

2018（平成 30）年度 修士学位論文

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-

Development of MC Type Magnetic Levitation System
Using Resonance Type Contactless Power Supply
-Rotation Control System-

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

1215003 小栗 佑斗

指導教員 岡 宏一 原田 明德

目次

1	緒言	1
1.1	背景	1
1.2	磁気浮上機構とは	1
1.3	非接触給電とは	1
1.4	ローレンツ力とは	2
1.5	本研究の概要	3
2	鉛直水平制御機構	4
2.1	本機構の全体図	4
2.2	機構の構成部品	6
2.2.1	永久磁石	6
2.2.2	鉛直制御用電磁石	10
2.2.3	水平制御用電磁石	13
2.2.4	浮上コイル	13
2.2.5	透過型レーザーセンサ	14
2.2.6	反射型レーザーセンサ	15
2.2.7	アクリル板	16
2.2.8	非接触給電	17
2.3	浮上の検討	19
2.4	制御方法	21
2.5	センサの測定原理	21
2.6	制御システムの概要	23
2.7	実験装置の構成	23
2.7.1	パワーアンプ(電磁石用)	23
2.7.2	直流電源(パワーアンプ用)	25
2.7.3	ADコンバータ	25
2.7.4	コントローラ	26
2.7.5	直流電源(センサ用)	26
2.8	制御実験	27
2.8.1	鉛直制御実験	27
2.8.2	水平制御実験	28
2.8.3	電磁石の性能実験	30
2.9	まとめ	34
3	回転制御機構	35
3.1	機構の全体図	35
3.2	機構の構成部品	38
3.2.1	永久磁石	38
3.2.2	制御用電磁石	39
3.2.3	浮上体	40
3.2.4	センサ	40

3.2.5	アクリル板.....	41
3.2.6	非接触給電.....	41
3.3	制御方法.....	42
3.4	センサの測定原理.....	43
3.5	制御システムの概要.....	44
3.6	実験装置の構成.....	45
3.7	制御実験.....	45
3.7.1	鉛直制御実験.....	45
3.7.2	水平制御実験.....	45
3.7.3	回転制御実験.....	46
3.7.4	実験結果.....	46
3.8	まとめ.....	47
4	結言.....	47
5	今後の課題.....	48
	参考文献.....	49
	謝辞.....	50

1 緒言

1.1 背景

磁気浮上システムは、磁気の利用して非接触で物体を支持できる機構であり、機械的な接触がないため、摩擦、潤滑、塵埃などの問題を解決できる可能性がある。このため、具体的な使用例として工場での磁気浮上搬送装置や磁気浮上列車（リニアモーターカー）、分子ターボポンプの磁気軸受け、真空中やクリーンルーム等の特殊環境でよく利用されている。

非接触給電は、非接触で電力を供給する技術の事であり、防水性を重視する環境下において、端末の露出を減らせることや、決まった配置や設定で充電をする必要がないこと、電源コネクタを抜き引きする必要がないことから、塵埃による接触不良、漏電を防ぐ目的で、電動歯ブラシやコードレス電話機等の製品にすでに利用されている [1]。また、近年では電気自動車の発達に伴って、駐車時に地面に設置されたコイルから、車載に搭載されたコイルに電気エネルギーを供給するような技術等が果敢に研究・開発されている [2]。

1.2 磁気浮上機構とは

磁気浮上機構は、磁石の反発力や吸引力を利用した機構で、電磁石による浮上力を用いた機構がほとんどである。電磁石を用いる場合、流れる電流値によって、磁力の強弱を生み出すことが容易であり、力の調整が簡単だからである。しかし、常に電流を外部から供給する必要があるため、塵埃等の発生を低減させる点を考慮すると、クリーンルーム等での使用は望ましくない [1]。

また磁気浮上システムは、アナログレコードのカートリッジ等で、MM(Moving Magnet)型とMC(Moving Coil)型によく分類される [3]。これは電気エネルギーを発電する際に、磁界の向きを変化させるのか、電流の向きを変化させるか分けられるからである。その分類は、表1のようになる。

Table 1 磁気浮上システムの分類

MM(Moving Magnet)型	MC(Moving Magnet)型
・磁石が移動する	・コイルが移動する
・コイルは固定される	・磁石は固定される

1.3 非接触給電とは

一般的に電気機器を使用する際は、電源ケーブルを使用して外部から電力を供給する必要がある[4]。非接触給電は電源ケーブルを使わずに離れた距離から機器に非接触で電力を供給できる電力供給方法である。電力伝送や充電する際に、電源ケーブルが不必

要なため、断線の恐れや水による漏電，塵埃等から防ぐことが可能であり，様々なものに実用化・製品化されている．非接触給電による電力供給方法は，電磁誘導方式，電磁界共振方式，電磁波方式等があり，盛んに研究されている．それぞれの方式に対して，表2のような特徴がある．

Table 2 非接触給電の給電方式とその特徴[4]

	電磁誘導方式	磁界共鳴方式	マイクロ波放電（電磁波）方式	
用途	携帯型電子機器・電気自動車・産業機器		センサ 携帯電話	宇宙太陽発電衛星
利用周波数	数十 kHz～ 100kHz	100MHz 前後	2.4GHz, 5.8GHz	
伝送距離	数 mm～ 10cm 程度	1m～2m 程度 (理論上では数百 m まで可能)	数メートル	数万キロ
送信電力	数 W～50kW	数 mW～数 kW	mW	GW
伝送効率	高い	低い	低い	高い
メリット	高効率の電力を安定し 伝送可能	数メートルの距離 で伝送可能	一度に多数の機 器に送電可能	大電力を長距離輸 送可能
デメリット	伝送距離が短い コイルの位置(向き)が ずれると効率が低下	コイルの距離が変 化すると効率が低 下する	伝送効率が悪い	システムの規模が大 きい

1.4 ローレンツ力とは

図1が示すように，磁場中に垂直に置いた導線に電流を流すと，導線に力が働く．電流は，導線内の電荷をもつ粒子（荷電粒子）が移動する状態であり，導線内を動く荷電粒子が受ける力の総和をローレンツ力という．

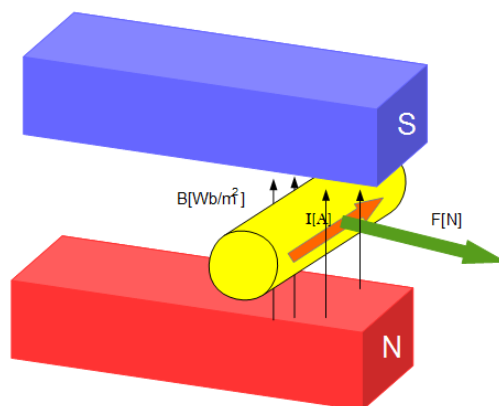


Fig. 1 ローレンツ力

1.5 本研究の概要

本研究の最終目標は、磁気を用いた機構を完全非接触で浮上させ、且つ非接触給電の技術を利用し、電力伝送機能をもった機構を開発することである。磁気による浮上力の発生方法は、永久磁石の磁性や電磁石の吸引力を利用したものなど様々な方法があるが、本研究では応用例の少ないローレンツ力を利用した磁気浮上システムを提案する。応用例が少ない理由としては、ローレンツ力を利用した磁気浮上システムは浮上力を得ることが難しいからである。ローレンツ力を利用するにあたって、浮上物に電流を供給する必要があるが、完全非接触で浮上する磁気浮上システムの提案を目標としているため、電源ケーブルなど電流を流す配線を用いることはできない。そこで、非接触で電力を送電できる磁界共鳴方式を用いて電力を送電する方法を採用した。また、今回使用した磁気浮上システムは、磁石を浮上させるより、コイルを浮上させたほうが軽くて浮上が容易である点、また非接触給電に基づいた電力で浮上させる際により低電力で済むという点で、MC(Moving Coil)型を採用した。

先行研究では、鉛直制御と水平制御が可能な機構を製作し、その機構を使って鉛直方向の浮上実験と、鉛直方向と水平方向を合わせた浮上実験を行った。結果として、非接触給電を用いた電力を使い、浮上物を任意の点に浮上させることに成功した[5]。2章ではその結果に加え、その機構の概要、制御方法、電磁石の特性を示す新たな実験結果を示す。次に、鉛直方向の制御と水平方向の制御が実現できたことから、新たに回転方向の制御が可能ではないかと考えた。そのため、非接触給電から得た電力に基づいて発生させたローレンツ力を用いて、新たに回転制御を行う磁気浮上システムに着目し、非接触浮上実験を行った。3章ではその回転制御機構の概要、制御方法、実験結果を示す。

2 鉛直水平制御機構

2.1 本機構の全体図

提案する鉛直水平浮上機構のモデルを図2に示す。鉛直水平浮上機構は主に、永久磁石、電磁石、浮上コイル、送電側コイル、受電側コイル、送電側回路、受電側回路から構成される。浮上コイルの両側には永久磁石と電磁石が配置される。中央には、非接触給電の送電側コイル、送電側回路、受電側コイル、受電側回路が配置される。電力は、送電側コイルと受電側コイル間で、非接触で供給する。得られた電力は、整流回路により直流に変換され、浮上コイルに直流の電流を流す。浮上コイルに流れる電流と永久磁石間ではローレンツ力が発生し、受電コイル、受電回路、浮上コイルの重力と釣り合う浮上力を得る。また、電磁石の電流を制御することで、その間に働くローレンツ力を調整し、コイルの浮上位置を安定化させる。

機構を鮮明に示すため、鉛直水平浮上機構のイラストを図3に示す。また、実際に制作した鉛直水平浮上機構の写真を図4に示す。図3、図4のように、実際の機構には図2の要素をアクリル板の上に配置し、浮上させた位置を読み取るためのセンサが配置される。

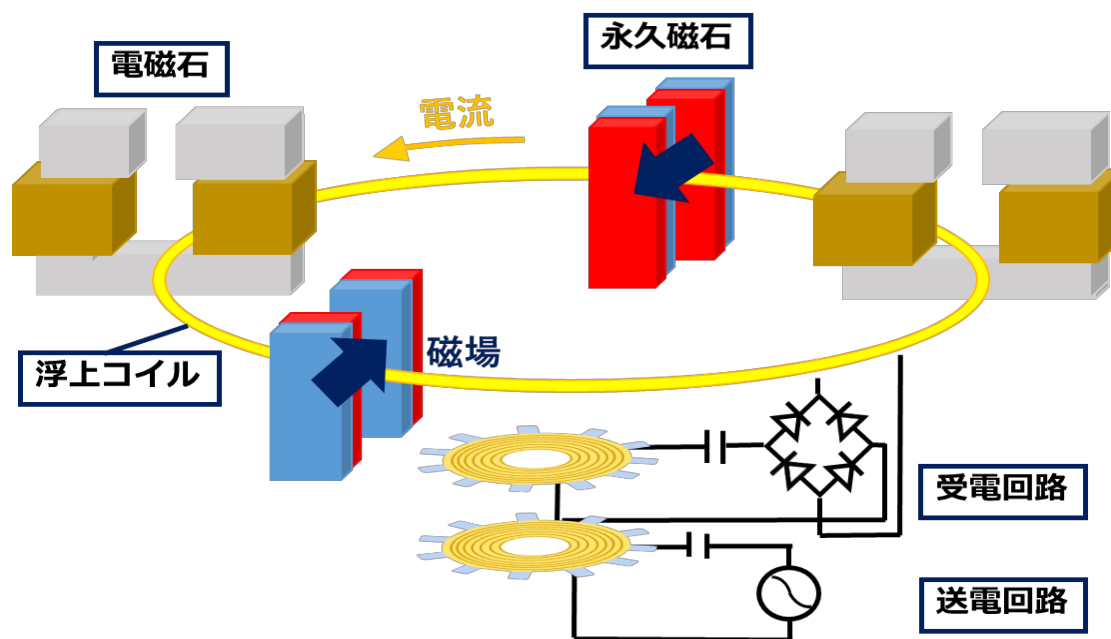


Fig. 2 鉛直水平浮上機構のモデル図

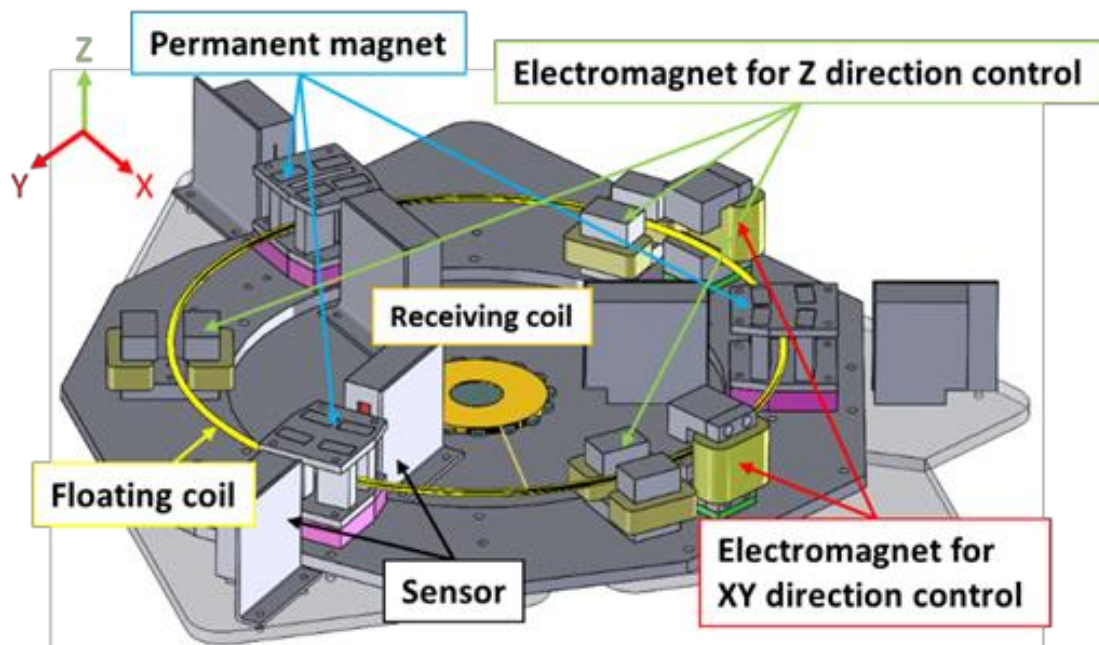


Fig. 3 鉛直水平浮上機構のイラスト図

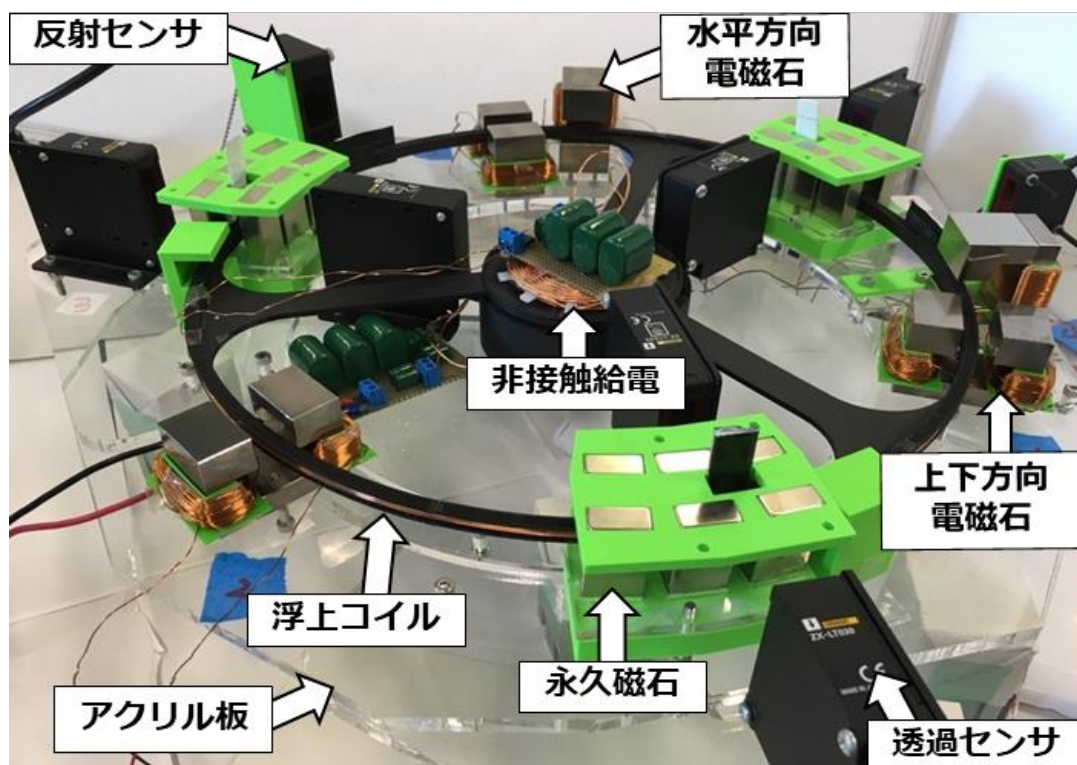


Fig. 4 製作した鉛直水平浮上機構

2.2 機構の構成部品

2.2.1 永久磁石

今回使用した永久磁石の写真を図 5 に示す。また永久磁石の図面を図 6 に示す。永久磁石は縦 10mm、横 20mm、高さ 40mm、着磁方向 10mm の角型のネオジム磁石を 18 個使用している。内訳として、6 個の永久磁石を組み合わせ、図 5 のようにアクリル板と 3D プリンタで製作した治具に固定したものを 120 度毎に 3 箇所配置している。

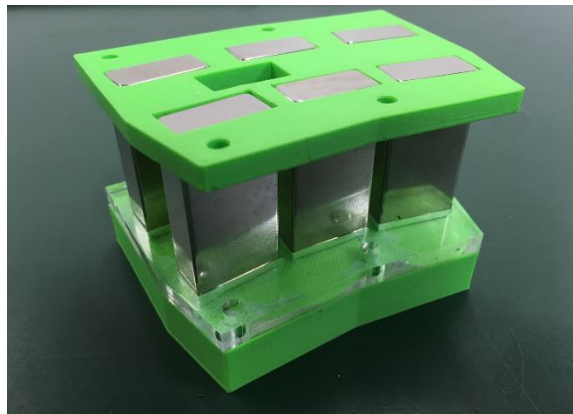


Fig.5 製作した永久磁石

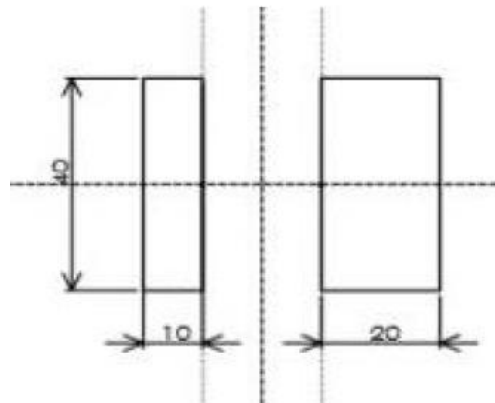


Fig.6 永久磁石の図面

以下では今回使用した永久磁石の特性と、この永久磁石を用いたときに発生するローレンツ力の向きを示す。

2つの永久磁石間の磁力線を図 7 示す。永久磁石間では、一方の永久磁石の N 極から出た磁力線は、他方の永久磁石の S 極に向かう。しかし、永久磁石の上端と下端では、永久磁石の N 極から出た磁力線は同じ永久磁石の S 極に向かう。

図 8 は、永久磁石の着磁方向の幅を 10[mm]から 60[mm]まで 10[mm]毎に変化させたときの磁力線の向きを解析したものである。高さ方向は 40[mm]と一定とした。図 8 より、着磁方

向の幅を大きくすると、永久磁石間の磁力線の数が多くなるが、永久磁石の上端および下端では、磁力線の数が少なくなることがわかった。従って、着磁方向の幅を大きくすると、永久磁石間の磁力は大きくなるが、永久磁石の上端および下端では、磁力が小さくなることが考えられる。

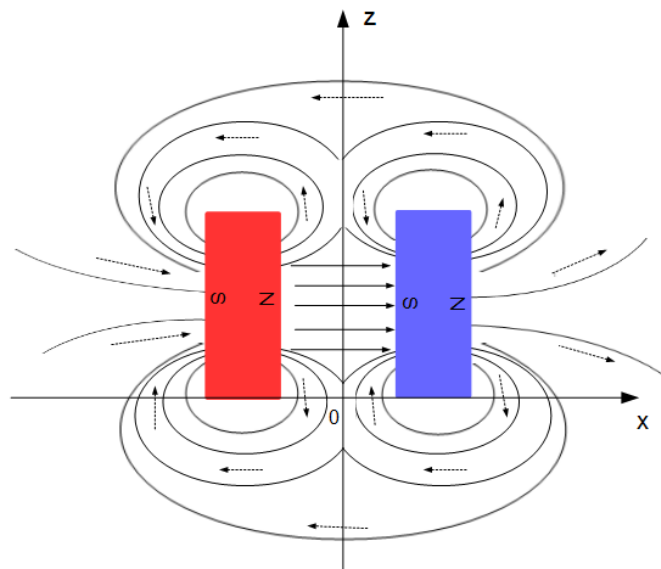


Fig. 7 永久磁石間の磁力線

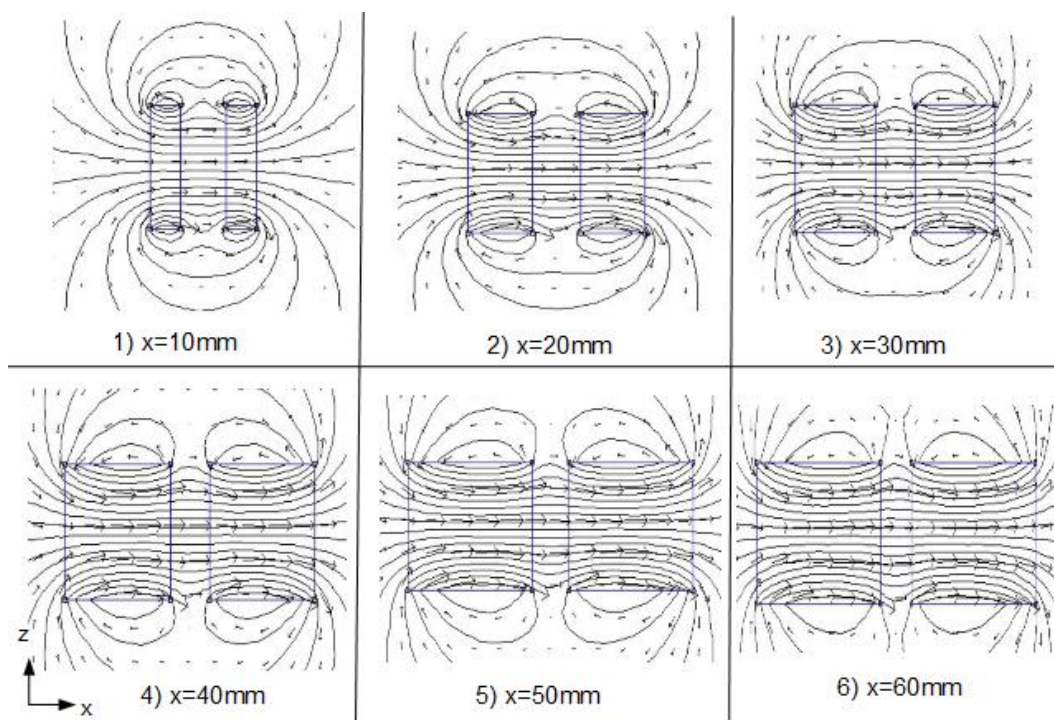


Fig. 8 永久磁石の着磁方向を変化させたときの磁力線の変化

図9は、磁場の向き B 、各コイルの位置とコイルに働くローレンツ力の向き F の関係を示す。コイルに流れる電流は、紙面垂直方向、奥から手前に流れている。磁石間の磁場の向きは位置によって異なるため、コイルを配置した位置によって発生するローレンツ力の向きは異なると考える。

コイルが永久磁石上端かつ x 軸負側または、永久磁石の下端かつ x 軸正側に配置されている場合、磁場 B は x 軸負方向と z 軸正方向の合成した向きが発生しているため、ローレンツ力 F は、 x 軸負方向かつ z 軸負方向の合成した向きに発生する。

また、コイルが永久磁石の下端かつ x 軸負側または、永久磁石の上端かつ x 軸正側に配置されている場合、磁場 B は x 軸正方向かつ z 軸負方向の合成した向きに発生しているため、ローレンツ力 F は、 x 軸正方向かつ z 軸負方向の合成した向きに発生する。

コイルが z 軸上に配置されている場合、永久磁石の上端と下端では、磁場 B は x 軸負方向に発生しているため、ローレンツ力 F は、 z 軸負の方向に発生する。永久磁石間では、磁場 B は x 軸正方向に発生しているため、ローレンツ力 F は z 軸正方向に発生する。

先行研究では、試作した磁気浮上機構の永久磁石をモデル化して、永久磁石がつくる磁場 B とコイルの位置によって、発生するローレンツ力の向きを解析した。図10は、永久磁石の上端部でのローレンツ力の向きと大きさの解析結果を示す。永久磁石間では、約 $0.26[\text{N}]$ のローレンツ力が発生していることがわかり、コイルが z 軸上に配置されているとき、永久磁石の上端から $2[\text{mm}]$ で発生するローレンツ力の z 成分が正から負へ 180° 反転することがわかっている。また、図11は、永久磁石の下端部でのローレンツ力の向きと大きさの解析結果を示す。結果より、永久磁石の下端から $2[\text{mm}]$ で発生するローレンツ力の z 成分が、正から負へ 180° 反転することがわかった。

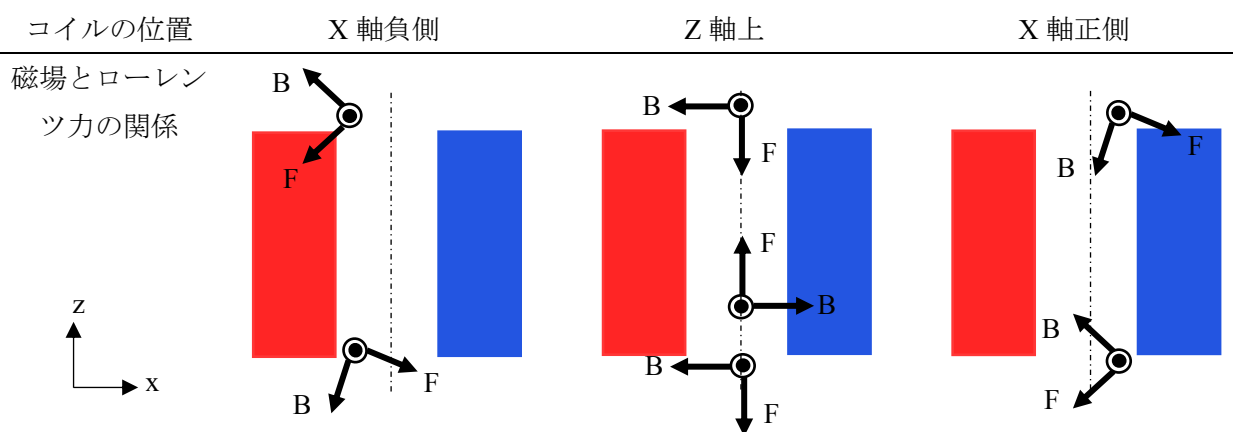


Fig. 9 磁場とローレンツ力の関係

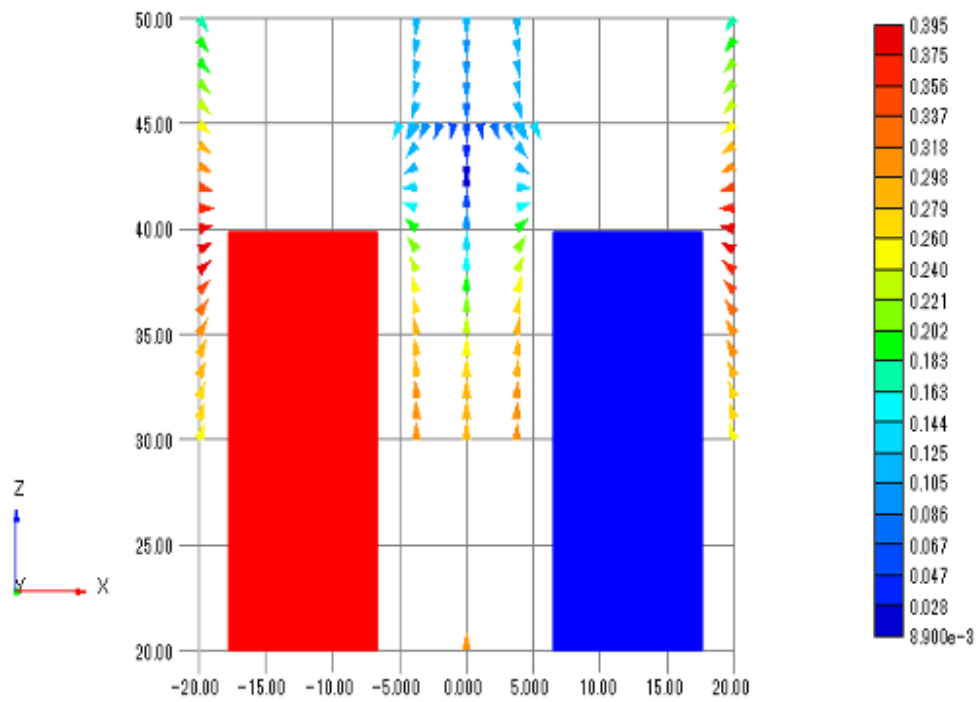


Fig. 10 永久磁石の上端部で発生するローレンツ力の解析結果[N]

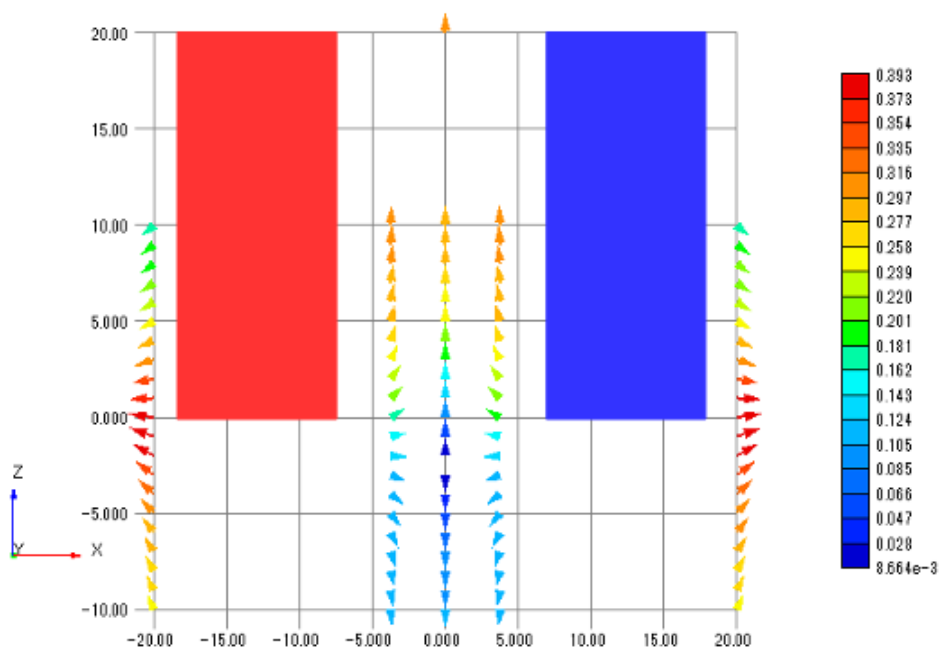


Fig. 11 永久磁石の下端部で発生するローレンツ力の解析結果[N]

2.2.2 鉛直制御用電磁石

実際に制作した鉛直制御用電磁石の写真を図 12 に示す。また、電磁石の鉄心の図面を図 13、図 14 に示す。この電磁石は SS400 で製作された鉄心に、3D プリンタで製作されたボビンを 2 個組み合わせ、そのボビンに銅線(UEW 線, 直径 0.5mm)を 150 回巻いている。この電磁石が 120 度毎に 3 箇所配置されている。

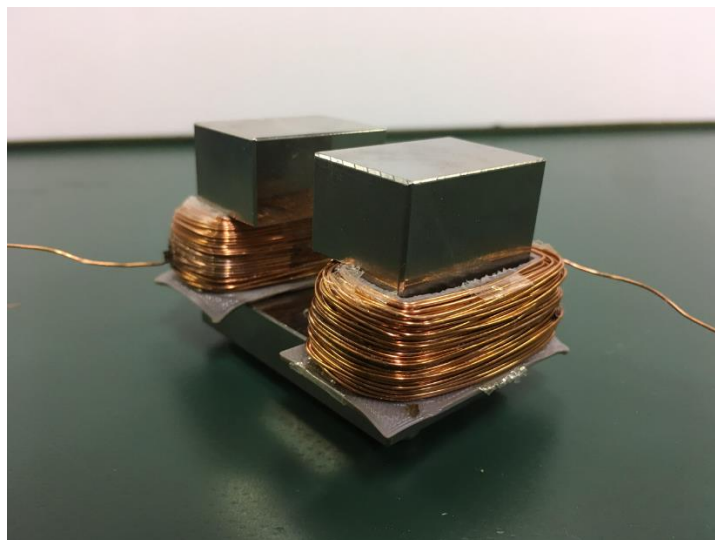


Fig. 12 製作した鉛直制御用電磁石

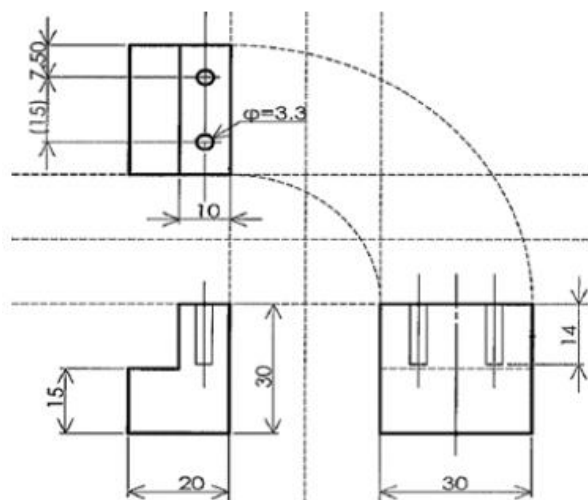


Fig. 13 鉛直制御用電磁石の図面 1

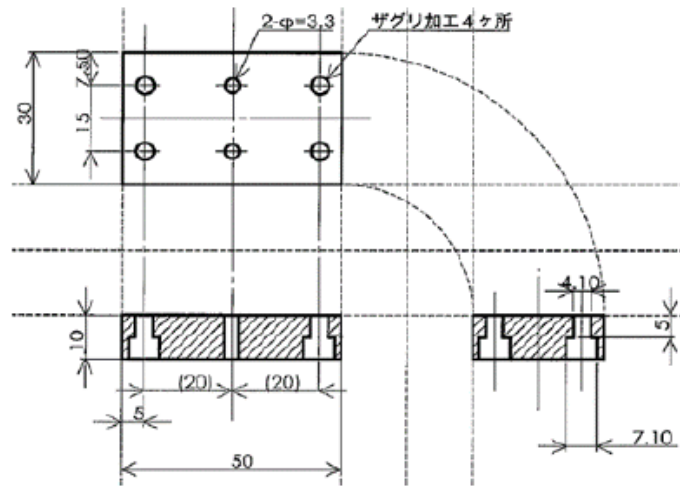


Fig. 14 鉛直制御用電磁石の図面 2

以下ではこの電磁石の特性を示す.

この電磁石によって発生するローレンツ力を, 磁界解析ソフト JMAG を用いて解析した. 解析の電磁石のモデルを図 15 に示す, また解析条件を以下に示す.

- ・ 浮上コイルの電流 : 1A
- ・ 図 7 に示す $Z=0\text{mm}$ の X 軸上に $0\sim 40\text{mm}$ までの 5mm 間隔で解析を行う.
- ・ 電磁石のコイルおよびコイルの電流 : 150 回巻 1A
- ・ 電磁石の磁極間距離 : 15mm と 30mm の 2 種類

解析の結果を図 16 に示す. 図 16 のように, 発生するローレンツ力は比較的小さいものであり, 発生力は磁極の中心部(20mm)で最も大きくなった. よって, この部分を浮上の平衡位置に設定することが適切である. 浮上支持力は永久磁石のローレンツ力で発生させ, 電磁石の発生力は浮上制御のために用いる. このことを考えるとこれらの発生力は十分である. しかし制御性能の向上を考慮し, より発生力が大きい磁極の空隙距離が 15mm のものを採用している.

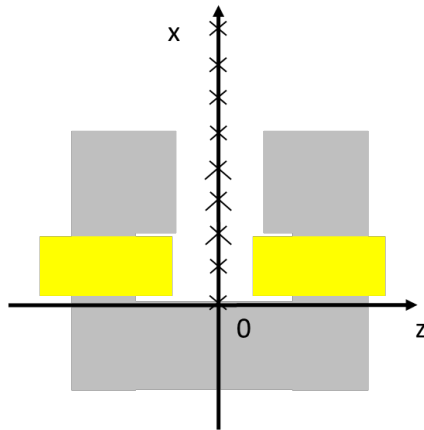


Fig. 15 解析の電磁石のモデル

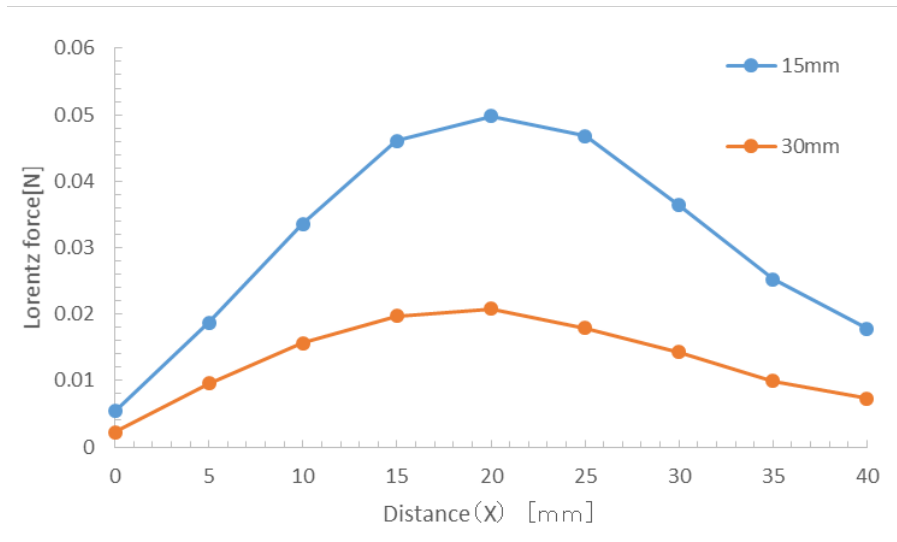


Fig. 16 解析結果

2.2.3 水平制御用電磁石

実際に制作した水平制御用電磁石の写真を図 17 に示す。また、電磁石の鉄心は鉛直制御用電磁石と同じである。この電磁石は SS400 で製作された鉄心に、3D プリンタで製作されたボビンを組み合わせ、そのボビンに銅線(UEW 線、直径 0.5mm)を 200 回巻いている。この電磁石が 90 度毎に 2 箇所配置されている。

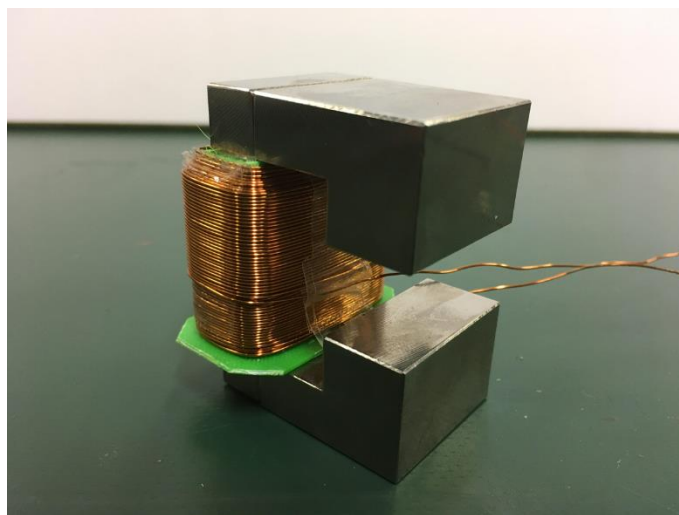


Fig. 17 製作した水平制御用電磁石

2.2.4 浮上コイル

浮上コイルのイメージ図を図 18 に、実際に制作した浮上コイルの写真を図 19 に示す。浮上コイルは 3D プリンタで制作したボビンに、銅線(UEW 線、直径 0.5mm)を 50 回巻いている。形状は、直径 340[mm]の円形である。ボビンに銅線を巻いている理由として、銅線のみで構成してしまうとコイルにたわみが生じてしまい、センサの計測箇所によって浮上点が異なってくるからである。また、ボビンの中央部に非接触給電を取り付ける箇所を設けることによって、浮上コイルと非接触給電の受電部を共に浮上させることができ、電力伝送機能を持った磁気浮上システムとして機能させることを可能にしている。

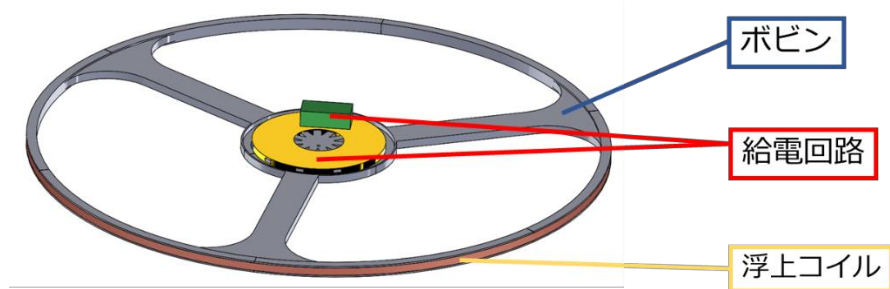


Fig. 18 浮上コイルのイメージ図



Fig. 19 製作した浮上コイル

2.2.5 透過型レーザーセンサ

使用した透過型レーザーセンサを図 20 に示す. 透過型レーザーセンサは, OMRON 社の形 ZX-LDA11-N スマートセンサを 4 つ, 形 ZX-LT030 透過型センサヘッドを 4 つ使用した. 仕様の詳細を表 3 に示す.



Fig. 20 透過型レーザーセンサ

Table 3 センサとアンプの仕様

型番	センサユニット部		アンプユニット部
	ZX-LT030	ZX-LT-010	ZX-LDA11-N
電源電圧	DC12~24 ± 10%		
消費電力	3.4W 以下 (電源電圧 24V 時, 消費電流 140mA 以下)		
検出距離	0~500mm		-
検出幅	30mm	10mm	-
最小検出物体	φ=0.3mm 不透明物体	φ=0.1mm 不透明物体	-
質量	約 450g	約 220g	約 350g
分解能	12μm	4μm	
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		

2.2.6 反射型レーザーセンサ

使用した反射型レーザーセンサを図 21, 図 22 に示す. 反射型レーザーセンサは, OMRON 社の形 ZX-LD40 レーザー変位センサを 1 つ, KEYENCE 社のセンサヘッド LB-040 を一つ使用した. 仕様の詳細を表 4 に示す.



Fig. 21 反射型レーザーセンサ 1



Fig. 22 反射型レーザーセンサ 2

Table 4 反射型センサの仕様

型番	OMRON 社	KEYENCE 社
	ZX-LD40	LB-040
検出距離	40mm	40mm
検出幅	±10mm	±5mm
分解能	2μm	2μm

2.2.7 アクリル板

アクリル板は、縦 450mm、横 450mm、厚さ 8mm のアクリル板を、図 23 のように加工した。このアクリル板の上に機構の部品を取り付けた。

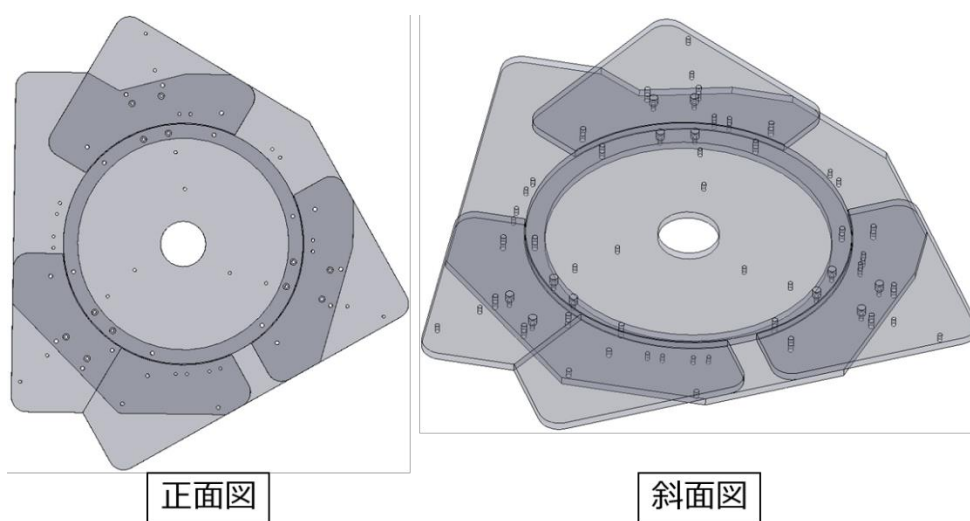


Fig. 23 アクリル板のイメージ図

2.2.8 非接触給電

今回使用した非接触給電の写真を図 24 に示す。非接触給電は、送電側回路と受電側回路に分けられる。送電側回路は送電コイルとコンデンサ、受電側回路は受電コイル、コンデンサ、ブリッジダイオードと浮上コイルで構成される。コンデンサはメタライズドポリプロピレンフィルムコンデンサ、ダイオードはショットキーバリアダイオードを用いた。コイルは、3Dプリンタで製作されたボビンに、直径 0.3[mm]のリッツ線 7 本撚りを用い、50 回スパイダー巻きで巻いている。また各コイルのインダクタンス、コンデンサの容量を表 5 に示す。

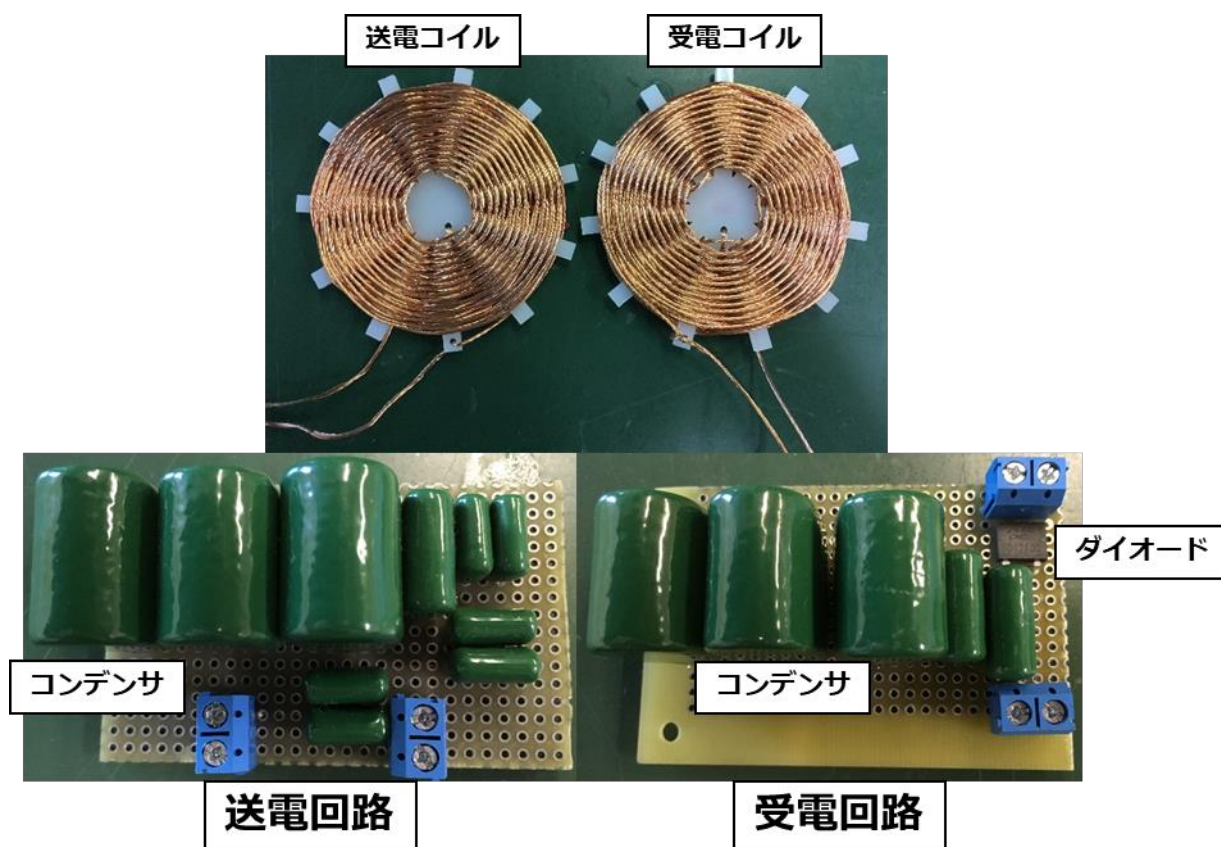


Fig. 24 使用した非接触給電

Table 5 LCR メータ測定値

	コイルのインダクタンス[μH]	コンデンサの容量[μF]
送電側	101.48	3.16
受電側	103.02	3.20

回路図を図 25 に、回路図の諸元を表 6 に示す。交流電圧を送電側回路に印加することで、受電側コイルには磁界共鳴方式により、交流の電力が供給される。浮上コイルには、一方向の電力が供給されるように、ブリッジダイオードを用いた。浮上コイルに全波整流が流れる

ことで、浮上コイルの周囲に配置された磁石間で一定のローレンツ力が発生し、受電側回路の浮上が実現される。回路で使用するコンデンサの容量と印加する交流電圧で用いる周波数と電圧は理論式より次のように求められる[6].

式(1)は、受電側回路の浮上コイルに最大電力が供給できる条件である。まず、コンデンサの容量を決定した。コンデンサの容量は、式(1)と式(2)を用いて、式(3)のように解き決定した。次に、共振周波数を式(4)より求めた。

電源電圧は式(7)を用いて求めた。また、この際、電源の内部抵抗を R_0 と置き、送電側コイルの測定した抵抗と同値とした。浮上コイルに供給する電流値は1.0[A]と仮定した。これらより、共振周波数は8.6[kHz]、電源電圧は6.6[V]を浮上コイルに印加する。

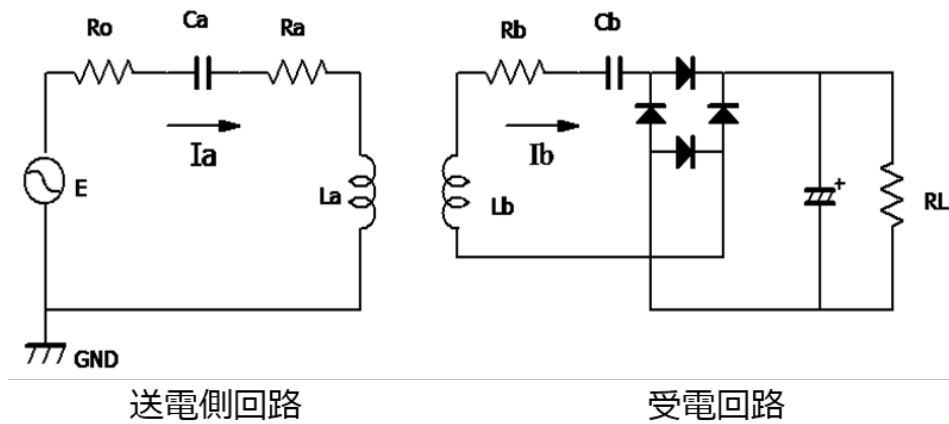


Fig.25 装置全体の回路図

Table 6 回路図の諸元

名称	記号
交流電圧	E
内部抵抗	R_0
送電用コンデンサ	C_a
送電側コイルのインダクタンス	L_a
送電側コイルの抵抗	R_a
送電側回路に流れる電流	I_a
受電側コイルのインダクタンス	L_b
受電側コイルの抵抗	R_b
受電用コンデンサ	C_b
受電側回路に流れる電流	I_b
浮上コイルの抵抗	R_L

$$\omega L = R_L \quad (1)$$

$$\omega = \frac{1}{\sqrt{LC}} \quad (2)$$

$$C = \frac{L}{R_L^2} \quad (3)$$

$$f_0 = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} \quad (4)$$

$$NOP = \frac{R_L k^2 \omega_0^2 L_a L_b}{\{(R_0 + R_a)(R_L + R_b) + k^2 \omega_0^2 L_a L_b\}^2} \quad (5)$$

$$W_{RL} = I^2 R_L \quad (6)$$

$$E = \sqrt{\frac{W_{RL}}{NOP}} \quad (7)$$

2.3 浮上の検討

式(8)は浮上コイルと受電回路が浮上するために必要なローレンツ力との関係を表している。 m_{b1} は受電コイルの重さ、 m_{b2} は受電回路の重さ、 M は浮上コイルの重さ、 g は重力加速度を表している。式(8)より受電回路を浮上させるために、浮上コイルと永久磁石の間では約 2.1[N]以上のローレンツ力が必要であることがわかる。

$$F \geq (m_{b1} + m_{b2} + M)g \times 10^{-3} \quad (m_{b1} + m_{b2} + M = 215) \quad (8)$$

次に浮上コイルと受電回路を浮上させるローレンツ力を発生させるために必要な、浮上コイルに流れる電流値を求めた。

電磁解析ソフト JMAG を用いて、永久磁石と浮上コイルに流れる電流の間に生じるローレンツ力の大きさを求めた。解析モデルを図 26 に、また解析条件を次に示す。

- ・永久磁石を 12 個
- ・浮上コイルは銅線(直径 0.5[mm], 50 回巻)
- ・浮上位置は永久磁石下から 20[mm]
- ・浮上コイルの電流値は最大 2.0[A]を 0.1[A]毎

解析結果を図 27 に示す。解析結果より、約 1.15[A]以上の電流値を浮上コイルに流せば、浮上コイルと受電回路が浮上できることがわかる。

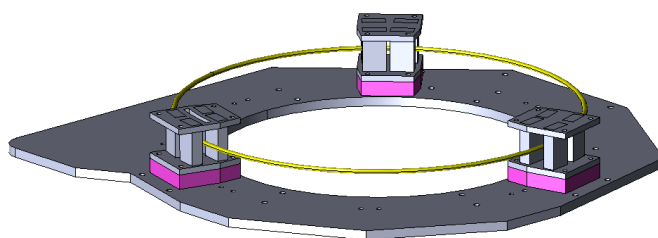


Fig.26 解析モデル

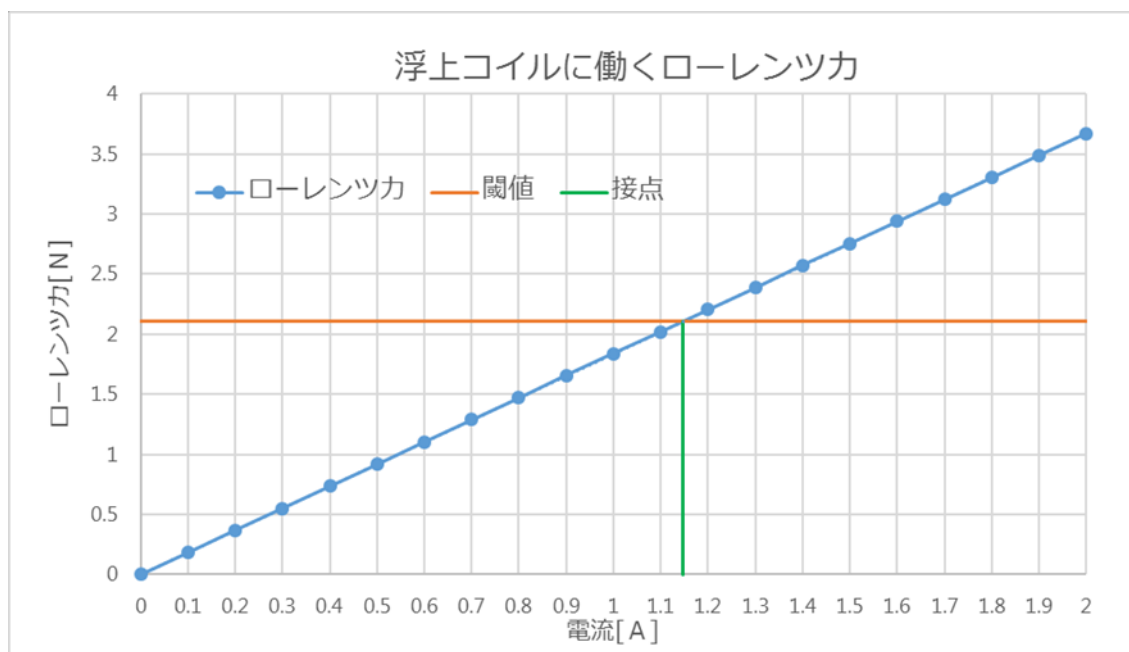


Fig.27 解析結果

2.4 制御方法

永久磁石間ではローレンツ力は常に鉛直方向に働くため、浮上コイルの重力とローレンツ力がつりあう位置でコイルの浮上位置が安定する。しかし、永久磁石の浮上力と重力だけでは能動制御ができないため、図 28 に示す電磁石を用いて、鉛直方向および水平方向の安定化を行うものとする。

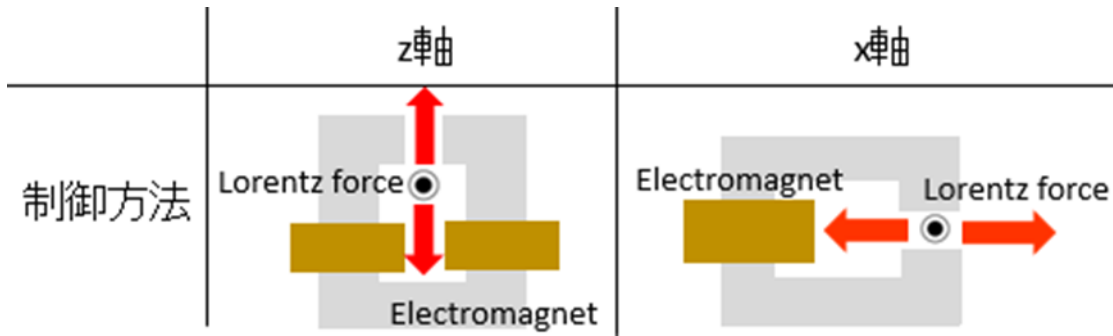


Fig. 28 制御方法

2.5 センサの測定原理

図 29 のように、浮上コイルが巻かれているボビンに、鉛直方向の浮上位置を読み取るための遮蔽物 3 つ、水平方向の位置を読み取るための遮蔽物 2 つを取り付けた。

鉛直方向の読み取りは、図 30 のように透過型センサによって受光量の変化を鉛直方向の浮上位置の変化として読み取る。

水平方向の読み取りは、図 31 のように反射型センサによって反射の距離の変化を水平方向の変化として読み取る。

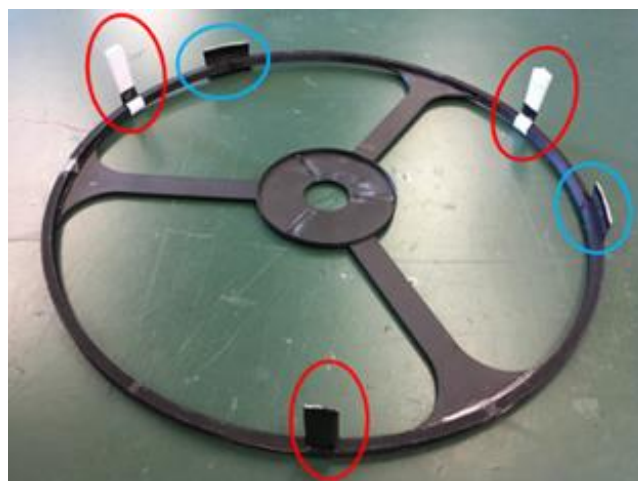


Fig.29 遮蔽物の取り付け

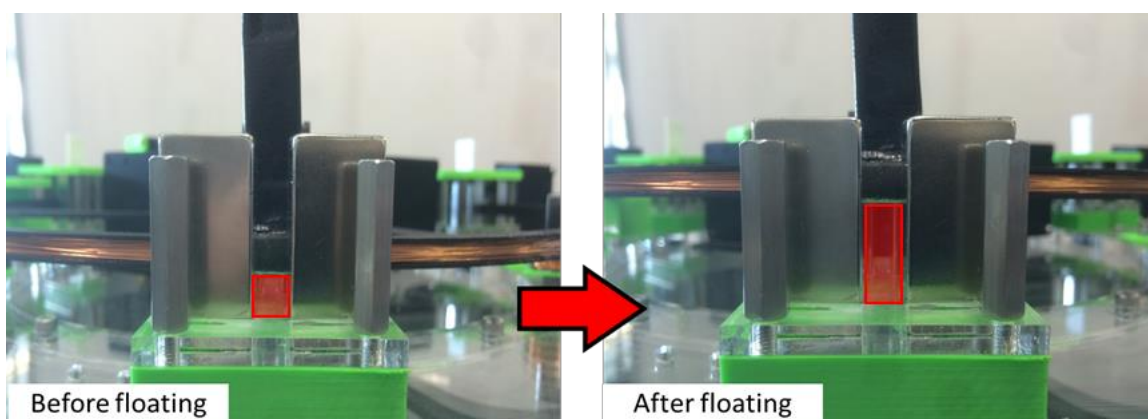


Fig.30 透過型センサの読み取り

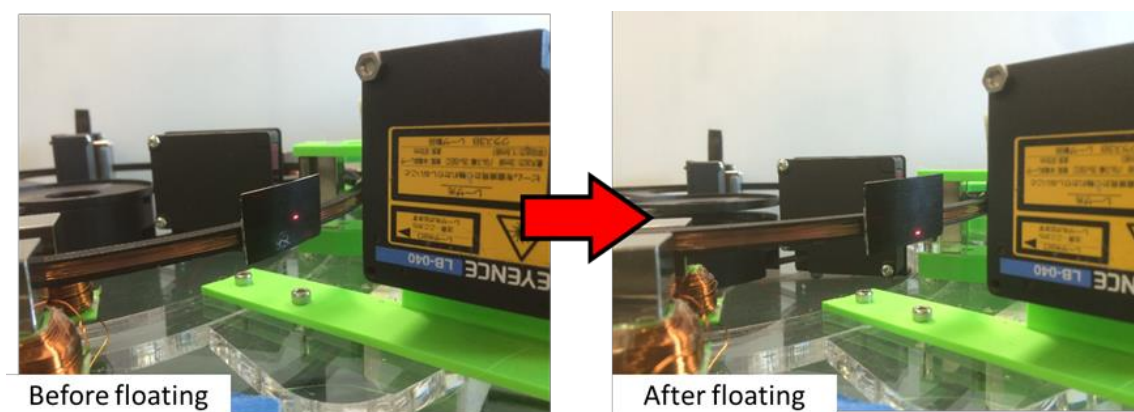


Fig.31 反射型センサの読み取り

2.6 制御システムの概要

鉛直水平制御のシステムを図 32 に示す。永久磁石付近の浮上コイルの浮上位置をセンサで計測する。各センサで計測された値は、A/D コンバータでデジタル化され、DSP ボードを介し、PC に取り込まれ、MATLAB/Simulink のプログラムにより、計算処理される。計算処理された値は DSP ボードを介し、アンプにより増幅された電流が各電磁石に供給される。

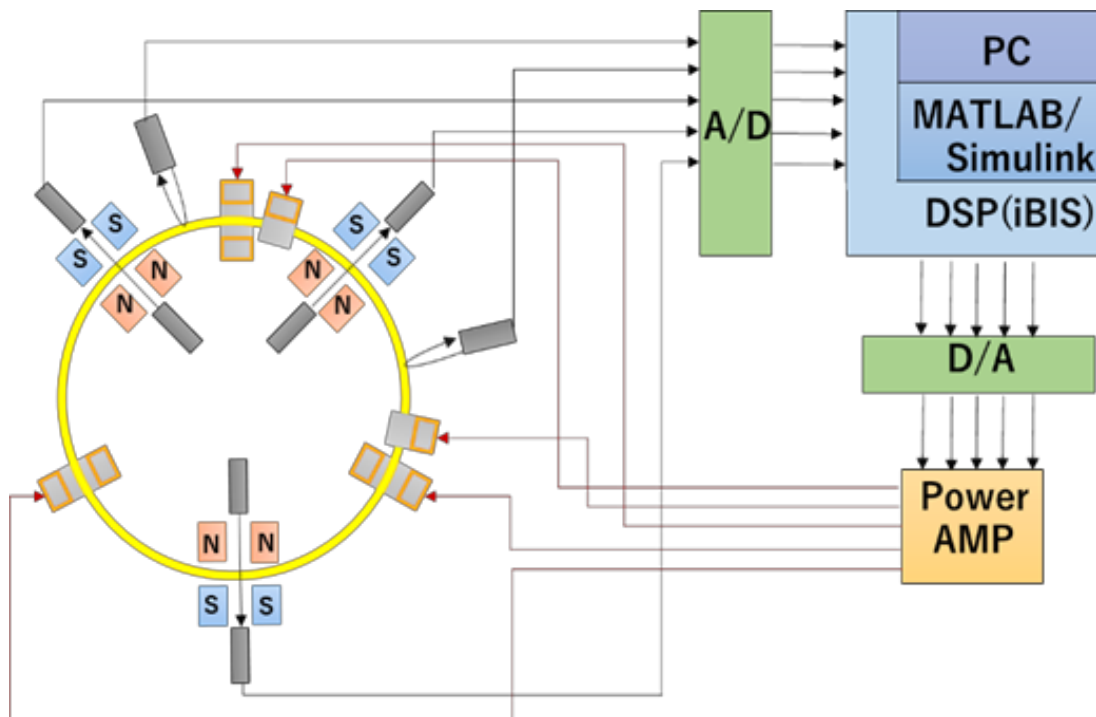


Fig.32 制御システムの概要

2.7 実験装置の構成

2.7.1 パワーアンプ(電磁石用)

鉛直制御用電磁石に電流を供給するパワーアンプとして、Maxon 社の Motor Controller (ADS50/10・ADS50/5)を電流制御モードに設定し使用する。その写真を図 33 に示す。

水平制御用電磁石に電流を供給するパワーアンプとして、株式会社高砂製作所の多機能 4 象限バイポーラ電源 BSP120-5 を使用する。その写真を図 34 に示す。

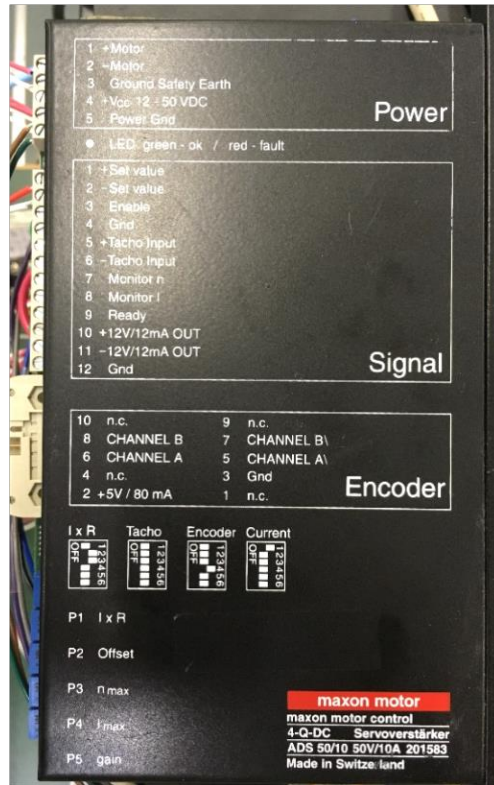


Fig.33 パワーアンプ 1



Fig.34 パワーアンプ 2

2.7.2 直流電源(パワーアンプ用)

パワーアンプ(Motor Controller (ADS50/10・ADS50/5))の直流電源には AND 社の AD-8722D を使用する。その写真を図 35 に示す。



Fig.35 DC Power Source

2.7.3 AD コンバータ

センサで読み取った値をデジタル信号に、また PC から出力された値をアナログ信号に変換する AD コンバータとして、エムティティ株式会社の TB-37 を 2 つ使用する。その写真を図 36 に示す。



Fig.36 AD Converter

2.7.4 コントローラ

コントローラとして、エムティティ社の iBIS 型式 DSP7101A を使用する。コントローラの計算には MathWorks 社の MATLAB(2016a)の Simulink を使用する。その写真を図 37 に示す。



Fig.37 コントローラ

2.7.5 直流電源(センサ用)

センサの直流電源には TKD-Lambda 社の HWS30A-12A を使用する。その写真を図 38 に示す。



Fig.38 DC Power Source

2.8 制御実験

2.8.1 鉛直制御実験

鉛直制御実験の方法として、鉛直方向の移動可能範囲は最大 8mm であったため、今回は目標値を 4mm とした。この目標値に追従させるために、鉛直制御用電磁石の電流を調節し、電磁石間のローレンツ力を制御する必要がある。図 39 のように電磁石と永久磁石間の浮上位置を読み取るセンサは、120 度毎に配置されている。また、電磁石とそのセンサは 60 度の間隔で配置されている。そのため鉛直制御用電磁石に出力する値として、両側に配置されているセンサから永久磁石間の浮上位置をそれぞれ読み取り、それらを足して 2 で割った値に、PID 補償をかけ、電磁石に出力した。それぞれ以下のようなになる。

(センサ①+センサ②)÷2 → PID 補償 → 電磁石①

(センサ②+センサ③)÷2 → PID 補償 → 電磁石②

(センサ③+センサ①)÷2 → PID 補償 → 電磁石③

実験の流れとして、鉛直制御を行った後、ステップ入力(電源電圧)を印加する。PID の値は、P : 0.3, I : 0.15, D : 0.1 とした。

実験結果を図 40 に示す。実験結果より、実験開始より約 10 秒後に鉛直方向の目標値 4mm に収束していることがわかる。

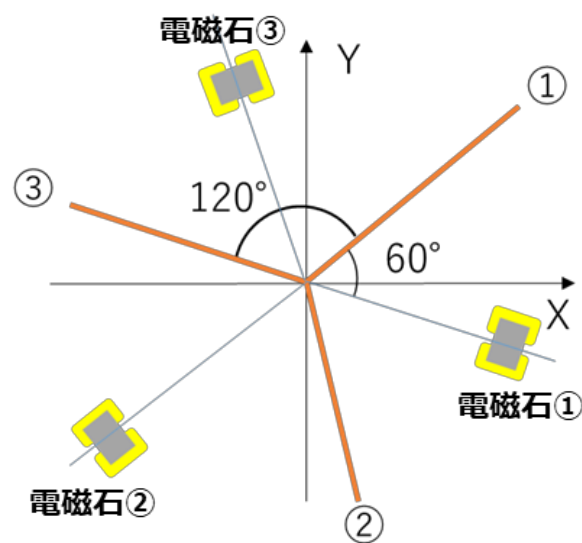


Fig.39 鉛直制御用電磁石と透過型センサの配置

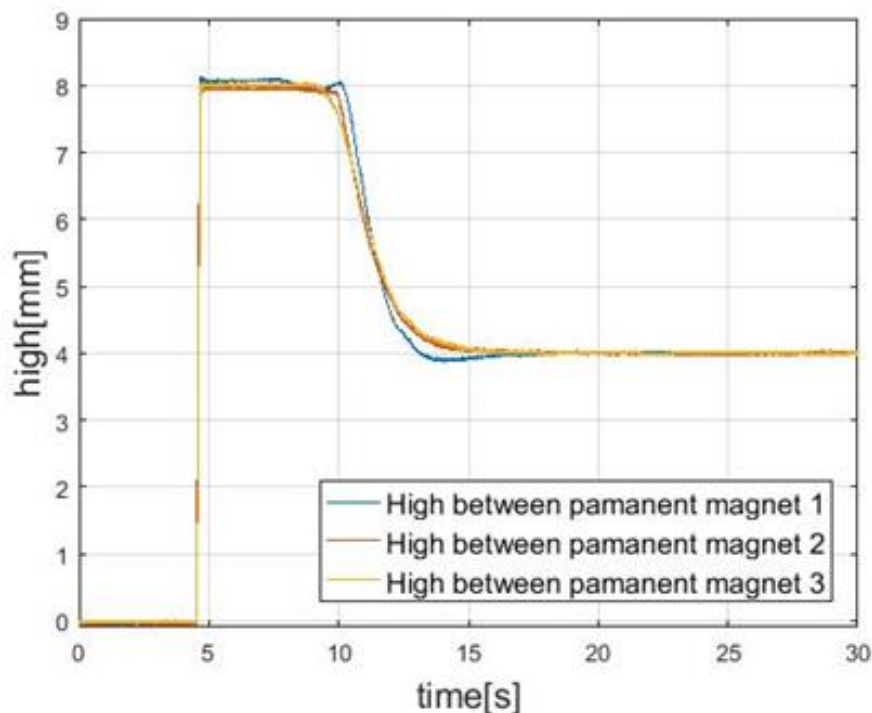


Fig.40 鉛直制御の実験結果

2.8.2 水平制御実験

水平制御実験の方法として、水平方向の移動可能範囲は X 方向, Y 方向共に最大 6mm であったため、今回は目標値を、Y 方向を 4mm, X 方向を 4mm とした。図 41 のように電磁石は 90 度の間隔で配置されており、電磁石の直線上をそれぞれ X 軸, Y 軸とした。また、水平方向の反射型センサ①は X 軸から 15 度の位置に、反射型センサ②は Y 軸から 45 度の位置に配置され、その間は 120 度である。これより水平制御用電磁石に出力する値として、式(9), 式(10)のような計算を行い、それぞれ電磁石に出力した。

実験の流れとして、鉛直制御を行い、鉛直方向の目標値に収束した後、水平制御を行った。鉛直制御の PID の値は、P : 0.3, I : 0.15, D : 0.1 とした。水平制御の PID の値は、P : 1.0, I : 0.3, D : 0.3 とした。

実験結果を図 42 に示す。実験結果より、実験開始より約 15 秒後に鉛直方向の目標値 4mm に収束していることがわかる。次に、約 20 秒後に水平制御を開始し、約 25 秒後に全ての目標値が 4mm に収束していることがわかる。また水平制御を開始した際、鉛直方向の浮上位置が 1~2mm 程度変化していることがわかる。これは、図 4 のように鉛直制御用電磁石と、水平制御用電磁石が近くに配置されているため、水平制御の際に、水平制御用電磁石によって発生した磁界によって、鉛直方向の浮上位置が変化したのではないかと考える。

$$X : (-①) \times \cos 15 + ② \times \cos 45 \quad (9)$$

$$Y : (-①) \times \sin 15 + (-②) \times \sin 45 \quad (10)$$

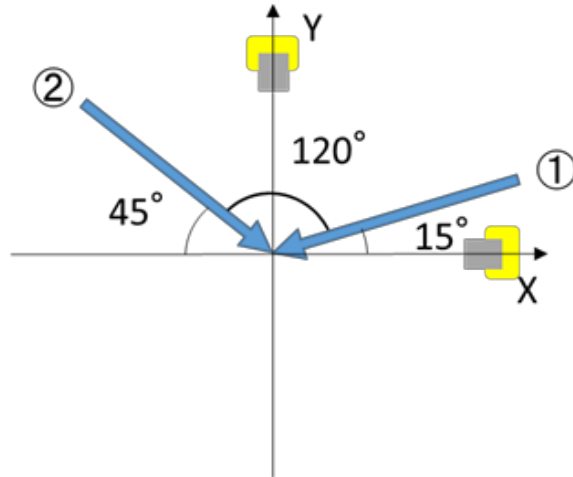


Fig.41 水平位置の読み取り

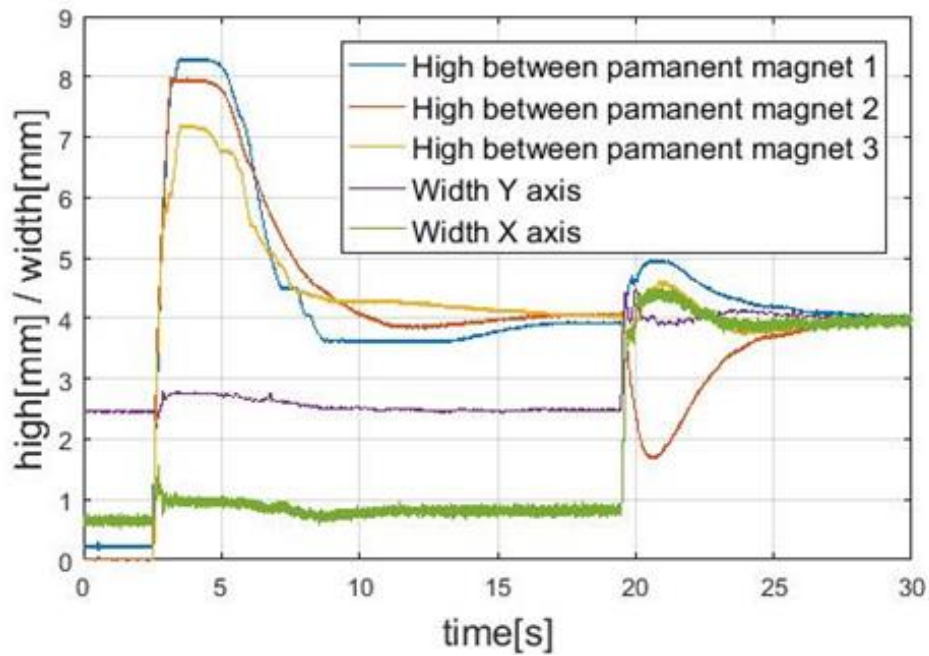


Fig.42 水平制御の実験結果

2.8.3 電磁石の性能実験

今回製作した電磁石の性能を確認するために、次の2つの実験を行った。

- ① 鉛直方向の目標値を変更したときの電流値の変化
- ② 鉛直制御と水平制御をした状態で、電源電圧を変更する

一つ目の実験方法として、鉛直方向の目標値を変更したときの電流値の変化を確認する。目標値は7mmから3mmまでとし、目標値に収束した後に1mmずつ変化させた。PIDの値は、 $P:0.3$ 、 $I:0.15$ 、 $D:0.1$ とした。

実験結果を図43、図44に示す。図43より、目標値を変更した時間は、実験開始から約23秒、33秒、43秒、56秒であり、それぞれ目標値に追従していることがわかる。またその時間について図44を見ると、その目標値が変更した時に、電流値が瞬間的に $-12[A]$ まで変化していることがわかる。また、電流値が大きく変化した前後を比較すると、変化後の方が変化前に比べて多少大きくなっていることがわかる。このことから、目標値によって必要なローレンツ力が変化しており、この場合は目標値が低くなると、必要な電流値も大きくなることわかる。

二つ目の実験方法として、鉛直制御と水平制御した状態で、非接触給電(送電側)の電源電圧を変えたときの電磁石(鉛直、水平)の電流値の変化を確認する。目標値は鉛直方向は6mm、Y方向は3mm、X方向は3mmとした。鉛直制御のPIDの値は、 $P:0.3$ 、 $I:0.15$ 、 $D:0.1$ とした。水平制御のPIDの値は、 $P:1.0$ 、 $I:0.3$ 、 $D:0.3$ とした。電源電圧の範囲は $10.2[V]$ ~ $9.2[V]$ の間とし、 $0.1[V]$ ずつ変化させた。

実験結果を図45に、電磁石の値のみ抽出したものを図46、図47、図48に示す。図46は鉛直方向電磁石の電流値、図47はX方向電磁石の電流値、図48はY方向電磁石の電流値である。実験結果より、まず鉛直方向は6mm、水平方向は3mmに収束していることがわかる。上部に記載されているのは電源電圧の値であり、電源電圧が変化した毎に線が引かれている。これより、電源電圧が変化するたび、鉛直方向の浮上位置が1mm程変化し、鉛直制御用電磁石の電流値も変化していることがわかる。ただ $9.2[V]$ 以降は、非接触給電から電力が得られなくなったため、浮上力が得られず、制御ができなくなっている。次に電源電圧を低くすればするほど、電磁石の電流値は大きくなっていることがわかる。これは、電源電圧が低くなると浮上コイルに流れる電流値が小さくなるため、永久磁石間に働くローレンツ力は小さくなる。それにより、目標値を一定に保つためには電磁石の電流値を大きくする必要があるため、大きくなっていると考えられる。図47、図48より、X方向とY方向の電磁石の電流値は、電源電圧が変化するたびに約 $\pm 0.5[A]$ 変化しているが、電源電圧の変化前と変化後では電流値の変化はない。そのため、電源電圧の変化は鉛直方向のローレンツ力しか変化を及ぼさないことが示された。今回は $\pm 1.8[A]$ より大きい値は流れないようにしてあるため、Y方向用電磁石の電流値の値は $-1.8[A]$ より低い値は流れていない。

これらの二つの実験より、電磁石は全て自作したため、それぞれ必要な電流値が多少異なるが、目標値変化や電源電圧の変化に対して、電磁石の電流値を相応な値に変化させるという

正しい性能をしていることが確認できた。

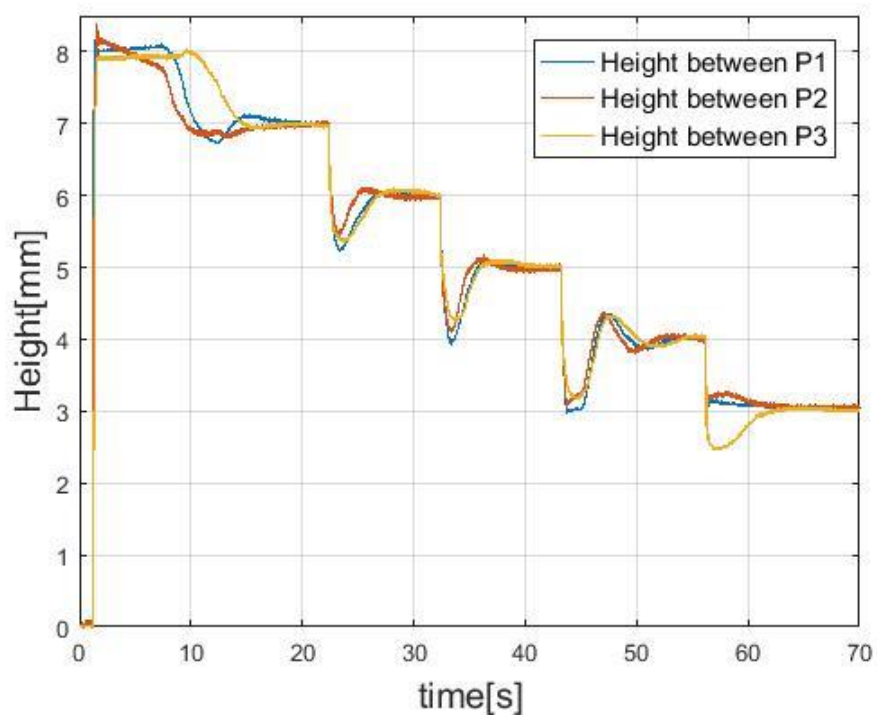


Fig.43 鉛直方向の変化

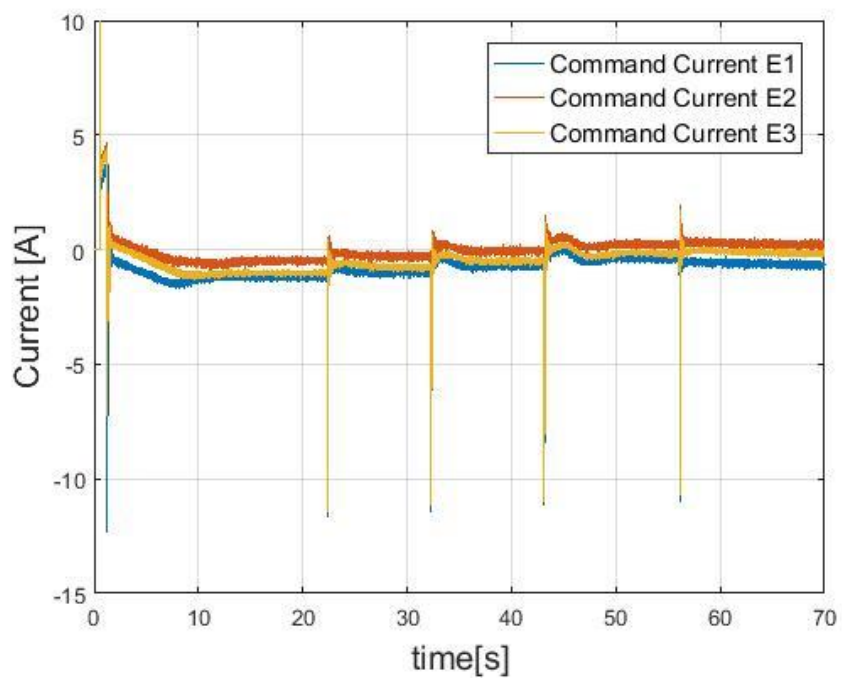


Fig.44 電流値の変化

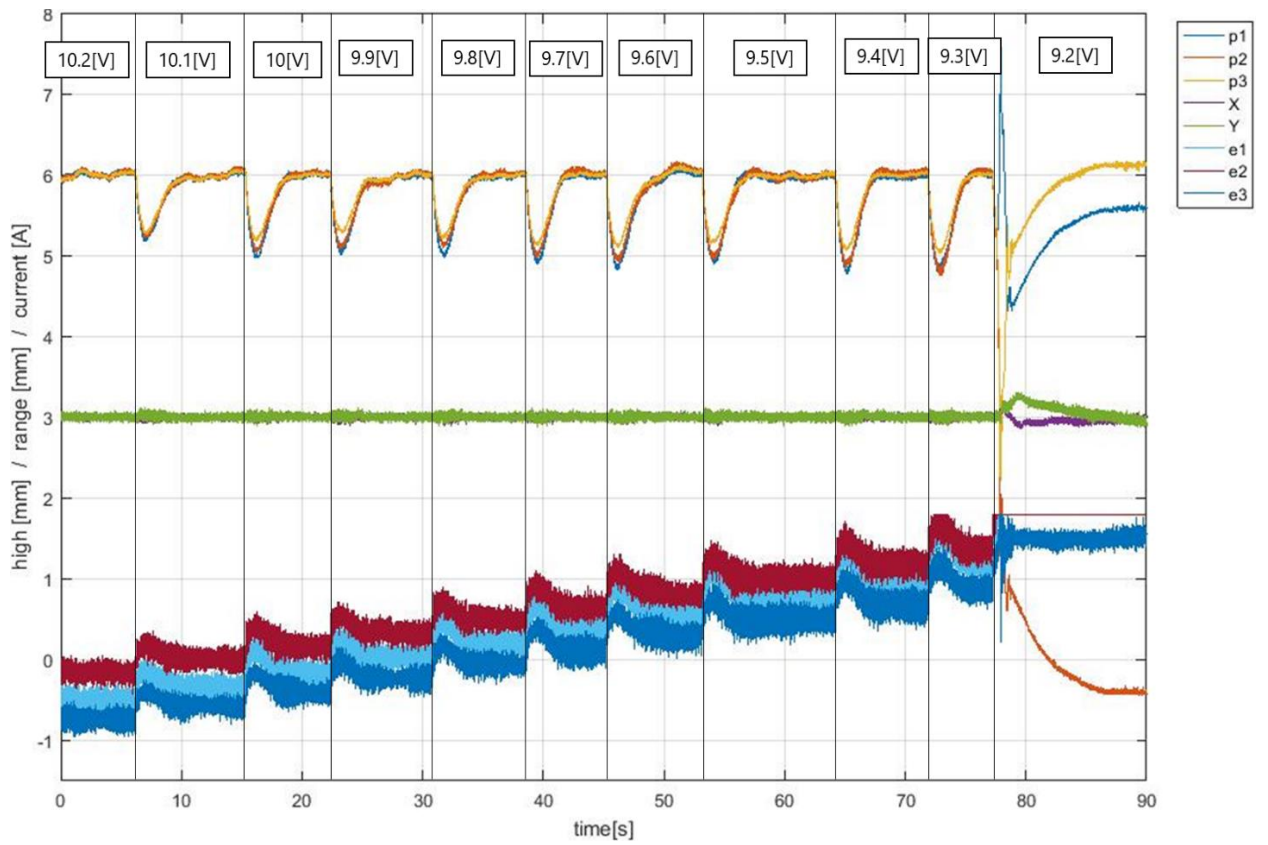


Fig.45 電流値の変化

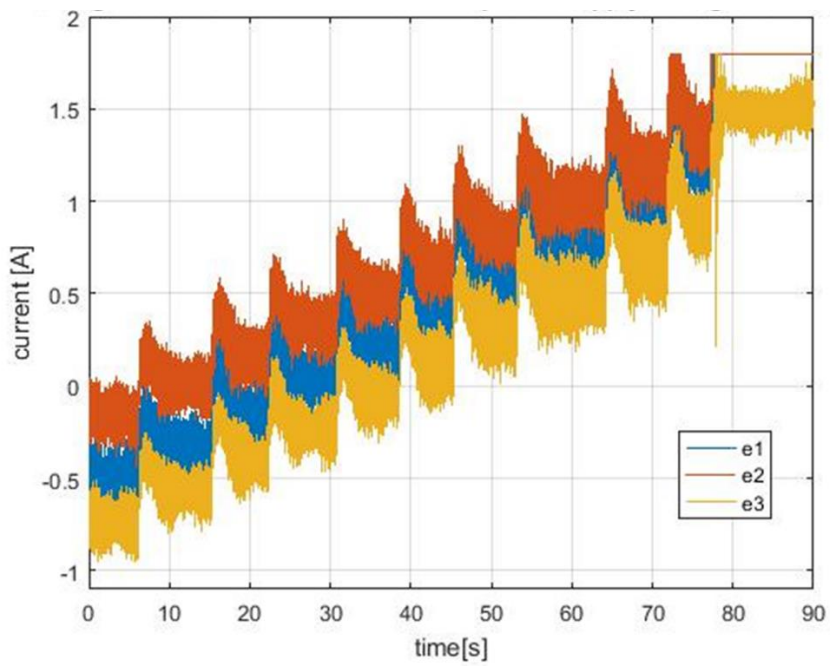


Fig.46 鉛直方向用電磁石の電流値の変化

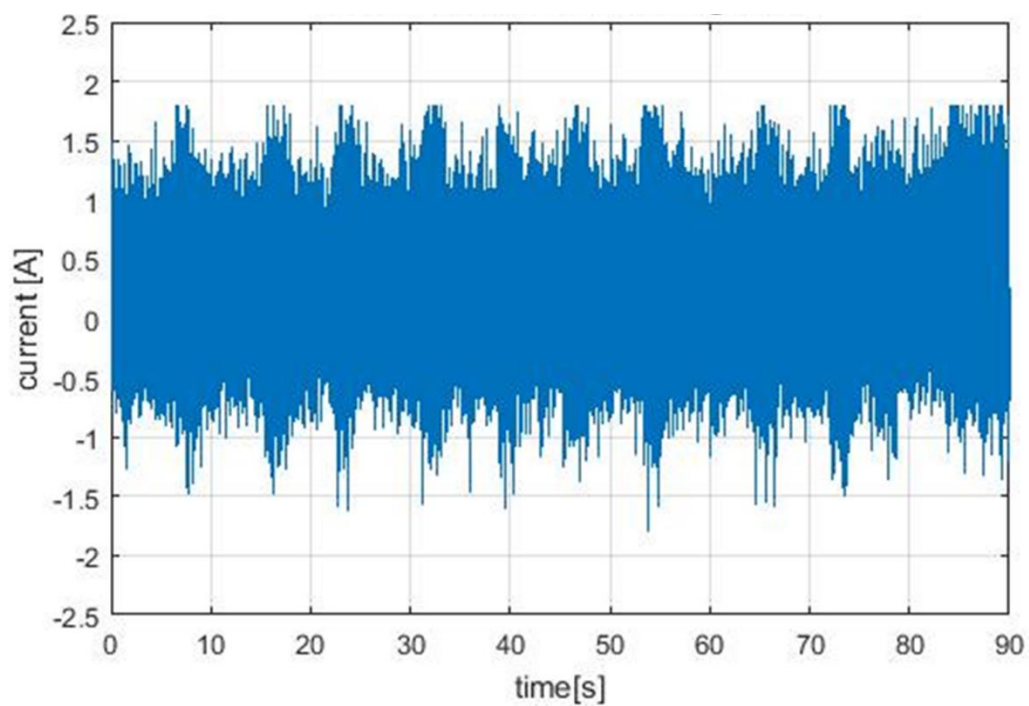


Fig.47 X方向用電磁石の電流値の変化

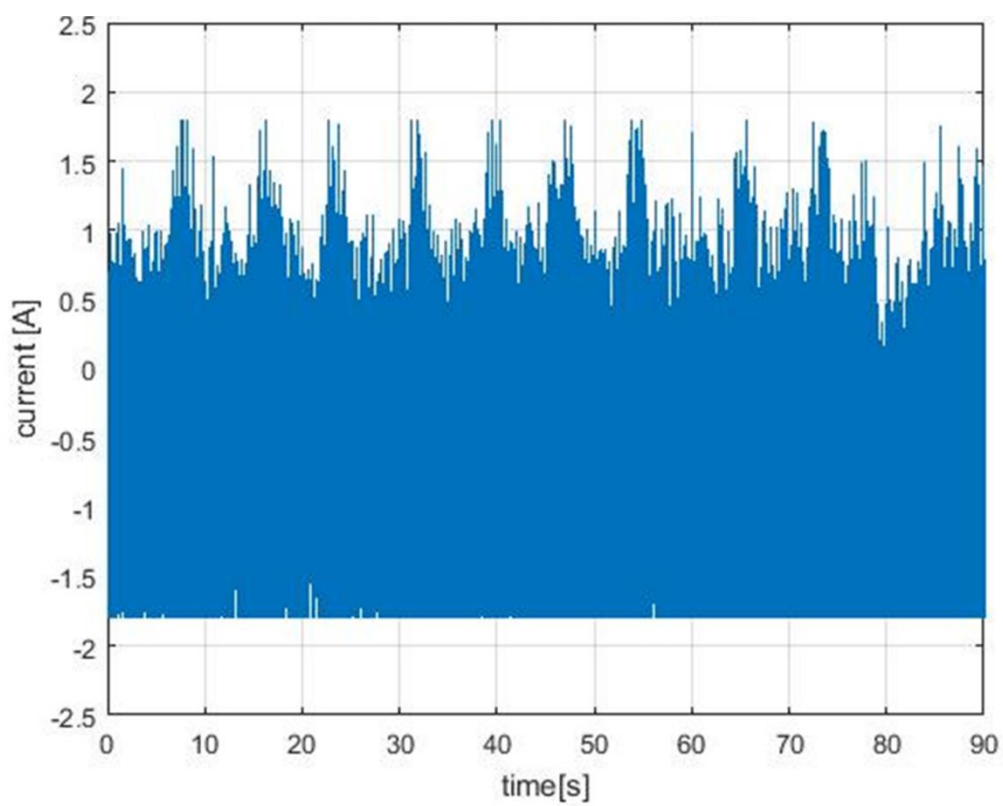


Fig.48 Y方向用電磁石の電流値の変化

2.9 まとめ

第2章では、鉛直水平制御機構の概要と、その構成要素の詳細、制御方法、実験結果を示した。実験結果より、鉛直方向、水平方向の目標値に浮上位置をそれぞれ追従させることができたため、非接触給電から得られた電力を用いて、浮上コイルを任意の点に浮上させることができたと言える。また電磁石の性能実験では、目標値変化や、電源電圧の変化に対して、電磁石の電流値を相応な値に変化させるという正しい性能をしていることが確認できた。次の第3章では、2章で示した鉛直制御と水平制御に加えて、回転制御を行う機構に着目する。

3 回転制御機構

3.1 機構の全体図

提案する回転制御機構のモデルを図 49 に示す。機構の構成要素、機構の仕組みとしては鉛直水平制御機構とほぼ同じである。主な変更点としては、回転制御を実現するために、浮上コイルをボビンに 3 箇所巻き、浮上コイル一つにつき一つの制御を行った点である。3 箇所巻いた理由として、図 4 のように、鉛直水平制御機構の浮上コイルのボビンには、非接触給電の受電部を設置するための場所を設けている。もしこの浮上コイルが回転すると、この場所と浮上コイル部分を繋ぐ箇所と、透過センサ、永久磁石が干渉してしまい、回転はできない。そのため、後に詳しく記述するが、永久磁石に干渉しないような固定の仕方をし、透過センサに干渉しないようなボビンの形状(お椀型)に変更した。またその変更に伴い、鉛直水平制御機構では一つのコイルで二つの制御を行ったが、この形状では水平制御用電磁石が干渉してしまい、水平制御ができない。そこで、二つのコイルに分けることで、水平制御も可能にした。最後に回転制御を行うために、電磁石の形状を、ローレンツ力を回転方向へ働かせるような形状にすると、干渉を起こしてしまうため難しい。そのためコイルの巻き方を斜方向に巻くことで、回転方向にローレンツ力を働かせる方が容易であると考えた。つまり、回転制御を行うためのコイルがもう一つ必要である。よって、ボビンにコイルを 3 箇所巻くことにした。

図 50 は実際に製作した回転制御機構である。構成要素としては、C 型の永久磁石を 6 個、鉛直制御用の電磁石を 3 個、水平制御用の電磁石を 2 個、回転制御用の電磁石を 3 個、透過型レーザーセンサを 2 個、反射型レーザーセンサを 2 個、浮上体、非接触給電で構成されている。

機構の仕組みとしては、まず鉛直水平制御機構と同様の流れで鉛直水平制御を行う。そして、完全に非接触になった状態で、図 51 のように上部の電磁石を用いて回転方向のローレンツ力を働かせ、回転させるものとする。

図 52 は機構のイメージ図である。鮮明に示すため、浮上体は 180 度で示してある。

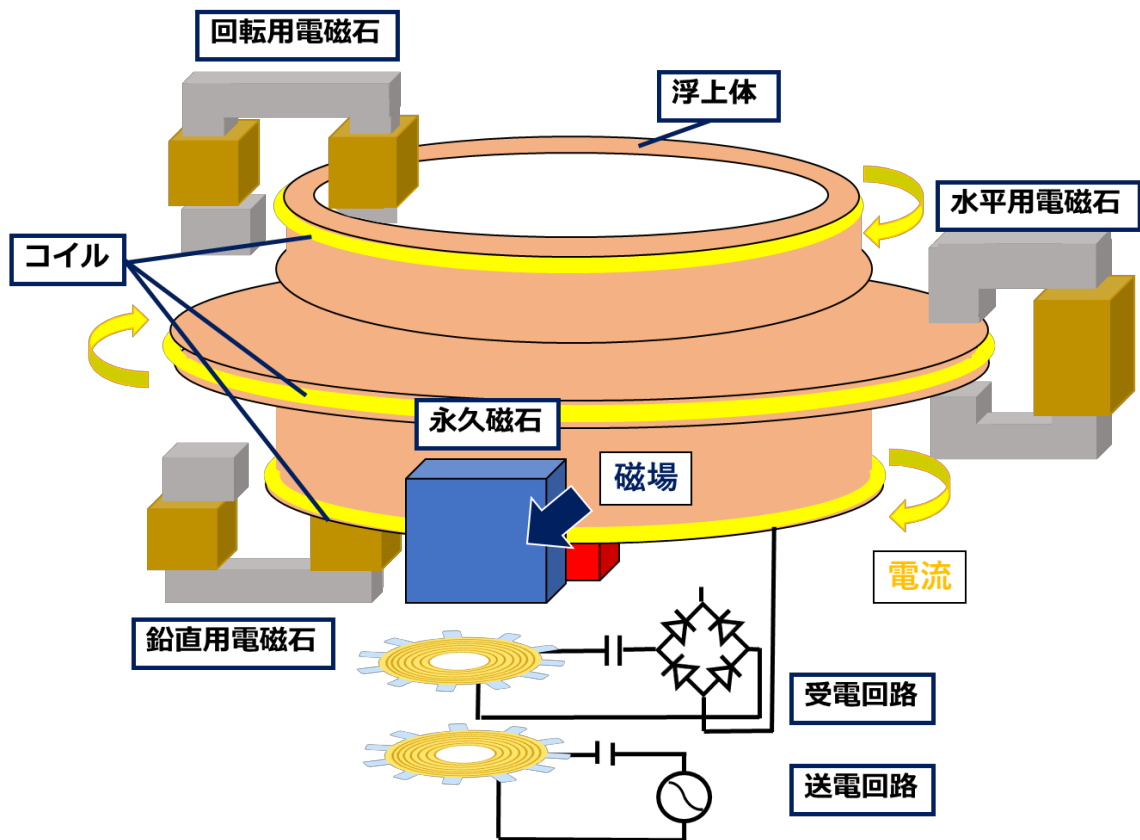


Fig.49 回轉制御機構のモデル

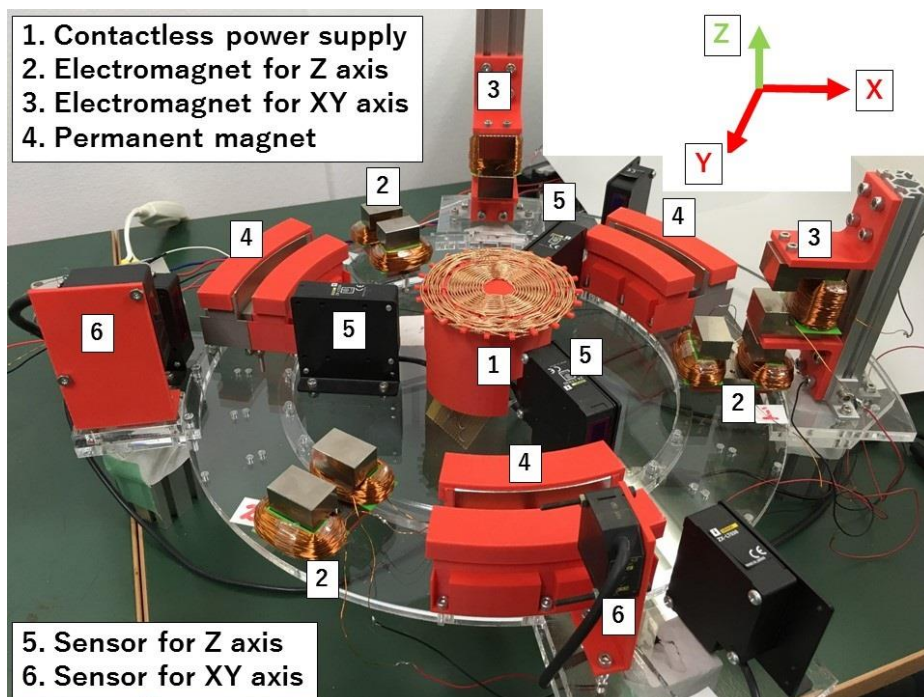


Fig.50 実際に製作した回轉制御機構

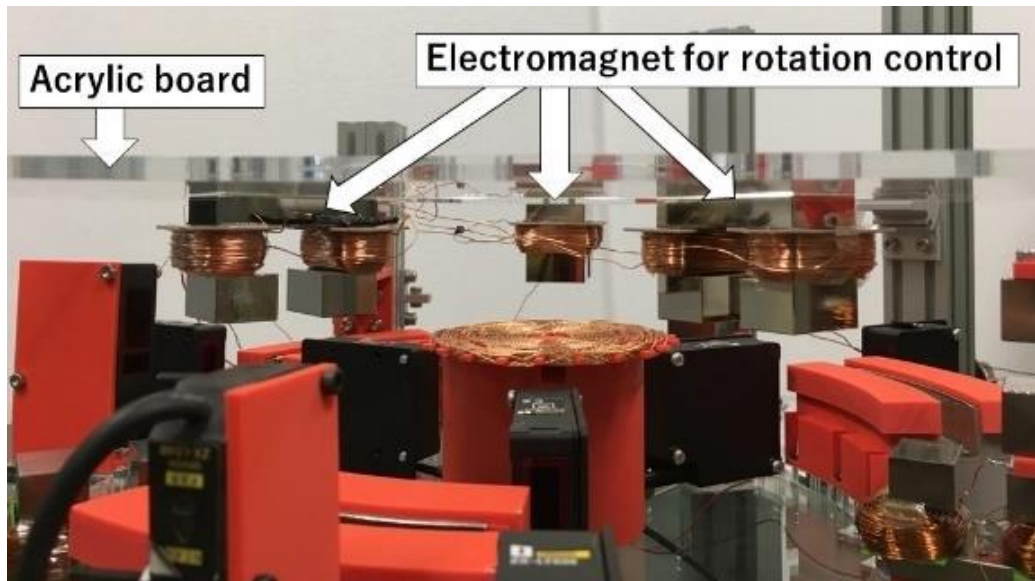


Fig.51 回転制御用電磁石

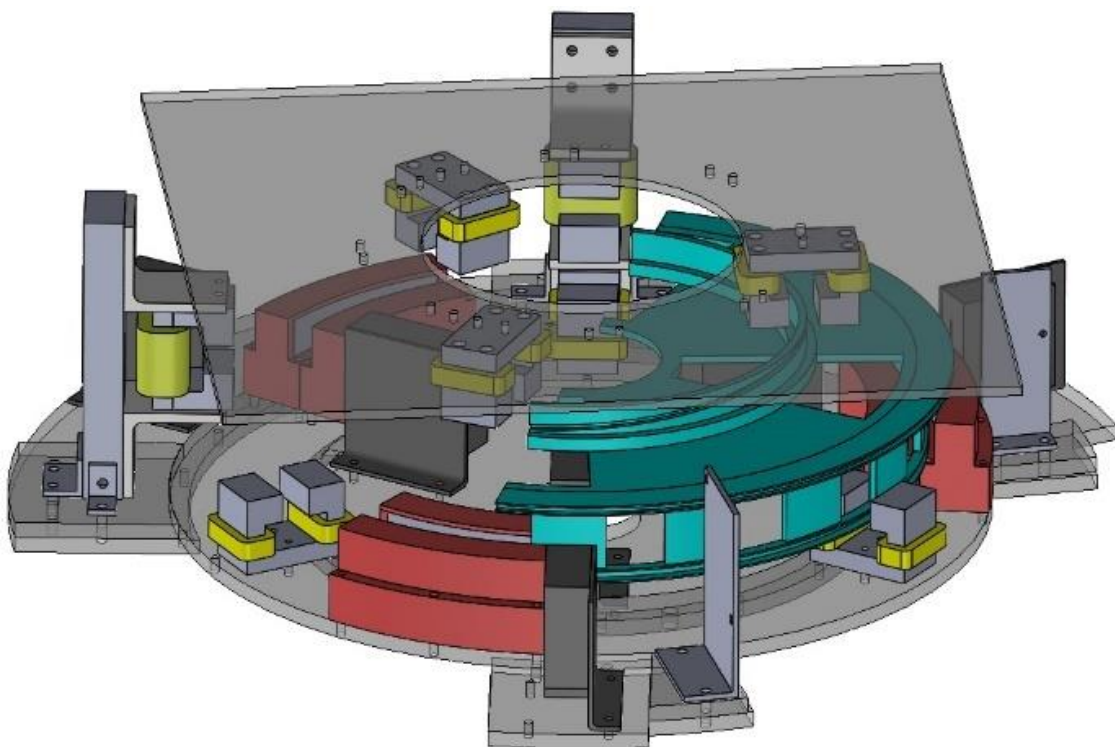


Fig.52 回転制御機構のイメージ図

3.2 機構の構成部品

3.2.1 永久磁石

製作した永久磁石の写真を図 53 に, 永久磁石の図面を図 54 に示す. 永久磁石は内径 305mm × 外径 325mm × 高さ 20mm × 中心角 30 度の C 型のネオジム磁石を 3 個, 内径 355mm × 外径 375mm × 高さ 20mm × 中心角 30 度の C 型のネオジム磁石を 3 個使用した.

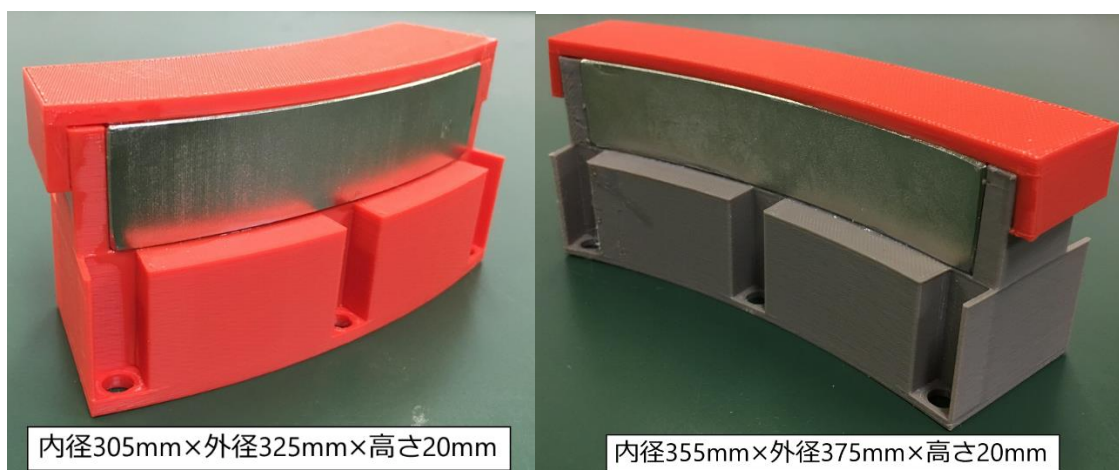


Fig.53 製作した永久磁石

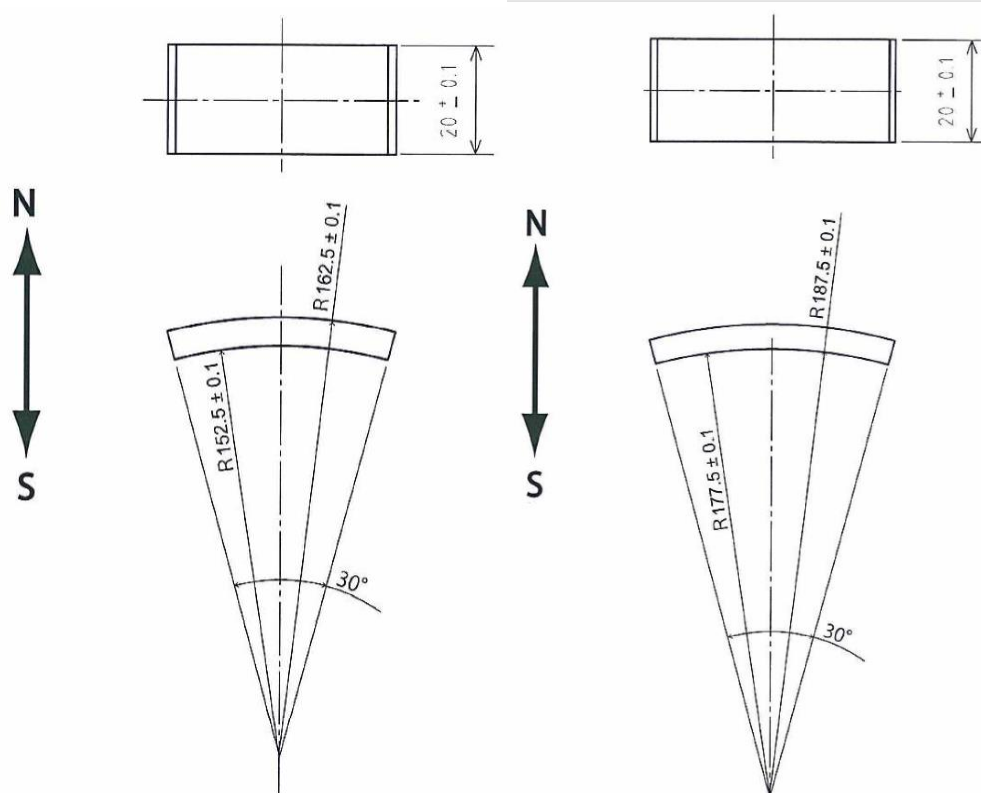


Fig.54 永久磁石の図面

3.2.2 制御用電磁石

製作した鉛直，回転制御用電磁石の写真を図 55 に，水平制御用電磁石を図 56 に示す．鉛直制御用電磁石，水平制御用電磁石，回転制御用電磁石は全て図 13，図 14 と同じ鉄心を使用した．鉛直，回転制御用電磁石はコイルの巻き数を 250 回巻を 2 箇所，水平制御用電磁石はコイルの巻き数を 300 回巻を 1 箇所取り付けた．

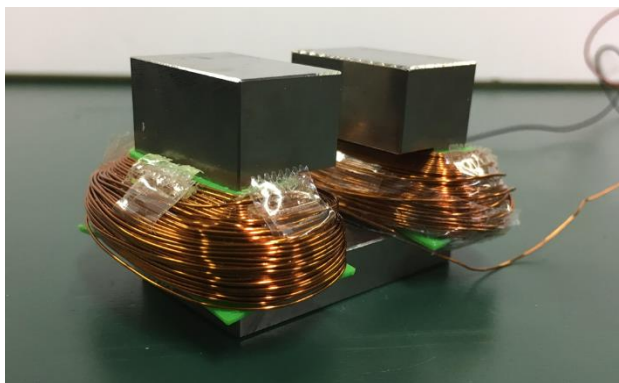


Fig.55 鉛直，回転制御用電磁石

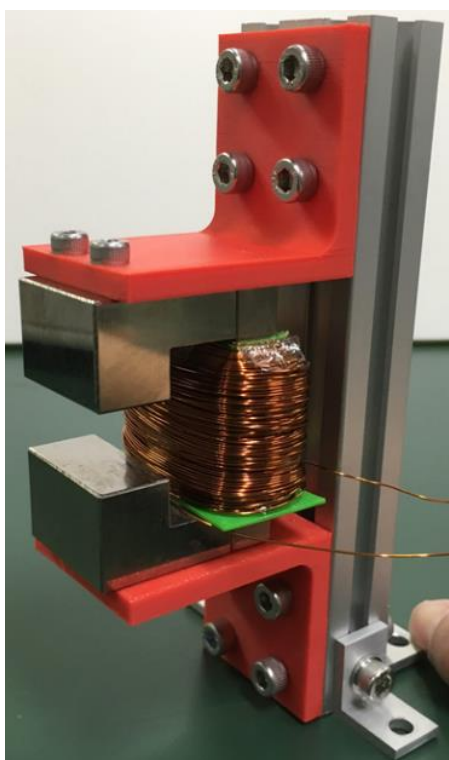


Fig.56 水平制御用電磁石

3.2.3 浮上体

実際に製作した浮上体の写真を図 57 に示す。図 57 のように，浮上体は 3D プリンタで製作したボビンにコイルを 3 箇所巻き，下から鉛直制御用コイル，水平制御用コイル，回転制御用コイルに分けられる。ボビンの中央には，非接触給電の受電部を配置した。

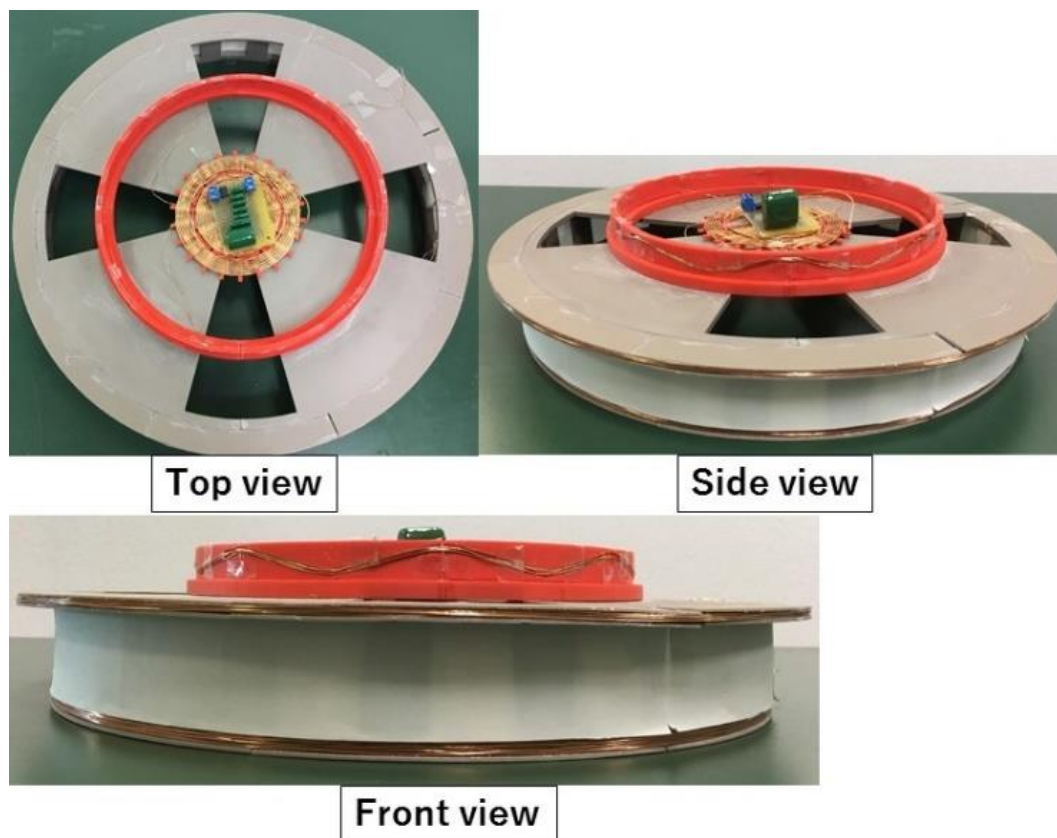


Fig.57 製作した浮上体

3.2.4 センサ

透過型レーザーセンサ，反射型レーザーセンサは，鉛直水平制御機構と同じ物を使用した。

3.2.5 アクリル板

アクリル板は、縦 450mm、横 450mm、厚さ 8mm のアクリル板を、図 58 のように加工した。このアクリル板の上に機構の部品を取り付けた。

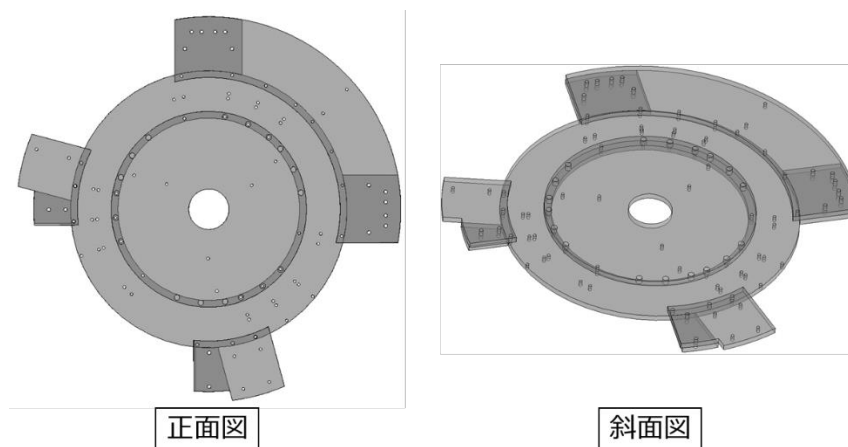


Fig.58 アクリル板のイメージ図

3.2.6 非接触給電

今回使用した非接触給電の写真を図 59 に示す。鉛直水平制御機構の非接触給電との違いは多くの電力を伝送できるように、送受電コイルの表面積を大きくし、コイルの巻き数を多くしている。各コイルのインダクタンス、コンデンサの容量を表 7 に示す。回路のパラメータの設定方法は、まずコイルのインダクタンスを LCR メータで計測した。次に共振周波数を 10[kHz]とし、式(4)を用いてコンデンサの値を決定した。

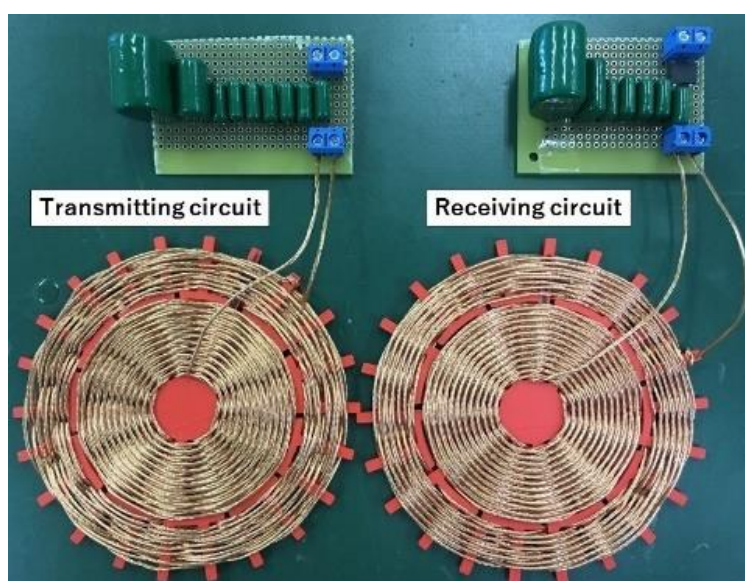


Fig.59 回転制御機構用の非接触給電

Table 7 LCR メータ測定値

	コイルのインダクタンス[μH]	コンデンサの容量[μF]
送電側	195.76	1.29
受電側	219.98	1.15

3.3 制御方法

鉛直方向と水平方向の制御は、鉛直水平制御機構と同じ方法で行う。回転方向の場合は図 60 のように、コイルを斜方向に巻くことによって、ローレンツ力を斜方向に働かせ、その力の横向き成分を利用して回転させる。

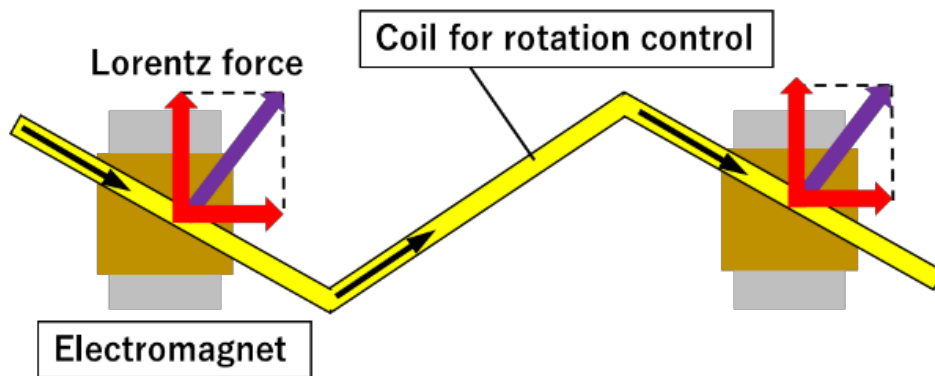


Fig.60 回転方向の制御方法

3.4 センサの測定原理

センサの測定原理は、鉛直水平制御機構と同じであるが、図 61, 図 62 のように浮上体に遮蔽物を取り付けず、浮上体のみで浮上位置を読み取る。

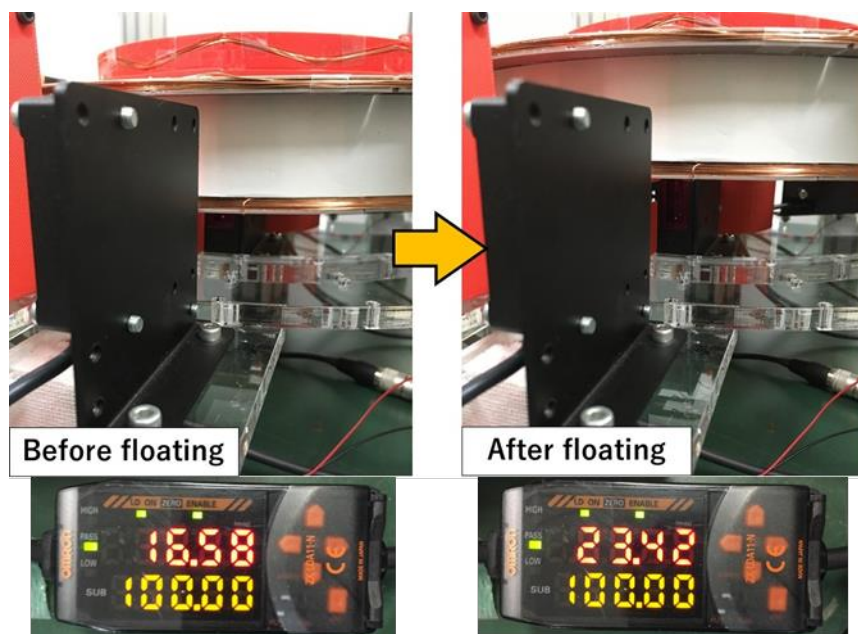


Fig.61 鉛直方向の読み取り

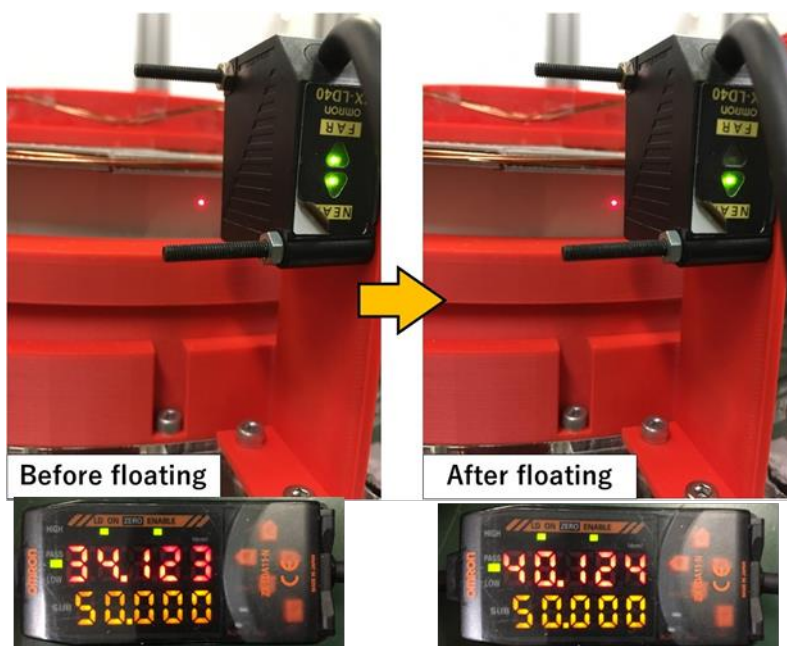


Fig.62 水平方向の読み取り

3.5 制御システムの概要

図 63 に鉛直水平制御システムの概要，図 64 に回転制御システムの概要を示す．鉛直制御と水平制御は鉛直水平制御機構と同じである．回転制御は，コントローラから電磁石に直接電流を供給するフィードフォワード制御を行う．

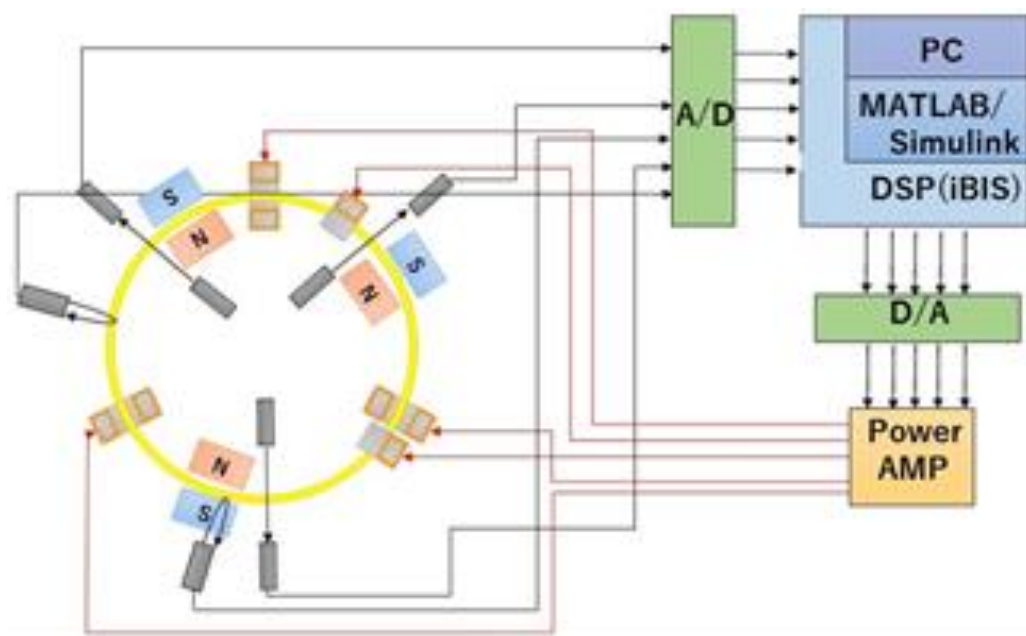


Fig.63 鉛直水平制御の概要

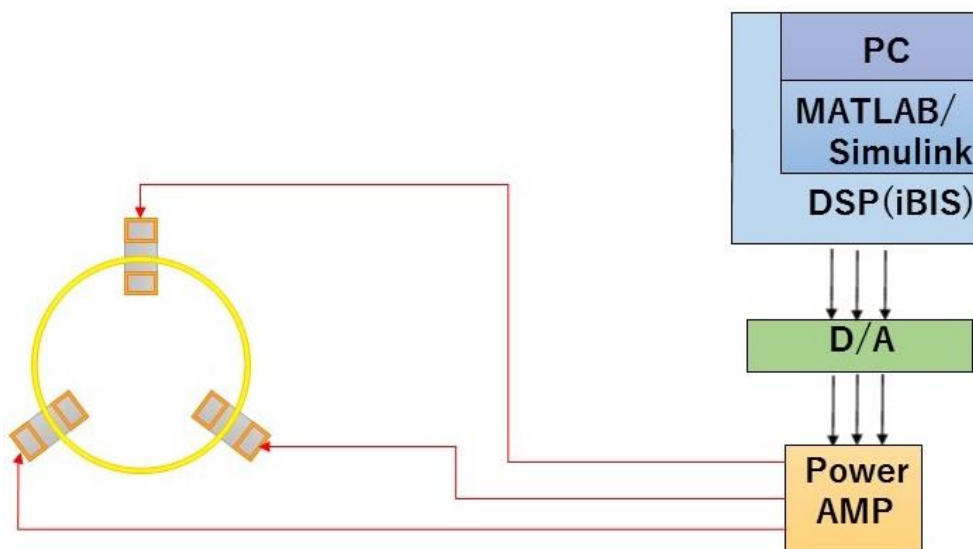


Fig.64 回転制御の概要

3.6 実験装置の構成

回転制御用電磁石には電流を供給するパワーアンプとして、図 31 の株式会社高砂製作所の多機能 4 象限バイポーラ電源 BSP120-5 を使用する。他の実験装置の構成は鉛直水平制御機構と同じである。

3.7 制御実験

3.7.1 鉛直制御実験

鉛直制御の方法は、鉛直水平制御機構と同じである。鉛直方向の浮上可能な位置は最大 6[mm]であったため、今回は目標値を 4[mm]とした。回転制御機構は鉛直制御と水平制御によって完全非接触の点を作り出し、回転制御によって回転させることを目標としているため、完全な目標値の追従を考えない。また I 制御をすると、もし浮上体が大きく振動した場合、誤差が蓄積されてしまい回転しづらくなる。そのため PD 制御を行う。PD の値は、P : 4.0, D : 0.3 とした。

3.7.2 水平制御実験

水平制御実験の方法として、水平方向の移動可能範囲は X 方向, Y 方向共に最大 6mm であったため、今回は目標値を、Y 方向を 4.5mm, X 方向を 4mm とした。図 65 のように電磁石は 90 度の間隔で配置されており、電磁石の直線をそれぞれ X 軸, Y 軸とした。また、水平方向の反射型センサ①は Y 軸から 15 度の位置に、反射型センサ②は X 軸から 15 度の位置に配置され、その間は 90 度である。これより水平制御用電磁石に出力する値として、式(11), 式(12)のような計算を行い、それぞれ電磁石に出力した。水平制御の PD の値は、P : 4.0, D : 0.3 とした。

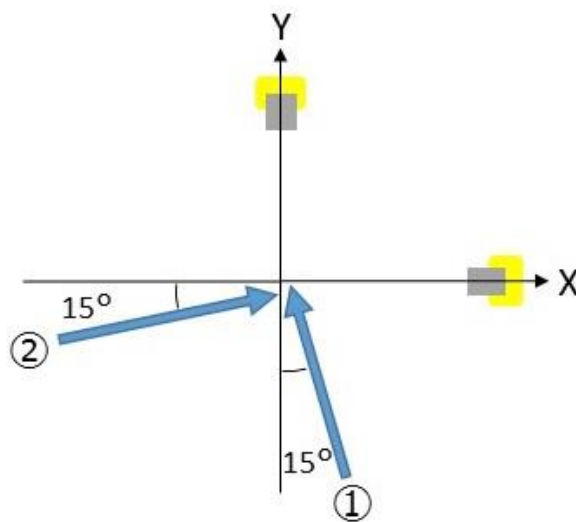


Fig.65 水平方向の読み取り方法

$$X : (-\textcircled{1}) \times \sin 15 + \textcircled{2} \times \cos 15 \quad (11)$$

$$Y : \textcircled{1} \times \cos 15 + \textcircled{2} \times \sin 15 \quad (12)$$

3.7.3 回転制御実験

120° 毎に配置されている回転制御用電磁石に、最大 4[A]で、位相は 120 度の三相交流を流す、フィードフォワード制御を行う。回転制御は、鉛直制御と水平制御を行い、完全に非接触になった状態で行った。

3.7.4 実験結果

実験結果を図 66 に示す。上のグラフが鉛直方向の浮上位置、下のグラフが水平方向の浮上位置を示している。

まず電源よりステップ入力が入力されると同時に鉛直方向の制御を開始した（約 3 秒後）。鉛直方向の高さが目標値の 4.5[mm]に収束しているのがわかる。次に約 9 秒付近で水平方向の制御が開始され、目標値の水平方向 4[mm]に収束している。最後に約 17 秒付近で回転方向の制御を開始した。結果として、回転制御開始から約 8 秒後に回転した。

図 66 の鉛直方向のグラフより、回転制御を開始してから、浮上体（鉛直方向の浮上位置）が三相交流のように振動していることがわかる。これは、回転制御用電磁石に 1[rad/sec]の三相交流を流していたため、回転制御用電磁石から発生したローレンツ力の鉛直成分によって、浮上体が三相交流のように振動したと考える。また、回転制御開始から実際に回転するまでに約 8 秒の時間がかかった。これは、回転用電磁石の回転方向のローレンツ力の不足により時間がかかったと考える。

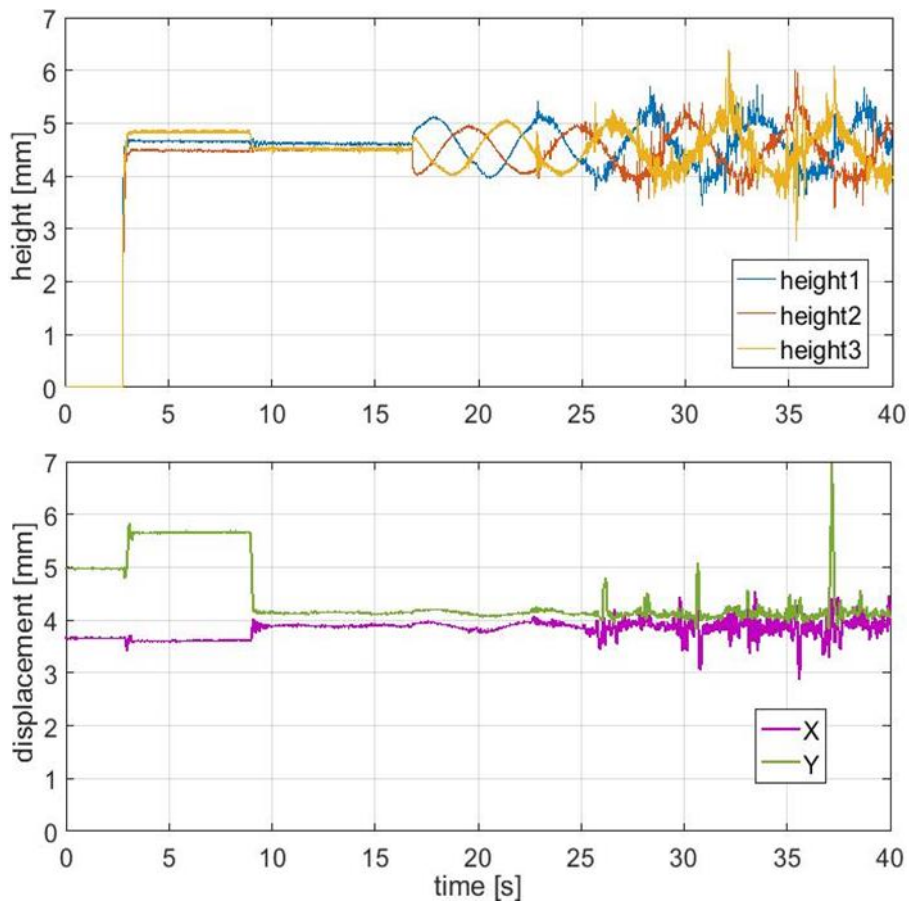


Fig.66 実験結果

3.8 まとめ

第3章では回転制御機構の概要とその制御方法，実験方法，実験結果を示した．実験結果より，鉛直方向，水平方向によって浮上体を任意の点に浮上させ，回転制御によって浮上体を回転させることに成功した．

4 結言

鉛直水平制御機構と，回転制御機構について，その機構の概要とその制御方法，実験方法，実験結果についてそれぞれ述べた．どちらの機構とも，非接触給電に基づいた電力を用いて浮上体を浮上させ，鉛直制御と水平制御を行い，任意点に浮上させることができた．鉛直水平制御機構においては，追加として電磁石の特性を示す実験を行い，電磁石が外乱によって正常に機能していることを示した．回転制御機構においては，回転制御用コイルに働くローレンツ力の鉛直成分による外乱要素が見られたものの，浮上体を回転させることができた．

5 今後の課題

引き続き、回転制御の制御性を改善するために回転制御実験を行う必要がある。そのために、プログラムを改善するか、新しい機構を設計するか、現在の機構に必要な要素を追加する機構を検討する必要がある。

考えられる機構としては、まず鉛直制御と水平制御を安定させるために、鉛直用電磁石と水平用電磁石を増やす。これによって、回転制御用コイルに働くローレンツ力の鉛直成分と、水平成分を抑えることができると考える。次に回転制御用コイルに巻かれているコイルの角度を大きくすることで、そのコイルに発生する鉛直方向のローレンツ力が小さくなり、回転方向のローレンツ力が大きくなるため、回転が容易になると考える。

新しい機構を設計する場合は、機構全体を、現在の機構よりもコンパクトにすることで、浮上体の質量も小さくなるので、全てのローレンツ力をより小さい力で制御することができ、外乱も少なくなるため、制御が容易になると考える。また鉛直制御と、水平制御用のコイルの巻き数を増やすことによって、ローレンツ力をそれぞれ大きくし、回転制御によって発生する外乱を消すことができると考える。またコイルの共有化をすることも考えられる。例えば、現在3つのコイルにそれぞれ1つの制御を行っているが、2つのコイルに対して3つの制御を行うようにする。水平制御は現在と同様に一つのコイルに対して行う。鉛直制御のコイルを取り消し、回転制御用のコイルに対し鉛直制御と回転制御を行う。この際、鉛直制御の対象として外乱となっていた回転制御用のコイルに働く鉛直方向の成分を利用する。これによって外乱要素を消し、よりコンパクトな機構が実現できると考える。

プログラムの改善案として、今回は回転制御用電磁石に周波数一定の交流を流したが、周波数を徐々に高くするようにすることで、回転するまでの時間が短縮できると考える。また、回転制御機構はI制御をしていないため、完全に目標値に収束することはない。そのため、浮上体は完全には水平にはなっておらず、多少の傾きが生じていると考えられる。よって図66の実験結果における振動は、その傾きによって発生したとも考える。その対策として、浮上体の重心制御を追加で行うことで、浮上体を水平に保つことができる可能性があると考えられる。

参考文献

- [1] <https://kotobank.jp/word/%E9%9D%9E%E6%8E%A5%E8%A7%A6%E5%85%85%E9%9B%BB-189000> (2019/01/29)
- [2] <https://www.nissan-global.com/JP/TECHNOLOGY/OVERVIEW/wcs.html> (2019/01/29)
- [3] <https://www.phileweb.com/review/column/201604/15/477.html> (2019/01/29)
- [4] TDK Techno Magazine 第131回暮らしを支える新しいワイヤレス送電技術 - 磁界共鳴伝送の仕組み - <http://www.tdk.co.jp/techmag/knowledge/200912u/> (2019/01/29)
- [5] Yuto Oguri, Yusuke Kajisawa, Koichi Oka and Akinori Harada, “Development of MC Type Magnetic Levitation System Using Resonance Type Contactless Power Supply “, The 16th International symposium on magnetic bearings (ISMB16), <http://www.magneticbearings.org/publications/>
- [6] 萩原 述史 電磁結合による非接触電力伝送の原理について 電気学会論文誌D(産業応用部門誌)Vol.131 No.5 pp703-713
- [7] 梶澤 勇亮 共鳴形非接触給電を用いたMC形磁気浮上システムの開発 高知工科大学システム工学群機械工学専攻学位論文, 2018
- [8] 田中雅子, 岡宏一, 原田明德, “非接触給電を用いた磁気浮上機構の開発”, 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修士論文, 2018

謝辞

本研究を進めるにあたり、お忙しい中長期にわたりご指導して頂きました指導教官の岡宏一教授、原田明德講師に感謝の意を表します。

また高知工科大学、機械・航空システム制御工学研究室の皆様にも多くの助言や励ましの言葉を頂き大変お世話になりました。

最後に6年間の長期に渡り、大学、大学院と進学させて頂きました両親に深く感謝しております。

本研究は、JSPS 科研費基盤研究(B)25289052 の助成を受けたものです。