UDC 625.143—46 : 669.71
621.313.333—185.4

論文

54-B 63

高速 LIM 用中空アルミニウムリアクション レールの効果に関する実験的研究

正員 野 中 作太郎 (九 大)
正員 藤 井 信 男 (九 大)
准員 篠 田 直 之 (九 大)

1. ま え が き

筆者らは先に、中空アルミニウムリアクションレール（以下、中空アルミと略称）について、これを等価なサンドイッチ構造複合二次導体とした空間高調波解析法による解析結果から端効果が小さいことを解明し、短一次形両側式高速リニアインダクションモータ（LIM）における中空アルミの有用性を提唱してきた^{(1)~(4)}。

中空アルミは、アメリカ運輸省のプエブロ試験センターの超高速リニアモーターカー試験車 LIMRV、PTACV、TLRV に採用されているが、これが採用されたそもその理由は、初期の基礎実験段階における拘束試験で厚い単一アルミニウムリアクションレール（以下、単一アルミと略称）よりも大きな推力が得られたこと、構造上機械的強度もあり資材を節約できることにあった。短一次形 LIM の解析は困難であるため、特にサンドイッチ構造複合二次導体についての比較的厳密な特性解明は、筆者らの研究を除いては実験を実施しているアメリカにおいてすら行なわれていない。また、LIMRV の走行試験の実験データは公表されているが⁽⁵⁾、駆動条件が一定でなく、得られた実測値は補外法を用いて定電圧または定電流特性に換算されているため、これら実験データを理論値と比較するには正確を期し難かった。

本稿では、まず回転円板方式の両側式高速 LIM 試験装置を用いて、二次導体がそれぞれ中空アルミと単一アルミの場合について、最高速度 500 km/h に及ぶ

特性を実測した。本試験装置は LIM を可変電圧・可変周波数サイリスタインバータによって駆動し、同時に LIM 円板に直結の直流機を静止レオナード方式で制御することによって、始動時からの推力・垂直力・一次電流の速度特性曲線を X-Y レコーダで直記できるようにしている。

次に中空アルミと単一アルミのそれぞれの場合の実測値と、時間高調波を考慮した空間高調波解析法による計算値を比較し、本解析法の妥当性を検討した。

また実測値により、中空アルミと単一アルミの特性の比較を行ない、中空アルミの効果を明確にした。最後に実験機の定数を用いて中空アルミと種々の二次導体の特性を理論的に比較し、その有用性を示した。

2. 実 験 装 置

実験に使用した装置を第 1 図に、概略図を第 2 図に示す。回転円板形両側式 LIM は三相、4 極、70 kVA で約 500 km/h の速度まで特性試験できる。各一次鉄心は積み厚 150 mm、中心半径 1,100 mm で長さ 1,550 mm の扇形状（中心半径 80.8°）構造であり、この

第 1 図 高速リニアモータ試験装置

Fig. 1. View of test facility for high-speed linear motor.

Experimental Study on Effect of Hollow Aluminium Reaction Rail for High-Speed LIM. By Sakutaro Nonaka, Member, Nobuo Fujii, Member & Naoyuki Shinoda, Associate (Faculty of Engineering, Kyushu University).

野中作太郎：正員、九州大学工学部電気工学科

藤井信男：正員、九州大学工学部電気工学科

篠田直之：准員、九州大学大学院工学研究科電気工学専攻（現在、安川電機製作所）

第 2 図 高速 LIM 試験装置概略図

Fig. 2. Outline of test facility for high-speed LIM.

第 3 図 推力検出装置

Fig. 3. Device for measuring thrust.

LIM 固定子は推力と垂直力を検出するために、それぞれ異なった方法で架台につり下げられている。推力検出は第 3 図に示すように、一方の LIM 固定子と架台間に設置された 2 個のロードセル（引張用）によって行ない、その際固定子は垂直力によってできるだけ変位しないようにしている。2 個のロードセルは正、負いずれの推力をも測定できるように定格ひずみの半分に相当する初期引張り応力を印加しており、一方で張力を他方で圧縮力を検出し、これらの出力を逆並列に接続することにより原理的に垂直力による出力を相殺させ、推力のみの平均値を得ている。垂直力検出は第 4 図に示すように、もう一方の固定子と架台間に設置された 4 個のロードセル（圧縮用）によって行なう。この固定子はばね（図中の C 部と D 部）によって架台に取付けられ、支持器具による残留応力を極小にすると共に垂直力方向の変位のみを許容し得るようにピン継手（図中の E）も併用し、固定子のわずかな変位で力の検出を行なう。4 個のロードセルは反発力、吸引力の測定を可能にするため、定格ひずみの半分に相当する初期圧縮応力を加えており、これらの出力を並列接続することにより平均値を得ている。

リアクションレールとして用いた二次導体円板は、単一アルミの場合は直径 2,700 mm、厚さ 16 mm で、中空アルミの場合はその構造を第 5 図に示すように、

第 4 図 垂直力検出装置

Fig. 4. Device for measuring vertical force.

第 5 図 中空アルミ円板の構造

Fig. 5. Structure of hollow aluminium rotating disk.

円板外径および厚さは単一アルミに等しく、アルミ壁厚 3 mm、ホール幅 10 mm で、材質は単一アルミと同様の高力アルミニウム合金である。なお、中空アルミ円板はホール幅保持のために LIM 中心と直径 2,660 mm の円周上に若干のスペーサを配置している。試験機の主な設計定数を第 1 表に示す。

LIM の駆動用電源として、可変電圧・可変周波数インバータ (70 kVA, 40~500 V, 20~250 Hz) を使用し、LIM の負荷調整には直流機 (45 kW) を回転円板に直結させ、その電力制御を静止コンバータ (120 kW) で行なう。これらの装置によって LIM 円板を約 2 rpm/s (0.23 m/s²) で加速しながら速度特性を得ているが、第 2 図に示すように現状ではインバータ装置は電力回生ができないので、試験範囲はモータ動作に限られる。

推力、垂直力はロードセル出力を動ひずみ測定器を通して X-Y レコーダの Y 軸入力とし、一方、X 軸入力回転円板に直結した速度検出用発電機から得ている。また、一次電流は各相が若干の不均衡となるため、三相の平均電流を X-Y レコーダに直記させるようにしている。力率および効率は計器（使用周波数範囲 25 Hz~2 kHz）の読みから算定している。

第 1 表 高速 LIM 試験機的设计定数

Table 1. Design parameters of test machine for high-speed LIM.

	名 称	記 号	単 位	数 値
定 格	線間電圧	$\sqrt{3} V_1$	V	440
	周 波 数	f_1	Hz	220
	容 量	KVA	kVA	70
	同期速度	v_1	km/h	494.2
一 次 鉄 心	相 数	m		3
	極数 (片側)	p		4
	ポールピッチ	τ	mm	312
	鉄心積み厚	h	mm	150
	スロット数 (片側)	N_s		58
	毎極毎相のスロット数	q		4
	スロットピッチ	t_s	mm	26
	スロット幅	w_s	mm	13
	スロット深さ	d_s	mm	30
	一次側の長さ	L	mm	1,482
一 次 巻 線	短 節 率	β		10/12
	1 コイルの巻数	N		3
	1 相の直列巻数	N_{ph}		96
	一次抵抗	r_1	Ω	0.104 (75°C)
	一次漏れリアクタンス	x	Ω	0.940 (220 Hz)
ギャップ	メカニカルクリアランス	g	mm	5
	全エアギャップ	g_1	mm	26
二 次 導 体	材 質			高力アルミ合金
	抵 抗 率	$1/\sigma$	Ωm	4.82×10^{-8} (40°C)
	全体の厚さ	$2d$	mm	16
	(中空アルミ 壁厚)	d_2	mm	3
	ホール幅	$2d_1$	mm	10
	オーバハンギング	c	mm	175
	二次導体幅	h_2	mm	500

3. 時間高調波を考慮した空間高調波解析

筆者らは先に、サンドイッチ複合二次導体をもつ高速 LIM について、偶、奇数極兼用の空間高調波解析を報告した⁽¹⁾。本実験の LIM 駆動用電源であるインバータの電圧波形は第 6 図に示すように時間高調波を含んでいるため、実測値に対応する理論としては時間高調波を考慮する必要がある。この場合、前進波磁界を作る $\xi = (6\xi' - 5)$ 次系と後進波磁界を作る $\xi = (6\xi' - 1)$ 次系の時間高調波に分けて考える (ξ' は正の整

第 6 図 インバータ電圧波形

Fig. 6. Voltage waveform of inverter.

数)⁽⁶⁾。一次鉄心表面上のエアギャップ磁束密度は、文献(1)の(26), (27)式に対応して、第 ξ 次時間高調波に対しては次式のようにになる。

$$B_{x1,\xi}^{\text{III}} = -\mu_0 \sum_{n=1,3}^{\infty} 3\sqrt{2} \frac{k_{wn} k_{Lpn} N_{ph}}{2L_1} I_{1,\xi} \times \{k_1 \varepsilon^{-j(\pi/\tau_{1n})x} \pm k_2 \varepsilon^{j(\pi/\tau_{1n})x}\} \varepsilon^{j\xi\omega_1 t} \quad (1)$$

$$B_{x1,\xi}^{\text{III}} = -j\mu_0 \sum_{n=1,3}^{\infty} 3\sqrt{2} \frac{k_{wn} k_{Lpn} N_{ph}}{2L_1} I_{1,\xi} \times \{k_1 K_{fn,\xi} \varepsilon^{-j(\pi/\tau_{1n})x} \mp k_2 K_{bn,\xi} \varepsilon^{j(\pi/\tau_{1n})x}\} \varepsilon^{j\xi\omega_1 t} \quad (2)$$

上式において、複数は偶数極の場合は上、奇数極の場合は下をとり、以下もこれに従う。ここで、 $\xi = (6\xi' - 5)$ 次時間高調波に対しては

$$k_1 = k_{mf n} = \frac{\sin \frac{\pi}{2} \left(1 - \frac{\tau}{\tau_{1n}}\right)}{3 \sin \frac{\pi}{6} \left(1 - \frac{\tau}{\tau_{1n}}\right)} \quad (3)$$

$$k_2 = k_{mb n} = \frac{\sin \frac{\pi}{2} \left(1 + \frac{\tau}{\tau_{1n}}\right)}{3 \sin \frac{\pi}{6} \left(1 + \frac{\tau}{\tau_{1n}}\right)} \quad (4)$$

$\xi = (6\xi' - 1)$ 次時間高調波に対しては

$$k_1 = k_{mb n}, \quad k_2 = k_{mf n} \quad (5)$$

を用いる。また

$$K_{fn,\xi} = \coth \frac{\pi}{\tau_{1n}} (g + d_2 \lambda_{2fn,\xi'}) \quad (6)$$

ここで $\lambda_{2fn,\xi'}$ は次式で決定される。

$$\frac{\pi}{\tau_{1n}} d_2 \lambda_{2fn,\xi'} = \tanh^{-1} \left\{ \lambda_{2fn,\xi} \tanh \frac{\pi}{\tau_{1n}} (d_2 \lambda_{2fn,\xi} + d_1 \lambda_{1fn,\xi'}) \right\} \quad (7)$$

N-S 対向の場合

$$\frac{\pi}{\tau_{1n}} d_1 \lambda_{1fn,\xi'} = \tanh^{-1} \left(\frac{\mu_2}{\mu_1} \frac{\lambda_{1fn,\xi}}{\lambda_{2fn,\xi}} \tanh \frac{\pi}{\tau_{1n}} d_1 \lambda_{1fn,\xi} \right) \quad (8)$$

ここで

$$\lambda_{1fn,\xi} = \sqrt{1 + j\sigma_1 \mu_1 s_{fn,\xi} \xi v_{1n} \tau_{1n} / \pi} \quad (9)$$

$$\lambda_{2fn,\xi} = \sqrt{1 + j\sigma_2 \mu_2 s_{fn,\xi} \xi v_{1n} \tau_{1n} / \pi} \quad (10)$$

同様に, $K_{bn,\xi}$ は(6)~(10)式の添字 f を b に置き換えたものである。ここで

$$s_{fn,\xi} = 1 - \frac{1-s}{\xi} \frac{\tau}{\tau_{1n}} \quad (11)$$

$$s_{bn,\xi} = 1 + \frac{1-s}{\xi} \frac{\tau}{\tau_{1n}} \quad (12)$$

また, 等価二次インピーダンス $\dot{Z}_{2e,\xi}$ は

$$\begin{aligned} \dot{Z}_{2e,\xi} &= \sum_{n=1,3}^{\infty} 12h\xi f_1 \mu_0 (1/n) (k_{wn} k_{Lpn} N_{ph})^2 \\ &\quad \times j(k_1 K_{fn,\xi} \pm k_2 K_{bn,\xi}) \\ &= r_{2e,\xi} + jx_{2e,\xi} \\ &= Re(\dot{Z}_{2e,\xi}) + jIm(\dot{Z}_{2e,\xi}) \quad (13) \end{aligned}$$

従って, V_1 をインバータ相電圧の実効値とすれば,

$$I_{1,\xi} = \frac{V_{1,\xi}}{Z_{1,\xi}} = \frac{\frac{3}{\pi} \frac{V_1}{\xi}}{\sqrt{(r_1 + r_{2e,\xi})^2 + (x_{1,\xi} + x_{2e,\xi})^2}} \quad (14)$$

これから推力 F_x (kg) と一次鉄心片側に働く垂直力 F_z^{IV} (kg) が次式の関係で得られる。

$$F_x = \frac{1}{9.8} \sum_{\xi=1}^{\infty} \int_{-L/2}^{L/2} Re \left(\frac{1}{\mu_0} B_{x1,\xi}^{III} B_{z1,\xi}^{III*} \right) h dx \quad (15)$$

$$\begin{aligned} F_z^{IV} &= \frac{1}{9.8} \sum_{\xi=1}^{\infty} \int_{-L/2}^{L/2} \frac{1}{\mu_0} (|B_{z1,\xi}^{III}|^2 \\ &\quad - |B_{x1,\xi}^{III}|^2) h dx \quad (16) \end{aligned}$$

また, 一次電流 I_1 , 一次入力 P_1 , 力率 $\cos \varphi_1$, 出力 P_0 , 効率 η は, それぞれ以下の式で計算することができる。

$$I_1 = \sqrt{\sum_{\xi=1}^{\infty} I_{1,\xi}^2} \quad (17)$$

$$P_1 = \sum_{\xi=1}^{\infty} 3 \cdot \frac{3}{\pi} \frac{V_1}{\xi} I_{1,\xi} \frac{r_1 + r_{2e,\xi}}{Z_{1,\xi}} \quad (18)$$

$$\cos \varphi_1 = P_1 / 3 V_1 I_1 \quad (19)$$

$$P_0 = 9.8 \times 2(1-s) F_x \tau f_1 \quad (20)$$

$$\eta = P_0 / P_1 \quad (21)$$

ここで, 中空アルミの場合は, $\sigma_1=0$, $\mu_1=\mu_2=\mu_0$ として, また単一アルミの場合は $d_1=0$, $\mu_2=\mu_0$ として求められる。

4. 実測値と計算値の比較

第7図は定格周波数 220 Hz で 220 V の電圧を供給した場合の中空アルミにおける特性を示す。ここで実測値の実線に対し, 計算値としてインバータ電圧(一点鎖線), 正弦波電圧(破線), インバータ電圧で端効果無視(点線)の3種を比較したものである。推力, 一次電流共に実測値と計算値(一点鎖線)はよく

第7図 特性の種々の計算値と実測値の比較 (中空アルミ)

Fig. 7. Comparison between various computed results and measurements for characteristics (hollow aluminium plate).

第8図 推力・垂直力に及ぼす風圧の影響

Fig. 8. Influence of wind pressure on thrust and vertical force.

一致している。この場合の同期速度は 494.2 km/h であるが, 二次導体が中空アルミであるため, 単一アルミに比べ端効果の影響は小さい。単一アルミの場合についても実測値と正弦波およびインバータ電圧に対する計算値との比較を行ない, 後者の計算値がよく一致することを確認している⁽¹⁾⁽⁷⁾。なお, 高速時に推力の実測値が計算値よりも低下するのは風圧の影響である。第8図は LIM を励磁せずに円板を直流機で回転させた場合の風圧による推力, 垂直力を直記させたもので, 高速になるほど空気の粘性により負の推力と吸引力を生じることを示している。

第9図は中空アルミの場合について, $\sqrt{3}V_1/f_1 = 1.0$ V/Hz 一定に保ちながら供給周波数を 90 Hz から 240 Hz まで 30 Hz ごとに変化させた場合の定電圧駆動時の(a)図; 推力, (b)図; 垂直力, (c)図; 一次電流, (d)図; 力率, (e)図; 単位容量あたりの出力特性を示したものである。ここで実線は実測値(但し(a),(b),(e)図の点線は実測値に風圧の影響を補正したもの), 一点鎖線はインバータ電圧波形に基づく計算値を示す。

(a)図に示した推力特性において, V/f 一定制御

第9図 中空アルミの実測値と計算値の比較

Fig. 9. Comparison between computed and measured values for characteristic curves (hollow aluminium plate).

時には最大推力は周波数にかかわらずほぼ一定となり、最大推力を発生するすべり位置と端効果によって生じる推力の凹みの位置なども実測値と計算値はよく一致している。なお、周波数が高くなるほど低すべり領域において計算値との差が大きくなるのは、前述のように実測値では高速になるほど風圧の影響により、検出される推力が減少するためである。

(b)図に示した垂直力特性においては、始動時の反発力は周波数の増加と共に増大し、次第に飽和する傾向にあること、また、すべりが小さくなるに従い反発力は減少し、全ての周波数の低すべり領域で吸引力となることなど定性的傾向は一致している。特にすべりが大きいところでの反発力領域において実測値と計算値の間かなりの値の差が認められるが、これは理論計算において二次元解析を用いているため、一次コイル端部に働く垂直力を算定していないことに起因するもので、垂直力に関する限り三次元解析が必要である⁽⁸⁾⁽⁹⁾。

(c)図に示した一次電流特性については、実測値と

計算値は非常によく一致している。中空アルミの場合周波数が高い高速時の低すべり領域でも一次電流はある程度減少している。また、始動二次抵抗が比較的大きいため、 V/f 一定制御にもかかわらず 90, 120 Hz の低い周波数における始動一次電流はやや小さいが、150 Hz 以上においてはほぼ一定となる。

(d)図は力率特性を示したものである。実測値と計算値は大体一致しており、周波数が増大しても最大力率はあまり低下しないことがわかる。周波数が高くなるにつれて実測値との若干の差が見られるが、これは一次抵抗や一次漏れリアクタンスなどの周波数による変化並びに各相の不均衡に起因するものと思われる。

(e)図は力率×効率、すなわち、単位容量あたりの出力特性を示したものである。実測値と計算値はよく一致しており、周波数が増大してもその最大値はほとんど低下しないことがわかる。

第10図は第9図の中空アルミと対応して、単一アルミの場合について $\sqrt{3} V_1 / f_1 = 1.0 \text{ V/Hz}$ 一定に保ち、種々の供給周波数に対する定電圧駆動時の特性

第 10 図 単一アルミの実測値と計算値の比較

Fig. 10. Comparison between computed and measured values for characteristic curves (single aluminium plate).

を、実測値と計算値を比較しながら示したものである。

(a)図の推力特性と(b)図の一次電流特性の双方共に、実測値と計算値の非常によい一致が見られる。なお、周波数が 180 Hz 以上の低すべり領域で実測曲線に脈動が見られるのは、本試験装置が回転円板駆動のため、出口端端効果で生じた二次うず電流が十分減衰しないうちにモータの入口端に到達し干渉を引き起こすためである。第 9 図の中空アルミの場合にこの脈動現象が現われていないのは、中空アルミの等価抵抗が大、等価インダクタンスが小で⁽¹⁰⁾、二次時定数が単一アルミに比べて小さく、出口端を出た後の二次うず電流は速やかに減衰するためと考えられる。

紙面の都合上割愛したが、他の力率特性と単位容量あたりの出力特性においても、実測値と計算値はよく一致することを確認している⁽¹¹⁾。

5. 中空アルミと単一アルミの特性の比較

第 11 図は中空アルミと単一アルミの場合について、推力に及ぼす端効果の影響がどの程度かを計算値により調べたものである。中空アルミの場合、単一アルミに比べて二次抵抗が大きいために(すべり $s=1.0$ で中空アルミの場合 $r_{2e}=0.190\Omega$ 、単一アルミの場合 $r_{2e}=0.0715\Omega$)、端効果を無視した場合でも最大推力を発生するすべりが比較的大きく、そのすべり付近では端効果が比較的小さいために端効果による最大推力

第 11 図 推力速度特性における端効果の影響 (計算値)

Fig. 11. Influence of end effect on thrust-speed characteristics (calculation).

の低下は単一アルミと比べると著しく小さく、240 Hz における最大推力は単一アルミの場合約 40% も減衰しているのに対し、中空アルミではわずか 10% 弱であることがわかる。

第 12 図(a)～(e)図は中空アルミの効果を明確にするために、中空アルミと単一アルミの特性を実測値同志比較したものである。ここで実線は中空アルミ、点線は単一アルミの場合を示す。

(a)図の推力特性において、点線の単一アルミの場合は端効果の影響で周波数が高くなるにつれて最大推力が極端に低下し、定常運転領域の曲線の傾斜がゆるやかになるのに対し、実線の中空アルミの場合これらの傾向は非常に小さく、端効果の大幅な軽減が認められる。端効果が比較的小さい 90, 120 Hz では中空アルミの最大推力発生時のすべりが大きいため、定常運転領域についてのみ比較すると、120 Hz 以下においてはむしろ単一アルミの推力の方が大きい、210 Hz, 240 Hz の高速域においては端効果の小さな中空アルミの方が断然優れていることが明瞭である。一方、始動時から最大推力に達する間の回みの位置は中空、単一アルミにかかわらず、また周波数に無関係で、すべり $s=0.4$ を中心として $s=0.35\sim 0.45$ の間で生じることから、二次側定数に無関係であること

第 12 図 中空アルミと単一アルミの特性比較 (実測値)

Fig. 12. Comparison between the characteristics for hollow aluminium and single aluminium reaction rail (measurement).

がわかる⁽¹²⁾。

(b)図の垂直力特性において、単一アルミでは 120 Hz 以上では反発力のみになるのに対し、中空アルミの場合は運転周波数にかかわらず低すべり領域で吸引力に変わる。低すべり領域では端効果のために生じる二次導体中のうず電流が少ないほど一次側から出る磁束は二次導体を通過しやすくなり⁽¹³⁾、両一次鉄心間の吸引力が大きくなるので、垂直力特性からも中空アルミは端効果の影響が少ないことがわかる。

(c)図は一次電流特性を示す。中空アルミの場合、単一アルミに比べて各周波数において低すべり領域での電流の減少が大きく、特に 180 Hz 以上では始動電流はほぼ等しいのに対し、定常運転領域では単一アルミの約 7 割程度に電流が小さくなる。これは中空アルミの場合、端効果による二次減磁作用を打ち消すための流入電流が単一アルミに比べ小さいことを意味している。

(d)図は力率特性を比較したもので、中空アルミでは全領域において大幅な向上が見られ、周波数の増大

に伴う最大力率の低下も小さい。特に 240 Hz での最大値については単一アルミに比べ約 6 割も向上している。

(e)図は総合特性を比較するために、単位容量あたりの出力について調べたもので風圧を補正した値を示す。単一アルミの場合周波数が高くなるにつれてその最大値は大幅に低下するのに対し、中空アルミではわずかに低下するのみで、全ての領域において著しい特性の改善が認められる。

特に 240 Hz での最大値については、中空アルミの場合単一アルミの約 1.7 倍程度にもなっている。

6. 中空アルミと種々の二次導体の特性比較

第 13 図は実験機の定数を用いて、種々の二次導体に関して (a)図推力特性と (b)図単位容量あたりの出力特性を理論的に比較したものである。曲線 1 は成層鉄心アルミ、曲線 2 は中空アルミ、曲線 3 は鉄アルミの場合であり、これらはいずれも $d_1=5\text{ mm}$ 、 $d_2=3\text{ mm}$ である。また、曲線 4 は単一鉄、曲線 5 は単一アルミ

第 13 図 種々の二次導体の特性比較 (計算値)
Fig. 13. Comparison of characteristics for various secondary conductors (calculation).

第 14 図 中空アルミと等価単体との特性比較
Fig. 14. Comparison between the characteristics for hollow aluminium and its equivalent single reaction plates.

の場合で、曲線 1～5 の二次導体全体の厚み $2d$ は 16 mm 一定としている。これらの図より、成層鉄心アルミ、中空アルミ、鉄アルミの三者はほぼ同様の特性を有することから、経済性も考慮すると中空アルミは非常に有用な二次導体であるといえる。

第 14 図は中空アルミの等価単体として $\mu = \mu_0$, $\sigma = \sigma_2 d_2 / (d_1 + d_2)$ で厚み $2d = 2(d_1 + d_2)$ の単一材質と中空アルミとの比較を行なったもので、すべり $s = 0.3$ と 0.2 の場合の推力 F_x と二次漏れリアクタンス x_2 (正弦波電圧時) について、ホール幅 $2d_1$ に対する変化を示す。このような等価単体を考えると二次抵抗 r_2 は d_1 変化に対し中空アルミの場合とほぼ同等となるが、図に示すように x_2 は d_1 が大きくなるほど中空アルミに比べて大幅に増大するため、推力 F_x などの特性の低下が大きくなる。このように、中空アルミが良好な特性をもつ理由は、単に等価抵抗が大きいことに依るものではなく、二次漏れリアクタンスを小さく

くできることも重要な要因となっている。

7. むすび

以上、中空アルミおよび単一アルミ二次導体について、高速 LIM の線間電圧と周波数を一定の比で種々変化した場合の定電圧駆動時の特性を実験的に明らかにすると共に、垂直力を除けば推力、一次電流、力率、効率などの速度特性がインバータ電圧波形を考慮した計算値とよく一致することから、本理論の妥当性が確認された。

また、中空アルミと単一アルミの特性比較から、特に高速になるほど単位容量あたりの出力が大幅に向上することを明らかにし、中空アルミを用いることによって高速 LIM の端効果を著しく軽減できることを実験および理論の両面から解明することができた。

終りに、本高速 LIM 試験装置、可変電圧・可変周波数インバータ装置および中空アルミ円板はそれぞれ昭和 47, 48, 52 年度文部省科学研究費補助金の援助により設備したもので、その製作に際して三菱電機(株)長崎製作所、新良由幸氏、猪谷耕太郎氏らにご協力頂いたことを記して感謝の意を表する。また、実験にご協力頂いた昭和 52 年本学大学院修士卒業生 幸山和正氏に謝意を表する。

(昭和 53 年 5 月 25 日受付, 同 54 年 2 月 5 日再受付)

文 献

- (1) S. Nonaka & K. Yoshida: "Analysis of Linear Induction Motors Using a Space Harmonic Technique" Transport Without Wheels (edited by E.R. Laithwaite) Eleck Science pp. 187~216 (1977)
- (2) 野中・秋吉: 「高速 LIM 用中空アルミニウムリアクションレールの壁厚と特性の関係」昭 50 電気四学会九州支連大 No. 126
- (3) 野中・池口・秋吉: 「高速 LIM 用中空アルミニウムリアクションレールのホール幅と特性の関係」同上 No. 127
- (4) 野中・秋吉: 「高速 LIM 用サンドイッチ構造リアクションレールの鉄心の影響」昭 51 電気学会全大 No. 776
- (5) K.M. Chirgwin: "Test results from the U.S. linear induction motor research vehicle program" (addendum) IEE Conf. Publication No. 120, 236 (1974)
- (6) 野中・林・吉田: 「インバータ駆動による高速リニアモータの推力特性」九州大学工学集報 46, 102 (昭 48-3)
- (7) 野中・藤井・幸山: 「高速 LIM のインバータによる駆動特性」昭 51 電気学会全大 No. 772
- (8) 野中・藤井・篠田: 「高速 LIM における一次コイル端起磁力の影響」昭 53 電気四学会九州支連大 No. 415
- (9) 野中・藤井・篠田: 「高速 LIM のコイル端部に働く垂直力の検討」昭 53 電気四学会九州支連大 No. 416
- (10) 野中・幸山・広崎: 「高速 LIM における中空アルミニウムリアクションレールの効果について」昭 52 電気学会全大 No. 1097
- (11) 野中・藤井・幸山: 「インバータによる高速 LIM の速度制御試験」昭 51 電気学会全大 No. 771
- (12) 野中・幸山: 「高速 LIM の磁束密度の端効果波の空間分布」昭 51 電気四学会九州支連大 No. 530
- (13) 野中・小川: 「端効果およびスロットの影響を考慮したときの高速リニアインダクションモータの磁力線分布」電学論 B, 98, 617 (昭 53-7)