

平成14年度 石田（實）記念財団研究発表会資料

開磁路形リニアパラメトリックモータの
設計法に関する研究

平成14年11月5日

石川 和己

東北学院大学工学部電気情報工学科

1. はじめに

これからの日本は高齢化社会が進み、在宅老人や障害を持った人々が家庭内で普通の生活ができる環境が必要となるため、優しい環境を提供するバリアフリー住宅が注目を集めている。バリアフリー住宅は玄関や床の段差が無く、車椅子での移動が自由にでき、老人にとっても優しい環境となっている。バリアフリー住宅内でのドアは、床にレールや溝が無い吊り戸式が有効であり、小さな力で開閉できるようになっている。しかし老人や車椅子に乗った方、及び両手が荷物でふさがっている状態でのドアの開閉は簡単なことではなく、このような状況下においては自動ドアが必要であると思われる。会社、銀行、デパート等のビルディングでは、もはや自動ドアが一般的であり、今後は家庭内での実用化が進むと思われる。現在の自動ドアの多くは回転形モータでベルト等を介して開閉しているため、停電などでは簡単に開閉できない構造となっている。

家庭内で自動ドアを実用化する場合は、単相交流電源で駆動でき、停電でも簡単に開閉できるシステムが必要であると思われる。リニアパラメトリックモータは、構造が簡単で単相交流電源で駆動できるリニアモータであり、二次導体にはアルミニウム板と鉄板を用いて非接触で駆動できるので、吊り戸式ドアの下部又は上部に設置することが可能である。これまでに簡単な自動ドアのモデルにリニアパラメトリックモータを設置して実験的に検討した結果、本モータでの駆動が充分可能であることを確認している^{1), 2)}。

しかし、ドアの大きさや重量並びに設置する場所の条件が異なる場合を考慮すると、モータ形状並びに最適設計法に関する検討が必要である。以上のことを考慮し、I形コアを用いた開磁路形リニアパラメトリックモータを数台製作し、モータ形状と特性値の関係について実験を行い、さらに電磁場解析ソフトを用いてシミュレーションを行い、モータの設計法に関する検討を行った。

2. 基本構成及び動作原理

Fig. 1 に開磁路形リニアパラメトリックモータ（以下 LPaM と略す）の基本構成を示す。P₁, P₃ は励磁側磁極、P₂, P₄ は共振側磁極であり、B₁ が共通磁路である。励磁側巻線 N₁ には単相電源 E₁、共振側巻線 N₂ には同調用コンデンサ C が接続されている。固定子にあたるモータ磁心は、方向性珪素鋼板を積層した I 形コアを用いており、共通磁路と脚部磁心は接着剤により固定している。又、各脚部磁心には型巻きしたコイルを挿入している。二次導体 RP は、厚さ 1mm のアルミニウム板と厚さ 5mm の鉄板を張り合わせた複合二次導体とし、磁気ギャップは 3mm とした^{3), 4)}。

今、励磁側巻線の単相電源 E₁ の電圧を上昇させていくと磁路内の磁束が増加し、一番断面積の小さな共通磁路 B₁ が磁気飽和に達すると、共振側巻線から見たインダ

クタンスが電源周波数の2倍周期で変動する。ここで同調用コンデンサ C に適当な値を用いるとパラメトリック発振により共振側巻線に二次電圧 E_2 が誘起される。 E_1 と E_2 には約 90° の位相差があり、磁極から発生する空隙磁束密度は P_4 から P_1 の方向に進行磁界が形成され、単相リニア誘導モータとして動作する。

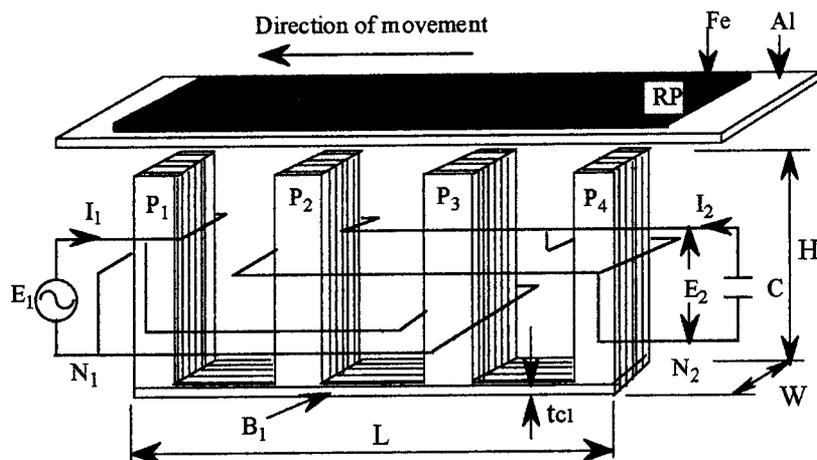


Fig. 1 開磁路形リニアパラメトリックモータの基本構成

3. 磁心幅の検討

これまでのモータ磁心幅は $W = 17 \text{ mm}$ 一定として実験を行ってきたが、今回の磁心幅の検討では、磁心幅 W の異なるモータを5台試作して実験的な検討を行い、さらに電磁場解析ソフト (Maxwell 3D field simulator) を用いて検討を行った^{5), 6)}。

Table 1 に試作したモータの各部寸法を示す。モータ磁心幅 $W = 17 \text{ mm}$ を基準とし、

Table 1 磁心幅の異なるモータの各部寸法

Stator core width W [mm]	17	25	34	43	51
Stator core height H [mm]	56				
Stator core length L [mm]	115				
Core material	grain-oriented Si-Fe sheet				
Thickness of common magnetic path tc_1 [mm]	5				
Number of turns N_1, N_2 [turns]	762				
Weight M [kg]	1.44	1.76	2.16	2.55	2.85
Stator core width-to-length ratio W/L	0.15	0.22	0.30	0.37	0.44

1.5倍, 2倍 ($W = 34$ mm), 2.5倍及び3倍 ($W = 51$ mm) 幅とした. 磁心幅以外は全て同寸法としており, 質量だけが異なっている.

Fig. 2 に各モータの同調用コンデンサ C に対する静推力 F_s の関係を示す. これを見ると, 各モータにおいて静推力 F_s が最大となる同調用コンデンサ C の値が存在することがわかる. また, 磁心幅 W が大きくなるに従って, 静推力が増加していることがわかる.

Fig. 3 に磁心幅と長さの比 W/L に対する静推力 F_s の関係を示す. 実線が実験値, 破線が計算値である. これを見ると, 磁心幅と長さの比 W/L が大きくなるに従って, 静推力はほぼ比例して増加しており, 実験値と計算値も良好に対応していることがわかる.

Fig. 4 に磁心幅と長さの比 W/L に対する推力質量比 F_s/M の関係を示す. これを見ると, 磁心幅と長さの比 W/L が 0.3 ($W = 34$ mm) 付近から飽和傾向にあることがわかる. 同様に磁心幅と長さの比 W/L に対する推力入力比 F_s/P_1 の関係においても, $W/L = 0.3$ 付近で良好な値が得られていることから, 次の磁心長と高さの比 L/H の検討においては, 磁心幅 $W = 34$ mm を用いることにした.

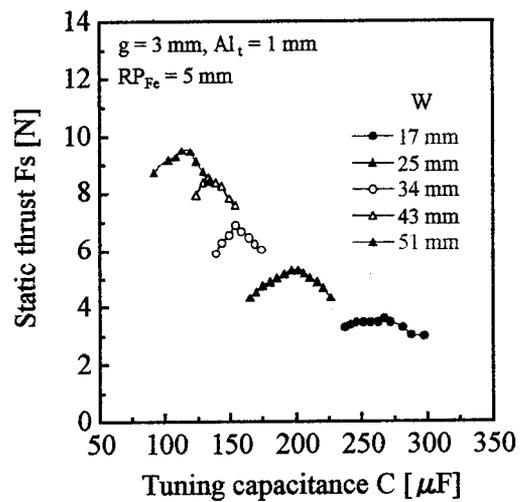


Fig. 2 同調用コンデンサ C に対する静推力 F_s

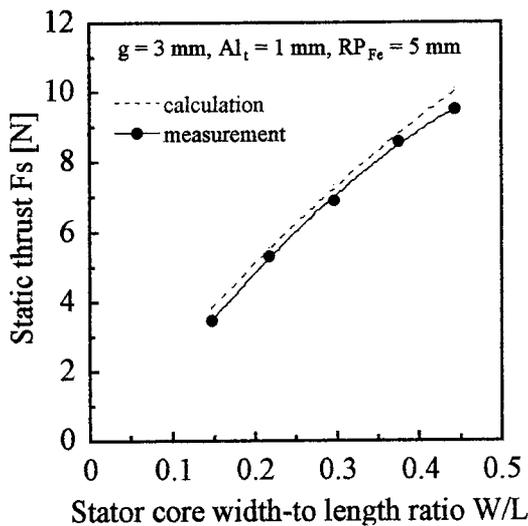


Fig. 3 W/L に対する静推力 F_s

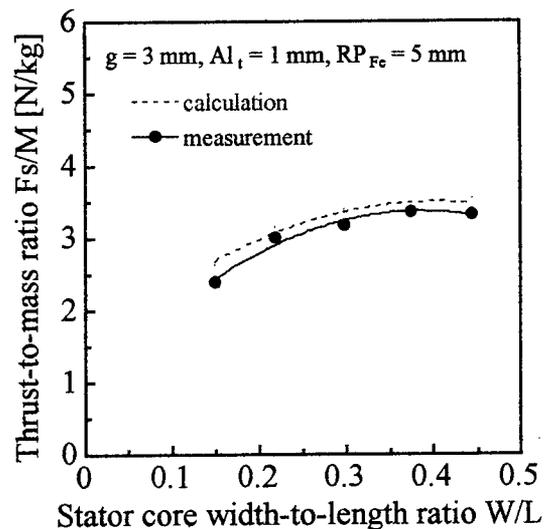


Fig. 4 W/L に対する推力質量比 F_s/M

4. 磁心長と高さの比 L/H の検討

前節の磁心幅の検討より，推力質量比及び推力入力比が良好となる磁心幅 $W = 34$ mm を用いて，磁心長と高さの関係について検討を行った．磁心長 L と高さ H の比 L/H の検討では，起磁力 NiI_1 が同じになるように巻線を巻くことができる窓面積を一定となるようにした．これまで検討してきたモータのポールピッチ $\tau = 70$ mm を基準として，更にポールピッチ $\tau = 50, 60$ 及び 80 mm のモータを試作して検討を行った^{7), 8)}．

Table 2 に試作したモータの各部寸法を示す．これらのモータは，磁心幅 $W = 34$ mm 及び巻線数 N を一定としている．又，窓面積が一定となるように，磁心長 L と高さ H を調整したので，質量も同程度の値になっている．

Table 2 ポールピッチの異なるモータの各部寸法

Pole pitch τ [mm]	50	60	70	80
Stator core height H [mm]	90	69	56	47.5
Stator core length L [mm]	85	100	115	130
Stator core length-to-height ratio L/H	0.94	1.45	2.05	2.74
Weight M [kg]	2.22	2.05	2.16	2.05

Fig. 5 にポールピッチの異なるモータの同調用コンデンサ C に対する静推力 F_s の関係を示す．これを見ると，ポールピッチの異なる各モータにおいて静推力 F_s が最大となる同調用コンデンサ C が存在することがわかる．また，ポールピッチが小さくなるほど，静推力も増加していることがわかる．これはポールピッチが小さくなるに従って，漏れ磁束が減少するためと考えられる．

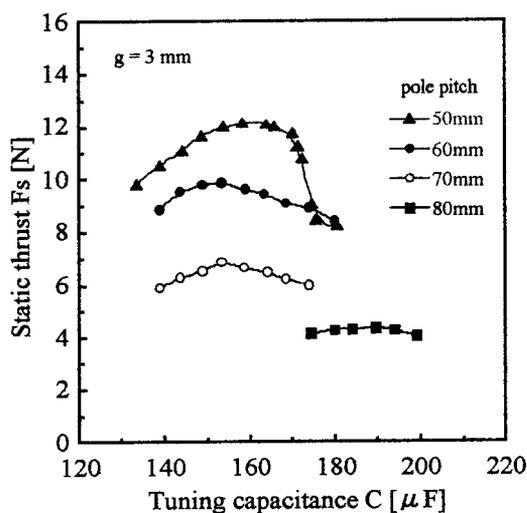


Fig. 5 同調用コンデンサ C に対する静推力 F_s

Fig. 6 に磁心長と高さの比 L/H に対する静推力 F_s の関係を示す。実線が実験値、破線が計算値である。これを見ると、磁心長と高さの比 L/H が小さくなるに従って静推力が増加しており、実験値と計算値が良好に対応していることがわかる。これはポールピッチが小さくなると、磁極間隔が狭くなるために漏れ磁束が減少するためと考えられる。今回は、 $L/H = 0.94$ ($\tau = 50\text{mm}$) までのモータを試作して実験することができたが、計算値からさらに磁心長と高さの比 L/H が小さいモータの方が、推力が大きくなると推測される。

Fig. 7 に磁心長と高さの比 L/H に対する推力質量比 F_s/M の関係を示す。静推力と同様の傾向を示しており、計算結果より $L/H = 0.69$ ($\tau = 44\text{mm}$) 付近で最大値が得られると推測される。

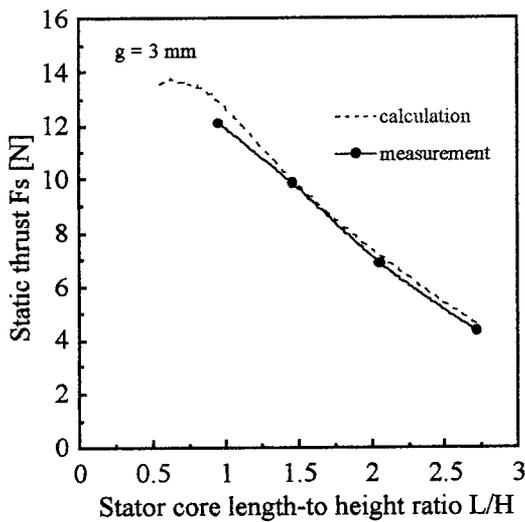


Fig. 6 L/H に対する静推力 F_s

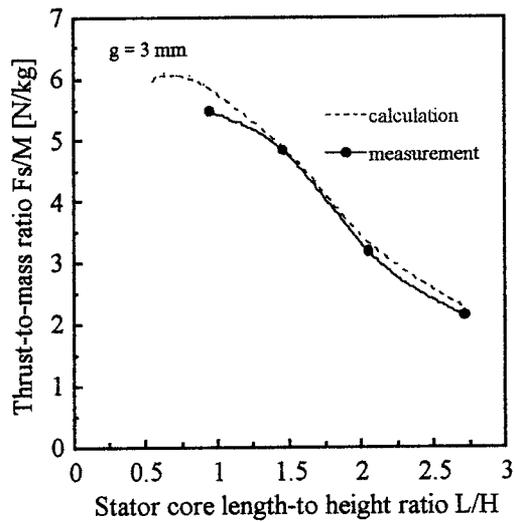


Fig. 7 L/H に対する推力質量比 F_s/M

これらの結果より、ポールピッチ $\tau = 44\text{mm}$ のモータを試作して、実験的に検討した。Table 3 に試作したポールピッチ $\tau = 44\text{mm}$ のモータの各部寸法を示す。

Table 3 ポールピッチ $\tau = 44\text{mm}$ のモータの各部寸法

Pole pitch	τ [mm]	44
Stator core height	H [mm]	111
Stator core length	L [mm]	76
Stator core width	W [mm]	34
Number of turns N_1, N_2	[turns]	762
Mass	M [kg]	2.6

Fig.8に同調用コンデンサ C に対する静推力 F_s の関係についてポールピッチ $\tau = 44$ mm と 50 mm を比較して示す。これを見ると、ポールピッチ $\tau = 44$ mm のモータの静推力が大きくなっていることがわかる。

Fig.9にポールピッチ τ に対する静推力 F_s , 推力質量比 F_s/M および推力入力比 F_s/P_1 の関係を示す。静推力 F_s について見ると、解析結果とほぼ同程度の値が得られていることがわかる。また、推力質量比 F_s/M はポールピッチ $\tau = 44 \sim 50$ mm 付近で最大になり、推力入力比 F_s/P_1 は 67 N/kW 以上の大きな値が得られた。

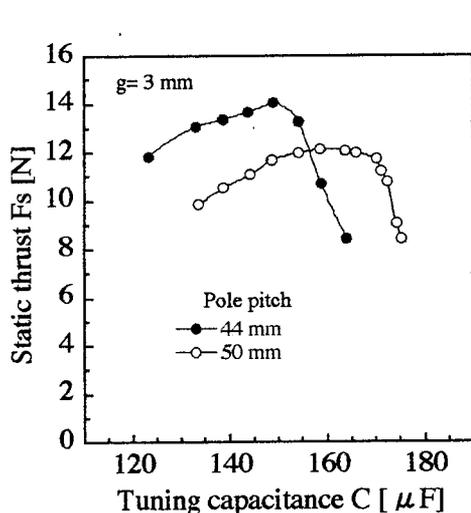


Fig.8 同調用コンデンサ C に対する静推力 F_s

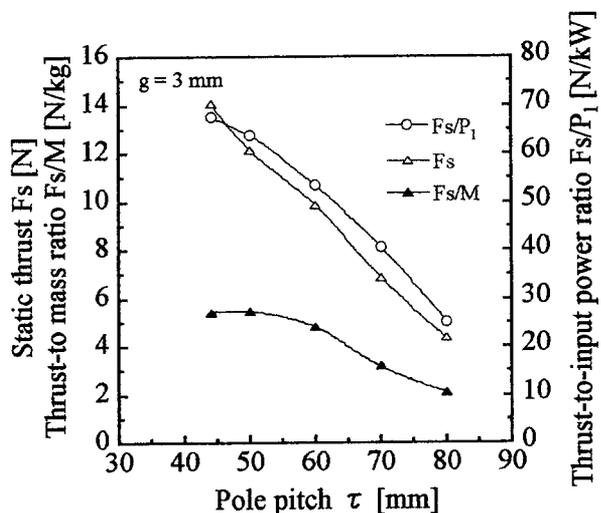


Fig.9 ポールピッチ τ に対する各特性

5. まとめ

以上、開磁路形 LPaM 設計法に関する検討を行った。その結果、磁心幅については、静推力が磁心幅にほぼ比例して増加し、推力質量比および推力入力比には最適な磁心幅が存在することがわかった。磁心幅 $W = 34$ mm を用いて、磁心長と高さの比 L/H について実験値と電磁場解析の結果を合わせて検討した結果、 $L/H = 0.69$ ($\tau = 44$ mm) 付近に最適な寸法比があることがわかった。さらにポールピッチ $\tau = 44$ mm のモータを試作して実験的に検討した結果、解析結果と同程度の静推力が得られた。

これらの検討結果より、家庭内自動ドアを十分に駆動できる推力が得られたので、今後は安全性を考慮した自動ドアの開閉制御に関する検討を行っていく予定である。

謝 辞

本研究を進めるにあたり、多大なご支援を賜りました財団法人 石田（實）記念財団に心より感謝申し上げます。

参考文献

- 1) K. Ishikawa, H. Tan, S. Kikuchi : Application of a Linear Parametric Motor with Open Magnetic Circuit to Automatic Door in the Home, 9th International Conference on Power Electronics and Motion Control – EPE-PEMC 2000, Proceedings, Vol.5, pp.65-68 (2000)
- 2) 菊地新喜, 石川和己, 石塚正人, 丹博希, 関本達也 : 新形式リニアパラメトリックモータの動作特性, 電気学会マグネティクス研究会資料, MAG-00-176, pp.55-60 (2000)
- 3) K. Ishikawa, S. Kikuchi : Improvement of the Performance Characteristics of A Linear Parametric Motor with Open Magnetic Circuit, IEEE Trans. on Magnetics, Vol.35, No.5, pp.3565-3567 (1999)
- 4) 丹博希, 石川和己, 菊地新喜 : 開磁路形 LPaM の発生推力と磁束密度分布の関係, 平成 12 年度電気関係学会東北支部連合大会講演論文集, p.235 (2000)
- 5) 丹博希, 石川和己, 菊地新喜 : 開磁路形 LPaM の動作特性に関する考察, 日本応用磁気学会誌, Vol.25, No.4-2, pp.1215-1218 (2001)
- 6) 木村泰明, 石川和己, 菊地新喜 : 開磁路形リニアパラメトリックモータの磁心幅に関する考察, 日本応用磁気学会誌, Vol.26, No.4, pp.685-688 (2002)
- 7) Y. Kimura, K. Ishikawa, S. Kikuchi : Influence of the Pole Pitch Length of a Linear Parametric Motor with Open Magnetic Circuit, 平成 14 年度電気関係学会東北支部連合大会講演論文集, p.6 (2002)
- 8) 木村泰明, 石川和己, 菊地新喜 : 開磁路形 LPaM の特性に与えるポールピッチの検討, 第 26 回日本応用磁気学会学術講演概要集, p.311 (2002)