非線形最適化手法による新都市交通用片側式 リニア誘導モータの設計について

正 員 樋 口 剛 (長崎大)

学生員 姫 野 浩 司 (長崎大)

正 員 野 中 作太郎 (近畿大)

On the Design of Single Sided Linear Induction Motors for Urban Transit Using a Nonlinear Optimization Technique

Tsuyoshi Higuchi, Member, Koji Himeno, Student Member (Nagasaki University), and Sakutaro Nonaka, Member (Kinki University)

The urban transit with single-sided linear induction motor (SLIM) propulsion and wheel on rail support and guidance have been in the stage for practical application.

This paper presents a method of optimizing the design parameters of the SLIM using nonlinear optimization technique. In the formulation of the optimization problem, the performance characteristics are estimated using space harmonic analysis taking into account the end effect, skin effect and air gap leakage. The transformation method and the simplex method are applied to solve the problem. As the transformation methods, the exterior point transformation are used. Seven parameters are chosen as the independent variables, such as the number of poles, the pole pitch, the stack height, the secondary aluminium sheet thickness, the overhang length, the slot width / slot pitch and the rated slip. The output KW / input KVA , the maximum flux density in teeth, the temperature rise, the primary length, the stack height, overhang length, the maximum thrust and the vertical force are selected as the constraint function.

The SLIM design is analyzed under four objective functions; the primary weight, the input KVA , the cost of secondary materials and energy consumption. Furthermore, the design is regarded as the multi-objective programming problem and the computed design example is shown.

キーワード：リニア誘導モータ，最適設計，非線形最適化問題，多目的最適化問題

1. ま え が き

近年リニアモータは交通システムや搬送システムを始めとして産業界のいろいろな分野で用いられるようになり⁽¹⁾⁽²⁾，設計に関するデータベース構築のための調査・検討も行われている⁽³⁾⁽⁴⁾。

著者らは先に，片側式リニア誘導モータ (SLIM) の設計に非線形最適化手法を導入して運転特性や設計・製作上の制約を考慮しながら設計パラメータの最適化を図る方法を示し⁽⁵⁾⁽⁶⁾，変換法として内点法と外点法を用いた場合や，SLIM の特性算定に空間高調波解析法⁽⁷⁾と近似特性計算式⁽⁸⁾を用いた場合の計算時間や解の精度について比較検討した。

著者らはまた，新都市交通用 SLIM の設計において，経験に頼りながらもある程度直観的に多くの SLIM を設

計し比較検討することによって，設計パラメータの変化が特性やモータ重量，電力消費量などへ及ぼす影響を明らかにした⁽⁹⁾。その際，電力消費量の算定には，①モータの設計，②運転方法（たとえば，定格速度までは滑り周波数一定， V/f 一定制御，定格速度以上では滑り一定， V 一定制御）に応じた推力，垂直力，電圧，電流，力率，効率などの速度特性の算定，③与えられた車両，運転条件に対する走行シミュレーション，④運転曲線および電力消費量の計算，といった大変手間のかかる手順が必要であり，非線形最適化手法による最適設計プログラムの目的関数や制約関数に電力消費量を導入することは比較的困難であった。

本論文は，先に提案した非線形最適化手法による SLIM 設計法⁽⁶⁾を使って具体的に新都市交通用 SLIM の設計を論じたもので，その評価に不可欠な電力消費量や垂直力を目的関数や制約条件に追加し，最適化すべき目的関数の違

いによって設計がどのように変化するかを詳細に検討している。まず、非線形最適化手法の SLIM 設計への適用方法の概略を示した後、電力消費量を簡単な係数で近似し評価関数として用いる方法を示している。推力、垂直力等の SLIM の特性算定には、空間高調波解析法を用いて端効果の影響を考慮して行い、制約のある非線形最適化問題の解法としては変換法の一つである外点法を用いて制約のない問題に変換しシンプレックス法を用いて最適値を求めている。さらに、高性能化、コンパクト化、低廉化といった競合する複数の要求を同時に考慮するために、多目的最適化手法の導入を提案し、設計例を示している。

2. 非線形最適化手法による SLIM の設計⁽⁶⁾

SLIM の設計を、 x を n 個の独立変数、 $g_i(x)$ を m 個の制約関数、 $F(x)$ を目的関数とし、次のような非線形最適化問題として扱う。

$$\left. \begin{array}{l} g_i(x) \geq 0 \quad (i=1, 2, \dots, m) \\ \text{の条件下で } F(x) \text{ を最小にする } x \text{ を求める} \end{array} \right\} \dots (1)$$

このような制約のある最適化問題を解くのに、ここでは、 $g_i(x)$ と $F(x)$ を組み合わせて次のような変換関数 $P(x, r_k)$ を作り、その最適解を求めることにより元の制約のある問題を解く変換法（外点法）を用いている。

$$P(x, r_k) = F(x) + r_k^{-1} \sum_{i=1}^m [\min\{g_i(x), 0\}]^2 \dots \dots \dots (2)$$

計算では、まず x および摂動パラメータ r_k に初期値 x^0, r_0 を与え、次に $P(x^0, r_0)$ を最小にする解 x^1 を求め、解が収束するまで $r_{k+1} = r_k / C$ ($C > 1$) と r_k を減少させながら計算を続ける。(2)式の制約のない最適化問題の解法には、直接探索法の一手法であるシンプレックス法を用いている。

定式化を行う場合、まず SLIM の多くの設計パラメータの中から独立変数 x を選定する。他のパラメータの式として書き表わせないパラメータをすべて独立変数として選ぶこともできるが、値が変化しても特性などにあまり大きな影響を及ぼさないパラメータ（以後、固定パラメータと呼ぶ）には適値を与え、必要最小限のパラメータを独立変数として選定することにより、収束性の向上や計算時間の短縮を図る。また、設計では保証特性として定格速度 v_n 、定格推力 F_{xn} 、最大推力 F_{xm} 、定格垂直力 F_{zn} 、単位容量当たりの出力 KW/KVA (= 力率 $\times$ 効率) を考えているが、 v_n, F_{xn} は仕様で与えられ、 $F_{xm}, F_{zn}, KW/KVA$ は制約条件として与えている。

独立変数、目的関数、制約関数の概要を以下に示す。

〈2・1〉 独立変数 図 1 に SLIM の構造略図を示す。

新都市交通用 SLIM の設計では、独立変数として極数 p (偶数)、ポールピッチ τ 、鉄心積み厚 h 、二次側アルミニウム板厚 d_2 、オーバハング長 c 、スロット幅/スロットピッチ $k_t = w_s / t_s$ 、定格すべり s_n を選ばば十分であると考え

る。メカニカルクリアランス g は、一般に小さいほどよい

図 1 SLIM の構造略図
Fig. 1. Construction of SLIM.

が、支持機構などから規制されるため、ここでは固定パラメータとして値を与える。さらに、固定パラメータとして、相数 m 、並列回路数 a 、1 コイルの巻数 N 、一次巻線電流密度 $J_1 [A/mm^2]$ 、每極每相のスロット数 q 、短節率 β 、二次側裏張り鉄板厚 d_1 、固定子鉄心冷却用のエアダクト幅 w_d を選ぶ。

〈2・2〉 目的関数 用途に応じて、最適化すべき量を目的関数として設定し定式化する。一次側モータ重量： $F_1(x)$ 、電源容量： $F_2(x)$ 、二次側地上設備資材費： $F_3(x)$ を選んだ場合、以下のように表わされる。定格推力が等しいため、 $F_1(x)$ 最小の設計は推力/重量比最大の、 $F_2(x)$ の場合は推力/KVA 比最大の設計と同等である。

$$\left. \begin{array}{l} F_1(x) = \gamma_{Cu1} V_{Cu1} + \gamma_{Fe1} V_{Fe1} \\ F_2(x) = KVA \\ F_3(x) = k_{Al2} \gamma_{Al2} V_{Al2} + k_{Fe2} \gamma_{Fe2} V_{Fe2} \end{array} \right\} \dots \dots \dots (3)$$

ここで、 γ_{Cu1} 、 γ_{Fe1} 、 γ_{Al2} 、 γ_{Fe2} はそれぞれ、銅、成層鉄心、アルミニウム、二次側ソリッド鉄の密度、 k_{Al2} 、 k_{Fe2} はアルミニウム、ソリッド鉄の 1 kg 当たりの価格、 V_{Cu1} 、 V_{Fe1} 、 V_{Al2} 、 V_{Fe2} は一次側銅線、一次側鉄心、二次側アルミニウム、二次側鉄板の体積である。

〈2・3〉 制約関数 制約関数として、単位容量当たりの出力 KW/KVA 、一次鉄心歯部磁束密度の最大値 B_{tm} 、温度上昇 θ 、モータ長 L 、鉄心積み厚 h 、オーバハング長 c 、定格垂直力/定格推力 F_{zn}/F_{xn} 、最大推力/定格推力 F_{xm}/F_{xn} を定めた。 $G_1, G_2, G_3, G_4, G_5, G_6, G_7, G_8$ をそれぞれの制限値とすると、

$$\left. \begin{array}{l} g_1(x) = KW/KVA - G_1 \geq 0 \\ g_2(x) = G_2 - B_{tm} \geq 0 \\ g_3(x) = G_3 - \theta \geq 0 \\ g_4(x) = G_4 - L \geq 0 \\ g_5(x) = G_5 - h \geq 0 \\ g_6(x) = G_6 - c \geq 0 \\ g_7(x) = G_7 - F_{zn}/F_{xn} \geq 0 \\ g_8(x) = F_{xm}/F_{xn} - G_8 \geq 0 \end{array} \right\} \dots \dots \dots (4)$$

SLIM の定式化作業では、(3)、(4)式を独立変数および固定パラメータの関数として空間高調波解析法⁽⁷⁾を用いて定式化する。ここでは、紙面の都合上、推力 F_x と垂直力 F_z の計算式および一次抵抗 r_1 と一次漏れリアクタン

ス x_1 の式を付録に示す。他の関係式については文献(6)を参照されたい。なお、スロット形状の影響はメカニカルクリアランス g をカータ係数で、オーバハングの影響は

二次導体板の導電率をラッセル・ノースワージー係数で補正することにより考慮している。

3. 電力消費量の評価

SLIM の一次入力 P_1 は、 V_1 を電源電圧、 I_1 を一次電流、 $\cos \phi$ を力率とすると $P_1 = \sqrt{3} V_1 I_1 \cos \phi$ で与えられ、電力消費量は、運転曲線に応じて、力行、回生制動時の土の電力(一次入力)を次のように積算して求められる。

$$W_T = \int P_1 dt = \int \frac{1}{\eta} P dt \quad \dots\dots\dots (5)$$

ここで、 P : 出力である。

図2に、新都市交通用 SLIM 設計例の推力、一次電流、力率、効率の速度特性を示す。一般に、SLIM を定格までは滑り周波数一定、 V/f 一定制御、定格速度以上では滑り一定、 V 一定制御の運転を行うと、効率 η の動作点は図のような傾向となり、低速域の立ち上りを無視して $\eta =$ 一定と近似すると、電力消費量は次式のように $1/\eta$ にほぼ比例するものと考えられる。

$$W_T \approx \frac{1}{\eta} \int P dt = k \frac{1}{\eta} \quad \dots\dots\dots (6)$$

したがって、等しい車両、運転条件を持ち、異なる設計パラメータを持つ LIM の電力消費量を比較する目安として、評価関数 $k_e = 1/\eta$ を定義する。図3は、文献(9)において、定格速度、定格推力を一定にし、磁束密度、モータ長、ポールピッチ、アルミニウム板厚等のパラメータを変えて設計した多くの LIM について、等しい車両、走行条件を与えて求めた電力消費量 W_T と評価関数 k_e の関係を調べたものである。図より、両者は比例関係があることが確認される。

図2 運転曲線

Fig. 2. Operating characteristics.

図3 電力消費量と電力消費量評価関数 k_e の関係

Fig. 3. Relation between energy consumption and its evaluation function k_e .

4. 目的関数が設計に及ぼす影響

表1(a)は、目的関数に一次側モータ重量、(b)は電源容

表 1 設計例
Table 1. Numerical results.

	名 称	固定 パラ メータ	独立 変数	単目的最適設計例								多目的最適設計例				
				(a) 目的関数 一次側重量		(b) 目的関数 容量		(c) 目的関数 二次側材料費		(d) 目的関数 電力消費量		(e) 目的関数 一次側重量		(f) 目的関数 電力消費量		
定 格	線間電圧	$\sqrt{3} V_1$ (V)			550		438		625		600		554		641	
	周波数	f_1 (Hz)			28		18		25		22		26		27	
	一次電流	I_1 (A)			404		453		356		371		400		347	
	容量	KVA (kVA)			385		343		385		385	<385	385	<385	385	
	定格滑り	S_n		○	0.28		0.23		0.28		0.15		0.29		0.24	
	定格推力	F_n (kgf)	○		1510		1510		1510		1510		1510		1510	
	定格速度	v_n (km/h)	○		37.5		37.5		37.5		37.5		37.5		37.5	
一 次 側	モータ長	L (m)	○		<2.5	1.7	<2.5	2.5	<2.5	2.5	<2.5	2.4	<2.5	1.9	<2.5	2.3
	相数	m	○			3		3		3		3		3		3
	極数	p		○		6		6		8		8		6		8
	ポールピッチ	τ (mm)		○		259		370		286		274		284		258
	鉄心積み厚	h (mm)		○	<300	300	<300	300	<300	261	<300	300	<300	300	<300	279
	鉄心高さ	d_a (mm)				100		101		89		102		95		92
	毎極毎相のスロット数	q	○			4		4		4		4		4		4
	スロット幅/スロットピッチ	k_t		○		0.78		0.73		0.76		0.73		0.79		0.78
	スロット幅	ω_s (mm)				16.7		22.6		18.0		16.8		18.7		16.8
	スロットピッチ	t_s (mm)				21.6		30.9		23.8		22.8		23.7		21.5
	歯幅	Z_t (mm)				4.8		8.3		5.8		6.0		5.0		4.7
	スロット深さ	d_s (mm)				63.2		52.6		53.2		58.7		56.5		55.7
	短節率	β	○			10/12		10/12		10/12		10/12		10/12		10/12
	1 コイルの巻数	N	○			4		4		4		4		4		4
	一相の直列巻数	N_{Ph}				96		96		128		128		96		128
	半コイルの長さ	l_a (mm)				623		763		619		641		655		601
	一次抵抗	γ_1 (Ω)				0.04		0.04		0.06		0.06		0.04		0.06
	一次漏れリアクタンス	x_1 (Ω)				0.25		0.16		0.27		0.27		0.22		0.29
	温度上昇	θ (deg)			<120	84	<120	64	<120	77	<120	74	<120	79	<120	76
	歯部磁束密度	B_{tm} (T)			<2.0	2.0	<2.0	1.5	<2.0	1.6	<2.0	1.9	<2.0	2.0	<2.0	2.0
銅重量	G_{Cu1} (kg)				300		412		350		378		312		331	
鉄重量	G_{Fe1} (kg)				166		295		202		264		179		187	
一次側重量	$G_{Cu1} + G_{Fe1}$ (kg)				466		706		552		641		492	<518	518	
二 次 側	メカニカルクリアランス	g (mm)	○		12		12		12		12		12		12	
	裏張り鉄板厚	d_1 (mm)	○		25		25		25		25		25		25	
	アルミニウム板厚	d_2 (mm)		○	4.1		5.7		4.9		8.0		4.6		5.3	
	オーバハング	c (mm)		○	<100	53.2	<100	100.0	<100	4.3	<100	37.1	<100	4.4	<100	5.6
	二次導体幅	h_2 (mm)			406		500		270		373		309		290	
	アルミニウム重量	G_{Al2} (t/km)			4.47		7.70		3.56		8.04		3.80		4.11	
	裏張り鉄板重量	G_{Fe2} (t/km)			79.9		98.2		53.1		73.4		60.7		57.0	
	二次側重量	$G_{Al2} + G_{Fe2}$ (t/km)			84.3		105.9		56.6		81.5		64.5		61.1	
特 性	最大推力/定格推力	F_{xm}/F_{xn}		>1.5	1.5	>1.5	1.5	>1.5	1.8	>1.5	1.6	>1.5	1.7	>1.5	1.8	
	定格垂直力/定格推力	F_{zn}/F_{xn}		<2.0	1.1	<2.0	1.2	<2.0	1.4	<2.0	1.4	<2.0	1.2	<2.0	1.3	
	KW/KVA	(%)		>40	40.0	>40	44.9	>40	40.0	>40	40.0	>40	40.1	>40	40.0	
	力率	$\cos \phi$ (%)			61.4		66.9		62.9		54.9		63.6		59.9	
	効率	η (%)			65.1		67.1		63.6		72.9	>63	63.0		66.8	
一次側材料費		$C_{Cu1} + C_{Fe1}$ (万円)			27		39		32		35		29		30	
二次側材料費		$C_{Al2} + C_{Fe2}$ (万円/km)			1067		1444		744		1217	<835	835	<818	817	

量, (c)は1 km 当たりの二次側材料費, (d)は電力消費量 (評価関数 k_e) を選び, 定格速度 $v_n=37.5$ km/h, 定格推力 $F_{xn}=1,510$ kgf の新都市交通 (ミニ地下鉄) 用 SLIM を想定して, 制約条件として $KW/KVA \geq 40\%$, 歯部磁束密度 $B_{tm} \leq 2$ T, 温度上昇 $\theta \leq 120^\circ\text{C}$, モータ長 $L \leq 2.5$ m, 鉄心積み厚 $h \leq 0.3$ m, オーバハング $c \leq 0.1$ m, 定格垂直力/定格推力の比 $F_{zn}/F_{xn} \leq 2$, 最大推力/定格推力 $F_{xm}/F_{xn} \geq 1.5$ を与えた場合の解析結果を示したものである。

固定パラメータとして, メカニカルクリアランス $g=12$ mm, 相数 $m=3$, 並列回路数 $a=1$, 1 コイルの巻数 $N=4$, 電流密度 $J_1=4.3$ A/mm², 毎極毎相のスロット数 $q=4$, 短節率 $\beta=10/12$, 裏張り鉄板厚 $d_1=25$ mm, エアダクト幅 $w_d=10$ mm を与え, アルミニウム, ソリッド鉄の 1 kg 当たりの価格として $k_{Al2}=600$ 円, $k_{Fe2}=100$ 円を与えた。また, 物質定数として一次巻線の体積抵抗率 $\rho=2.1 \times 10^{-8}$ Ωm , 裏張り鉄の体積抵抗率 $\rho_1=10.5 \times 10^{-8}$ Ωm , 透磁率 $\mu_1=500 \mu_0$, アルミニウムの体積抵抗率 $\rho_2=3.3 \times$

$10^{-8}\Omega\text{m}$, 透磁率 $\mu_2=\mu_0$ を用いた (抵抗率は 75°C の時の値)。

独立変数 k_t は、回転形誘導モータでは一般に $1/2$ 程度に選定されるのに対して、ギャップの大きな LIM の場合スロット漏れリアクタンスを抑えるために大きめの設計となるが、目的関数に応じて $0.73\sim 0.78$ に収束している。

目的関数を一次側重量に選ぶと、ポールピッチを $\tau=259\text{ mm}$ と小さくして、コイルエンド部、継鉄高さを小さくし、さらに歯部磁束密度の上限まで一次側鉄心歯幅を小さくした設計になっており、一次側重量は 466 kg に収束している。また、一次鉄心表面積が小さくなり ($L\times h=1.7\times 0.3\text{ m}^2$)、さらにオーバハング長が $c=53.2\text{ mm}$ と大きくなるなどの影響で、垂直力が $F_{zn}=1.1F_{xn}$ とかなり小さくなるのがわかる。

容量を目的関数に選ぶと、ポールピッチを $\tau=370\text{ mm}$ (モータ長 $L=2.5\text{ m}$)、鉄心積み厚を $h=300\text{ mm}$ と上限まで大きくし、さらに二次側のアルミニウム板厚が $d_2=5.7\text{ mm}$ 、オーバハング長が $c=100.0\text{ mm}$ と大きくなるため、一次側重量最小の設計と比べて一次側重量が 52% 、二次側材料費最小の場合と比べて二次側材料費が 94% 増加するが、両者に比べて容量 KVA は 385 kVA から 343 kVA と 11% 減少 (KW/KVA は 40.0% から 44.9% に増加) するのみで、速度が 40 km/h 程度の新都市交通用 SLIM では、 KW/KVA は 40% 程度が限界であると考えられる。垂直力は $F_{zn}=1.2F_{xn}$ に収束している。

二次側材料費最小の設計では、モータ長を $L=2.5\text{ m}$ と上限まで長くし、鉄心積み厚を $h=261\text{ mm}$ と小さく抑えた設計になっている。極数を $p=8$ 極にすると 6 極の場合に比べて二次側材料費は若干小さくなる程度であるが、一次側重量および電力消費量が減少する点で有利である。また、オーバハング長を $c=4.3\text{ mm}$ と小さくして二次側設備資材を軽減する設計になるため二次導体板のうず電流路が制限され、垂直力が $F_{zn}=1.4F_{xn}$ と他の設計に比べて大きくなるのがわかる。

電力消費量を目的関数に選ぶと、定格すべりを $s=0.15$ と小さくして磁束密度を大きくした設計となっている。しかしながら、モータ長を $L=2.4\text{ m}$ 、鉄心積み厚を $h=300\text{ mm}$ と上限近くまで大きくし、さらに二次側のアルミニウム板厚を $d_2=8\text{ mm}$ 、オーバハング長を $c=37.1\text{ mm}$ と大きくするため、一次側重量、二次側材料費ともかなり大きくなっている。垂直力は $F_{zn}=1.4F_{xn}$ に収束している。このように、電力消費量を重視した設計を行うと、いきおい効率を大にしようとする設計になり、他の設計、特に一次側モータ重量や二次側材料費最小の設計では定格すべりを大きめにとって磁束密度を小さくする設計になるのに対して、磁束密度が大きくなり、力率が小さくなって、当然ながらモータ重量や材料費も大きくなる設計となる⁽¹⁰⁾ ことが明白である。また設計例では、 $L\leq 2.5\text{ m}$ 、 $h\leq 300\text{ mm}$ の条件下で $KW/KVA\geq 40\%$ の制約が厳しいため垂直力への $F_{zn}/F_{xn}\leq 2.0$ の制約があまり効いていな

いが、垂直力を軽減するには、定格すべり s_n を大きくして磁束密度を小さく設計すればよいことを確認している⁽¹¹⁾。

なお、定格推力 $1,500\text{ kgf}$ 、定格速度 40 km/h 程度の東京都営地下鉄 12-000 形車両用 LIM では、 $p=8$ 、 $L=2.476\text{ m}$ 、 $\tau=280.8\text{ mm}$ 、 $h=300\text{ mm}$ に設計され、定格で力率は約 53% 、効率は約 75% 、垂直力は定格推力の 2 倍程度である⁽¹²⁾。都営地下鉄用 LIM の設計および特性は、力行・制動区間で二次導体板に厚さ $d_2=5\text{ mm}$ 、オーバハング長 $c=30\text{ mm}$ の銅板を使っている違いはあるが、表 1 (d) の目的関数を電力消費量としたときの最適設計例に非常に近いことがわかる。

5. 多目的最適化問題による解析

以上、SLIM の設計では最適化すべき目的関数の選び方によって設計が変わるため、使用目的、条件に応じた総合的な判断が必要である。評価関数として効率 η と力率 $\cos\phi$ のバランスを決める評価パラメータ $x=a\eta+b\cos\phi$ を定義し、 x を最大化するような設計方法の提案もあるが⁽¹⁰⁾、モータを特性のみで評価すると実用的でない偏った結果が得られる恐れがあり、やはりモータ重量や製造価格などに対する検討が必要であろう。

そこで、本論文では、SLIM の設計を次式のように相競合する複数個の目的関数を同時に考慮する多目的最適化問題⁽¹²⁾ として取り扱うことを提案する。

$$\left. \begin{aligned} &g_i(\mathbf{x}) \geq 0 \quad (i=1, \dots, m) \text{ の条件の下で,} \\ &\mathbf{F}(\mathbf{x}) = (F_1(\mathbf{x}), F_2(\mathbf{x}), F_3(\mathbf{x}), F_4(\mathbf{x})) \\ &\text{を最小にする } \mathbf{x} = (x_1, \dots, x_n) \text{ を求める。} \end{aligned} \right\} \dots\dots (7)$$

ここで、 $F_1(\mathbf{x})$: 一次側モータ重量、 $F_2(\mathbf{x})$: 電源容量、 $F_3(\mathbf{x})$: 二次側地上設備資材費、 $F_4(\mathbf{x})$: 電力消費量 (評価関数 k_e) である。

新都市交通用 SLIM 設計の場合、(7) 式のような 4 つの目的関数を同時に最小化する完全最適解は存在せず、パレート最適解の集合を求めることになるが、通常、同式を単一目的の最適化問題に変換してその最適解をパレート最適解に対応づける。その解法としてここでは、次のようにある目的関数、たとえば $F_1(\mathbf{x})$ のみを目的関数とし、他のものを制約式に置き換える方法を用いる。すなわち、

$$\left. \begin{aligned} &g_i(\mathbf{x}) \geq 0, (F_2(\mathbf{x}), F_3(\mathbf{x}), F_4(\mathbf{x})) \leq (\varepsilon_2, \varepsilon_3, \varepsilon_4) \\ &\text{の条件の下で,} \\ &F_1(\mathbf{x}) \text{ を最小にする } \mathbf{x} \text{ を求める。} \end{aligned} \right\} \dots\dots (8)$$

多目的最適解の例として、表 1 (e) に $F_1(\mathbf{x})$: 一次側重量を目的関数とし、他の $F_2(\mathbf{x}), F_3(\mathbf{x}), F_4(\mathbf{x})$ に対しそれぞれの単目的最適化問題で得られた解 (以後、最小値と呼ぶ。同表 (b)~(d) 参照) の 1 割増しを制約値 $\varepsilon_2\sim\varepsilon_4$ として与えた場合、表 1 (f) に $F_4(\mathbf{x})$: 電力消費量を目的関数とし他の $F_1(\mathbf{x}), F_2(\mathbf{x}), F_3(\mathbf{x})$ を制約式に置き換えた場合の解析結果を示す。 $p=8$ 極、 $\tau=258\text{ mm}$ 、 $h=279\text{ mm}$ の設計例 (f) は設計例 (d) に比べて効率が 8.4% 減少するが、一次側重量や二次側材料費が大幅に減少し、一次側重量 518

図 4 最適化目的関数と設計例の一次側重量、電源容量、二次側材料費、電力消費量の関係
 Fig. 4. Relation between the optimized objective functions and the computed design data of primary weight, input KVA, cost of secondary material and power consumption.

kg, 二次側材料費 817 万円/km, 力率 60%, 効率 67%程度が見積もられる。図 4 に、表 1 (a)~(f) について、各目的関数 $F_1(x) \sim F_4(x)$ の最小値 (太線) を 1 とおいた場合の各目的関数の値を示す。多目的最適解 (e) (f) は他の単目的最適解 (a)~(d) に比べて調和のとれた設計になることがわかる。

6. む す び

以上、新都市交通用 SLIM の設計を、電力消費量や垂直力を考慮して制約のある非線形最適化問題として定式化し、数値解析による設計の比較を行った。独立変数として極数、ポールピッチ、鉄心積み厚、二次側アルミニウム板厚、オーバハング長、スロット幅/スロットピッチ、定格すべりを、制約関数として単位容量当たりの出力、一次鉄心歯部磁束密度の最大値、温度上昇、モータ長、鉄心積み厚、オーバハング長、定格垂直力/定格推力、最大推力/定格推力を選定し、目的関数として一次側モータ重量、電源容量、二次側材料費、電力消費量を選んだ場合に設計がどのように変化するかについて検討し、さらに多目的最適化手法による設計例を示した。

終りに、本研究に協力された長崎大学大学院修士課程学生梅木聖巳君 (現、富士電機) に深謝する。

(平成 6 年 7 月 22 日受付, 同 6 年 10 月 11 日再受付)

文 献

- (1) 海老原・鹿野: 「リニアモータの FA への応用 I 総論」, 電学誌, **112**, 223 (平 4-4)
- (2) 野中: 「リニアドライブとその応用」, 電学論 D, **112**, 1134 (平 4-12)
- (3) 野中・吉田・横井・樋口: 「リニアモータ設計データベース調査専門委員会活動報告およびデータベースの現状」, 電気学会研究会資料, LD-91-28 (平 3-2)
- (4) 野中: 「リニアモータ設計データベースの動向」, 電気学会研究会資料, TER-92-23, LD-92-57 (平 4-7)
- (5) 野中・樋口・河田: 「非線形最適化手法を用いた車両用 SLIM の設計について」, 電気学会研究会資料, MAG-90-150, LD-90-53 (平 2-11)
- (6) 樋口・野中: 「非線形最適化手法を用いた片側式リニア誘導モータの設計について」, 電学論 D, **112**, 1171 (平 4-12)
- (7) S. Nonaka & K. Yoshida: "Analysis of Linear Induction Motors Using a Space Harmonic Technique", Transport Without Wheels, pp. 157~216 (1977) Elek Science
- (8) 野中・樋口: 「片側式リニアインダクションモータの近似特性計算式について」, 電学論 B, **102**, 565 (昭 57-9)
- (9) 野中・樋口: 「新都市交通用リニア誘導モータの設計について」, 電学論 D, **111**, 555 (平 3-7)
- (10) 藤井: 「新都市交通用リニア誘導モータの電気的特性とモータサイズとの関係」, 電学論 D, **113**, 525 (平 5-4)
- (11) 樋口・梅木・野中: 「垂直力を制約条件に付加した非線形最適化手法による車両用 SLIM の設計について」, 電気学会研究会資料, LD-93-18 (平 4-3)
- (12) 草刈・麻生・磯部: 「都営 12 号線用鉄車輪式リニアモータカーの推進システム」, 電気学会研究会資料 TER-92-16, LD-92-

50 (平 4-7)

- (13) 例えば、馬場・坂和：「数値計画法入門」、共立出版
 (14) 野中・吉田：「両側式リニアモータの等価回路定数と特性計算式」、電学誌，90，890 (昭 45-5)

付 録

1. 推力 F_x ，垂直力 F_z の式

速度が v_2 のときの推力 F_x ，垂直力 F_z は， μ_0 を真空透磁率とすると次式で求められる。

$$F_x = \int_{-L/2}^{L/2} \frac{1}{2} \left(\frac{1}{\mu_0} B_x B_x^* \right) h dx \quad \cdots \cdots \text{(付 1)}$$

$$F_z = \int_{-L/2}^{L/2} \frac{1}{2} \left(\frac{1}{2\mu_0} B_z B_z^* - \frac{1}{2\mu_0} B_x B_x^* \right) h dx \quad \cdots \cdots \text{(付 2)}$$

ここで， B_x ， B_z はギャップ磁束密度の x 方向（進行方向）， z 方向（垂直方向）成分で，次式で表わされる。

$$B_x = -\mu_0 \sum_{n=1}^{\infty} 2\sqrt{2} m I_1 \frac{(k_{w,2n-1} k_{Lp,2n-1} N_{ph})}{(2n-1) \tau_{2n-1}} \times \left\{ k_{mf,2n-1} \epsilon^{j(\omega t - \frac{\pi x}{\tau_{2n-1}})} + k_{mb,2n-1} \epsilon^{j(\omega t + \frac{\pi x}{\tau_{2n-1}})} \right\} \quad \cdots \cdots \text{(付 3)}$$

$$B_z = -j\mu_0 \sum_{n=1}^{\infty} 2\sqrt{2} m I_1 \frac{(k_{w,2n-1} k_{Lp,2n-1} N_{ph})}{(2n-1) \tau_{2n-1}} \times \left\{ k_{mf,2n-1} K_{Hf,2n-1} \epsilon^{j(\omega t - \frac{\pi x}{\tau_{2n-1}})} + k_{mb,2n-1} K_{Hb,2n-1} \epsilon^{j(\omega t + \frac{\pi x}{\tau_{2n-1}})} \right\} \quad \cdots \cdots \text{(付 4)}$$

ここで， ω ：角周波数， N_{ph} ：一相の直列巻数（ $=pqN$ ）， τ_{2n-1} ：第 $2n-1$ 調波のポールピッチ， $k_{w,2n-1}$ ：第 $2n-1$ 調波の巻線係数， $k_{Lp,2n-1}$ ：第 $2n-1$ 調波の極数係数， $k_{mf,2n-1}$ ：第 $2n-1$ 調波の進行波の相数係数， $k_{mb,2n-1}$ ：後進波の相数係数で，

$$K_{Hf,2n-1} = \coth\{\pi(g + d_2 \lambda'_{2f,2n-1})/\tau_{2n-1}\} \quad \cdots \cdots \text{(付 5)}$$

$$\frac{\pi d_2 \lambda'_{2f,2n-1}}{\tau_{2n-1}} = \tanh^{-1} \left[\frac{\mu_0 \lambda'_{2f,2n-1}}{\mu_2} \tanh \left\{ \frac{\pi(d_2 \lambda'_{2f,2n-1} + d_1 \lambda'_{1f,2n-1})}{\tau_{2n-1}} \right\} \right] \quad \cdots \cdots \text{(付 6)}$$

$$\frac{\pi d_1 \lambda'_{1f,2n-1}}{\tau_{2n-1}} = \tanh^{-1} \left\{ \left(\frac{\lambda'_{1f,2n-1} \mu_2}{\lambda'_{2f,2n-1} \mu_1} \right) \right. \\ \left. \frac{\left(\frac{\mu_1}{\lambda'_{1f,2n-1} \mu_0} \right) + \tanh \left(\frac{\pi d_1 \lambda'_{1f,2n-1}}{\tau_{2n-1}} \right)}{1 + \left(\frac{\mu_1}{\lambda'_{1f,2n-1} \mu_0} \right) \tanh \left(\frac{\pi d_1 \lambda'_{1f,2n-1}}{\tau_{2n-1}} \right)} \right\} \quad \cdots \cdots \text{(付 7)}$$

$$\lambda'_{1f,2n-1} = \sqrt{1 + j\sigma_1 \mu_1 S_{f,2n-1} v_{1,2n-1} \tau_{2n-1} / \pi} \quad \cdots \cdots \text{(付 8)}$$

$$\lambda'_{2f,2n-1} = \sqrt{1 + j\sigma_2 \mu_2 S_{f,2n-1} v_{1,2n-1} \tau_{2n-1} / \pi} \quad \cdots \cdots \text{(付 9)}$$

$$S_{f,2n-1} = (v_{1,2n-1} - v_2) / v_{1,2n-1} \quad \cdots \cdots \text{(付 10)}$$

$$v_{1,2n-1} = 2\tau_{2n-1} f_1 \quad \cdots \cdots \text{(付 11)}$$

ここで， μ_1 ：裏張り鉄板透磁率， σ_1 ：裏張り鉄板導電率， μ_2 ：アルミニウム板透磁率， σ_2 ：アルミニウム板導電率。

また， $K_{Hb,2n-1}$ については，(付 5)～(付 9)式中の添字 f

(a) スロット構造図

(b) 横方向構造図

図 5 SLIM の構造略図
 Fig. 5. Construction of SLIM.

を b に置き換えたものに等しく，(付 10)式に相当するものは次のようになる。

$$S_{b,2n-1} = (v_{1,2n-1} + v_2) / v_{1,2n-1} \quad \cdots \cdots \text{(付 12)}$$

2. 一次抵抗 r_1 ，一次漏れリアクタンス x_1 の式⁽¹⁴⁾

一次抵抗 r_1 は，

$$r_1 = K_r \rho 2N_{ph} l_a / a A_{c1} \quad \cdots \cdots \text{(付 13)}$$

ここで， K_r ：交流実効抵抗補正係数， ρ ：一次巻線の体積抵抗率， l_a ：半コイル長（ $=h + 1.5\tau\beta$ ）， A_{c1} ：導体断面積（ $=I_1 \times 10^{-6} / a J_1$ ）， I_1 ：一次電流（定格推力と(付 1)式の関係より計算）

一次漏れリアクタンス x_1 は，Kilgore の式を用いると，

$$x_1 = 16mf_1 h \frac{(k_w N_{ph})^2}{p} \times 10^{-7} \times \left\{ \frac{K_{x1}}{k_w^2} \frac{20}{mq} \left(\frac{d_{2s}}{w_s} + \frac{d_{1s}}{3w_s} \right) + \frac{4}{h} (2l_{e2} + l_{e1}) \right\} \quad \cdots \cdots \text{(付 14)}$$

$$K_{x1} = (3\beta + 1) / 4 \quad \cdots \cdots \text{(付 15)}$$

ここで， f_1 ：周波数（ $=v_n / 2\tau(1 - s_n)$ ）， k_w ：巻線係数（ $=\sin(\beta\pi/2)\sin(\pi/2m)/q\sin(\pi/2mq)$ ）， l_{e1} ， l_{e2} ， d_{1s} ， d_{2s} は，図 5 に示すパラメータで， $l_{e1} = (l_a - 2l_{e2} - h) / 2$ ， $d_{1s} = 2aA_{c1}N / w_s$ （実際には絶縁厚みを考慮して求めている）で与えられる。ここでは， $l_{e2} = 10 \text{ mm}$ ， $d_{2s} = 5 \text{ mm}$ としている。

樋 口 剛（正員） 昭和 29 年 1 月 24 日生。57 年 3 月九州大学大学院工学研究科電気工学専攻博士課程修了。同年 4 月長崎大学工学部講師。59 年 10 月同助教授，現在にいたる。工学博士。リニア誘導モータの設計に関する研究，パワーエレクトロニクスと電動機制御に関する研究に従事。

姫野 浩 司 (学生員) 昭和 47 年 1 月 28 日生。平成 6 年 3 月長崎大学工学部電気情報工学科卒業，同年 4 月長崎大学大学院工学研究科電気情報工学専攻修士課程入学，現在にいたる。

野中 作太郎 (正員) 昭和 3 年 11 月 12 日生。27 年 3 月九州大学工学部電気工学科卒業。29 年 4 月九州大学工学部講師，30 年 6 月同助教授，42 年 4 月同教授，平成元年～3 年工学部附属超伝導マグネット研究センター長併任，平成 4 年 4 月近畿大学九州工学部教授，現在にいたる。工学博士。46 年電気学会論文賞，平成 4 年電気学会業績賞授賞。