$ [A]

回転子を２周期回転させ，固定子に流す電流を θ の値を 0°から 360°まで変更，その時に回転子にかかる回転トルクを解析した．その結果を回転子の回転位相，回転用電流の位相，回転トルクの 3 つの関係性を調べた．MATLAB を用いて，3 次元でこの関係性を表したものを図 5.11 にしめす．

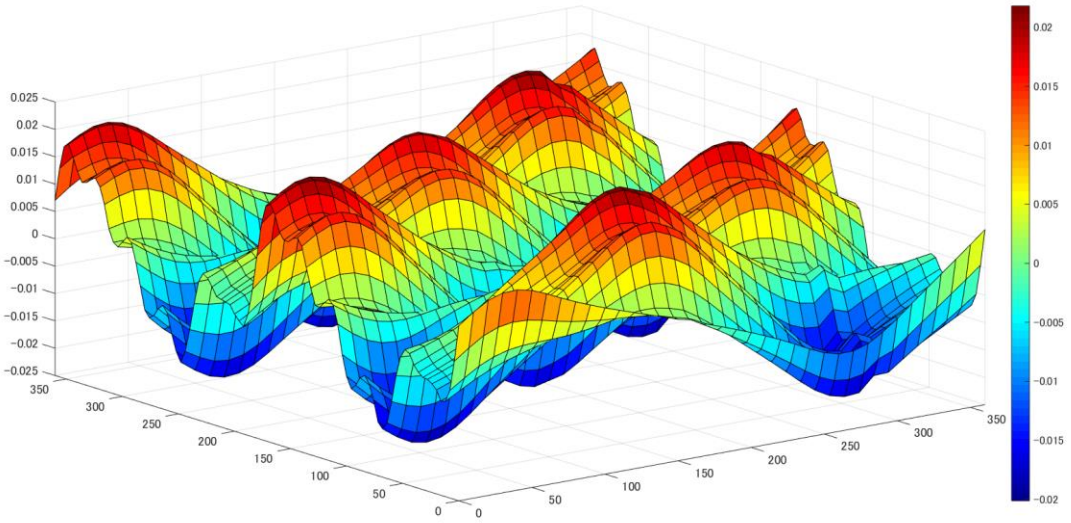

Fig.5.11 simulation result of 3-phrase control

回転制御電流として 3 相交流電流を用いた場合，に回転子にどのような力がかかるかを解析するには，先ほど記述した安定点を参考に考えることとした．このグラフを上面から見た図を以下に示す．X 軸に回転制御電流の電流位相を，Y 軸に回転子の回転位相を示している．このグラフをトルクが 0°以下を切り取り，安定点の軌跡を辿ったのが図 5.12 である．

電流の位相が進むにつれて，回転の位相が進んで行くことが理想である．つまり，安定点の軌跡が右斜め上方向に直線で，また回転の位相で考えると周期が 180°毎に現れることが理想である．しかし，図〇をに着目すると，安定点は直線で現れておらず，連続でもないことが分かる．回転の位相，電流の位相がともに 0°から始まる安定点に着目する．安定点は，ほぼ X 軸に平行に表れている．つまりこの時は回転電流の位相が進んでも回転子はほぼ動かないことが分かる．そして，電流の位相が 60°付近では，安定点が途切れている．この時，更に回転電流を進めると回転子にかかる力は＋方向であることが分かる．よってこの時回転子は正回転方向に急速に回転し，上部の安定点へと推移すると考えられる．よって，3 相交流電流を用いることで回転子は正回転を常に行うと考えられるが，この回転は安定せず，急速に回転する，またはその場に止まることなどが考えられた[9]．

この問題を解決する方法として回転子を急速に回転させることが考えられた．回転子を急速に回転させることで，回転子には慣性モーメントが働き，この安定点の連続していない部分を上方に推移しやすくなるのではないかと考えられた．

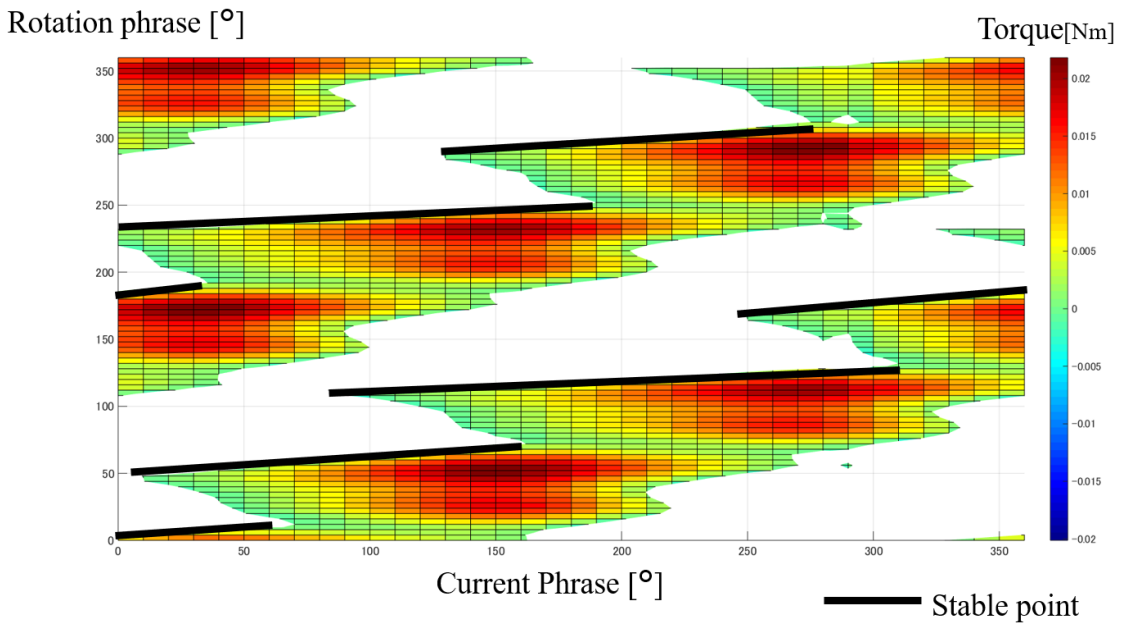

Fig.5.12 simulation result of stable point

しかし，回転電流として，３相交流電流を用いることによるデメリットも存在する．３相交流電流では一の電流を使用するために，回転子の浮上力に大きく影響してくると考えられた．そこで，３相交流制御時に回転子にかかる力を計算した．

図 5..13 は，３相交流制御時に回転子にかかる X 軸方向の力を解析したものである．回転子にかかる X 軸方向の力は±0.01N 程度で推移しており，この程度の力であれば回転子の水平位置制御でコントロールすることができると考えられた．

図 5.14 の Y 軸方向の力についても同様に，±0.01N 程度であるため問題はないと考えられた．しかし，図 5.15 に示すように，Z 軸方向にかかる力を見ると±0.3N 程度で推移していることが分かる．回転子にかかる力が大きくなっているところは，3 相交流で用いる sin 波のピークであり，逆に回転子にかかる力が小さくなっている所は，sin 波のボトム部分である．先の浮上力の章で述べたが，100T-50T の新しい回転子を浮上させるために必要な力は 6.84N であるため，回転子にかかる Z 軸方向の力が±0.3N 変わるとすると，浮上高さは 4mm 程度変動する．3 相交流制御を回転電流として使用するためには高さ方向の制御ゲインを高め，従来機よりも高さ制御のフィードバックゲイン等の改善をする必要性があることが分かった．

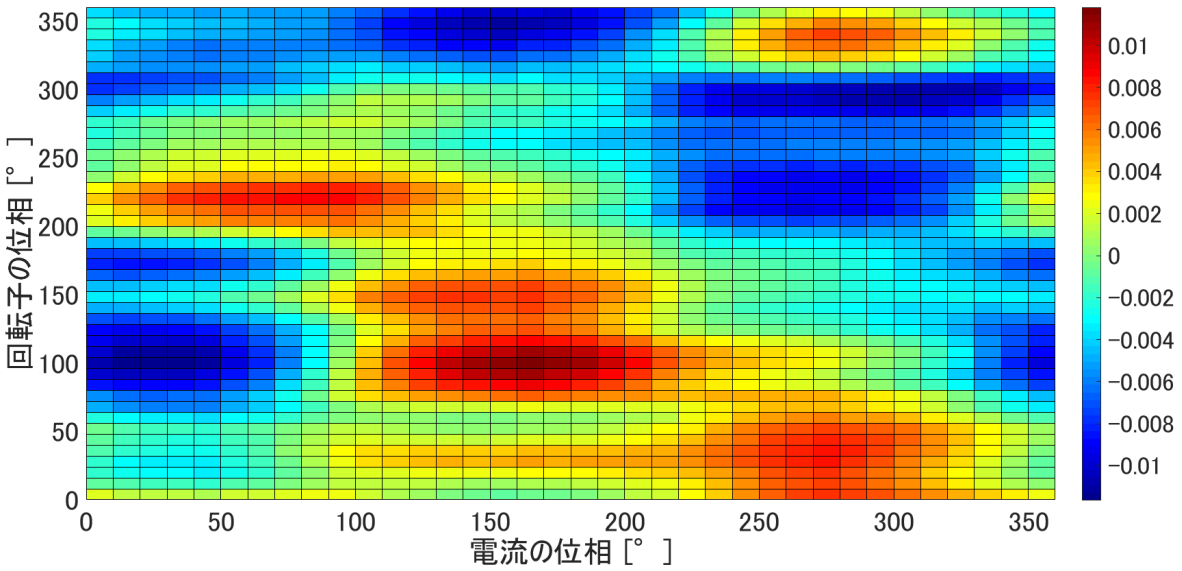

Fig. 5.13 X-axis force

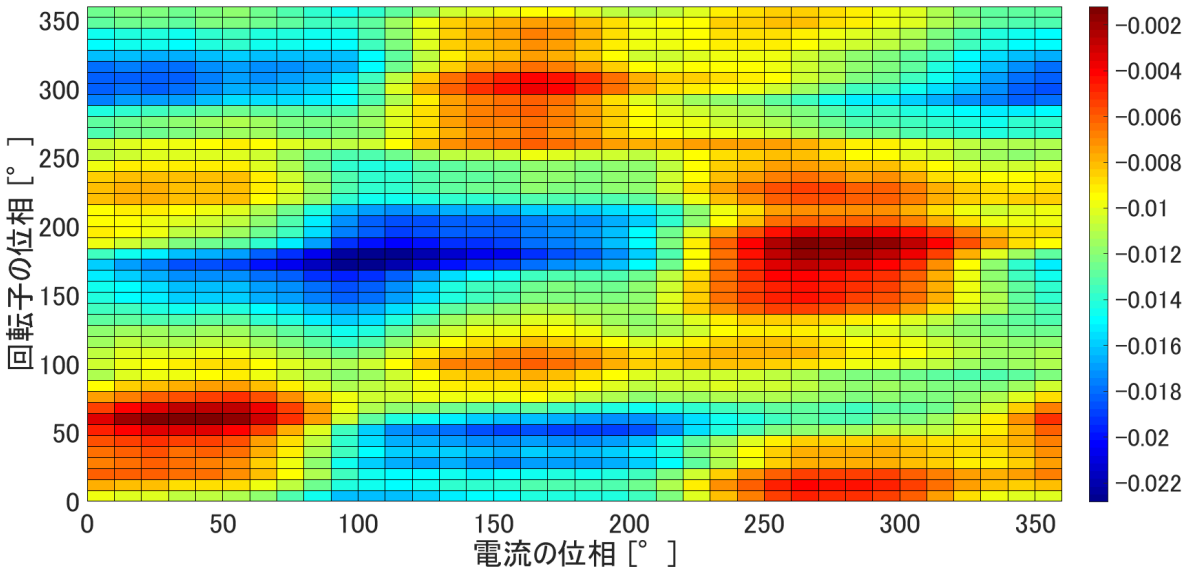

Fig. 5.14 Y-axis force

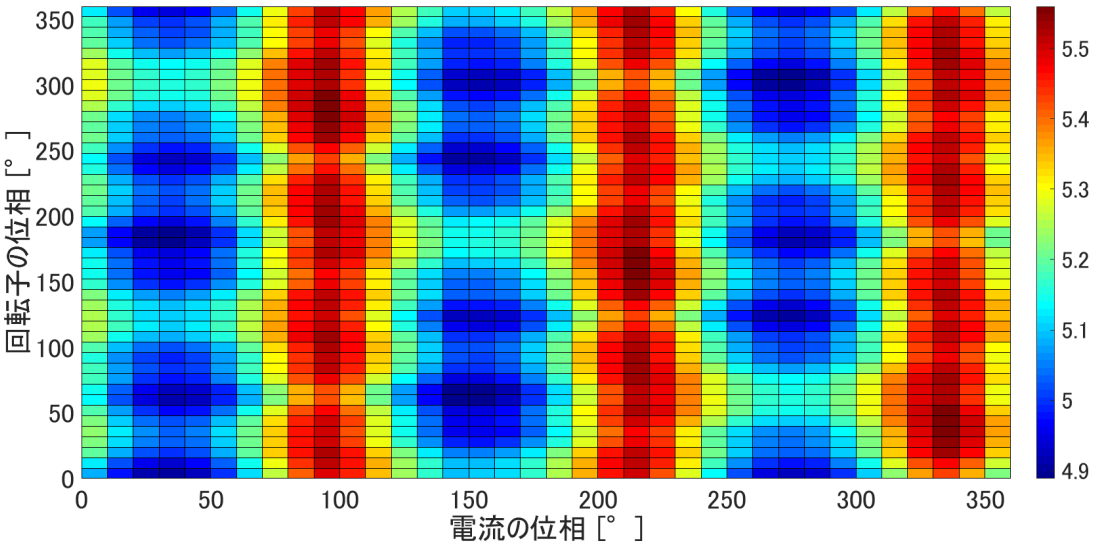

Fig.5.15 Z-axis force

回転用電流が回転子の浮上高さに与える影響を少なくするために，回転電流を変更することを試みた．第５章で示したように，回転電流で三相交流電流を用いた場合，電流のピークとボトムの場合に回転子の Z 軸方向の吸引力に影響があることが考えられた．回転制御電流は，振幅１の波形を simulink 上で製作し，その波形に対して，ゲインをかけることで，回転電流の振幅を決定している．そこで simulink で生成される sin 波に対して制限をかけ，波形の出力する振幅を±0.9～±0.6 まで変更して実験を行った．この時，幅を±0.6 にしたとき 6Hz まで追従し，最も回転しやすくなった．

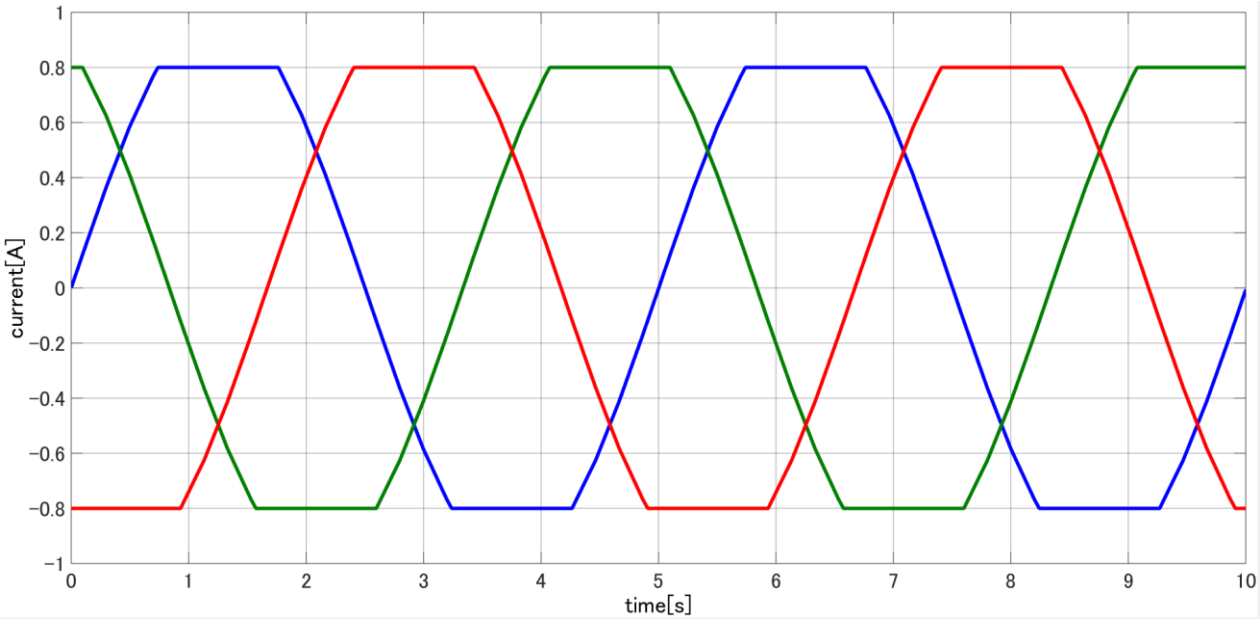

Fig.5.16 3-phrase control (limit±0.8)

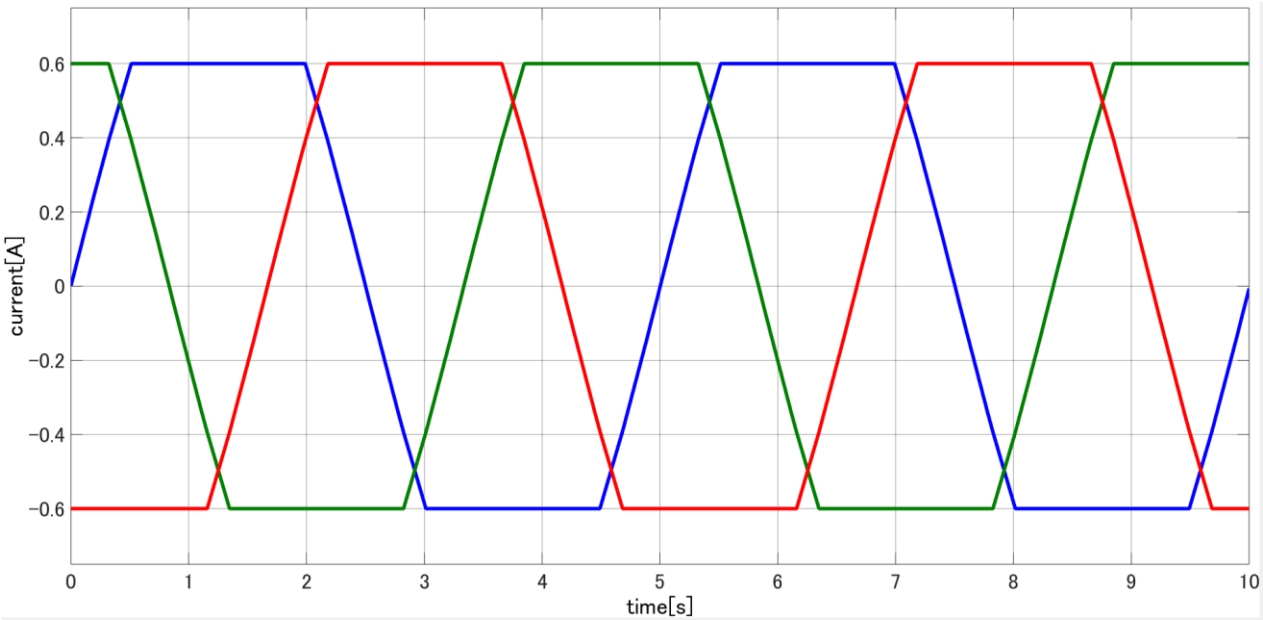

Fig.5.17 3-phrase control (limit±0.6)

回転電流に制限をかけることで回転しやすくなった原因は，制限値まで電流がかかった状態で保持される時間が長くなるためであると考えられる．この時間が長くなることにより，回転子が電流に対して同期しやすくなったため．回転子が 4Hz の回転周波数まで同期することができた．しかし，1Hz など，非常に遅い回転周波数を設定した場合には，回転子が逆回転するなどの結果も得られた．これは，遅い周波数では回転子が同期するために必要な時間を超えて，同じ状態で電流が保持されるためであると考えられる．そのため，この方式を使用できるのは回転周波数を十分に大きくした場合であると考察でき，回転子の回転制御電流を低周波数と高周波数で変更する必要性がある．

次に，電流に制限をかけるのではなく，sin 波のピークを歪ませた形を考案し回転制御電流に用いることを考えた．先の実験結果より，電流の制限を 0.6 にすることで回転子の回転特性が改善できることを示したので,今回も sin 波のピークを±0.6 となるような sin 波を考案した.Sin 波のピークを 0.6 に落とすため，以下のような表を作成した．

Table.5.4 Gain of 3-phrase control

Range	Gain	Range	Gain
1	0.6	0.7 ～ 0.72	0.75
0.98 ～ 1	0.61	0.68 ～ 0.7	0.76
0.96 ～ 0.98	0.62	0.66 ～ 0.68	0.77
0.94 ～ 0.96	0.63	0.64 ～ 0.66	0.78
0.92 ～ 0.94	0.64	0.62 ～ 0.64	0.79
0.9 ～ 0.92	0.65	0.6 ～ 0.62	0.8
0.88 ～ 0.9	0.66	0.58 ～ 0.6	0.82
0.86 ～ 0.88	0.67	0.56 ～ 0.58	0.84
0.84 ～ 0.86	0.68	0.54 ～ 0.56	0.86
0.82 ～ 0.84	0.69	0.52 ～ 0.54	0.88
0.8 ～ 0.82	0.7	0.5 ～ 0.52	0.9
0.78 ～ 0.8	0.71	0.48 ～ 0.5	0.92
0.76 ～ 0.78	0.72	0.46 ～ 0.48	0.94
0.74 ～ 0.76	0.73	0.44 ～ 0.46	0.96
0.72 ～ 0.74	0.74	0.42 ～ 0.44	0.98

この表に従い，sin 波を徐々に歪ませていくことによって，新しい回転電流を作成した．次に，1.2A を回転電流として入力した際に，実際に出力される電流を実線で示している．点線で表しているのが，従来流していた回転電流であるが，回転電流のピークの間に谷間があることが分かる．新しく考案した回転電流ではこの谷間を小さくすることができ，それぞれの波形の立ち上がり，立下りについては従来と同様であるため，同期する時間を設けることができ，また回転子を引き寄せるのに十分なトルクを発生させることができるのではないかと考えられた．

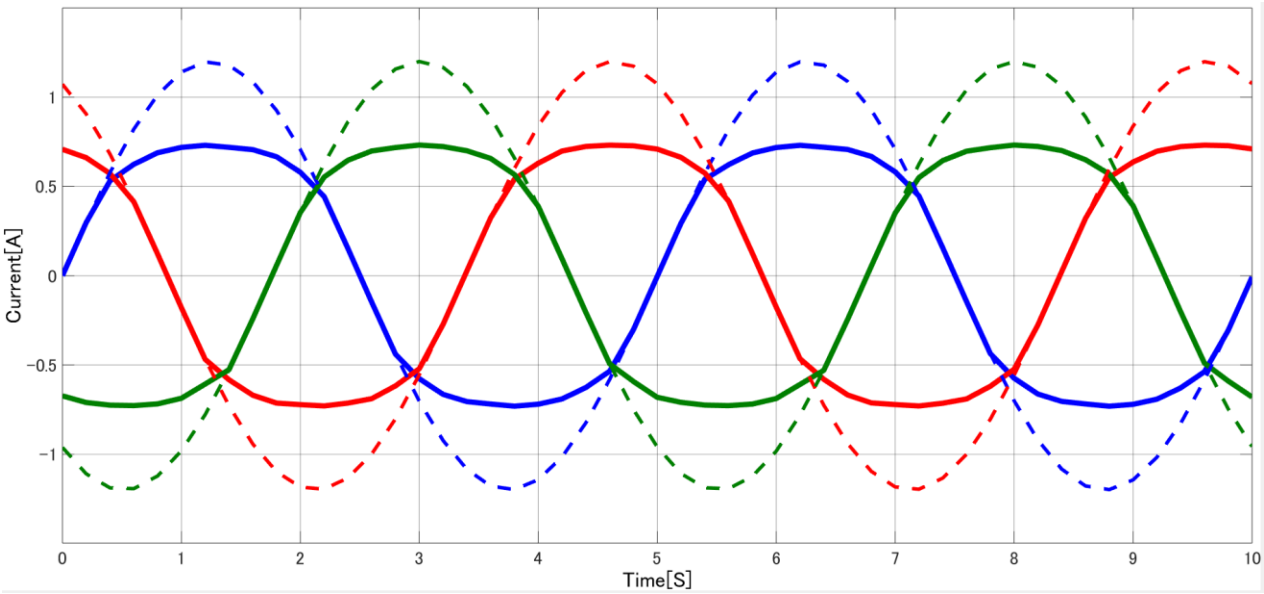

Fig.5.18 implovement of 3-phrase current

第 6 章　新しい回転子を用いた実験結果

6.1 新しい回転子の浮上実験

回転子の巻き数を交互に変更したことにより，従来の回転子に比べて浮上時の安定性が落ちた．以前は，回転子の巻き数がすべて同じであったために，回転子の回転角を計測することなく，回転子を制御していたが，回転子の状態を正確に計測するには，回転角を計測する必要が出てきた．非接触で回転角を計測する方法としては，ロータリエンコーダのようにレーザーセンサを用いて回転子に設けたスリットを計測する方法が考えられたが，回転子内側には非接触給電機構があり，コイル間にはスリットを入れる余地が無いため不可能であった．そこで，回転子浮上時の PD 制御のゲインを変更することにより，この問題を解決することとした．

以下に以前と同様のゲインを用いて行った浮上実験結果を示す．６秒付近から，回転子への非接触給電を開始しているが，回転子が浮上していくにつれて，回転子の傾き，水平方向位置の変動が大きくなり，以前の実験結果に比べても，それぞれが収束していないことが分かる．ここで表す傾き，θ_yは，Y 軸回りの傾きであるために，X 軸方向の変位と関係し，θ_xは，X 軸回りの傾きであるため Y 軸方向の変位と関係するが，X 軸，Y 軸方向の水平位置の変位も大きいが，この挙動は傾きが収束していないことに起因すると考え，まず傾きの制御を行うこととした．傾きを収束させるために，傾き制御のゲインを変更することを考えた．

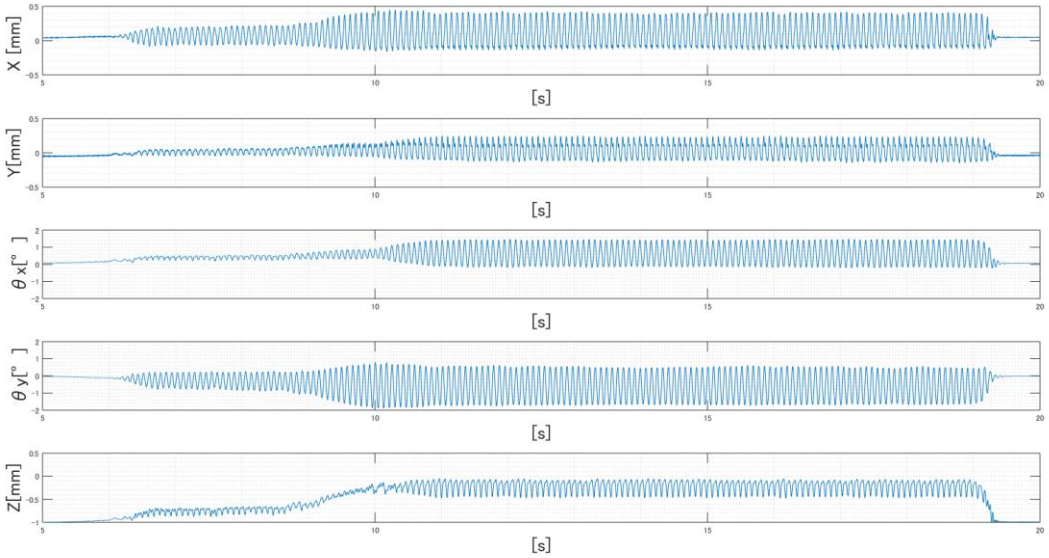

Fig.6.1 The result of levitation experiment(new roter)

傾きのゲインは，渦電流センサを用いて計測した，回転子の傾き[rad]により決定される．回転子の傾きは，最大でも$\pm 2°$程度，つまり± 0.0349rad であるので，とこれまでの実験結果より考えられるため，今使用されているパラメータ$K_P = 10$ A/rad, $K_D = 1.5$ As/radよりも大幅に大きくすることで，傾きを抑えることができるようになると考えた．

傾き制御を大きくすることによって，これまでに使用していたセンサによるノイズによる影響が大きくなることが考えられた．そこで，ローパスフィルタを製作し，実験に用いることとした．

そこで，傾き制御の PD 制御ゲインを$K_P = 50\mathrm{A/rad}$, $K_D = 10\ \mathrm{As/rad}$として，再度浮上実験を行った結果を次に示す．

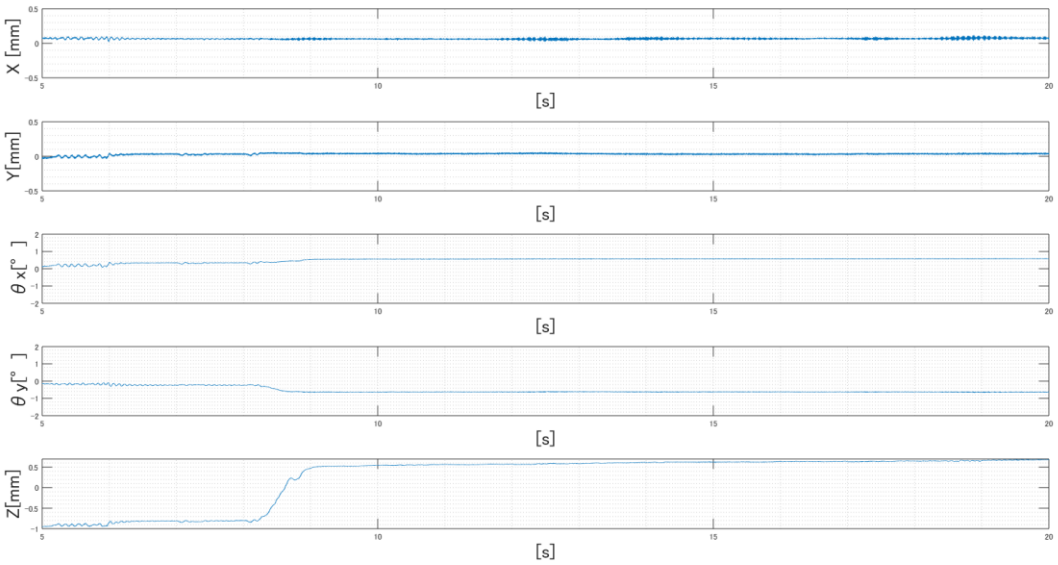

Fig.6.2 The result of implovement levitation experiment(new roter)

先ほどの実験と比べて，大幅に回転子が安定して浮上していることが分かる．Z 軸方向の高さが，従来のゲインを使用した場合に比べて大きくなっているのは，傾きゲインを大幅に変えたことで，浮上時に流れる電流が大きくなっているためだと考えられた．

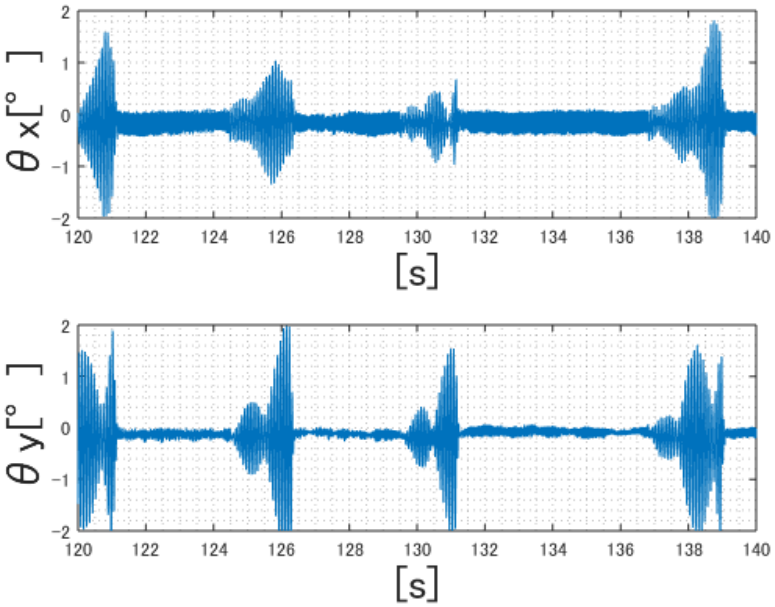

Fig.6.3 usefulness of inclination control

この新しく調節したゲインを使用して，傾き制御の有用性を調べるために，傾き制御をしない場合，する場合を交互に設定し，実験を行った結果が図 6.3 である．例として，124 秒付近に着目する．この時，傾き制御を行っていないが，徐々に傾きが大きくなり発散していっていることが分かる．そこで，126.5 秒付近で傾き制御を再度開始しているが，すぐに傾きが収束していることが分かる．

従来機で使用していたゲインでは今回の回転子が安定して浮上しない原因は，回転子の巻き数を交互に変更しているためであると考えられる．よって，制御性としては以前の回転子よりも大幅に悪化していることが，今回の実験からも分かった．

バイアス電流と浮上高さの関係

前章での解析結果より，固定子全体にかかる電流が，浮上時に 2.5A 以上確保することができれば，100T-50T の新しい回転子を用いても従来の回転子と同様の高さで浮上することが分かっていた．浮上時，固定子に印加される電流は，バイアス電流と浮上制御用電流の合計であるため，浮上制御中にバイアス電流を変更し，回転子の浮上高さとその時に流れる電流を検証した．バイアス電流は，従来機で使用していた，1.0A から 1.6A まで，0.1A 刻みで変更し実験を行った．

Table.6.1 relationshiop of bias current and levitation position

バイアス電流	浮上高さ	固定子電流
1.0	-0.96	1.56
1.1	-0.94	1.84
1.2	-0.85	2.04
1.3	-0.74	2.22
1.4	-0.63	2.69
1.5	0.31	3.00
1.6	0.58	3.04
1.7	0.75	3.37

5 秒刻みで 1.0A から 1.6A までバイアス電流を変更していったので，浮上高さ固定子電流については，それぞれの区間での平均値を出力し，表にまとめた．表から分かるように，回転子の浮上高さの目標値は 0mm であるため，1.5A 以上を印加した場合に，十分な浮上力を得ることができることが分かる．この時の固定子電流の平均値に着目すると，2.69A が流れていることが分かる．これまでの解析結果同様に，2.6A を印加する事で十分な浮上力を得られるという結果になった．

回転制御時には，この浮上用電流の他に，回転用電流が固定子には流れることになる．つまり，固定子全体に流れる電流がさらに大きくなり，現在以上に高い位置で浮上することが考えられる．そこで，浮上高さにも，余裕のある 1.5A をバイアス電流として流すことを決定した．

また，バイアス電流の変更は 0.1A 刻みで行ったが，浮上高さに与える影響が大きいことが分かった．浮上高さ制御については，バイアス電流を制御することによって行っているが，このバイアス電流を大きく変えることは，回転子の浮上安定性が悪くなる可能性が考えられた．

6.2　回転実験結果

6.1 章で示したように，バイアス電流を 1.5A，回転用電流を 1.2A に設定し 2Hz の周波数で電流を流した時の実験結果を示す．

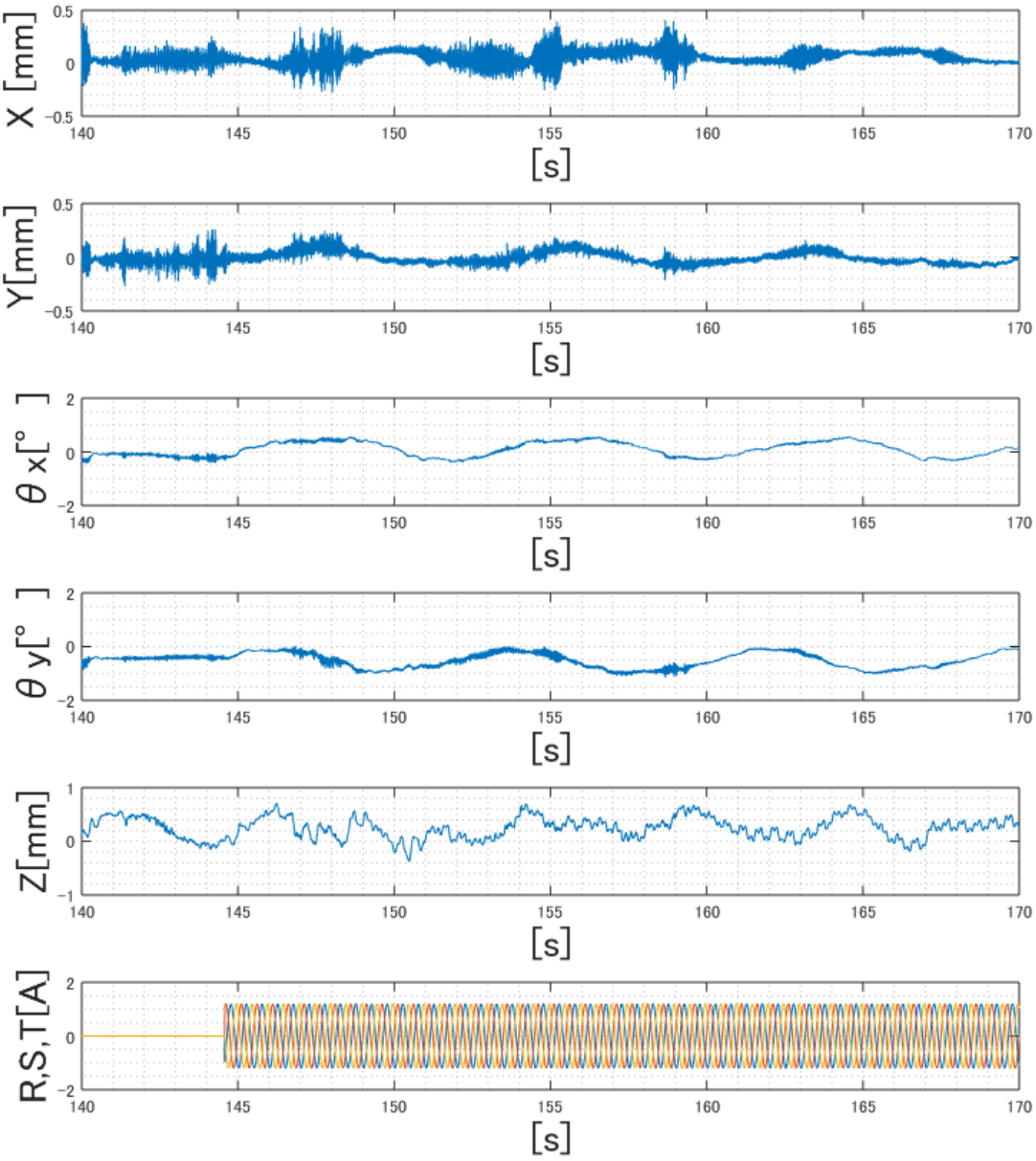

Fig.6.4 The result of rotation control

回転制御を 145 秒付近で開始している．傾き制御のゲインを上げたので，回転子の傾きは非常に落ち着いているように見えるが，高さ方向の変動が大きいことが分かる．これは，第 5 章で示したように回転用電流を流すことによって，Z 軸方向にかかる力の変動が大きくなることに起因すると考えられる．高さ制御のゲインは$K_P = 0$ A/mm $K_D = 0.1$As/mm と設定していた．PID 制御において，D 制御は振動の減衰にかかわっている．そこで，$K_P = 0.25$A/mm $K_D = 0.1$As/mm と PID 制御のゲインを変更し，実験を行った結果を次に示す．

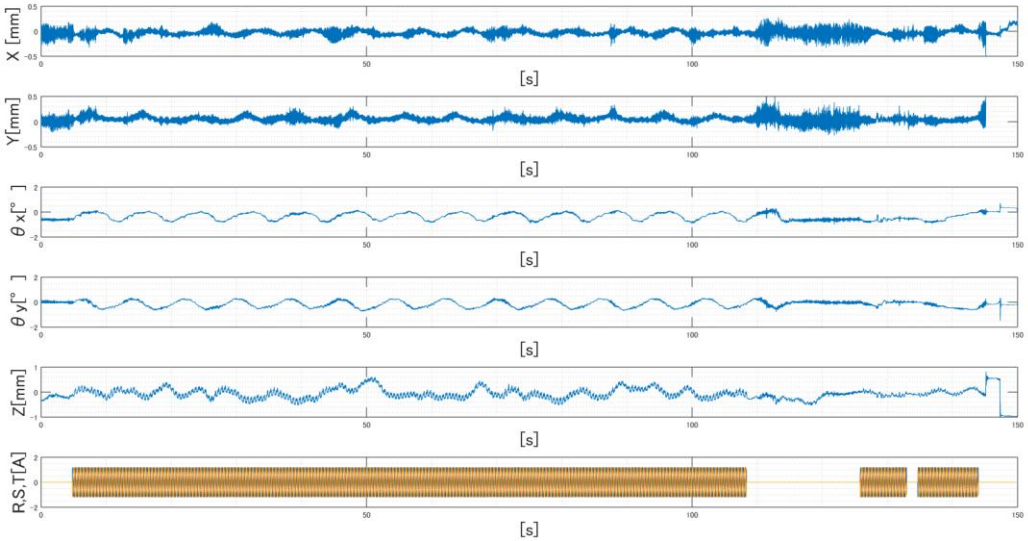

Fig.6.5 The result of rotation control

ゲインの改善により，回転子の傾きが収まっていることが分かる．しかし，先ほどまでは D 制御のみを使用していたため，回転子にはダンピング作用のみが働くことになり，回転子は固定子の電流と回転子に非接触給電されている電流による平衡位置に収まるように制御されていた．つまり，回転子は高さ方向については目標値を持たず，減衰力のみが働いていた．そこに，P 制御を入れることにより，回転子は目標値である 0mm に収束しようとする力が大きく働くことになった．回転電流を流すことで Z 軸方向の吸引力が変わるため，一定の目標値に収束するためには必然的に制御電流が多くなってしまう．そのため，P 制御を用いると回転電流を流しても，制御電流が大きくなることで回転制御電流が回転トルクを生み出す力が相対的に小さくなり，回転子は回転しなくなった．制御電流よりも大きくなるように回転用電流の振幅を大きくすると，Z 軸方向の吸引力も必然的に大きくなるため，使用できる P 制御ゲインを実験的に求めたが，0.25A/mm 以上のゲインでは，回転子が回転しなくなった．

次のグラフに示すのは，高さの P 制御ゲインを 0.8A/mm に設定した場合の実験結果である．回転電流を流しても回転子は安定して浮上していることが分かるが，この状態では回転電流を流しても回転子は回転せず，わずかに正回転と逆回転を繰り返す結果となった．よって，回転制御時に回転電流による影響を受けないように高さ制御をすることは困難であるので，高回転電流に改良を加えた波形を流すことが必要であると考えた．

6.3 新しい回転電流を用いた実験

第５章で示した回転電流を用いて，回転実験を行った．これまでの実験同様の条件にするために，ピーク電流として 1.2A となるように，2A に設定したが回転子の Z 方向の制御ができない状態となったため，従来と同様に回転電流は 1.2A を流すこととした.この時,回転電流として流れる電流は最大で 0.72A である．この時の実験結果を図 6.6 に示す.

回転制御を 212 秒付近から開始している．この時の回転周波数は 5Hz であり，その後 261 秒で 6Hz，274 秒で 7Hz，294 秒で 8Hz と回転速度が回転電流に同期していることを目視で確認しながら回転周波数を 1Hz ステップで上げていった.

回転子の同期を確認するために，実験を撮影したビデオカメラの映像をもとに回転子が 1 周回るのに必要な時間を計測し，それぞれの周波数での平均時間を計算した.. その結果を 6.2 に示す．例えば，回転電流として 5Hz を流した場合，回転子は 1.6 秒で 1 回転する計算となる．しかし，これまでの実験結果などから，不要な安定点の影響で計算の半分の速度でしか回転しないことが分かっていた．今回の実験結果について確認すると，それぞれの周波数において，実験での回転速度は約半分となっていることが分かり，回転子が 8Hz まで回転電流に追従していることが確認できる．この時，回転周波数を 9Hz に上げると回転子は同期しなくなり，その場で止まってしまった.

回転周波数を上げていくにつれて，回転子の水平位置，傾き，高さの変位が大きくなっていることが分かる．よって，回転電流を改良しても，回転子の安定性を改善するには至らなかった.

また、今回の実験で回転電流のピークは 0.72A であったので、歪みのない３相交流電流を 0.72A 流した場合でも実験を行ったが、回転周波数を 1Hz～5Hz に変化させても回転しなかった。

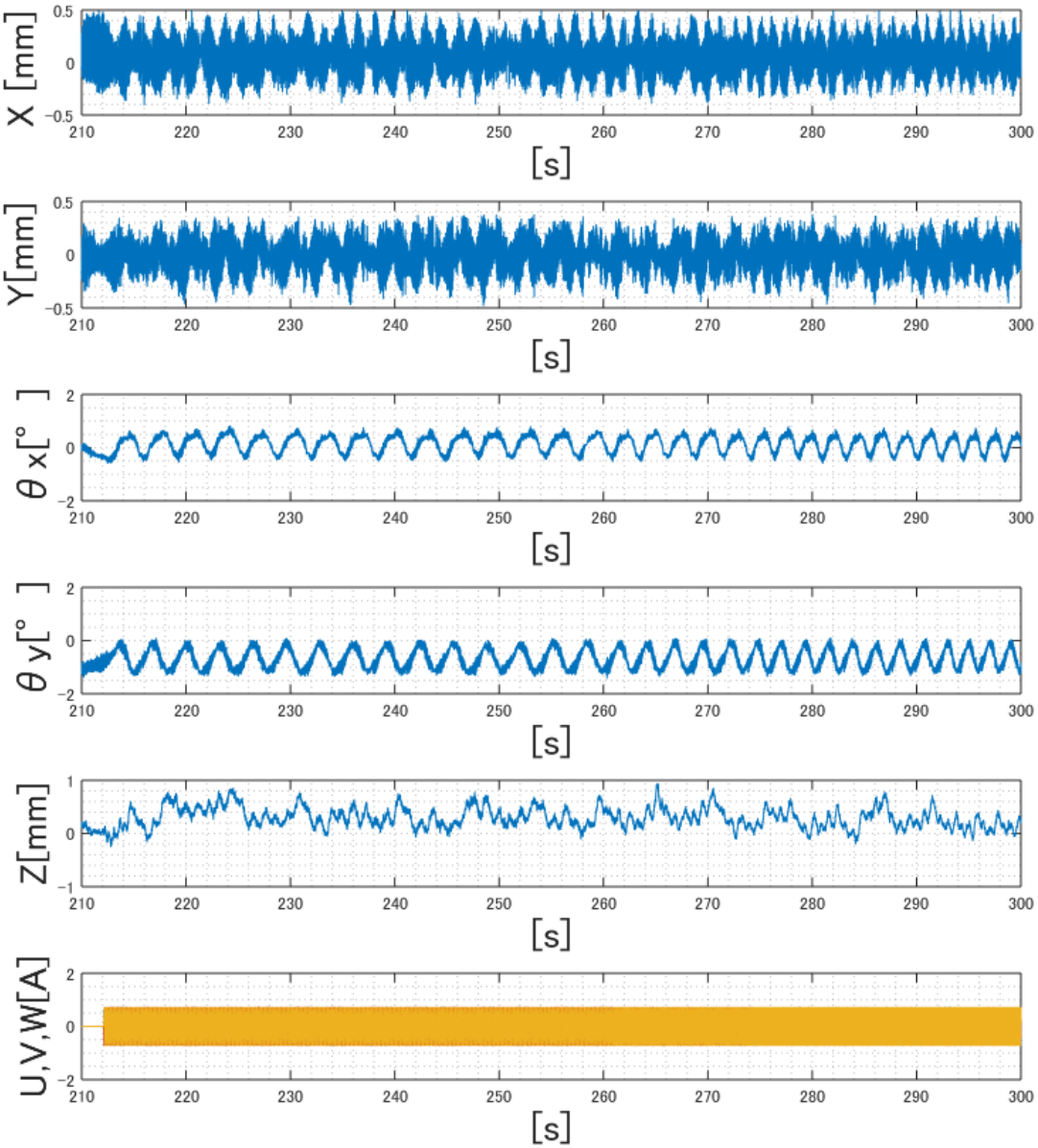

Fig. 6. 6 The result of rotation control

Table. 6. 2 The result of rotation speed

	experiment[s]	calculation[s]
5Hz	3.20	1.60
6Hz	2.65	1.33
7Hz	2.29	1.14
8Hz	2.00	1.00

第７章　結論

7.1 まとめ

本研究では，永久磁石を使用しないことで，利用可能な環境を拡大できる非接触給電を用いたベアリングレスモータを提案し，現在まで研究を行ってきた．

本稿では先行研究にて成功していた回転子の浮上制御に加え，回転制御についての内容を示した．回転制御を行うにあたっては従来使用していた回転子コイルの巻き数がすべて同じ回転子では，磁力の差を設けることができず，回転子の任意の歯を引き寄せる力が弱く，回転制御がうまくできなかった．そこで，回転子コイルの巻き数を交互に変更することで，回転特性が向上することを解析より示し，新しく回転子を製作し，実験を行った．また，回転子コイルの巻き数を交互に変更するだけでは，回転しない原因があったため，回転制御電流を矩形波から sin 波を用いた 3 相交流制御に変更し，さらにその波形自体にも歪みを生じさせることで，実験では，最高で 30rpm の回転速度を得ることができた．

7.2 今後の課題

以上の結果などにより，モータとして本研究のベアリングレスモータは機能することができた．しかし，回転速度はまだまだ遅く，回転子の浮上制御についても不安点が残っている．また，実用化されるには，電力が遮断された時のフューエルセーフ機能など，この方式のベアリングレスモータを実用化するには，まだまだ多くの課題が残っている．その中でも極めて重要なものが小型化である．小型化することで，応用例を増やせることはもちろんのこと，回転子の歯数を減らすことができる．歯数を減らすことで，回転子の歯と歯の間のギャップを大きく設けることができるようになり，不要な安定点をなくすことができると考えられる．また，回転子の構造を見直し，スリットを入れることで回転角の計測ができるように設計し，ベクトル制御を用いることなども提案される．

謝辞

本研究に取り組むにあたり，親身になってアドバイスをくださった岡宏一教授，原田明徳講師にお礼申し上げます．また，同研究室の蒔田和磨君には，解析の手伝いをしてもらい，円滑に研究を進めることができました．ありがとうございました．

そして，６年間大学に通わせてくれた両親に感謝いたします。

参考文献

[1] 進土忠彦，”磁気軸受　基礎と応用”，精密機械学会誌 Vol.78，No.12.2012
https://www.jstage.jst.go.jp/article/jjspe/78/12/78_1054/_pdf

[2]朝間淳一，”ベアリングレスモータの小型化・省電力化”，日本機械学会誌 Vol.116，No.1133，2013
https://www.jsme.or.jp/publish/kaisi/130402t_.pdf

[3] 立花邦彦，“整流コイルを用いたベアリングレスモータの研究”，高知工科大学 博士論文，(2014).

[4] 森光利至，“共鳴給電によるロータ磁化方式ベアリングレスモータ”，高知工科大学 修士論文，(2015).

[5]電気学会磁気浮上技術調査専門委員会(編)，”磁気浮上技術の原理と応用”，
科学情報出版株式会社(2018)

[6]日経 BP 社/日経 BP 出版センター，ワイヤレス給電のすべて:電気自動車/スマートフォンの非接触充電，エネルギー・ハーベスティング，宇宙太陽光発電まで(2011)

[8]電気学会磁気浮上応用技術調査専門委員会（編），”磁気軸受と磁気浮上”コロナ社(1993)

[9]町田燿平，”非接触給電を用いたベアリングレスモータの開発”，高知工科大学　修士論文，(2017)

[10]谷井勲・蒔田和磨・岡宏一・原田明徳 ： 非接触給電を用いたベアリングレスモータの回転方法の検討
電気学会(産業応用部門)，”第 30 回「電磁力関連のダイナミクス」シンポジウム講演論文集”pp374-377

[11]谷井勲・蒔田和磨・岡宏一・原田明徳 ： 非接触給電を用いたベアリングレスモータの性能評価，日本 AEM 学会，”第 27 回 MAGDA コンファレンス in Katsushika -電磁現象および電磁力に関するコンファレンス- 講演論文集”pp378-381