

# 横磁束形円筒リニア同期モータの設計と磁束集中形界磁による大推力化の提案

申 重燮\*, 古関隆章 (東京大学), 金 弘中 (Sung-Jin Royal Motion Co. Ltd)

The design of transverse flux cylindrical linear synchronous motor and  
proposal of high thrust by flux concentrated type field

Shin Jung-Seob, Takafumi Koseki, (The University of Tokyo)

Kim Houn-Joong, (Sung-Jin Royal Motion Co. Ltd)

## Abstract

Linear motors are being employed increasingly in applications ranging from transportation, manufacturing, and office automation to material processing, health care, and generation systems. However, conventional single-sided linear motors have some disadvantages. One of them is normal attractive force between an armature core and field magnets. Double-sided or coreless configuration can be a substantial solution for reducing strong normal attractive force but their complex structure and thermal problems remain the task for many engineers to solve. In this paper, the structure and operational principle of the proposed flux concentrated type transverse flux cylindrical linear synchronous motor are described. Also, its fundamental characteristics and calculation are both theoretically analyzed and numerically computed using finite element method.

キーワード：リニア同期モータ, 横磁束形モータ, 大推力, 磁束集中形界磁

(Linear synchronous motor, Transverse flux-type motor, High thrust, Flux concentrated type field)

## 1. はじめに

産業用の直動システムは、油圧及び空気圧シリンダ、または回転式モータの動作をボールねじ等で機械的に直線駆動に変換するものが主流だった。1980年代から、物流システムや工場内搬送装置として用いられてきたリニアモータは、高推力化設計技術とセンサ、制御技術の進歩に伴い、工作機械の直動系や高速往復運動を必要とする分野などに広く用いられている。

リニアモータには様々な種類があるが、特に永久磁石を用いるリニア同期モータ(PMLSM: Permanent Magnet Linear Synchronous Motor)は、従来のフェライト磁石系より約 5~10 倍の高い磁気特性を持つ NdFeB 系磁石や SmCo 系磁石等のレアアース系磁石を用いることで、モータの小型化、大推力化、高効率化等を図ることができるというメリットがあり、産業分野で応用されるケースが急速に増えている。

産業分野で利用されている PMLSM には、使用条件・目的にもよるが、一般的に大推力、高位置決め精度(低ディテント力、低推力リップル)、小型、軽量などの特性が要求されている。特に半導体製造装置、液晶検査装置等に XY ステージのような精密駆動装置の駆動源として利用される場合は、IT 産業の急速な発展による電子部品の小型化、ガラス基板の大型化等の傾向からその要求はさらに高まっている。

しかし、現在市販されている PMLSM にはいくつかの技術課題がある。例えば、片面式コア付き PMLSM は比較的に大推力は得られるが、永久磁石とコアの間に推力の数倍となる磁気吸引力が働くため、高い位置決め精度を出すのが難しく支持機構の負担が大きくなる。両面式 PMLSM は電機子側と界磁側が対向する有効面積を 2 層に増やすことで、磁気吸引力を相殺しながらさらに大きな推力を得ることができるが、2 層以上に対向面積を増やすとエアギャップの調整が難しく、構造が複雑になる。コアレス PMLSM は、鉄心を持たないため支持機構の負担が低く原理的には磁気吸引力とディテント力がないので位置決め精度を高めることができるが、大推力化には不向きで熱の放散路を確保する必要がある。

コアレス円筒型 PMLSM は、構造がボールねじ駆動に似ており置き換えが簡単なことと磁石を有効に活用できるため高効率で大推力を得られるメリットはあるが、界磁側が自重でたわむので長ストローク化は難しく、鉄心を持たないため放熱の処理が大事である。また、近年活発に研究が行われている横方向磁束リニア同期モータは、巻線を巻く空間(電気回路)と磁束が流れる空間(磁気回路)が互いに分離されているため、電気回路と磁気回路が同一空間で各々の空間を占める縦磁束形に比べて数種類の形状の設計が可能であり、空間内で極数や極ピッチを自由に調整できるため、高い推力密度を得ることができる。しかし、3次元的な磁束の流れに適した積層形構造の製作が困難である場

合もある。

上記を考慮しながら、本研究では大推力のための磁束集中形界磁を持つ横磁束形円筒リニア同期モータを提案し、その設計と有限要素法による特性の計算を報告する。

## 2. 磁束集中形界磁を持つ横磁束形円筒リニア同期モータ

〈2・1〉設計の考慮点 PMLSM に対する要求性能と現在市販されている PMLSM の特長から次のようないくつかの設計のポイントを定めた。

- (1) 大推力、小型
- (2) 低ディテント力、着磁の自由度が高い
- (3) 組み立て・加工が簡単、低コスト、シンプルな構造
- (4) 置き換え簡単、磁気吸引力相殺、支持が簡単

(4)については、置き換えが簡単なことと界磁側の2次断面モーメントが大きいので機械的な剛性がいいことから円筒型にした。また磁気吸引力が相殺し支持や組み立てが簡単ことから、回転機用汎用電機子鉄心を用いることにした<sup>[1]</sup>。したがって、実際の設計では(1)~(3)に重点を置いた。

〈2・2〉磁束集中形界磁による大推力化 一般的にPMLSMの推力は電機子側に印加される電流とギャップに流れる磁束に比例する。電機子側に同じ電流を与えた場合、着磁を工夫することでギャップに磁束を集中させ大推力を得ることは、よくあるパターンである。その代表的な方法がハルバツハ配置である。ハルバツハ配置は、磁化の向きを変えることによりギャップに流れる磁束を集中させ大推力を得られる。しかし、NdFeB系磁石やSmCo系磁石などのレアアース系磁石を使ってハルバツハ配置を構成するのは難しく、磁石同士を強力な接着剤を使用しなければならず、作業にも手間がかかる。実際に磁石がとれてしまい、失敗したこともある。したがって、できるだけシンプルな形でギャップに流れる磁束を集中させ、大推力を得る方法を考えた。その基本となる発想を図1に示す。

一般的な永久磁石を用いるモータは、一つの磁石で一極を作っている(図1(a))。つまり1対1の構造になっているが、磁石を同じ磁極同士に対向させると反発力が作用することをうまく工夫することができれば、磁石同士を付けるために強力な接着剤を使わなくても、シンプルな形でギャップに流れる磁束を集中させ大推力を得ることができると考えた。また、図1(b)のように向き合わせると磁力線が半々の割合に分かれるため、磁束集中の効果は得られないが、(c)のように電機子の方向に磁石の間隔を広げることにより、より多くの有効磁力線を発生させることができる。これが実現できれば、1対1の構造やハルバツハ配置よりシンプルな形で少量の磁石を用いて同じ推力またはそれ以上の推力を得ることができると期待される。

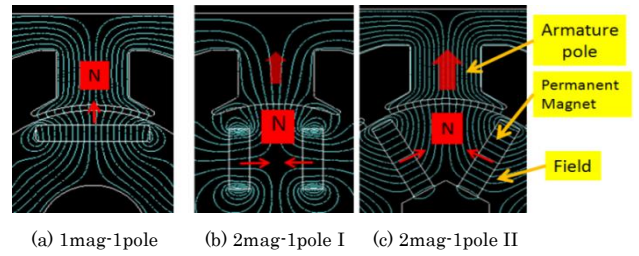


図1 磁束集中の発想

Fig. 1 The concept of flux concentration

〈2・3〉提案モデルの基本原則と特徴 まず、設計の前に図1に示した発想が考えた通りにバランスよく均等な磁気回路ができるかどうかまた磁束集中効果があるかどうかを確認するために、電磁界解析ソフト(JMAG)を用いて有限要素法による提案モデルの2次元解析を行った。提案する磁束集中形界磁を持つ横磁束形円筒リニア同期モータの1コア1界磁の断面とそれに対するエアギャップの磁束密度の解析結果を図2に示す。

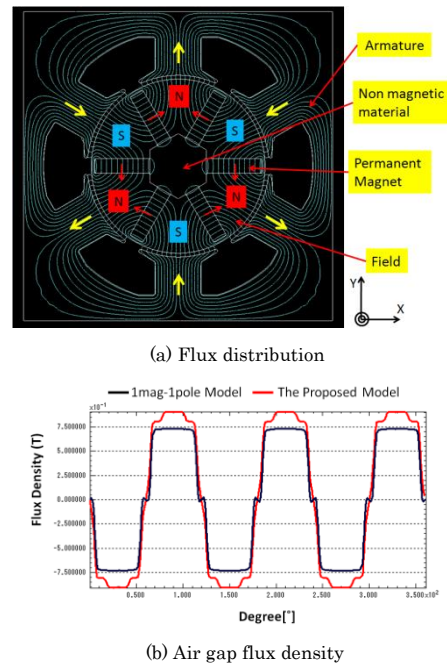


図2 提案モデルの磁束分布とギャップの磁束密度

Fig. 2 Flux distribution and its air gap flux density of the proposed model

提案モデルは図2(a)のように、回転機用汎用電機子鉄心(正確に言えばブラシレスDCモータの電機子鉄心)を用いた電機子側と電機子側の突極数と同じ数の永久磁石が磁束集中の構造を持つ界磁側で構成されてシンプルな構造になっている。進行方向は紙面から奥方向である。したがって、進行方向に対して横方向に流れるので横方向磁束リニア同期モータになる。

中央の軸は漏れ磁束防止と界磁側の支持のために非磁性

体で構成される。対向する磁石によって集中した磁束は電機子極を通してコアのなかで均等に分散し、隣の電機子極から戻ってくる。つまり磁氣的に隣の極は反対極となり、このような磁気回路がバランスよく磁氣的に助け合うような形になっている。また、永久磁石を積層された電磁鋼板に投入すればいいので、固定用の接着剤や器具が簡単になる。電機子コアの突極数と界磁側の永久磁石数の組合せは、磁石端部同士の間隔を大きくしすぎると磁石同士の反発力が弱くなり提案した磁束集中効果が少なくなる。逆に短くしすぎると、磁束集中効果はあるがコアの極に巻けるコイルの量が減ることや電機子コアの歯先間に漏れる磁束が増えることなどを考慮し、6個にした。

以上のような構造によって、片方に引き寄せられる性質がなくなるので電機子と永久磁石の間に働く吸引力が相殺でき、支持が簡単になる。したがって、高効率で大推力が実現できると期待される。

エアギャップの磁束密度の最大値から見ても約0.902[T]の提案モデルは、同じ磁石量で計算した1コア1極モデルの約0.734[T]に比べて、約22.89%の増加効果が見られた(図2(b))。このような特徴を持つ提案モデルの3相電機子の構成と試作モデルを図3に示す。

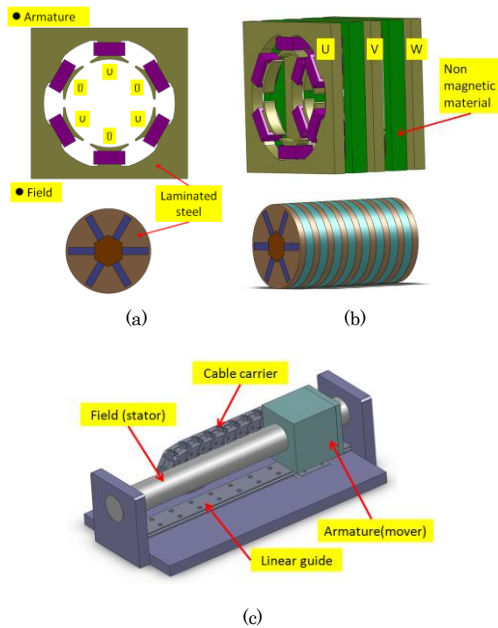


図3 提案モデルの基本構造

Fig. 3 Fundamental configuration of proposed model

先行研究と同じように回転機用汎用電機子鉄心を用いるので、巻き方は基本的に集中巻にした。図2(a)に示したように、積層鋼板と永久磁石で構成された一個の界磁ユニットはN-S-N-S-N-Sの磁極を作るので、図3(a)のようにU相の各コイルには1極おきに電氣的に180°の位相差を持つU相を通電する。また進行方向に対しては3相を考慮し、図3(b)のようにU相と120°、240°の位相差を持つV相と

W相を非磁性体のスペーサと組み合わせて配置することで3相モータになる。永久磁石界磁極は進行方向の隣り合う磁極が相反になるように、非磁性体のスペーサと組み合わせて配置する。つまり、1ユニットおきに同じ磁極になる。非磁性体のスペーサを用いることで、各相は磁氣的に干渉しないで極数や極ピッチを自由に調整できるため、横方向磁束形方式のメリットである設計の自由度を高くし、大きな推力密度を得ることが可能になる。

全体的な構成としては図3(c)のように、両端で固定されたステンレスパイプの中に界磁側ユニットが入っている固定子と非磁性体の箱に電機子側ユニットが入っている可動子で構成される。後に試作モデル製作の時にはリニアガイドやドライバー、リニアスケールなどを加えてリニアシステムを構築する予定である。

### 3. 電機子コアと永久磁石の組合せによる低ディテント力化

PMLSMにおいてディテント力は、推力リップルの原因となり、数十nm以下の精密な位置決め精度が必要な半導体製造装置や液晶検査装置にとっては、大きな問題でありこのディテント力を低減することが大事である。式(3.1)に仮想仕事の原理から求めた提案モデルの電機子1コアに対するディテント力を示す。

$$F_{detent} = -\frac{dW}{dx} = \frac{3\phi_{gmax}^2 g_d}{4\mu_0 R L \tau} \sin\left(\frac{2\pi x}{\tau}\right) \text{ [N]} \quad (3.1)$$

$\phi_{gmax}$ はギャップ磁束の最大値、 $g_d$ はカーター係数によるギャップの長さ、 $\tau$ は極ピッチ、 $R$ 、 $L$ は界磁側の中心軸からギャップまでの半径と進行方向の長さ、 $\mu_0$ は空気の透磁率である。

ディテント力を減らすために、永久磁石のスキューや形状の変更などの様々な方法が検討されているが、それらは場合によっては加工が難しいことや形状が複雑になるなどの可能性がある。提案モデルでは加工しやすく、できるだけ低コストでシンプルなモデルを目的としているため、一般的によく使われている永久磁石のスキューや形状の変更などの手法は考慮しないことにした。式(3.1)によりディテント力は、コアと永久磁石の相対的な位置関係によって周期性(極ピッチと同じ)を持っているため、進行方向に対する電機子コアと永久磁石の組合せを適切に工夫することにより、各コアのディテント力が互いに打ち消し、全体のディテント力を小さくする方向に着目した。

電機子コアと永久磁石の組合せによるディテント力の低減を考慮した場合、一般的に回転式同期モータでは、コギングトルクが低減するために9スロット-8極の組合せを用いることが多い<sup>[2]</sup>。リニアの場合も基本的な原理は回転式同期モータと同じなので、ディテント力を低減する効果

を得るために、9 スロット-8 極の組合せの概念を取り入れた。したがって、提案モデルは9個の電機子コアに8個の永久磁石が対向する構成になり、通電方式はU-U-V-V-W-Wに変更される（ $\bar{U}$ 、 $\bar{V}$ 、 $\bar{W}$ はU、V、Wと180°の位相差を持つ成分）。

#### 4. 推力の検討

ひとつのコアを電流一定の条件で一定速度で動かした時の推力を式(4.1)に示す。

$$F_{thrust} = F_{detent} - pI \frac{d\Phi}{dx} \text{ [N]}$$

$$= \frac{3\phi_{gmax}^2 g_d}{4\mu_0 RL\tau} \sin\left(\frac{2\pi x}{\tau}\right) + \frac{p\pi v NI \phi_{gmax}}{\tau} \sin\left(\frac{\pi x}{\tau}\right) \text{ [N]} \quad (4.1)$$

$N$ はコイルの巻き数、 $v$ は移動速度、 $p$ は界磁1ユニットの永久磁石の数、 $I$ は電機子側のコイルに印加される電流である。上式で表わすように、推力は周期  $2\tau$  の正弦波であり、ディテント力が加わって脈動を起しているような形になっている。無励磁時はディテント力の成分だけ存在するが、実際のフルモデルでは9スロット-8極の組合せよりディテント力は低減されるため、推力脈動は少なくなると期待される。

#### 5. 有限要素法による提案モデルの解析

提案モデルの設計の段階では、古典的な磁気回路法を用いたが、磁気回路法による設計は、モータの細かい形状の変更や材料特性、漏れ磁束などの影響に対応が難しい。したがって、本章では JMAG という電磁界解析ツールを用いて提案モデルの解析を行った。3相を考慮したフルモデルの解析は長時間がかかるため、1相分(3コア)だけ考慮した。また、提案モデルの磁束集中効果の是非を確かめるために、先行研究の方式を比較対象として決めて比較検討する(図4)。比較モデルはサイズ、磁石量、駆動条件などを提案モデルと全部同一にした。

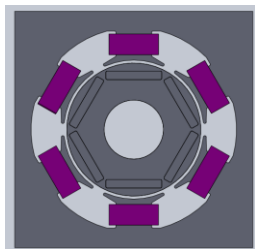


図4 参考モデル

Fig.4 Reference model

〈5・1〉ギャップの磁束密度 2次元解析によるギャップの磁束密度を図5に示す。

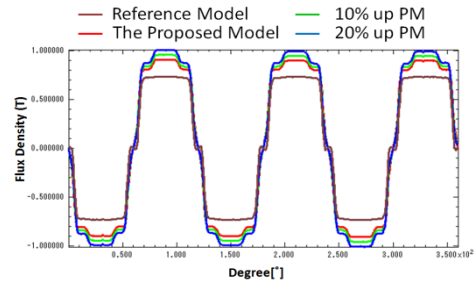
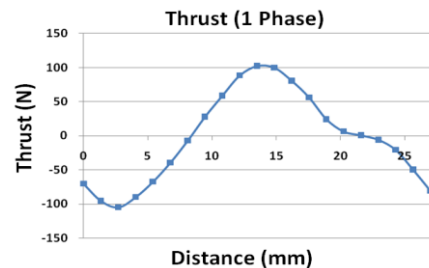


図5 ギャップ磁束密度の比較

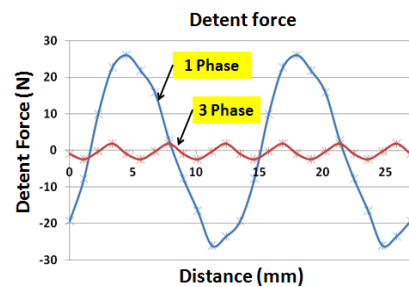
Fig.5 Comparison of air gap flux density

磁束密度の最大値を考慮した場合、提案モデルは磁束集中効果により比較モデル(0.734[T])に比べて同じ磁石量を使った条件で約23.91%増加(0.902[T])した。また、構造上比較モデルは磁石の量を増やすと隣の磁石と重なってしまうので、着磁の自由度には限界があるが、提案モデルは比較的着磁の自由度が高く、磁石の量を増加させて設計することができる。10%増加した場合は約30.65%(0.958[T])、20%増加した場合約37.72%(1.01[T])のギャップ磁束密度が増加し、提案モデルによる磁束集中の効果期待される。図5の結果により、同磁石量の条件での漏れ磁束係数 $k_l$ ( $k_l:2$ 次元解析値による最大ギャップの磁束密度/理論値によるギャップの磁束密度、理論値1.075[T]、2次元解析値:0.902[T])は0.839になる。

〈5・2〉推力、ディテント力 移動距離 $2\tau$  (電気角360°)に対する推力とディテント力の3次元解析結果を図6に示す。



(a) Thrust force



(b) Detent force

図6 提案モデルの静推力とディテント力  
Fig.6 Thrust and detent force of proposed model

5A 流した時の 1 相分の推力は約 102[N]で、3 相分を考慮した場合は 1.5 倍程度の 153[N]となる(図 6(a))。

1 相分の最大ディテント力は 26.3[N]で、多少高調波を含んだ周期 $\tau$ を持つ波形になっている。しかし全体を考慮した場合は、9 スロットー8 極の組合せにより各コアのディテント力は互いに打ち消され 2[N] (推力の約 1.3%) までディテント力を低減することができた(図 6(b))。

〈5・3〉提案モデルの問題点 図 7 は、電流を 0[A]から 15[A]まで 2.5[A]ずつ増加させた時の漏れ磁束係数 $k_l(0.839)$ を考慮した推力(最大値)の理論値と、三次元解析の結果を示す。図 7 より解析値は、電流が 10[A]を過ぎるとモータ内部の磁束密度が増加し鉄心が飽和するため、推力・電流の線形性がなくなる。よって、10[A]の時の定格推力は 102[N]である。

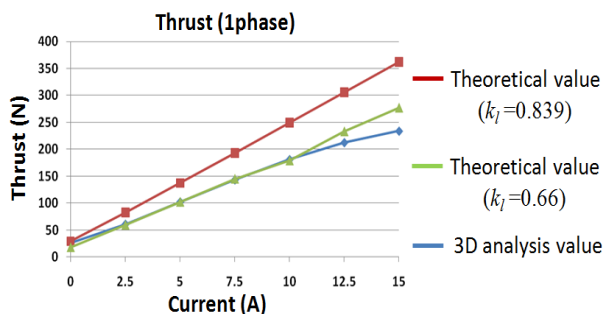


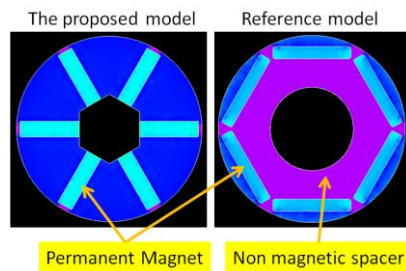
図 7 提案モデルの推力-電流特性

Fig.7 Thrust-current characteristic of proposed model

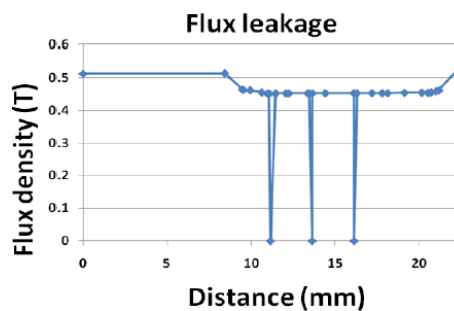
図 7 から分かるように、理論値と計算値にはかなりの差がある。実際のギャップの磁束密度は、漏れ磁束の影響で 2 次元解析の結果よりさらに低くなることが予想される。実際に 5[A]を流した時の推力は、提案モデルが約 102[N]になることに比べて、比較モデルは 119.2[N]になりかなり磁束が漏れていることが分かった。提案モデルと比較モデルのスペーサーの磁束密度分布を図 8 に示す。

図 8 のように、比較モデルは磁束漏れが少ない反面、磁束集中型の提案モデルはスペーサー全体にわたって磁束漏れがあることが分かる。これは磁石同士を向き合わせるにより、さらに強くなった反発力が隣のスペーサーにも影響を及ぼして推力に寄与しないからである。3 次元解析時の最大ギャップ磁束密度も 2 次元解析時の 0.902[T]から 0.72[T]まで低くなり、3 次元解析時の最大ギャップの磁束密度を用いて求めた漏れ磁束係数 $k_l$ は 0.66 になる。漏れ磁束係数 0.66 の場合、理論値は解析値とほぼ一致した。

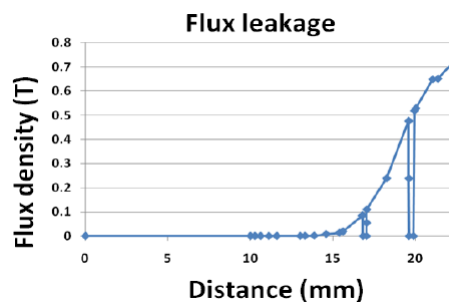
同じ極ピッチの条件でスペーサーの幅を 3.5mm から 1mm ずつ増やして、スペーサーの磁気抵抗を増加させることによって、どれくらい漏れ磁束が減り推力が上がるかを確認した。その結果を図 9 に示す。



(a) Contour of leakage flux density



(b) Leakage flux density of the proposed model in spacer



(c) Leakage flux density of reference model in spacer

図 8 非磁性体スペーサーの磁束密度分布

Fig.8 Leakage flux in non-material spacer

図 9 から分かるように、増えたスペーサーの幅によって漏れ磁束が減り推力とディテント力は上がったが、提案モデルは構造上比較モデルに比べて磁束の漏れが大きく、現形状だと目標とした推力を得ることはできるが、本研究で提案した磁束集中型界磁のメリットを生かすことができないと判断した。提案モデルの特性を表 1 にまとめた。

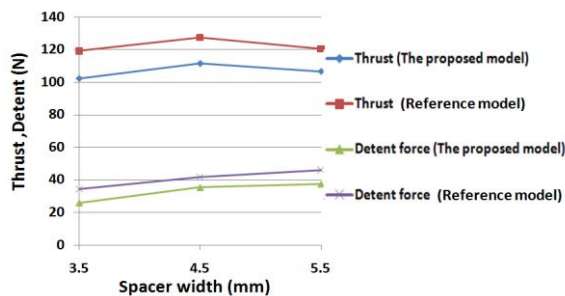
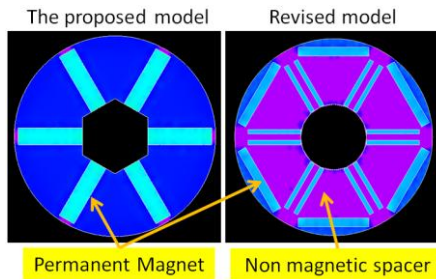


図 9 スペーサーの幅による推力とディテント力  
Fig.9 Thrust and detent force by spacer width

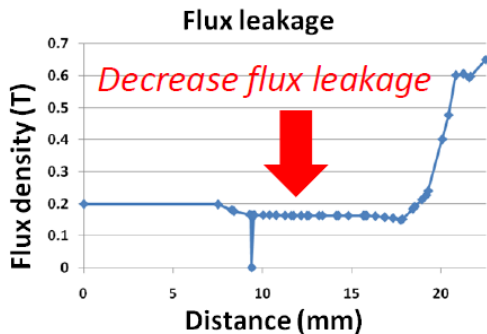
Table I Theoretical characteristics of the proposed model

●1 Armature size	●1 Field size	●1 Magnet size
83w×80h×7d[mm]	83r×10d[mm]	14.3w×3.8h×10d[mm]
●Mass of mover $m$	●Air gap flux density $B_a$	●Permeance coefficient $P_c$
4.02[kg]	0.72 [T]	4.212
●Frequency $f$	●Winding turn $N$	●Rated current $I_{rms}$
37.03 [Hz]	50 [turns]	10 [A]
●Back EMF $E_{rms}$	●Detent force $F_{detent}$	●Thrust force (max) $F_{thrust}$
4.19 [V]	7.12 [N]	29.82 [N]
●Winding resistance $R$	●Self-inductance $L$	●Output $P$
0.1586 [ $\Omega$ ]	1.737 [mH]	20.95 [W]
●Power factor $\cos \theta$	●Efficiency $\eta$	●Deflection $\delta(L=1m)$
0.927	84.08 [%]	$9.041 \times 10^{-6}$ [m]

〈5・4〉提案モデルの形状の変更 提案した磁束集中型界磁を持つ横磁束形円筒リニア同期モータは、漏れ磁束が大きいため高効率で大推力を得る目標から見るとメリットがないと判断し、形状の変更を考えなければならなかった。変更した形状を図 10 に示す。



(a) Revised model and leakage flux density of spacer



(b) Leakage flux density of revised model in spacer

図 10 修正モデルとスペーサーの磁束密度分布

Fig.10 Revised model and leakage flux density in spacer

変更した形状では、比較モデルに磁束集中形の方式を取り入れた形になっている。図 10 (a)のように、隣のスペーサーに漏れる磁束を減らすために、中央軸の付近にある磁

石の端部には漏れ磁束が通る磁路を設けた。また界磁側表面付近にある磁石間の鉄心を一部切ることにより、ギャップに流れる磁束を増加させようとした。3次元解析した結果、漏れ磁束は図 10 (b)のように大きく減少し 133.3[N](1相分)まで推力を改善することができた。ただ、同じ形状の比較モデル(131.2[N])に比べて磁束集中効果はあったが、漏れ磁束の考慮のため界磁側の着磁の自由度は最初に予想したほど大きくはない。表 2 に同じ磁石量を使って 5[A]を流した時の提案モデルと比較モデルの計算結果を示す。

Table II Thrust force of 4-type model (1phase)

Variable	Proposed model	Reference model I	Revised model	Reference model II
$F_{thrust}$	102.3N	119.2N	133.3N	131.2N

## 6. まとめ

本研究では、大推力のための磁束集中形界磁を持つ横磁束形円筒リニア同期モータを提案し、その設計と有限要素法による推力とディテント力の計算を行った。

大推力化の観点から見ると、PMLSMを作る上で提案したモデルは、漏れ磁束が多く比較モデルに比べて磁束集中形界磁による磁束集中効果を得られなかった。変更モデルは漏れ磁束は大きく減り推力を改善することができたが、最初の目標より着磁の自由度が低く、スペーサーに流れ込む漏れ磁束を考慮した設計が必要であるので、高効率化を考えるとまだ不完全である。

ディテント力は9スロットー8極の組合せを採択することにより、シンプルな形で抑制することができた。今回の結果はあくまでもシミュレーションによる結果なので、試作による実験の段階では発熱や騒音など設計段階で考慮できなかった問題が発生する可能性がある。

したがって今後の課題としては、まずは漏れ磁束を考慮して再設計を検討している。これを中心に試作モデルの実験による推力と他の特性(ディテント力、逆起電力等)を測定し、理論値及び解析値との比較検証を行い報告する予定である。

## 文 献

- (1) 金 弘中, 安 克燮, 安 珍雨, 古関 隆章: “回転機用汎用電機子鉄心を生かした横磁束形大推力円筒型リニア同期モータへ円滑で大きな推力を得るための原理的構成”, IEEJ (reviewing) Kim H. J., G. S An, J. W Ahn, T. Koseki: “Transverse Flux Type Cylindrical Linear Synchronous Motor for High Thrust using Generic Armature Cores for Rotary Machinery”, IEEJ (reviewing)
- (2) 見城 尚志, 永守 重信: “新ブラシレスモータシステムの設計と実際”, 総合電子出版社(2000)