

信州大学審査学位論文

ペンシルサイズ円筒形リニア同期モータの
高推力密度化に関する研究

Study on high thrust densification of pencil size cylinder
type linear synchronous motor

2015年3月

仲岩 浩一

記号表	1
第1章 まえがき	4
1.1 リニアモータとは	4
1.1.1 リニアモータへの期待	4
1.1.2 産業界に求められるリニアモータ	5
1.1.3 リニアモータの分類	6
1.1.4 各メーカーの円筒形リニアモータ仕様	9
1.1.5 市場予測	16
1.2 研究目標	17
1.3 製作面の課題	19
1.4 本論文の構成と概要	20
第1章の参考文献	21
第2章 ペンシルサイズ円筒形リニア同期モータの動作原理と設計概論	25
2.1 構成と動作原理	25
2.1.1 市場における従来の技術	25
2.1.2 本研究の円筒形リニア同期モータ	26
2.1.3 LSMの基本構造	27
2.1.4 ヨーク内の磁束の流れ	29
2.1.5 LSMの動作原理	30
2.1.6 磁束線図の比較	32
2.1.7 リニアセンサ	33
2.2 リニアモータの特性評価指標と設計概論	38
2.2.1 特性評価指標	38
2.2.2 EMFにおける歪率	40
2.3 LSMのイニシャル設計と目標仕様	43
2.3.1 設計制約	43
2.3.2 イニシャル設計と目標仕様	44
第2章の参考文献	46
第3章 コアレス LSM の設計	50
3.1 設計条件と定義	50
3.1.1 設計条件	50
3.1.2 設計手法	51

目次	ii
3.2 コアレスによる高推力化の検討	53
3.2.1 設計定義	53
3.2.2 寸法の評価方法	54
3.2.3 可動子の寸法	55
3.2.4 コイルの寸法	57
3.3 計算結果によるコアレス LSM の特性比較	60
3.3.1 寸法の比較	60
3.3.2 特性比較	60
3.4 コアレス LSM の試作と特性評価	62
3.4.1 試作	62
3.4.2 システムの概要	64
3.4.3 静推力・コギング力特性	66
3.4.4 設計値と測定値の比較	67
第3章の参考文献	69
第4章 コア付 LSM による高推力密度化・低コギング力の検討	71
4.1 コア付 LSM の設計条件と定義	71
4.1.1 設計条件	71
4.1.2 設計手法	72
4.2 高推力密度化の検討	73
4.2.1 設計定義	73
4.2.2 寸法の評価方法	74
4.2.3 可動子の寸法	76
4.2.4 固定子の寸法	78
4.2.5 コイルの寸法	82
4.2.6 歪率の低減と低コギング力の検討	83
4.3 LSM の特性比較	88
4.3.1 寸法の比較	88
4.3.2 特性比較	89
4.4 コア付 LSM の試作と特性評価	91
4.4.1 試作	91
4.4.2 静推力・コギング力特性	93
4.4.3 設計値と測定値の比較	95
第4章の参考文献	96

第5章 あとがき	97
5.1 ペンシルサイズ円筒形リニア同期モータの動作原理と設計概論	97
5.2 コアレス LSM の設計	97
5.3 コア付 LSM による高推力密度化・低コギング力の検討	98
5.4 市場品との仕様比較	99
5.5 量産化に向けた検討	100
5.5.1 温度特性	100
5.5.2 動作確認	102
5.6 今後の課題	105
第5章の参考文献	107
謝辞	108
研究実績	109
付録	112

記号表

記号	: 名称 [単位]
A_c	: 巻線面積 [mm^2]
A_{co}	: コイル全体の断面積 [m^2]
A_f	: 推力発生面積 [mm^2]
A_g	: ギャップの表面積 [mm^2]
A_m	: 永久磁石の表面積 [mm^2]
A_S	: 積分した領域の断面積 [m^2]
B_g	: ギャップの磁束密度 [T]
B_m	: 動作点の磁束密度 [T]
B_r	: 永久磁石の残留磁束密度 [T]
B_s	: 飽和磁化 [T]
B_x	: ギャップ部分の磁束密度の x 成分 [T]
B_θ	: ギャップ部分の磁束密度の θ 成分 [T]
C_f	: (推力/コギング力)比
D	: 歪率 [%]
D_g	: ギャップ径 [mm]
D_i	: 固定子内径 [mm]
d_s	: 軸の外径 [mm]
E_o	: 出力電圧 [V]
F	: 静推力 [N]
F_c	: コギング力 [N]
F_m	: 永久磁石の起磁力
F_{max}	: 最大推力 [N]
F_r	: 定格推力 [N]
f	: 推力 [N]
G	: 推力定数 2 乗密度 [$\text{N}^2 / (\text{Wm}^3)$]
h_{co}	: コイルの高さ [mm]
h_{ci}	: 1 相 1 コイル長 [mm]
I	: 電流 [A]
I_r	: 1 コイルあたりの電流値 [A]
J	: 電流密度 [mm^2]
K_d	: 分布係数
K_f	: 推力定数 [N/A]
K_m	: モータ定数 [$\text{N} / \sqrt{\text{W}}$]
K_p	: 短節係数

K_{ϕ}	: 界磁磁束係数
L	: コイルインダクタンス[mH]
L_g	: ギャップの厚み [mm]
L_m	: 永久磁石の厚み [mm]
l	: 1 極分の長さ [mm]
l_{am}	: アキシアル配向磁石の幅 [mm]
l_{co}	: コイル 1 周の長さ[m]
l_{ch}	: 歯先厚[mm]
l_m	: 歯先幅[mm]
l_o	: 歯先の開口幅[mm]
l_{oy}	: 外周ヨーク[mm]
l_{ph}	: 可動磁石の厚さ[mm]
l_{rm}	: ラジアル配向磁石の幅 [mm]
l_s	: ストローク[mm]
l_{sf}	: 可動子外径[mm]
l_{st}	: 固定子外径[mm]
l_w	: 歯幅[mm]
N	: コイル巻数[回]
N_s	: スロット数
NI	: 起磁力[A]
n	: 相数
P	: 入力電力 [W]
p	: パーミアンス
R	: コイル抵抗[Ω]
R_g	: ギャップの磁気抵抗
R_m	: 永久磁石の内部磁気抵抗
R_t	: $t^{\circ}\text{C}$ における抵抗[Ω]
R_0	: 0°C における抵抗[Ω]
r	: 固定子外径の半径[mm]
S	: 磁石断面積[mm ²]
S_c	: スロットの面積 [mm ²]
T_1	: T_1 における温度[$^{\circ}\text{C}$]
T_2	: T_2 における温度[$^{\circ}\text{C}$]
t	: 時間 [min]
t_d	: 遅れ
t_s	: 周期
v	: 可動部の速度[mm/s]

W_c	: 銅損[W]
W_g	: 重量[kg]
w_c	: コイル幅[mm]
V_m	: モータ体積 [m ³]
e	: EMF[V(m/s)]
x	: 変位[mm]
ρ	: 銅の抵抗率[1.7×10 ⁻⁸ Ωm]
α_0	: 導体の抵抗温度係数[1/°C]
β	: コイル占積率 [%]
δ	: ギャップ[mm]
ϕ	: コイル線径[mm]
Φ	: 磁束量[Wb]
Φ_m	: 磁束[Wb]
Ψ	: 鎖交磁束数[Wb]
ΔT	: コイルの温度上昇[K]
ΔT_s	: モータコイル飽和温度[°C]
τ_e	: 電氣的時定数[ms]
τ_m	: 機械的時定数[ms]

第1章 まえがき

1.1 リニアモータとは

1.1.1 リニアモータへの期待

近年、産業界における直進運動の要求がされる中で、直進への変換機構が不要なリニアモータは、幅広く応用されている⁽¹⁻¹⁾。図 1.1 に示すようにリニアモータは直線方向への駆動をし、回転モータは円周方向に駆動する構造である。例えば、図 1.2 に示すような【直進機構】のケースで比較した時、回転モータ方式では回転運動をボールねじに伝え、ボールねじの回転運動をボールねじナット内部のベアリングを介して直進運動に置き換える事となる。対してリニアモータ(この場合は円筒形リニアモータ)は、ボールねじを介すること無く直進運動となる⁽¹⁻²⁾。即ち【直進機構】においては、回転から直進への変換機構が不要となる。

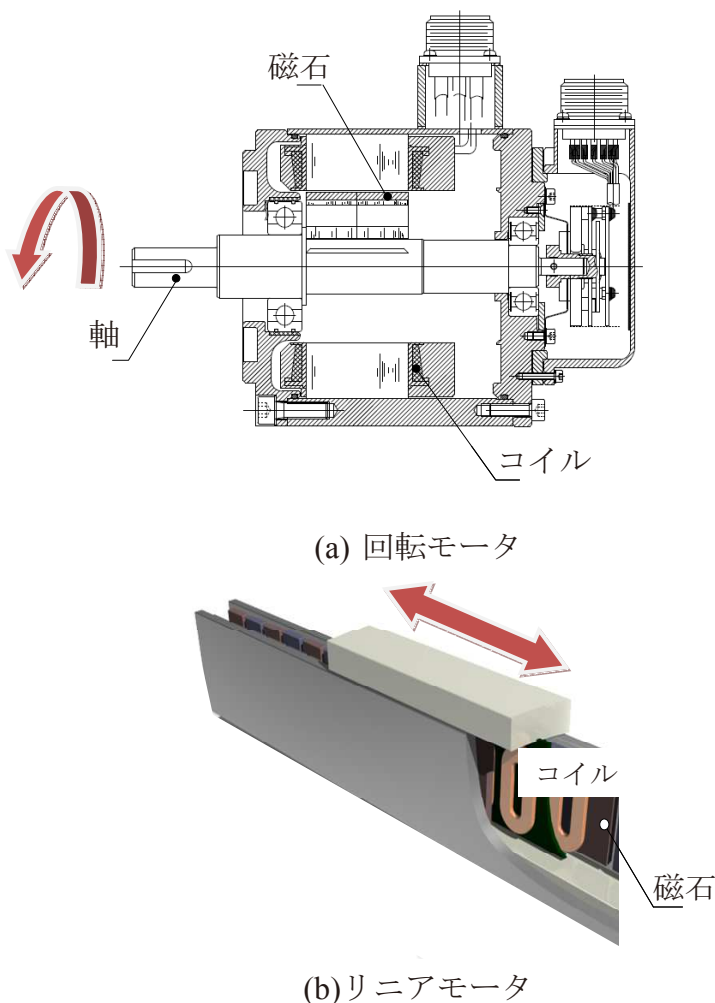


図 1.1 回転モータとリニアモータの構造例

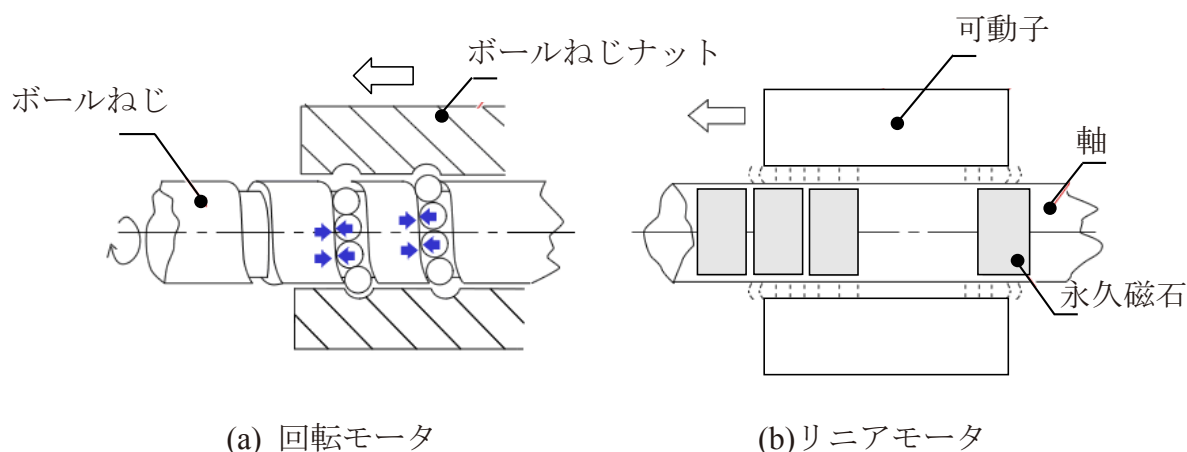


図 1.2 回転モータとリニアモータにおける直進機構

リニアモータの具体的な応用製品の例としては、工場内搬送装置，病院内搬送装置，半導体製造装置，電車でドア等が挙げられる^{(1-3) (1-4)(1-5)}．近年ではエレクトロニクス機器の高機能化，軽薄短小化に伴い，リニアモータの需要が高まっている．例えば実際の引合い案件として，チップマウント用の円筒形リニアモータにおいて，現状使用している体格□20 の推力を維持しつつも，□12 までサイズダウンする事が求められる事例もある．

1.1.2 産業界に求められるリニアモータ

近年，製品化が実現されているリニアモータが増えている⁽¹⁻⁶⁾⁽¹⁻⁷⁾．以下に産業用の小型リニアモータに要求される特徴例を示す．

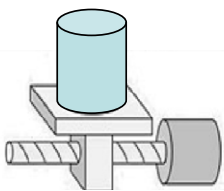
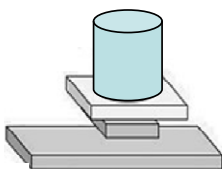
- (1) **高速性，長ストローク性**：最も優位性を保っている点が高速性である．位置検出器を用いたサーボシステムでは，最高速度 10m/s, 分解能 2 μm のものが商品化され，さらに高速化の傾向にある．最高速度はストロークに影響されない為，コストパフォーマンスに優れたシステムが実現できる．
- (2) **高加減速性，高追従性**：リニアモータはダイレクトドライブで，力伝達の制限がないため可動部の軽量化により高加減速性を向上できる．また，リニアモータの固定部側支持部，及び負荷の剛性を上げ，共振を防ぐことにより，高追従性も向上することができる．
- (3) **クリーン性**：クリーン環境での位置決めでは，非接触動力伝達のリニアモータが有利である．
- (4) **コンパクト性**：ボールねじ駆動タイプより周辺機構が少ない為，ユニッ

ト自体がコンパクトである。

- (5) **メンテナンスフリー**：リニアモータは，力伝達系による制約が少なく，接触部分は案内だけであるために摩擦が少なくなる．部品点数が少ないシンプルな構成な為，ボールねじ駆動と比べて高信頼性，長寿命である。

表 1.1 にボールねじ駆動とリニアモータ駆動の特徴まとめた。

表 1.1 ボールねじ駆動とリニアモータ駆動

項目	ボールねじ駆動	リニアモータ駆動
		
高速化	課題あり	実現容易
加速度	モータと負荷以外の影響大	モータと負荷のみ
ストローク	制約有	制約無
位置決め精度	高め難い	高め易い
等速度安定性	ボールねじの脈動	実現容易
騒音	ボールねじ音	静か
拡張性	マルチヘッド困難	マルチヘッド可能
洗浄性	ボールねじ潤滑，シールが困難	コンパクトでクリーン
メンテナンス	定期的に必要な	フリー

1.1.3 リニアモータの分類

表 1.2 にリニアモータの分類を示す．リニアモータは，回転モータの回転軸を中心として直線状に展開したものである．ここではトルク発生原理による名称と対比する形とした．本研究におけるリニアモータは，円筒形リニア同期モータの永久磁石 (PM:Permanent Magnet) 形である．円筒形の為，構造が簡単且つ小型化が容易であり，省スペースの要求が多いチップマウンタや工場内の押し

ボタン向け等に適している．また永久磁石により，高磁束密度が得られるといった利点がある．

表 1.2 リニアモータの分類⁽¹⁻⁸⁾

分類	構成	原理と特徴
リニア同期モータ (LSM:Linear Synchronous Motor)	電磁石 (EM:Electro Magnet)形	・電機子と界磁磁極との相互作用により，移動磁界の移動速度に同期して界磁磁極のある可動体側が移動
	永久磁石 (PM:Permanent Magnet)形	・コギング対策考慮要 ・EM形：界磁，電機子に鉄心を使用する為高価．小型には不適
	バリアブル リラクタンスモータ (VR:Variable Reluctance)形	・PM形：強力な磁界により高磁束密度が得られる．永久磁石を使用する為，高価 ・VR形：低コスト，高速運動に適する
リニア ステッピングモータ (LSTM:Linear Stepping Motor)	永久磁石 (PM:Permanent Magnet)形	・入力パルス信号に応じて，所定のステップずつ歩進する．閉ループ制御が可能，変位誤差が累積しない
	バリアブル リラクタンスモータ (VR:Variable Reluctance)形	・PM形：一次側の電磁石と永久磁石又は鉄心歯の間の吸引力で歩進，無励磁時でも自己保持力を持つ ・VR形：軟鉄の二次側と一次側巻線から構成．電磁吸引力により歯極を引きつけ歩進．無励磁時の保持力がゼロ
リニア直流モータ (LDM:Linear DC Motor)	単極形 (ボイスコイルモータ)	・可動コイル形の単極．高速微小位置決めに適している
	ブラシ付	・長ストロークには向かないが，微小位置決めに適している ・推力／質量比が大きく高速化向き ・ブラシ付：メンテナンス要
リニア誘導モータ (LIM:Linear Induction Motor)	リニア誘導 モータ一般	・一次巻線により発生する磁界と二次導体に誘起される誘導電流の相互作用で推力を発生
	電磁誘導形 電磁ポンプ	・二次側の構造がシンプル ・端効果による高速駆動での推力低下 ・極ピッチが小さい小型では，磁束密度を得る事が難しい

図 1.3 にリニアモータの適用分野を示した⁽¹⁻⁹⁾⁽¹⁻¹⁰⁾．2000 年以降，ボールねじの置換としてシャフトモータに代表される円筒形の LSM が半導体装置，チップマウント等の用途において台頭している．リパルジョン型磁気回路を構成し

た円筒形の LSM は、コイル全領域に渡り推力発生に有効な界磁磁束が鎖交する為モータ効率は比較的良く、シャフト固定においては両端2点支持の為、他のリニアモータに比べて装置への組み込みに優れているといった特徴がある(1-11)(1-12)。

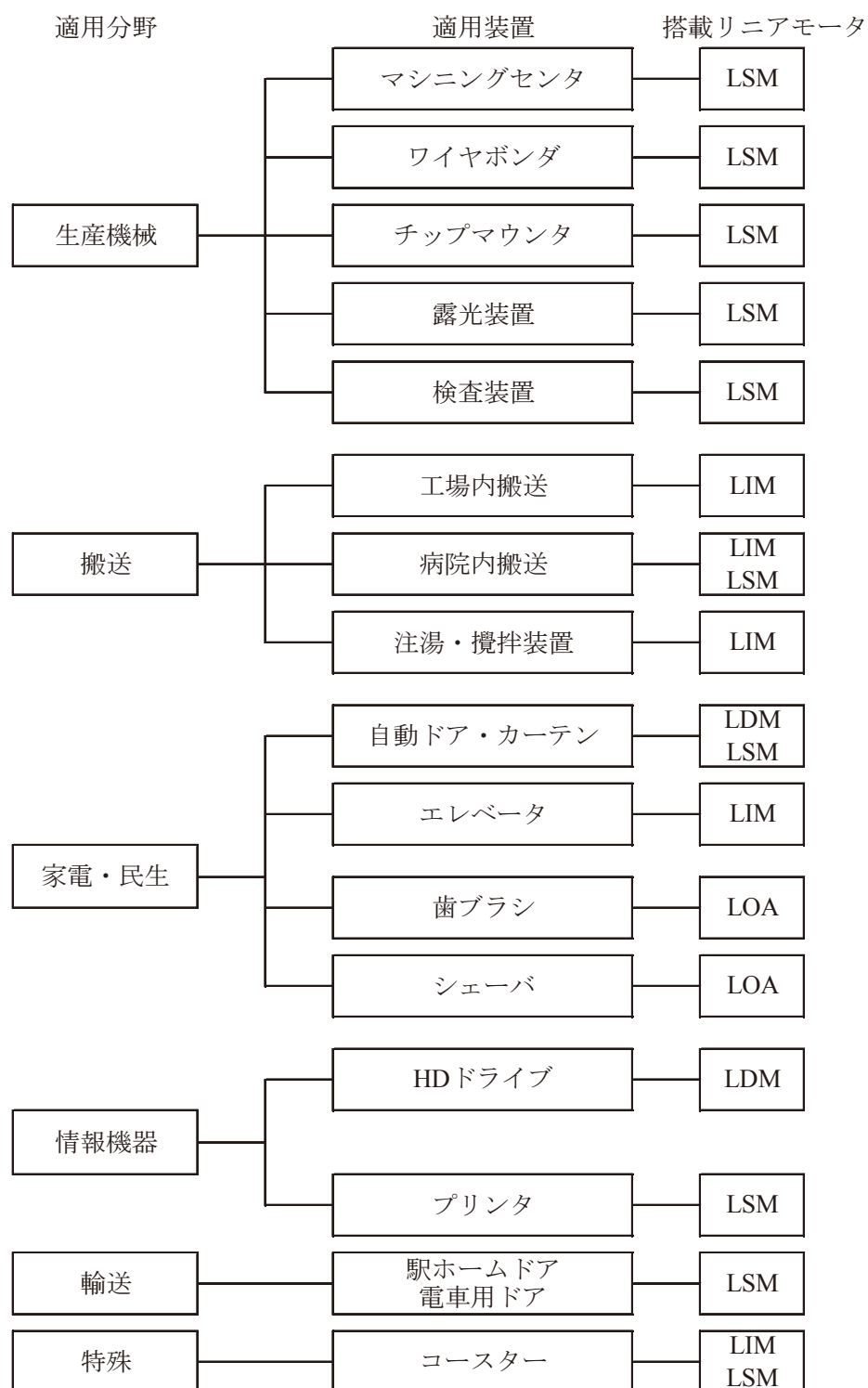


図 1.3 リニアモータの適用分野

1.1.4 各メーカーの円筒形リニアモータ仕様

表 1.3 に 2015 年 1 月現在の日本国内における円筒形リニアモータの取り扱いメーカーを示す。円筒形リニアモータを自社開発・販売しているメーカーは 6 社と少ない。また、表 1.4 には海外を含めた各メーカーの円筒形リニアモータ仕様を示し、図 1.4 には、国内メーカーの定格推力とリニアモータ体格(外径)の網羅範囲をまとめた。また、図 1.5 には海外メーカーにおける円筒形リニア同期モータの定格推力とリニアモータ体格(外径)の網羅範囲をまとめた。

小型の観点から見た時に、円筒形リニア同期モータでは、C 社から□10 がラインナップされている。最も小型では、円筒形リニア直流モータとなるが、2013 年に E 社および O 社より体格□8 がラインナップされており、小型化の開発が進んでいる傾向も確認できる。小型高推力の円筒形リニアモータが要求される側面にある各社とも、小型の円筒形リニアモータの開発を進めている事が分かるが、実際は A 社と C 社が市場で高いシェアを持っている状況でもある。

本研究では、直近の製品化も考慮しつつ□12(ϕ 10)における円筒形リニアモータの設計を行うが、将来的な展望(目標)としては、市場最小サイズとなる□7 以下達成を視野に入れている。

表 1.3 円筒形リニアモータの取り扱いメーカー

メーカー	リニアモータ単体	リニア駆動単軸 ステージ
A社	○	○
B社	●	●
C社	○	○
D社	○	
E社	●	●
F社	○	○
G社	●	○
H社	○	
I社	○	

○自社開発 ●他社製品取扱い

表 1.4 各メーカーの円筒形リニアモータ仕様

メーカー	定格推力[N]	最大推力[N]	ストローク [mm]	体格[mm]
A社 ⁽¹⁻¹³⁾	2.5	—	30	φ 16
	5	18	30	φ 20
	10	30	40	φ 25
B社 ⁽¹⁻¹⁴⁾	217	744	～1500	□ 72
	458	1860		
C社 ⁽¹⁻¹⁵⁾	0.29	1.2	20～40	□ 10
	0.45	1.8		
	0.5	2.1		
	1.8	7.2	25～200	□ 20
	2.7	11		
	3.5	14		
	4.5	18	50～1050	□ 25
	6.6	27		
	8.9	36		
	10	40	50～1050	□ 30
	15	60		
	20	81		
	18	72	100～1050	□ 40
	28	112		
	38	152		
	40	160	100～1550	□ 50
	60	240		
	75	300		
	140	560	100～2000	□ 60
	56	226		
	85	338		
	113	451	100～3000	□ 80
	104	416		
	148	592		
	190	760	100～2000	□ 80
	100	400		
	150	600		
	200	800	100～2000	□ 80
	116	464		
	175	700		
	233	932	100～2000	100×105
	289	1156		
	440	1760		
	585	2340	100～2000	125×120
	420	1700		
	610	2400		
	780	3100	100～3000	□ 50
	34	138		
	52	207		
	69	276	100～3000	□ 60
	55	218		
	82	327		
	109	436		

メーカー	定格推力[N]	最大推力[N]	ストローク [mm]	体格[mm]
D社 ⁽¹⁻¹⁶⁾	1.2	4.0	30	\varnothing 10
	2.6	10.0		\varnothing 15
	4.3	18.0	30	\varnothing 20
E社 ⁽¹⁻¹⁷⁾	1.03	2.74	10 40	□ 8
	3.6	10.7	20～120	□ 12.5
	9.2	27.6	40～220	□ 20
F社 ⁽¹⁻¹⁸⁾	0.8	2.6	6.5～26.5	□ 19
	1.7	5.3		
	2.3	5.1	12.5～32.5	
	4.7	10.4		
	5.4	9.4	8.0～38.0	
	11.4	19.3		
G社 ⁽¹⁻¹⁹⁾	C社参照			
H社 ⁽¹⁻²⁰⁾	11	51	199～1045	□ 32
	16	75		
	25	117		
	28	126	117～1041	□ 52
	59	267		
	90	403		
	118	532		
	150	700	233～1253	□ 60
I社 ⁽¹⁻²¹⁾	17	60	180～660	□ 34
	25	90		
	34	120		
	30	150	210～770	□ 44
	45	225		
	60	300		
	70	280	270～990	□ 54
	105	420		
	140	560		
	90	420	360～1320	□ 64
	135	630		
	180	840		

メーカー	定格推力[N]	最大推力[N]	ストローク [mm]	体格[mm]
J社 ⁽¹⁻²²⁾	33.7	93.7	100	□32
	29.4	141.0	200	
	33.8	141.0	320	
	55.3	183.0	100	□40
	33.8	202.0	200	
	42.1	202.0	320	
	47.9	202.0	400	
K社 ⁽¹⁻²³⁾	217	744	～1500	□72
	458	1860		
L社 ⁽¹⁻²⁴⁾	3.5	10.7	40,60,80, 100,120	□12
	9.2	27.6		□20
M社 ⁽¹⁻²⁵⁾	2500	—	4000	φ140
N社 ⁽¹⁻²⁶⁾⁽¹⁻²⁷⁾	11	—	50,130, 210,290	φ20
	17	—		
	22	—		
	40	—	50,125, 200,275	φ37
	50	—		
	60	—		
O社	1.03	2.74	10 40	□8
	3.6	10.7	20～120	□12.5
	9.2	27.6	40～220	□20

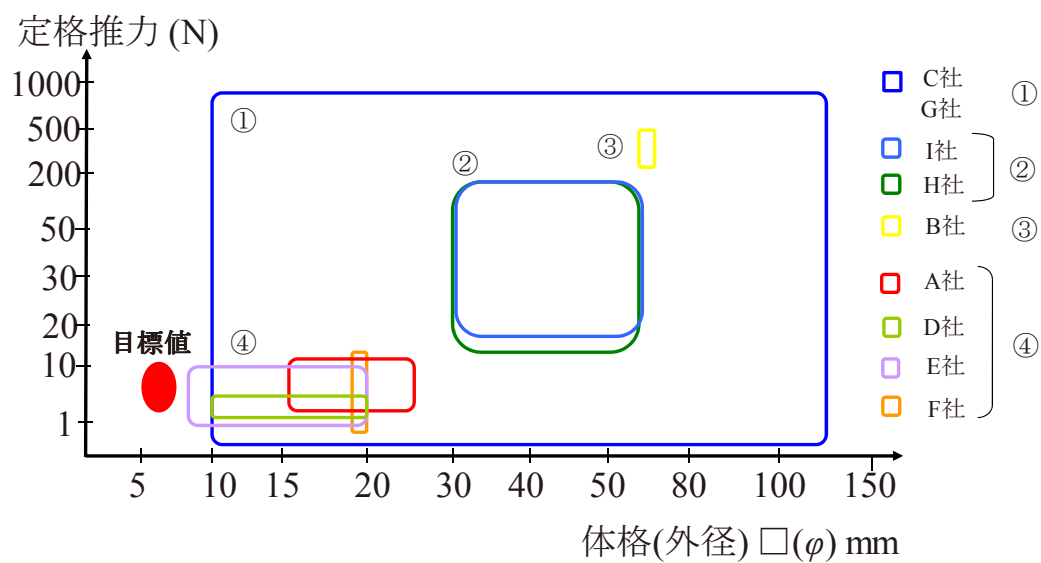


図 1.4 円筒形リニア同期モータの網羅範囲(国内メーカー)

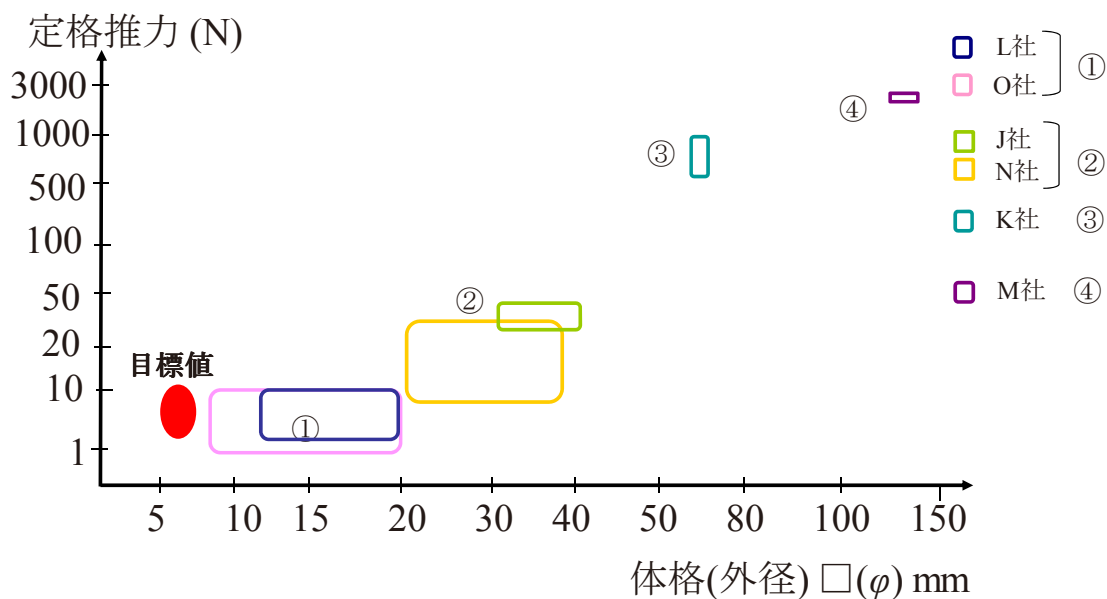


図 1.5 円筒形リニア同期モータの網羅範囲(海外メーカー)

2 項以降で述べるが、今回開発する円筒形リニア同期モータのストロークは 30mm である。各メーカーの円筒形リニア同期モータ仕様の中から、同体格(外径)でストローク 30mm 程度の円筒形リニア同期モータの仕様について、表 1.5 にまとめた。

表 1.5 ストローク 30mm 程度の円筒形リニア同期モータの仕様

定格推力[N]	最大推力[N]	ストローク[mm]	体格(外径)[mm]
0.45	1.8	30	□10
0.50	2.1		
1.2	4.0		
2.6	10.0	20	φ 15
2.5	—	30	φ 16
1.7	5.3	26.5	□19
4.7	10.4	32.5	
1.8	7.2	25	□20
2.7	11.0		
3.5	14.0		
5.0	18.0	30	φ 20

表 1.6 に 2008 年以降の円筒形リニアモータにおける特許をまとめ、図 1.6 には年代別の件数内訳をまとめた⁽¹⁻²⁸⁾⁽¹⁻²⁹⁾。特許としては、高推力及び低コギング力・低推力リップルに関する特許が大半を占めており、依然として高推力密度

低推力リップルに関する課題は継続されている事が分かる。

表 1.6 円筒形リニアモータに関する公開特許(2008 年～2013 年)

出願人	発明等の名称	公開番号	解決しようとする課題
株式会社 安川電機	円筒リニアモータ	特許公開2012-175850	小型・省スペース
	多連結円筒リニアモータ	特許公開2012-154649	組立剛性強化
	ムービングマグネット形 円筒リニアモータ	特許公開2009-50128	推力リップル低減, 微小推力制御
	リニアモータ	特許公開2013-198204	位置検出制度向上
	リニアモータ、およびリニア モータの電機子	特許公開2010-213408	冷却性能向上
	円筒形リニアモータ	特許公開2010-98880	コギングトルク低減
	円筒型リニアモータ用電機子 および円筒型リニアモータ	特許公開2008-271753	磁束密度向上
	円筒型リニアモータおよび そのボールスプライン	特許公開2008-141922	コスト削減, 組立容易化
	円筒形リニアモータ	特許公開2008-79358	絶縁耐圧低下防止
	円筒形リニアモータと その固定子製造方法	WO2009/041185	冷却構造の簡素化, リニアモ ータの小型化, 軽量化, 低価格化
三菱電機 株式会社	円筒型リニアモータ	特許公開2013-223289	小型, 高精度化
	円筒型リニアモータの固定子、 円筒型リニアモータ及び円筒型 リニアモータの固定子コイルの 巻装方法	特許公開2013-59165	放熱性向上
	リニアバーニアモータ	特許公開2012-244688	推力向上, ディテント力 低減
富士機械製 造株式会社	円筒型リニアモータ	特許公開2008-206335	組立作業性向上
	円筒型リニアモータ	特許公開2008-61458	冷却効果
株式会社 日立製作所	円筒リニアモータ及びそれ を用いた車両	特許公開2009-291069	高推力化, 推力リップル 低減
	円筒リニアモータおよびそ の製造方法	特許公開2009-254025	放熱性向上
	円筒リニアモータ及びそれ を用いた車両	特許公開2008-5665	高推力化, 推力リップル 低減
	円筒リニアモータ及びそれ を用いた車両	特許公開2009-291069	高推力化, 推力リップル 低減
	円筒型リニアモータ	特許公開2009-213192	部品着脱容易化
	同期形リニアモータ	特許公開2009-159790	温度検出機能付加
	同期形リニアモータ	特許公開2009-136118	冷却効果
	リニアモータ	特許公開2009-112167	コイルの位置決め簡易化
	筒形リニアモータ	特許公開2008-236832	小型, 軽量化

出願人	発明等の名称	公開番号	解決しようとする課題
多摩川精機株式会社	円筒型リニアモータのコア付ステータ構造	特許公開2009-213253	高推力化
	円筒型リニアモータ	特許公開2009-213254	小型化
	リニア3相モータ用ステータボビン及びその巻線方法	特許公開2009-219185	製造方法簡素化
	円筒型リニアモータのマグネットスキュー構造	特許公開2010-35296	コギングトルク低減
	円筒リニアモータのホール素子埋込構造	特許公開2010-141986	小型化（軸方向）
	コア付円筒状リニアモータの台形型マグネットスキュー構造	特許公開2010-161878	コギングトルク低減
	コア付円筒状リニアモータの台形型マグネットスキュー構造	特許公開2010-193584	コギングトルク低減
	円筒型リニアモータ	特許公開2010-288418	小型化，高推力化
	磁石埋め込み型円筒リニアモータ	特許公開2011-172439	推力リップル低減
	円筒型リニアモータ	特許公開2012-223004	高推力化
株式会社コガネイ	リニアモータ	特許公開2013-85405	製造方法簡略化
	リニアモータ	特許公開2011-114889	小型化
THK株式会社	リニアモータ	特許公開2012-19613	推力向上
日本パルスモータ株式会社	リニアモータの可動子	特許公開2012-5315	位置検出方法の提案
マクソンモーターアーゲー	リニアドライブ	特許公開2011-147333	円筒リニアモータの構造
セイコーインスツル株式会社	リニアモータ	特許公開2011-45877	小型，簡素化
株式会社アイエイアイ	リニアモータとアクチュエータ	特許公開2009-194991	高推力化
日本電産サンキョー株式会社	リニアモータ	特許公開2009-183041	コギングトルク低減
株式会社ワコー技研	リニアモータ	特許公開2008-289344	高推力化
株式会社椿本チエイン	リニアモータ	特許公開2008-193760	高推力化

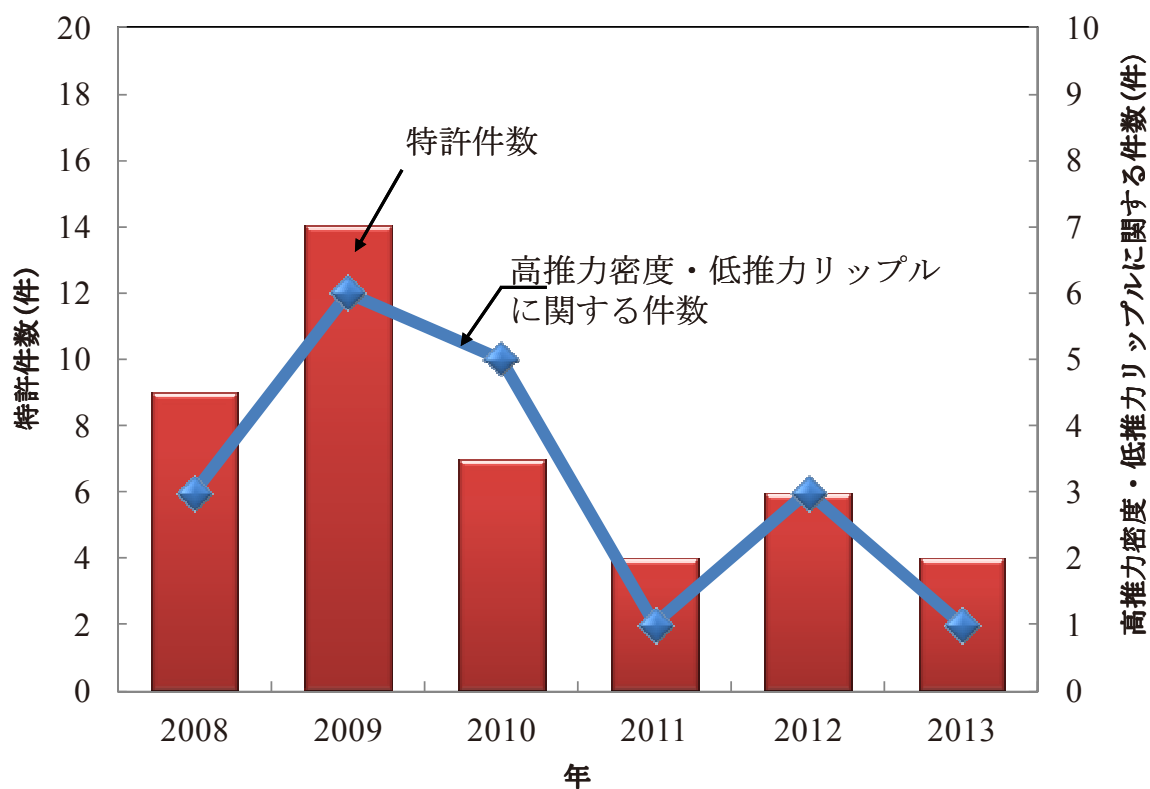


図 1.6 円筒形リニアモータに関する公開特許の年代別内訳

1.1.5 市場予測

表 1.7 に日本製の半導体実装装置の販売高を示す⁽¹⁻³⁰⁾。半導体装置における 2012 年度の販売実績は 10,284 億円であった。2013 年度は上期組立・検査用の装置が落ち込んだが、下期に回復があった。2014 年度以降も継続的な成長が予測される。表 1.8 に、日本市場での販売高を示した。日本市場においては、2012 年度に一度落ち込みを見せたが、2013 年度はメモリーメーカーの投資再開により成長、2014 年以降も横ばいの予測である⁽¹⁻³¹⁾。

表 1.7 半導体実装装置(日本製)販売高

項目	実績			予測		
年度	2010	2011	2012	2013	2014	2015
合計[億円]	12,415	12,637	10,284	11,158	12,452	12,788
前年比成長率[%]	—	1.8	-18.6	8.5	11.6	2.7

表 1.8 日本市場(日本製)販売高予測

項目	実績			予測		
年度	2010	2011	2012	2013	2014	2015
合計[億円]	4,162	4,552	2,363	3,635	3,853	3,660
前年比成長率[%]	—	9.4	-48.1	53.8	6.0	-5.0

また世界の半導体，電子部品の実装，検査装置の市場予測では，2015 年度に半導体実装装置 1,828 億円，電子部品実装装置 2,492 億円とされ需要は拡大していく．半導体実装装置においては，最も規模が大きいのがワイヤボンダで，2015 年に向け成長率が高いのがフリップチップボンダ， bumps ボンダとなっている．電子部品実装装置においては，高速モジュラーマウンタで 1,320 億円が見込まれる．以上の背景もあり，本研究のペンシルサイズ円筒形リニア同期モータは，特に Z 軸を筆頭に継続的な需要が見込まれる．

1.2 研究目標

目標仕様としては，体格□12 において，最大推力 4.5N 以上とする．これは現在市場で量産化されている円筒形リニアモータにおいては，実現されていない数値である．同時に本研究では，体格□12(外径 $\phi 10$)の円筒形リニア同期モータを開発する事とした．

リニアモータの推力は，磁石面積やコイルの容量といったモータの体積に依存する為，既存の推力を得る事は容易ではない⁽¹⁻³²⁾．この問題を解決する為に，現在までに様々な手法が用いられ推力向上が図られている．例えばシャフトモータでは着磁方向を対向させて連結した永久磁石群によって，各永久磁石の境界部分に高いラジアル方向の磁束を発生させることで対策がされている⁽¹⁻³³⁾．

今回，外径 $\phi 10$ において固定子に電機子コア，可動子の磁石をハルバツハ磁石配列⁽¹⁻³⁴⁾⁽¹⁻³⁵⁾で構成する等により，推力向上を図る．

小型・高推力の円筒形リニアモータを評価する為に，式(1.1)に示す推力定数 2 乗密度 G を評価指標として用いる事とする⁽¹⁻³⁶⁾⁽¹⁻³⁷⁾．推力定数 2 乗密度 G は体積あたりの最大推力及び入力電力あたりの最大推力を正規化したものである⁽¹⁻³⁸⁾．また最近では推力定数 2 乗密度 G をカタログベース品で採用するメーカーも出ており，推力定数 2 乗密度 G は省エネルギー，高推力のリニアモータを開発する為には必要な指標となりつつある．図 1.7 に市場における□20 以下の円筒形リニアモータの推力定数 2 乗密度と本研究の設計目標を示した．推力定数 2 乗密度はモータ体積に依存する為，暗に大きくなるものではない．市場の製品

の実態を調査し、その上限値から近似式を導出し、推力定数 2 乗密度の境界線を示した。この境界線を越え、具体的には推力定数 2 乗密度が 0.028×10^6 [$\text{N}^2/(\text{Wm}^3)$]となることを目標値として規定した。

$$G = \frac{F_{\max}^2}{P V_m} \quad [\text{N}^2/(\text{Wm}^3)] \quad (1.1)$$

ここに G 推力定数 2 乗密度 [$\text{N}^2/(\text{Wm}^3)$],

F_{\max} 最大推力 [N],

P 入力電力 [W],

V_m モータ体積 [m^3]

図 1.7 から分かるように体積が小さくなるほど、推力定数 2 乗密度が小さくなる事が分かる。これは推力が磁石面積のやコイル容量といったモータの体積に依存する為である。更には発熱の要素も加わる為、モータの小型化と高推力は相反する。

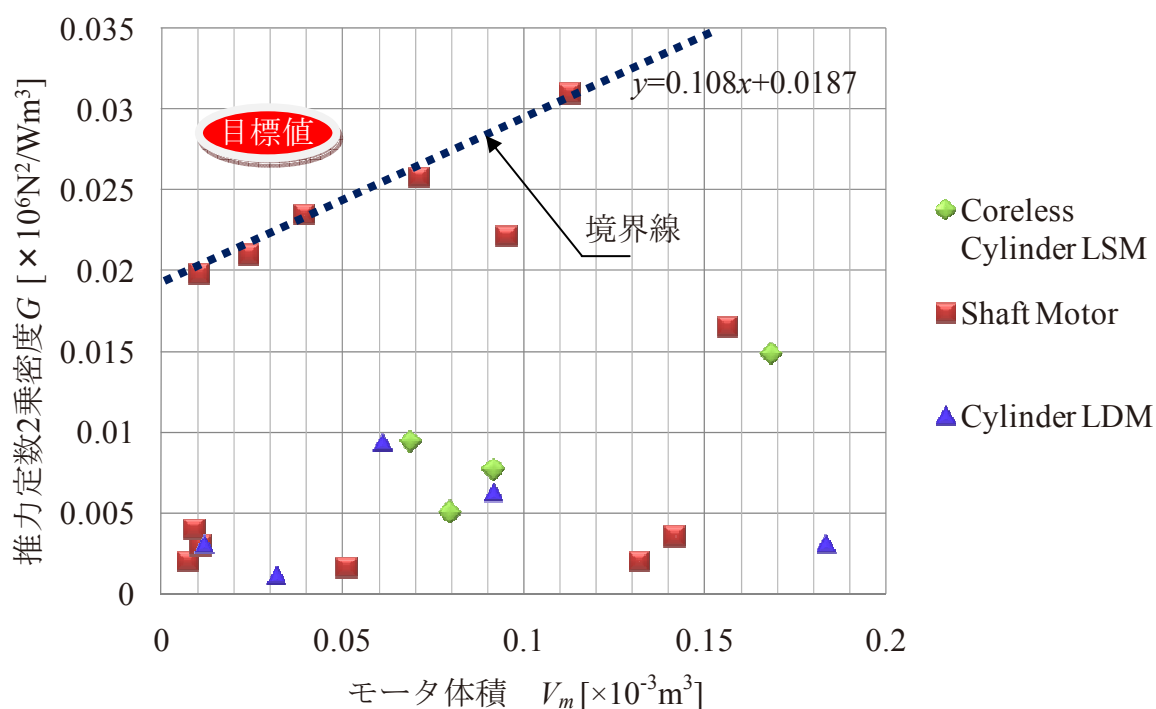


図 1.7 市場における円筒形リニアモータの推力定数 2 乗密度(□20 以下)と本研究の設計目標

1.3 製作面の課題

小型化及び量産を見据える上では、製作面の課題も挙げられる、一つ目は磁石の着磁である。リング磁石の着磁を行う上で、内外径比 0.6 以上且つ通過磁束密度を考慮する必要がある⁽¹⁻³⁹⁾。十分な着磁が行われないと、残留磁束密度 B_r 、保持力 H_g とともに低下する為、本来の磁気特性が得られず必要推力に対して、致命的な影響を及ぼす。磁石を着磁するためには、一定以上の磁場強度が必要であり、磁気特性の残留磁束密度 (B_r) 以上が必要となる。

例えば、磁石の残留磁束密度 $B_r=1.3\text{T}$ とし、(外径 $\phi 5 \times$ 内径 $\phi 3$)mm の磁石を例に考える。磁石断面積 S は約 12.57mm^2 となるので、式(1.2)に示す着磁に必要な磁束量の式

$$\Phi = B_r \times S [\text{Wb}] \quad (1.2)$$

より、16.3 となる。この着磁に必要な磁束を $\phi 3$ の部分にすべて通すことになるが、 $\phi 3$ 部分の面積 S' は、 7.065mm^2 となる。

次に式(1.3)より、この部分を通過する磁束密度 B_1 が求まる。

$$B_1 = \Phi / S' [\text{T}] \quad (1.3)$$

故に、2.3T となる。次に、この $\phi 3$ の部分に磁束密度 B_1 を流すことが可能な磁性体の有無が問題となる。現状、一般的な磁性体材料でも最も磁気特性が高いと言われる軟磁性材料の飽和磁化 (B_s) は、2.3T 程度である為、この例であれば、磁束を流すことは可能となる(保証値ではなく実力値としては、3T までは磁束を流すことが可能と言われている)。

その為、特に小径磁石では、軟磁性材料の磁気特性から着磁する磁場強度(磁束密度)の確保が難しい。

二つ目は電機子コアを設けた場合、型製作が困難という課題がある。固定子コアを型で製作する事が出来れば、ワイヤーカットで製作した場合の 1/10 のコストに抑えることが出来るが、 $\square 12$ クラスでは、固定子コアの型化が難しい為、市場においても固定子はコアレスのものに限られ、高推力化をより難しいものになっている背景もある。コアの型に関しては、メーカーとの技術調整を重ねた結果、対応可能との見込みが立った事をここに述べておく。

1.4 本論文の構成と概要

以下に本論文の構成と概要を示す.

第2章の内容

第2章では本研究のペンシルサイズ円筒形リニア同期モータの基本構造と動作原理, 概論設計について述べる.

第3章の内容

第3章では固定子コアレスタイプにおいて, 高推力化を目的としたパーミアンス法と有限要素法による設計について述べる. 基礎特性の測定と, 駆動システムの構成を交えながら, 特性の測定結果についても述べる.

第4章の内容

第4章では, 固定子コア付タイプにおいて, 高推力密度を目的としたパーミアンス法と有限要素法による設計について述べる. 更に歪率低減と低コギング力化について述べる. また基礎特性の測定と, 特性の測定結果についても述べる.

第5章の内容

第5章では, 本論文の内容のまとめとして, 一連の検討に対する結果と考察, 今後の課題について内容をまとめる.

第1章の参考文献

- (1-1) リニアモータとは : <http://homepage3.nifty.com/bs3/Magnet/visual/mtor7.html>, 2014.
- (1-2) ミスミホームページ : エンジニアのための技術講座
http://koza.misumi.jp/lca/2005/01/194_2.html, 2014.
- (1-3) 電気学会 搬送用リニア位置決めシステム調査専門委員会編 : 搬送用リニア位置決めシステムの応用技術, 電気学会技術報告第 732 号, pp.41-46, 1999.
- (1-4) 電気学会 リニアメカニズム調査専門委員会編 : 搬送用メカニズムの実用化動向と将来展望, 電気学会技術報告第 657 号, pp.3-23, 1997.
- (1-5) 電気学会 産業用リニアドライブと応用の変遷調査専門委員会編 : 産業用リニアドライブ技術と応用の変遷 電気学会技術報告 1259 号, pp.13-14, 2012.
- (1-6) Norhisam Misron : 磁石埋込形高性能リニア同期モータの設計に関する研究, 信州大学博士学位論文, p1, 2003.
- (1-7) ジイエムシーヒルストンカタログ : Shaft Motor Solution(2015.1 現在)
pp.1-2, 2014.
- (1-8) 電気学会 リニアドライブシステムの用語等再検討調査専門委員会編 : リニアドライブ技術とその応用に関わる用語, 電気学会技術報告第 911 号, pp.4-12, 2003.
- (1-9) 電気学会 リニア搬送システムの高性能化技術調査専門委員会編 : リニア搬送システムの高性能化技術, 電気学会技術報告第 846 号, p.4-5, 2001.
- (1-10) 電気学会 産業用リニアドライブと応用の変遷調査専門委員会編 : 産業用リニアドライブ技術と応用の変遷 電気学会技術報告 1259 号, pp.19-30, 2012.

- (1-11) 井出萬盛：よくわかる最新モータ技術の基本とメカニズム,秀和システム,pp.137-147,2004.
- (1-12) M.Sanada, S.Morimoto, Y.Takeda : Interior Permanent Magnet Linear Synchronous Motor for High Performance Drive,IEEE Trans.on IA,33(4), pp.966-972,1997.
- (1-13) アイエイアイカタログ : ロボシリンダ総合カタログ (2015.1 現在), pp.437-441.,2013.
- (1-14) 青山特殊鋼カタログ : 防水リニアサーボチューブ (2015.1 現在), pp.1-4,2012.
- (1-15) ジイエムシーヒルストンカタログ : Shaft Motor Solution (2015.1 現在), pp.4-6,2014.
- (1-16) シチズン千葉精密カタログ : オールインワン小型リニアモータ Slimo Series(2015.1 現在),pp.1-10,2013
- (1-17) FAULHABER カタログ : Linear DC servo motors(2015.1 現在),pp.1-16,2010.
- (1-18) THK カタログ : クラスタリニアモータ(2015.1 現在),pp.89-98,2013.
- (1-19) 日本パルスモータカタログ : シャフトモータ(2015.1 現在),pp.1-6,2012.
- (1-20) 三木プーリカタログ : 円筒型リニアモータリニアシャフトドライブ, (2015.1 現在),pp.547-569,2013.
- (1-21) 安川電機カタログ : リニアサーボドライブ Linear Σ シリーズ Σ -Stick(2015.1 現在),pp.2-39,2011.
- (1-22) FESTO カタログ : Electric cylinders DNCE-LAS with linear motor (2015.1 現在),pp.2-18,2013.
- (1-23) Dunkermotoren Linear Systems ホームページ(2015.1 現在)
: <http://www.dunkermotoren.com>,2015.

- (1-24) PBA Systems ホームページ(2015.1 現在):<http://www.pbasystems.com>,2015.
- (1-25) ROTATING RIGHT カタログ : RECIPROCASTING ELECTRIC SUBMERSIBLE PUMP(2015.1 現在),pp.1-4,2010.
- (1-26) LinMot カタログ : MagSpring(2015.1 現在),pp.2-8,2013.
- (1-27) LinMot カタログ : Linear Motors(2015.1 現在),pp.1-49, 2014.
- (1-28) 特許庁ホームページ : <http://www.jpo.go.jp>,2015.
- (1-29) 電気学会 産業用リニアドライブと応用の変遷調査専門委員会編 : 産業用リニアドライブ技術と応用の変遷 電気学会技術報告 1259 号, pp.9-12,2012.
- (1-30) 一般社団法人日本半導体製造装置協会 : 半導体・FPD 製造装置需要予測,pp.1-3.2014.
- (1-31) 株式会社富士経済ホームページ” <https://www.fuji-keizai.co.jp/market>,2014.
- (1-32) 山下文敏 : 高効率小型磁石モータの開発動向, 電気学会誌, No.11,pp.752-755,2008.
- (1-33) 三島将行, 平田勝弘, 石黒浩 : 有限要素法によるアンドロイド用リニアアクチュエータのハルバッハ磁石配列に関する考察, 電気学会リニアドライブ研究会資料, LD07-15,pp.73-76,2007.
- (1-34) 三島将行, 平田勝弘, 石黒浩 : 有限要素法によるアンドロイド用同期モータの特性解析, 電気学会リニアドライブ研究会資料, LD07-40,pp.45-48,2007.
- (1-35) 仲岩浩一, ペンシルサイズ円筒型リニアモータの設計, 信州大学修士論文, pp.7-11,2009.
- (1-36) Norhisam Misron : 磁石埋込形高性能リニア同期モータの設計に関する研究,信州大学博士学位論文, p4,2003.

- (1-37) 脇若弘之, Norhisam Misron, 神谷昭範, 矢島久志, 藤原伸広, 高田進 : 小型電磁アクチュエータの特性評価, 日本応用磁気学会誌 27, pp.482-485, 2003.
- (1-38) 宮本恭祐 : 永久磁石同期機における高効率化と実用化に関する研究, 長崎大学博士学位論文, p.19, 2014.
- (1-39) 日立金属カタログ : NEOMAX MAGNET(2015.1 現在), pp15-18, 2015.

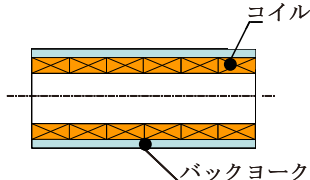
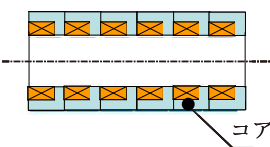
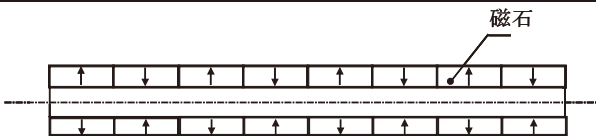
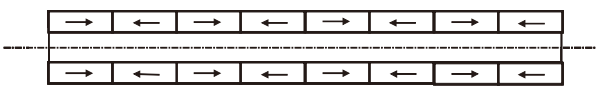
第2章 ペンシルサイズ円筒形リニア同期モータの動作原理と設計概論

2.1 構成と動作原理

2.1.1 市場における従来の技術

円筒形のリニア同期モータにおいては、これまでに様々な技術開発や方法が考案されている。本項で取り上げる円筒形リニア同期モータにおいては、具体的に表 2.1 にまとめた 2 種類の技術に大別される。各社毎、磁石配列やバックヨークの有無といった違いはあるものの、現状はこの 2 種類での試作納入、製品化或いは量産化がされている実態である⁽²⁻¹⁾⁽²⁻²⁾⁽²⁻³⁾⁽²⁻⁴⁾。シャフトモータ・スロットレスモータ構造による推力向上に対し、巻線部分にコアを配置する事で、更なる推力向上を図ったものが、コア付円筒形リニア同期モータである。

表 2.1 円筒形リニア同期モータの市場における従来技術

項目	シャフトモータ, スロットレスモータ	コア付円筒形リニア同期モータ
巻線	コアレス 	コア付 
磁石配列	ラジアル磁石配列  アキシシャル磁石配列 	
構造上の特徴	<ul style="list-style-type: none"> ・磁石とコイルのみのシンプル構造 ・磁石の磁束を360°利用している為、短いコイル長で推力を得られる(フラット式(両側, 片側)等と比較した場合) 	<ul style="list-style-type: none"> ・巻線部分にコアを追加した構造
長所	<ul style="list-style-type: none"> ・シャフトの外周部はステンレスであり鉄を使っていない為、コイルとシャフトとの間に吸着力がなく、動作ムラ(コギング力)が発生しない 	<ul style="list-style-type: none"> ・巻線部コアによる高推力化
短所	<ul style="list-style-type: none"> ・巻線側コアレスの為、磁石のグレードに依存する割合が高い ・小型高推力密度を目指すにはコスト高 	<ul style="list-style-type: none"> ・巻線部コアによるコギング力

2.1.2 本研究の円筒形リニア同期モータ

本研究の円筒形リニア同期モータは永久磁石形であり，固定子はコアレス，コア付の2種類，可動子の磁石配列を2種類とした計4種類のリニア同期モータである．表2.2にその分類を纏める．コアレスRLSM及びコアレスHLSTMは固定子コアが無い為，コアの影響によるコギング力が無い．最も高推力が期待できるのは，可動子をハルバツハ磁石配列で構成し，固定子にコアを設けたコア付HLSTMである．市場においては，コアレスHLSTM及びコア付HLSTMの可動子に構成されるハルバツハ磁石配列で製品化・量産化された事例は無い．

但し研究の視点では，円筒形リニア同期モータにおけるハルバツハ磁石配列の検討については複数報告されている．⁽²⁻⁵⁾⁽²⁻⁶⁾⁽²⁻⁷⁾⁽²⁻⁸⁾⁽²⁻⁹⁾⁽²⁻¹⁰⁾ その一方で，体格□12(外径 $\phi 10$)以下におけるハルバツハ磁石配列による研究成果の公表は無い．

本研究の体格□12の円筒形リニア同期モータにおいて，これまでに述べた通り，最も高推力が期待され，且つ第1章で示した推力定数2乗密度 $G=0.028 \times 10^6$ [$\text{N}^2/(\text{Wm}^3)$]を達成する事が期待されるのは，固定子にコアを設け，可動子をハルバツハ磁石配列で構成するコア付HLSTMである．また4種類のリニア同期モータを検討する事で，高推力化の観点のみに留まらず，固定子コアレス及び固定子コア付夫々におけるハルバツハ磁石配列による効果，固定子コアの有無による効果を比較する事が可能となる．

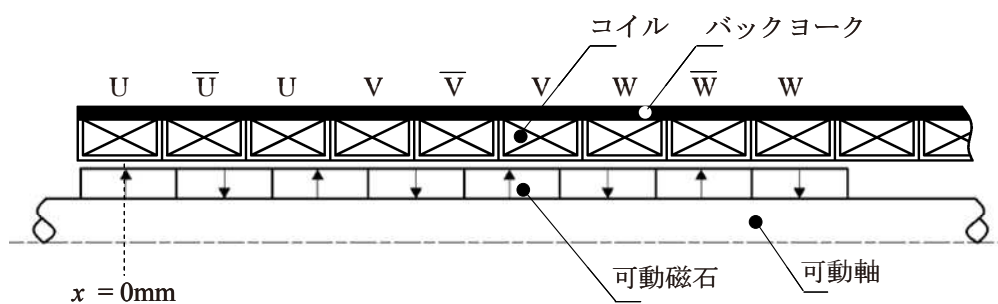
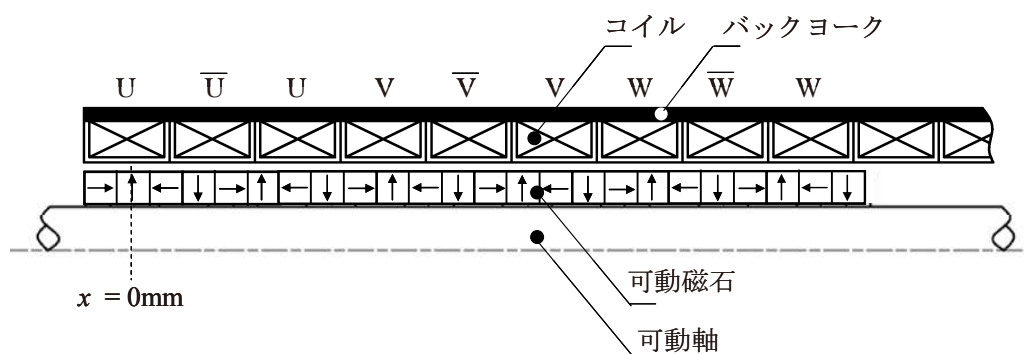
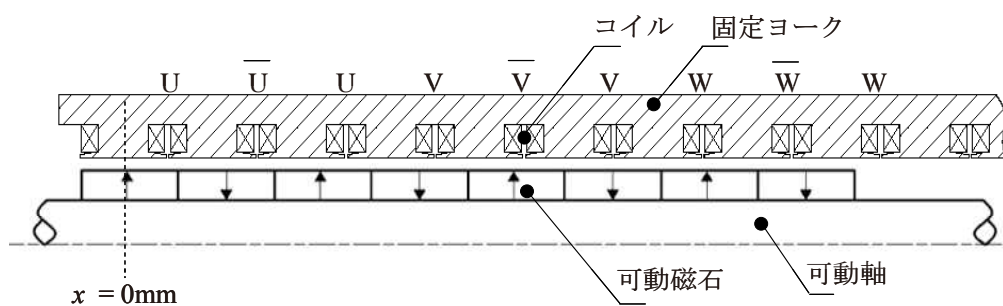
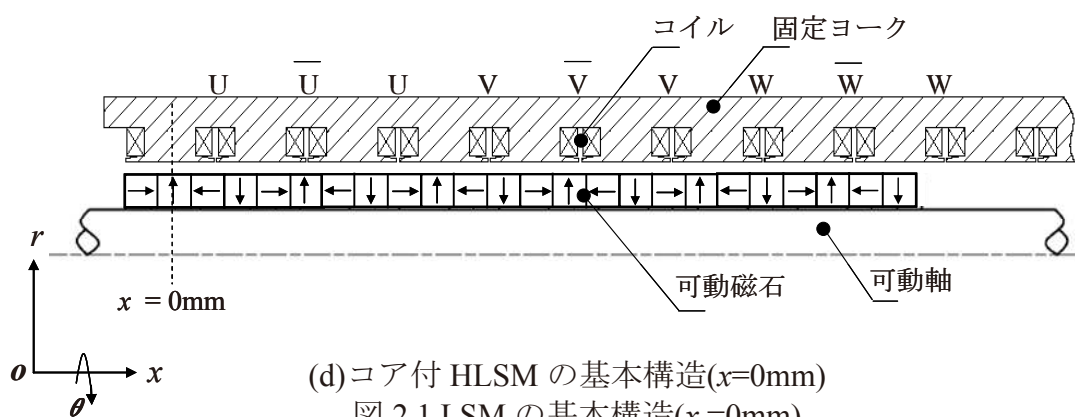
更には円筒形リニア同期モータを表2.1の分類で考えた時，スロットレスモータの分類であるコアレスHLSTM，コア付円筒形リニアモータの分類であるコア付HLSTMにおいて，ハルバツハ磁石配列をリニアモータ体格□12（外径 $\phi 10$ ）で実現する事にも特徴を有する．

表 2.2 LSM の分類と特徴

名称	固定子コア	可動子	特徴
コアレスRLSM	無	ラジアル磁石配列	製作が容易 コアによるコギング力無し
コアレスHLSM	無	ハルバツハ磁石配列	ラジアル磁石配列よりも 高推力
コア付RLSM	有	ラジアル磁石配列	コアによる高推力化 コアによるコギング力有り
コア付HLSM	有	ハルバツハ磁石配列	ラジアル磁石配列よりも 高推力

2.1.3 LSM の基本構造

図 2.1 に、今回の LSM の基本構造を示した。コアレス LSM の固定部は巻線ボビンとバックヨークからなり、可動部は可動磁石と可動軸から構成されている。可動磁石は可動軸外周に配置され、可動磁石の着磁方向の違いにより、ラジアル磁石配列(コアレス RLSM)、ハルバツハ磁石配列(コアレス HLSM)となっている。コイルは巻き線ボビンに配置されている。コアレス RLSM の可動磁石は、ラジアル方向に磁化された N 極と S 極の磁石が交互に 8 極分配置されている。コアレス HLSM では着磁方向が 90° 異なった磁石が交互に配置される構成となっている。コア付 LSM の固定部はコイルと固定ヨークからなり、可動部は可動磁石と可動軸から構成されている。可動磁石は可動軸外周に配置され、可動磁石の着磁方向の違いにより、ラジアル磁石配列(コア付 RLSM)、ハルバツハ磁石配列(コア付 HLSM)となっている⁽²⁻¹¹⁾。コイルは固定ヨーク内に配置されている。固定ヨークは無方向性電磁鋼板を用いる。コア付 RLSM の可動磁石は、ラジアル方向に磁化された N 極と S 極の磁石が交互に 8 極分配置されている。コア付 HLSM では着磁方向が 90° 異なった磁石が交互に配置される構成となっている。

(a) コアレス RLSM の基本構造($x=0\text{mm}$)(b) コアレス HLSM の基本構造($x=0\text{mm}$)(c) コア付 RLSM の基本構造($x=0\text{mm}$)(d) コア付 HLSM の基本構造($x=0\text{mm}$)図 2.1 LSM の基本構造($x=0\text{mm}$)

2.1.4 ヨーク内の磁束の流れ

図 2.2(a)に、コア付 RLISM を元に、電流が流れない際の磁束の流れを示した。可動磁石の磁束は、エアギャップ、固定ヨークに流れ可動磁石に戻る。この磁束がコギング力の要因となる。図 2.2(b)に、コイルに電流を流した時の磁束の流れを示した。電流を流すと、可動磁石の磁束は電流による磁束と共に固定ヨーク内、エアギャップ、可動軸に流れる。ギャップに流れる磁束が大きくなり、ストローク方向に推力が発生する。印加電流の向きを切り替える事で、可動部の移動方向を左右に制御できる⁽²⁻¹²⁾。

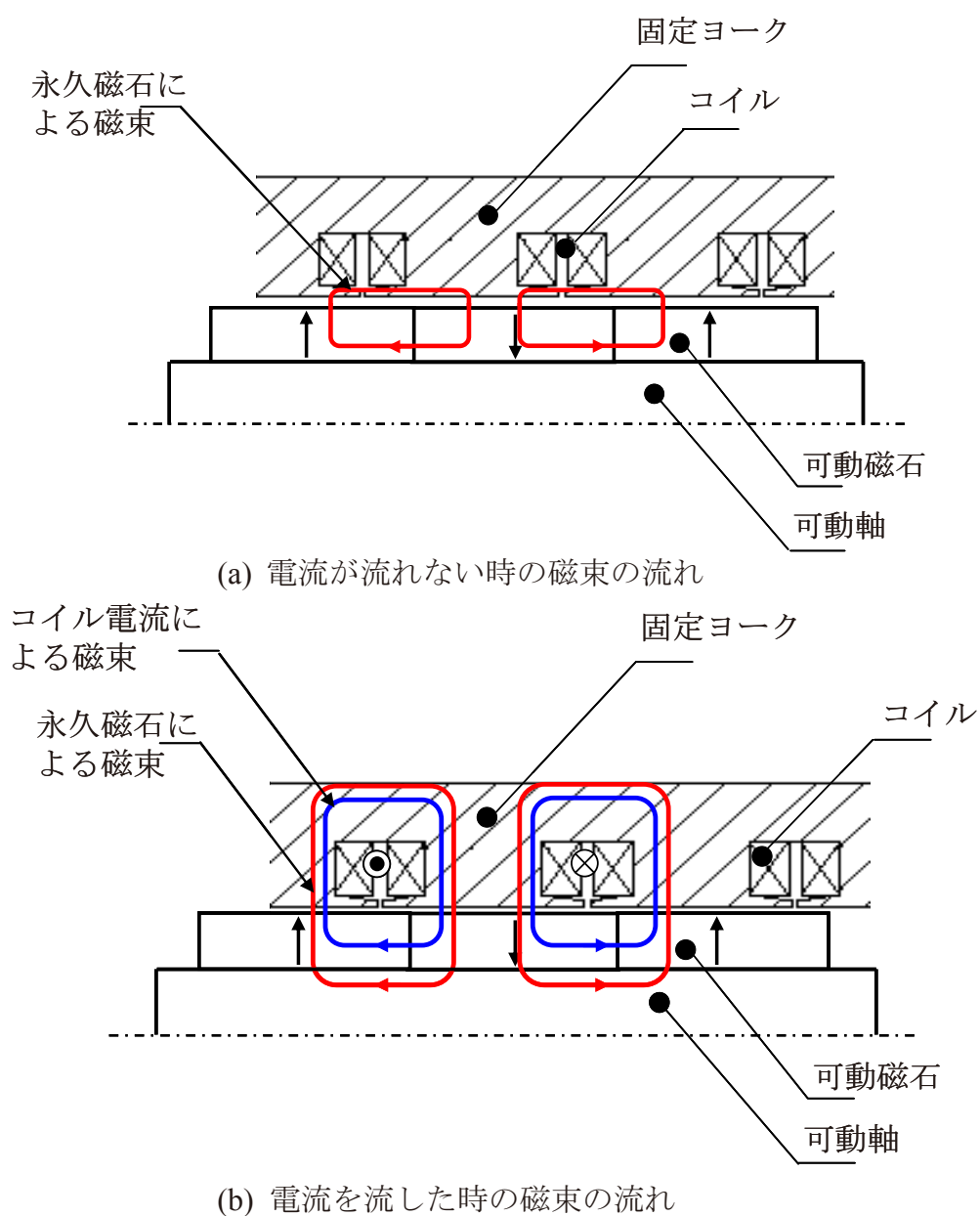


図 2.2 可動磁石及びコイルによる磁束の流れ($x=0\text{mm}$)

2.1.5 LSM の動作原理

図 2.3 にコア付 RLSM を元に，電流を流した時の推力発生原理を示した．LSM の推力は吸引力と反発力により発生する⁽²⁻¹³⁾⁽²⁻¹⁴⁾．コイルに電流を流すと，各磁極が NS となり，図のように吸引力と反発力によって，左方向の推力が発生する．LSM の推力はマクスウェルの方程式によって算出できる．ギャップの磁束密度は有限要素法により計算し，マクスウェルの応力式を用いて推力を算出した．LSM の推力 f は式(2.1)で与えられる． B_θ と B_x の値は，エアギャップにおける値である⁽²⁻¹⁵⁾．

$$f = \int_{A_s} \frac{B_\theta B_x}{\mu_0} dA_s \quad [\text{N}] \quad (2.1)$$

A_s : 積分した領域の断面積[m²],

B_θ : ギャップ部分の磁束密度の θ 成分[T],

B_x : ギャップ部分の磁束密度の x 成分[T]

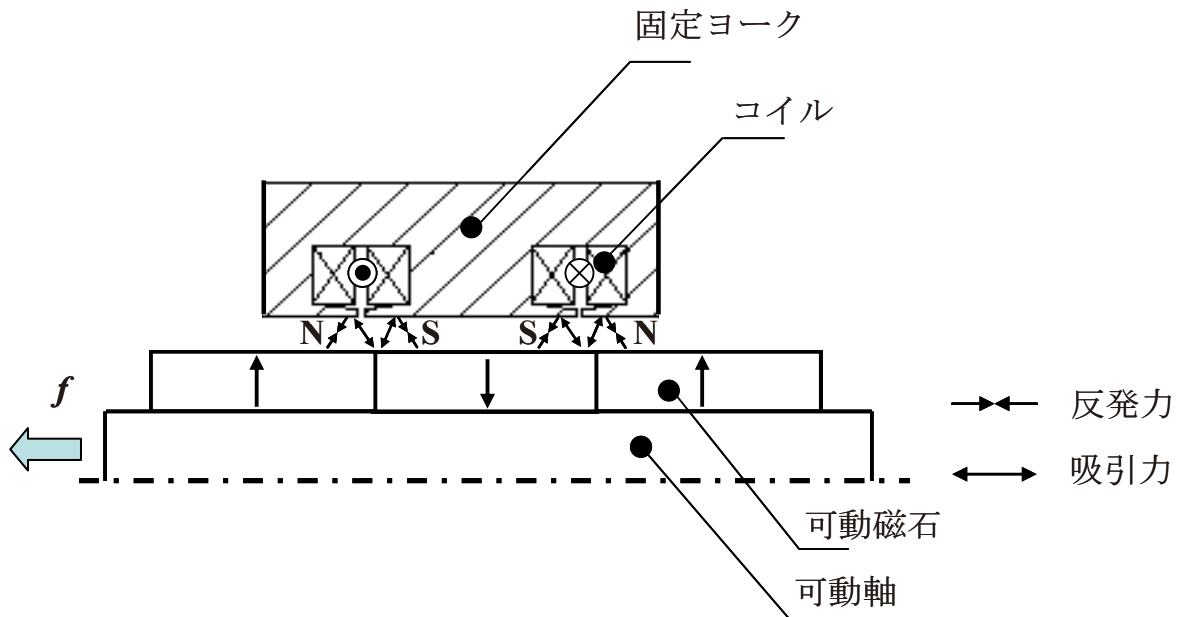


図 2.3 LSM の推力発生原理

図 2.4 に，コイル電流タイミングチャート及び可動子の動作を示した．各コイルに流す電流のタイミングチャートを図 2.4(a)に示した．可動子の磁極(N 極，S 極)は可動磁石によって作られる．また，固定子の磁極はコイル電流によって作られる．電流の流れる向きを変えると固定子の磁極は N 極から S 極に変換できる．図 2.4(b)には，二相励磁した場合の可動子の動作を示した．時間 A の時，U

相と V 相が励磁している．推力は U 相と V 相の磁極により吸引力が発生し，各磁極に同じ方向の推力が働く．時間 B の時には，U 相と W 相が励磁している．推力は U 相の吸引力と W 相の反発力により発生している．コイル電流を制御することによって，固定子の磁極変化と可動子の磁極変化が同期して移動するため，可動部が移動する．基本的な動作原理はコア付 HLSM，コアレス RLSM 及びコアレス HLSM も同じである．

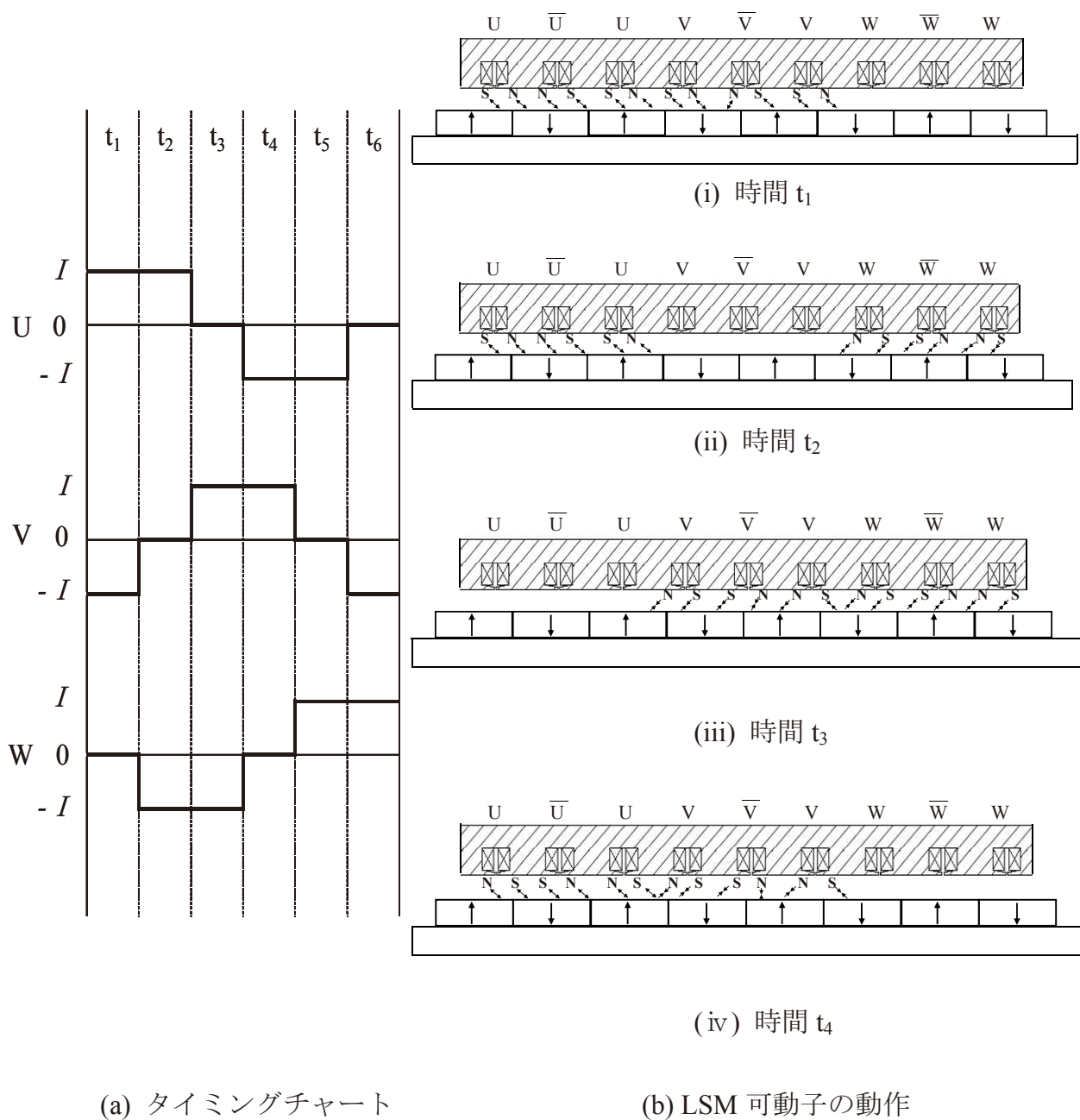


図 2.4 コイル電流タイミングチャートと可動子の動作

2.1.6 磁束線図の比較

図 2.5 にコア付 RLSM とコア付 HLSM を例に磁束の流れを示した⁽²⁻¹⁶⁾⁽²⁻¹⁷⁾. コア付 RLSM では磁石から発生した磁束がギャップを介して固定子を通り, 可動子に戻る. (b)のコア付 HLSM も同様に, 可動子から発生した磁束がギャップを介して固定子を通り可動子に戻るが, 大きく異なるのはコア付 HLSM では磁束は可動部内側に流れることなく, より多くの磁束が固定子に流れる. 軸材を S45C などの磁性体とすると磁束が可動子内部に回り, 固定子へ鎖交する磁束は少なくなる. 非磁性体の軸を用いたハルバツハ磁石配列構成は磁束が可動子内部で還流することを防ぐ.

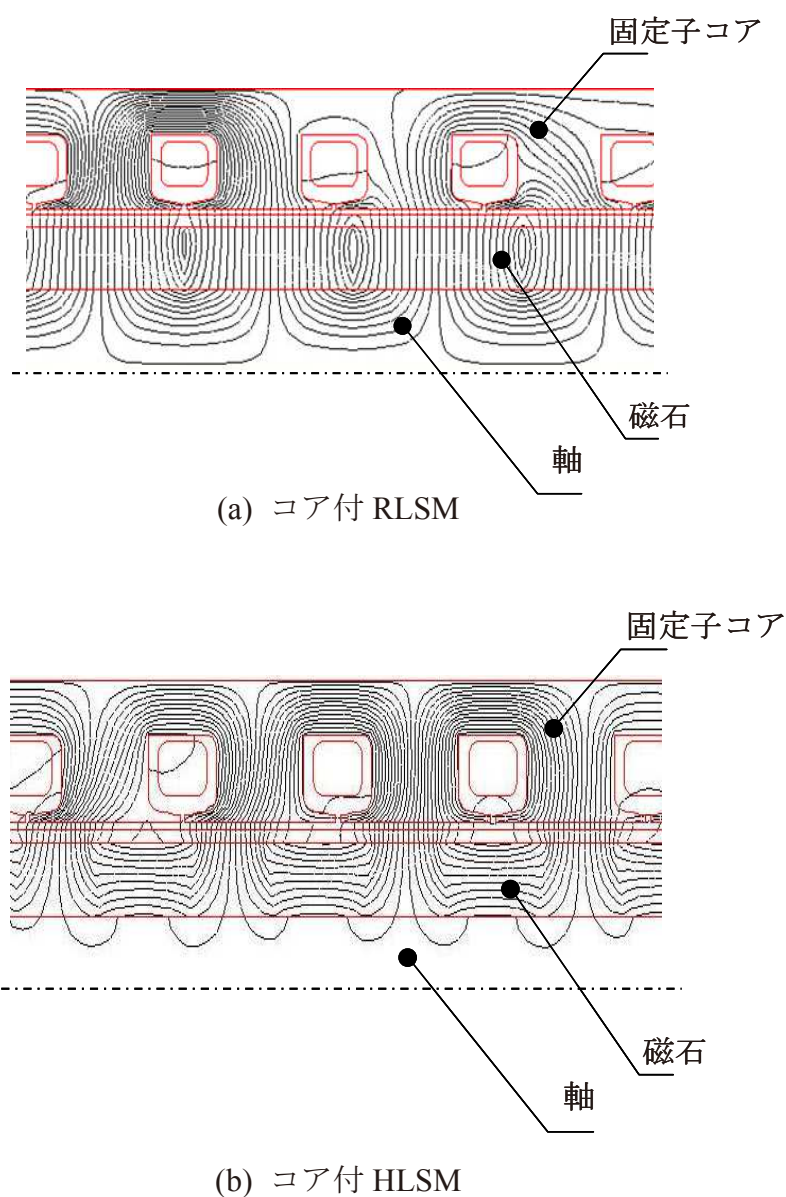


図 2.5 コア付 LSM の構造と磁束線図の比較

2.1.7 リニアセンサ

円筒形リニア同期モータの駆動・位置検出においては、ホール素子内蔵方式や、C社のシャフトモータに代表されるような、磁極位置自動検出機能によりドライバが自動的にリニアモータを作動させ位置検出を推定する方式や、ラインドライバ出力のインリメンタル方式のものが使用される。ここに事例を示す。

(1)ホール素子内蔵方式

磁石から発生する磁束を利用して位置検出をする。図 2.6 に示すように、ホール素子は磁束密度に比例した出力を得ることができる。円筒型リニア同期モータにおいては、コイル側にホール素子を配置し、磁石側の磁束密度の変化に比例した出力を得る。

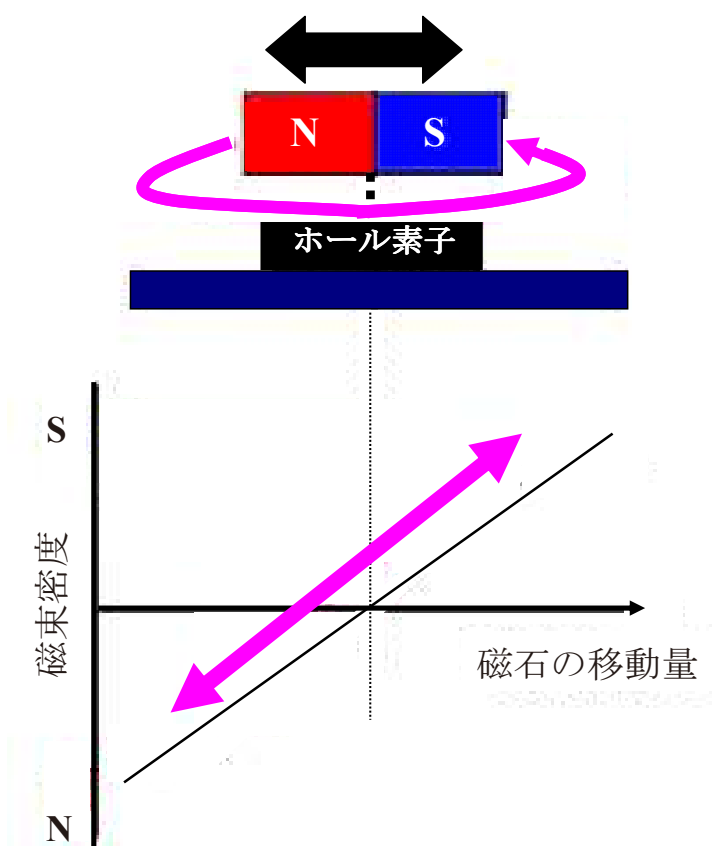


図 2.6 ホール素子と磁束密度

(2) 外付けリニアセンサスケール方式

図 2.7 に外付けリニアセンサスケール方式のシステム構成例を示す. 軸とケーシングをブラケットで固定し, ガイドに配置する仕組みである. 図 2.8(a)に示すように, スケールには帯状になったプラスチックマグネット部に磁気格子縞(N 極と S 極の繰り返しストライプ状に着磁)となっており, ヘッドがこの磁気格子縞を読み取る. 例えば, 図 2.8(b)に示すようなインクリメンタル用の 90° 位相差の A 相, B 相を出力する⁽²⁻¹⁸⁾.

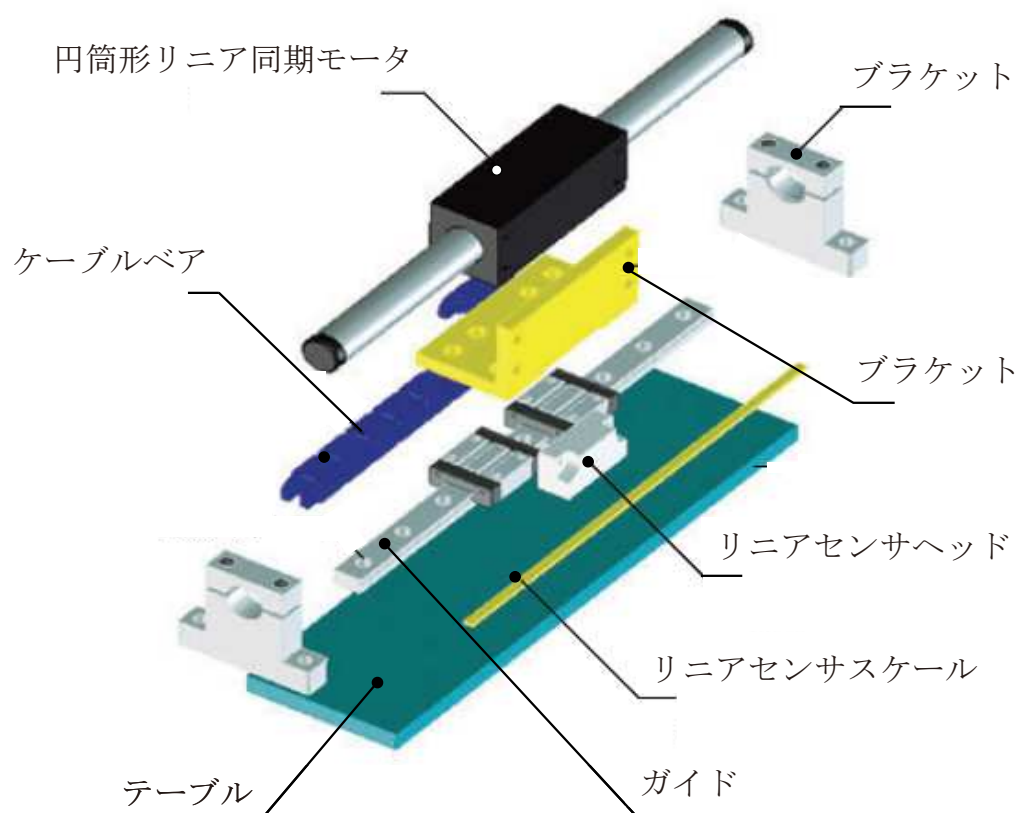
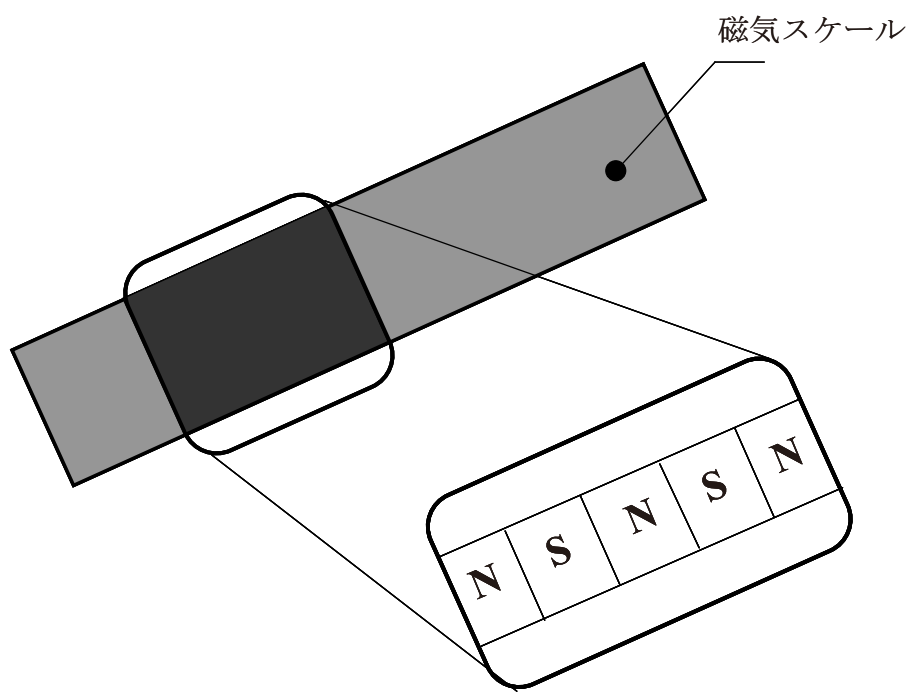
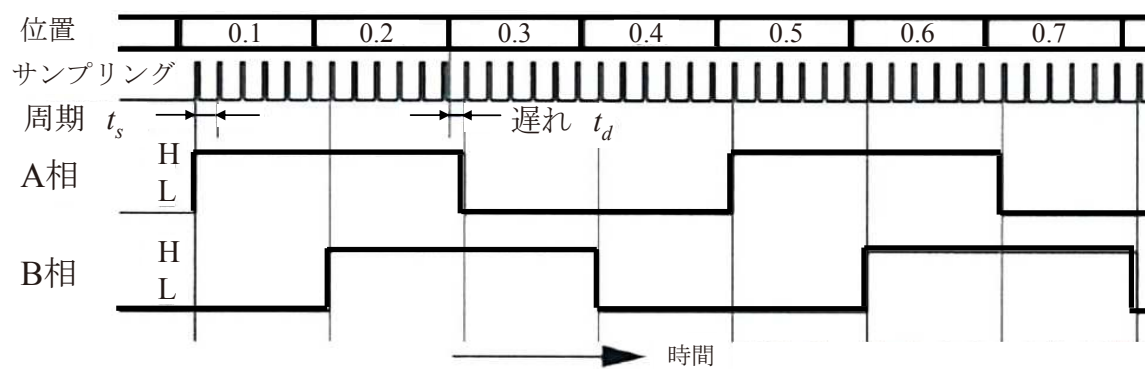


図 2.7 外付けリニアセンサスケール方式のシステム構成例



(a) 磁気スケール



(b) ヘッドによる出力

図 2.8 ラインドライバ出力のインリメンタル方式

(3)外付けスリーブセンサ方式

スリーブセンサの構成を図 2.9 に示す．スリーブセンサは同軸貫通型であり⁽²⁻¹⁹⁾⁽²⁻²⁰⁾．高周波磁界を発生する細いコイル(プローブ)と，プローブの外周を覆う円筒状の金属(スリーブ)と，プローブとスリーブ間で作用する電磁結合の強弱を検出するディテクタとで構成されている．高周波磁界を発生するプローブの外周にスリーブを被せる事で，プローブとスリーブ間に電磁結合が作用し，スリーブを移動させてプローブ上でスリーブが占める割合を変化させる事で，電磁結合は強弱する．ディテクタは，プローブに供給している高周波電流の変化から電磁結合の強弱を検出して，スリーブの移動変位に比例したアナログ信号を出力する．

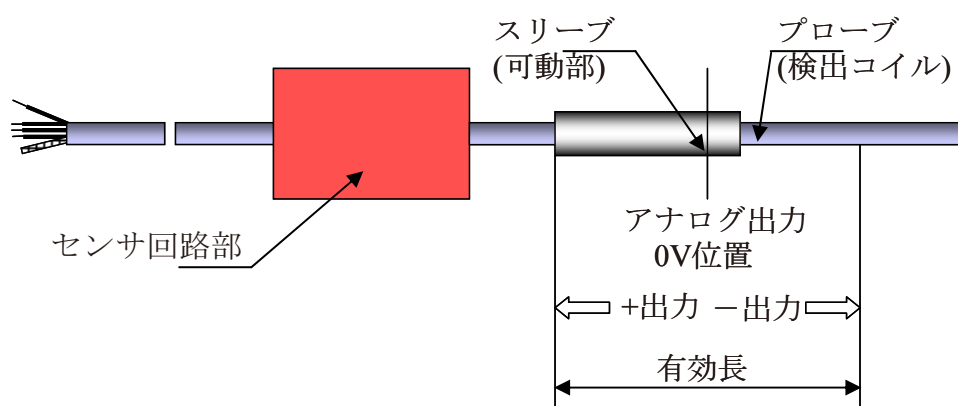


図 2.9 スリーブセンサの構成

本研究ではリニアセンサの開発は含まないが，動作確認のみを行うこととした．動作確認については，(3)に述べたスリーブセンサを使用する．これは，リニアセンサスケール+リニアセンサヘッドに比べ格安であった事と，今回の円筒形リニア同期モータに搭載できるサイズのホール素子が無く，特注生産になる故，高価であった事が理由である．

具体的には，マコメ研究所スリーブセンサ：DT-800-L40 を使用し，LSM を駆動させる．表 2.3 にその仕様を纏めた．出力は-2V～+2V の電圧出力となっており，スリーブのプローブへの挿入側側面が検出位置となる．プローブの中心位置で 0V，スリーブがケース方向に移動した時には「-」出力，プローブ先端方向に移動した時には「+」出力となる．

表 2.3 スリーブセンサの仕様

項目[単位]	数値	
供給電源電圧[V]	DC24V±5%	
消費電流[mA]	20	
出力電圧[V]	-2～+2	
出力直線性[%]	±1	
出力インピーダンス[kΩ]	10	
応答周波数[Hz]	300	
配線	赤	DC15V
	黒	0V
	緑	電圧出力 +
	白	電圧出力 -
	シールド	0Vへ接続

2.2 リニアモータの特性評価指標と設計概論

2.2.1 特性評価指標

図 2.10 に、リニアモータの性能と特性値を示した⁽²⁻²¹⁾。リニアモータの仕様は特性値、性能、寸法の 3 種類の量から成り立っている。性能は仕様の限界を表す定格値及びピーク値である。特性値は、推力定数、抵抗、インダクタンス、質量である。リニアモータの特性値は、磁氣的要因(K_f, L)、機械的要因(m)、電氣的要因(R)の 3 つに分類される。そして寸法は、外形寸法、重量、ギャップ面積である。これらの特性を正規化したものとして、電氣的時定数、機械的時定数、モータ定数、推力定数 2 乗密度などが挙げられる。これらの評価方法はリニアモータの推力特性、応答特性などの特性を定量的に表現できる評価指標である。

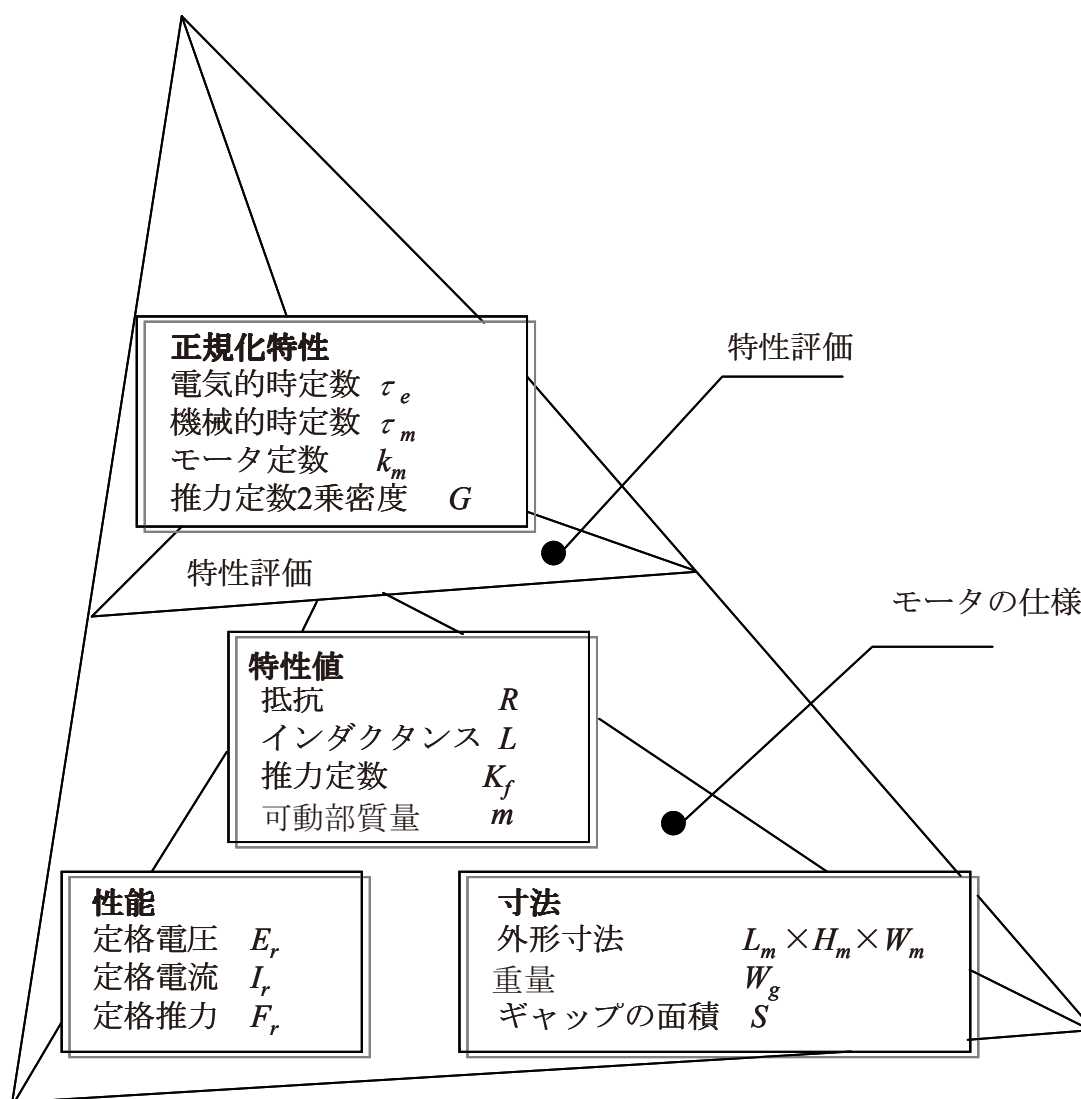


図 2.10 リニアモータの性能と特性値

表 2.4 に主な評価指標の物理的な意味をまとめた^{(2-22)(2-23)(2-24)(2-25) (2-26)(2-27)}.

表 2.4 主な評価指標の物理的意味

項目 [単位]	記号	式	物理的意味
推力定数 [N/A]	K_f	$K_f = \frac{F}{I} \quad (2.2)$ F : 推力 [N], I : 電流 [A]	推力は, 電流に対する線形領域において1次式によって近似され, その傾きが推力定数 K_f として式(2.2)で与えられる.
電氣的時定数 [ms]	τ_e	$\tau_e = \frac{L}{R} \quad (2.3)$ L : コイル インダクタンス [mH], R : コイル抵抗 [Ω]	コイルに電圧を印加した時に, コイル電流が最大値の62%に達するまでの時間である. 電氣的時定数は式(2.3)で与えられる.
モータ定数 [N/ \sqrt{W}]	K_m	$K_m = \frac{F}{\sqrt{P}} \quad (2.4)$ P : 入力電力 [W]	モータ定数は, 推力を銅損の平方根で割ったものと定義され, 式(2.4)で与えられる. モータ定数を大きくすることは, モータの入力と出力の比を増加させる.
(推力/コギング力)比 [%]	C_f	$C_f = \frac{F}{F_c} \quad (2.5)$ F : 推力 [N], F_c : コギング力 [N]	コギングに対する推力の比率
推力定数2乗密度 [N ² /(Wm ³)]	$G \times 10^6$	式(1.1)による	第1章1.2による

チップマウンタや半導体装置の小型化が進んでいることを第1章で述べたように, 小型, 高推力, 省エネルギーのリニアモータを評価するために, 推力定数2乗密度 G は重要な評価指標となる. この G を大きくするために, 2.1.1 項でも述べたコア付 HLISM に採用するハルバッハ磁石配列と固定子コア付構造は効果的であると考えた. 1 項でも述べたとおり, 本研究の円筒形のリニアモータにおいては, より小型, 高推力を達成しつつ, $0.028 \times 10^6 [\text{N}^2/\text{Wm}^3]$ 以上の推力定数2乗密度の値を持つ事が目標である. その為にも G の増減に大きく起因してくる推力定数 K_f ならびに, モータ単位体積あたり (磁気回路部分) のモータ定数 K_m を大きくする必要がある.

2.2.2 EMF における歪率

本項では歪率について述べる．歪率は EMF(誘起電圧)に含まれるが，EMF は磁束が電機子巻線に鎖交することで誘起される電圧である．EMF 中の高調波成分は推力リップルの要因となる．推力リップルは永久磁石の磁気吸引力によるものと，磁束，電流の相互作用によるものがあり，主要因は下記の 3 つである．

- ① コギングトルク(磁気リラクタンس変化による)
- ② 偏芯
- ③ 電流アンバランス

推力リップルがあると加速度，速度，現在位置も変動し，この変動は位置センサーを介してフィードバックされ，振動が増幅されることとなる．即ち制御性の悪化となる⁽²⁻²⁸⁾⁽²⁻²⁹⁾⁽²⁻³⁰⁾．また，電流と推力との線形性についても，リニアモータの推力ゲインが変わることとなり，サブミクロン以上の高精度制御が要求されるような場合では，微振動発生の原因となる．

推力リップルは，空間高調波と電磁誘導推力成分ならびにギャップにおけるパーミアンスの変化と界磁磁極間のエネルギー変化によるものである．

コギング力については，式(2.6)に示す通り，ギャップのパーミアンス変化があることでギャップ磁気エネルギー W_g が可動子位置(角度) θ に対して変化するものである．すなわち W_g における θ に対する微分で求められる．またギャップ磁束密度 B_g の2乗に比例する為，高性能磁石(残留磁束密度の高い)を用いるとコギング力が増加する側面もある．

$$F_c = \frac{D_g}{2} \frac{\partial W_g}{\partial \theta} = \frac{D_g}{4\mu_0} \frac{\partial B_g^2}{\partial \theta} \quad (2.6)$$

ここに，

D_g : ギャップ径[mm]

EMF について式(2.7)に示す．高調波次数を n とした時の EMF は，

$$E(n) = v \Psi = v K_w \Phi_m = v K_w K_\phi B_m S_g = v \{K_p(n) K_d(n) K_\phi(n)\} B_m S_g \quad (2.7)$$

で表される．

ここに,

Ψ	鎖交磁束数(Wb),
v	速度(m/s),
Φ_m	磁束(Wb),
B_m	磁束密度(T),
S_g	ギャップ磁束面積(mm ²),
$K_\phi(n)$	界磁磁束係数,
$K_p(n)$	短節係数,
$K_d(n)$	分布係数

次に推力リップルについて, 推力方程式を導出する⁽²⁻³¹⁾.
各相の電機子電流は(2.8), ギャップ磁束は(2.9)で示される.

$$\begin{aligned}
 i_u &= \sum_{n=1}^{\infty} I_a \sin\{nvt\} & [A] \\
 i_v &= \sum_{n=1}^{\infty} I_a \sin\left\{n\left(vt - \frac{2}{3}\pi\right)\right\} & [A] \\
 i_w &= \sum_{n=1}^{\infty} I_a \sin\left\{n\left(vt - \frac{3}{4}\pi\right)\right\} & [A]
 \end{aligned} \tag{2.8}$$

ここに,

I_a 電機子電流の振幅値

$$\begin{aligned}
 \Phi_u &= \sum_{n=1}^{\infty} \Phi_m(n) \cos\{n(vt - \theta)\} & [\text{Wb}] \\
 \Phi_v &= \sum_{n=1}^{\infty} \Phi_m(n) \cos\left\{n\left(vt - \frac{2}{3}\pi - \theta\right)\right\} & [\text{Wb}] \\
 \Phi_w &= \sum_{n=1}^{\infty} \Phi_m(n) \cos\left\{n\left(vt - \frac{3}{4}\pi - \theta\right)\right\} & [\text{Wb}]
 \end{aligned} \tag{2.9}$$

ここに,

Φ_m ギャップ磁束の振幅値

故に推力方程式は,

$$\begin{aligned}
 F(n) &= \frac{D_g}{2} K_w W(i\Phi) \\
 &= \frac{D_g}{2} K_w W \left[\sum_{n=1}^{\infty} I_a \sin\{nvt\} \sum_{n=1}^{\infty} \Phi_m(n) \cos\{n(vt - \theta)\} + \sum_{n=1}^{\infty} I_a \sin\left\{n\left(vt - \frac{2}{3}\pi\right)\right\} \right] \\
 &\quad \sum_{n=1}^{\infty} \Phi_m(n) \cos\left\{n\left(vt - \frac{2}{3}\pi - \theta\right)\right\} + \sum_{n=1}^{\infty} I_a \sin\left\{n\left(vt - \frac{4}{3}\pi\right)\right\} \sum_{n=1}^{\infty} \Phi_m(n) \cos\left\{n\left(vt - \frac{4}{3}\pi - \theta\right)\right\}
 \end{aligned} \tag{2.10}$$

となり, $n=1$ (基本成分)としては

$$F = \frac{3}{4} D_g K_w I_a \Phi_m \sin \theta \quad [\text{N}] \tag{2.11}$$

となる.

次に歪率について示す. 歪率は波形歪みの程度を表すものであるが, 本解析においても, 波形に含まれる全高調波成分($V_2 \sim V_n$)の実効値の総和と基本波(V_1)の実効値の比として定義する⁽²⁻³²⁾⁽²⁻³³⁾⁽²⁻³⁴⁾.

この時の歪波電圧を,

$$v(t) = V_o + \sum_n V_n \sin(n\omega t - \theta_n) \tag{2.12}$$

で表し, その実効値 $|V|$ を,

$$|V| = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T v^2(t) dt} \tag{2.13}$$

$$|V| = \sqrt{V_o^2 + |V_1|^2 + |V_2|^2 + |V_3|^2 + \dots} \tag{2.14}$$

とする. また高調波歪率は,

$$D = \sqrt{\frac{|V_2|^2 + |V_3|^2 + \dots}{|V_1|^2}} \tag{2.15}$$

で表す.

ここで, V_1 は基本波, V_2 は2次高調波, V_3 は3次高調波である.

2.3 LSM のイニシャル設計と目標仕様

2.3.1 設計制約

2.1 項で述べた 4 種類の LSM における詳細設計に入る前段階として，設計制約を纏める必要がある．はじめに産業分野におけるニーズに依るものから，制約条件 1 として表 2.5 に纏めた．

表 2.5 制約条件 1

項目	記号	数値
外形寸法	mm ³	12×12×97
ストローク	mm	±30
固定子外径	mm	φ 10
スロット数	—	18
可動子軸径	mm	φ 3
極数	—	8

次に，製作面(特性面)での実現性を整備する必要がある．1.3 項でも述べたが，例えばリング磁石の着磁の問題等によって，計算上では目標とする仕様を達成する事が出来ても，製作面では未達成となる事も有り得る．

先の表 2.5 において，寸法上の制約が固まっている為，この制約を基に製作面での問題を整備した．整備の結果を制約条件 2 として表 2.6 に纏める．以上の制約条件を元に，イニシャル設計に移行する．

表 2.6 制約条件 2

項目		条件
軸		$\phi 3\text{mm}$ 以上
磁石	寸法	厚さ 0.5mm 以上
		内径 $\phi 3\text{mm}$ 以上
	残留磁束密度	上記条件であれば 1.34T ※長手寸法により変動
巻線ボビン及び巻線技術		厚さ 0.5mm 以上
		内径 $\phi 3\text{mm}$ 以上
		上記条件にて、手巻・ 自動巻線ともに可能

2.3.2 イニシャル設計と目標仕様

2.3.1 項の制約条件を元に、4 種類の LSM について、FEM を用いてイニシャル設計を行った。この時点では、各部寸法の詳細計算は行わず、あくまで仕様値の見積もり段階である。イニシャル設計の結果では、コア付 HLISM であれば、1.2 項で述べた推力定数 2 乗密度の目標値を達成できる見込みがたった為、詳細設計に移行する。

表 2.7 に、イニシャル設計の結果を LSM の目標仕様値として纏めた。コアレスではコアレス HLISM のハルバツハ磁石配列にする事で、コアレス RLISM(ラジアル磁石配列)より 20%の推力向上、コア付ではコア付 HLISM(ハルバツハ磁石配列)にする事でラジアル磁石配列より 15%の推力向上の見積もりとなった。

コアレスでは理論的にコギング力はゼロの為、コギング力及び推力／コギング力比は目標仕様値の対象外とした。コア付では、2.2.2 項で述べた歪率の目標値を規定し、歪率の低減についても検討することとした。

目標である推力定数 2 乗密度 $G=0.028 \times 10^6 [\text{N}^2/(\text{Wm}^3)]$ については、コア付

HLSM で実現する事とする．尚，推力の定義であるが，定格推力 F_r は定格電流印加時における連続定格の値であり，最大推力 F_{max} は最大電流印加時における短時間定格の値である⁽²⁻³⁵⁾．

またコギング力の詳細については4章で述べるが，コギング力は推力リップルに影響する為，推力リップルを小さくする為にはコギング力を小さくする必要がある．一方で高推力密度化を目指す上で，ギャップ部分に高磁気ベクトルポテンシャルを作る場合，電機子スロット開口部の磁気パーミアンス変化を強く受けてコギング力は増加する為，トレードオフの関係となる．コア付においては高推力密度化を優先しつつ，高推力密度化におけるコギング力の低減について検討する．

表 2.7 LSM の目標仕様値

項目[単位]	記号	コアレス RLSM	コアレス HLSM	コア付 RLSM	コア付 HLSM
定格推力[N]	F_r	1.05	1.27	1.30	1.50
最大推力[N]	F_{max}	3.15	3.81	3.90	4.50
推力定数[N/A]	K_f	1.05	1.27	2.60	3.00
モータ定数[N/ \sqrt{W}]	K_m	0.83	1.01	2.20	2.54
推力定数2乗密度 [N ² /(Wm ³)]	$G \times 10^6$	0.019	0.023	0.024	0.028
コギング力[N]	F_c	—		0.03	0.03
(推力／コギング 力)比[%]	C_f	—		130	150
歪率[%]	D	—		3以下	

第2章の参考文献

- (2-1) 三木プーリカタログ：円筒型リニアモータリニアシャフトドライブ,
(2015.1 現在),pp.547-569,2013.
- (2-2) 安川電機カタログ：リニアサーボドライブ Linear Σ シリーズ Σ -Stick(2015.1 現在),pp.2-39,2011.
- (2-3) ジイエムシーヒルストンカタログ：Shaft Motor Solution(2015.1 現在),
pp.1-3,2014.
- (2-4) 特許庁ホームページ：<http://www.jpo.go.jp>,2014.
- (2-5) Huisheng Liang,Zongxia Jiao,Liang Yan,Longfei Zhao,Shuai Wu,Yang Li:Design and analysis of a tubular linear oscillating motor for directly-driven EHA pump, pp.107-118, 2014.
- (2-6) 三島将行, 平田勝弘, 石黒浩：アンドロイド用リニアアクチュエータのハルバッハ磁石配列に関する考察, 電気学会リニアドライブ研究会資料, LD07-15,pp.73-76, 2007.
- (2-7) 三島将行, 平田勝弘, 石黒浩：有限要素法によるアンドロイド用同期モータの動特性解析, 電気学会リニアドライブ研究会資料, LD07-40, pp.45-48,2007.
- (2-8) 福正博之, 山本裕介, 古関隆章：Halbach 永久磁石を使用した二関節駆動用アクチュエータの概念設計と基本特性の評価, 電気学会全国大会講演文集, pp.131, 2006.
- (2-9) 福正博之, 山本裕介, 古関隆章：二関節筋電磁アクチュエータの磁気回路設計と静推力特性, 第18回「電磁力関連のダイナミクス」シンポジウム SEAD18 論文集 pp.19-22, 2006.
- (2-10) 福田貴之,奥田泰弘,大森裕樹,森下明平：円筒型ハルバッハリニア同期モータの検討: 電気学会リニアドライブ研究会資料,LD17-20,2007.

- (2-11) K.Nakaiwa, K.Tashiro, H.Wakiwaka:Thrust Characteristic Comparison of Interior Magnet Type Pencile size Cylinder Linear Motor, Journal of the Japan society of applied electro magnetics and mechanics, pp.509-512, 2011.
- (2-12) Koichi Nakaiwa, Hiroyuki Wakiwaka: Analysis of Distortion Factor of Three Phase Linear Synchronous Motor, PIERS 2013 Taipei Proceedings , pp552-555, 2013.
- (2-13) Norhisam Misron : 磁石埋込形高性能リニア同期モータの設計に関する研究,信州大学博士学位論文, p13,2003.
- (2-14) 江口諒,田原俊司,小川幸吉:片側式と同じモータ長をもつ両側式 PMLSM の特性の検討,電気学会九州支部連合大会論文集,p380,2010.
- (2-15) 山田一:産業用リニアモータ,工業調査会,p24,1981.
- (2-16) 砂川重信:電磁気学,培風館,p141-143,1988.
- (2-17) 磁気アクチュエータ調査専門委員会編:リニアモータとその応用,電気学会,pp.179-191,1984.
- (2-18) 株式会社マコメ研究所: リニアスケールマコメジャー (2015.1 現在), pp3-7,2013.
- (2-19) 亀若真一:非接触磁気リニアエンコーダとその応用, MECHATRONICS 会誌,pp.27-29,1990
- (2-20) 株式会社マコメ研究所:一体型スリーブセンサ DT-800 仕様書, (2015.1 現在)pp.5-10,2013.
- (2-21) Norhisam Misron : 磁石埋込形高性能リニア同期モータの設計に関する研究,信州大学博士学位論文, p85,2003.
- (2-22) 真田雅之,池見健,森本茂雄,武田洋次:磁極表面積の拡大による VR 形リニアモータの特性改善,電気学会論文誌 D,123 巻 7 号 pp.878-879,2003.

- (2-23) 電気学会 リニアドライブシステムの用語等再検討調査専門委員会編：リニアドライブ技術とその応用に関わる用語，電気学会技術報告第911号，p.36,2003.
- (2-24) 中野道雄，美多勉：制御基礎理論,昭晃堂 pp.59-60,1992.
- (2-25) 長坂長彦：制御用小型電動機－最新の進歩と展望－，電気学会誌，110巻3号，pp.195--202,1990.
- (2-26) 水野勉，宮下利仁，矢島久志，唐玉王其，山本秀夫，渋谷浩洋，山田一：円筒状コイル可動形リニア直流モータの推力／入力比に関する考察，電気学会論文誌D,Vol.118-D,No.4,pp.444-449,1998.
- (2-27) 電気学会 リニアドライブシステムの用語等再検討調査専門委員会編：リニアドライブ技術とその応用に関わる用語，電気学会技術報告第911号，p.36-38,2003.
- (2-28) 宮本恭祐：永久磁石同期機における高効率化と実用化に関する研究，長崎大学博士学位論文，pp.116-117,2014.
- (2-29) Nan-Chyuan Tsai, Chao-Wen Chiang, "Design and analysis of magnetically drive actuator applied for linear compressor", Mechatronics 20The Science of Intelligent machines, pp.596-603 ,2010.
- (2-30) 比田一，富樫仁夫，上山健司，井上征則：永久磁石同期モータの空間高調波を考慮した新しいトルク推定方法とトルクリプル低減，電気学会論文誌D, Vol. 130,No.9,pp. 1051-1058, 2010.
- (2-31) 宮本恭祐：永久磁石同期機における高効率化と実用化に関する研究，長崎大学博士学位論文，pp.78-80,2014.
- (2-32) 野中作太郎，小川幸吉：高速リニア誘導モータのスロット高調波と端効果，電気学会論文誌D, Vol. 108,No.6,pp. 598-602, 1988.

- (2-33) Y.Kusumalatha, Ch.Saibabu, and Y.P. Obulesu, "Minimization of Harmonic Distortion of Industrial Motor Drives with Active Power Filter in Paper Mill-a Case Study"Proceeding of the International Multi Conference of Engineers and Computer Scientists 2012 Vol.2,2012.

- (2-34) 石橋文徳, 武政亮, 松下真琴, 西澤隆志, 野田伸一: 集中巻DCブラシレスモータの高調波磁束と電磁力, 電気学会論文誌D, Vol.127, No.12, pp.1231-1237, 2007.

- (2-35) 仲岩浩一: ペンシルサイズ円筒型リニアモータの設計,信州大学修士論文, p12,2008.

第3章 コアレス LSM の設計

3.1 設計条件と定義

3.1.1 設計条件

本設計では2章で述べた設計目標を達成する為に、詳細設計を行った。表3.1に、コアレス LSM の構成材料を示した。バックヨークには S15C を用いた。可動子磁石は、ラジアル配向磁石とアキシヤル配向磁石により、各々の配列を形成している。可動軸は、コアレス RLSM には磁性体である S45C を用い、コアレス HLSM については非磁性体である SUS303 を用いる。

表 3.1 コアレス LSM の構成材料

項目		コアレスRLSM	コアレスHLSM
固定子	バックヨーク	S15C	
	コイル	ポリエステル銅線	
可動子	軸	S45C	SUS303
	磁石	ラジアル配向 Ne-Fe-B N42SH($Br=1.29T$)	ラジアル配向 Ne-Fe-B N42SH($Br=1.29T$)
			アキシヤル配向 Ne-Fe-B N40MA($Br=1.29T$)

以降、コアレス HLSM の設計手順を取り上げる。尚、2種類の磁石配列における可動子の体積は一定である。

3.1.2 設計手法

設計手法としては、パーミアンス法と有限要素法(Finite Element Method)を用いた⁽³⁻¹⁾⁽³⁻²⁾⁽³⁻³⁾⁽³⁻⁴⁾。手順としては、パーミアンス法にて設計を行い、その後 FEM にて詳細設計を行った。FEM は、磁気ベクトルポテンシャル分布を求めたい領域の多数の小さな領域に細分する。細分した小さな領域 1 つを 1 要素として、要素内の磁気ベクトルポテンシャルの計算を全領域について実施することで、解析領域全体の磁場分布を求める手法である。細分化された各要素内の磁気ベクトルポテンシャル分布は、関数で近似して計算する。本研究で採用した Femaph/Femaph3D は、磁気ベクトルポテンシャル A と電気スカラポテンシャル φ を未知数として連立方程式を立て⁽³⁻⁵⁾⁽³⁻⁶⁾⁽³⁻⁷⁾、それを解くものである。A- φ 法による基礎方程式を、式(3.1)(3.2)に示す。

$$\text{rot}(\nu \text{ rot } A) = J_0 + J_e + \text{rot} \nu_m M \quad (3.1)$$

$$\begin{aligned} J_e &= -\sigma \left(\frac{\partial A}{\partial t} + \text{grad} \varphi - \nu B \right) \\ \text{div} J_e &= 0 \end{aligned} \quad (3.2)$$

図 3.1 に推力解析のフローを示した。

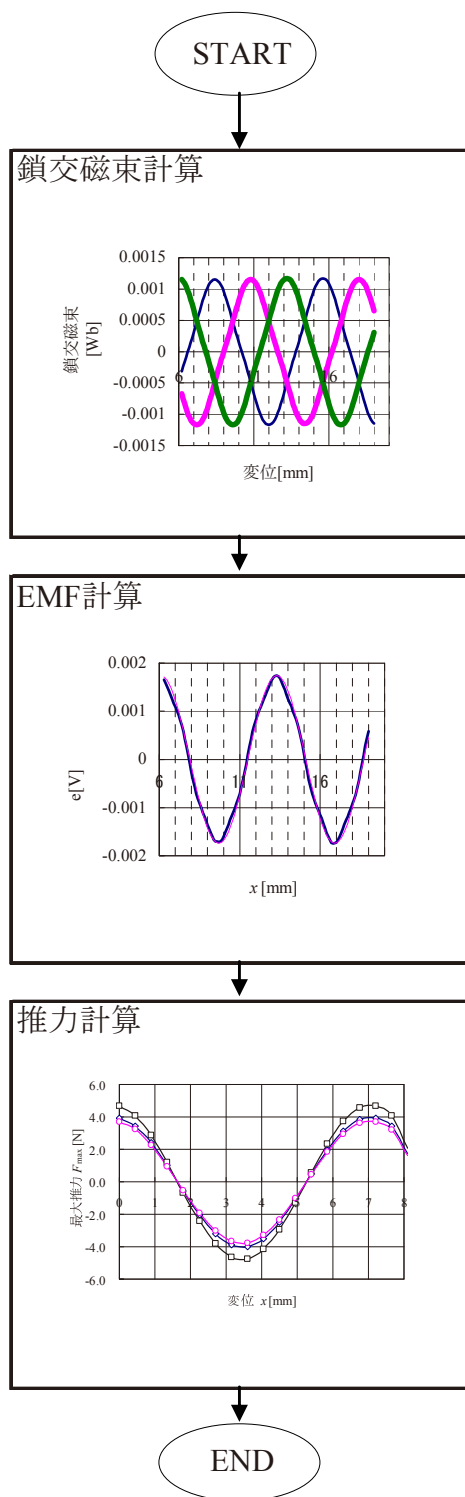


図 3.1 解析フロー

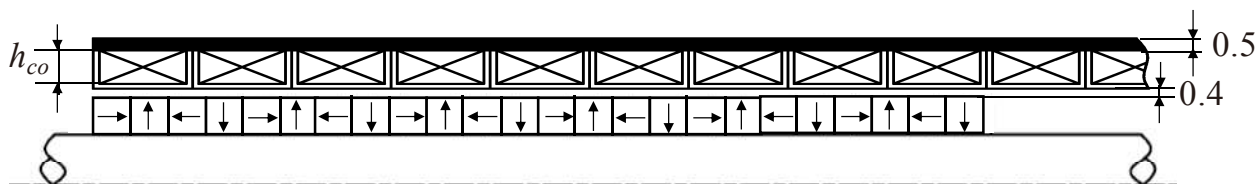
3.2 コアレスによる高推力化の検討

3.2.1 設計定義

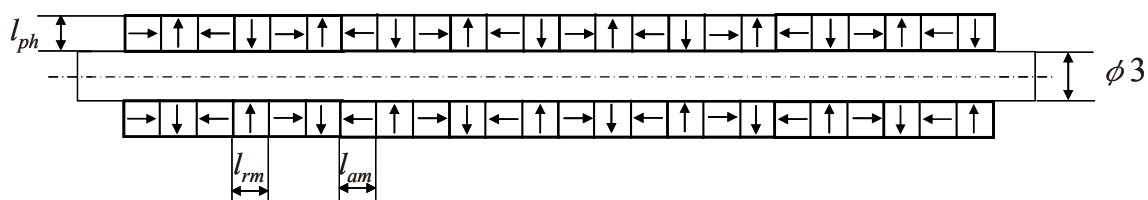
コアレスによる高推力実現の為、ハルバッハ磁石配列による推力への影響を検討する詳細設計を行った⁽³⁻⁸⁾。表 3.2 に及び図 3.3 に設計パラメータを示した。各パラメータが、コアレス HLISM の推力に与える影響を検討する。

表 3.2 設計パラメータ

項目		記号	単位
可動子	ラジアル配向磁石の幅	l_{rm}	[mm]
	アキシシャル配向磁石の幅	l_{am}	[mm]
	可動磁石の厚さ	l_{ph}	[mm]
コイル	コイルの高さ	h_{co}	[mm]



(a) 固定子寸法及びエアギャップ寸法



(b) 可動子寸法

図 3.3 設計パラメータ

3.2.2 寸法の評価方法

図 3.4 にコアレス HLSM の設計手順を示した．段階を 2 段階に分割し，第 1 段階で可動子の寸法，第 2 段階にてコイルの寸法とした．ラジアル配向磁石の幅 l_{rm} とアキシャル配向磁石の幅 l_{am} の関係は式(3.3)で与えられる．

$$l_{rm} + 2l_{am} = 3.6[\text{mm}] \quad (3.3)$$

第 2 段階では，コイル高さ h_{co} を変え，推力定数 2 乗密度 G を用いて最適値を評価する．総じて評価指標としては，

- (1) 最大推力
 - (2) 推力定数 2 乗密度
- とする．

尚，コアレス HLSM の外径寸法及び軸径寸法は固定の為，可動磁石の厚さ l_{ph} を厚くすれば，コイル高さ h_{co} (=コイル巻線スペース)は低くなり，逆に可動磁石の l_{ph} を薄くすれば，コイル高さ h_{co} は高くなる．本設計においては，実際には 100 パターン以上の寸法組み合わせで計算を行っており，また場合により第 2 段階⇒第 1 段階に立ち回り，最も G が高くなる寸法を求めたケースも存在している．ここではその全てを記述しきれない為， G が最も高くなったポイントに限定し，その流れを示す形としている．

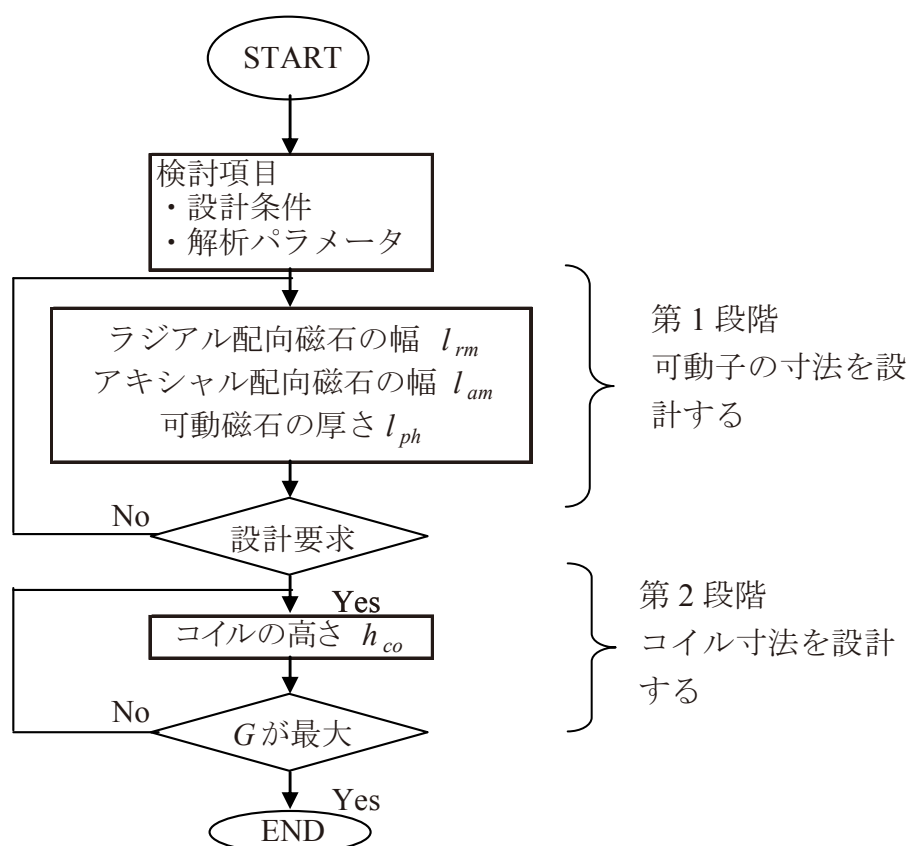


図 3.4 設計手順

3.2.3 可動子の寸法

図 3.3 に, ラジアル配向磁石の幅 l_{rm} , アキシャル配向磁石の幅 l_{am} , 可動磁石の厚さ l_{ph} をパラメータとした時の推力特性を示した. 可動磁石の厚さ l_{ph} を厚くすると推力の値は大きくなる. 推力については可動磁石の厚さ l_{ph} が 2.0mm, ラジアル配向磁石の幅 l_{rm} が 1.6mm, アキシャル配向磁石の幅 l_{am} が 1.0mm の時, 推力が 3.93N と大きくなった.

図 3.4 に最大推力特性のコンター図を示した. 黒太線で囲んだ部分は, 可動子の寸法を決定する時点での目標最大推力 $F_{max}=3.5\text{N}$ 以上である. 目標最大推力を満足し, 推力定数 2 乗密度 G が大きい寸法は, 可動磁石の厚さ l_{ph} が 1.0mm, ラジアル配向磁石の幅 l_{rm} が 1.8mm, アキシャル配向磁石の幅 l_{am} が 0.9mm となった. 表 3.3 に決定した可動子の寸法をまとめた.

表 3.3 可動子の寸法

項目	記号	数値
ラジアル配向磁石の幅[mm]	l_{rm}	1.8
アキシャル配向磁石の幅[mm]	l_{am}	0.9
可動磁石の厚さ[mm]	l_{ph}	1.0

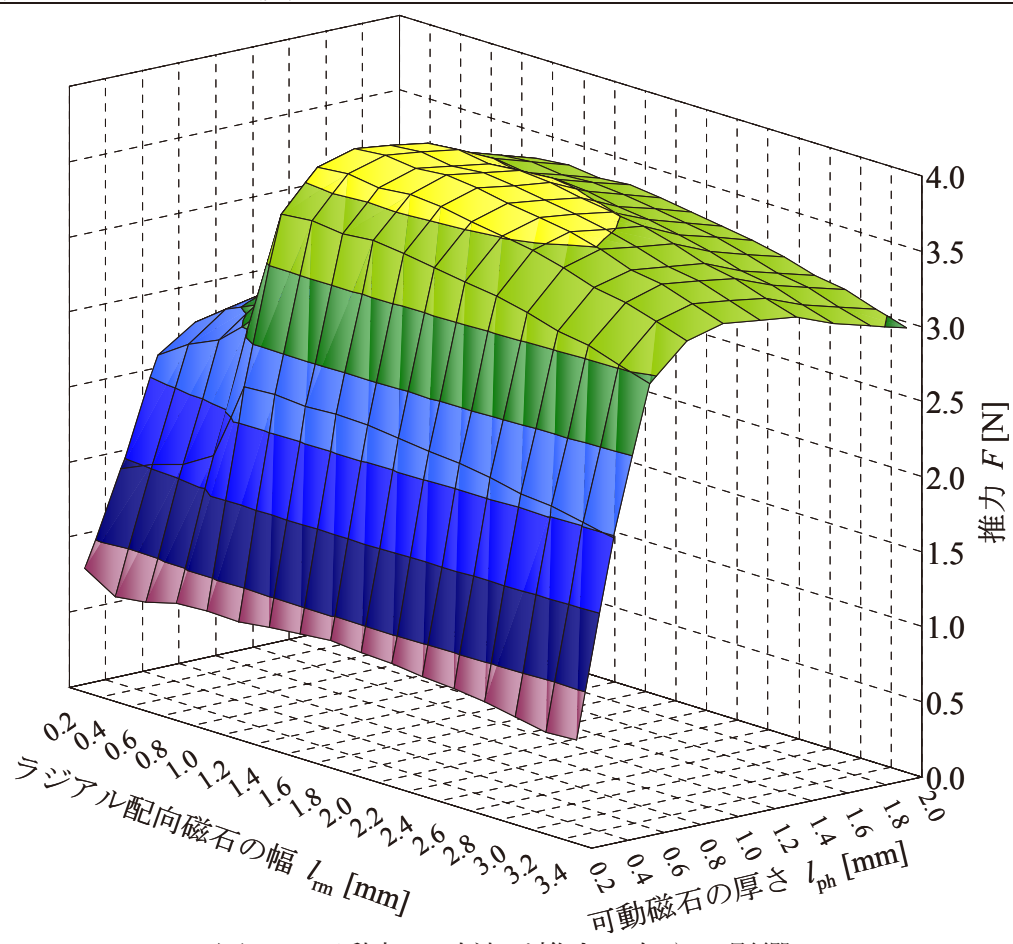


図 3.3 可動部の寸法が推力に与える影響

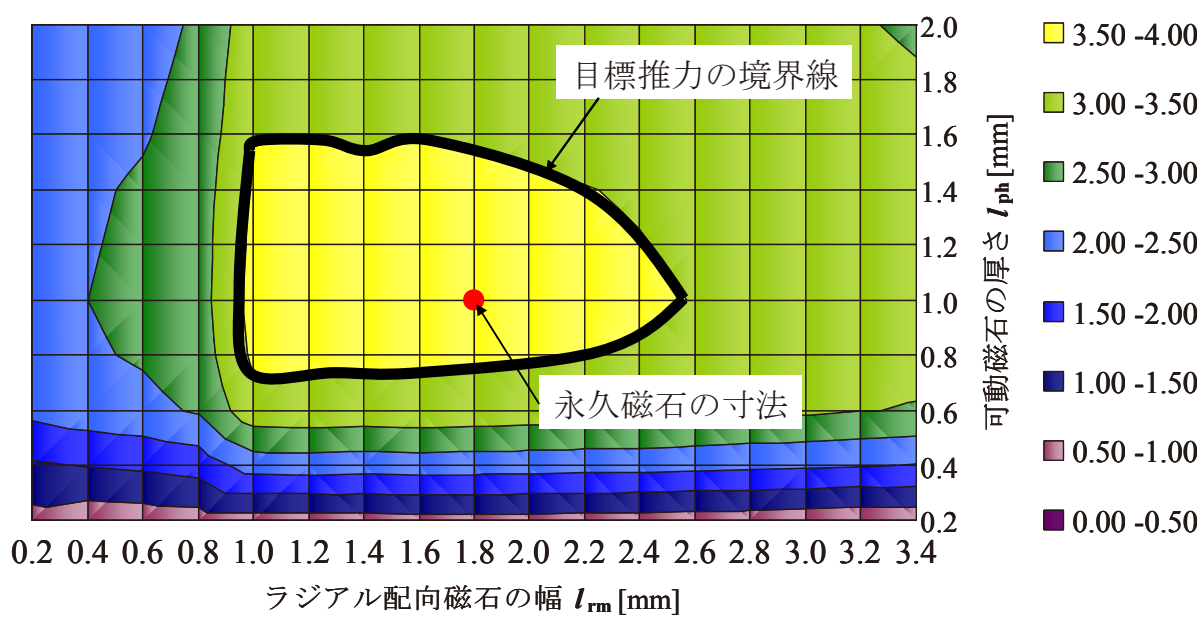


図 3.4 最大推力特性のコンター図

3.2.4 コイルの寸法

コアレスの固定子は、巻線ボビンとコイルから構成されている。コイル寸法の検討により最終的な設計目標である最大推力 $F_{max}=3.8\text{N}$ 、推力定数 2 乗密度 $G=0.023 \times 10^6 [\text{N}^2/(\text{Wm}^3)]$ を達成させる。コイル寸法を決定するにあたり、銅損とコイル抵抗の式によって、コイルの起磁力を導出する⁽³⁻⁹⁾⁽³⁻¹⁰⁾⁽³⁻¹¹⁾。コイルの起磁力式により高さを計算し、推力定数 2 乗密度 G によって最適なコイル高さを決定する。コイルの起磁力とコイル部分の面積の関係⁽³⁻¹²⁾は以下のように展開できる。コイルの銅損は次式で与えられる。コイル抵抗は、コイルの線径に依存する。

$$P=I^2 \cdot R [\text{W}] \quad (3.4)$$

また、コイル抵抗は次式で与えられる。

$$R = \frac{\rho^2 N^2 l_{co}}{A_{co}} [\Omega] \quad (3.5)$$

ここに、

- P 入力電力[W],
- R コイル抵抗[Ω],
- I コイル電流[A],
- ρ 銅の抵抗率[$1.7 \times 10^{-8} \Omega \text{m}$],
- N コイル巻数 [回],
- l_{co} コイル 1 周の長さ[m],
- A_{co} コイル全体の断面積[m²]

式(3.4)、(3.5)より、コイルの起磁力とコイル断面積の関係は次式で表される。コイルの起磁力は、コイル全体の断面積と比例関係である。

$$NI = \frac{1}{\rho} \sqrt{\frac{A_{co} P}{l_{co}}} = \frac{1}{\rho} \sqrt{\frac{h_{co} 5P}{l_{co}}} \quad (3.6)$$

コイル全体の断面積を変えるための変数は、コイルの高さ h_{co} である。最適なコイルの高さ h_{co} を評価する為、推力定数 2 乗密度 G を評価指標に用いる。推力定数 2 乗密度 G は、次式で与えられる⁽³⁻¹³⁾。

$$G = \frac{K_m}{V_m} = \frac{F}{P} \times \frac{F}{V_m} \quad [\text{N}^2/(\text{Wm}^3)] \quad (3.7)$$

ここに,

K_m モータ定数[N/√W],

V_m モータ体積[m³],

P 入力電力[W]

図 3.5 にコアレス HLSM のコイル高さ h_{co} を変えた時の推力定数 2 乗密度 G と最大推力 F_{max} の特性を示した. コイル高さ h_{co} を大きくすると, 推力定数 2 乗密度 G が大きくなり, コイル高さ $h_{co}=1.4\text{mm}$ 以上では減少する傾向を示した. コイル高さが $h_{co}=1.4\text{mm}$ の時, 推力定数 2 乗密度は $G=0.023 \times 10^6 [\text{N}^2/(\text{Wm}^3)]$ で最大値となり, 最大推力は $F_{max}=3.86\text{N}$ となった. コイル高さ $h_{co}=1.4\text{mm}$ 以上で減少傾向を示したのは, 磁石幅が小さくなる事が要因の一つと考える.

故に, コアレス HLSM のコイルの高さ h_{co} は 1.4mm とした. 図 3.6 にコイルの高さ h_{co} における推力定数 2 乗密度 G のコンター図を示す.

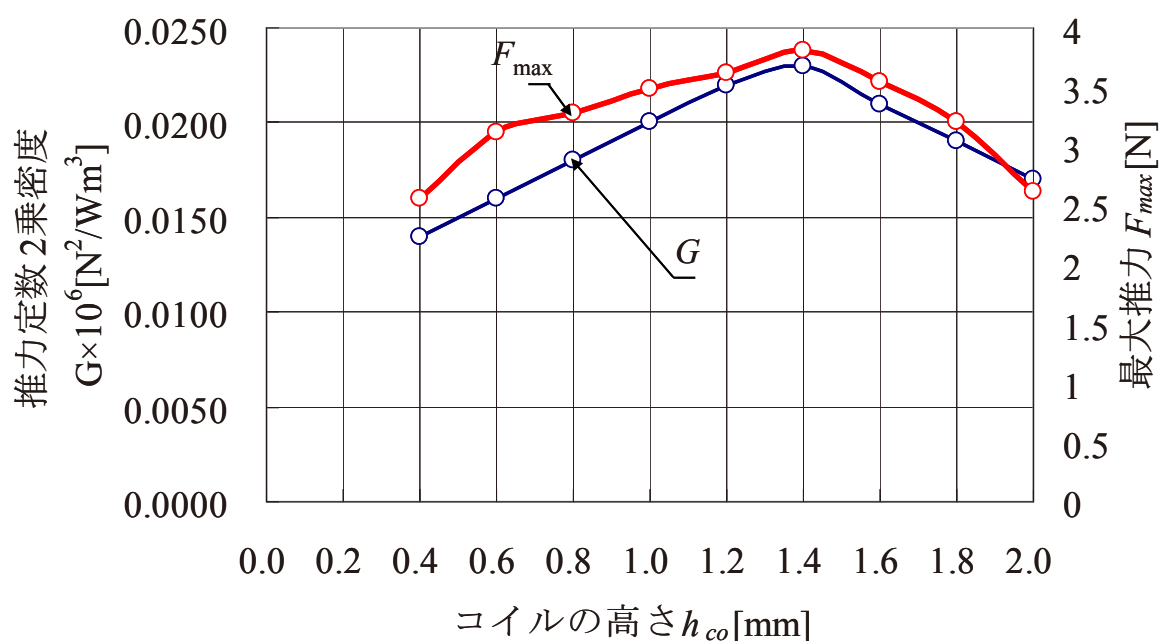


図 3.5 コイル高さによる推力定数 2 乗密度

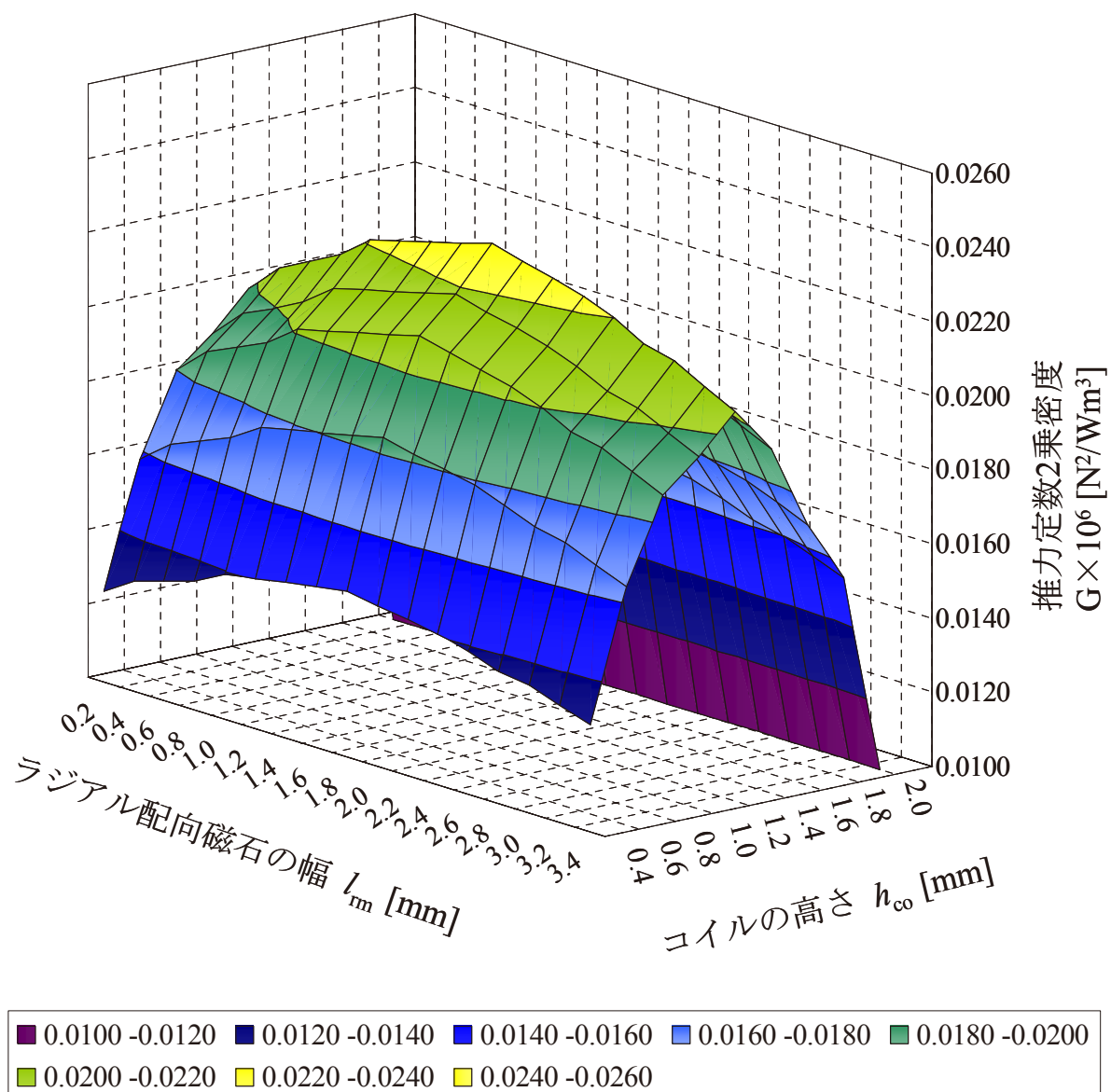


図 3.6 コイル高さによる推力定数 2 乗密度のコンター図

3.3 計算結果によるコアレス LSM の特性比較

3.3.1 寸法の比較

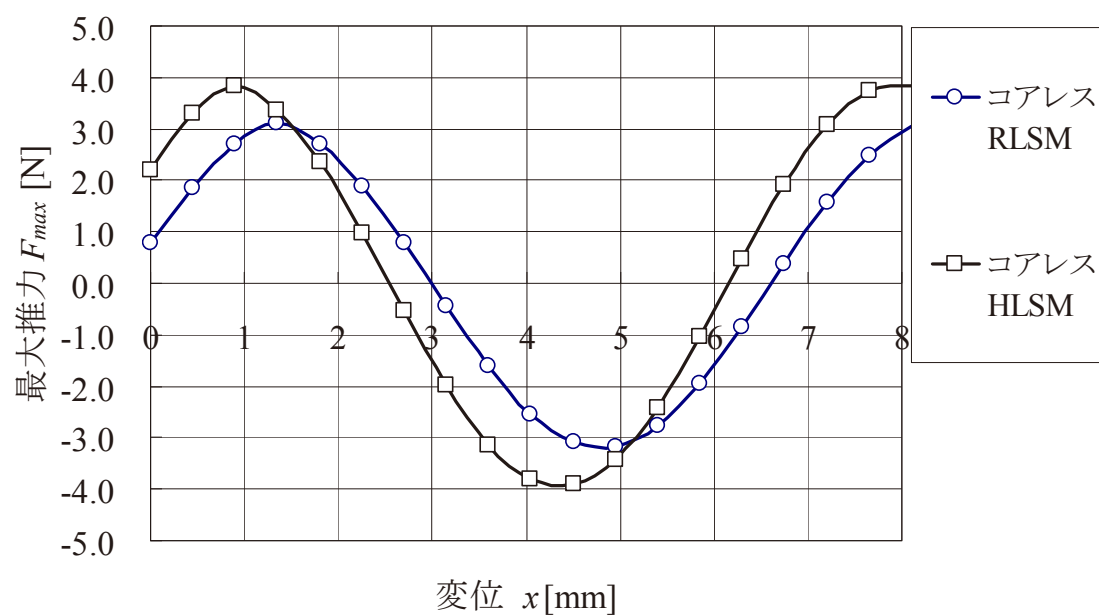
表 3.4 に本手法によるコアレス RLSM, コアレス HLSM の設計寸法をまとめた.

表 3.4 設計寸法

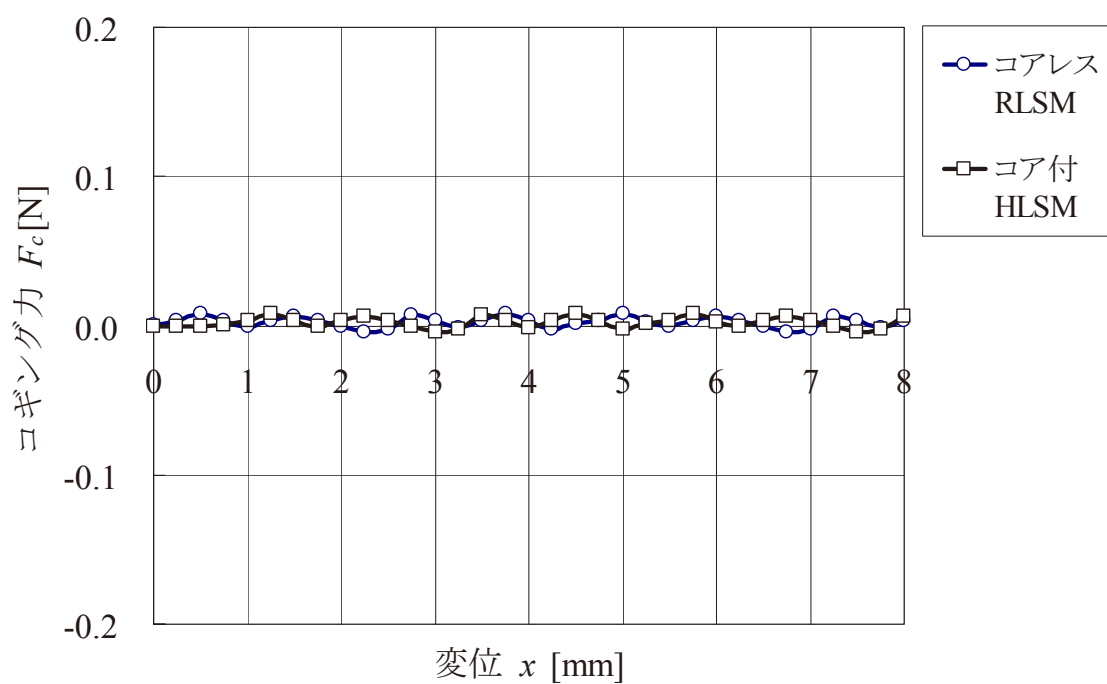
項目[単位]		記号	コアレス RLSM	コアレス HLSM
可動子	ラジアル配向磁石の幅[mm]	l_{rm}	3.6	1.8
	アキシアル配向磁石の幅[mm]	l_{am}	—	0.9
	磁石の厚さ[mm]	l_{ph}	1.0	1.0
固定子	外周ヨーク[mm]	l_{oy}	0.5	0.5
	ギャップ[mm]	δ	0.4	0.4
コイル	コイルの高さ[mm]	h_{co}	1.4	1.4
	コイル線径[mm]	ϕ	0.2	0.2
	コイル幅[mm]	ω_c	2.8	2.8
	コイル巻数		165	165
材質	可動軸		S45C	SUS303
	固定ヨーク		35H300	35H300
	可動磁石		N39MR	N39MR N40MA

3.3.2 特性比較

図 3.7 に設計した 2 種類のリニアモータの推力とコギング力特性をまとめた. コアレスの為, コギング力はほぼゼロに近い. 推力はハルバッハ磁石配列にすることで, ラジアル磁石配列から 20%向上した. 設計値として第 2 章の表 2.2 で示す目標値は達成した. 表 3.5 には, 本手法により設計したコアレス RLSM, コアレス HLSM の特性比較を示した. 尚, パーミアンス法と FEM による設計値の比較をする意味で, パーミアンス法による計算結果を括弧内に示した



(a) 推力特性



(b) コギング力特性

図 3.7 設計したコアレス LSM の推力とコギング力特性

表 3.5 設計したコアレス LSM の特性比較

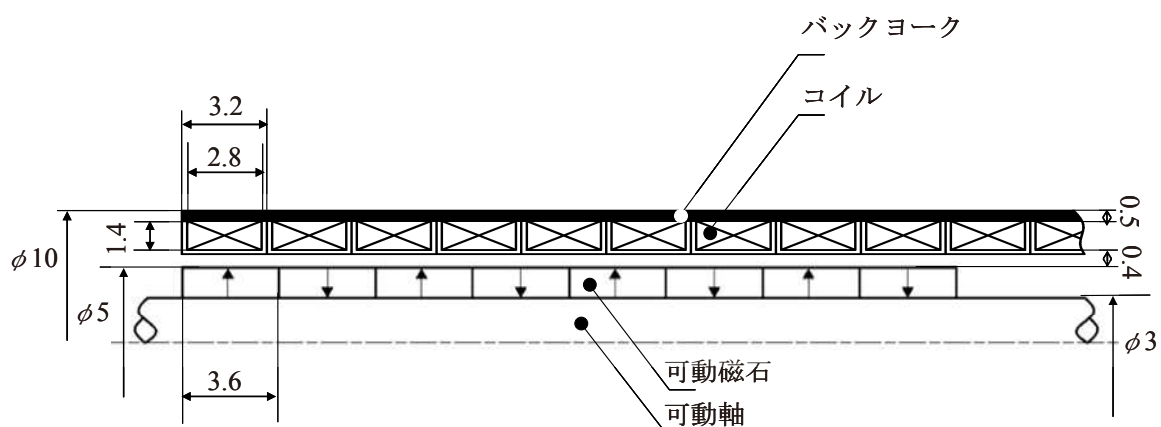
項目[単位]	記号	コアレス RLSM	コアレス HLSM
定格推力[N]	F_r	1.08 (1.06)	1.30 (1.28)
最大推力[N]	F_{max}	3.20 (3.16)	3.86 (3.80)
推力定数[N/A]	K_f	1.08	1.30
モータ定数[N/ \sqrt{W}]	K_m	0.84	1.02
コギング力[N]	F_C	0.01	0.01

3.4 コアレス LSM の試作と特性評価

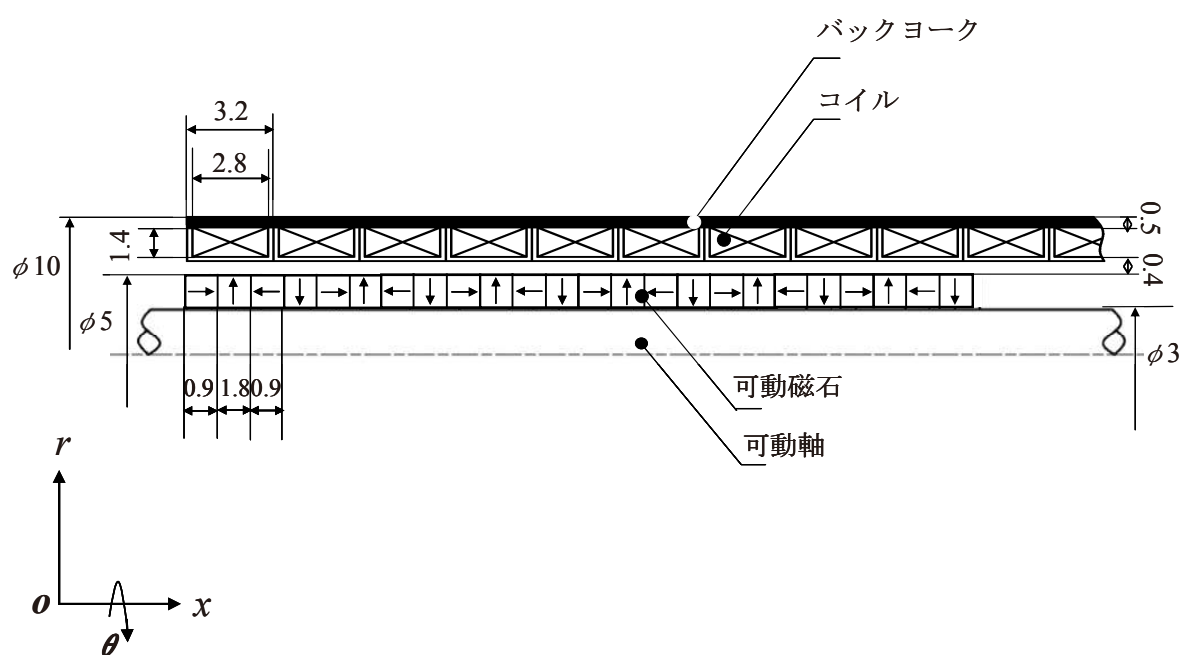
3.4.1 試作

図 3.8 に、試作した 2 種類の LSM(コアレス RLSM, コアレス HLSM)の寸法を示した。ここでは、コアレス HLSM について述べる。推力及び推力定数 2 乗密度の目標値を達成するため、FEM による詳細検討の結果、歯先幅 l_m は 2.1mm, 歯先の間口隔 l_o は 0.1mm, 歯幅 l_w は 1.8mm, 歯先厚 l_{ch} は 0.3mm とした。コイルによる起磁力を大きくするため、コイルの高さ h_{co} は 1.0mm とした。

可動子の寸法は、ラジアル配向磁石の幅 l_{rm} は 1.2mm, アキシヤル配向磁石の幅 l_{am} は 0.6mm, 磁石の厚さ l_{ph} は 1.0mm とした。固定子と可動子間のギャップ δ は 0.4mm とした。これは軸のたわみも考慮している。尚、磁石についてはメーカーから着磁品を購入している。コアレス HLSM における磁石の結合には、エポキシ系接着剤を用いた。表 3.6 に試作した仕様一覧をまとめた。



(a) コアレス RLSM の寸法



(b) コアレス HLSCM の寸法

図 3.8 試作したコアレス LSM の寸法 [mm]

表 3.6 試作仕様一覧

項目[単位]		記号	コアレス RLSM	コアレス HLSM
可動子	ラジアル配向磁石の幅[mm]	l_{rm}	3.6	1.8
	アキシヤル配向磁石の幅[mm]	l_{am}	—	0.9
	磁石の厚さ[mm]	l_{ph}	1.0	1.0
固定子	外周ヨーク[mm]	l_{oy}	0.5	0.5
	ギャップ[mm]	δ	0.4	0.4
コイル	コイルの高さ[mm]	h_{co}	1.4	1.4
	コイル線径[mm]	ϕ	0.2	0.2
	コイル幅[mm]	ω_c	2.8	2.8
	コイル巻数		165	165
材質	可動軸		S45C	SUS303
	固定ヨーク		35H300	35H300
	可動磁石		N39MR N40MA	

3.4.2 システムの概要

図 3.9 に，基礎特性測定システムの外観を示した．DC モータによるボールねじ駆動を利用し，静推力及びコギング力を測定する⁽³⁻¹⁴⁾．機能のブロック図を図 3.10 に示す．

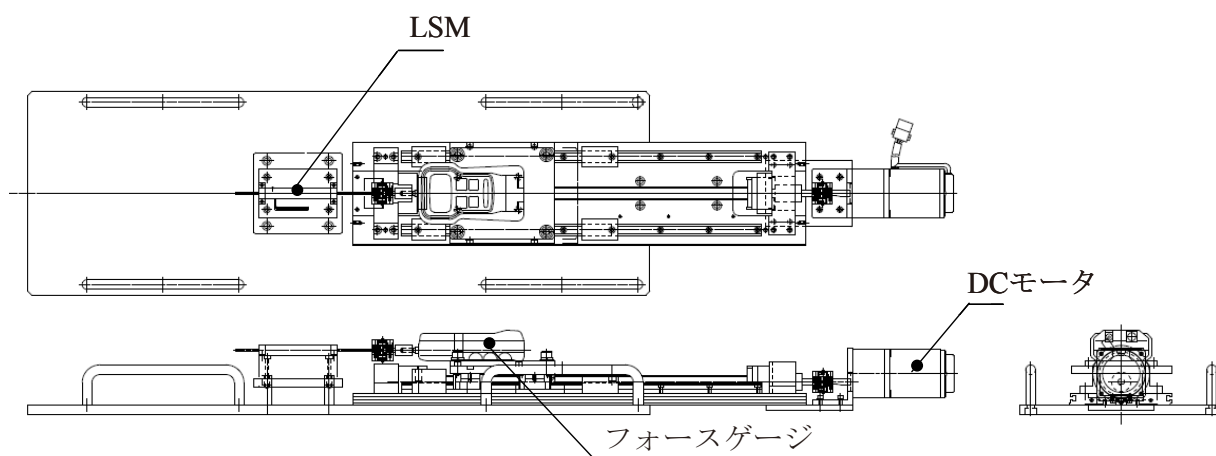


図 3.9 基礎特性測定システム

LSM は取付け台座に固定，フォースゲージはボールねじ駆動台に固定されている．取付け台座と駆動台の軸をカップリングで締結する．ボールねじ駆動により LSM の軸を x 方向に推進させる仕組みである．

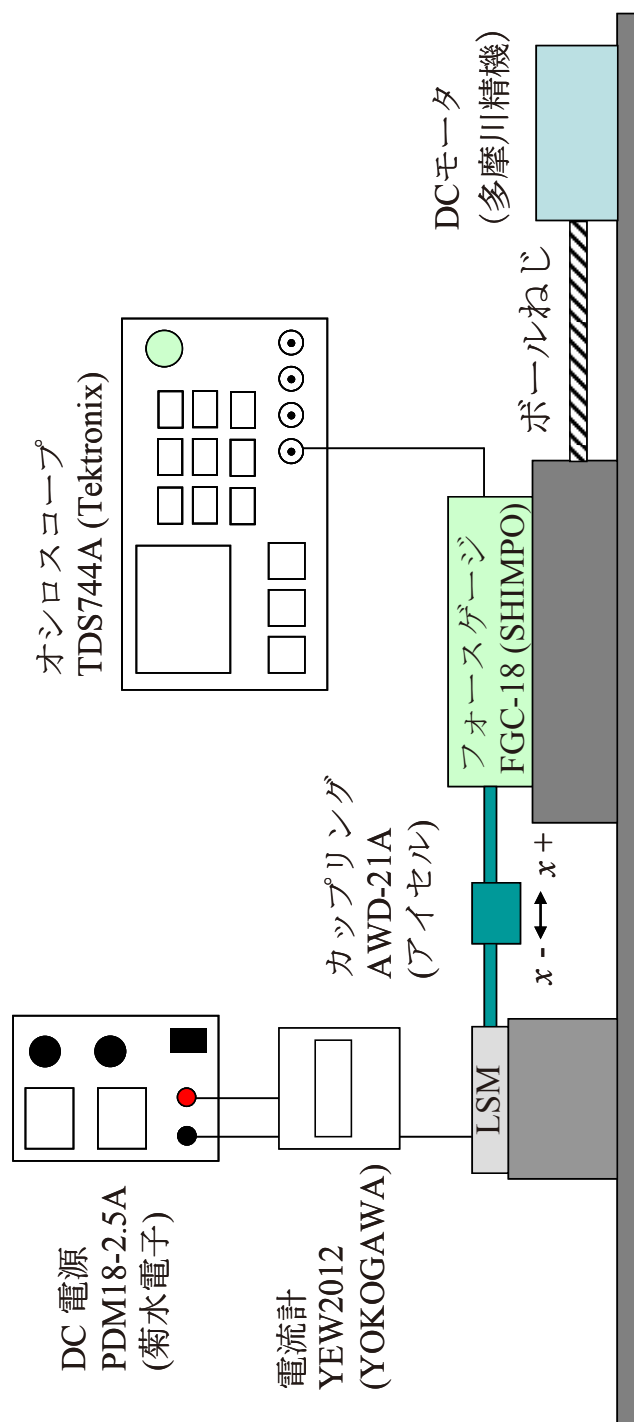


図3.10 機能のブロック図

3.4.3 静推力・コギング力特性

図 3.10 に示した基礎特性測定システムを構成し，静推力及びコギング力を測定する．取付け台座に取り付けられた LSM の軸を，ボールねじ駆動により直線運動する駆動台に配された軸とカップリング締結をしている．その為，機械的摩擦分が存在する．測定の際には，測定値から摩擦分を差し引く．図 3.11 に静推力の測定結果，図 3.12 にコギング力の測定結果を示した．静推力は，定格電流 100%から定格比 300%の範囲において，可動部の速度 $v = 10\text{mm/s}$ で推進させた時の値である．

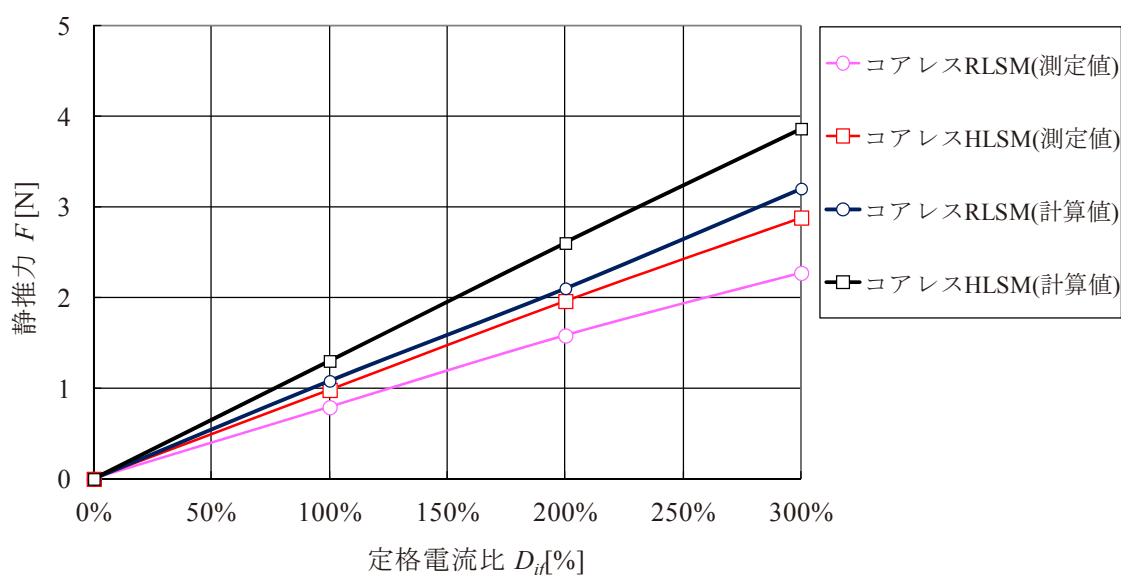


図 3.11 静推力測定結果

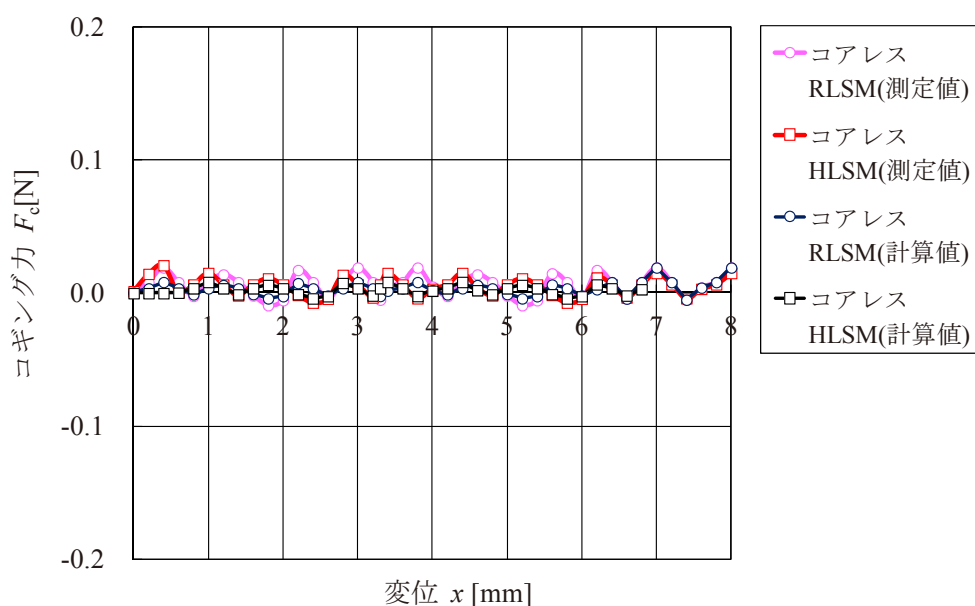


図 3.12 コギング力測定結果

3.4.4 設計値と測定値の比較

表 3.7 に目標値及び設計値と測定値の比較を示した。測定値について、目標値及び計算値に対する未達成部分を網かけで明記した。結果として全ての項目において、未達成となった。推力の測定値は、コアレス RLISM, コアレス HLISM とともに計算値に対して 30%低い結果であった。推力の測定値が計算値に対して低くなった理由として考えられる要因としては、設計時(計算値)に磁石の残留磁束密度を磁石メーカーのカタログ値である 1.29T としていたが、実際に製作した結果、1.04T となった為と考えられる⁽³⁻¹⁵⁾。その結果、推力定数 K_f , モータ定数 K_m , 推力定数 2 乗密度 G とともに目標値及び計算値に対して未達成となった。尚、推力の計算値及び測定値ともに、ハルバッハ磁石配列で構成されたコアレス HLISM がコアレス RLISM に対し 20%高い結果であった⁽³⁻¹⁶⁾⁽³⁻¹⁷⁾。

コギング力については、目標値を定めていないものの、コアレス RLISM で 0.02N, コアレス HLISM でも 0.02N とほぼゼロに近い値となり、同時に LSM の組立誤差の影響もほぼ無いものと考えてよい。また、磁石の残留磁束密度を 1.04T とし、FEM による推力の再計算を行った結果を測定値と比較する形で図 3.13 と表 3.8 に示した。再計算値と測定値との差異はコアレス RLISM で 3.4%, コアレス HLISM で 3.7%となった。また評価指標である推力定数 2 乗密度 G で比較した時、再計算値と測定値は整合性が取れる結果となった。

表 3.7 目標値及び設計値と測定値の比較

項目[単位]	記号	コアレスRLISM			コアレスHLISM		
		目標値	計算値	測定値	目標値	計算値	測定値
定格推力[N]	F_r	1.05	1.08	0.76	1.27	1.30	0.97
最大推力[N]	F_{max}	3.15	3.20	2.27	3.81	3.86	2.88
推力定数[N/A]	K_f	1.05	1.08	0.76	1.27	1.30	0.97
モータ定数[N/ \sqrt{W}]	K_m	0.83	0.84	0.60	1.01	1.02	0.76
推力定数2乗密度 [N ² /(Wm ³)]	$G \times 10^6$	0.019	0.019	0.013	0.023	0.023	0.018
コギング力[N]	F_c	—	0.01	0.02	—	0.01	0.02

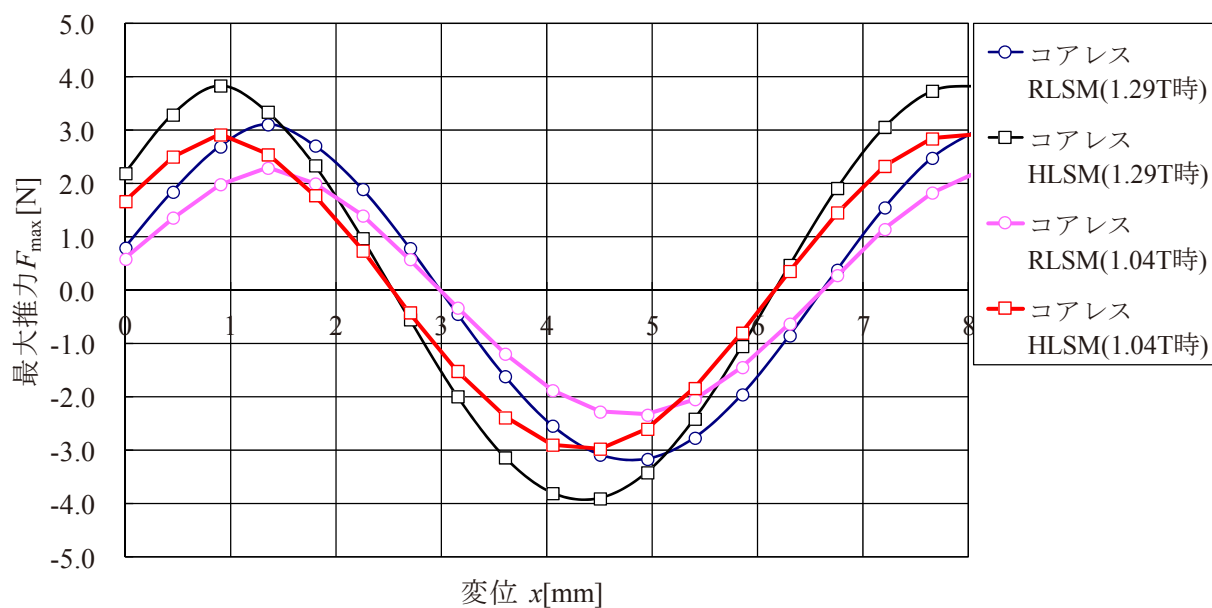


図 3.13 磁石残留磁束密度 1.04T における推力特性

表 3.8 磁石残留磁束密度 1.04T での再計算結果と測定値の比較

項目[単位]	記号	コアレスRLSM		コアレスHLSM	
		再計算値	測定値	再計算値	測定値
定格推力[N]	F_r	0.79	0.76	1.01	0.97
最大推力[N]	F_{max}	2.35	2.27	2.99	2.88
推力定数[N/A]	K_f	0.79	0.76	1.01	0.97
モータ定数[N/ \sqrt{W}]	K_m	0.63	0.60	0.80	0.76
推力定数2乗密度 [N ² /(Wm ³)]	$G \times 10^6$	0.013	0.013	0.018	0.018
コギング力[N]	F_C	0.01	0.02	0.01	0.02

第3章の参考文献

- (3-1) 糸見和信 : 制御用モータ技術活用マニュアル, 総合電子出版社, pp. 208-211, 1987.
- (3-2) 電気学会 : 基礎電気機器学, オーム社, pp.6-7, 1985.
- (3-3) 阿部龍蔵 : エネルギーと電磁場, 裳華房, p.111, 2002.
- (3-4) 尾添紘之, 平光雅司 : スカラポテンシャルとベクトルポテンシャルを用いた数値計算法の開発-二次元および三次元層流浮力流れへの応用-, 日本機械学会論文集. B 編 52(478), 2418-2424, 1986.
- (3-5) 電気学会 リニア電磁駆動装置設計技術の高度化調査専門委員会編 : リニア電磁駆動装置解析の現状, 電気学会技術報告第 797 号, pp.5-8, 2000.
- (3-6) Masato Enokizono : Scalar Potential and Vector Potential, Journal of the Japan Society of Applied Electromagnetics 20(4), 671-674, 2012.
- (3-7) 河瀬順洋, 山口忠 : 電磁場系のシミュレーション, 日本 AEM 学会誌 Volume 22 Number 1, pp. 7-12, 2014.
- (3-8) 仲岩浩一, 細沢和司, 飯島邦彦, 山田明倫, 田代晋久, 脇若弘之 : ペンシルサイズ円筒リニアモータの磁石配列による推力特性比較, 電気学会全国大会講演論文集, p.182, 2008.
- (3-9) 中田高義, 伊藤昭吉, 河瀬順洋 : 有限要素法による交直電磁石の設計と応用, 森北出版, pp.77-79, 1991.
- (3-10) 山田一, 宮沢永次郎, 別所一夫 : 基礎電磁気学, 学献社, pp.164-166, 1996.
- (3-11) 田中守也編著 : 電気磁気学基礎, 電気学会, オーム社, pp.83-85, 1994.
- (3-12) 北村正司, 田島文男, 赤見裕介, 内海典之, 李友行, 五十嵐一 : 永久磁石式円筒リニアモータにおける磁気回路の最適設計, 電気学会研究会資料 SA, 静止器研究会 2007(17), pp.69-73, 2007.

- (3-13) 鹿山透, 筒井幸雄: マグナギャップリニアモータ, 安川電機技報, Vol.64, No.3, pp.177-181, 2000.
- (3-14) 仲岩浩一: ペンシルサイズ円筒型リニアモータの設計, 信州大学大学院工学系研究課修士論文, pp.54-58, 2009.
- (3-15) 信越化学磁石試作レポート(20071122), pp.1-2, 2007.
- (3-16) K.Nakaiwa, A.Yamada, K.Tashiro, H.Wakiwaka: COMPARISON OF THRUST CHARACTERISTICS OF PENCIL SIZE CYLINDER TYPE LINEAR MOTOR WITH DIFFERENT MAGNET ARRAY, Journal of the Japan society of applied electro magnetism and mechanics , pp.481-484, 2009.
- (3-17) 仲岩浩一, 細沢和司, 飯島邦彦, 山田明倫, 田代晋久, 脇若弘之: ペンシルサイズ円筒リニアモータの磁石配列による推力特性比較, 電気学会全国大会講演論文集, p.182, 2008.

第4章 コア付 LSM による高推力密度化・
低コギング力の検討

4.1 コア付 LSM の設計条件と定義

4.1.1 設計条件

本章では，コア付による高推力密度化を実現する．表 4.1 に，コア付 LSM の構成材料を示した．固定子コアには無方向性電磁鋼板である 35H300 を用いた．可動子磁石は，ラジアル配向磁石とアキシヤル配向磁石により，各々の配列を形成している．可動軸は，コア付 RLSM には磁性体である S45C を用い，コア付 HLSM については非磁性体である SUS303 を用いた⁽⁴⁻¹⁾．

表 4.1 LSM の構成材料

項目		コア付RLSM	コア付HLSM
固定子	コア	35H300	
	コイル	ポリエステル銅線	
可動子	軸	S45C	SUS303
	磁石	ラジアル配向 Ne-Fe-B N42SH($Br=1.29T$)	ラジアル配向 Ne-Fe-B N42SH($Br=1.29T$)
			アキシヤル配向 Ne-Fe-B N40MA($Br=1.29T$)

以降，最も高推力が期待できるコア付 HLSM の設計手順を取り上げる．尚，2種類の磁石配列における可動子の体積は一定である．

4.1.2 設計手法

設計手法としては、コアレス LSM と同様に、パーミアンス法と有限要素法 (Finite Element Method) を用いた。手順としては、パーミアンス法にて設計を行い、その後 FEM にて詳細設計を行った^(4.2)。

FEM による解析モデルを図 4.1 に示す。材料の非線形性を考慮し、永久磁石の減磁曲線を 11 点、固定子コア(35H300)の $B-H$ 曲線を 29 点で近似する。要素数は、170000 である。尚、可動子の体積は 2 種類の配列ともに同体積とし、磁石の使用量は、コア付 RLISM とコア付 HLSM を同体積とした。

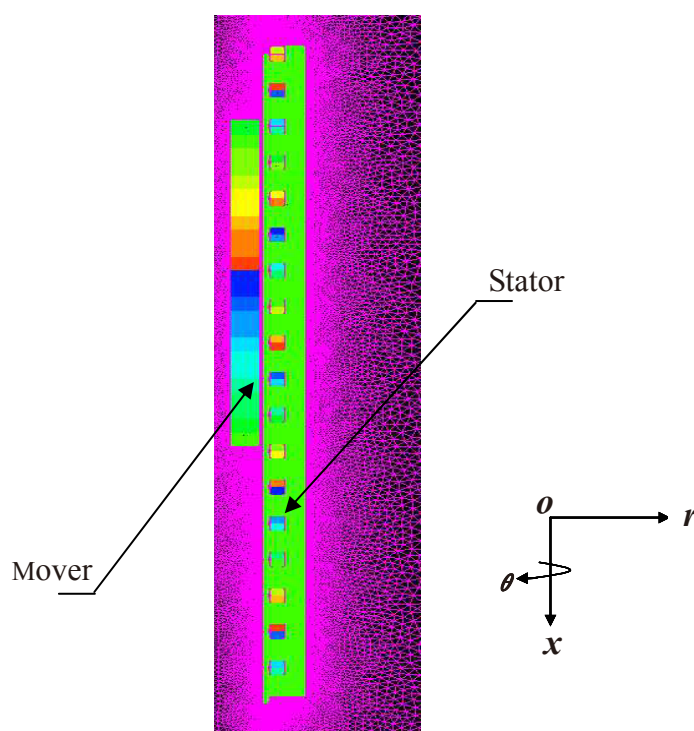


図 4.1 解析モデル

パーミアンス法による設計手順は付録にまとめた。尚、パーミアンス法と FEM の計算結果の差異については、4.3 項にまとめる。

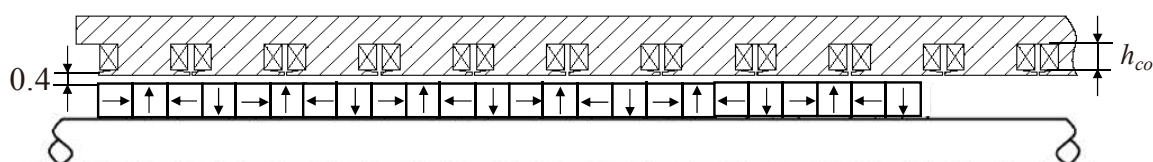
4.2 高推力密度化の検討

4.2.1 設計定義

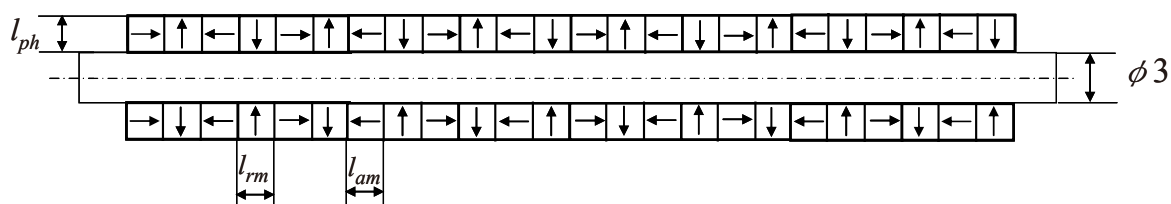
高推力密度化を目指し、詳細設計を行った。表 4.2 に及び図 4.2 に設計パラメータを示した。各パラメータが、コア付 HLSM の推力に与える影響を検討した。推力、コギング力の変化を導出する為に、各歯先の寸法を設計パラメータとする⁽⁴⁻³⁾。

表 4.2 設計パラメータ

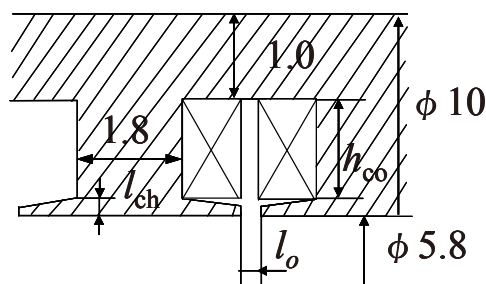
項目		記号	単位
固定子	歯先幅	l_{ch}	[mm]
	歯先の開口幅	l_o	[mm]
可動子	ラジアル配向磁石の幅	l_{rm}	[mm]
	アキシヤル配向磁石の幅	l_{am}	[mm]
	可動磁石の厚さ	l_{ph}	[mm]
コイル	コイルの高さ	h_{co}	[mm]



(a) コイル寸法とエアギャップ寸法



(b) 可動子寸法



(c) 固定子寸法

図 4.2 設計パラメータ

4.2.2 寸法の評価方法

図 4.3 にコア付 HLSM の設計手順を示した⁽⁴⁻⁴⁾。段階を 4 段階に分割し、第 1 段階～第 3 段階は高推力密度の実現として、第 1 段階で可動子の寸法、第 2 段階にて固定子の寸法、第 3 段階はコイル寸法である。第 4 段階は歪率低減とした。本リニアモータは小型である為、コギング力が大きいと支持機構に影響を及ぼす。故にコギング力は可能な限り小さくする。ラジアル配向磁石の幅 l_{rm} とアキシヤル配向磁石の幅 l_{am} の関係は式(4.1)で与えられる。

$$l_{rm} + 2l_{am} = 2.4[\text{mm}] \quad (4.1)$$

第 2 段階では、第 1 段階で決定した寸法を一定とし、歯先厚 l_{ch} 、歯先の開口幅 l_o をパラメータとする。例えば、 l_{ch} を変数とした場合、 l_o を一定とする。パラメータを変動させ⁽⁴⁻⁵⁾⁽⁴⁻⁶⁾、推力及び(推力/コギング力)比が最大となる寸法を設計する。第 3 段階では、コイルの高さ h_{co} を変え、推力定数 2 乗密度 G を用いて評価する。

総じて、設計目標を決定するための評価指標は、

- (3) 最大推力
 - (2) (推力/コギング力)比
 - (3) 推力定数 2 乗密度
- となる。

尚、コア付 HLSM の外径寸法及び軸径寸法は固定の為、可動磁石の厚さ l_{ph} を厚くすればコイルの高さ h_{co} (=コイル巻線スペース)は低くなり、逆に可動磁石の l_{ph} を薄くすればコイルの高さ h_{co} は高くなる。本設計においては、実際には 160 パターンの寸法組み合わせで計算を行っており、また場合により第 2 段階⇒第 1

段階に立ち返り，最も G が高くなる寸法を求めたケースも存在している．ここではその全てを記述しきれない為， G が最も高くなったポイントに限定し，その流れを示す形としている．

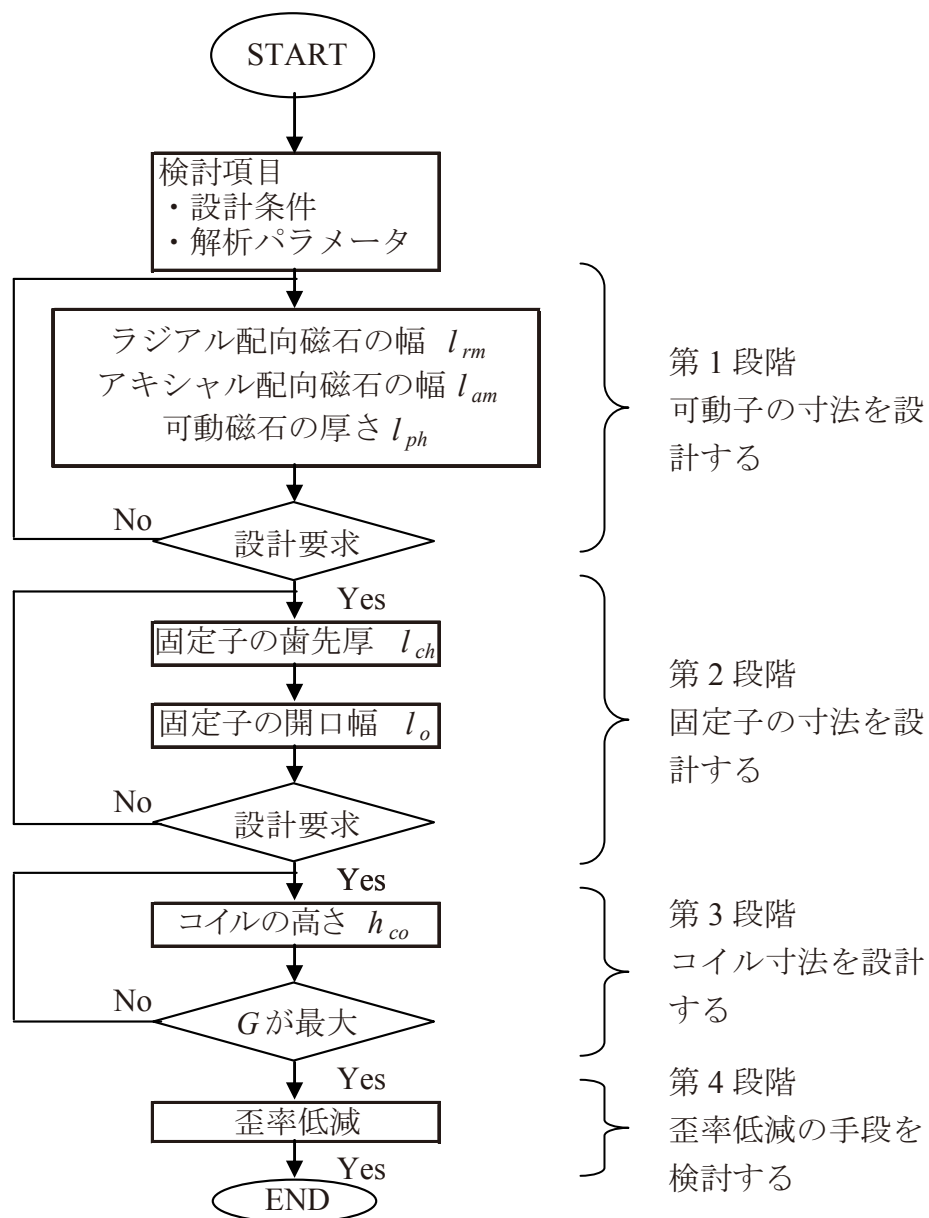


図 4.3 設計手順

4.2.3 可動子の寸法

図 4.4 に, ラジアル配向磁石の幅 l_{rm} , アキシヤル配向磁石の幅 l_{am} , 可動磁石の厚さ l_{ph} をパラメータとした時の最大推力特性を示した.

可動磁石の厚さ l_{ph} を厚くすると推力は大きくなるが, $l_{ph}=1.0\text{mm}$ を超えると減少傾向を示した. ラジアル配向磁石の幅 l_{rm} についても幅を広げると推力は大きくなり, $l_{rm}=1.2\text{mm}$ を超えると減少傾向を示した. 結果的に, 可動磁石の厚さ l_{ph} が 1.0mm , ラジアル配向磁石の幅 l_{rm} が 1.2mm , アキシヤル配向磁石の幅 l_{am} が 0.6mm の時, 最大推力 F_{max} は 4.30N と大きくなった. 図 4.5 に最大推力特性のコンター図を示した. 黒太線で囲んだ部分は, 可動子の寸法を決定する時点での目標最大推力 $F_{max}=4.0\text{N}$ 以上である. 表 4.3 に決定した可動部の寸法をまとめた.

表 4.3 可動子の寸法

項目	記号	数値
ラジアル配向磁石の幅[mm]	l_{rm}	1.2
アキシヤル配向磁石の幅[mm]	l_{am}	0.6
可動磁石の厚さ[mm]	l_{ph}	1.0

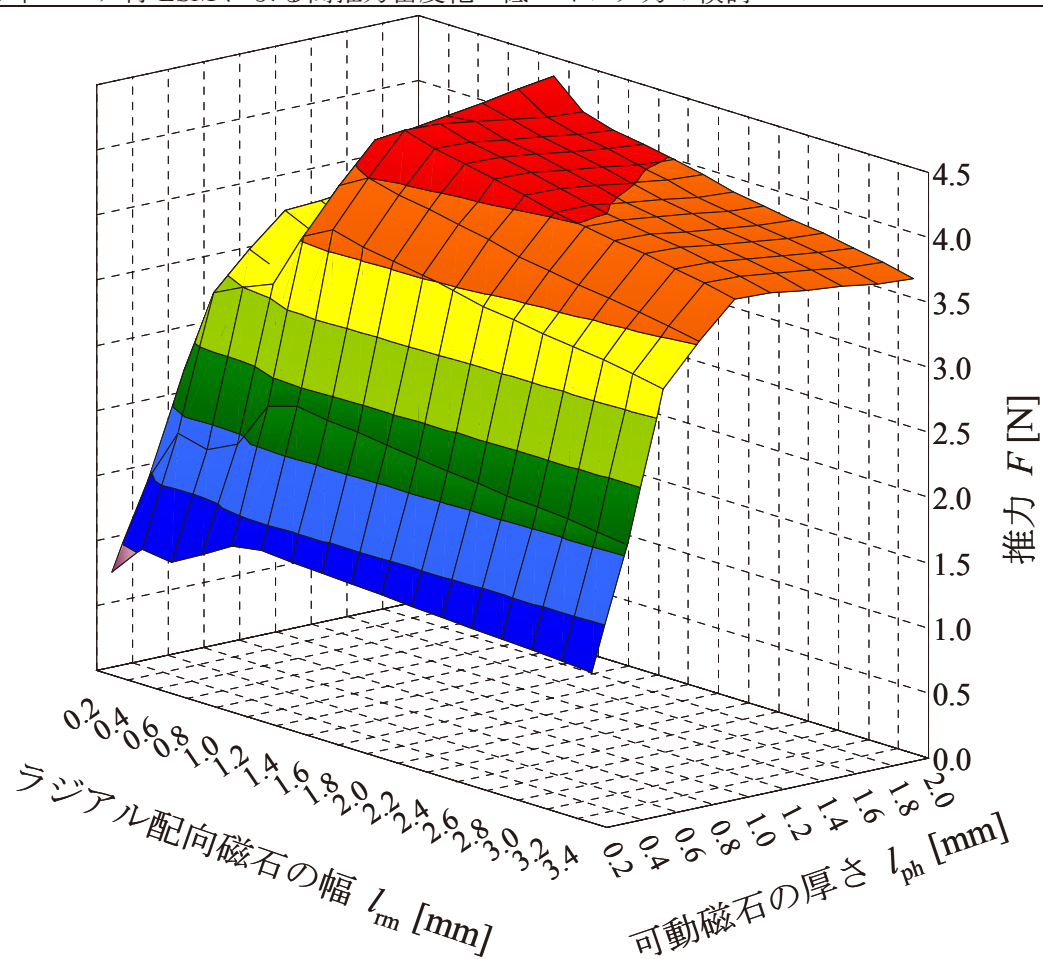


図 4.4 可動部の寸法が推力に与える影響

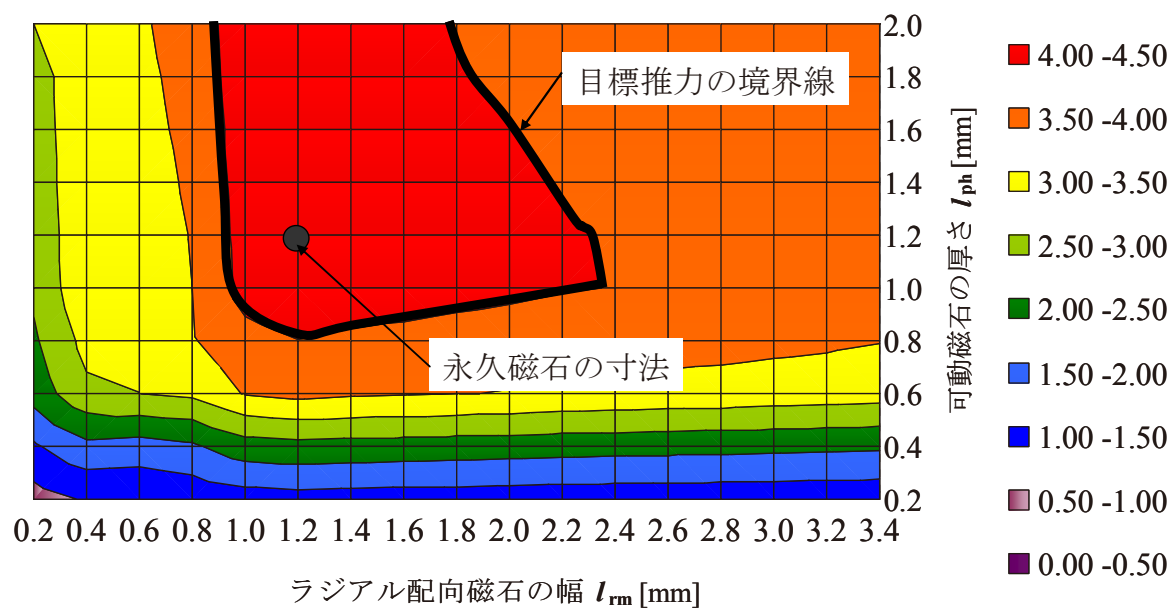


図 4.5 最大推力特性のコンター図

4.2.4 固定子の寸法

固定子の寸法を決定するにあたり，ラジアル配向磁石の幅 l_{rm} 、アキシヤル配向磁石の幅 l_{am} 、可動磁石の厚さ l_{ph} は一定とした．ラジアル配向磁石の幅 l_{rm} 、アキシヤル配向磁石の幅 l_{am} 、可動磁石の厚さ l_{ph} の寸法は，前節の検討内容により決定した．はじめに，歯先厚 l_{ch} 以外の寸法は一定とした．表 4.4 に，歯先厚 l_{ch} を変える時の他の寸法条件をまとめた．

表 4.4 歯先幅を変える時の解析条件

項目	記号	数値
歯先厚[mm]	l_{ch}	解析パラメータ
歯先の開口幅[mm]	l_o	0.1

図 4.6(a)に，歯先厚 l_{ch} を変えた時の最大推力，最大コギング力の特性を示した．歯先厚 l_{ch} を大きくすると最大推力と最大コギング力の差が小さくなる．図 4.6(b)に，歯先厚 l_{ch} を変えた時の(推力/コギング力)比の特性を示した．図 3.5(b)から，(推力/コギング力)比の特性では，歯先厚 $l_{ch}=0.3\text{mm}$ で最大値を示す．歯先厚 0.3mm の時，歯先の両端に発生する力が釣合うため，コギング力が小さくなる．故に，歯先厚 $l_{ch}=0.3\text{mm}$ とする．

次に，歯先の開口幅寸法を求めるため，歯先厚 l_{ch} ，ラジアル配向磁石の幅 l_{rm} ，アキシヤル配向磁石の幅 l_{am} ，可動磁石の厚さ寸法 l_{ph} は一定とした．表 4.5 に，歯先の開口幅 l_o を変える時の他の寸法条件をまとめた．

表 4.5 歯先の開口幅を変える時の解析条件

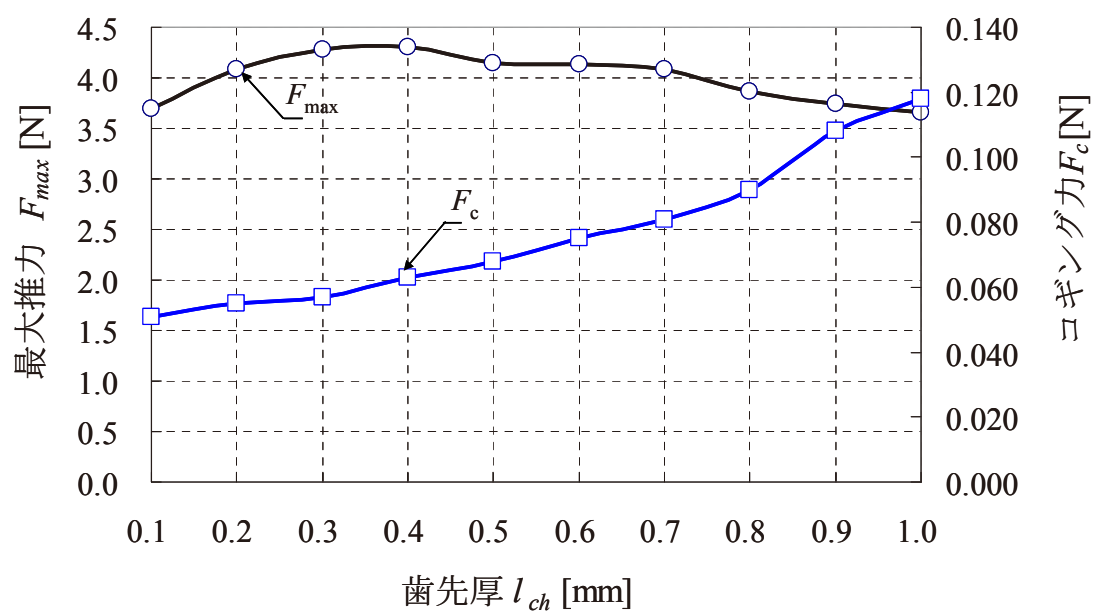
項目	記号	数値
歯先厚[mm]	l_{ch}	0.3
歯先の開口幅[mm]	l_o	解析パラメータ

図 4.7(a)に、歯先の開口幅 l_o を変えた時の最大推力，最大コギング力の特性を示した．図 4.7(b)に、歯先の開口幅 l_o を変えた時の(推力/コギング力)比の特性を示した．(推力/コギング力)比について、歯先の開口幅 $l_o=0.1\text{mm}$ で最大値を示す．以上の結果により、歯先厚 $l_{ch}=0.3\text{mm}$ 歯先の開口幅 $l_o=0.1\text{mm}$ とした．

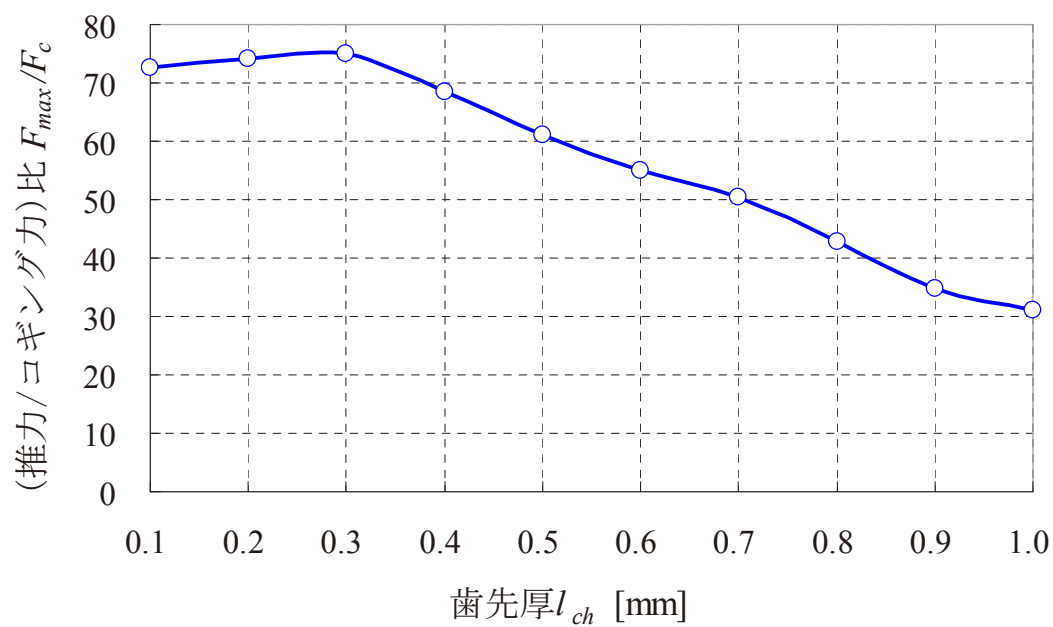
表 4.6 に、設計した固定子と可動子の寸法を纏めた．尚、歯先厚 $l_{ch}=0.3\text{mm}$ 及び、歯先の開口幅 $l_o=0.1\text{mm}$ 以外の寸法も検討している．

表 4.6 設計した LSM の寸法

項目	記号	数値
歯先厚[mm]	l_{ch}	0.3
歯先の開口幅[mm]	l_o	0.1
ラジアル配向磁石の幅[mm]	l_{rm}	1.2
アキシヤル配向磁石の幅[mm]	l_{am}	0.6
可動磁石の厚さ[mm]	l_{ph}	1.0

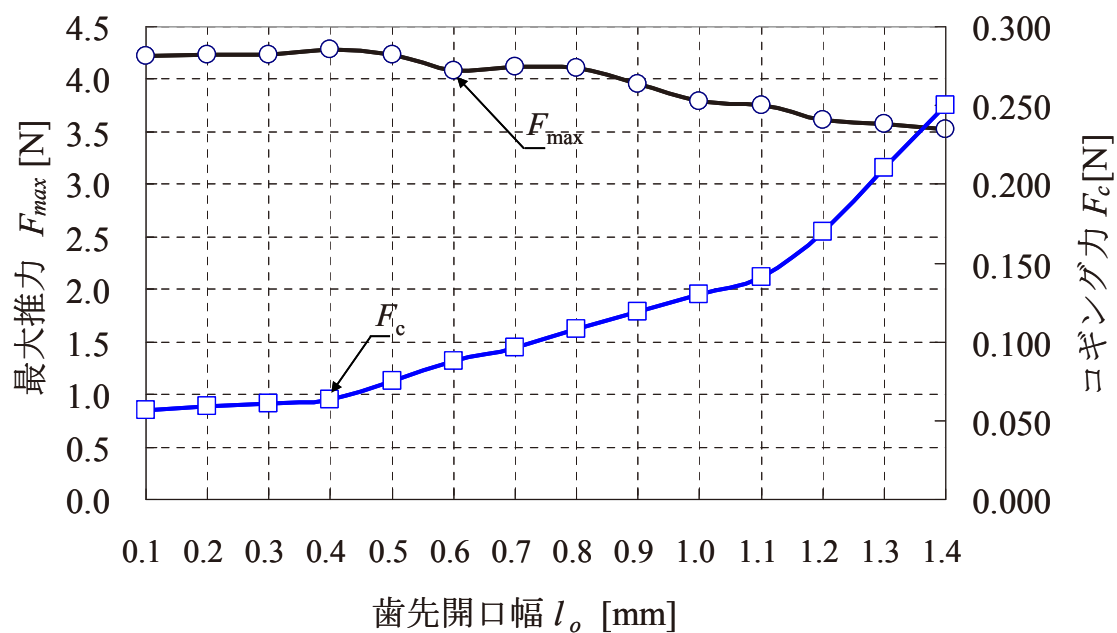


(a) 最大推力，最大コギング力特性

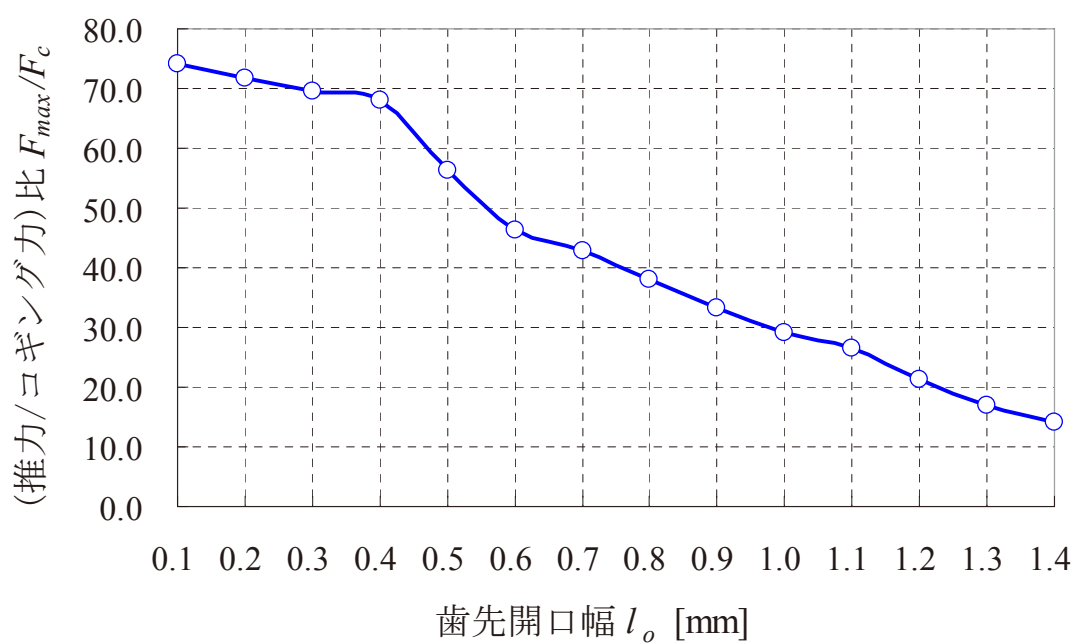


(b) (推力/コギング力)比特性

図 4.6 (推力/コギング力)比による歯先厚 l_{ch} の決定



(a) 最大推力，最大コギング力の特性



(b) (推力/コギング力)比の特性

図 4.7 (推力/コギング力)比による歯先の開口幅 l_o の決定

4.2.5 コイルの寸法

コイルの寸法を決定するにあたり、銅損とコイル抵抗の式によって、コイルの起磁力を導出する。

図 4.8 にコア付 HLSM のコイルの高さ h_{co} を変えた時の推力定数 2 乗密度 G と最大推力 F_{max} の特性を示した。コイルの高さ h_{co} を大きくすると、推力定数 2 乗密度 G が大きくなり、コイルの高さ $h_{co}=1.0\text{mm}$ 以上では減少する傾向を示した。コイル高さが $h_{co}=1.0\text{mm}$ の時、推力定数 2 乗密度は $G=0.029 \times 10^6 [\text{N}^2/(\text{W} \cdot \text{m}^3)]$ で最大値となった。従って、コア付 HLSM のコイル高さ $h_{co}=1.0\text{mm}$ とした。コイル高さ $h_{co}=1.0\text{mm}$ 以上で減少傾向を示したのは、磁石幅が小さくなる事が要因の一つと考える。図 4.9 にコイルの高さ h_{co} における推力定数 2 乗密度 G のコンター図を示す。

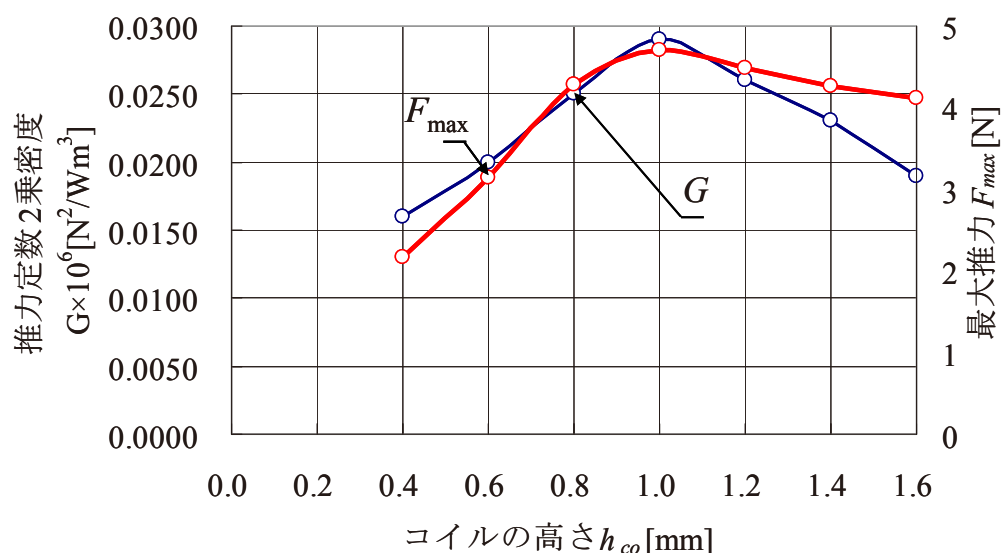
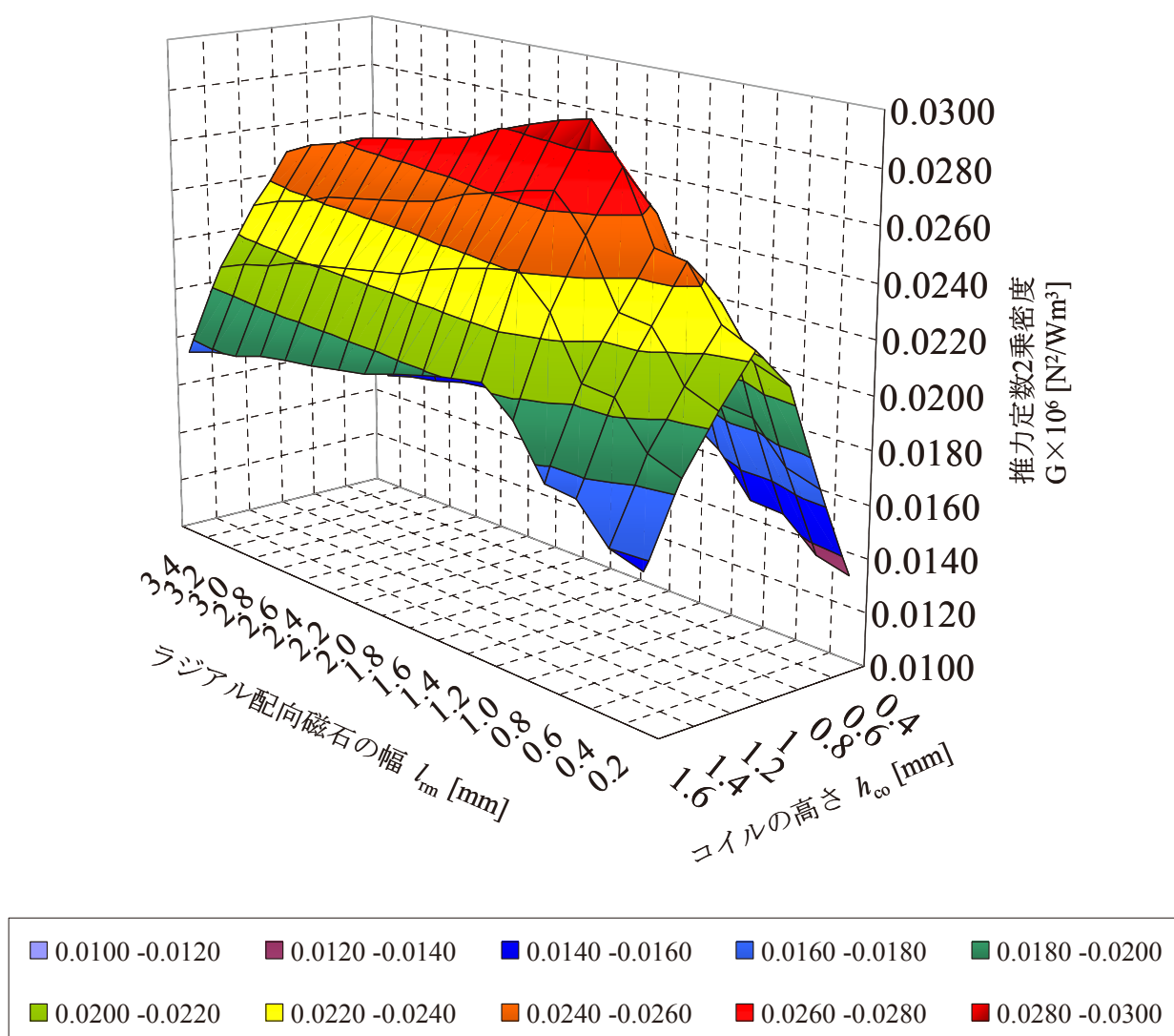


図 4.8 コイル高さによる推力定数 2 乗密度

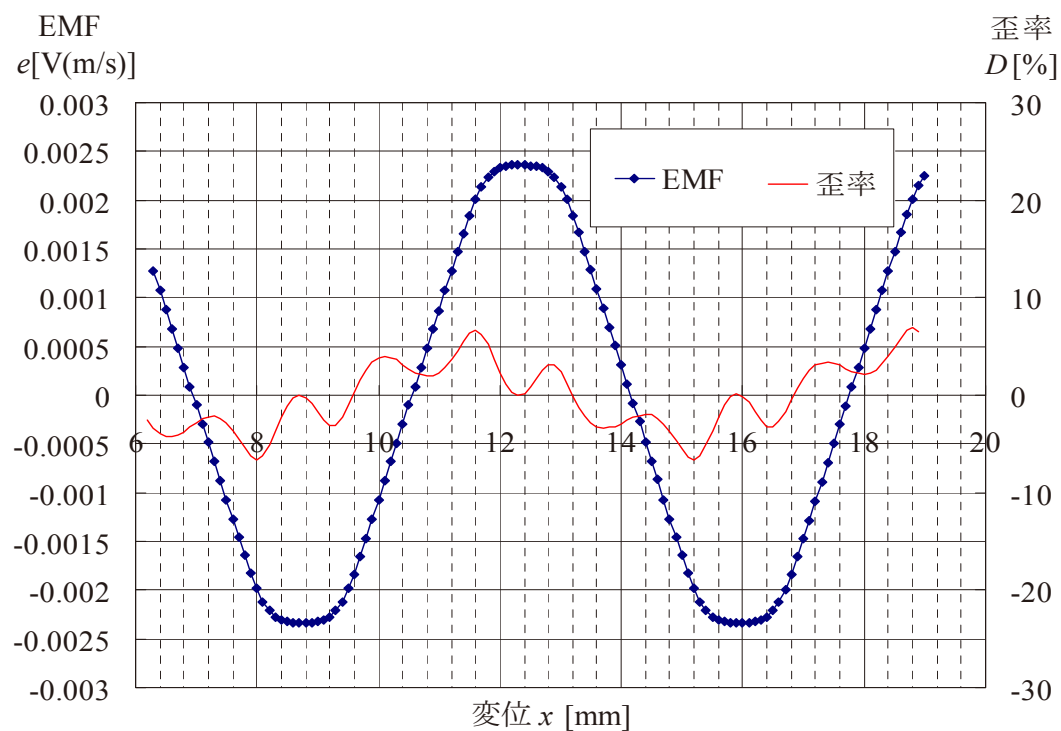


※歯先厚 $l_{ch}=0.3\text{mm}$, 歯先の開口幅 $l_o=0.1\text{mm}$, 可動磁石の厚さ $l_{ph}=1.0\text{mm}$

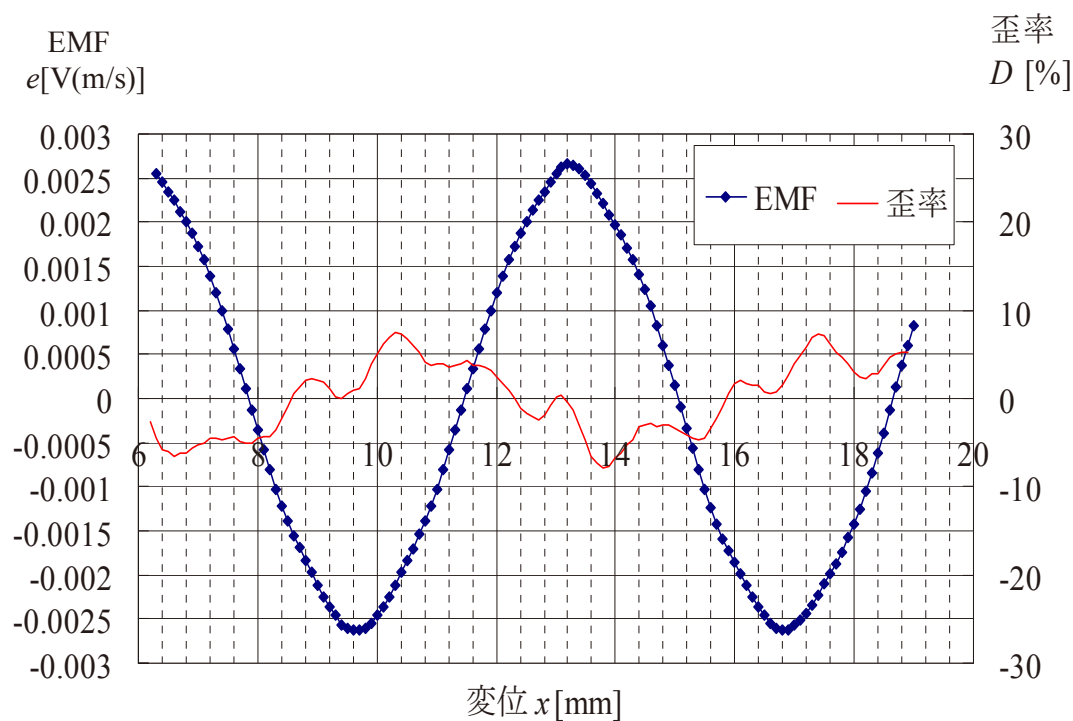
図 4.9 コイルの高さによる推力定数 2 乗密度のコンター図

4.2.6 歪率の低減と低コギング力の検討

4.2.5 項までに、推力定数 2 乗密度 G が最大となる寸法が求まった為、2.2.2 項で述べた歪率の低減手段について検討した。はじめに 2 種類の LSM における歪率の計算結果を図 4.10 に示す。コア付 HLSM は誘起電圧が高いが、歪率はコア付 RLSM よりも高い。



(ア) コア付 RLSM



(b) コア付 HLSM

図 4.10 EMF と歪率

続いて、コア付HLSMにおいて、磁石のアスペクト比を変動させることによる歪率の低減についてまとめる⁽⁴⁻⁷⁾。推力が最も高くなる比率としては、4.2項までに $R:A=2:1$ であることを確認したが、これを基本寸法とし、アスペクト比を変動させることで歪率を算出する⁽⁴⁻⁸⁾。図4.11に比率の定義を示す。

ここに、

ケースⅠ(ベース)・・・ $R:A=2:1$

ケースⅡ・・・・・・・・ $R:A=1:1$

ケースⅢ・・・・・・・・ $R:A=5:1$

ケースⅣ・・・・・・・・ $R:A=1:5$

ケースⅤ・・・・・・・・ $R:A=1:2$

と定義した。

尚、コア付HLSMの歪率の指標としては、コア付RLSMの歪率以下とする。また実際は、0.1mm刻みで磁石寸法(比率)変化させたが、細かな比率変化では変化が少ない為、ここでは5つのケースを抜粋とする。

計算結果を表4.7に示す。アスペクト比の変化によって、歪率は最大10%低減した。ケースⅤが最も歪率が低く、これはエアギャップ中の磁束密度分布の空間高調波が最も抑制された為である。

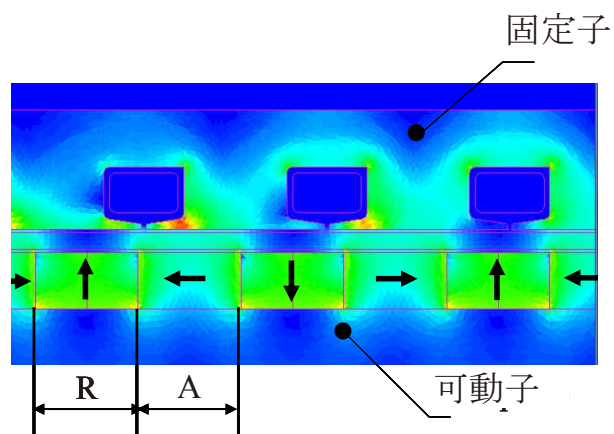


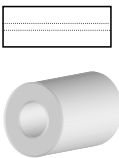
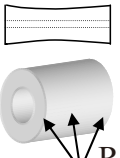
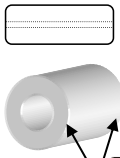
図 4.11 磁石のアスペクト比

表4.7 磁石のアスペクト比による歪率

項目 [単位]	ケース I (ベース)	ケース II	ケース III	ケースIV	ケース V
歪率 D [%]	9.11	8.68	9.05	9.91	6.38

次に、ケース毎に磁石の形状を変更することにより、コギング力の低減の可能性を検討した。磁石の形状の種類について表 4.8 に概要を示す。

表 4.8 磁石形状の種類

	形状 A (標準)	形状 B	形状 C
形状			

計算結果について、図 4.12 にまとめた。コギング力についてはケースⅢの磁石形状 B が最も低く、0.021N となった。一方でケースⅣの磁石形状 A が最も高く、0.098N となった。

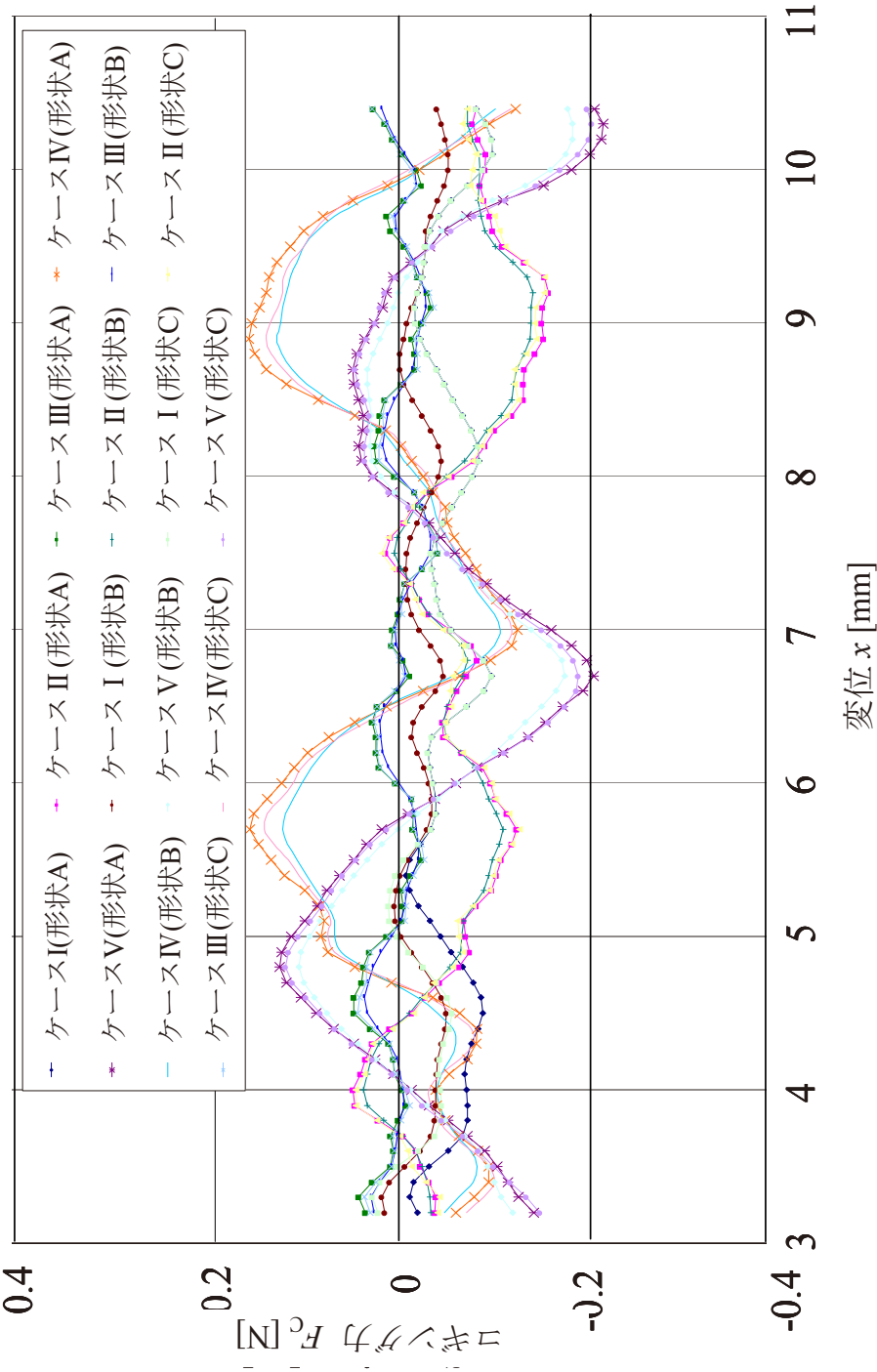


図4.12 コギング力の比較と低減

4.3 LSM の特性比較

4.3.1 寸法の比較

表 4.9 に本手法によるコア付 RLSM, コア付 HLSM における設計寸法をまとめた. ここに示すコア付 HLSM については, 最も推力が高いケース I 形状 A である.

表 4.9 設計寸法

項目[単位]		記号	コア付 RLSM	コア付 HLSM
可動子	ラジアル配向磁石の幅[mm]	l_{rm}	3.6	2.4
	アキシヤル配向磁石の幅[mm]	l_{am}	—	0.6
	磁石の厚さ[mm]	l_{ph}	1.0	1.0
	磁石の外径 ϕ [mm]	l_{mg}	3.0	3.0
	可動子外径 ϕ [mm]	l_{sf}	5.0	5.0
固定子	歯先幅[mm]	l_m	2.1	2.1
	歯先の開口幅[mm]	l_o	0.1	0.1
	歯幅[mm]	l_w	1.8	1.8
	歯先厚[mm]	l_{ch}	0.3	0.3
	ギャップ[mm]	δ	0.4	0.4
	固定子外径[mm]	l_{st}	10.0	10.0
コイル	コイルの高さ[mm]	h_{co}	1.0	1.0
	コイル線径[mm]	ϕ	0.2	0.2
	コイル幅[mm]	ω_c	1.4	1.4
	ストローク[mm]	l_s	30	30
	コイル巻数		114	114
材質	可動軸		S45C	SUS303
	固定ヨーク		35H300	35H300
	可動磁石		Ne-Fe-B	Ne-Fe-B

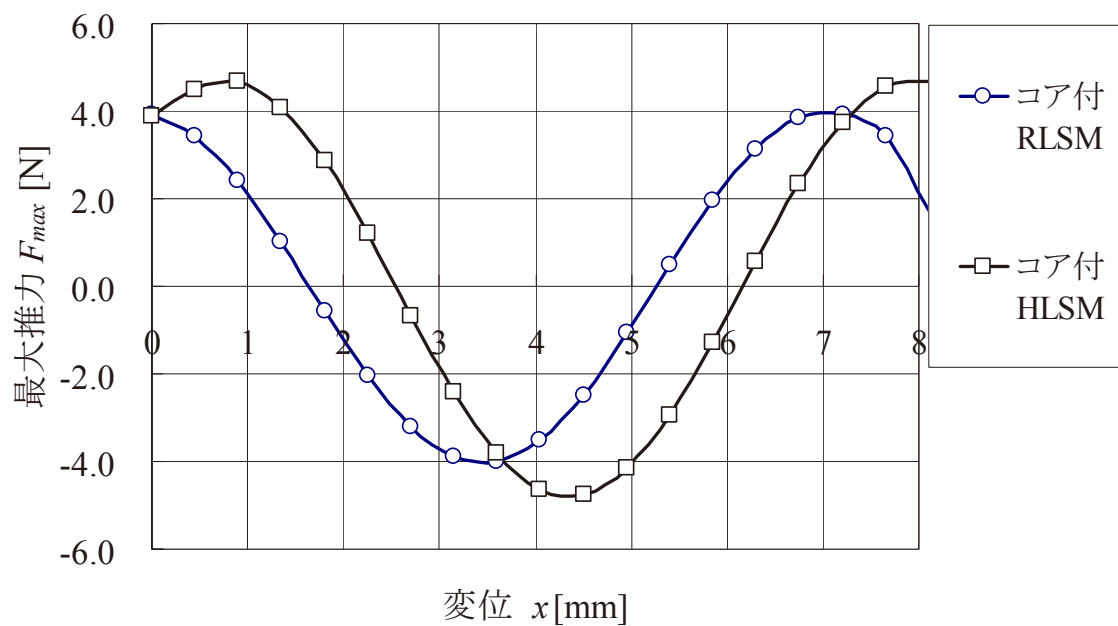
4.3.2 特性比較

表 4.10 に本手法により設計したコア付 RLSM, コア付 HLSM の特性比較を示した。尚, パーミアンス法と FEM による設計値の比較をする意味で, パーミアンス法による計算結果を括弧内に示した。コア付 HLSM においては, 最も最大推力が高い結果となったケースⅠ形状 A と最も歪率及びコギング力が小さくなったケースⅢ形状 B についてまとめた。また, 図 4.13 に設計した 2 種類のリニアモータの推力とコギング力特性をまとめた。コア付 HLSM については, いずれもケースⅠ形状 A の波形である。4.3 項でコア付 HLSM のコギング力低減を検討したが, 最もコギング力の低いケースⅢ形状 B であっても, コア付 RLSM に対して 25%高い。推力は, ハルバツハ磁石配列にすることで, ラジアル磁石配列から 15%向上した。また, 設計値(計算値)として第 2 章の表 2.2 で示す目標値は達成した。

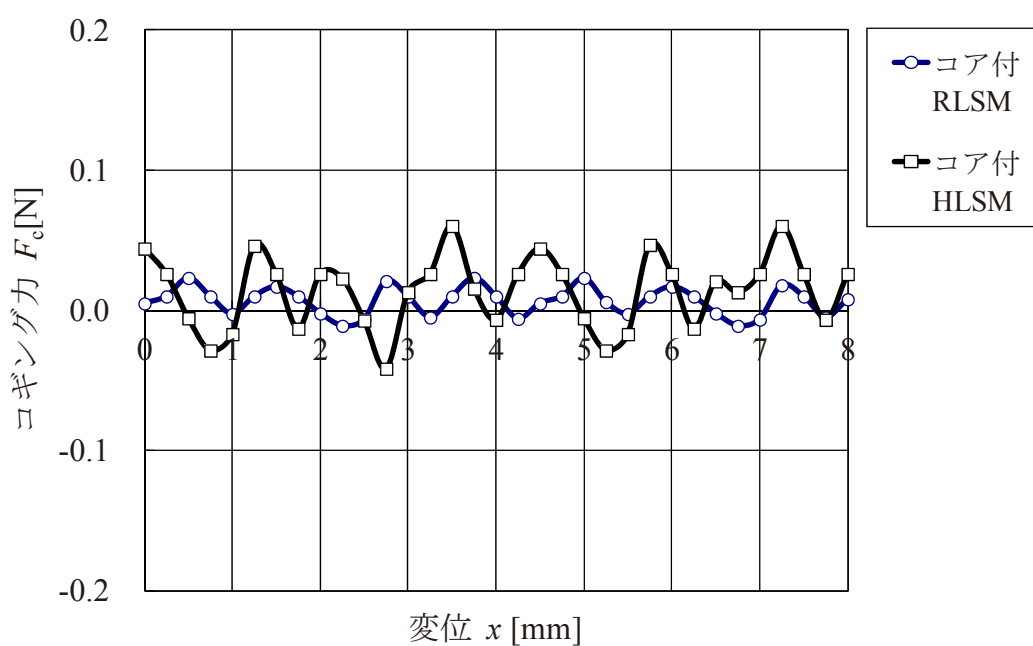
表 4.10 設計した LSM の特性比較

項目[単位]	記号	コア付 RLSM	コア付HLSM	
			ケースⅠ 形状A	ケースⅢ 形状B
定格推力[N]	F_r	1.36 (1.38)	1.59 (1.62)	1.27
最大推力[N]	F_{max}	3.95 (3.98)	4.70 (4.75)	3.73
推力定数[N/A]	K_f	2.72	3.18	2.49
モータ定数[N/ \sqrt{W}]	K_m	2.22	2.65	2.10
歪率[%]	D	6.39	9.11	4.56
コギング力[N]	F_C	0.028	0.057	0.021
(推力/コギング力)比	F/F_C	141	82	178

※コア付 HLSM のケースⅢ形状 B については, FEM のみの計算である。



(イ) 推力特性



(b) コギング力特性

図 4.13 設計したコア付 LSM の特性比較

4.4 コア付 LSM の試作と特性評価

4.4.1 試作

図 4.14 に、試作したコア付 LSM の外観を示した。固定子は、ケース内に圧入により埋め込まれている。可動部には磁石が配置されている。

図 4.15 に、試作した 2 種類の LSM(コア付 RLSM, コア付 HLSM)の寸法を示した。ここでは、コア付 HLSM について述べる。コア付 HLSM は、ケース I 形状 A について試作を行った。コア付 HLSM のバックヨーク厚さ l_{by} は、1.0mm とした。推力を大きく、コギング力を小さくするため、FEM による詳細検討の結果、歯先幅 l_m は 2.1mm, 歯先の間口隔 l_o は 0.1mm, 歯幅 l_w は 1.8mm, 歯先厚 l_{ch} は 0.3mm とした。コイルによる起磁力を大きくするため、コイルの高さ h_{co} は 1.0mm とした。

可動部の寸法は、ラジアル配向磁石の幅 l_{rm} は 1.2mm, アキシアル配向磁石の幅 l_{am} は 0.6mm, 磁石の厚さ l_{ph} は 1.0mm とした。尚、磁石についてはメーカーから着磁品を購入している。コア付 HLSM における磁石の結合には、エポキシ系接着剤を用いた。表 4.11 に試作品寸法一覧をまとめた。

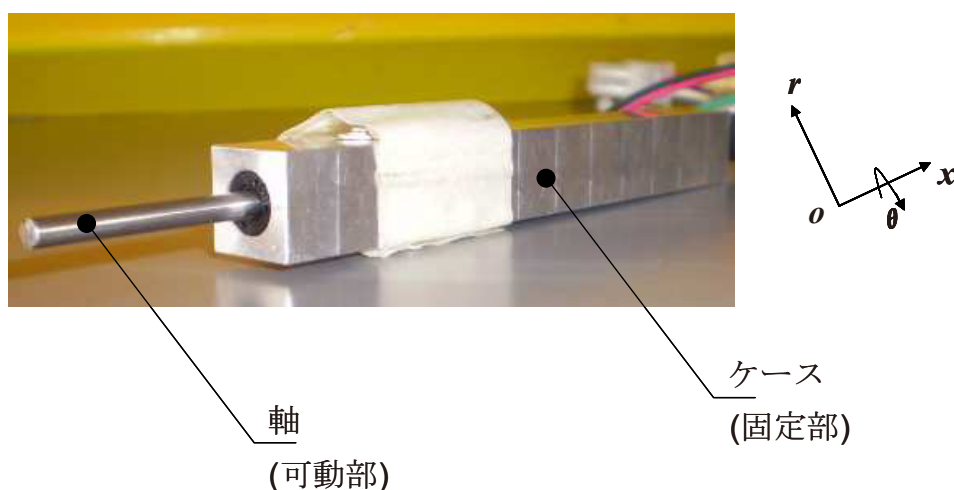
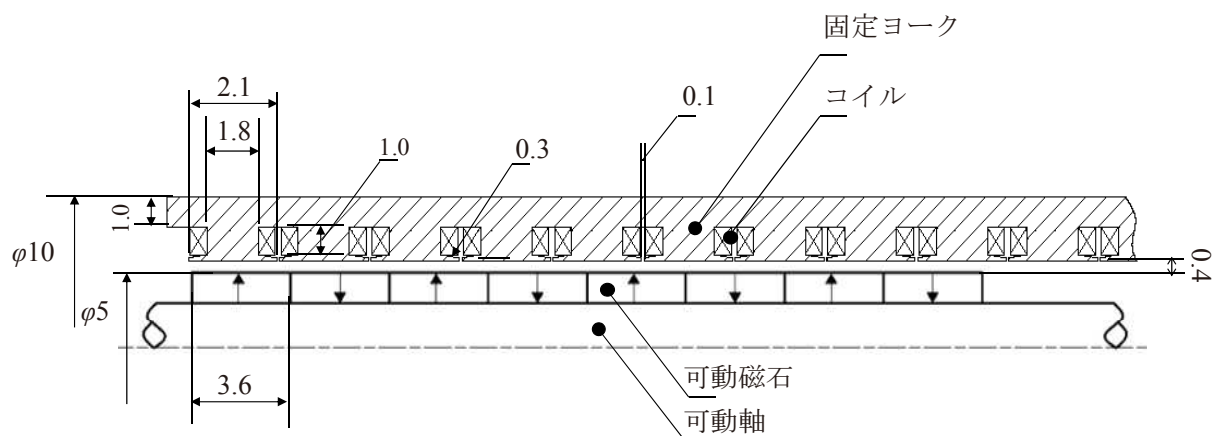
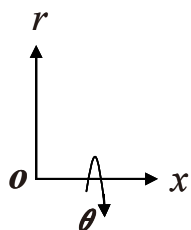
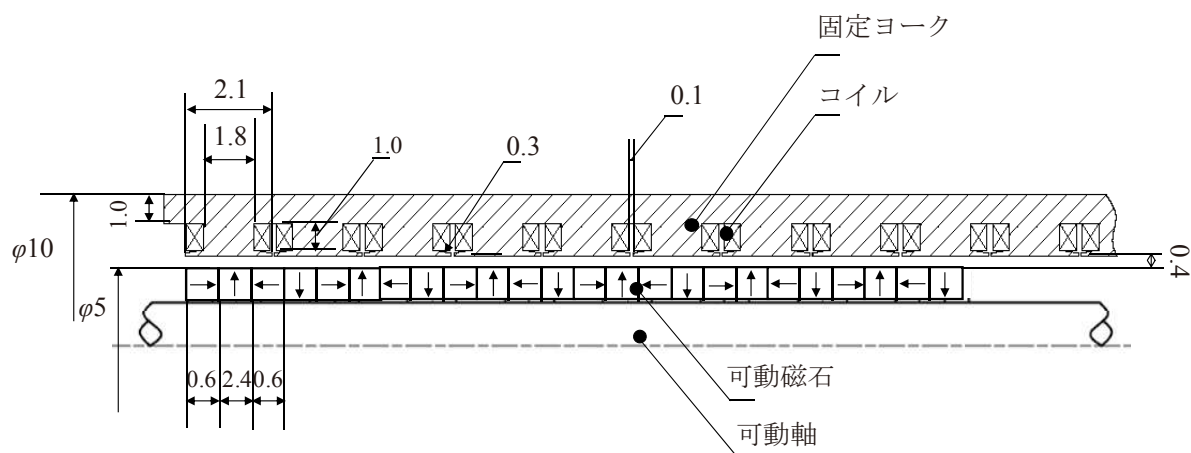


図 4.14 試作したコア付 LSM の外観



(c) コア付 RLSM の寸法



(d) コア付 HLSM の寸法

図 4.15 試作したコア付 LSM の寸法 [mm]

表 4.11 試作品寸法一覧

項目[単位]		記号	コア付 RLSM	コア付 HLSTM
可動子	ラジアル配向磁石の幅[mm]	l_{rm}	3.6	2.4
	アキシヤル配向磁石の幅[mm]	l_{am}	—	0.6
	磁石の厚さ[mm]	l_{ph}	1.0	1.0
固定子	歯先幅[mm]	l_m	2.1	2.1
	歯先の開口幅[mm]	l_o	0.1	0.1
	歯幅[mm]	l_w	1.8	1.8
	歯先厚[mm]	l_{ch}	0.3	0.3
	ギャップ[mm]	δ	0.4	0.4
	固定子外径[mm]	l_{st}	10	10
コイル	コイルの高さ[mm]	h_{co}	1.0	1.0
	コイル線径[mm]	ϕ	0.2	0.2
	コイル幅[mm]	ω_c	1.4	1.4
	コイル巻数		114	114
材質	可動軸		S45C	SUS303
	固定ヨーク		35H300	35H300
	可動磁石		N39MR	N39MR N40MA

4.4.2 静推力・コギング力特性

3章に示した基礎特性測定システムを構成し、静推力及びコギング力を測定する。取付け台座に取り付けられた LSM の軸を、ボールねじ駆動により直線運動する駆動台に配された軸とカップリング締結をしている。その為、機械的摩擦分が存在する。測定の際には、測定値から摩擦分を差し引く。図 4.16 に静推力の測定結果、図 4.17 にコギング力の測定結果を示した。定格電流 100%から定格比 330%の範囲において、可動部の速度 $v=10\text{mm/s}$ で推進させた時の、最大静推力値である。ともに定格比 300%を超えてから飽和が始まる。コギング力については、コア付 HLSTM>コア付 RLSM となった。

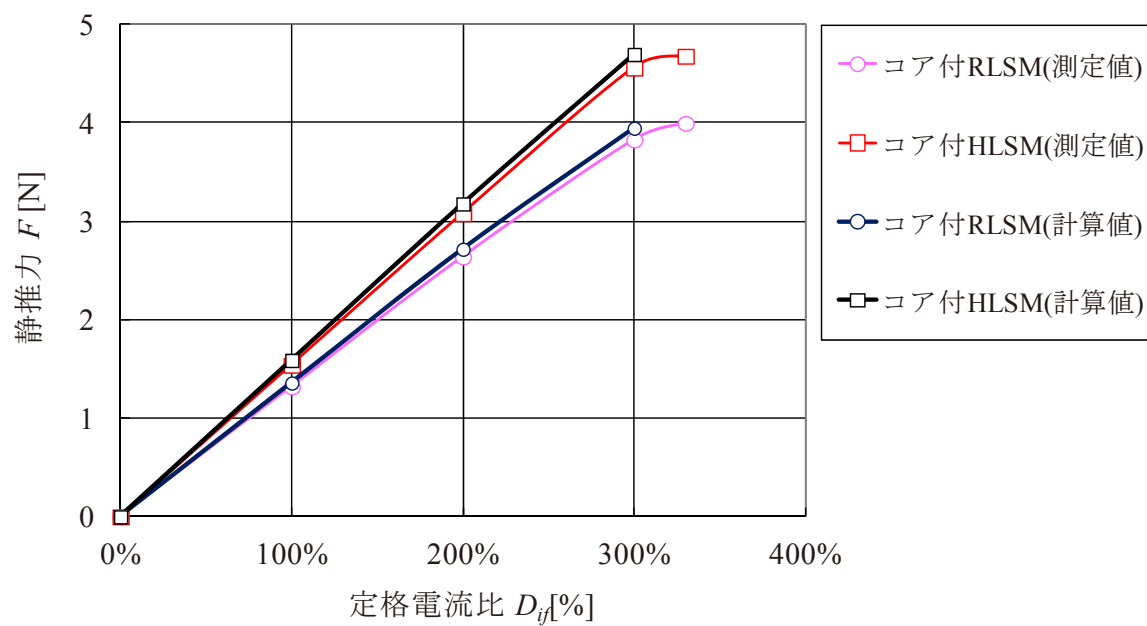


図 4.16 静推力測定結果

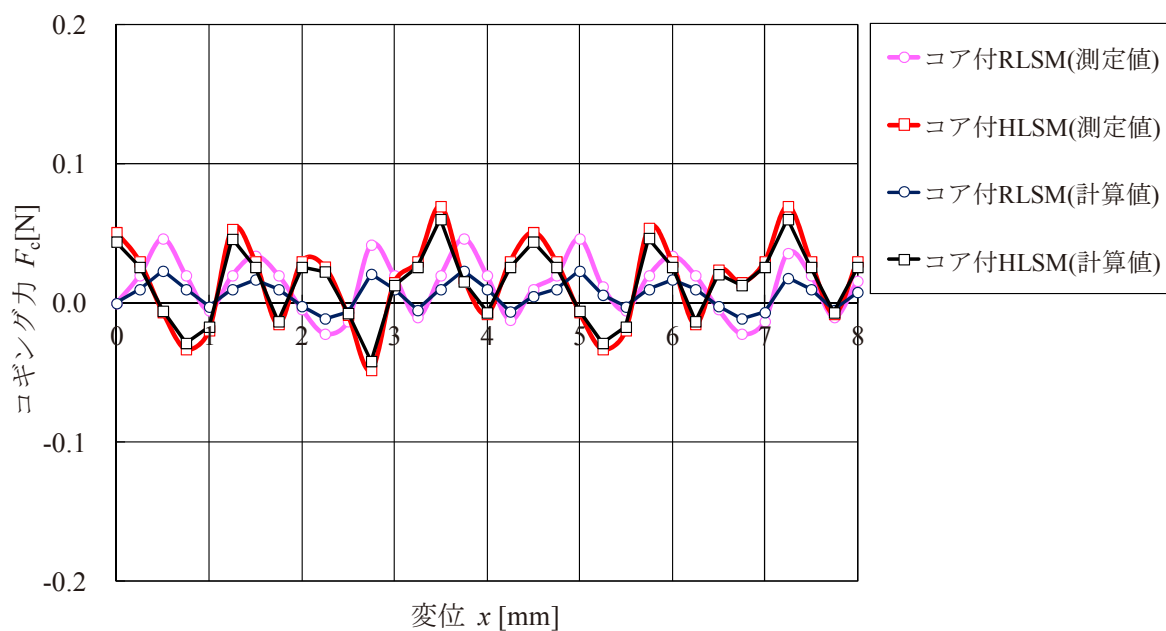


図 4.17 コギング力測定結果

4.4.3 設計値と測定値の比較

表 4.12 に目標値及び設計値と測定値の比較を示した。目標値に対する未達成部分を網かけで明記した。コギング力及び(推力／コギング力)比が未達成となった。推力の測定値は，計算値に対して 3.5～4%低くなった。コギング力については計算値に対し，コア付 RLSM で 0.012N，コア付 HLSM で 0.013N 高くなった。ともに誤差レベルと考える。本研究の設計目標は，最大推力 F_{max} は 4.5N，推力定数 2 乗密度 G は 0.028×10^6 [$N^2/(Wm^3)$]としたが，コア付 HLSM において計算値・測定値ともに達成した。

表 4.12 設計値と測定値の比較

項目[単位]	記号	コア付RLSM			コア付HLSM		
		目標値	計算値	測定値	目標値	計算値	測定値
定格推力[N]	F_r	1.30	1.36	1.32	1.50	1.59	1.54
最大推力[N]	F_{max}	3.90	3.95	3.92	4.50	4.70	4.56
推力定数[N/A]	K_f	2.60	2.72	2.64	3.00	3.18	3.08
モータ定数[N/√W]	K_m	2.20	2.22	2.21	2.54	2.65	2.57
推力定数2乗密度 [$N^2/(Wm^3)$]	$G \times 10^6$	0.024	0.024	0.024	0.028	0.029	0.029
コギング力[N]	F_C	0.03	0.028	0.04	0.03	0.057	0.07
(推力/コギング力)比	F/F_C	130	141	98	150	82	65

第4章の参考文献

- (4-1) 仲岩浩一, 田代晋久, 脇若弘之, 細澤和司, 飯島邦彦: ペンシルサイズ $\phi 10$ コア付円筒リニアモータの磁石配列違いにおける設計, 第32回日本磁気学会学術講演会講演論文集, p.111, 2008.
- (4-2) 富沢文基, 田代晋久, 脇若弘之, 仲岩浩一, 青柳典明, 城下健治: 磁石埋込型クロールリニア同期モータの高推力, 低コギング力化, 電気学会回転機研究会資料, pp.37-40, 2010.
- (4-3) Koichi Nakaiwa and Hiroyuki Wakiwaka: Analysis of Distortion Factor of Three Phase Linear Synchronous Motor, PIERS Proceedings, Taipei, pp.584-588, 2013.
- (4-4) 五十嵐一: 電磁界解析による設計最適化: Computer-Aided Invention に向けて, 電気学会誌 Vol.134 No.10, pp.700-703, 2014.
- (4-5) Lee Sung-Q, Park Kang-Ho, Paek Mun-Cheal, Kang Kwang-Yong, "Halbach Magnet Array Based Focusing Actuator for Small-Form-Factor Optical Storage Device" Published by the Japan Society of Applied Physics through the Institute of Pure and Applied Physics Jpn J Appl Phys 45(2B), p.1131-1136, 2006.
- (4-6) 柿原正伸, 星俊行, 鹿山透: 高推力密度コア付きリニアモータの開発, 電気学会論文誌D, Vol. 132, No.4, pp. 480-486, 2012.
- (4-7) Koichi Nakaiwa, Hiroyuki Wakiwaka, Kuniyoshi Tashiro: Analysis of Three Phase Linear Synchronous Motor Distortion Factor, Materials Science Forum journal, Applied Electromagnetic Engineering for Magnetic, Superconducting, Multifunctional and Nano Materials, pp.239-244, 2014.
- (4-8) 仲岩浩一, 脇若弘之, 田代晋久: 小型円筒リニアモータの推力と歪率に関する研究と考察, 日本 AEM 学会誌 Vol. 22 No.2, pp.238-242, 2014.

第5章 あとがき

5.1 ペンシルサイズ円筒形リニア同期モータの

動作原理と設計概論

第2章では、ペンシルサイズ円筒形リニア同期モータの動作原理と設計概論についてまとめた。本研究における4種類のリニア同期モータの基本構造と磁気回路と特徴について述べ、また駆動・位置検出をする為のリニアセンサについて述べた。更に、ペンシルサイズ円筒形リニア同期モータの特性評価をする為の指標と目標仕様を示した。

5.2 コアレス LSM の設計

第3章では、固定子コアレスタイプにおける、パーミアンス法と有限要素法(FEM)を用いた高推力化の検討とし、可動子及びコイル寸法の設計を行った。以下に第3章で示したことをまとめた。

- (1) 計算結果では、コアレス HLSM の推力はコアレス RLSM より 20%高い結果となった。
- (2) 測定結果でも、コアレス HLSM の推力はコアレス RLSM より 20%高い結果となった。
- (3) 計算値では、コギング力はコアレス HLSM, コアレス RLSM とともに 0.01N であり、ほぼ 0 に近い。測定値でも 0.02N であり、組立誤差の影響含め、コギング力は限りなく 0 に近いと考える。
- (4) コアレス HLSM において、可動磁石の厚さ l_{ph} を厚くすると最大推力は向上するが、1.0mm を超えると、低下する。また、ラジアル磁石の幅 l_{rm} を広げると最大推力は高くなるが、 $l_{rm}=1.8\text{mm}$ でピークを示し、1.8mm 以上では推力は低下の一途をたどる。
- (5) コアレス HLSM において、コイルの高さ h_{co} を高くすると推力定数 2 乗密度 G は大きくなるが、 $h_{co}=1.4\text{mm}$ 以上では減少傾向を示す。磁石幅が小さくなることが要因の一つと考える。
- (6) 推力の測定結果はコアレス RLSM, コアレス HLSM とともに、計算値よりも 30%低い結果であった。要因として考えられるのは、設計時(計算値)では磁

石の残留磁束密度を $B_r=1.29\text{T}$ としていたが、実際に製作納入された現品が製作サイドの着磁問題により、 $B_r=1.04\text{T}$ であった為と考える。また残留磁束密度を $B_r=1.04\text{T}$ とし、FEM による推力の再計算を行った結果、測定値との差異はコアレス RLSM で 3.4%、コアレス HLSM で 3.7%あった。また評価指標である推力定数 2 乗密度 G で比較した時、再計算値と測定値は整合性が取れる結果となった。尚、4 章で述べたコア付タイプでは、この問題はクリアされた。

5.3 コア付 LSM による高推力密度化・低コギング力の検討

第4章では、パーミアンス法と有限要素法(FEM)を用いた高推力・低コギング力の検討とし、可動子、固定子、コイル寸法の設計を行った。以下に第4章で示したことをまとめた。

- (1) 計算結果では、コア付 HLSM の推力はコア付 RLSM より 15%高い結果となった。
- (2) 測定結果では、定格電流 100%から定格比 330%の範囲において、可動子の速度 $v=10\text{mm/s}$ で推進させた時、定格比 300%を超えてから飽和し始める。また測定結果から、コア付 HLSM の推力はコア付 RLSM より 15%高い。
- (3) コギング力は、計算値ではコア付 RLSM が 0.028N 、コア付 HLSM では 0.057N であり、 0.03N 程度高くなった。測定値ではコア付 RLSM で 0.04N 、コア付 HLSM で 0.07N となった。いずれも設計誤差範囲内であるとともに、計算結果と同様コア付 HLSM はコア付 RLSM よりも 0.03N 高い結果となった。
- (4) コア付 HLSM において、可動磁石の厚さ l_{ph} を厚くすると最大推力は向上するが、 1.0mm を超えると、低下する。また、ラジアル磁石の幅 l_{rm} を広げると最大推力は高くなるが、 $l_{rm}=1.2\text{mm}$ でピークを示し、 1.2mm 以上では推力は低下をたどる。
- (5) コア付 HLSM において、歯先厚 l_{ch} を広げると最大推力は向上するが、 0.3mm を超えると、低下する。コギング力については、歯先厚 l_{ch} を広げるほど高くなる。(推力/コギング力)比では、歯先厚 $l_{ch}=0.3\text{mm}$ で最大を示す。
- (6) コア付 HLSM において、歯先の開口幅 l_o を広げると最大推力は向上するが、 0.4mm を超えると、低下する。コギング力については、歯先の開口幅 l_o を広げるほど高くなる。(推力/コギング力)比では、歯先の開口幅 $l_o=0.1\text{mm}$

で最大を示す.

- (7) コア付 HLISM において, コイルの高さ h_{co} を高くすると推力定数 2 乗密度 G は大きくなるが, $h_{co} = 1.0\text{mm}$ 以上では減少傾向を示す. 磁石幅が小さくなることが要因の一つと考える.
- (8) コギング力の優位性は, コア付 RLISM > コア付 HLISM となる.
- (9) 歪率はコア付 RLISM の方が低い, コア付 HLISM 磁石のアスペクト比を変更, 磁石形状を変更する事で, 歪率が増減する事を示した. 結果的に磁石のアスペクト比を $R:A = 5:1$ とし, 磁石の端部から中央に向かってフィレット形状にする事で, コア付 RLISM よりも歪率が低くなった. これは, エアギャップ中の磁束密度分布の空間高調波が最も抑制される為である.
- (10) 市場で量産されている同体格同ストロークの LSM 以上の推力定数 2 乗密度を目標値としたコア付 HLISM において, 計算及び実機評価で目標を達成する $G=0.029 \times 10^6 [\text{N}^2/(\text{Wm}^3)]$ が得られた. この値を現在市場量産化されている同体格同ストロークの円筒形リニアモータにおいて, 最も推力定数 2 乗密度が高い物と比較した時, 1.25 倍の数値となる.

5.4 市場品との仕様比較

- (1) 推力定数 2 乗密度において, 目標を達成したコア付 HLISM を市場品(他社カタログ品)の仕様と比較したものが表 5.1 である. モデル A,B,C は他社製品であり, いずれも巻線部分はコアレスである. モデル B は市場で最もシェアの高い量産品であるが, 今回のコア付 HLISM(試作品)は, 最大推力で 2 倍程度上回っている. 一方で, 2014 年に登場したモデル C はコア付 HLISM(試作品)と推力が拮抗しており, 現時点ではコア付 HLISM が勝っているものの, モデル C のコギング力はカタログで謳われる限り, 理論上 0 であり, 強力なライバルになり得る.

表 5.1 市場品(他社カタログ品)とコア付 HLSM の仕様比較⁽⁵⁻¹⁾

項目[単位]		記号	コア付HLSM		モデルA *1	モデルB *2	モデルC *3
			ケースⅠ 形状A (試作品)	ケースⅢ 形状B			
外形(体格)[mm]		—	φ 10(□12)		φ 16	φ 10	φ 10 (◇16)
ストローク[mm]		x	30				
歪率[%]		D	9.11	4.56	—	—	—
推力[N]	定格	F_r	1.59	1.27	2.5	0.5	1.2
	最大	F_{max}	4.70	3.73	—	2.1	4.0
コギング力 [N]		F_c	0.057	0.021	0 (理論値)	0 (理論値)	0 (理論値)

5.5 量産化に向けた検討

5.5.1 温度特性

本研究のリニアモータにおける，モータコイル温度許容上限値は F 種⁽⁵⁻¹⁾である $\Delta T_c = 155 \text{ deg}$ とする．尚，F 種⁽⁵⁻²⁾については，本リニアモータの仕様ならびに産業用途のニーズにより決定した．

図 5.1 に示すリニアモータの固定子コイル部分にモールド剤(東都レジン EC1010)を注入する．モールド剤を注入することで放熱性が良くなる為，モータコイル温度上昇を低減させることができる．

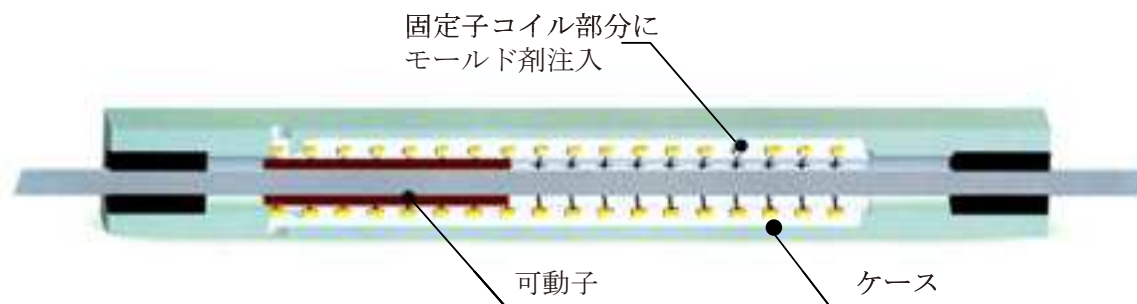


図 5.1 熱試験の準備

可動部の速度 $v = 10\text{mm/s}$ で正逆方向に推進させ、通電電流は $0.71\text{A}(0.5\text{Arms})$ とした。放熱板(□150×T5 アルミ)はケース前方に取り付けている。モータ表面は無塗装の条件にて、各測定部の温度上昇値とモータコイル飽和温度 ΔT を測定する。温度上昇値の測定は熱電対にて行った。コイル温度上昇値については、抵抗法により行った。式(5.1)に抵抗法による温度上昇を求める式を示す^{(5-3) (5-4)}。 0°C 及び $t^\circ\text{C}$ における抵抗をそれぞれ R_0 及び R_t とすれば、次式のような関係がある。

$$R_t = R_0(1 + \alpha_0 t) \quad [\Omega] \quad (5.1)$$

ここに、 t : LSM に通電してからの時間 [min]

α_0 : 導体の抵抗温度係数($=1/234.51/^\circ\text{C}$) [$1/^\circ\text{C}$]

従って、 $T_1^\circ\text{C}$ および $T_2^\circ\text{C}$ における抵抗をそれぞれ R_1 および R_2 とすれば、式(5.1)から、 R_1, R_2 について次式が得られる。

$$R_2 = R_1(1 + \alpha_1(T_2 - T_1)) \quad [\Omega] \quad (5.2)$$

$$\alpha_1 = \alpha_0 / (1 + \alpha_0 t_1) \quad [1/^\circ\text{C}] \quad (5.3)$$

コイルの温度上昇 ΔT は、式(5.4)で与えられる。

$$\Delta T = T_2 - T_1 \quad [^\circ\text{C}] \quad (5.4)$$

図 5.2 に熱電対の取付け箇所を示した。

①雰囲気温度

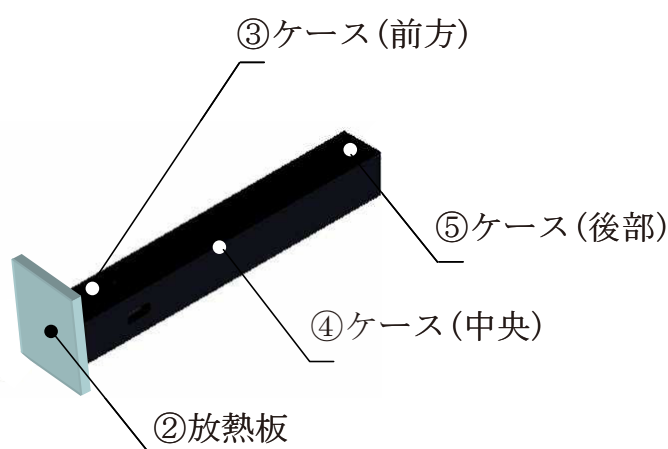


図 5.2 熱電対の取り付け

表 5.2 と表 5.3 に測定結果を示した. 試験開始から飽和までの時間はおよそ 2Hr であった. モータコイル飽和温度 ΔT_s は 106.4 °C であった. これより F 種を満足する結果が得られた.

表 5.2 コア付 HLSM の温度測定結果

測定箇所	飽和温度 T_s [°C]	飽和上昇値 ΔT (K)
①雰囲気温度	22.0	—
②放熱板	40.0	18.0
③ケース (前方)	54.1	32.1
④ケース (中央)	60.3	38.3
⑤ケース (後部)	47.3	36.1
⑥U-V相	106.1	84.1
⑦V-W相	105.6	83.6
⑧W-U相	106.4	84.4

表 5.3 抵抗法によるモータコイル抵抗値

項目	初期抵抗 R_f [Ω]	飽和時抵抗 R_l [Ω]
U-V相	8.44	11.21
V-W相	8.46	11.22
W-U相	8.44	11.24

5.5.2 動作確認

位置決め動作確認を行う為, マコメ研究所製スリーブセンサ : DT-800-L40 を用いて, コア付 HLSM の位置決めを行った. はじめに, スリーブセンサの出力電圧を確認するために, スリーブセンサ単体における変位による出力電圧を測定した. 図 5.3 に接続図を示し, 図 5.4 に変位における出力電圧を示した. 測定値は, 理論値とほぼ不変であった.

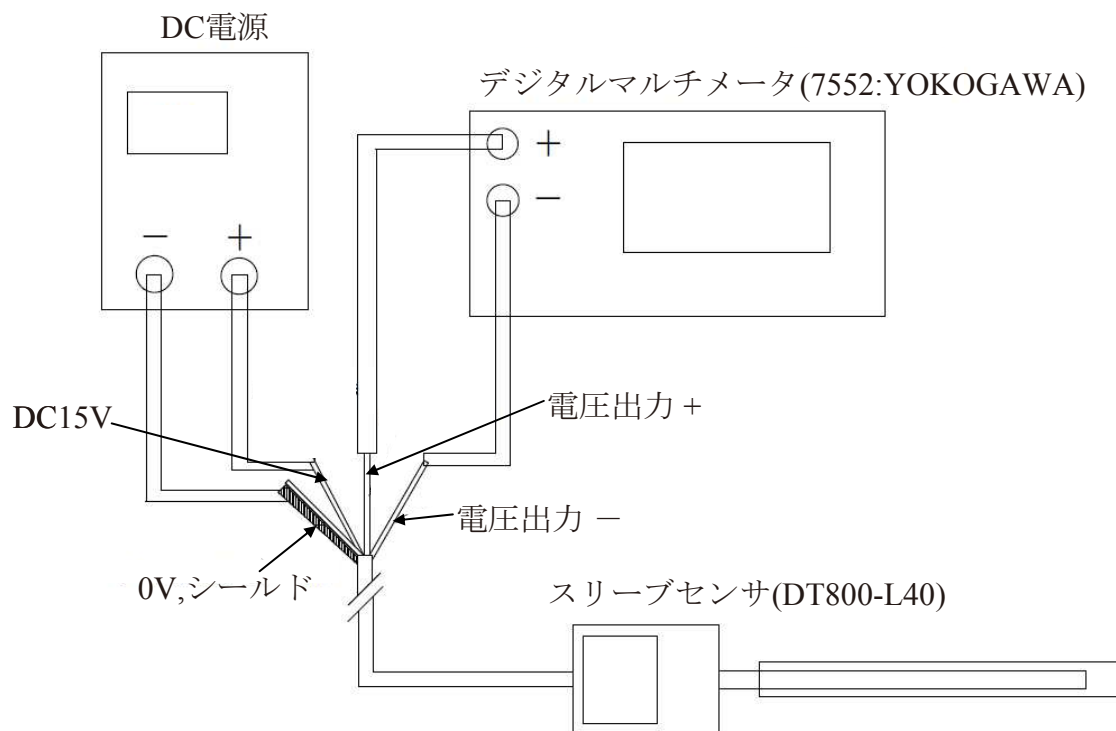


図 5.3 スリーブセンサの出力電圧確認

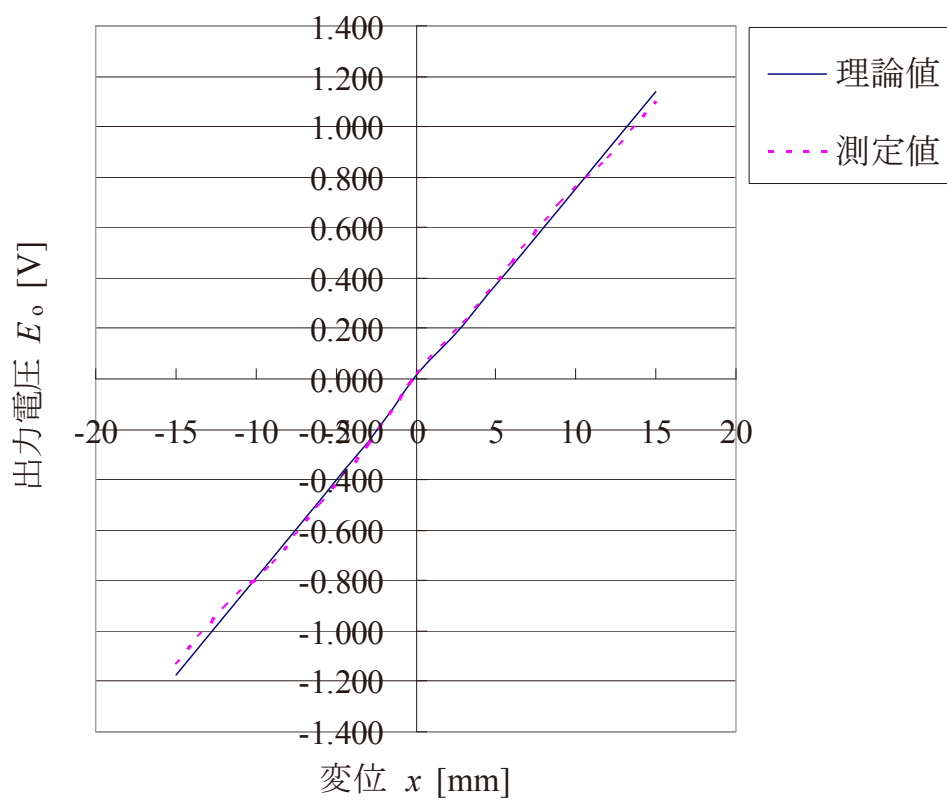


図 5.4 変位による出力電圧

次にスリーブセンサを用いての LSM の駆動を行った。尚，本研究では位置決めが出来るかの確認に留める。制御ドライバは，多摩川精機製 SV-NET：TA8410 をを用いた。図 5.5 に LSM 駆動のシステム構成，表 5.4 に SV-NET：TA8410 の概要と特徴を示す。シリアルデータ通信によってドライバをコントロールし，カウンタで入力とフィードバックを拾う⁽⁵⁻⁵⁾⁽⁵⁻⁶⁾。スリーブセンサのアナログ信号を R/D でデジタル（位置データ）に変換し，指令の数値とスリーブセンサからの位置データ（数値）を比較し，その差が零となるように LSM を動かす仕組みである。

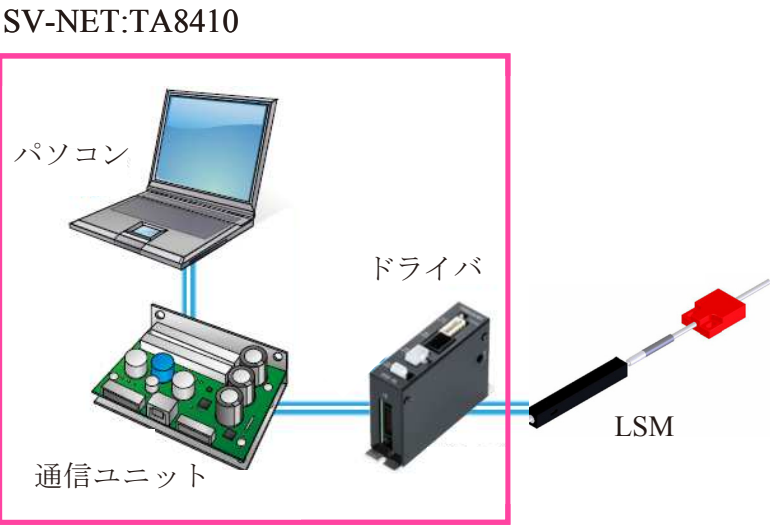


図 5.5 LSM 駆動のシステム構成

表 5.4 SV-NET の特徴

項目	特徴
電源電圧	DC24～48V
制御電源電流	0.2A
制御指令	位置指令入力 SV-NET/パルス指令
	速度指令入力 SV-NET/アナログ指令
	電流指令入力 SV-NET/アナログ指令

5.6 今後の課題

本研究は収束となるが，表 5.5 に 4 種類の LSM を比較した際の優劣を纏めると同時に，今後の課題を述べる．

表 5.5 4 種類の LSM における優劣

項目	コアレス RLSM	コアレス HLSM	コア付 RLSM	コア付 HLSM
推力	△	△	○	○
コギング力	○	○	△	△
推力定数 2乗密度	×	△	△	○
歪率	○	○	△	△
製作性	○	△	△	△

○優 △普通 ×劣

推力については，コア付 RLSM 及びコア付 HLSM が優位である一方で，コギング力については，コアレス RLSM 及びコアレス HLSM が優位である．推力定数 2 乗密度については，コア付 HLSM が最も優れているが，歪率について考慮が必要である．製作の観点では，可動子ではコアレス HLSM，コア付 HLSM が反発する磁石の結合に手間がかかる．固定子の製作では，コア付 RLSM，コア付 HLSM でコア間に巻線ボビンを挟み込む作業があり，手間がかかる．総じて今後の課題を下記に述べる．

(1) 歪率の低減

推力定数 2 乗密度の目標値を達成したコア付 HLSM において，歪率を低減するための手法と成果は示したが，より効果的な低減方法を検討する必要がある．

(2) 更なる小型高推力

今後一層の小型化が要求される可能性がある．上限値から導出した境界線及び今回の研究の結果を用い，更なる小型化・高推力を実現する為の構造を検討する．

(3) 推力定数 2 乗密度の限界値(理想値)

図 5.5 に本研究のコア付 HLISM における推力定数 2 乗密度の限界値を定義した．この限界値の定義は，リング磁石の最大残留磁束密度である 1.43T での着磁実現，厚さ 0.05mm×幅 0.095mm の平角線による α 巻線が今回の固定子サイズで実現できた場合の理想値である．

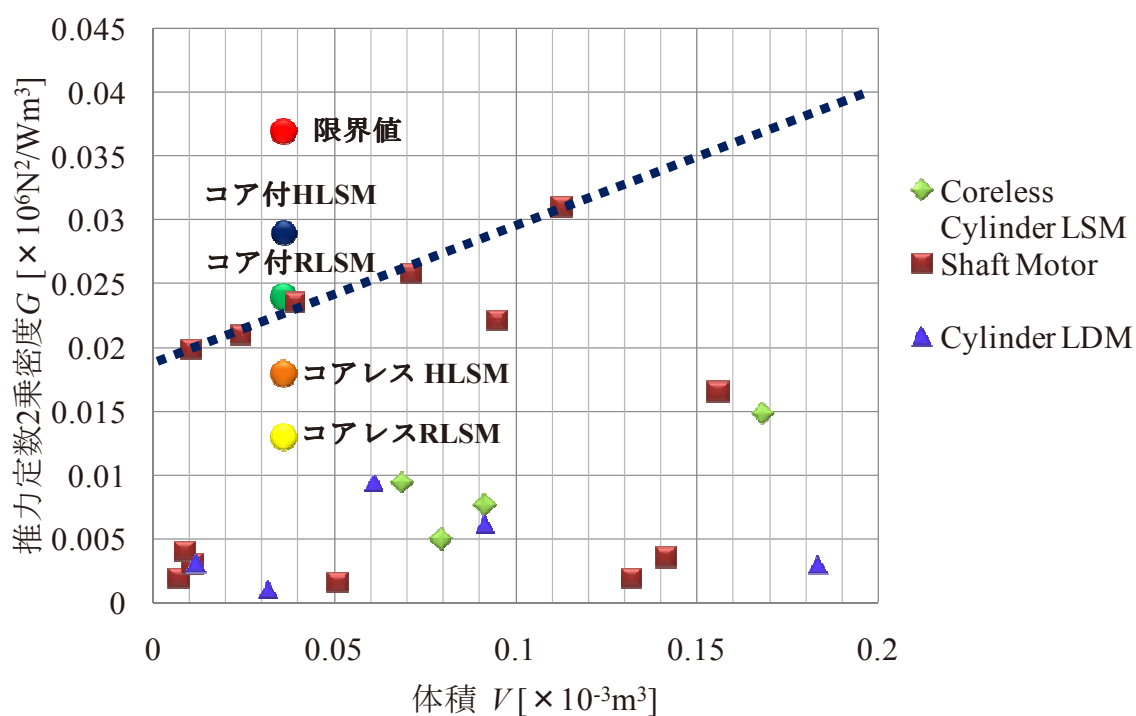


図 5.5 推力定数 2 乗密度の限界値

(4) 低コギング力

今回試作したコア付 HLISM を市場品と比較した際，推力及び推力定数 2 乗密度は業界トップクラスとなるが，コギング力では劣っている為，更に低減する必要がある．本研究の磁気回路を基軸に，新構造のコア付 HLISM を検討する．

第5章の参考文献

- (5-1) Koichi Nakaiwa, Hiroyuki Wakiwaka, Kuniyoshi Tashiro: Analysis of Three Phase Linear Synchronous Motor Distortion Factor, Materials Science Forum journal, Applied Electromagnetic Engineering for Magnetic, Superconducting, Multifunctional and Nano Materials, pp.239-244, 2014.
- (5-2) 磯辺昭二：電気機器設計法，開発社, pp.51-55, 1981.
- (5-3) 中田高義，伊藤昭吉，河瀬順洋：有限要素法による交直電磁石の設計と応用，森北出版，pp.63-70, 1991.
- (5-4) 仲岩浩一：ペンシルサイズ円筒型リニアモータの設計, 信州大学大学院工学系研究課修士論文, pp.62-64, 2008.
- (5-5) 株式会社マコメ研究所：一体型スリーブセンサ DT-800 仕様書, (2015.1 現在), pp.2-12, 2013
- (5-6) 多摩川精機株式会社：SV - NET カタログ ALL Products (2015.1 現在), pp.2-16, 2013

謝辞

信州大学工学部 田代晋久准教授，脇若弘之名誉教授には，ペンシルサイズ円筒形リニア同期モータの高推力密度化に関する研究及び論文の作成において，多大なる懇切丁寧なご指導とご鞭撻を賜った．ここに深甚なる謝意と敬意を表する次第である．

信州大学工学部電気電子工学科 佐藤敏郎教授，水野勉教授，環境機能工学科 中村正行教授，富山大学工学部電気電子システム工学科 大路貴久教授には，研究及び論文に対する査読とご指導ご鞭撻を賜った．ここに深甚なる謝意と敬意を表する次第である．

博士(工学)の学位取得に向けた研究のご許可を頂きました多摩川精機株式会社 萩本博幸会長，萩本範文副会長，関重夫社長，熊谷秀夫常務取締役には，深甚なる謝意と敬意を表する次第である．

多摩川テクノクリエイション菊池良巳社長には，FEMに関する知識と解析のノウハウを伝授いただいた．ここに深甚なる謝意と敬意を表する次第である．

技術品質統括部 矢澤利弘次長，牛山睦章課長，井上公一主任には，本研究へのご理解を頂いた．ここに，深甚なる謝意と敬意を表する次第である．

多摩川精機株式会社技術品質統括部 小久江幸二氏には，磁場解析について貴重なご意見を賜った．ここに心より謝意と敬意を表する次第である．

SMC 株式会社 矢島久志氏，秋田県立大学 片岡康浩氏には，長きに渡りリニアドライブの在り方，考え方をご指導頂いた．ここに深甚なる謝意と敬意を表する次第である．

多摩川精機株式会社モータトロニクス研究所の方々には，入社から 2011 年までの 9 年間，多くの議論や意見を交わし，成長させて頂いた．ここに深甚なる謝意と敬意を表する次第である．

最後に，仕事外(プライベートな事)で体調を崩し，それが原因で闘病生活を送った 2009 年～2011 年の 2 年間を支えてくれた妻，そして父，母，姉に深く感謝申し上げる次第である．また病気が完治した以降の 3 年間を見守ってくださり，信じてくださり，応援して下さった多くの方々に，深甚なる謝意を表する次第である．

ここに学位論文として纏めるとともに，全ての方々への感謝の気持ちをこれからも忘れず，精進していく所存である．

研究業績

【審査付発表論文（レフェリー制のある学術雑誌）】：4 件

- (1) K.Nakaiwa, A.Yamada, K.Tashiro and H.Wakiwaka: Comparison of Thrust Characteristics in Pencil Sized Cylinder-type Linear Motors with Different Magnet Arrays, Journal of the Japan Society of Applied Electromagnetics and Mechanics Vol.17,No.3, pp.481-484, 2009.
- (2) Koichi Nakaiwa, Hiroyuki Wakiwaka and Kunihiisa Tashiro:Thrust Characteristic Comparison of Interior Magnet Type Pencil Size Cylinder Linear Motor, Journal of the Japan Society of Applied Electromagnetics and Mechanics Vol.19,No.3, pp.509-512, 2011.
- (3) Koichi Nakaiwa, Hiroyuki Wakiwaka, Kunihiisa Tashiro: Analysis of Three Phase Linear Synchronous Motor Distortion Factor, Applied Electromagnetic Engineering for Magnetic, Superconducting, Multifunctional and Nano Materials, Materials Science Forum Vol.792,pp.239-244,2014.
- (4) 仲岩浩一,脇若弘之,田代晋久:小型円筒リニアモータの推力と高調波歪みに関する研究と考察, 日本 AEM 学会誌 Vol. 22 No.2,pp.238-242, 2014.

【審査付発表論文(レフェリー制のある国際会議発表論文)】：1 件

- (1) Koichi Nakaiwa and Hiroyuki Wakiwaka: Analysis of Distortion Factor of Three Phase Linear Synchronous Motor, PIERS Proceedings,Taipei, pp.584-588, 2013.

【学位論文のテーマに直接関係しない発表論文】：5 件

- (1) 仲岩浩一：様々な非破壊技術によるリニアモータの探傷比較, 電気学会リニアドライブ研究会資料,LD13-015,pp.29-32,2013.
- (2) 仲岩浩一：特殊分野におけるリニア技術の応用, 電気学会全国大会講演論文 CD,5-S24-5,2014.
- (3) 仲岩浩一：リニアセンサを含む特殊用途向け製品紹介, 電気学会マグネティクスリニアドライブ合同研究会資料, MAG-14-061, LD-14-015, pp.73-76,2014.
- (4) 仲岩浩一,高石陽介,望月大,和多田雅哉,平田勝弘：家電・民生品及び医療・福祉分野におけるリニアモータの応用, 電気学会マグネティクスリニアドライブ合同研究会資料, MAG-14-076,LD-14-030,pp.143-146,2014.
- (5) 仲岩浩一： $\phi 8$ リニアシンクロナスモータの推力特性比較, MAGDA2014 講演論文集,pp.359-360,2014.

【審査なし発表論文】：6 件

- (1) 仲岩浩一,細沢和司,飯島邦彦,山田明倫,田代晋久,脇若弘之: ペンシルサイズ円筒リニアモータの磁石配列による推力特性比較, 電気学会全国大会講演論文集,p.182, 2008.
- (2) K.Nakaiwa, A.Yamada, K.Tashiro, H.Wakiwaka: COMPARISON OF THRUST CHARACTERISTICS OF PENCIL SIZE CYLINDER TYPE LINEAR MOTOR WITH DIFFERENT MAGNET ARRAY, APSAEM08 IN THAILAND, p.65, 2008.
- (3) 仲岩浩一, 田代晋久, 脇若弘之, 細澤和司, 飯島邦彦:ペンシルサイズ $\phi 10$ コア付円筒リニアモータの磁石配列違いにおける設計, 第 32 回日本磁気学会学術講演会講演論文集,p.111,2008.
- (4) 仲岩浩一, 細澤和司, 飯島邦彦, 小久江幸二, 脇若弘之, 田代晋久: ペンシルサイズ円筒リニアモータにおける推力密度向上の為の検討, 電磁力関連のダイナミックスシンポジウム講演論文集,pp.97-98,2009.
- (5) koichi NAKAIWA, koji KOKUE, Hiroyuki WAKIWAKA, Kunihisa TASHIRO: Design of pencilsize cylinder type linear motor, LDIA2009,pp.69-72, 2009.
- (6) K.Nakaiwa, H.Wakiwaka, K.Tashiro " Thrust characteristic comparison of Interior magnet type pencil size cylinder linear motor "APSAEM10 IN MALAYSIA pp-025, 2010.

【その他発表論文】：5 件

- (1) 富沢文基,田代晋久,脇若弘之,仲岩浩一,青柳典明,城下健治: 磁石埋込型クローポールリニア同期モータの高推力, 低コギング力化,電気学会回転機研究会資料,pp.37-40,2010.
- (2) 青柳典明,仲岩浩一,小久江幸二,脇若弘之:産業用小型 AC サーボモータの最適設計, 電気学会全国大会講演論文集, p48,2011.
- (3) 青柳典明,仲岩浩一,小久江幸二,脇若弘之:産業用小型 AC サーボモータの最適構造検討, 電気学会東海支部連合大会講演論文集,K3-6,2011.
- (4) 青柳典明,仲岩浩一,小久江幸二,脇若弘之:産業用小型 AC サーボモータの最適設計と検証, 電気学会モータドライブ研究会資料,pp.29-34,2011.
- (5) 矢島久志,米津武則,仲岩浩一,和多田雅哉: リニアモータのさまざまな実用化例, 電気学会リニアドライブ研究会資料,LD-13-018,pp.43-46, 2013.

【学会授賞関連】4 件

- (1) 日本磁気学会桜井講演賞: 2009
[$\phi 10$ コア付円筒リニアモータの磁石配列違いにおける設計, 第 32 回日本磁気学会学術講演会]
- (2) JAPMED8 Best poster award: 2013

[Analysis of Three Phase Linear Synchronous Motor Distortion factor, JAPMED8 Athens]

(3) 電気学会産業応用部門感謝状：2014

(4) 電気学会優秀論文発表賞(本部表彰)：2014

[様々な非破壊技術によるリニアモータの探傷比較]

【関連特許・実用新案】16 件

特許公報

- (1) コア付円筒状リニアモータの台形型マグネットスキュー構造, 特許第 5352802 号
- (2) 円筒リニアモータのホール素子埋込構造, 特許第 5358791 号
- (3) コア付円筒状リニアモータの台形型マグネットスキュー構造, 特許第 5463453 号
- (4) 磁石埋込型円筒リニアモータ, 特許第 5544538 号

公開公報

- (1) 円筒型リニアモータのコア付ステータ構造, 特開 2009-213253
- (2) 円筒型リニアモータ, 特開 2009-213254
- (3) リニア 3 相モータ用ステータボビン及びその巻線方法, 特開 2009-219185
- (4) 円筒型リニアモータのマグネットスキュー構造, 特開 2010-35296
- (5) 円筒リニアモータのホール素子埋込構造, 特開 2010-141986
- (6) コア付円筒状リニアモータの台形型マグネットスキュー構造, 特開 2010-161878
- (7) コア付円筒状リニアモータの台形型マグネットスキュー構造, 特開 2010-193584
- (8) 円筒型リニアモータ, 特開 2010-288418
- (9) 磁石埋め込み型円筒リニアモータ, 特開 2011-172439
- (10) 円筒型リニアモータ, 特開 2012-223004

出願中

- (1) 円筒リニアモータ及びその位置検出方法, 特願 2013-241788
- (2) 複層配列による dq 比を利用した円筒リニアモータの位置検出装置及び方法, 特願 2014-092335

付録

付録 1 パーミアンス法による計算手順(抜粋)

付録 2 スリーブセンサの制御ブロック図

付録 3 研究レベルにおける開発状況(近年における円筒形リニア同期モータの成果公表)