

# 3 Coins リニアモータの推力発生原理

工学博士 矢島 久志 (電気学会 リニアドライブ技術委員会)

ここでは、このリニアモータを一般的なリニアモータと区別するため、その構成から「3 Coins リニアモータ」と呼び、以下について説明します。

- (1) 構造とリニアモータの種類
- (2) 推力発生原理と推力定数
- (3) コンピュータを使った計算
- (4) 試作・実測による評価



# 1. 構造と種類

図1に3 Coins リニアモータの断面構造を示します。3 Coins リニアモータは、裸銅線を巻いたコイル、電池の両側に永久磁石を取り付けた可動子で構成されます。永久磁石はS極(もしくはN極)が電池側になります。

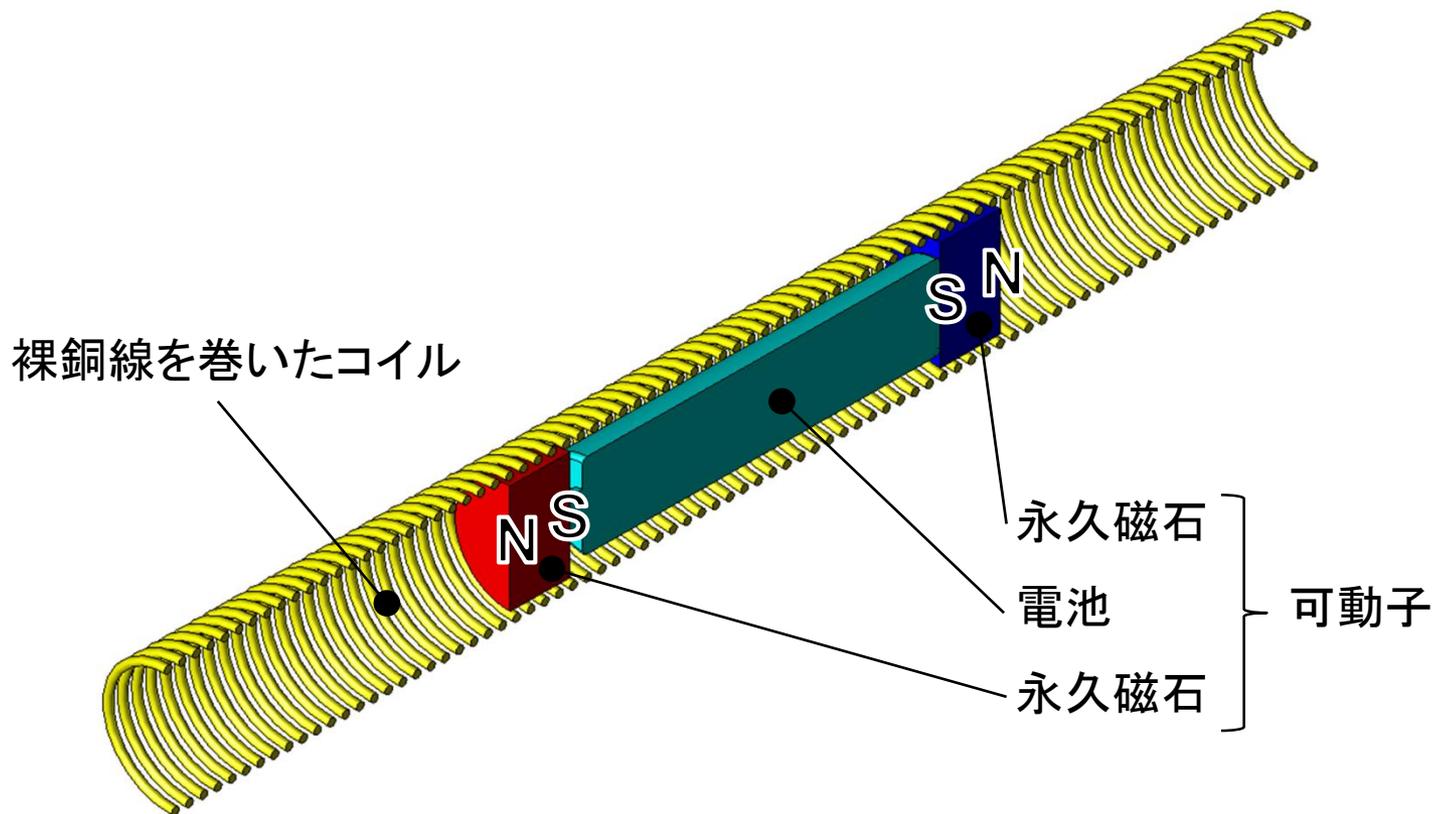


図1 3 Coins リニアモータの構造

# 1. 構造と種類

リニアモータは動作原理から表1の種類があります。3 Coins リニアモータはリニア直流モータに分類され、永久磁石を2つしか使わない構造と、励磁電源が乾電池で可動子の位置によって電流の向きを切り換ええないことから、円筒状可動磁石型単極リニア直流モータの一種です。

リニア同期モータ (LSM)

リニアステッピングモータ (LSTM)

リニア直流モータ (LDM)

リニア誘導モータ (LIM)

表1 リニアモータの種類

# 1. 構造と種類

リニア直流モータの推力  $F$  は、次式で与えられます。

$$F = F_e + F_m \quad (\text{N}) \cdots \cdots (1)$$

●  $Bil$  則に基づくローレンツ力  
(フレミングの左手則の方向)

● 磁気エネルギーの傾斜に基づく磁気力

## 2. 推力発生原理と推力定数

- ① 電池から永久磁石の導電性のメッキを介して、コイルに周方向（緑色の矢印）の向きの電流が流れます。

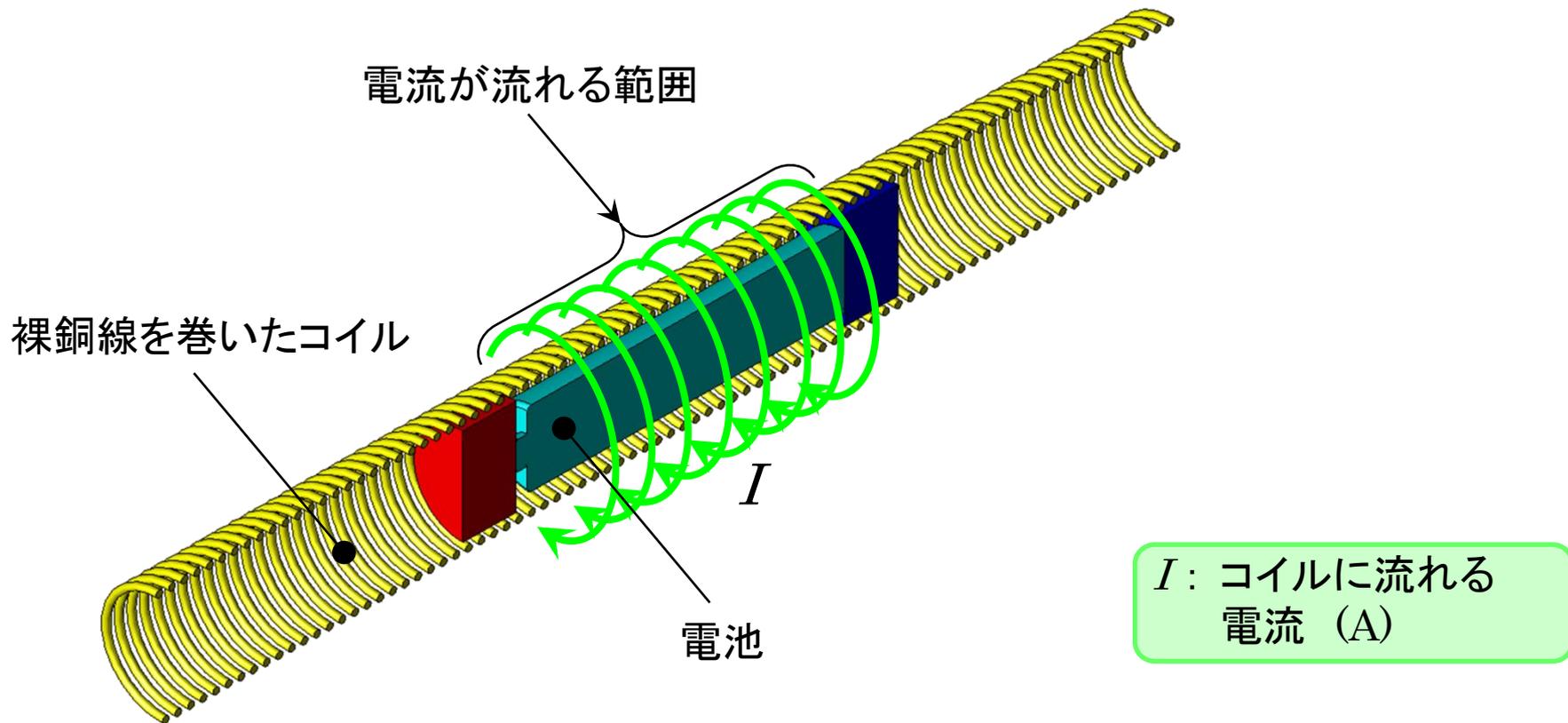


図2 3 Coins リニアモータのコイルに流れる電流

## 2. 推力発生原理と推力定数

- ② 永久磁石のN極からS極に向けて磁束が流れる。コイルには径方向（赤色の矢印）の向きに磁界（磁束密度）が発生します。

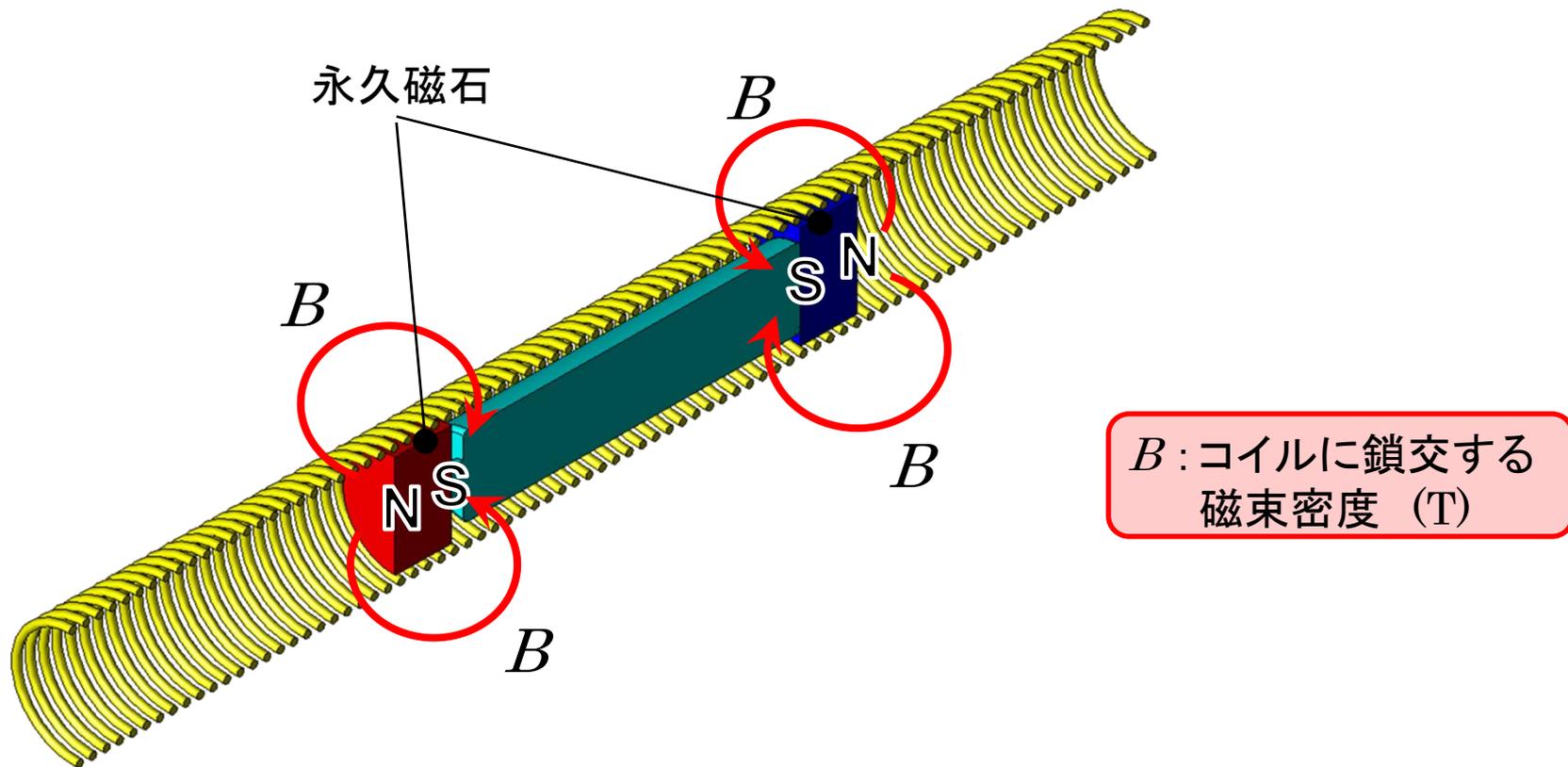


図3 3 Coins リニアモータの永久磁石から発生する磁束

## 2. 推力発生原理と推力定数

- ③ コイルに流れる電流は永久磁石の作る磁界からフレミングの左手の法則の向き(青色の矢印の向き)にローレンツ力を受けます。

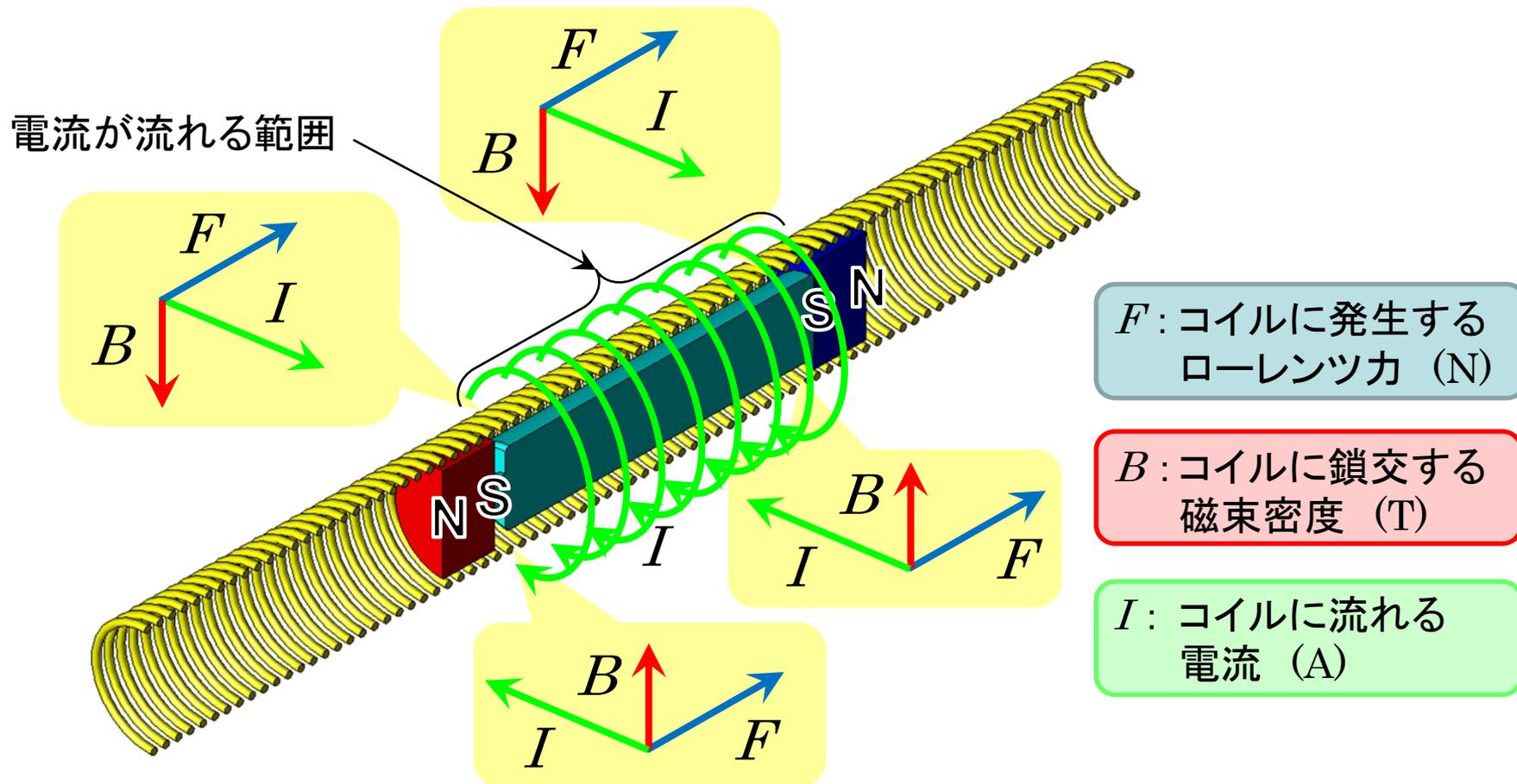


図4 3 Coins リニアモータのコイルに発生する力

## 2. 推力発生原理と推力定数

- ④ 3 Coins リニアモータはコイルを固定しているのです、ローレンツ力の力の反作用で、反対方向に永久磁石と電池が移動します。

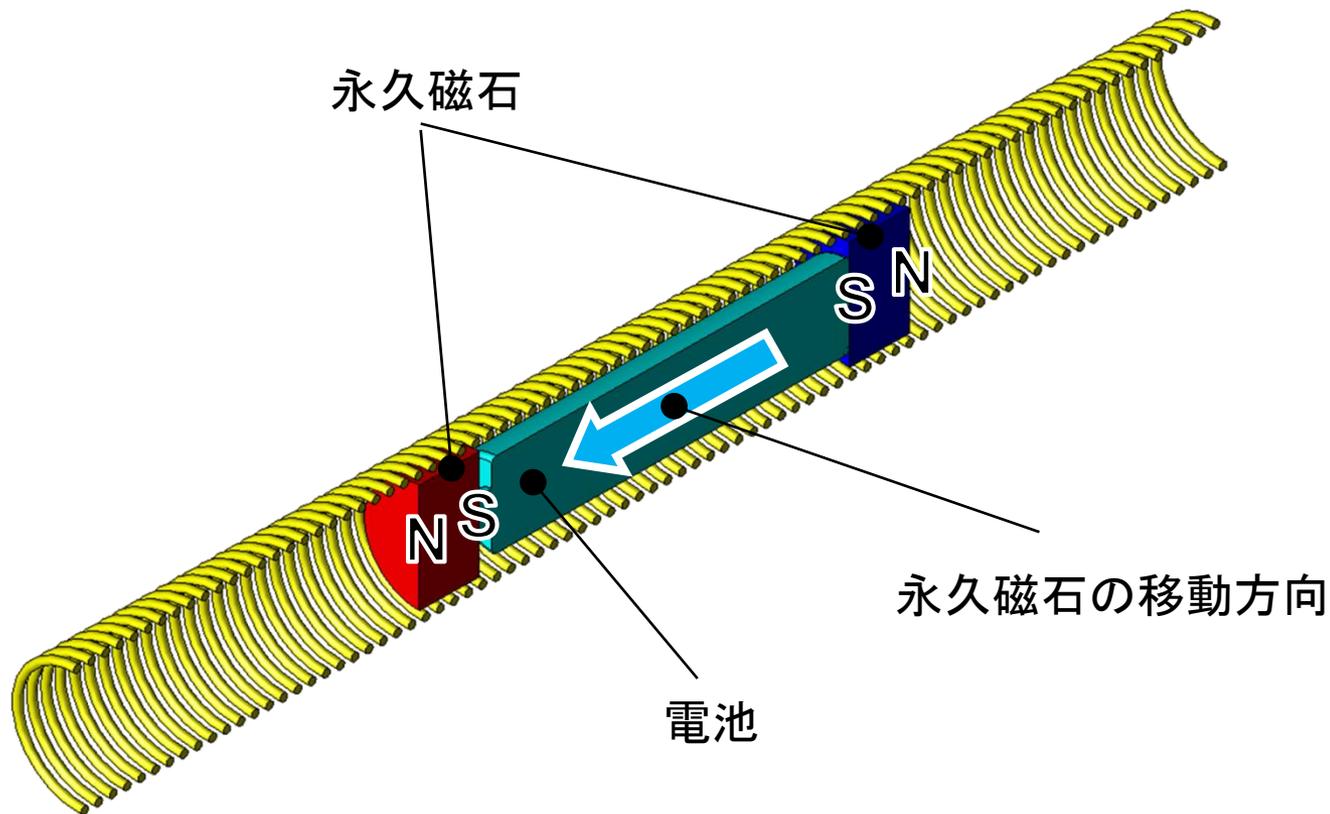


図5 3 Coins リニアモータの可動子に発生する力

## 2. 構造と動作原理と推力定数

リニア直流モータの推力  $F$  は、次式で与えられます。

コイルに流れる電流に比例し、コイルに流れる電流  $I$  の向きで発生する推力の向きが変わります。ここで、式(2)の比例係数  $K_f$  を推力定数と呼びます。

$$F = F_e \quad (\text{N}) \cdots \cdots (1)$$

$$= K_f I \quad (\text{N}) \cdots \cdots (2)$$

ここに、 $K_f$  : 推力定数 (N/A),

$I$  : コイルに流れる電流 (A)

## 2. 構造と動作原理と推力定数

3 Coins リニアモータの推力定数 $K_f$ は、次式で与えられます。

$$K_f = NlB \quad (\text{N/A}) \cdots \cdots (3)$$
$$= \frac{\pi}{2} \frac{N}{L} D_m^2 B_p \quad (\text{N/A}) \cdots \cdots (3)'$$

ここに、 $N$ : 永久磁石間のコイルの巻数,  
 $l$ : 磁束が鎖交するコイルの長さ(m),  
 $B$ : コイルに鎖交する磁束密度 (T),  
 $L$ : 永久磁石の間隔 (m),  
 $D_m$ : 永久磁石の直径 (m),  
 $B_p$ : 永久磁石の表面磁束密度 (T)。

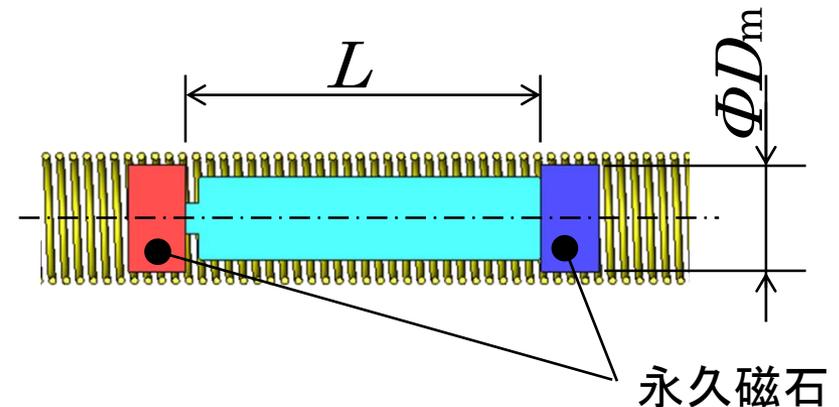


図6 各部寸法

## 2. 構造と動作原理と推力定数

式(3)'から, 3 Coins リニアモータの推力定数  $K_f$  を大きくするには, 下記(1), (2)のようにすれば良いことが分かります。

$$K_f = \frac{\pi}{2} \frac{N}{L} D_m^2 B_p \quad (\text{N/A}) \cdots \cdots (3)'$$

(1) コイルを密に巻く

(2) 大きく高性能な永久磁石を用いる  
 $\Phi D_m, B_p$  を大きくする

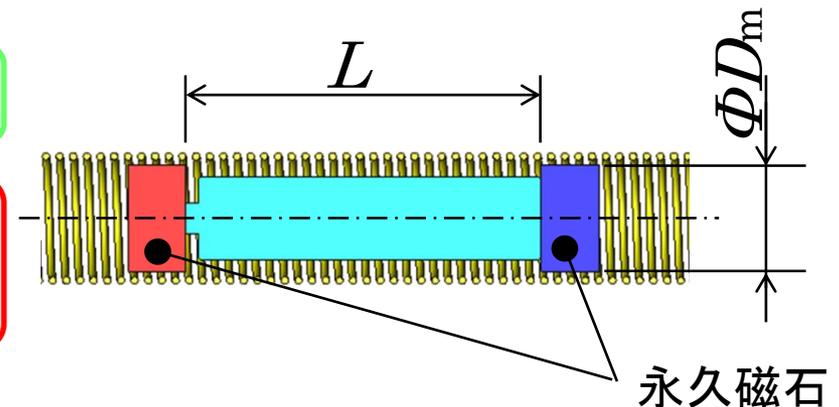


図6 各部寸法

# 3. コンピュータを使った計算

コンピュータを使って、表2, 図5の3 Coins リニアモータの磁界を計算します。

表2 解析諸元

項目	数値
計算方法	有限要素法
解析モデル	軸対称2次元解析
モデルサイズ	4万要素, 2万節点
永久磁石	$B_r=0.75\text{T}$ $H_c=568\text{kA/m}$ $\mu_r=1.05$
コイル	銅線径0.9mm 27回巻, 1~20A

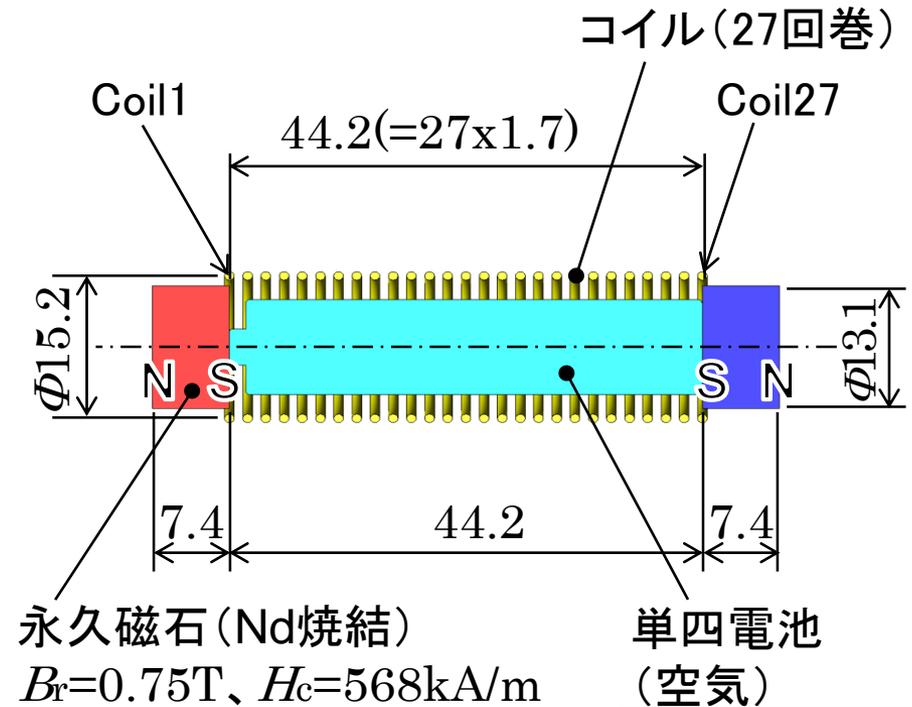
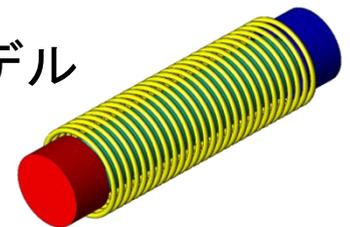


図7 解析モデル



# 3. コンピュータを使った計算

計算結果を図8に示します。それぞれの永久磁石のN極から磁束が発生し、径方向に流れてそれぞれの磁石のS極に戻ることが分かります。

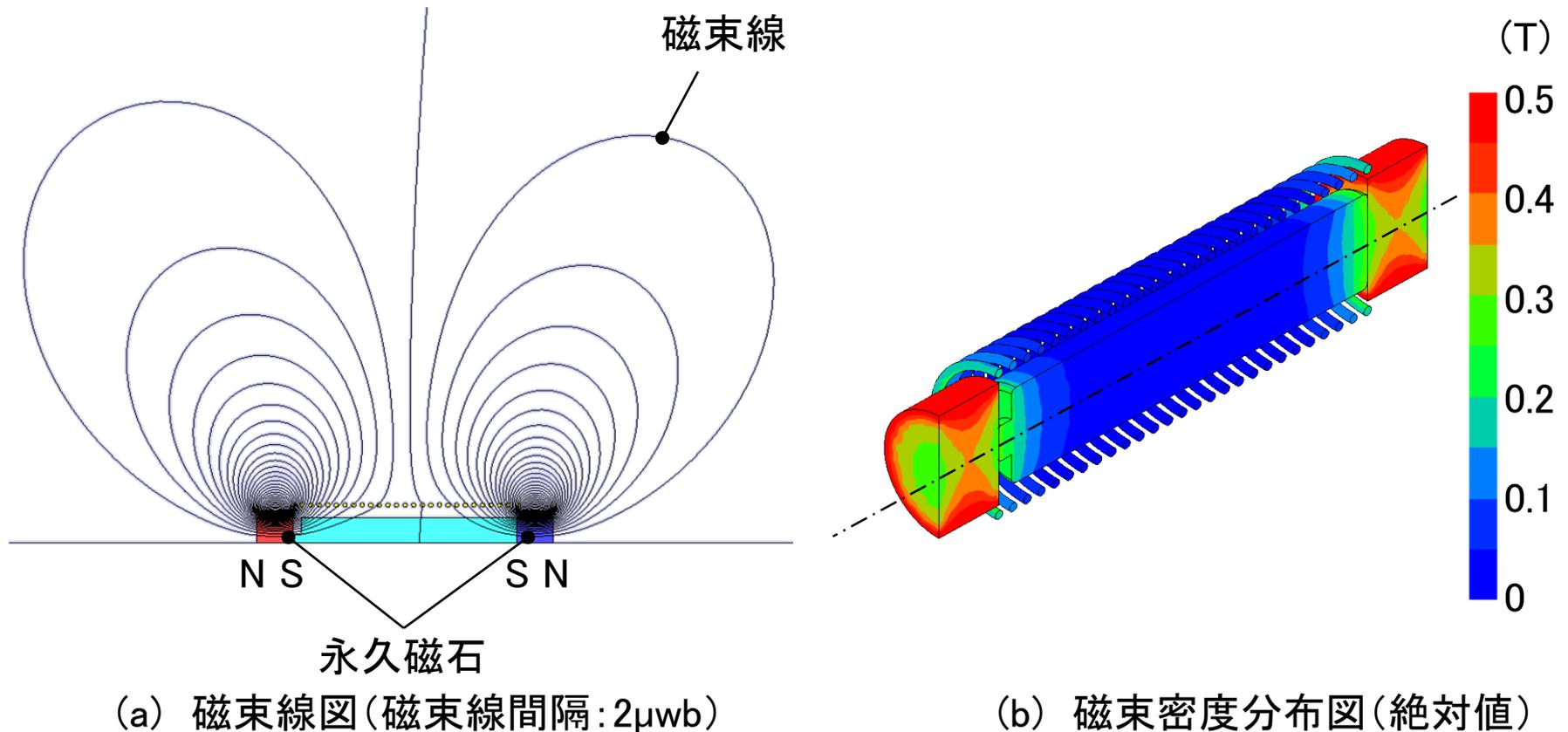
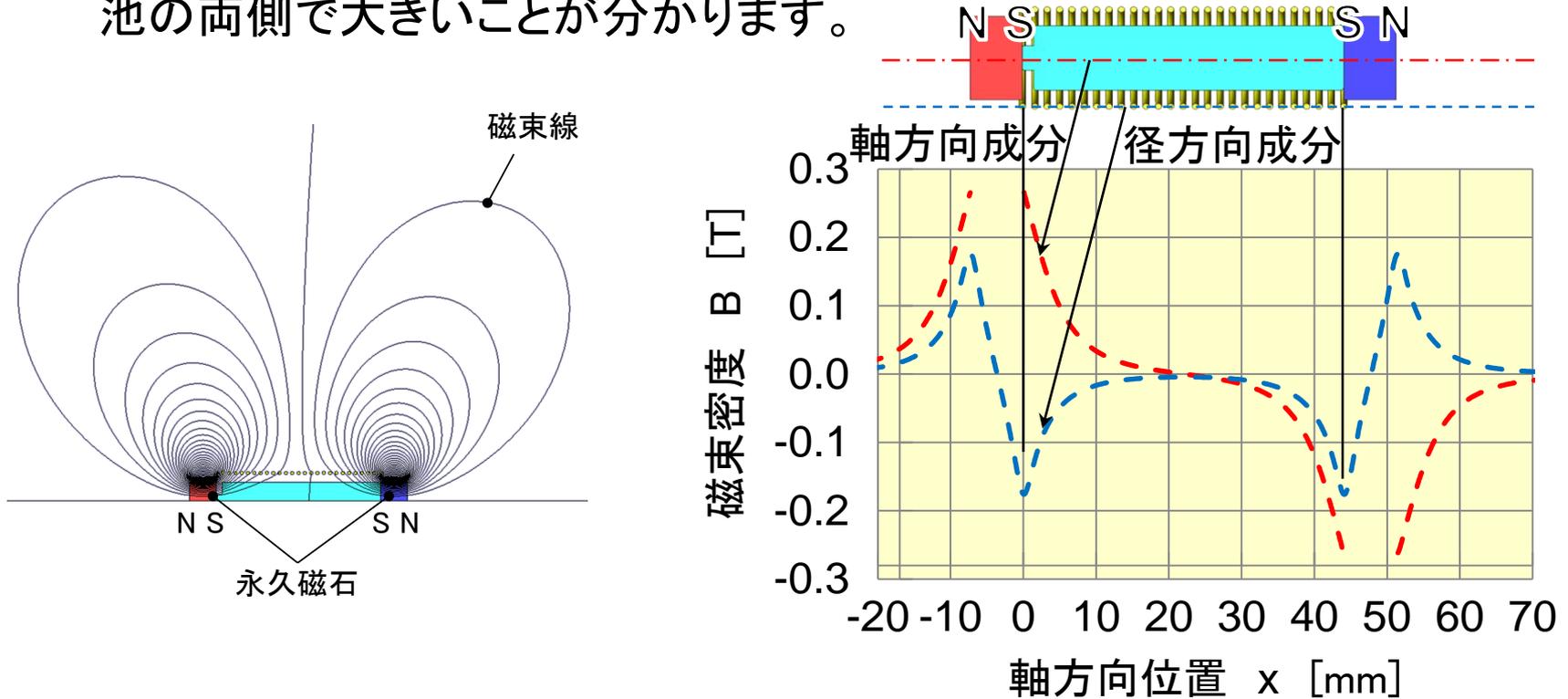


図8 計算結果(磁束線図, 磁束密度分布図)

# 3. コンピュータを使った計算

コイル(銅線)の場所に発生する磁束密度を図9に示します。推力に寄与する径方向の磁束密度(青)は永久磁石が取り付けられた電池の両側で大きいことが分かります。



(c) コイルに鎖交する磁束密度

図9 計算結果(コイルの場所に発生する磁束密度)

# 3. コンピュータを使った計算

コイルに6A流した時に、コイル1巻きに発生するローレンツ力の計算結果を図10に示します。ローレンツ力は永久磁石が取り付けられた電池の両側で大きいことが分かります。

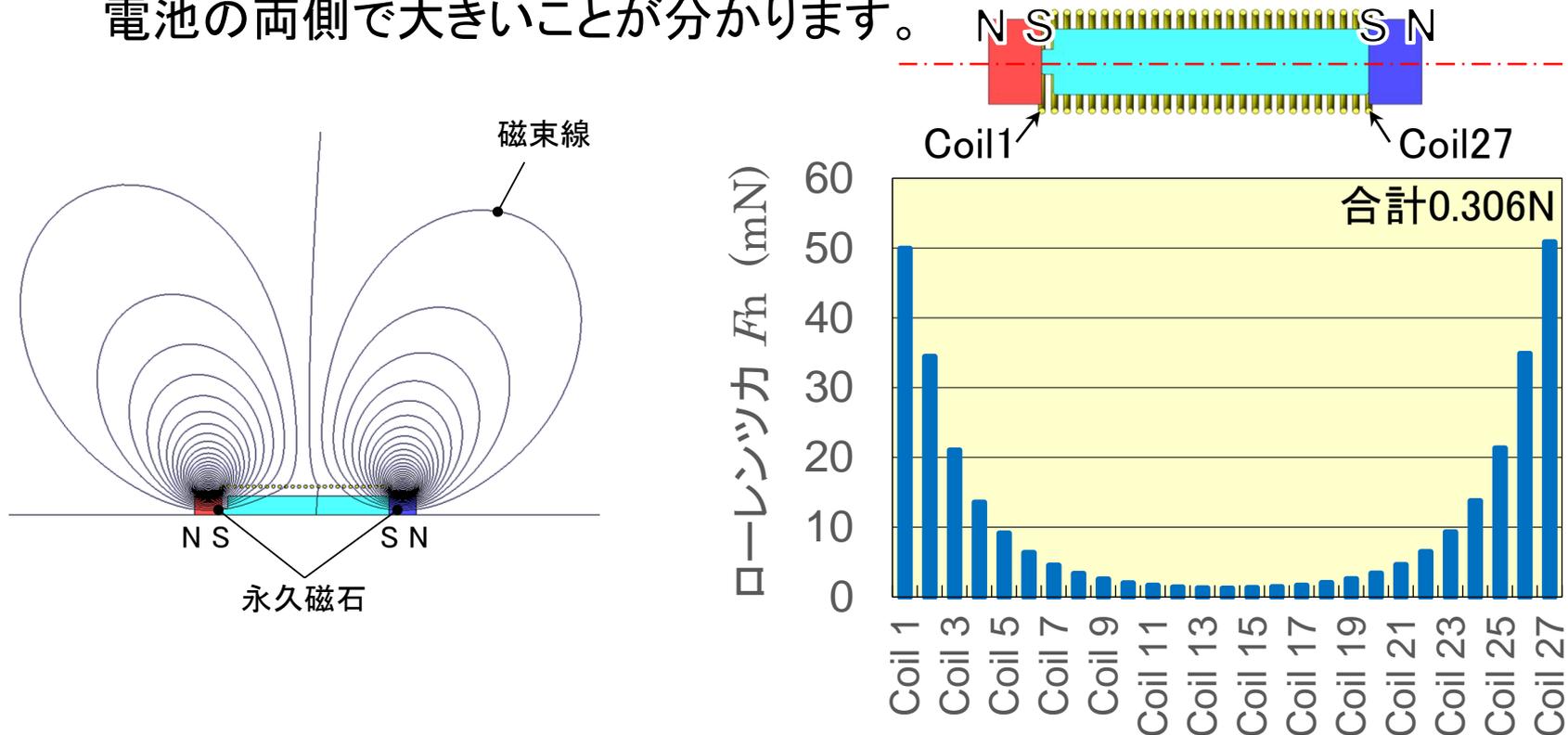


図10 計算結果(コイル1巻きに発生するローレンツ力,  $I=6A$ )

### 3. コンピュータを使った計算

コイルに1~20A流した時にコイルに発生するローレンツ力の計算結果を図11に示します。ローレンツ力は電流に比例します。

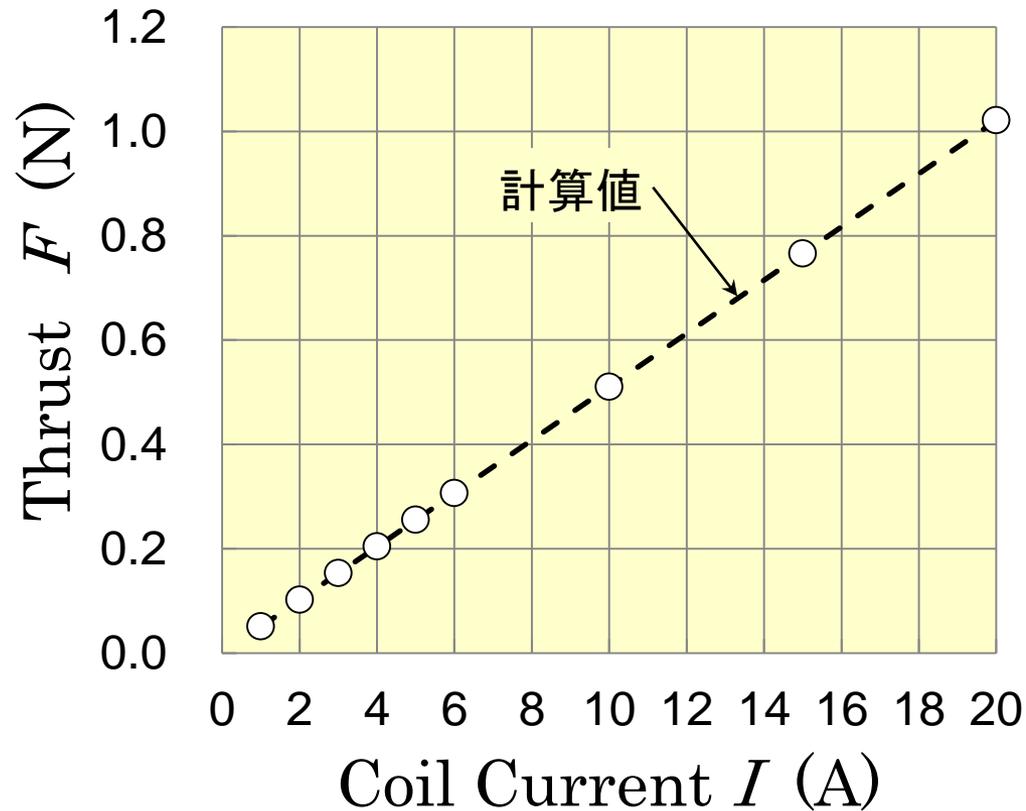


図11 推力の計算結果

# 4. 試作・実測による評価

推力を測定するため表3の 3 Coins リニアモータを製作し、図12のように電池ではなく直流電源からコイルに一定の電流を流す。その時に可動子(永久磁石と電池)に発生する推力を、荷重変換器を用いて測定する。

表3 推力測定用  
3 Coins リニアモータの仕様

項目	数値
永久磁石	ネオジム磁石 $\phi 13.1(D_m) \times 7.2\text{mm}$ (3ヶ) 表面磁束密度( $B_p$ ): 250mT (3ヶ)
電池	$\phi 44.2(L) \times 10.2\text{mm}$
コイル	銅線径: 0.9mm 巻数( $N$ ): 27回巻 直流抵抗( $R_c$ ): 35m $\Omega$ コイル径: $\phi 15.2\text{mm}$

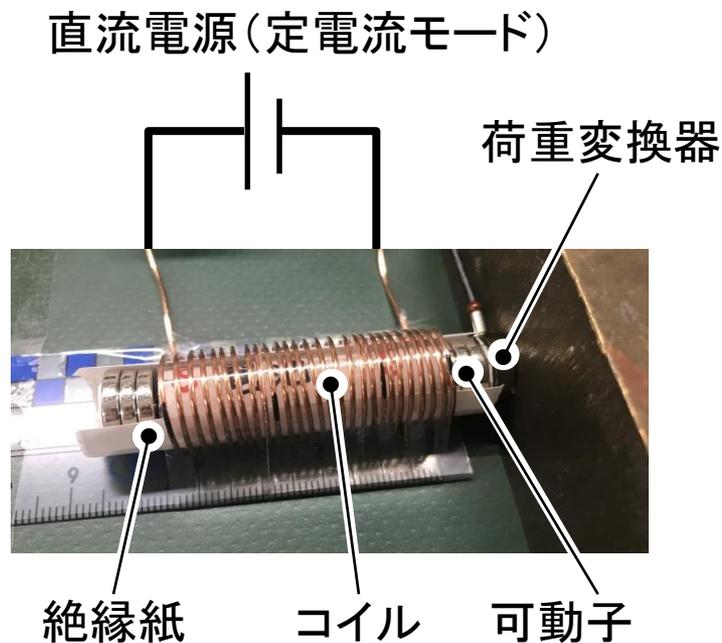


図12 推力測定方法

# 4. 試作・実測による評価

図13に推力の測定結果(○印)を示します。推力の大きさは、コイルに流れる電流に比例しています。実測した推力の傾き(推力定数)は、図11で計算した推力定数と誤差8%で一致しました。

表3 推力測定用  
3 Coins リニアモータの仕様

項目	数値
永久磁石	ネオジム磁石 $\phi 13.1(D_m) \times 7.2\text{mm}$ (3ヶ) 表面磁束密度( $B_p$ ): 250mT(3ヶ)
電池	$\phi 44.2(L) \times 10.2\text{mm}$
コイル	銅線径: 0.9mm 巻数( $N$ ): 27回巻 直流抵抗( $R_c$ ): 35m $\Omega$ コイル径: $\phi 15.2\text{mm}$

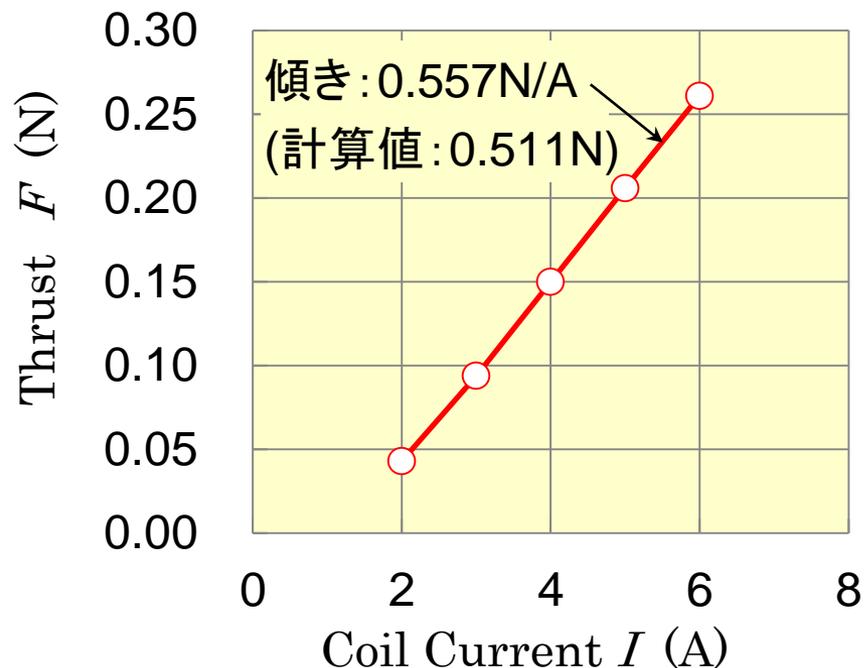


図13 推力の実測値

# 4. 試作・実測による評価

移動時間を測定するため、表4・図14の3 Coins リニアモータを製作しました。

表4 製作した3 Coins リニアモータの仕様

項目	数値
永久磁石	ネオジム磁石 $\phi$ 13.1x2.4mm, 2.4g 両側に2ヶずつ
電池	ニッケル水素電池 1.2V, 750mAh $\phi$ 44.2x10.2mm, 11.5g
コイル	銅線径: 0.9mm 巻数: 103回巻 長さ: 150mm コイル径: $\phi$ 15.2mm

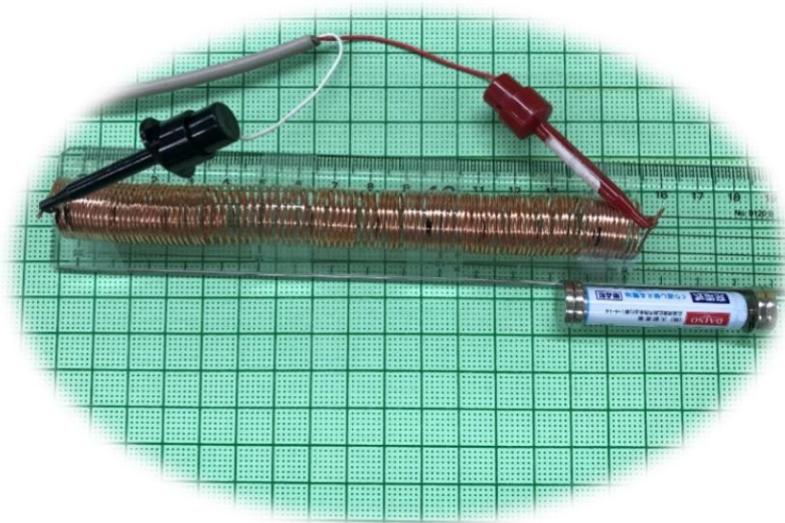


図15 製作した3 Coins  
リニアモータの外観

# 4. 試作・実測による評価

移動時間を測定するため、図16のようにコイル(銅線)の両端に電池から印加される電圧を、レコーダで計測します。図17のように、電圧が印加される時間を計測することで、移動時間(0.261秒)を測定できます。

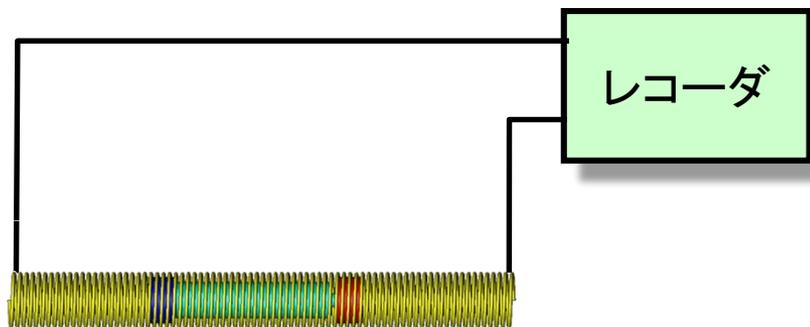
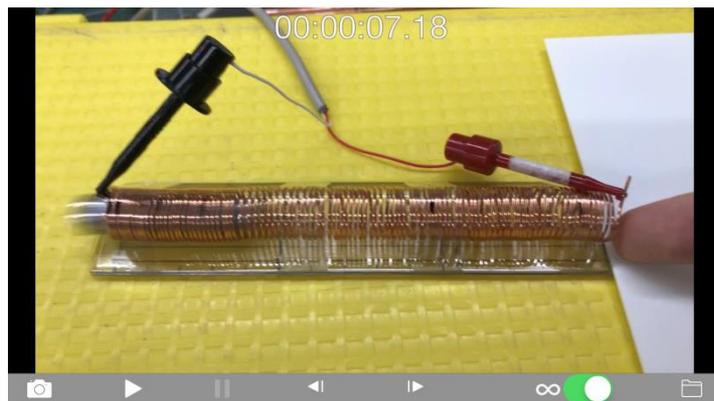


図16 移動時間の測定方法

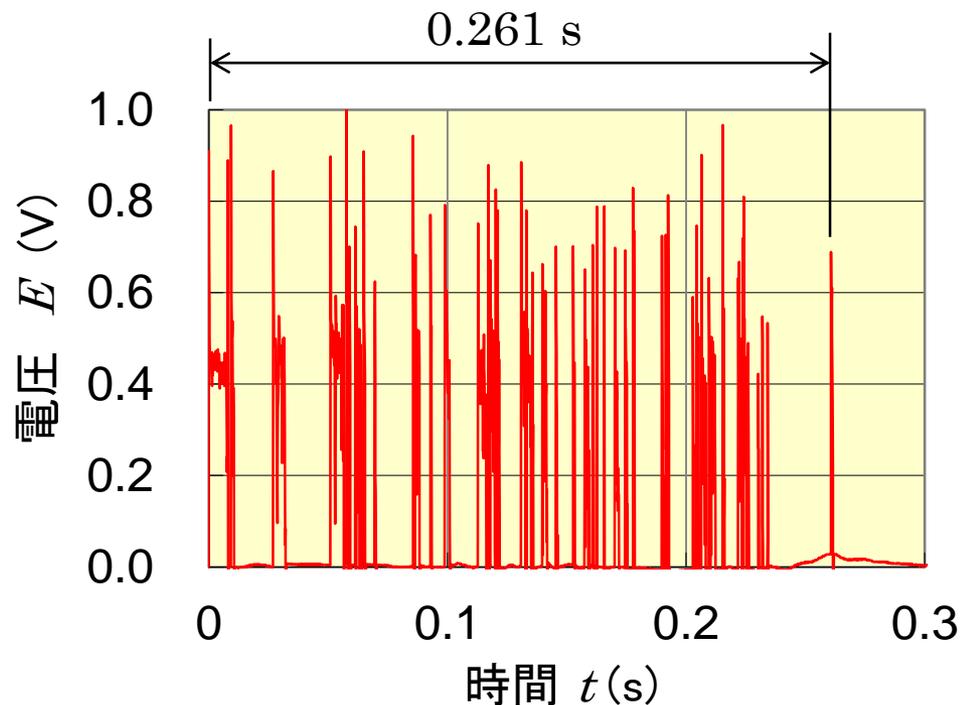


図17 可動子移動時のコイル両端電圧

# 4. 試作・実測による評価

また、印加電圧を測定することで、図18のように、コイルに流れる電流を計算し、加速度から速度や可動子の位置(変位)を計算することができます。今回の実測では、最高速度0.6m/sで移動したことがわかります。

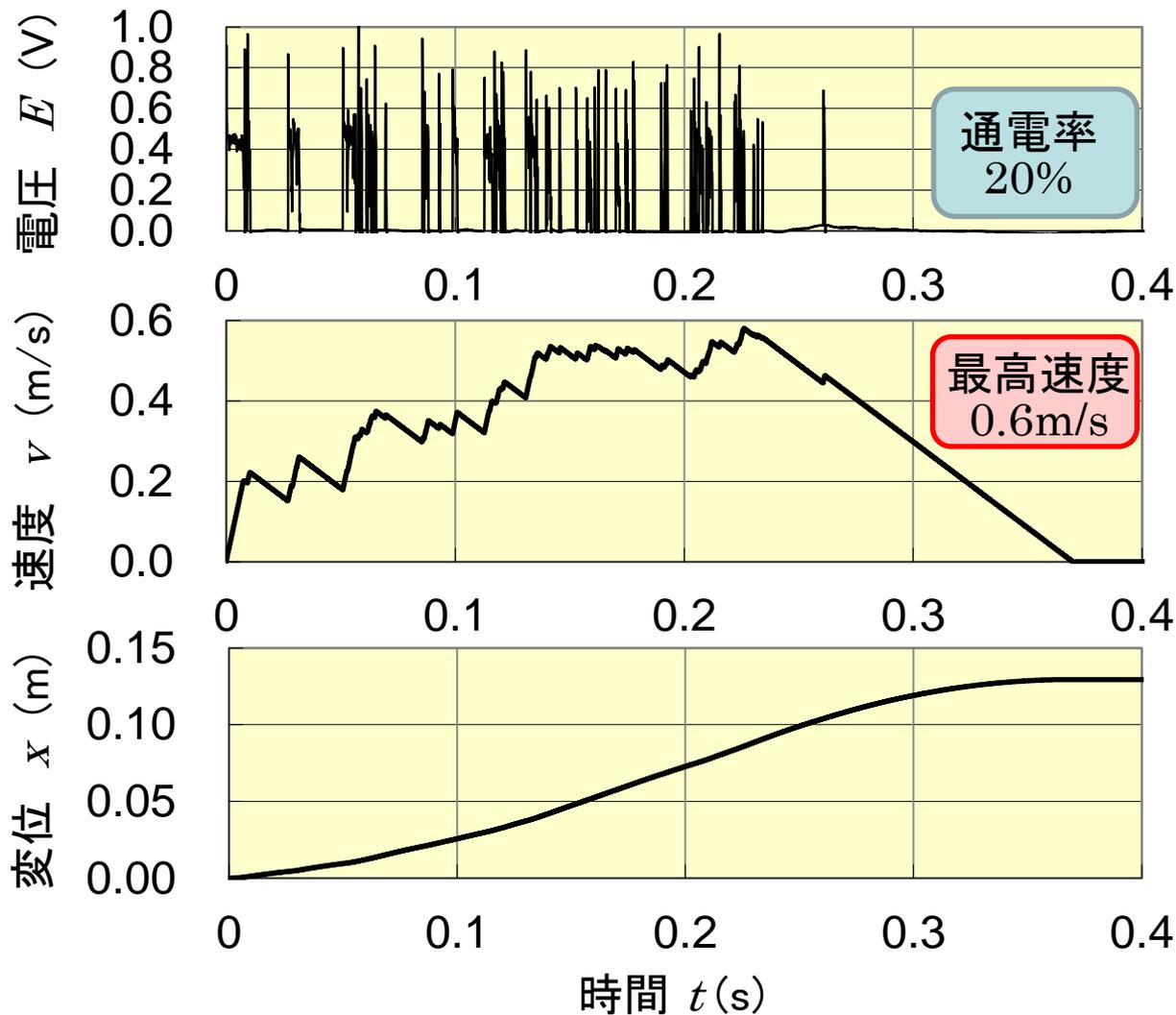


図18 可動子移動時の速度と位置

# 5. まとめ

ここでは、3 Coins リニアモータについて以下を述べた。

- (1) 3 Coins リニアモータの構造は、裸銅線のコイル内を電池の両側に永久磁石を付けた可動子が移動する構造である。3 Coins リニアモータは、円筒状可動磁石型単極リニア直流モータの一種である。
- (2) 3 Coins リニアモータの推力はローレンツ力に基づくもので、電流の大きさに比例する。電流に対する推力の傾きを推力定数と呼び、推力定数を大きくするためには、コイルを密に巻く、直径の大きな永久磁石を使うことが良い。
- (3) コンピュータを使って、3Coinsリニアモータの磁界を計算し、推力を求めた。永久磁石の近くのコイルで、大きな推力が発生している。
- (4) 推力の測定方法を示した。製作した3 Coins リニアモータの推力定数はコイルに流れる電流に比例し、上記(2)が正しいことを確認した。さらに移動時間の測定方法を示し、試作した3Coinsリニアモータは106mmを0.26秒で移動する。このとき、最高速度(計算値)は0.6m/sである。

ご閲覧、ありがとうございました。

⇒ [リニアドライブ技術委員会のページに戻る](#)

注意) 本文または図表・写真を利用する際には、電気学会 リニアドライブ  
技術委員会までご連絡ください。