

2018（平成 30）年度 修士学位論文

非接触給電磁気浮上リニアスライダーにおける  
3相リニアアクチュエータ

3phase Linear Actuator in Magnetically Levitated Linear  
Slider with Non-Contact Power Supply

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

1215020 富田 将広

指導教員 岡 宏一 原田 明德

## 目次

1. 緒言	1
1.1 研究背景	1
1.2 非接触給電磁気浮上リニアスライダーについて	2
1.3 リニアアクチュエータ機構について	3
1.4 研究概要	3
2. 非接触給電磁気浮上リニアスライダー	4
2.1 試作磁気浮上リニアスライダー	4
2.2 ステータ	4
2.3 浮上スライダー	5
3. 磁気浮上機構	6
3.1 ハイブリッド電磁石	6
3.2 ゼロパワー制御	7
3.3 浮上モデル	8
4. 非接触給電機構	9
5. リニアアクチュエータ機構	11
5.1 電磁石	12
5.1.1 コイル	12
5.1.2 コア材	16
5.2 ガイドレール	18
5.3 駆動原理	18
5.4 電圧制御回路	20
5.5 プログラム	26
6. シミュレーション	27
6.1 シミュレーション方法	27
6.2 推進力と安定点	27
6.3 鉄心モデル	29
6.4 鉄心幅変更モデル	31
6.5 鉄心アール付きモデル	34
6.6 コアレスモデル	36
6.7 シミュレーション結果	38
6.8 考察	39

7. 浮上・走行実験	40
7.1 走行実験	40
7.1.1 実験装置	40
7.1.2 実験方法	40
7.1.3 実験結果	41
7.2 浮上走行実験	42
7.1.4 実験装置	42
7.1.5 実験方法	45
7.3 実験結果	46
7.4 考察	49
8. 結言	50
9. 展望	50
10. 謝辞	50
11. 参考文献	51

## 1. 緒言

### 1.1 研究背景

昨今では半導体や薬品の製産ラインにおいてクリーンルームを必須とした製造過程が増加している。機械的接触のない磁気浮上スライダシステムは、粉塵の発生リスクがないことや潤滑油を必要とせずメンテナンス性に優れているといった利点からクリーンルーム内で部品搬送装置として利用されるケースが多い。磁気浮上リニアスライダを用いた搬送システムにおいてスライダ部に浮上及び駆動制御を行うための機構が存在し、それらの機構を稼働させるために浮上しているスライダ部に対し電力供給を行う必要がある。そのため現在では電力供給に電源ケーブルの接続や、Fig. 1 のような浮上スライダへバッテリーの搭載が行なわれている。電源ケーブルでの給電は機械的接触がないという磁気浮上スライダの利点を殺してしまう。バッテリーにはその容量に限りがあるため可動時間に限界があるといった問題が存在する。可動時間を伸ばすために大容量のバッテリーを用いると浮上機構の質量や体積の増加につながり、消費電力の増大の原因となる。また、バッテリーには寿命があるため永久的に使用することは不可能であり寿命に伴う交換が必要となる。このように現在利用されている磁気浮上リニアスライダには電力の供給方法に問題がある。その問題を解決するために非接触給電を用いた磁気浮上リニアスライダを開発することが重要であると言える。

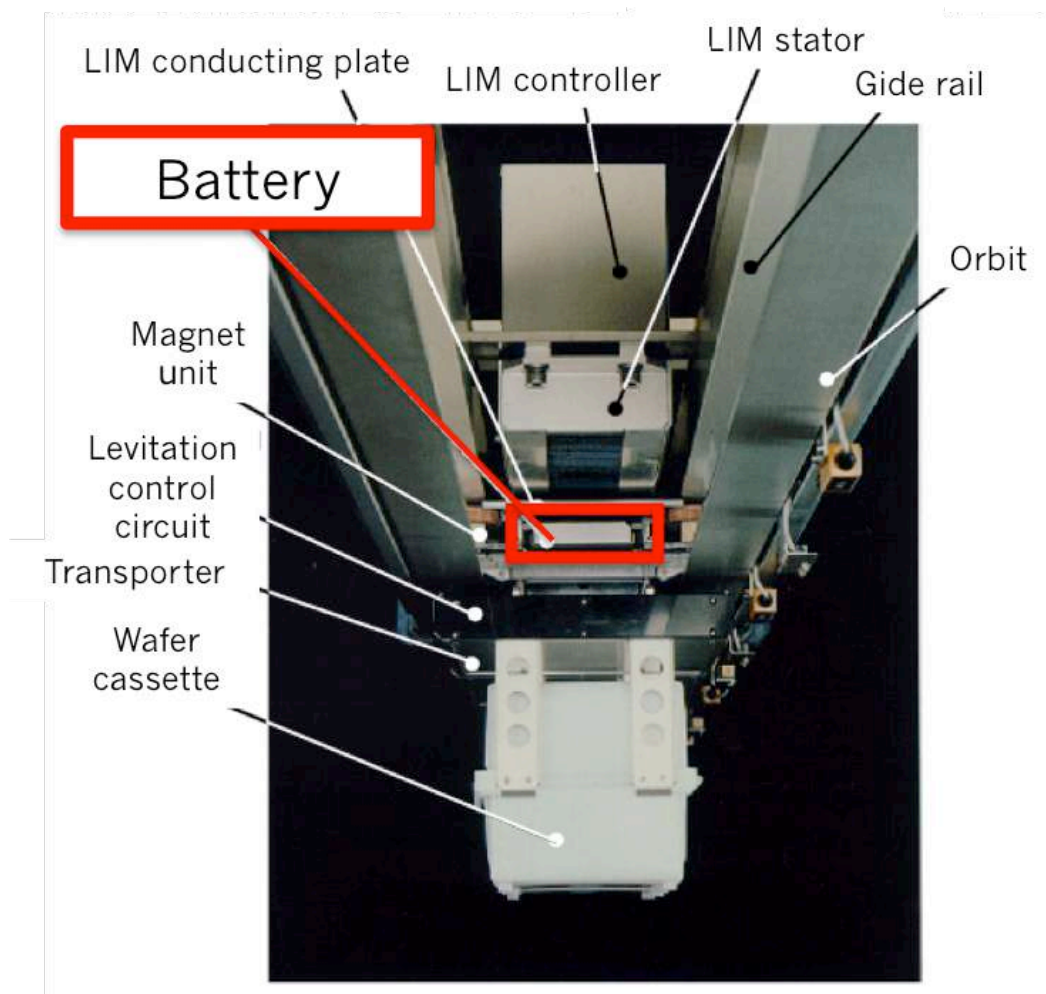


Fig. 1 Magnetic levitation linear slider in practical use

## 1.2 非接触給電磁気浮上リニアスライダについて

本研究ではスライダ部に対し浮上走行中も常時非接触給電が行える機構を採用して磁気浮上リニアスライダの製作を行った。非接触給電方法として電磁誘導方式を採用した。リニアスライダの駆動方向と平行に回転軸を設けたローターに永久磁石を配列し、浮上スライダ側には円筒型の発電機を搭載した。発電機は内側にコイルを設けてある。発電機の中でローターを回転させることで電磁誘導による電力の供給を可能にしているものである。

### 1.3 リニアアクチュエータ機構について

リニアアクチュエータ機構は可動子を駆動方向に移動させる推力を発生させる機構である。リニアアクチュエータには動作原理で分類すると様々な種類があり、代表的なものはリニア同期モータやリニア誘導モータ、電磁式リニアモータである。今回は同期モータをリニアアクチュエータ機構として採用した。リニア同期モータは円筒状同期モータを平面に展開したような構造をしており、非接触で推進力を発生できるためクリーンルーム内での利用される磁気浮上リニアスライダの駆動力を発生させる機構として適しているとされている。さらに摩擦がないことから停止状態から高速度で移動するために必要な時間が他の駆動機構よりも短いという利点があるため、クリーンルーム内での製品の生産の速度を落とすことなく部品や製品の運搬を可能にしている。

### 1.4 研究概要

本研究では誘導リニアモータを用いたリニアアクチュエータ機構における装置および電圧の制御回路の製作、磁場解析ソフト **j-mag** を用いた電磁石のコアの材質・形状による安定点の位置の変化についてのシミュレーション、リニアアクチュエータ機構のみの駆動実験、浮上状態での駆動実験を行った。

## 2. 非接触給電磁気浮上リニアスライダ

### 2.1 試作磁気浮上リニアスライダ

Fig. 2 に非接触給電磁気浮上リニアスライダの全体像を示す. リニアスライダは構造として浮上走行を行う浮上スライダ部と浮上スライダ部を非接触で支持するための固定部の 2 つに分割することができる. またその役割からスライダ部を浮上させる磁気浮上機構, 浮上したスライダ部に対して非接触給電を行う非接触給電機構, 浮上したスライダ部を走行方向に駆動させるリニアアクチュエータ機構の 3 種類の機構を組み合わせたものとして考えることができる.

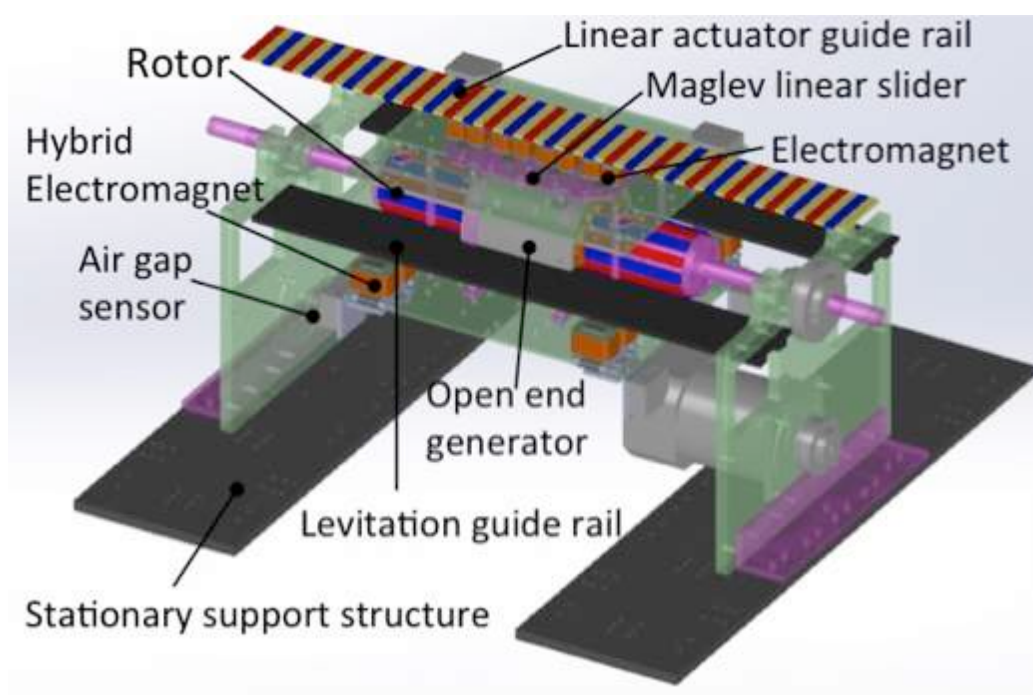


Fig. 2 Overall image of magnetic levitation linear slider

### 2.2 ステータ

Fig. 2 にリニアスライダの固定部を示す. 浮上スライダの駆動経路を決定するために浮上用ガイドレールを駆動経路と平行になるようにステータに取り付けている. 固定部はアルミフレームと SS440 を用いて製作した. 非接触給電機構用のローターはベルトによりモータから動力を得ており, 互いに固定部側面に取り付けている. リニアアクチュエータ機構用のガイドレールは固定部の上部に設置した.

### 2.3 浮上スライダー

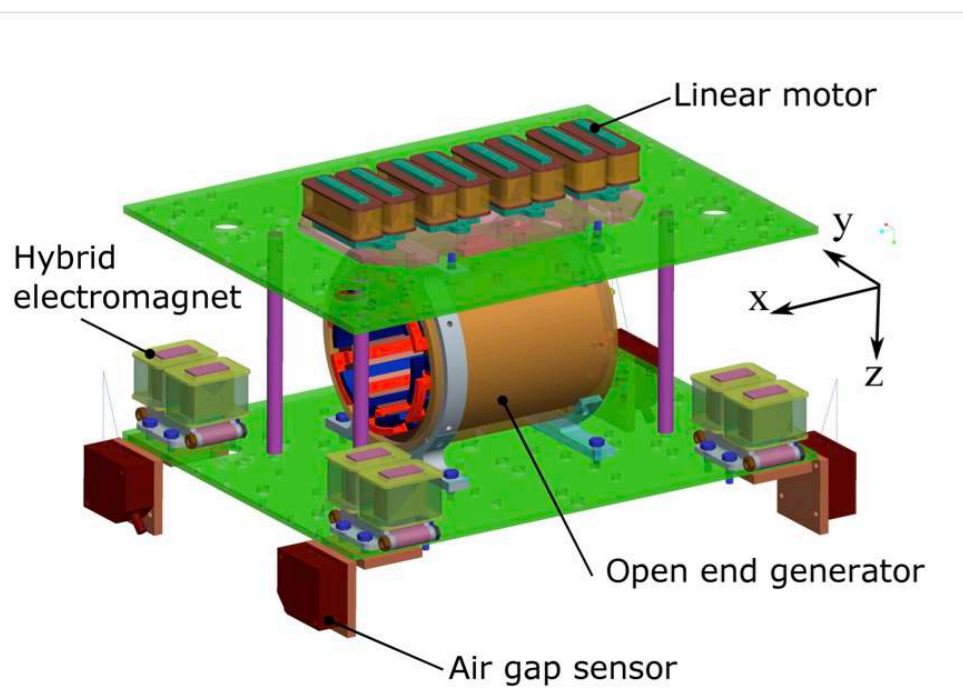


Fig. 3 Levitation slider part

浮上スライダー部をFig. 3に示す。浮上スライダー部には磁気浮上機構用のハイブリッド電磁石(以下 HEM)、レーザーセンサ、非接触給電用の円筒型発電機とリニアアクチュエータ用の電磁石を搭載している。浮上スライダーは円筒型発電機を2枚のプレートで上下から挟むような構造をしており、底板にはステンレスSUS304を上板にはアルミニウムA6061を使用した。共に非磁性体である。浮上スライダー上部プレートにリニアアクチュエータ用の電磁石を、底板の四隅には HEMと距離センサを取り付けている。距離センサは磁気浮上ガイドレールと HEM の空隙距離を計測できるように固定している。浮上スライダー部全体の重量は約15[kg]である。



### 3. 磁気浮上機構

#### 3.1 ハイブリッド電磁石

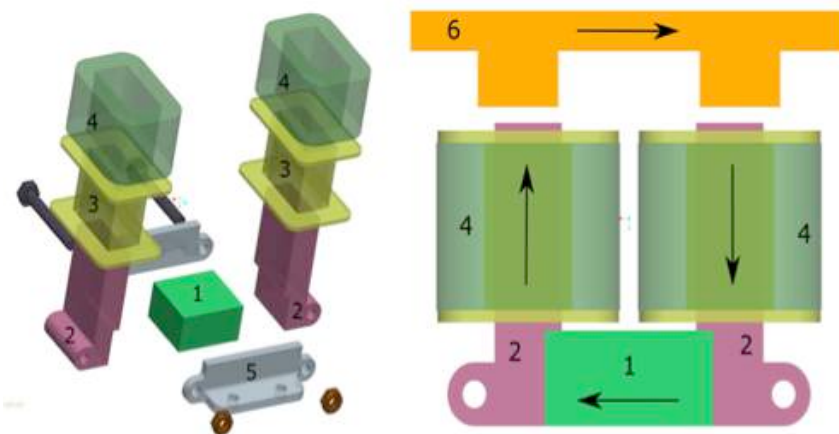


Fig. 4 Hybrid electromagnet (HEM)

磁気浮上機構に使用している HEM は永久磁石と電磁石を組み合わせたものである。電磁石の磁力により永久磁石の磁力のみで浮上可能な空隙距離に調整することで、定常状態では永久磁石とガイドレール間で発生する吸引力のみで浮上することを目的としたゼロパワー制御を可能にする役割を担っている。浮上スライダー下部の四隅に取り付けられたレーザーセンサから電磁石ガイドレール間の空隙距離を計測するために取り付けてある。HEM は  $25[\text{mm}] \times 21[\text{mm}] \times 12[\text{mm}]$  の N50 ネオジム磁石と軟磁性鋼 Fig. 4 を鉄心に用いた電磁石で構成されており、軟磁性鋼には方向性電磁鋼帯を使用した。方向性電磁鋼帯の各層の厚さは  $0.23[\text{mm}]$  であり、断面積は  $21[\text{mm}] \times 10[\text{mm}]$  である。直列に接続した 2 つのコイルは  $\phi 0.6[\text{mm}]$  の銅線を 360 回巻きにしている。Fig. 4 は HEM とガイドレールの形状を示し、図中の矢印は磁束経路を表している。数字は 1 がネオジム磁石を 2 が電磁石の鉄心を 3 がボビン、4 がコイル、5 が取り付け板を 6 がガイドレールを示す。ガイドレールには亜鉛めっき加工を施した SS400 を用いた。

### 3.2 ゼロパワー制御

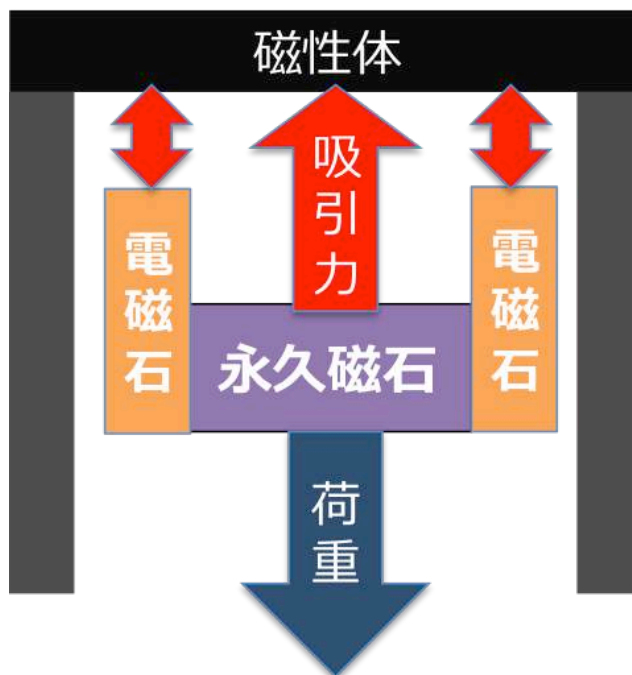


Fig. 5 Zero power control

磁気浮上機構にはゼロパワー制御を用いている。固定された磁性体に対し永久磁石のみを浮上させようとするとき、吸引力が荷重と等しくなる位置で永久磁石を保持しておく必要がある。永久磁石のみで安定した浮上は難しいため、電磁石を共に用い距離によって吸引力を変化させる。距離が遠い場合は吸引力を強化させるように電磁石を励磁して距離を短く、近づきすぎた場合は吸引力を弱めるように電磁石を励磁して距離を長くするといった制御を行う。この制御方法では定常状態で電磁石に必要な電力が0[W]となるためゼロパワー制御と呼ばれており、電磁石のみを用いた浮上方法よりも消費電力が少ないという利点が挙げられる。磁気浮上機構に用いているゼロパワーシステムでは浮上スライダ一部自重の150[N]に加え50[N]の荷重まで安定して浮上制御することが可能である。

### 3.3 浮上モデル

ゼロパワー制御のブロック線図を Fig. 6 に示す.

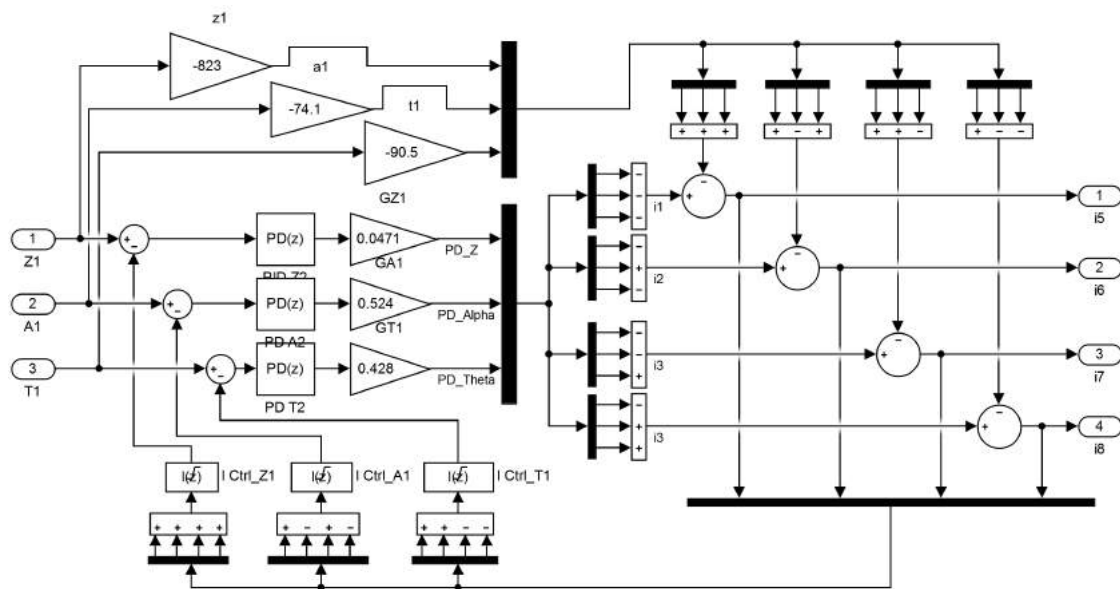


Fig. 6 Levitation controller with zero power control

4. 非接触給電機構

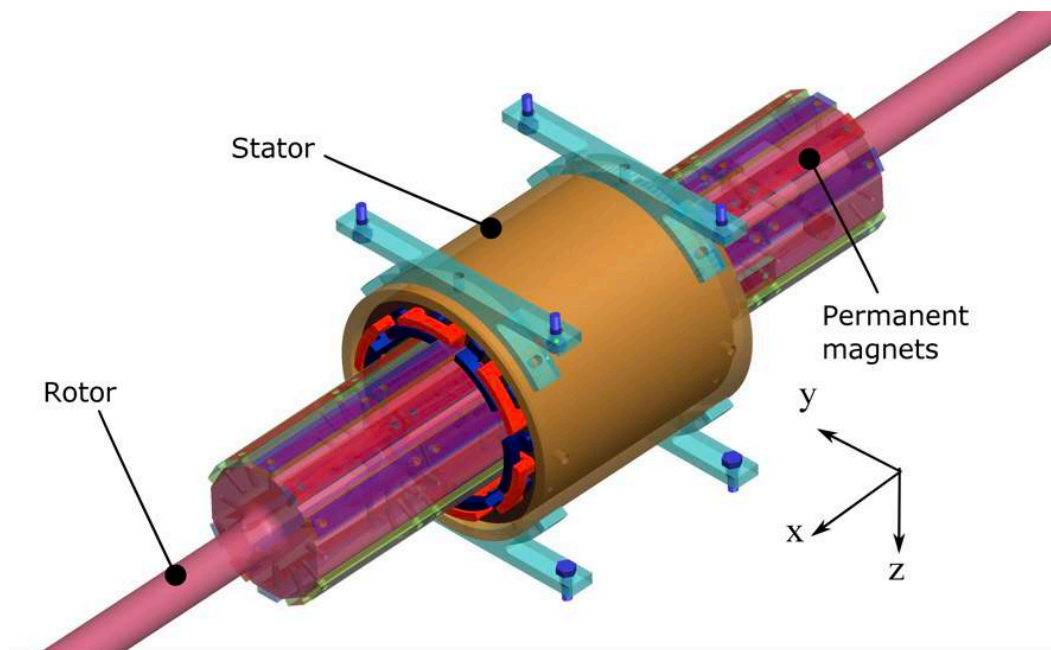


Fig. 7 Non-contact power supply mechanism

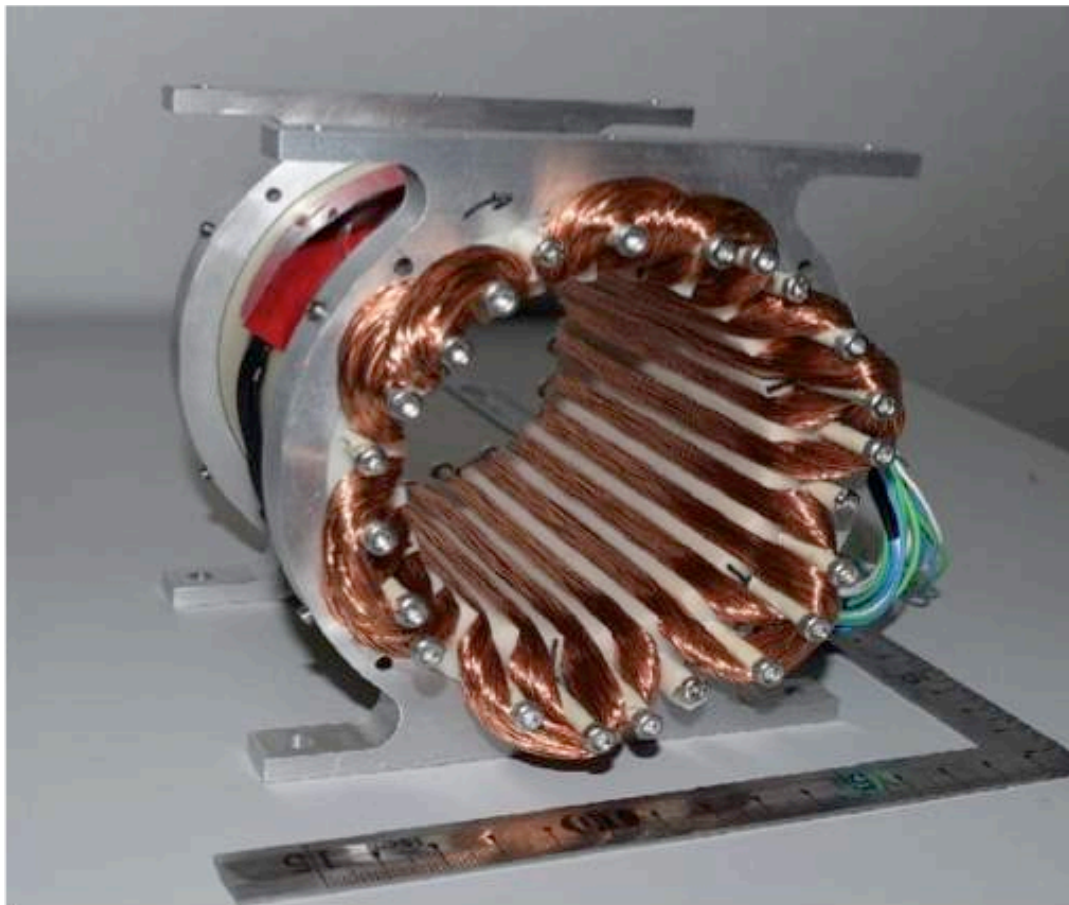


Fig. 8 Open-end generator



Fig. 9 Rotor with permanent magnet

Fig. 7 に非接触給電機構の全体像を Fig. 8 に用いた円筒型発電機, Fig. 9 にローターを示す. 磁気浮上機構とリニアアクチュエータ機構の稼働に必要な電力を非接触給電するために円筒型発電機を浮上スライダー部に, 永久磁石を表面に固定したローターを固定部に取り付けた. Fig. 7 における x 方向の発電機のコアの長さは 100[mm] であり, 12 組のコイルを組み合わせている. 各コイルは,  $\phi 0.5$ [mm] の銅線を 120 回巻いたものである. 円筒型発電機のコアは ABS を使用した. モーターと連結したローターを回転させることによってコイル内の磁界を変動させ, 円筒型の発電機に電力を発生させている. ローターの回転数が最大の時 (1000[rpm]) スライダーに 35[W] の電力を供給することが可能である.

## 5. リニアアクチュエータ機構

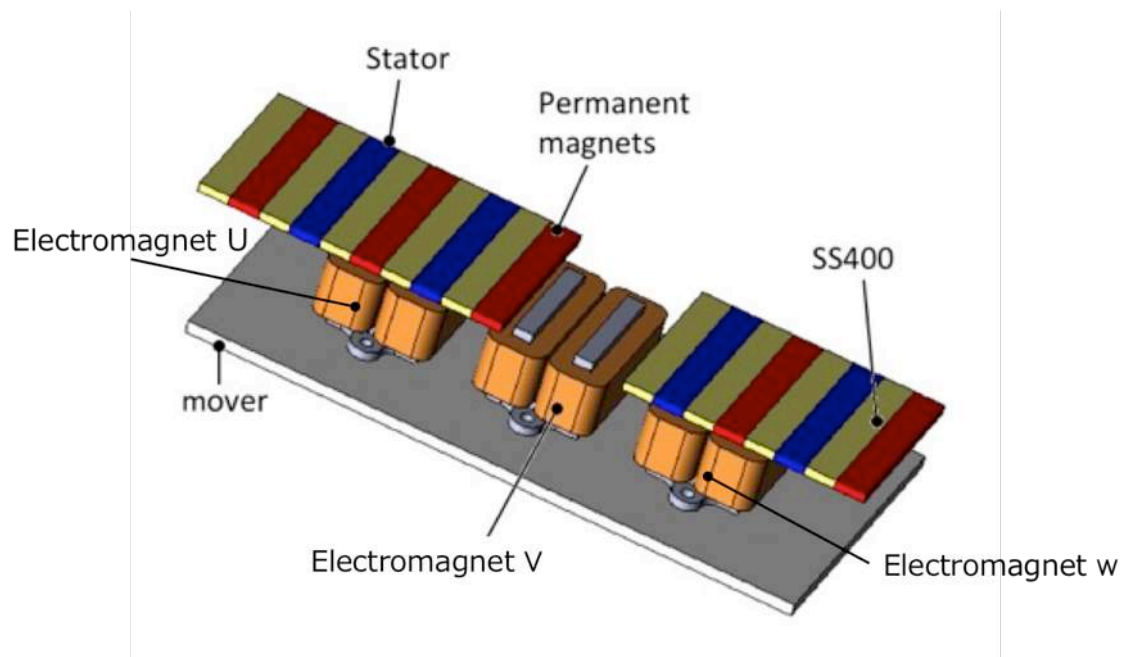


Fig. 10 linear actuator mechanism

リニアアクチュエータ機構に用いるガイドレールと電磁石を Fig. 10 に示す.コイルを 2 個直列に接続した電磁石を 3 組製作した. ガイドレールは永久磁石と SS400 の配列からなる. 永久磁石の磁極が交互になるように配列し, その間に SS400 を配置した.

## 5.1 電磁石

電磁石はコアの材質が SS400 のものと ABS のものを作成した。電磁石は電流を流したときに発生する磁界の向きを逆になるようにコイルを 2 個ずつ直列つなぎにしたものを 1 つの電磁石とし、全 3 組製作した。各電磁石は 53.3mm ずつずらしている。これは後述するガイドレールの配列のパターンによるものである。3 相交流を電磁石に入力する場合に各電磁石を配列パターンの 1/3 に相当する位相を持たせる必要があるからである。今回は

$x$  : 電磁石の位相[mm]

$D$  : 配列パターン全長[mm]

$x = a * D + D/3$  ( $a$ : 定数)

より、 $D=40$ [mm],  $a=1$  として  $x=53.3$ [mm] から電磁石の位相を決定した。

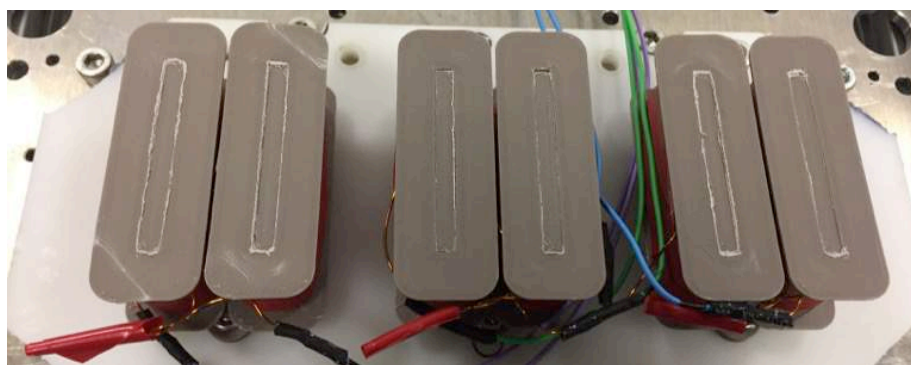


Fig. 11 Electromagnets (Core ABS)

### 5.1.1 コイル

コイルには  $\phi 0.5$ [mm] の銅線を用い、コアの材質が SS400 のものは 160 回巻き、ABS のものは 240 回巻きとした。コイルを作成する際に ABS 製のボビンと Fig. 12 の装置を使用してコイルの作成を行った。回転数のカウントと回転角度の調整が可能である。回転部分に 3D プリンタで作成した部品とボルトを用いたボビンの取付け具を製作した。コイルの諸元を Table 1, Table 2 に示す。ガウスメーター(F.W.BELL(現 OECO)社製バッテリー内蔵ガウスメーター6010型)Fig. 13 を用いてコイルに発生する磁束密度と電流値の関係を計測した。結果を Fig. 14 および Fig. 15 に示す。巻いた銅線が解けないようにコイルの上からビニールテープで固定した。





Fig. 12 Coil winding device



Fig. 13 Gauss Tesla Meter



Table 1 160turn coil (core material: SS400)

Coil No,	Resistance [Ω]	Inductance [μH]	
		100Hz	1kHz
1	1.67	2786	2052
2	1.67	2795	2014
3	1.67	2795	2043
4	1.66	2775	1995
5	1.60	2739	1970
6	1.63	2737	1972
Ave	1.65	2771	2008

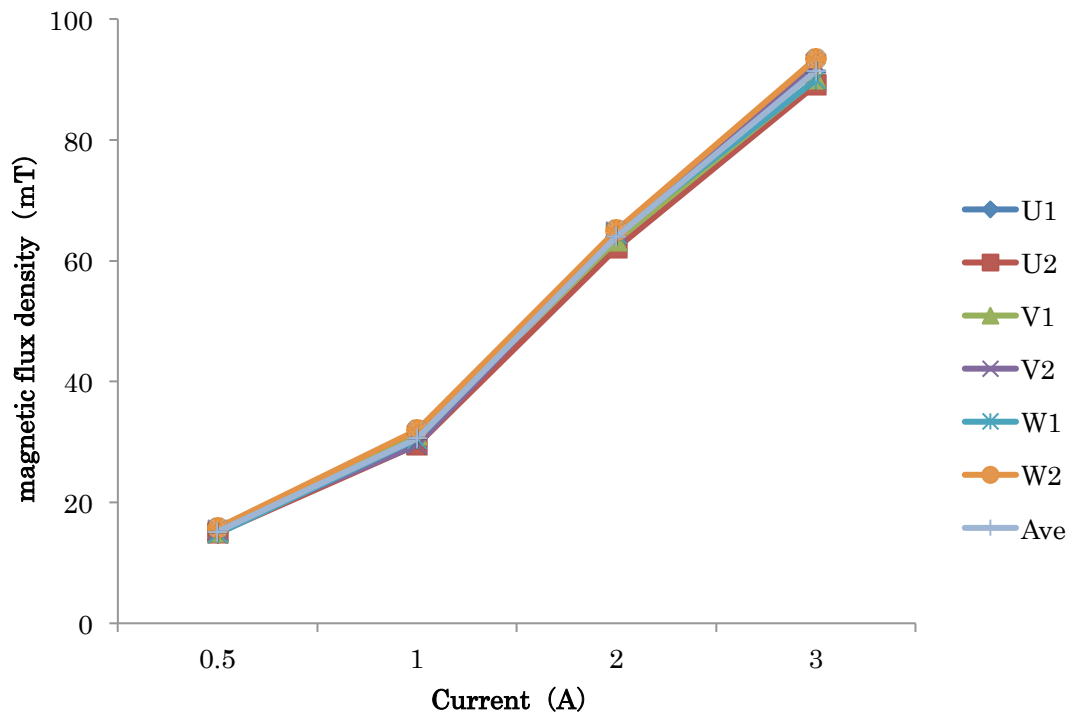


Fig. 14 The generated magnetic flux density ( core material: SS400)

Table 2 240turn coil (core material: SS400)

Coil No,	Resistance [Ω]	Inductance[μH]	
		100Hz	1kHz
1	2.3	1016	1013
2	2.3	1071	1071
3	2.3	1103	1099
4	2.3	1069	1066
5	2.3	1003	1000
6	2.3	1119	1112
Ave	2.3	1064	1060

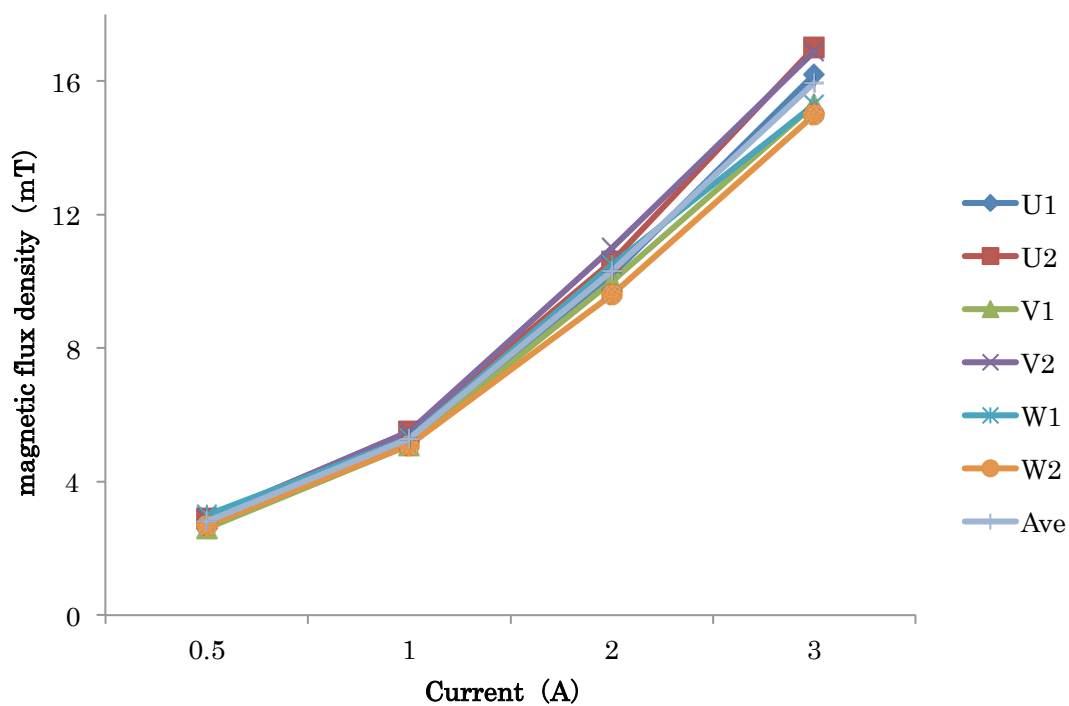


Fig. 15 The generated magnetic flux density ( core material: ABS)

### 5.1.2 コア材

Fig. 16 に電磁石のコアを示す。コア材の材質として軟磁性体の SS400 と非磁性体の ABS を用いた。ABS を用いた電磁石はコイルの巻き数の増加に対応できるようにコアの芯に当たる部分を細くした。形状を Fig. 17 および Fig. 18 に示す。



Fig. 16 Electromagnets (core material: SS400 ABS)

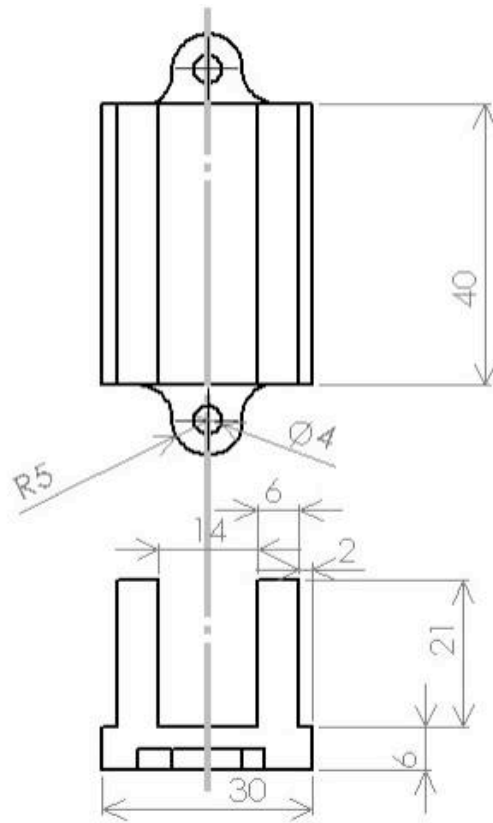


Fig. 17 Shape of electromagnet core (SS400)

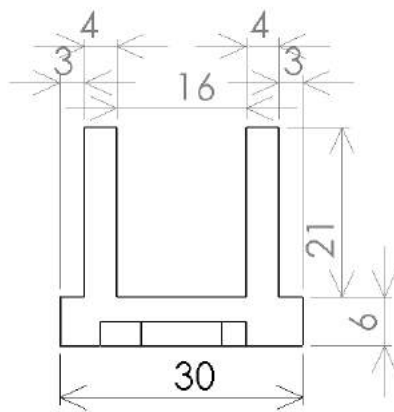


Fig. 18 Shape of electromagnet core (ABS)

## 5.2 ガイドレール

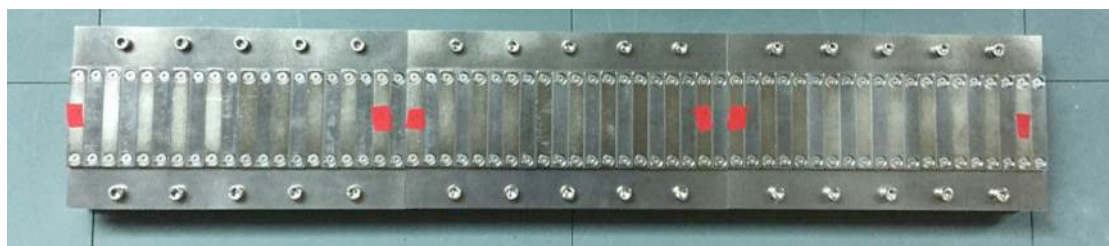


Fig. 19 guide rail

Fig. 19 に製作したガイドレールを示す。ガイドレールは永久磁石と SS400 の配列からなる。永久磁石の磁極を S 極, N 極を交互に配列し, その間に SS400 を配置した。用いた永久磁石と SS400 は共に寸法 3[mm]×10[mm]× 60[mm] であり, 10 [mm]×60[mm] の面が電磁石と向かい合うように下穴を開けたアルミ板に SS400 とネオジム磁石をネジとナットで固定した。ガイドレールの全長は 600 [mm] , 幅は 60 [mm] である。用いた永久磁石は N35 ネオジム磁石であり 3 [mm] の方向に磁化されている。

## 5.3 駆動原理

3 組の電磁石に流す電流の向き変化させることで吸引力, 反発力が強く働く向きが常時進行方向に向くように制御する。その吸引力と反発力を推力として浮上スライダ部を進行方向に駆動させる。そのときの 3 組の電磁石に流す電流を Fig. 20 に示す。I<sub>u</sub>, I<sub>v</sub>, I<sub>w</sub> はそれぞれ電磁石 U, V, W に入力する電流値である。駆動方法を Fig. 21 を用いて説明する。電磁石 U に真上の永久磁石と吸引力が働くように電流を流し, その後進行方向に吸引力が働くように V に電流を流す。移動が完了したら次は W に電流を流して移動を行う。これらの動作を繰り返すことで走行を行う。実際には Fig. 20 のような 3 相交流を書く電磁石に入力する。3 相交流が 1 周期入力されると浮上スライダが 40[mm]移動するように設計した。

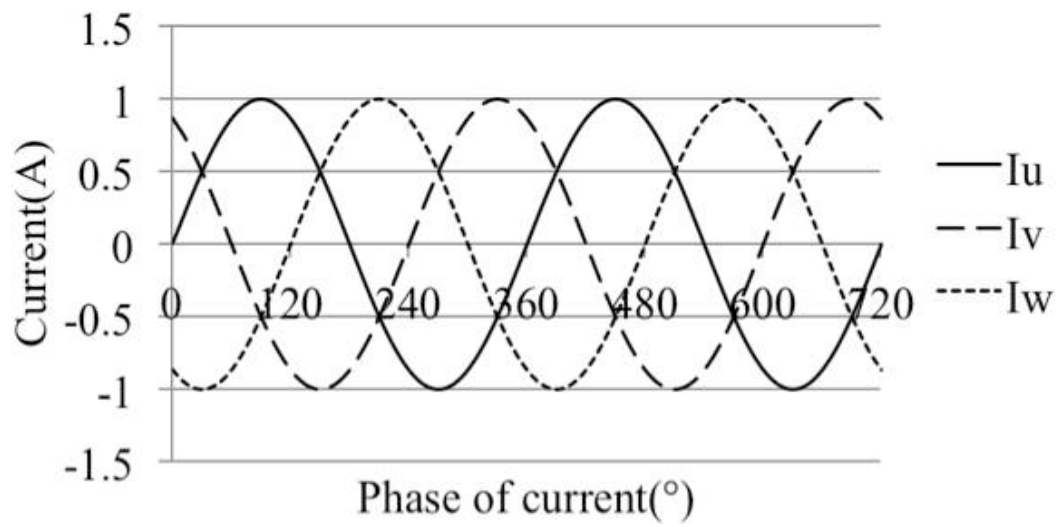


Fig. 20 Each current of the electromagnet

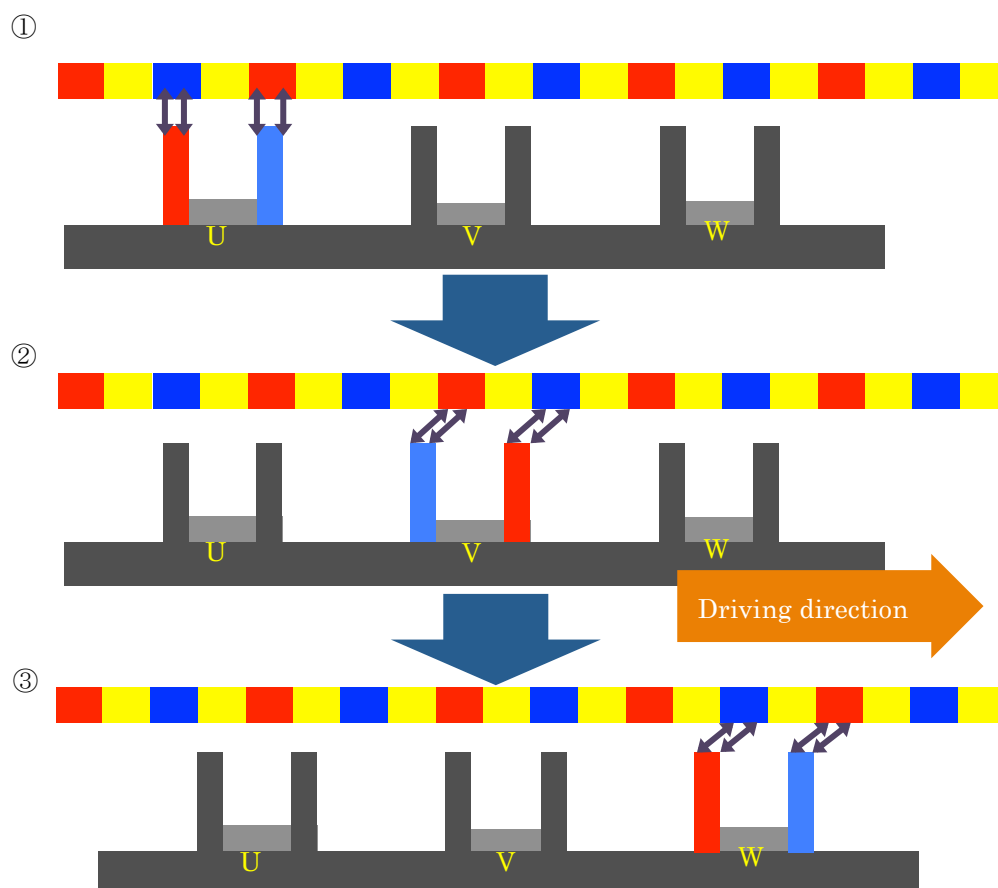


Fig. 21 Driving principle

#### 5.4 電圧制御回路

開発/評価ボード(NUCLEO-F401RE)と DC モータードライバ IC(TA7291P), NAND 回路 IC(SN74HC00N)を使用して電磁石に流れる電圧を制御する装置を製作した. Fig. 25 に回路の全体像を示す. Fig. 20 のような電流を電磁石に流すにはその向きと値を変化させる必要がある. この装置では PWM 制御を用いて行うことにした. PWM 制御とは半導体を使った電力を制御する方式の 1 つであり, オンとオフの繰り返しスイッチングを行うことで出力される電力を制御する方法である. 定電圧の入力からパルス列のオンとオフの一定周期を作り, オンの時間幅を変化させる電力制御方式を PWM 制御と呼ぶ. 早い周期でこのスイッチングを行うことで, オンのパルス幅に比例した任意の電圧を得ることができる.

TA7291P は TOSHIBA 製の DC モータ用フルブリッジドライバであり, モータのコイルに流れる電流の向きを切り替えることでモータの正転・逆転・ストップ・ブレーキの切り替えを行うドライバである. 平均出力電流は 1.0[A]および最大出力電流は 2.0[A]である. 出力側と制御側の 2 系統電源端子かつ出力側にはモータ電圧を制御できる Vref 端子を持っており, モータへの印加電圧調整ができる. また, 熱遮断回路と過電流保護回路を内蔵しており, 出力電流値が 2.5[A]を越えた場合や, チップ自体の温度が 170[°C]をこえると出力を Off にする機能がある. TA7291P の諸元を Table 3 に示す.

Table 3 TA7291P Specification table

	Rated Value		Rated Value
Logic supply voltage	25 [V]	Average output current	1.0 [A]
Output supply voltage	25 [V]	Power dissipation	12.5 [W]
Operating supply voltage	25 [V]	Operating temperature	-30~75 [°C]
Max output current	2.0 [A]	Storage temperature	-55~150 [°C]

SN74HC00N の論理回路は正ロジックを用いた NAND 型である. Fig. 22 中の A,B は SN74HC00N の各 NAND 回路の入力を, Y は出力を表している.NAND 型理論回路の入力 AB の関係と出力 Y の関係を Table 5 に示す. SN74HC00N の諸元を Table 4 に示す.

Table 4 SN74HC00N Specification table

	Rated value		Rated value
Max supply voltage	2 [V]	Input voltage	0~Vcc [V]
Min supply voltage	6 [V]	Output voltage	0~Vcc [V]
Min high level input voltage (Vcc=4.5 [V])	3.15 [V]	Input transition rise/fall time (Vcc=4.5[V])	500 [ns]
Max low level input voltage (Vcc=4.5 [V])	1.35 [V]	Operating free-air temperature	-40~85 [°C]

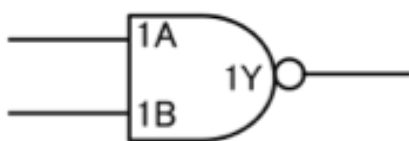


Fig. 22 NAND circuit diagram

Table 5 NAND circuit I/O relation

Input		Output
A	B	Y
1	1	0
1	0	1
0	1	1
0	0	1



使用した開発/評価ボード(NUCLEO-F401RE)は mbed と親和性があり， USB mini B タイプによる給電とコードのインストールが可能である． 諸元を Table 6 に示す． 入出力が可能なピンは 50 本あり， 配置は Fig. 23 および Fig. 24 のとおりである． 今回は MacBook Air から 5[V] の電源供給することにした． mbed は ARM 社が提供するコンパイラであり， インターネットブラウザ上でプログラムの作成やデバッグ， コード作成ができる．

Table 6 NUCLEO-F401RE Specification table

	Related value		Related value
Main supply voltage	3.3, 5, 7~12[V]	ADC	12bitADC×1,1channel
MCU	STM32F401RET6	GPIO pin	50 pins
Pin out	LQFP64	MCU supply voltage	1.7~3.6[V]
Max operation clock	84[MHz]	Internal memory	512[kB](Flash),96[kB](SRAM)

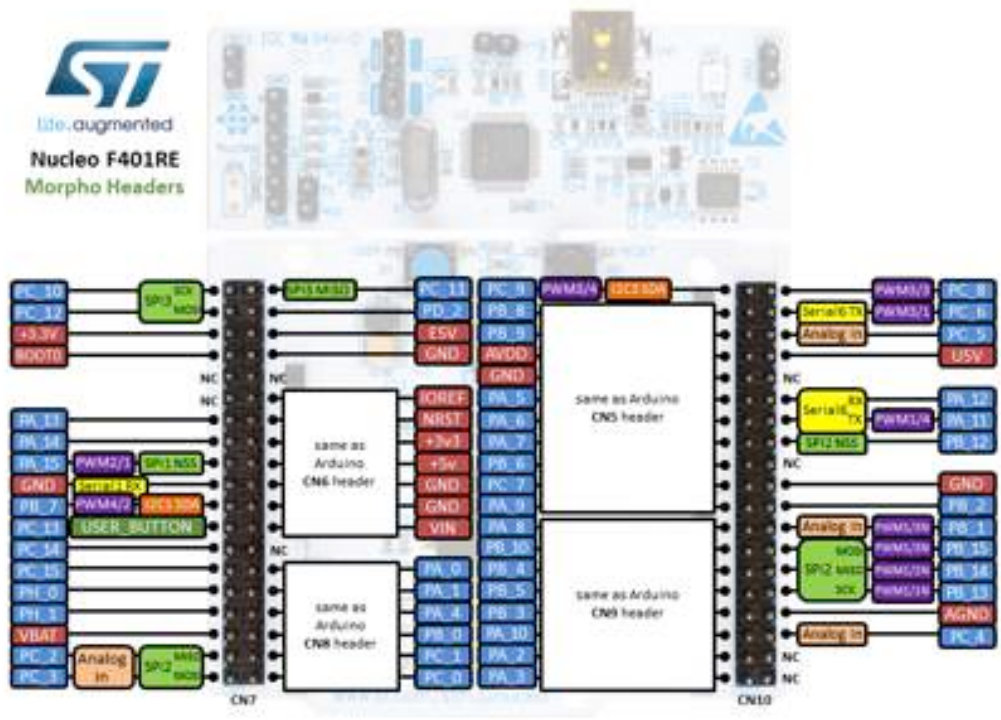


Fig. 23 Pin arrangement of NUCLEO-F401RE(1)

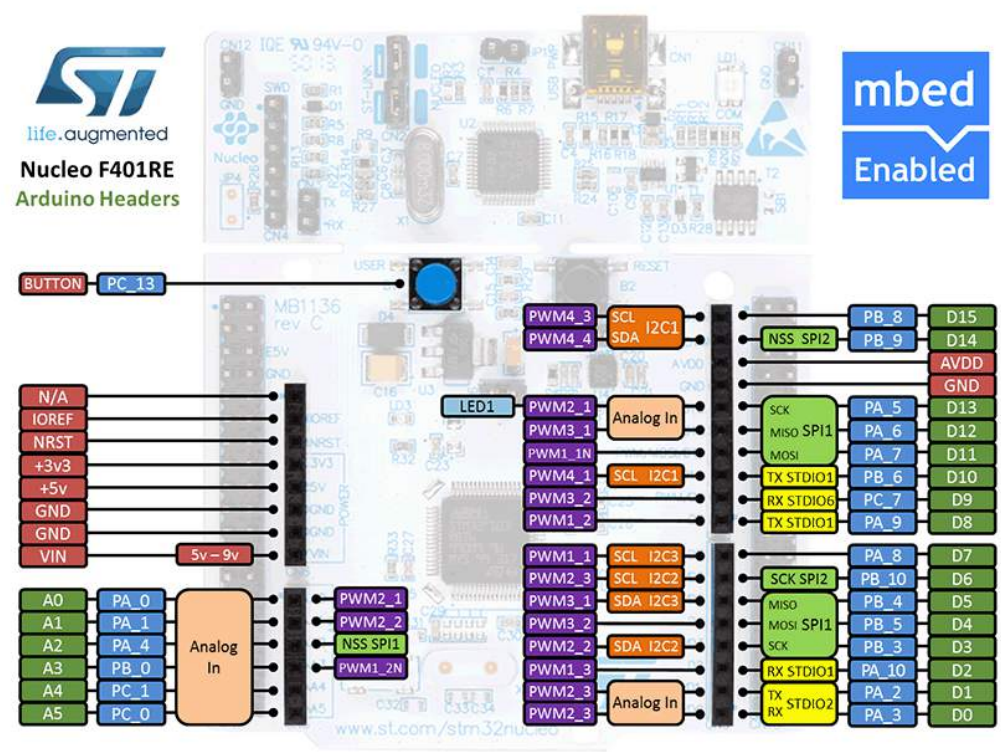


Fig. 24 Pin arrangement of NUCLEO-F401RE(2)

NUCLEO-F401RE に電流の向きを決定する出力と PWM 制御のデューティ比を決定する出力の 2 種類の出力を設け Table 7 のように出力できるように NAND 回路 IC とモータードライバと組み合わせたものを 4 組作成した。電流制御回路に用いた IC の接続は Fig. 28 のようになっている。電流の向きを決める信号(IN1)が high かつ PWM の信号(IN2)が high の間は TA7291P の 4,5 ピンに 1,0 が、電流の向きを決める信号が low かつ PWM の信号が high の間は 4,5 ピンに 0,1 が入力されるように論理回路を設計した。

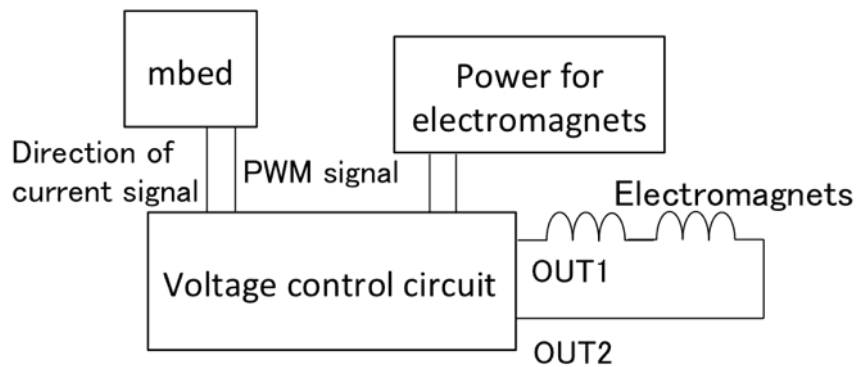


Fig. 25 current control circuit model

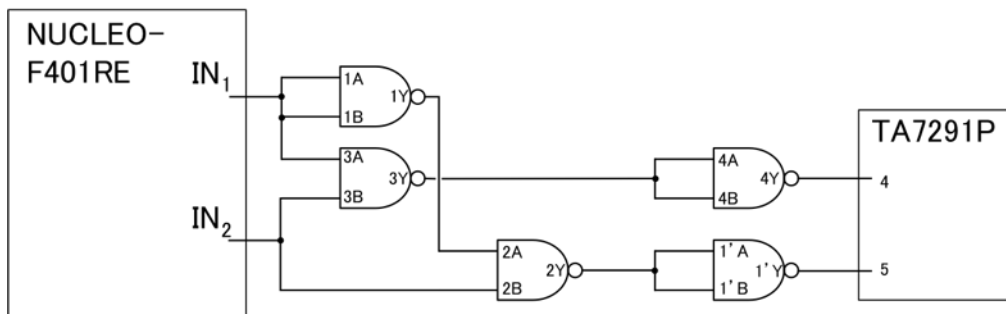


Fig. 26 Logic diagram circuit

Table 7 Detail of each I/O

NUCLEO-F401RE OUT		SN74HC00N OUT					Direction of current
IN 1(Direction of current signal)	IN2 (PWM signal)	1Y	2Y	3Y	4Y	1'Y	
1	1	0	1	0	1	0	Normal
1	0	0	1	1	0	0	-----
0	1	1	0	1	0	1	Reverse
0	0	1	1	1	0	0	-----

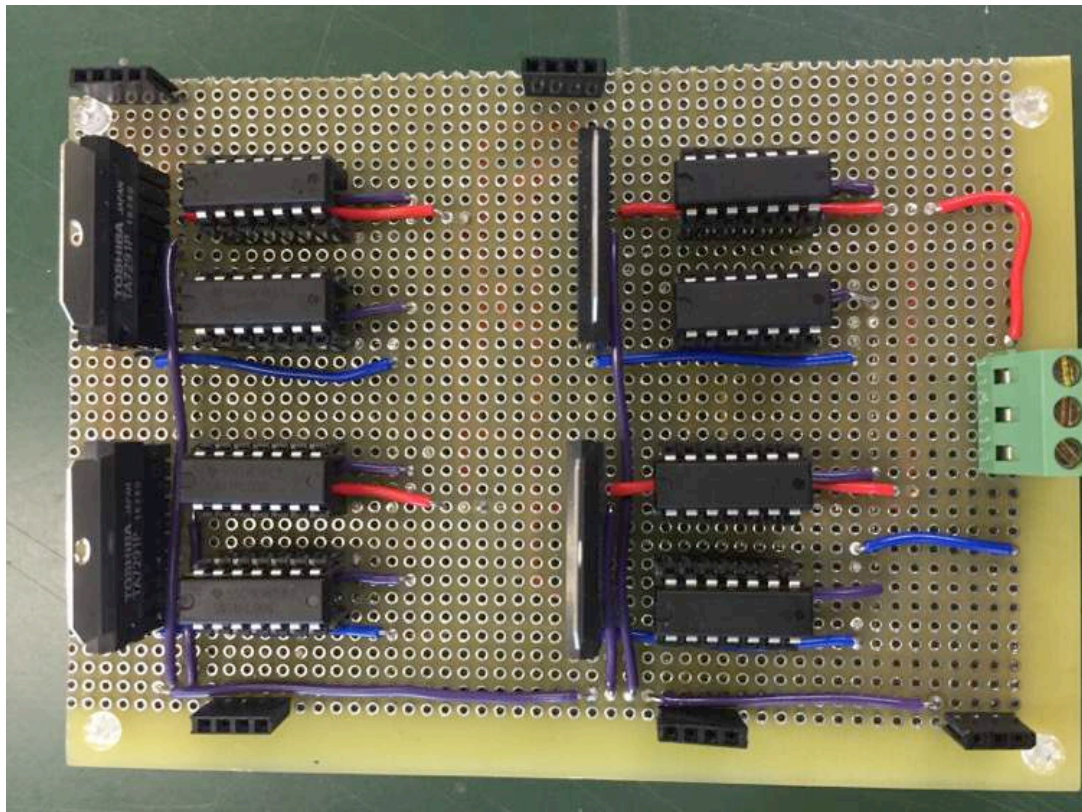


Fig. 27 current control circuit model

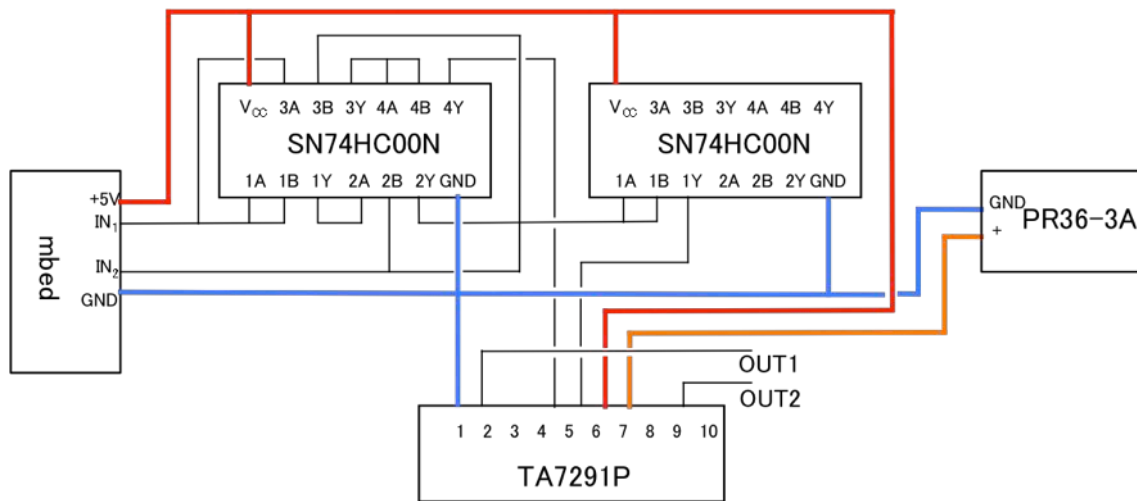


Fig. 28 current control circuit

## 5.5 プログラム

mbed コンパイラを用いてプログラムの製作を行った。NUCLEO-F401RE には PWM の信号用として D11, D10, D9 を、電流方向用の信号として D8, D7, D6 を出力用のピンとして設定し、電流の向きと値を変更して電流制御回路に入力した。

## 6. シミュレーション

### 6.1 シミュレーション方法

電磁石のコアによる推進力の変化について調べるため、FEM 磁場解析ソフトウェア JMAG を用いてシミュレーションを行った。SolidWorks で製作した 3D データを用い電磁石のコアの材料として SS400 と ABS を使用したモデルを用い推進力の変化を調べた。SS400 は形状を変更させたものについてもシミュレーションを行った。ABS を用いたものはコイルの巻き数を 160 回巻きと 200 回巻きについてシミュレーションを行った。各コイルには Fig. 20 に示す電流値を  $10^\circ$  ごとに入力し、スライダを走行方向に 40[mm]移動させた。その際進行方向に働く力である推進力の値と電流周期、スライダの位置の関係性について調べた。また、同じように電磁石のコア材に SS400 と ABS を用いた場合の垂直方向に働く吸引力と電流周期、スライダの位置の関係性についても調べた。

### 6.2 推進力と安定点

推進力の正負はスライダの進行方向と同方向に働くものをプラスとし、逆方向をマイナスとした。推進力の値がプラスの間はスライダが進行方向に進み、マイナスの間は逆方向に進むことを意味する。その際、進行方向に進むにつれて推進力がプラスからマイナスに変化する位置を安定点と呼ぶ。スライダは安定点よりも手前の位置では進行方向に進み、安定点を通り過ぎると逆向きに推進力が働くためこの位置で静止する。逆に、推進力がマイナスからプラスに働く位置は不安定点と呼ばれ、この位置より手前では戻るように力が働き、奥では進行方向に進むように推進力が働くためスライダがこの位置では安定して静止しないためである。各位相時の安定点の位置を赤線で示す。例として Fig. 29 に SS400 をコア材に用いた場合の電流周期  $0^\circ$  の際の移動距離と推進力の値の関係について示す。この場合は 31[mm]が安定点、11[mm]が不安定点となる。8[mm]付近でも正負が切り替わっており安定点、不安定点であると言えるが他の安定点、不安定点と比較した際に影響が小さいものであると考えた。他の電流周期にも散在するが安定点としては含めていない。

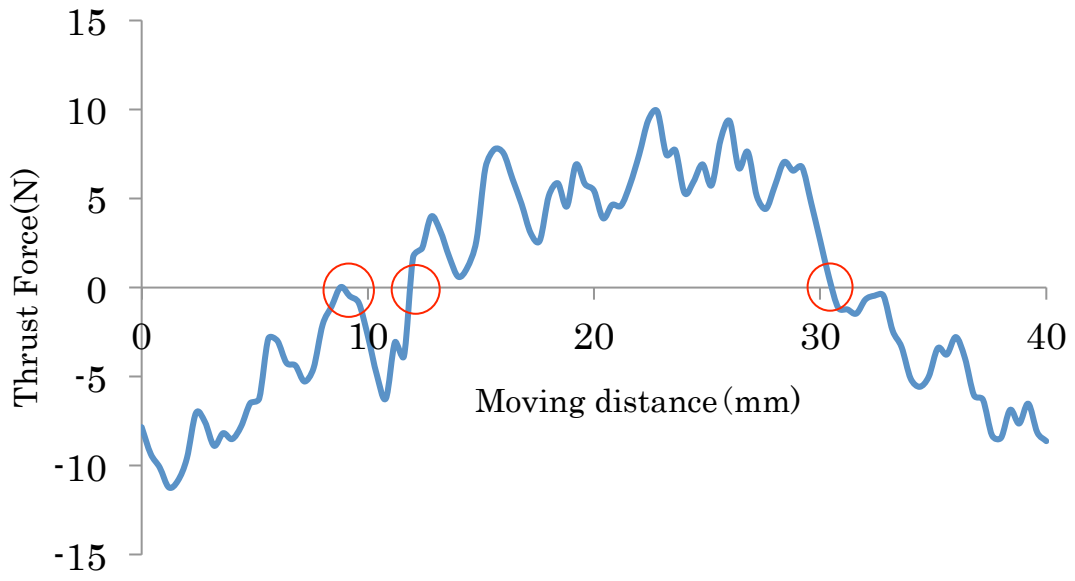


Fig. 29 Relationship of between thrust force and moving distance  
(Core:SS400)



### 6.3 鉄心モデル

コア材に SS400 を用いた電磁石を使ったモデルでシミュレーションを行った. 結果を Fig. 30 ~Fig. 32 に示す.

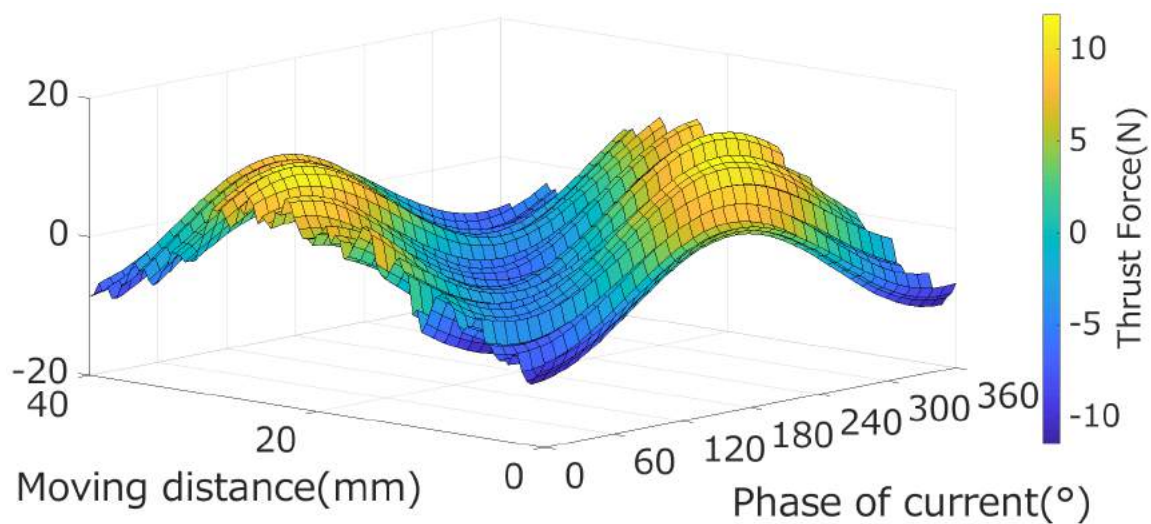


Fig. 30 Relationship of between thrust force and phase of current  
(Core:SS400)

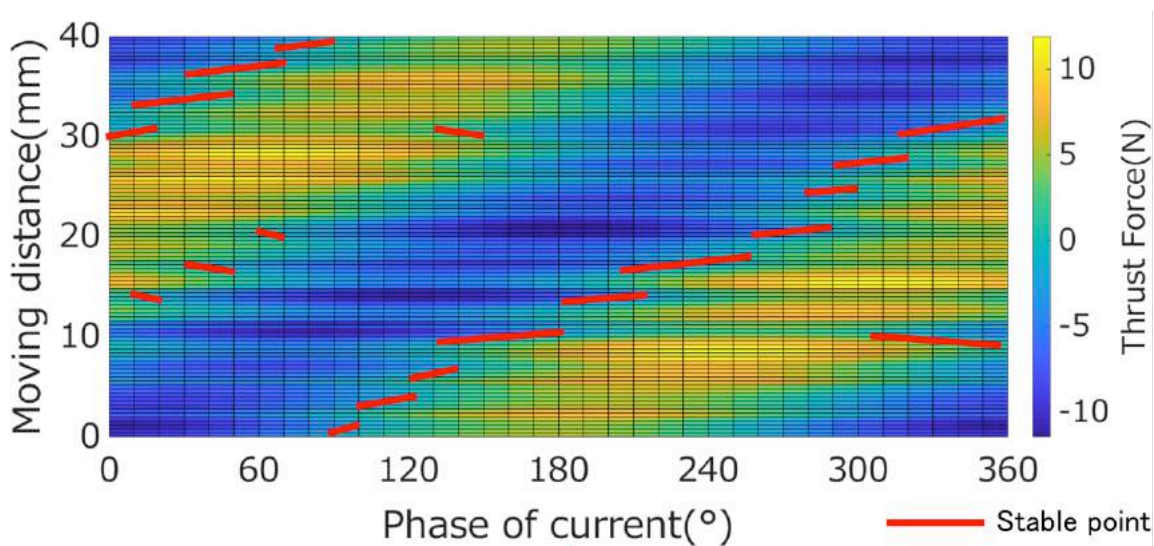


Fig. 31 Relationship of between stable point and phase of current  
(Core : SS400)



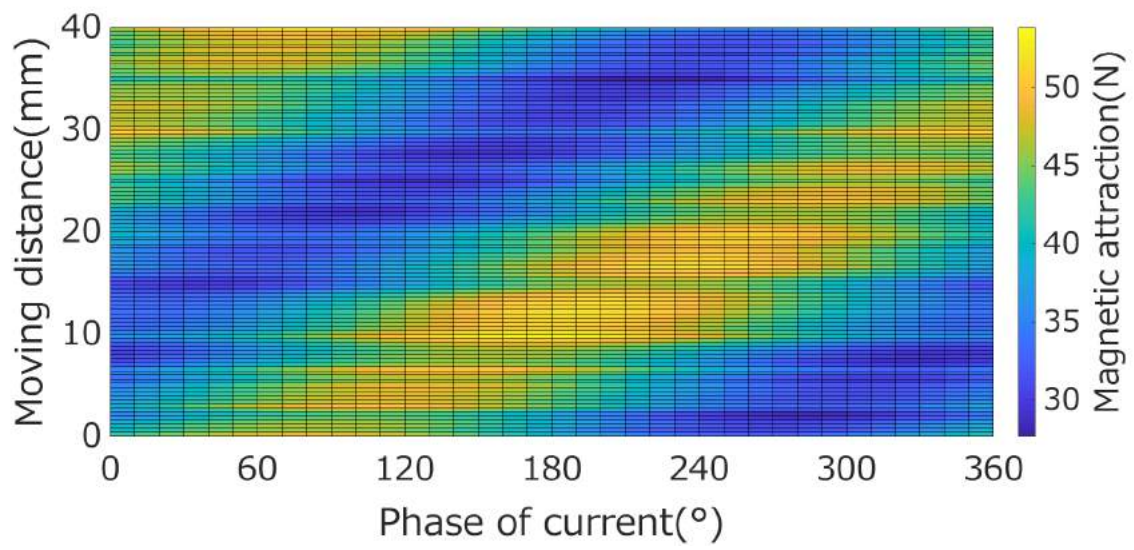


Fig. 32 Relationship of between vertical magnetic attraction and phase of current  
(Core: SS400 )

#### 6.4 鉄心幅変更モデル

コアの形状を Fig. 33 に示す。  $H_c$  は電磁石コアの歯の幅、  $H_c$  は電磁石の電磁石鉄心同士の距離、  $H_m$  は電磁石同士の距離である。  $H_m=53[\text{mm}]$ 、  $H_c=20[\text{mm}]$  で固定し  $H_c$  を 6, 8, 10, 12, 14[mm] の 5 種類のモデルを製作し、 解析を行った。 Fig. 34～Fig. 38 に示す。

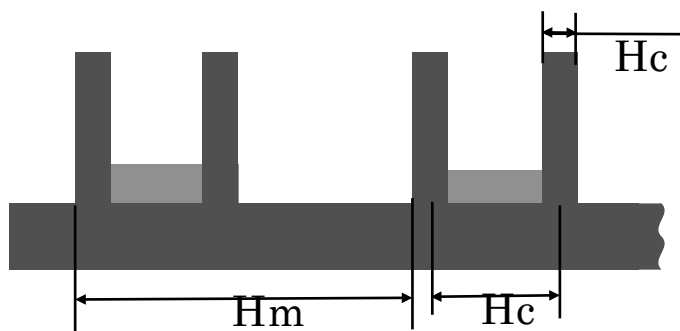


Fig. 33 Shape of electromagnet core (  $H_c$  change model)

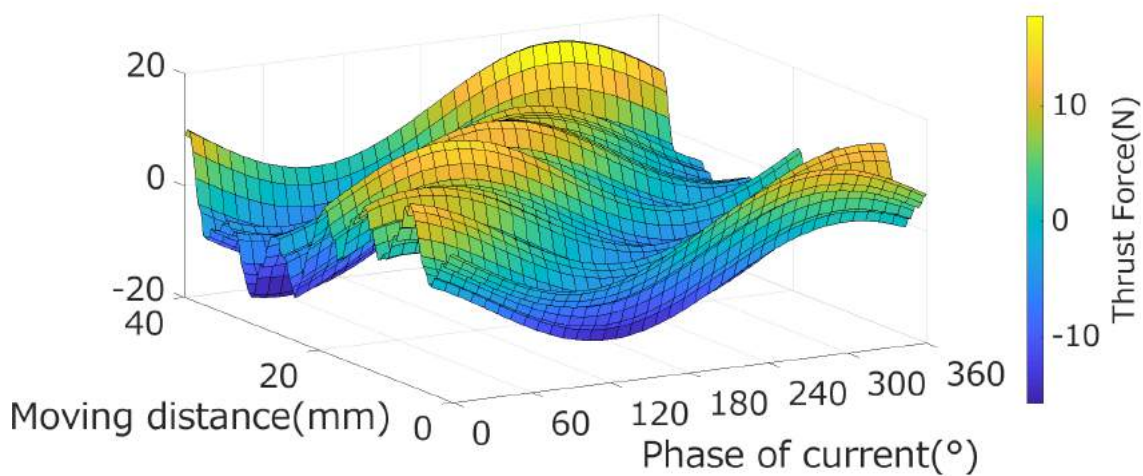


Fig. 34 Relationship of between thrust force and phase of current  
(Core : SS400  $H_c=8\text{mm}$ )

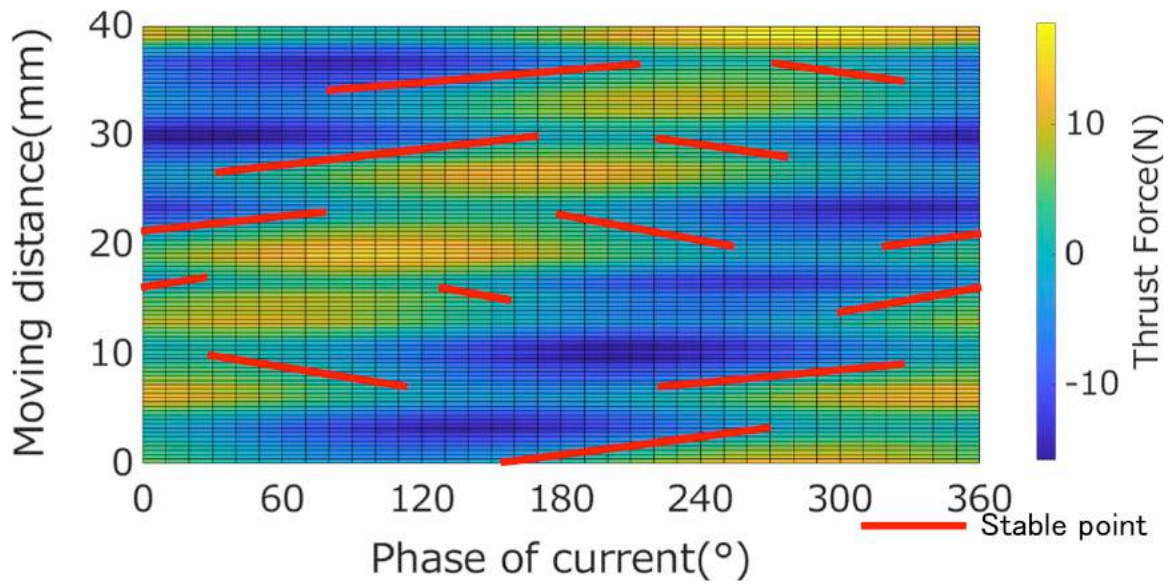


Fig. 35 Relationship of between stable point and phase of current  
(Core : SS400 Hc8mm)

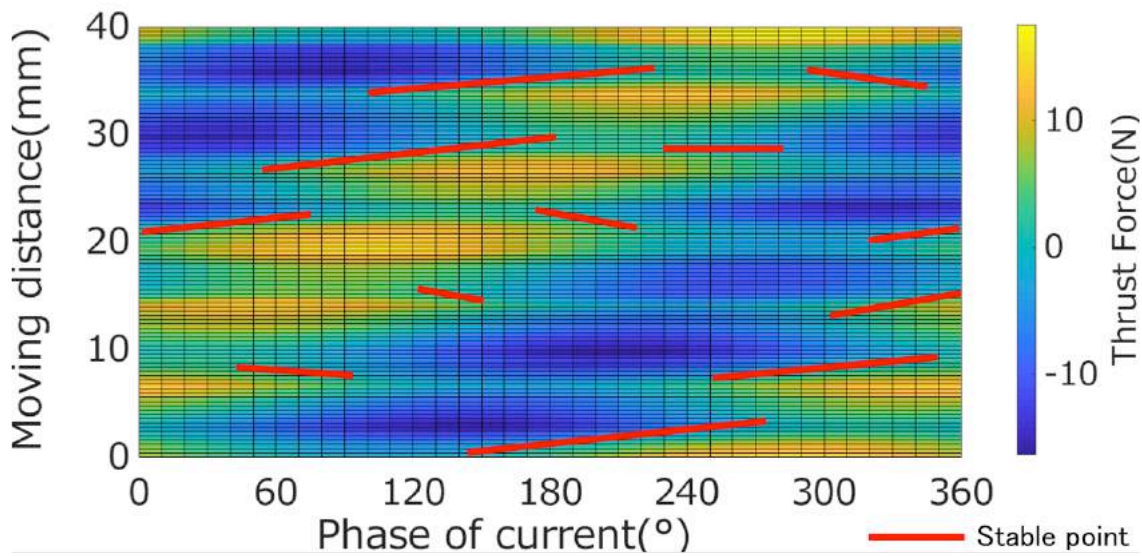


Fig. 36 Relationship of between stable point and phase of current  
(Core : SS400 Hc10mm)



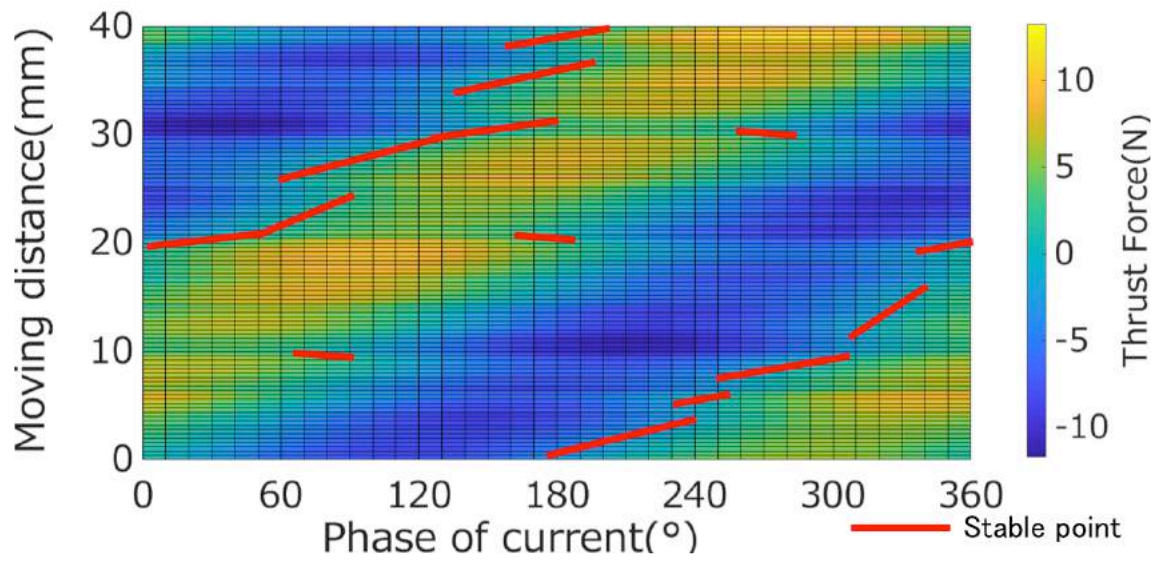


Fig. 37 Relationship of between stable point and phase of current  
(Core : SS400 Hc12mm)

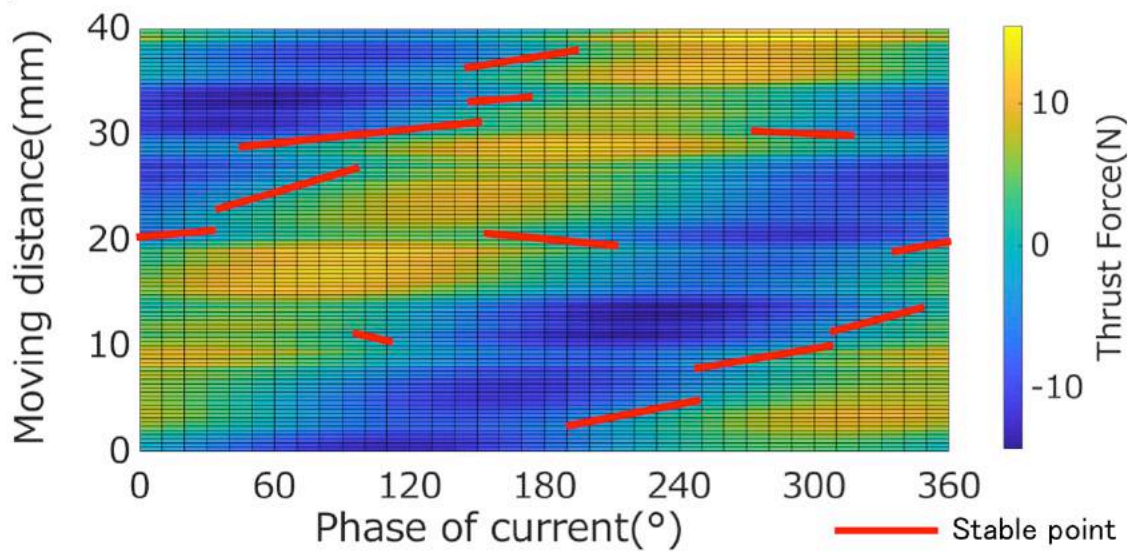


Fig. 38 Relationship of between stable point and phase of current  
(Core : SS400 Hc14mm)

### 6.5 鉄心アール付きモデル

鉄心の歯にアールをつけたモデルを使ってシミュレーションを行った。R=2 の際の鉄心の形状を Fig. 39 に示す。鉄心の歯の幅は 6mm で固定し、R を 1, 2, 3[mm]に変更した 3 種類のモデルを用いた。解析結果を Fig. 40～Fig. 42 に示す。

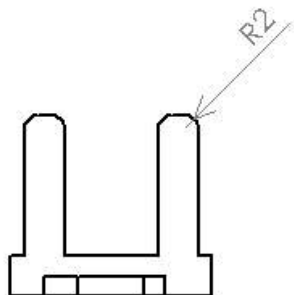


Fig. 39 Shape of electromagnet core (R change model)

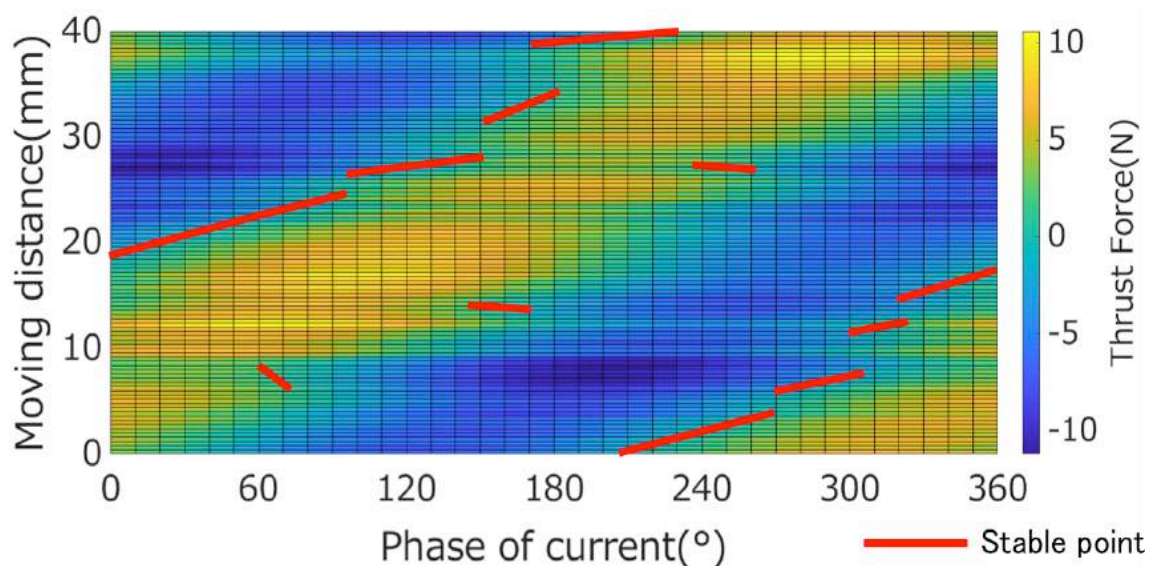


Fig. 40 Relationship of between stable point and phase of current

(Core : SS400 R1mm)

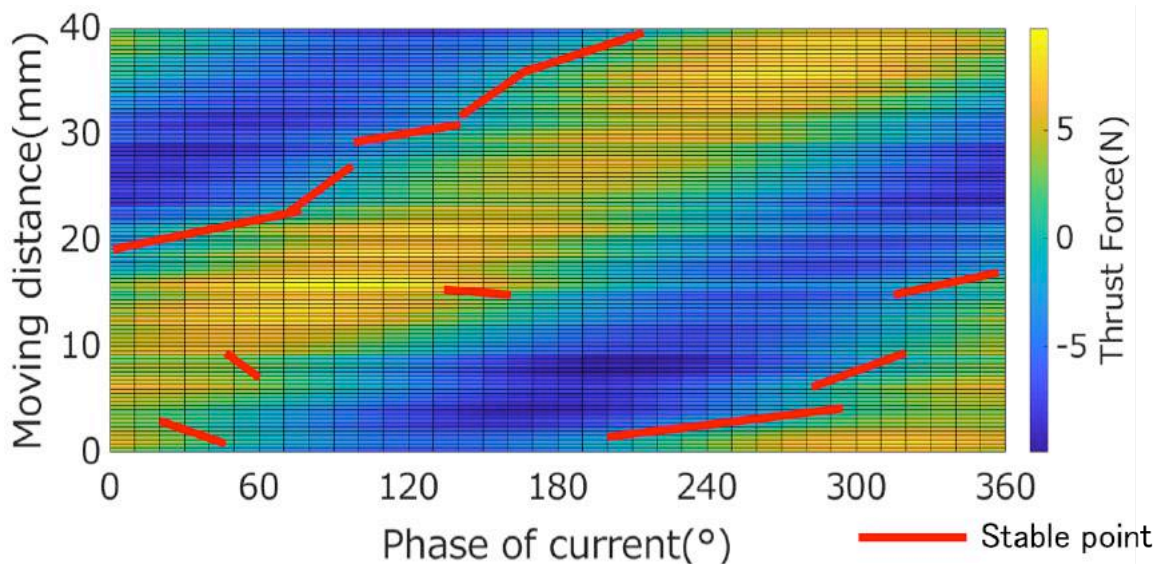


Fig. 41 Relationship of between stable point and phase of current  
(Core : SS400 R2mm)

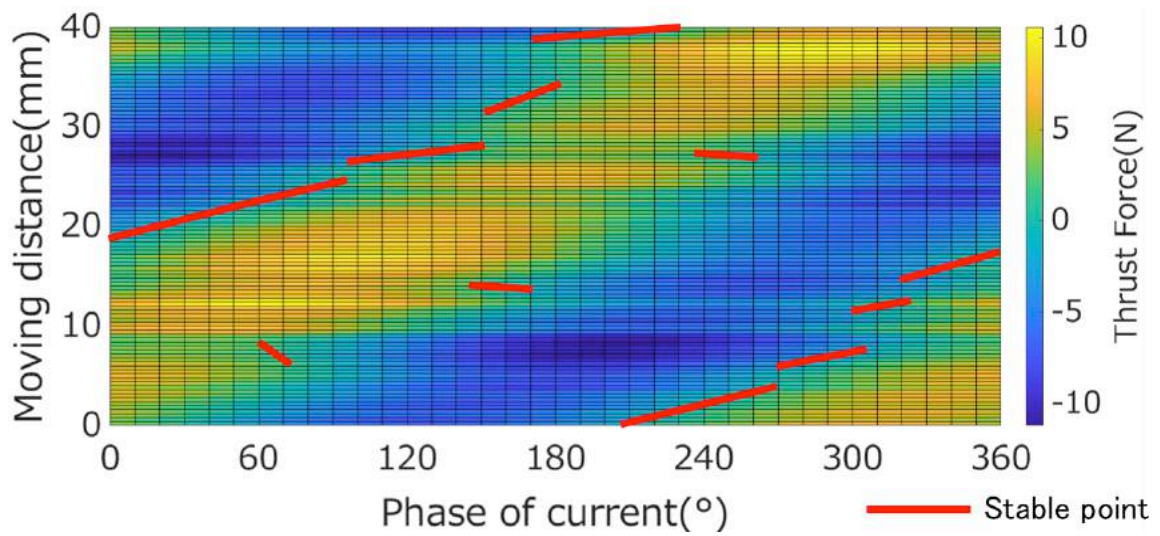


Fig. 42 Relationship of between stable point and phase of current  
(Core : SS400 R3mm)



## 6.6 コアレスモデル

コア材に ABS を用いた電磁石を使ったモデルでシミュレーションを行った。コイルの巻き数を 240 回と 160 回の 2 種類で行った。結果を Fig. 43～Fig. 47 に示す。

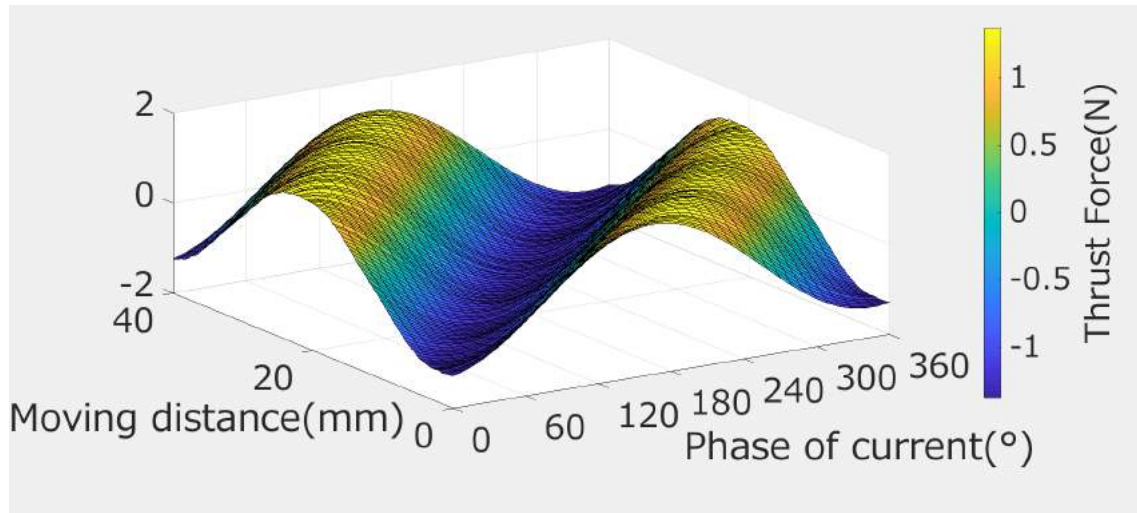


Fig. 43 Relationship of between thrust force and phase of current  
(Core : ABS 240turn)

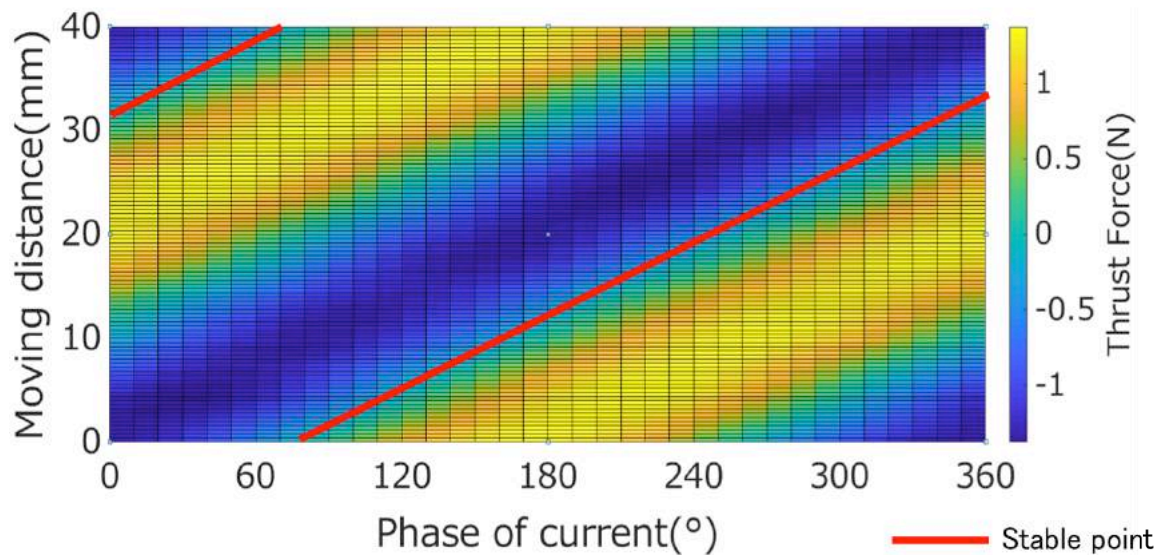


Fig. 44 Relationship of between stable point and phase of current  
(Core : ABS 240turn)

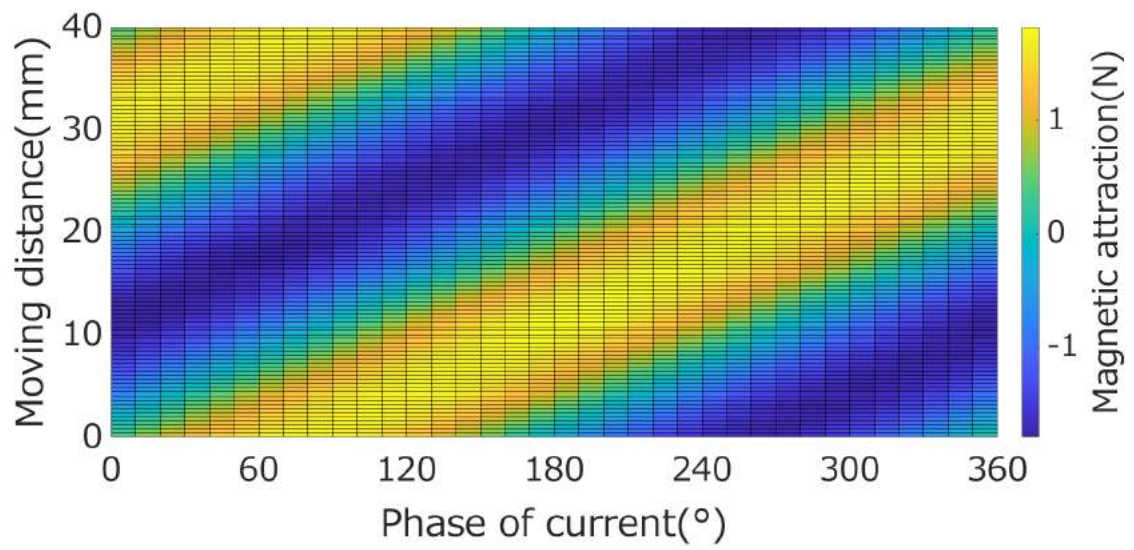


Fig. 45 Relationship of between vertical magnetic attraction and phase of current  
(Core : ABS 240turn)

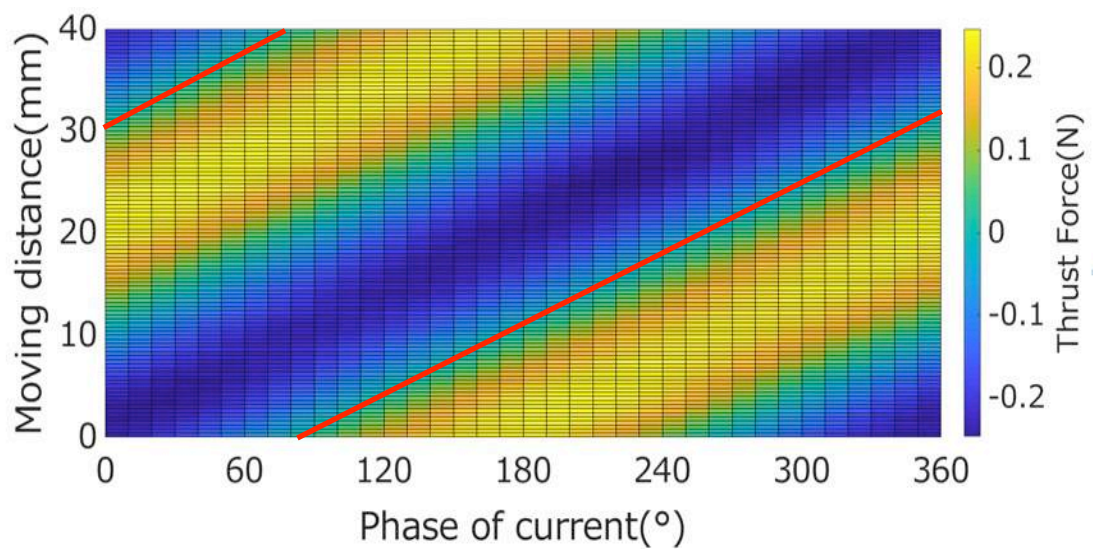


Fig. 46 Relationship of between stable point and phase of current  
(Core : ABS 160turn)



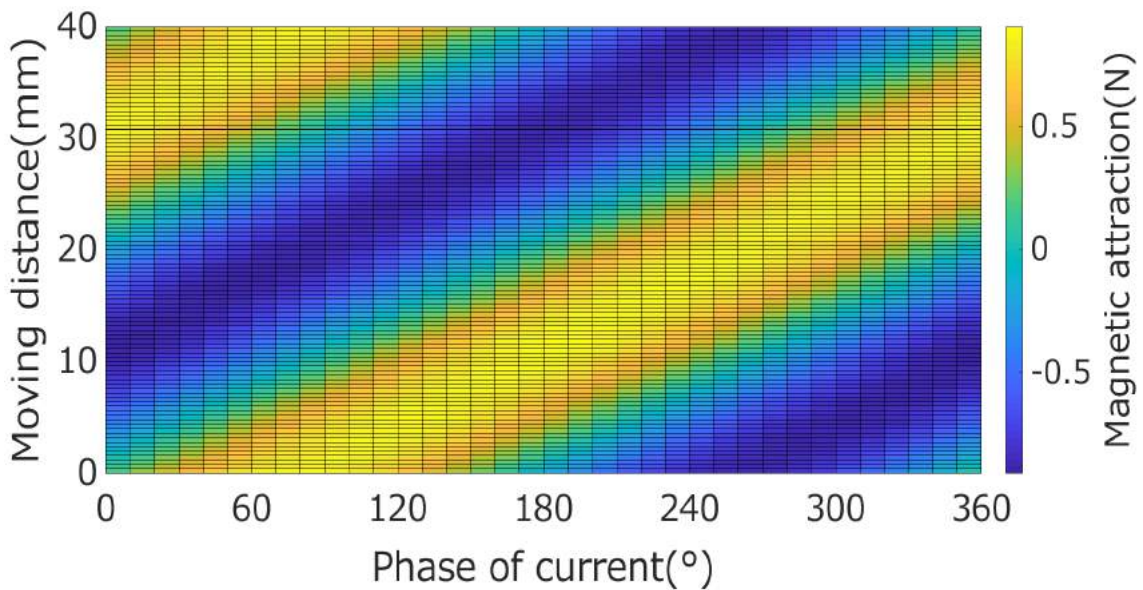


Fig. 47 Relationship of between vertical magnetic attraction and phase of current  
(Core : ABS 160turn)

#### 6.7 シミュレーション結果

コア材に SS400 を用いた場合、推進力の大きさは+13~-13N で推移し、安定点の位置は電流周期の変化に対して線形的に変化しておらず、連続的になっていない部分があることが分かる。特にコア材歯幅 6mm アールなしのモデルでは特徴が顕著に出ており、同じ電流周期でも安定点が 2 箇所存在する場所があることがわかった。

コア材に SS400 を用いた場合でも、鉄心の歯の幅を変更した場合は、8[mm], 10[mm], 12[mm] と幅が広くなるにつれて安定点の位置変化が線形的になっており連続している部分も増加している。また、同じ周期における安定点の個数も減少している。しかし、14[mm]よりも 12[mm]の方が線形に近く、2 箇所の安定点が同化している部分があることがわかった。

鉄心の両端にアールをつけたモデルでは、鉄心につけたアールが 3mm の場合に最も滑らかになったと言える。

コア材に ABS を用いた場合では推進力の大きさは+1.5~-1.5N と SS400 の際よりも推進力の大きさは小さいが、安定点の位置は電流周期の変化に対して線形的に変化している。各電流周期における推進力の変化も滑らかである。

垂直方向に発生する吸引力は、鉄心の形状に関わらず SS400 をコア材に用いた場合では常に 40N ほどの吸引力が発生し、ABS を用いた場合では、+1~-1N となった。

## 6.8 考察

コア材の材質を変更させたことで、安定点の位置が線形的になったことについて考察する。これはコア材と永久磁石間に働く吸引力に原因があると考えられる。SS400 は強磁性体であることに比べて ABS は非磁性体である。強磁性体である SS400 をコア材として用いると永久磁石とコア材間に吸引力が働く。非磁性体である ABS をコア材として用いた場合では、コア材と永久磁石間に吸引力が働かないため、スライダに働く吸引力はコイルに流れる電流によって発生する磁力と永久磁石間の吸引力のみとなる。その結果スライダに発生する推進力がコア材に発生する吸引力の影響を受けないため、安定点の位置が電流周期に伴い、線形的に変化したと考えられる。

コア材に SS400 を用い、鉄心の歯の幅を変更した場合では 8[mm], 10[mm], 12[mm] と幅が広くなるにつれて安定点の位置変化が線形的になっており連続している部分も増加している点について考察する。電流周期に伴う安定点の位置変化が 12[mm] のモデルが最も線形的に変化しているのは永久磁石に対向する鉄心の面積が最適であるからだと考えた。対抗する面積が広くなるほど、影響を受ける面積が広くなる。これによって異なる幅の鉄心をもつ電磁石を同じように位置を変化させても、面積が広い方が磁界の変化の影響を受けにくいと言える。14[mm] 幅の場合において 12[mm] 幅よりも安定点の変化が線形的ではないのは、他の永久磁石からの磁界変化も受けてしまっているからではないかと考えた。

コア材に SS400 を用い、鉄心の歯のアールを変更した場合では 1[mm], 2[mm], 3[mm] と大きくなるほど安定点の位置変化が線形的になっている。これも歯の幅を変更した場合と同じく、永久磁石から受ける磁界の影響が滑らかになるためであると考えられる。

シミュレーション結果より、磁気浮上リニアスライダのリニアアクチュエータ機構として適しているのは、ABS をコアに用いたものであると考えられる。SS400 を用いたものは、形状を変化させることで、推進力の大きさを変化させずにより滑らかに走行させることができるが、SS400 と永久磁石間に働く吸引力による影響を完全に取り除くことは不可能である。その点、コア材を ABS に変更することで、コア材と永久磁石の間に発生する吸引力を取り除くことが可能である。同じ 160 回巻きのコイルを使う場合、コア材を ABS にすると SS400 の際と比較して発生する推進力が  $\pm 40\text{N}$  から  $\pm 0.3\text{N}$  に減少し推進力不足となる可能性があるといった問題点がある。これはコイルの巻き数の増加、コイルに流れる電流値の増大、ガイドレールと電磁石間の距離を狭めることで解決することができる。今回は巻き数を 240 回巻きに変更することで  $\pm 2\text{N}$  にすることができることがわかった。

## 7. 浮上・走行実験

製作したリニアアクチュエータ機構を用いて走行実験を行った。電磁石のコア材として SS400 を用いたものと ABS を用いたものの 2 種類で走行実験を行い、両者の結果を比較、またシミュレーションの結果とも比較した。

### 7.1 走行実験

#### 7.1.1 実験装置

SS400 を電磁石のコア材として用いて走行実験を行った。リニアアクチュエータ機構のみを走行方向に移動できるように設置した。ガイドレールと電磁石の距離は 3mm になるようにアルミフレームや固定用器具を用いて固定した。走行実験の様子を Fig. 48 に示す。

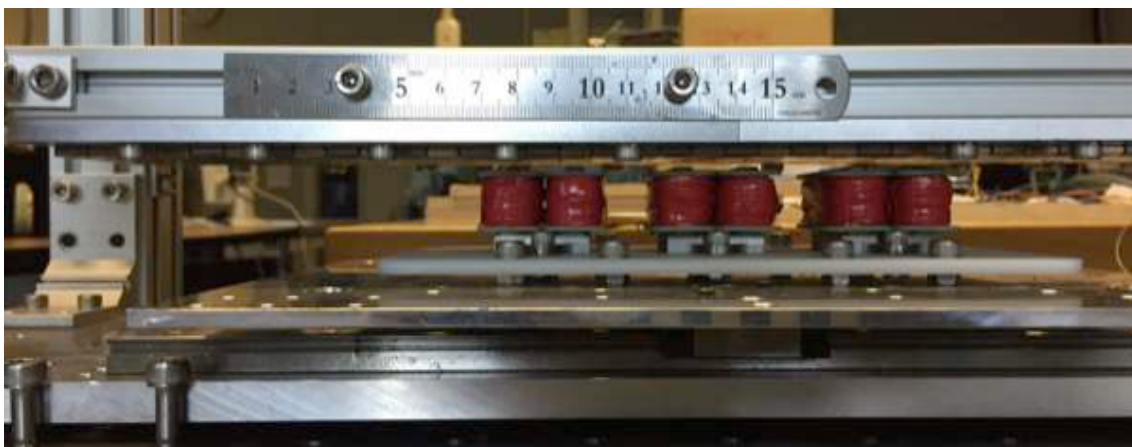


Fig. 48 Running experiment(Core:SS400)

#### 7.1.2 実験方法

制作した電流制御回路を用いて各電磁石に PWM 変換した 3 相交流を入力した。周期は  $10^\circ$  ごとに変化させて、スケールを用い静止安定する位置を目視で計測した。電流周期が  $0^\circ$  の際に静止安定した位置を 0mm とした。

### 7.1.3 実験結果

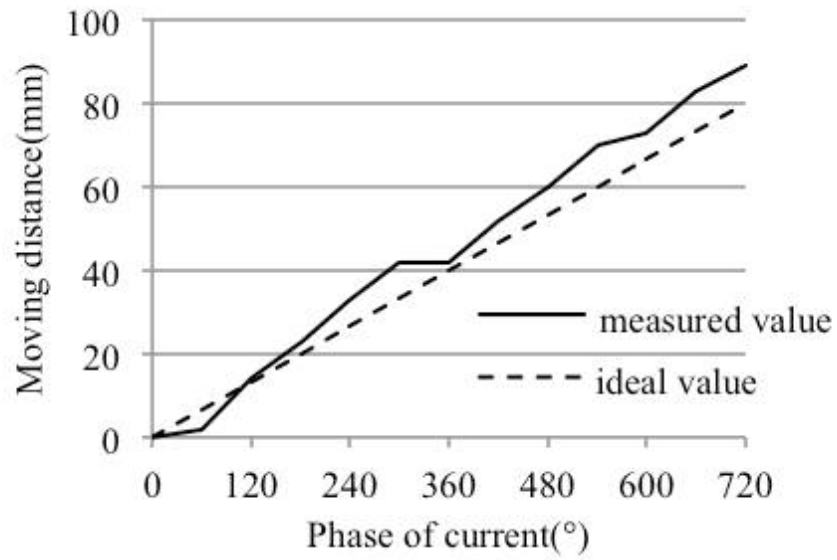


Fig. 49 Result of the running experiment (Core:SS400)

## 7.2 浮上走行実験

### 7.1.4 実験装置

電磁石のコア材に ABS を用いたリニアアクチュエータ機構で浮上走行実験を行った。リニアアクチュエータ機構を浮上スライダー上部に搭載し、走行実験を行った。用いたサーボアンプ (MAXON 社製 LSC 30/2, 4-Q-DC) を Fig. 50 に、安定化電源 (CUSTOM 社製 CPS-3030) を Fig. 51 に示す。また、浮上走行実験の様子を Fig. 52 に示す。



Fig. 50 サーボアンプ (MAXON 社製 LSC 30/2, 4-Q-DC)



Fig. 51 安定化電源(CUSTOM 社製 CPS-3030)



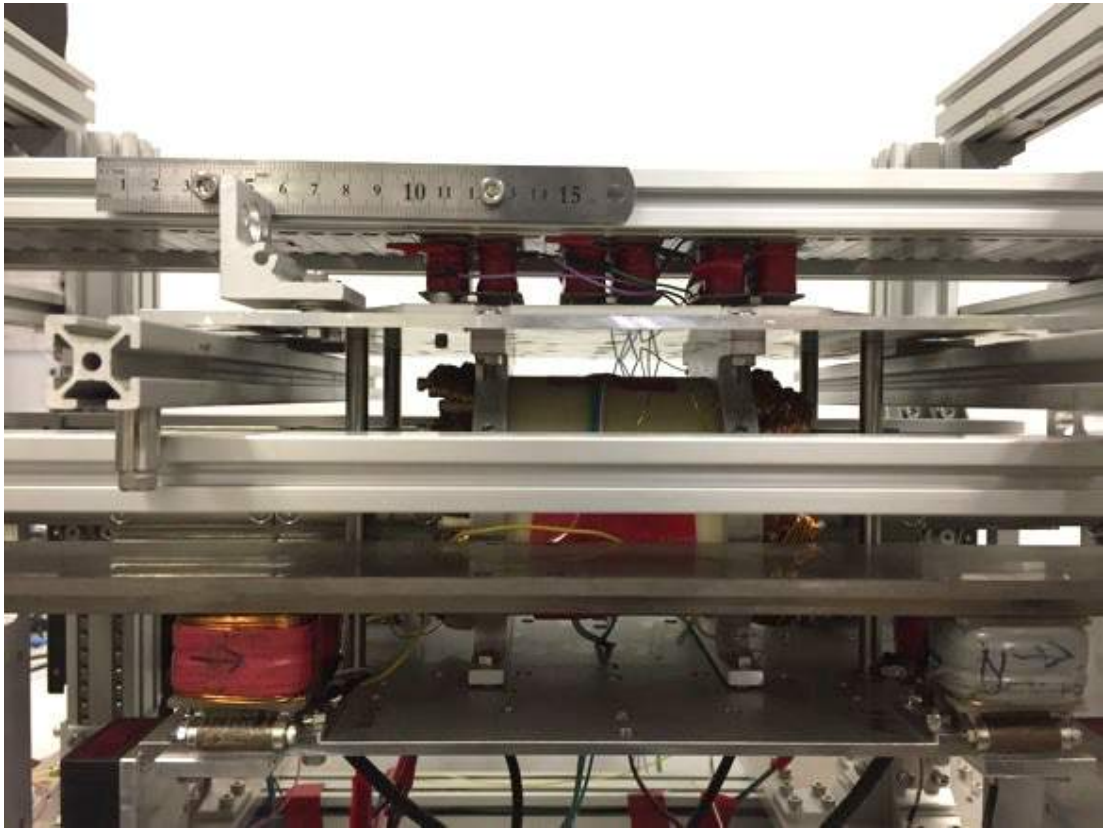


Fig. 52 State of floating run experiment

### 7.1.5 実験方法

ABS をコアに用いたリニアアクチュエータ機構は浮上スライダー上部に搭載して浮上走行実験を行った。浮上時にガイドレールと電磁石コアの空隙距離が 1.5mm になるように調整した。Matlab Simulink 及び Dspace を用いて各電磁石に電流を入力した。使用したプログラムのブロック線図を Fig. 53 に示す。レーザーセンサを用いて位置を計測した。電流周期が  $0^\circ$  の際に静止安定した位置を 0mm とした。電流周期を  $10^\circ$  ごとに変更した際の位置変化, 異なる周波数 (0.25Hz, 0.5Hz, 1.0Hz) の 3 相交流を入力した際の位置変化, 3 相交流の代替としてステップ信号 Fig. 54 を入力した際の位置変化を計測した。

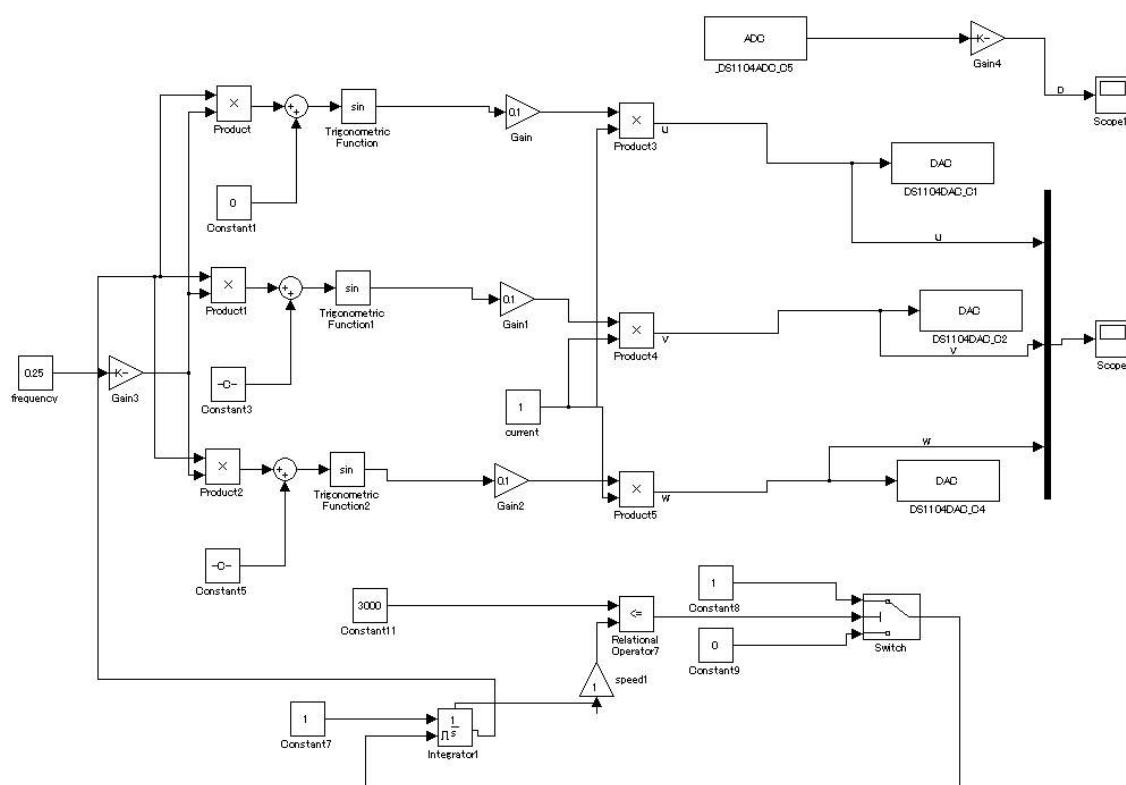


Fig. 53 Simulink model for three-phase current input



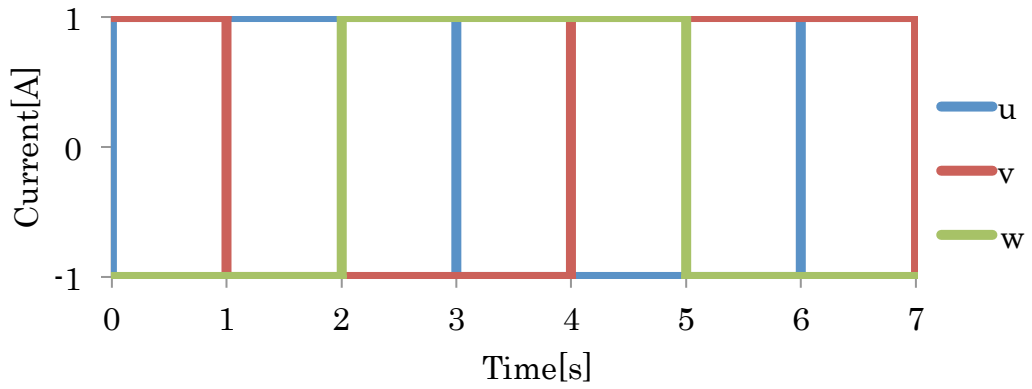


Fig. 54 3-phase step input current

7.3 実験結果

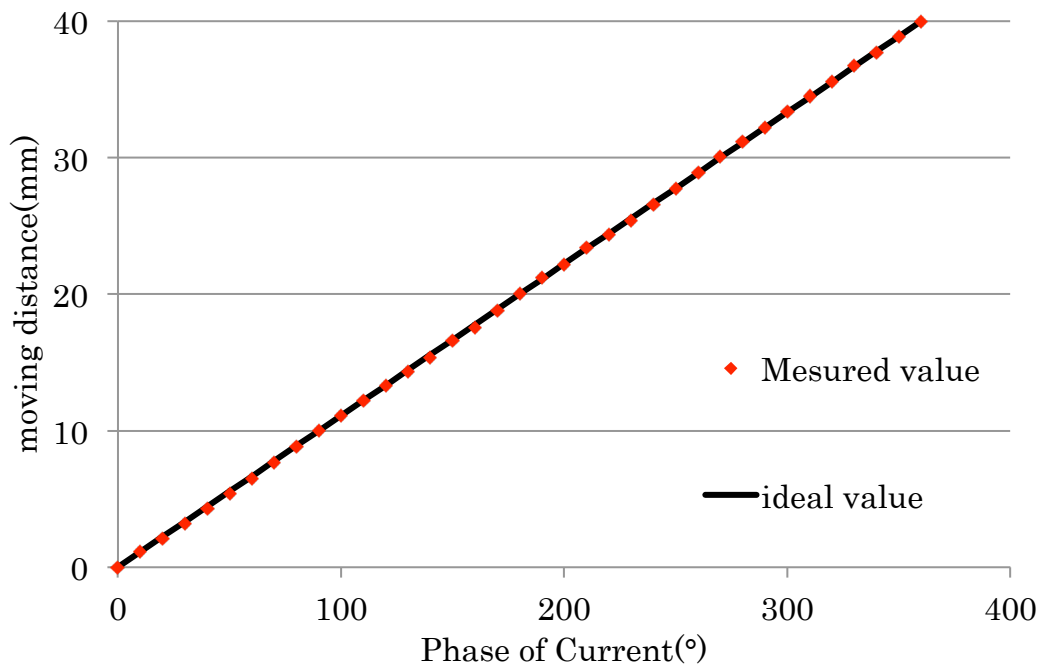


Fig. 55 Moving distance per current cycle 10 degree (Core:ABS)

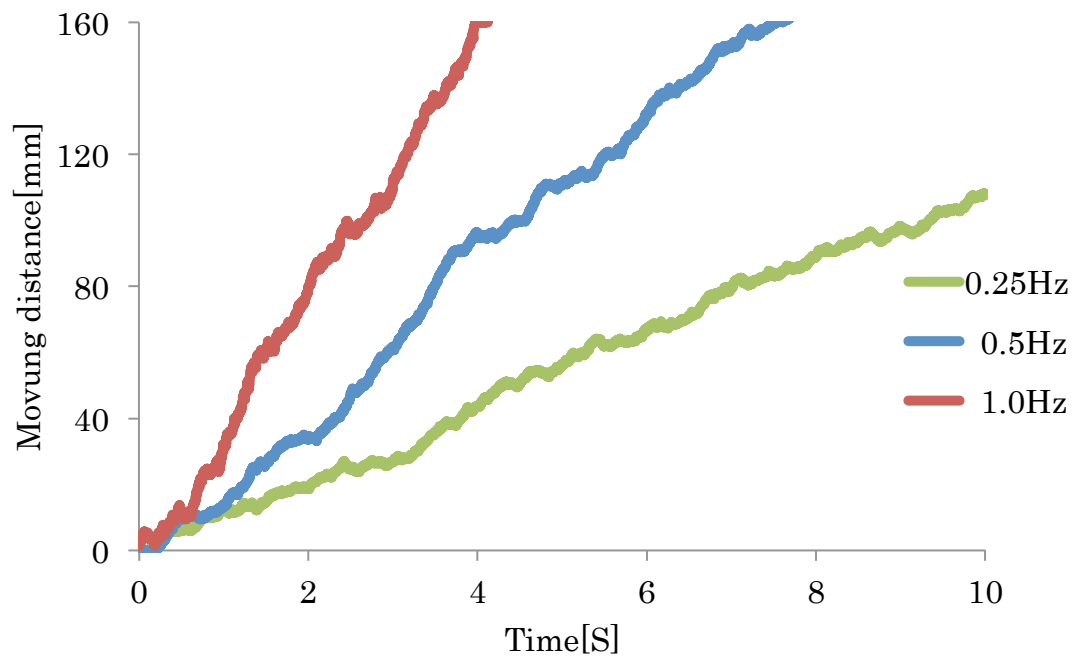


Fig. 56 Relation of moving distance and frequency of input 3-phase alternating current

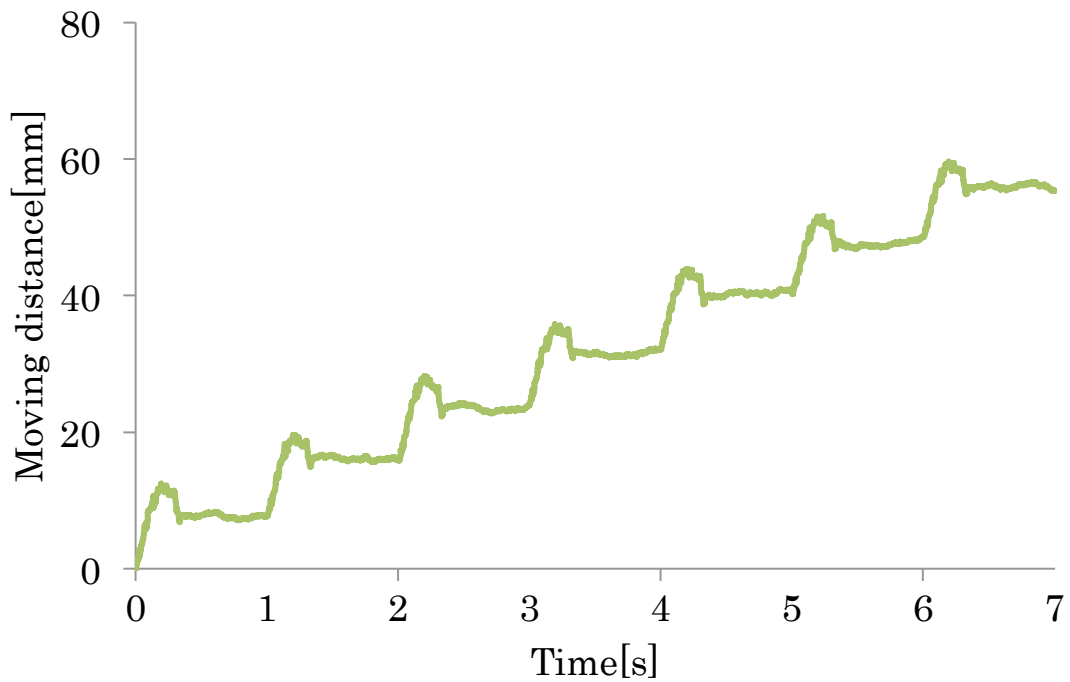


Fig. 57 Relation of moving distance and 3-phase step signal input

電流周期を  $10^\circ$  ごとに変更した際の位置変化を Fig. 55 に、異なる周波数の 3 相交流を入力した際の位置変化を Fig. 56 に、3 相交流の代替としてステップ信号 Fig. 54 を入力した際の位置変化を Fig. 57 に示す。電流周期が  $10^\circ$  変化するごとに移動距離が  $0.9 \sim 1.1$  [mm] ほど変化している。3 相交流の周波数を変更するとそれに伴い、速度が変化していることがわかる。またステップ状の信号を入力すると 8mm ごとに位置が変化していることがわかった。

#### 7.4 考察

SS400, ABS の場合ともに安定静止位置は変化し, リニアスライダーとして駆動することが確認できた. SS400 の場合理想値と測定値が近い値を取っているが, 電流周期に対して線形的に変化していない部分があることがわかる. これは電磁石のコア材 SS400 とガイドレールの間働く吸引力によって安定静止位置が理想値と変化したためであると考えられる. ABS をコア材として用いた場合は実測値が電流周期に対して線形的に変化しており, 理想値と一致していることがわかる. このことから, 電流周期に対して線形的に安定静止する位置を変化させるためにはリニアアクチュエータ機構の電磁石のコア材を非磁性体である ABS にすることが有効であると考えた.

## 8. 結言

本研究では誘導リニアモータを用いたリニアアクチュエータ機構における装置および電圧の制御回路の製作，磁場解析ソフト **j-mag** を用いた電磁石のコアの材質・形状による推進力と安定点の位置の変化についてのシミュレーション，リニアアクチュエータ機構のみの走行実験，浮上状態での走行実験を行った。シミュレーションと走行実験の結果から，リニアアクチュエータ機構に用いる電磁石のコア材に **SS400** を用いた場合は **SS400** と永久磁石間に吸引力が発生するためスライダーが滑らかに走行しないが，コア材を **ABS** に変更すれば吸引力が発生しないためスライダーが滑らかに浮上走行することがわかった。また，3 相交流の周波数を変更することでスライダーの速度を変化させることができることを確認した。

## 9. 展望

今回制作した装置を用いて，速度制御や位置制御が可能だと考えた。また，電流周期 **1Hz** 以上では安定した浮上走行ができていないことから，浮上プログラムや装置の更なる改善の余地があると考えられる。

## 10. 謝辞

本研究や論文執筆を行うにあたり，丁寧な指導をして賜りました指導教員の岡宏一先生，原田明德先生に感謝を申し上げます。アドバイスや知識を示唆して頂いた **Annasi** さん，**James** さんをはじめ多くの方々からお励ましの言葉を頂いたことを感謝しております。同期の谷井勲君は彼自身の研究で多忙であるにも関わらず，研究内容についてアドバイスや叱咤激励，実験装置の使用法の指導やプログラムの提供をして頂きました。心から非常に感謝しております。研究活動を支えて頂いた研究室のメンバーや研究が不調な時に心の支えとなった配信をして頂いた「にじさんじ」の皆様，本当にありがとうございました。

## 11. 参考文献

- [1] A.W.B.I. Annasiwaththa "Magnetically levitated linear slider with non-contact power supply"
- [2] <https://os.mbed.com/users/nxpfan/notebook/faq-japanese/>
- [3] [https://toshiba.semicon-storage.com/jp/design-support/e-learning/brushless\\_motor/chap3/1274512.html](https://toshiba.semicon-storage.com/jp/design-support/e-learning/brushless_motor/chap3/1274512.html)
- [4] [https://www.mbed.com/en/platform/hardware/boards/st/nucleo\\_f401re/](https://www.mbed.com/en/platform/hardware/boards/st/nucleo_f401re/)
- [5] <https://toshiba.semicon-storage.com/jp/product/linear/motordriver/detail.TA7291P.html>
- [6] <http://dbnst.nii.ac.jp/junior/detail/323>
- [7] <https://www.marutsu.co.jp/contents/shop/marutsu/mame/81.html>
- [8] 電気学会磁気浮上技術調査専門委員会(2018). 磁気浮上技術の原理と応用 科学情報出版株式会社
- [9] 電気学会磁気浮上技術調査専門委員会(1993). 磁気浮上と磁気軸受け コロナ社