種々の二次導体板による片側式 LIM の 等価回路定数と特性の変化

正 員 野 中 作太郎 (近畿大)

学生員 生 澤 通 人 (近畿大)

Change of Equivalent Circuit Parameters and Performance Characteristics of Single-sided LIMs
with Various Secondary Conducting Plates
Sakutaro Nonaka, Member, Michito Izawa, Student Member (Kinki University)

This paper describes the equations for calculation of the equivalent secondary resistance and the equivalent secondary reactance referred to the primary of single-sided linear induction motor (SLIM) and shows the change of those equivalent circuit parameters and the operating characteristics with various secondary conducting plates. Usually, a composite conductor slab which is consisted of an aluminum plate backed with a solid steel plate is used. In order to simplify the calculation, we have assumed that the back-iron plate consists of a laminated core instead of a solid steel core.

Firstly, the computed results of the performance characteristics of a SLIM with the secondary aluminum plate backed with either solid steel plate or laminated core are shown comparatively.

It was confirmed that the characteristics curves in the case of laminated core give close agreement with the curves in the case of solid steel:

In practice the reaction rail backed with a solid steel is better than that backed with a laminated core from the point of view of economy, robustness and corrosion.

Next, the calculated results of the performance characteristics of a SLIM with a single secondary aluminum plate or a single secondary iron plate are shown.

キーワード：リニア誘導モータ，二次導体板，裏張り鉄板，塊状鉄心，成層鉄心，等価回路定数

1. まえがき

LIM は電磁力によるダイレクトドライブなので低騒音であり、回転機のように遠心力で速度が制限されることがないので高速運転も可能である。車輪で車体を支持案内する LIM カーは LIM が平板状で車輪を小さくできるので低床化が可能で、トンネル断面積を小さくできる特徴があり、ミニ地下鉄用に普及が期待されている⁽¹⁾。

本論文では、二次導体は一般にアルミニウム板と裏張り鉄板から構成されるが、裏張り鉄板が塊状鉄心と成層鉄心とで特性上どの程度の差を生じるかをシミュレーションによって解明する⁽²⁾。

LIM の特性算定式にはエアギャップ中の漏れ磁束や二次導体の材質・寸法などに起因する表皮効果の影響などを正確に把握するために端効果を見捨てた二次元解析式を用いた⁽³⁾。数値例として九州大学都市交通用片側式 LIM 試験装置の設計データを使用した⁽³⁾⁽⁴⁾。LIM の輸送応用では、二次リアクションレールを長距離敷設する必要があり、特性上

あまり差がなければ経費の点でもアルミ爆着塊状鉄心を用いた方が遥かに得策であり、構造上も簡単堅固で腐食にも強く耐用年限も長くなる。また解析上では成層鉄心を仮定すれば計算式が簡単になり、設計パラメータの特性に及ぼす影響の考察が容易となる。

先に報告した等価回路定数の計算式⁽³⁾⁻⁽⁶⁾は、複合二次導体板の導体部分の導電率 σ_2 、透磁率 $\mu_2 = \mu_s \mu_0$ (μ_s : 比透磁率) ならびに裏張り鉄板と仮定した部分の導電率 σ_1 、透磁率 μ_1 を含んだ計算式となっているため、任意の材質や形状の複合二次導体板や単一材質の導体板にも適用できる⁽⁷⁾。本稿では、二次導体板に単なるアルミニウム板や鉄板を使用する場合についても特性の比較を示す。

2. 片側式 LIM の構造と二次元解析モデル

図 1 に短一次形片側式 LIM の構造、図 2 に片側式 LIM の二次元解析モデルを示す⁽²⁾⁽³⁾。

図1 片側式 LIM の構造略図
Fig. 1. Construction of single-sided LIM.

図2 片側式LIMの二次元解析モデル
Fig. 2. Two-dimensional model for analysis of SLIM.

3. 等価回路

図3に LIM の一相あたりの等価回路を示す⁽³⁾。

Fig. 3. Equivalent circuit.

4. 等価二次インピーダンス

以下、先に報告したように、一相あたりの等価二次インピーダンス $\dot{Z}_0(\Omega)$ は次式のようになる⁽²⁾⁻⁽⁵⁾。

$$\dot{Z}_{2e} = K_a j \coth \frac{\pi}{\tau} (g_e + d_2 \lambda_2') \quad \dots\dots\dots (1)$$

ここで、片側式 LIM では

$$K_a = 8mhf_1\mu_0 (k_w N_{ph})^2 / p \quad \dots\dots\dots (2)$$

g_e はスロットの影響を補正した等価ギャップを表し、カータ係数を k_c とすれば、

$$q_e = k_c q \quad \dots\dots\dots (3)$$

また、 $d_2\lambda_2'$ は複合二次導体板の表面で、二次電流による反作用の影響がどの程度になるかを裏張り鉄板の電流も含めて厚さ d_2 の導体板に代表させて等価的に表したもので、次式で求められる⁽³⁾。

$$\frac{\pi}{\tau} d_2 \lambda_2' = \tanh^{-1} \left\{ \frac{\mu_0}{\mu_2} \lambda_2 \tanh \frac{\pi}{\tau} (d_2 \lambda_2 + d_1 \lambda_1') \right\} \quad \dots\dots\dots (4)$$

上式において,

$$\lambda_2 = \sqrt{1 + j\sigma_{2e}\mu_2 s v_1 \tau / \pi} \dots\dots\dots (5)$$

$d_1\lambda_1'$ は裏張り鉄板が導体板領域に關与する割合を示し、次式で計算できる⁽³⁾。

$$\frac{\pi}{\tau} d_1 \lambda_1' = \tanh^{-1} \left\{ \frac{\frac{\mu_2 \lambda_1}{\mu_1 \lambda_2} \frac{\frac{\mu_1}{\mu_0 \lambda_1} + \tanh \frac{\pi}{\tau} d_1 \lambda_1}{1 + \frac{\mu_1}{\mu_0 \lambda_1} \tanh \frac{\pi}{\tau} d_1 \lambda_1}} \right\} \dots\dots\dots(6)$$

$$\lambda_1 = \sqrt{1 + j\sigma_1 e \mu_1 s v_1 \tau / \pi} \dots\dots\dots (7)$$

(5) 式において σ_e (S/m) は等価二次導電率を表わす。二次渦電流は二次導体板幅 $h_2 = h + 2c$ に制約されるので二次元解析が必要であり、等価的に導電率が減少する形で補正できる。次式の Russell-Norsworthy 補正式は比較的良好な結果を与える⁽³⁾⁽⁸⁾。

$$\frac{\sigma_{2e}}{\sigma_2} = 1 - \frac{\tanh \frac{\pi h}{\tau_2}}{\frac{\pi h}{\tau_2} (1 + \tanh \frac{\pi h}{\tau_2} \cdot \tanh \frac{\pi}{\tau} c)} \dots\dots\dots(8)$$

裏張り鉄板に対しても、 σ_{1e}/σ_1 は上式を適用できる。 σ_{2e} , σ_{1e} を採用することによって準三次元の解析を行ったことになる。

$\dot{Z}_{2e}$ を図 3 の等価回路に示すように r_{2e} と x_{2e} に分離すると、

$$\dot{Z}_{2e} = r_{2e} + jx_{2e} \dots\dots\dots(9)$$

λ_2' は次式のように実数部 α_2' と虚数部 β_2' に分けることができるので

$$\lambda_2' = \alpha_2' + j\beta_2' \quad \dots\dots\dots(10)$$

$$\dot{Z}_{2e} = K_a j \coth \left\{ \frac{\pi}{\tau} (g_e + d_2 \alpha_2') + j \frac{\pi}{\tau} d_2 \beta_2' \right\} \quad \dots\dots\dots (11)$$

となる。ゆえに、 r_{2e} と x_{2e} はそれぞれ下式によって求められる⁽²⁾⁻⁽⁴⁾。

$$r_{2e} = K_a \frac{\{\tan \frac{\pi}{\tau} d_2 \beta_2'\} \{1 - \tanh^2 \frac{\pi}{\tau} (g_e + d_2 \alpha_2')\}}{\tanh^2 \frac{\pi}{\tau} (g_e + d_2 \alpha_2') + \tan^2 \frac{\pi}{\tau} d_2 \beta_2'} \dots\dots (12)$$

$$x_{2e} = K_a \frac{\{\tanh \frac{\pi}{\tau} (g_e + d_2 \alpha_2')\} \{1 + \tan^2 \frac{\pi}{\tau} d_2 \beta_2'\}}{\tanh^2 \frac{\pi}{\tau} (g_e + d_2 \alpha_2') + \tan^2 \frac{\pi}{\tau} d_2 \beta_2'} \dots\dots (13)$$

(a)

(b)

(c)

(d)

図4 供給周波数変化時の速度特性

Fig. 4. Speed-characteristics for various supply frequencies.

(a)

(b)

(c)

(d)

図5 供給周波数変化時のすべりに対する速度特性

Fig. 5. Speed-characteristics with slip for various supply frequencies.

図6 ギャップ変化時のすべりに対する速度特性
Fig. 6. Speed-characteristics with slip for various gap length.

5. 複合二次導体板の裏張り鉄板が塊状鉄心と成層鉄心の場合の比較

塊状鉄心の場合、(7)式において $\sigma_{1e} \neq 0$ であり、 $s=0$ の場合の $\lambda_1=1$ を除いて λ_1 は複素数となる。 λ_2 も複素数であるので(6)式の計算はやや複雑である。これに対し、成層鉄心の場合は $\sigma_{1e}=0$ とおけるので常に $\lambda_1=1$ であり図2の領域II-2がアルミニウム板または銅板の場合、透磁率 $\mu_2=\mu_0$ であるので、(6)式において $\mu_1 \gg \mu_0$ を考慮すれば $d_1 \lambda_1' = 0$ となり裏張り鉄板はほぼ完全な磁路を構成するだけで、当然ながら二次導体板としてアルミニウム板に寄与する事はない。

塊状鉄心と成層鉄心を比較するため、図4では横軸を速度 v_2 (km/h)、図5では横軸をすべり s として周波数を $f_1=5, 15, 25$ (定格), 35 Hz と変化させた時で、定格すべり $s_n=0.3$ である。供給電圧と周波数の比は $\sqrt{3}V_1/f_1$ 一定 (数値例では 17.6V/Hz) とした条件での特性である。破線は塊状鉄心、実線は成層鉄心を表す。図4(a)、図5(a)の推力-速度特性において $s=1$ の始動時やその近傍の s が大きく、速度 v_2 の遅い領域では、すべり周波数 sf_1 が大きいので鉄板に流れる二次電流の表皮効果によって等価的にエアギャップが少し増大し塊状鉄心 (破線) の方が成層鉄心 (実線) よりも少し推力が下がっているが、 s が小さくなると逆に塊状鉄心の方が僅かながら特性が良くなっているのはすべり周波数 sf_1 が小さくなると表皮効果が減少し、鉄板に流れる二次電流がアルミニウム板の推力に加わることを意味する。特に $f_1=5\text{Hz}$ では s の大小にかかわらず sf_1 が小さいので塊状鉄心の方が極く僅かであるが特性が向上している。しかし全般的に両者の特性はほとんど一致し、表皮効果による影響は極めて小さいことがわかる。図4及び図5の(b)、(c)の力率と効率において、塊状鉄心は効率にはほとんど影響しないが、力率は低すべり領域で僅かだが良くなることがわかる。

図6では横軸をすべり s としてギャップ長を $g=2, 12, 20$ mm と変化させた時の特性を示す。図6(a)に推力-すべり特性を示す。当然ながら g が小さいほど推力は大となるが塊状鉄心と成層鉄心による差は g に関係なく小さい。図6(d)の一次電流特性ではギャップが小さくなるほど始動電流は大きく、無負荷励磁電流は小さくなるので、一次電流が g の変化によらず一定となるすべりが $s=0.3$ 付近に存在する。

しかし全体的に塊状鉄心と成層鉄心による特性の差は小さく、ギャップにほとんど関係しないことがわかる。

野中は以前、他の設計データとして、4極SLIMにおいて $r=450\text{mm}$, $h=190.5\text{mm}$, 相電圧 $V_1=1,648\text{V}$, $f_1=165\text{Hz}$, 同期速度 $v_1=148.5\text{m/s}$ ($=534.6\text{km/h}$) の高速LIMの場合について、複合二次導体板のアルミニウム板厚 $d_2=3.175\text{mm}$, $\sigma_2=2.32 \times 10^7\text{S/m}$, 裏張り鉄板厚 $d_1=6.35\text{mm}$, $\sigma_1=0.952 \times 10^7\text{S/m}$ の塊状鉄心で $\mu_s=500, 100$ と 20 の場合と成層鉄心で $\sigma_1=0$, $\mu_s=500, 100, 20$ として磁路の飽和の影響を考察し、さらに空間高調波解析を適用することによって端効果がある場合の磁力線分布を解明し、併せて各場合の推力-速度特性、一

次電流-速度特性を報告していた⁽⁹⁾。この場合も s が 0.2 以下の低すべり領域では、塊状鉄心と成層鉄心で推力特性に大差がないことを指摘していた。以上のことから低速は勿論、高速 SLIM でもすべり周波数 sf_1 が小さい領域では裏張り鉄が塊状鉄心でも成層鉄心として近似的に解析できることがわかる。

6. 裏張り鉄板がない単一の二次導体板の特性

〈6・1〉 検討の背景 半導体ウェハーなど、素子の高集積化や歩留まり向上のために、超クリーンな環境下で稼働できる無発塵で保守性の良い搬送システムが要求される。このため移動体を非接触支持し、非接触駆動する装置として地上一次方式 LIM を用いた永久磁石併用の浮上用電磁石にゼロパワー制御を行う磁気浮上、または空気浮上の台車搬送システムが実用化されている⁽¹⁰⁾⁽¹¹⁾。しかし、LIM 二次側に裏張り鉄板がある場合、後述の図 11 (c) に示すように一次側と二次側間に発生する垂直力是一般に高すべり領域で電磁反発力が働き、低すべり領域になると磁気吸引力が強くなりその大きさは速度によって時々刻々変化する^{(12)~(15)}。したがって、磁気浮上に要する負担が増大し、かつ制御が厄介になる。これを避けるため、特性が悪くなるのは已むを得ないとして、また、浮上方式により推力が小さくすむことから二次裏張り鉄板のない単一アルミニウムを採用している⁽¹⁰⁾⁽¹¹⁾。以下二次が単一アルミニウム板または銅板の場合について特性を検討する。

〈6・2〉 二次元解析モデルと等価二次インピーダンス

図 2 の解析モデルにおいて二次導体板を示す II-2 領域は今までの複合二次導体板と同じようにアルミニウム板か銅板と考える。従って $\mu_2=\mu_0$, σ_2 (または σ_{2e}) にはアルミニウムか銅の導電率を用いる。問題は従来裏張り鉄板と考えていた II-1 領域であるが、これは空気層と考え、 $\mu_1=\mu_0$, $\sigma_1=0$ ($\sigma_{1e}=0$) とおく。厚さ d_1 であるが一応 1 極あたりの磁束は 2 等分されて空気層に漏れると考えれば $d_1=\tau/2$ とおけば充分と考えられる。

以上の仮定を (7) 式に代入すれば $\lambda_1=1$ となり、(6) 式は次式のように簡単になる。

$$\frac{\pi}{\tau} d_1 \lambda_1' = \tanh^{-1} \frac{1}{\lambda_2} \dots\dots\dots (14)$$

上式の物理的意味は、導体板の裏の空気層は厚さ d_1 の設定値に無関係に (4) 式右辺に寄与することがわかる。上記のことは数値計算結果からも確認された。

〈6・3〉 数値例による検討 図 7 は裏張り鉄板がある場合と同じ設計データ⁽³⁾⁽⁴⁾を用いて鉄板の代わりに空気層の影響を (14) 式で考慮して、単一アルミニウム板の厚さ d_2 を 1, 3, 5, 10, 15mm と変化した時のすべりに対する速度特性を示したもので、同図 (a) は推力、(b) は力率、(c) は効率、(d) は一次電流の変化の様子を示す。供給電圧、周波数はそれぞれ定格の $\sqrt{3}V_1=440V$, $f_1=25Hz$, ギャップ $g=12mm$, アルミニウムの導電率は $\sigma_2=3.03 \times 10^7 S/m$, $\sigma_{2e}=1.80 \times 10^7 S/m$ を採用した。 $d_2=5mm$ の曲線が図 5 の裏張り鉄板がある場合の $f_1=25Hz$ の曲線と対応する。推力は約 2/3, 力率は約半分、

図 7 種々の厚さの単二次アルミニウム板の場合の速度特性

Fig. 7. Speed-characteristics for various thickness of single secondary aluminum plate.

一次電流は始動電流 ($s=1$) が 0.93, 無負荷励磁電流 ($s=0$) が 3.5 倍程度となることがわかる。なお, 二次抵抗 r_2 は近似的に d_2 に反比例するので⁽⁵⁾, 図 7 (a) の推力-すべり特性は比例推移の傾向を示す。また, 単一アルミニウム板の場合, 予想されるほど特性は劣化せず, 定格すべり $s=0.3$ では, $d_2=15\text{mm}$ を採用すれば最大推力付近で動作させることができる。搬送システムでギャップ g を小さく設計できる場合は更に特性の改善が期待できる。

7. 二次が単一鉄板の場合の特性の検討

〈7・1〉 検討の背景 片側式, 両側式にかかわらず LIM の二次側リアクションレールが単一の鉄板で構築できれば構造が簡単, 堅固で安価になり, これに越した事はない。しかしながら, 従来から, 鉄板を使用した場合, 実験的にも理論的にも LIM の特性が悪く, 特に垂直力 (吸引力) が強く働き, ギャップ支持機構を強固にする必要があった。また, 表皮効果によってすべり周波数が高い場合にはいくら鉄板を厚くしても磁束の浸透深さが極端に浅くなり, 電流, 結果的には磁束が表面に集中して飽和の影響が強く現れることが問題点として知られていた。しかし, 鉄板を使用した場合, 垂直力の問題はさておき, どの程度の特性が得られるのかを確認しておく必要がある。

〈7・2〉 二次元解析モデルと等価二次インピーダンス

図 2 の解析モデルにおいて, II-2 領域は単一鉄板と考え $\mu_2=\mu_s\mu_0$, σ_2 (または σ_{2e}) は鉄板の導電率とする (6・2) 節と同様に II-1 領域は空気層と考え, $\mu_1=\mu_0$, $\sigma_1=\sigma_{1e}=0$ とする。 $\sigma_{1e}=0$ だから (7) 式の $\lambda_1=1$ となり, これらの値を (6) 式に代入すれば, 次式のようになる。

$$\frac{\pi}{\tau} d_1 \lambda_1' = \tanh^{-1} \frac{\mu_s}{\lambda_2} \dots\dots\dots (15)$$

即ち, 鉄板の裏の空気層は厚さ d_1 に無関係となり (14) 式と比較すれば $\tanh^{-1}$ の中が μ_s 倍になることがわかる。

〈7・3〉 数値例による検討 同じ設計データ⁽³⁾⁽⁴⁾を用いて単一鉄板は塊状鉄心の裏張り鉄板と同じ材質と仮定し, $\mu_s=800$, $\sigma_2=0.952 \times 10^7 \text{S/m}$, $\sigma_{2e}=0.565 \times 10^7 \text{S/m}$ とする。アルミニウム板に比べて, 導電率は 0.314 に減少している。図 8 は単一鉄板の厚さ d_2 を 1, 3, 5, 10, 15mm と変化した時のすべりに対する速度特性を同図 (a) は推力, (b) は力率, (c) は効率, (d) は一次電流について示したものである。アルミニウム板の場合に比べて鉄板の場合, $d_2=1\text{mm}$ では表皮効果が小さいので σ_2 の比に応じて, 推力は 0.32, 一次電流は 0.37 程度に減少しているが, $d_2>5\text{mm}$ では表皮効果の影響で特性があまり向上せず, $d_2=10\text{mm}$ と 15mm では特性は殆ど変わらないことがわかる。先に報告した文献 (16) では, 二次側が単一鉄板の場合, 直観的に空気層の影響は無視して $d_1=0$ と仮定したが, 鉄板厚 d_2 が十分薄い時は磁束は鉄板の裏側の空気層に或程度回り込むことが予想される⁽⁹⁾。そこで, 鉄板裏側の空気層の影響を (15) 式で考察した場合と $d_1=0$ と仮定して空気層を無視した場合の両者の特性比較を図 9 に示す。図では紙面の都合で推力-速度特性のみを示しているが, 力率, 効率及び一次電流の速度特性の比較も

図 8 種々の厚さの単二次鉄板の場合の速度特性
Fig. 8. Speed-characteristics for various thickness of single secondary iron plate.

図9 二次鉄板裏側の空気層を考慮した解とこれを無視した解の推力-速度特性の比較

Fig. 9. Comparative thrust-speed characteristics of SLIM with secondary iron plate taking into account and leaving out of account the back-air region.

得ている。

同図 (a) の $d_2=1\text{mm}$ の場合は両者の差は大である。実線の曲線がギャップ磁束が鉄板を突き抜けて裏の空気領域に回り込んでいることを意味する。一方、点線の $d_1=0$ 仮定では回り込み磁束はすべて鉄板中を通り抜けると仮定しているので、推力は大きくなっている。

同図 (b) に示す $d_2=5\text{mm}$ の場合は、 $s=1$ の近傍では両者の差が小さくなっているのは、鉄板中のすべり周波数 sf_1 が大きいので表皮効果により空気層に回り込む磁束も減少す

る。しかし、 s が小さくなるにつれて、 sf_1 が小さくなると表皮効果で磁束が表面に押し上げられずに空気層に突き抜けるようになるため、推力は実線のように点線よりも減少する。図 (c) $d_2=10\text{mm}$ では、 d_2 の増加につれて $s \approx 0$ の近傍を除いて、両者の計算結果はますます一致してくる。このことは d_2 が 10mm 以上になると磁束は殆ど鉄板中を通るようになり、 $d_1=0$ の仮定でも特性計算は十分であることがわかる。

8. 種々の二次導体板による特性比較

〈8・1〉 前提 図 10 は供給電圧 $\sqrt{3}V_1=440\text{V}$, $f_1=25\text{Hz}$, 定格すべり $s=0.3$ の条件の下に、 g'/τ の変化に対する $d_2=5\text{mm}$ 一定の種々の二次導体板をもつ短一次形片側式 LIM の端効果を見逃した特性を比較して示したものである。数値例として用いた片側式 LIM の設計データ⁽²⁾⁽³⁾はミニ地下鉄用車輪支持リニアモーターの開発を目的とした LIM 試験装置で定格速度 37.8km/h , 100kVA である。二次等価回路定数の評価を行う時は g'/τ は g が一定の時には τ を変化させると考えてもよいが、特性比較を行うときは LIM 一次側は $\tau=300\text{mm}$, 回路定数 $r_1=0.168\Omega$, $x_1=0.528\Omega$ を使用しているので、 g'/τ の変化は実質的には g を変化した場合に相当する。なお、単二次銅板の場合、銅の導電率 $\sigma_2=4.76 \times 10^7 \text{ S/m}$ (アルミニウムの 1.571 倍) を採用している。

〈8・2〉 特性の比較検討 図 10 (a) の推力-速度特性は矢張り裏張り鉄板付きアルミニウム板の発生推力が他の単一銅板、アルミニウム板、鉄板を引き離して断然大きいことがわかる。銅板の場合は導電率の大きい分だけアルミニウム板より推力が大きくなる。鉄板の場合は極端に推力が小さく一般には利用価値が少ない。しかし、非常に低速用途ですべり周波数が小さく吸引力も逆に利用できる応用では可能性がある。設計仕様では $g=12.0\text{mm}$, $g_e=14.1\text{mm}$, $g'=19.1\text{mm}$, $g'/\tau=0.0637$, $\tau/g'=15.7$ であり、 $g'/\tau=0.05$ にするだけでも推力はかなり向上できる。同図 (d) において、一次電流の定格値は 130A なので、銅板やアルミニウム板では過電流が流れることになり、供給電圧を下げる必要があり、鉄板では一次電流が十分に流入しきれないで、供給電圧をかなり上げないと一次の容量一杯には使いきれないことになる。電圧上昇の目安として、 $\sqrt{3}V_1=1100\text{V}$, 即ち 2.5 倍程度にすれば、同じすべりに対して電流は 2.5 倍、推力は $(2.5)^2=6.25$ 倍となるので、或程度特性を改善できる⁽¹⁷⁾。

9. 種々の二次導体板による垂直力特性の変化

〈9・1〉 検討の背景 垂直力はギャップ支持機構に大きく影響する。野中らは既に複合二次導体板の場合の SLIM の実験装置において、垂直力の速度特性を実験的に明らかにすると共に理論的にもよく一致することを確認してきた⁽¹⁴⁾⁽¹⁸⁾。片側式 LIM の垂直力を二次導体板がアルミニウムや鉄の単一導体板と裏張り鉄板付きアルミニウム板のような複合二次導体板について二次元解析式に基づいて検討を行った⁽¹⁵⁾。

図10 $\sqrt{3} V_1 = 440V$, $f_1 = 25Hz$, $s = 0.3$, $d_2 = 5mm$ 一定条件下で g'/τ の変化に対する種々の二次導体板の特性の比較
Fig. 10. Comparative performance of SLIM with various secondary reaction rail versus g'/τ under conditions of $\sqrt{3} V_1 = 440V$, $f_1 = 25Hz$, $s = 0.3$ and $d_2 = 5mm$.

〈9・2〉 垂直力の計算式 垂直力 F_z は、

$$F_z = \frac{1}{2} \mu_0 J_1^2 \frac{\cos 2 \frac{\pi}{\tau} d_2 \beta_2'}{\cosh 2 \frac{\pi}{\tau} (g_e + d_2 \alpha_2') - \cos 2 \frac{\pi}{\tau} d_2 \beta_2'} (h \tau p) \quad (16)$$

$$J_1 = 2\sqrt{2} m \frac{k_w N_{ph}}{p \tau} I_1 \quad (17)$$

となる⁽¹⁹⁾。

〈9・3〉 垂直力特性の比較検討 図11において(a)と(b)は(14)式と(15)式の関係を(4)式に代入して領域II-1を空気層、領域II-2をそれぞれアルミニウム板か鉄板とし、その厚み d_2 を変化させた場合の垂直力特性を示す。アルミニウム板の場合は d_2 の増加に伴って、反発力が大きくなっているのがわかる。逆に鉄板の場合は吸引力として現れ、鉄板の厚みが5mm以上になると吸引力はほぼ一定となるのがわかる。

同図(c)は、従来の複合二次導体板においてアルミニウム板厚を変化した場合の垂直力特性を示す。垂直力は主として一次と二次の電流による電磁反発力と鉄心間の磁気吸引力によって構成され、磁気吸引力はすべりに関係なくほぼ一定である。高すべり領域においてアルミニウム板厚が薄い場合は電磁反発力が弱く吸引力として現れているが、板厚が厚くなるとともに二次渦電流が大となり電磁反発力が磁気吸引力に勝るようになり反発力となっている。しかし、低すべり領域に移行するに従って二次渦電流の遅れ成分が減少し、吸引力が強くなるように現れるようになる。

同図(d)は、 $d_2 = 5mm$ の時のアルミニウム、鉄、複合二次導体板の垂直力特性を比較して示す。高すべり領域においては複合二次導体板はアルミニウム板とほぼ同じ反発力を示すが、低すべり領域に近づくにつれ鉄の磁気吸引力の影響が顕著に現れることがわかる。LIM推進を採用しているHSST磁気浮上車ではSLIMの垂直力は浮上制御に重大な影響を与えるので、これが零となるすべり付近で運転される。

10. むすび

裏張り鉄板が塊状鉄心と成層鉄心について周波数とギャップ長をパラメータとして速度特性の比較を行ったが、高すべり領域で特性にごく僅か差がでているが、これは塊状鉄心に、表皮効果が増加するためと考えられる。しかし、両者の差は小さく特性としても変わらないことがわかった。つまり $\sigma_1 = 0$ の成層鉄心として解析を行っても差し支えないといえるし、実用上では塊状鉄心の方が経済的であり、わざわざ成層鉄心にする必要がないことが理論的に確かめられた。

また、二次元解析モデルにおいて、複合二次導体板の裏張り鉄板領域を空気層と置き換えることによって単一アルミニウム板や銅板、さらに単一鉄板の等価二次インピーダンスを求める手法を示し、種々の二次導体板についてSLIMの特性を解明した。

終わりに、本研究に協力された本学研修生原田克彦君および大学院修士課程2年富羽嘉久君に深謝する。

(平成8年6月27日受付, 平成8年11月7日再受付)

文 献

- (1) 野中作太郎:「リニアドライブとその応用」, 電学誌 D, **112**, 1134~1140 (平4-12)
- (2) 野中作太郎・生澤通人:「片側式 LIM の二次導体板裏張り鉄が塊状鉄心と成層鉄心の場合の特性比較」, 平8年電気学会産業応用部門全大, No.136
- (3) 野中作太郎:「片側式リニア誘導モータの等価回路定数と特性計算式の検討」, 電学論 D, **115**, 223~232 (平7-3)
- (4) 野中作太郎:「リニア誘導モータの設計の概要」, 電気学会リニアドライブ研究会資料, LD-91-78, 9~24 (平3-11)
- (5) S. Nonaka: "Calculation of Equivalent Circuit Parameters and Performance Equations of Single-sided Linear Induction Motors" Proc. of the First International Symposium on Linear Drives for Industry Applications, NA-7, Nagasaki (1995-6)
- (6) 野中作太郎:「片側式リニア誘導モータの二次抵抗と二次漏れリアクタンスの計算式」, 平7年電気学会産業応用部門全大, No.75
- (7) 野中作太郎:「種々の二次導体板による片側式 LIM の等価回路定数と特性の変化」, 第8回「電磁力関連のダイナミクス」シンポジウム講演論文集 B3, 159~164 (平8-5)
- (8) 野中作太郎・吉田欣次郎:「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**, 890~899 (昭45-5)
- (9) 野中作太郎・小川幸吉:「片側式リニアインダクションモータの磁力線分布」, 電学論 **98-B**, 867~874 (昭53-10)
- (10) 小豆沢照男, 他:「磁気浮上無じん搬送システム」, 電学誌 **106**, 677~680 (昭61-7)
- (11) 正田英介編著:「リニアドライブ技術とその応用」, pp.112~118, オーム社 (平3-10)
- (12) 電気工学ハンドブック, p.579, 電気学会 (昭63-2)
- (13) 野中作太郎・樋口 剛:「車両推進用片側式リニアインダクションモータの設計について」, 電学論, **107-D**, 1395~1402 (昭62-11)
- (14) 野中作太郎・藤井信男・小島安信:「新都市交通用リニア誘導モータの V/f 一定運転時の動特性」, 電学論, **109-D**, 493~498 (平元-7)
- (15) 野中作太郎・富羽嘉久・生澤通人:「片側式 LIM の垂直力特性」, 平8年電気関係学会九州支部連大, No.846
- (16) 野中作太郎:「片側式 LIM の二次側が鉄板の場合の等価回路定数」, 平8年電気学会全大, No.1098
- (17) 野中作太郎・富羽嘉久・生澤通人:「片側式 LIM の二次側が鉄板の場合の特性改善策」, 平8年電気関係学会九州支部連大, No.845
- (18) 野中作太郎・藤井信男・渡辺武敏・小島安信:「新都市交通用リニア誘導モータの特性に関する実験的研究」, 電学論, **108-D**, 477~484 (昭63-5)
- (19) 野中作太郎・樋口 剛:「車両推進用片側式 LIM の垂直力軽減について」, マグネティックス研究会資料, MAG-87-165, 11~20 (昭62-11)

野中 作太郎 (正員) 1928年11月12日生まれ。52年3月九州大学電気工学科卒業。54年九州大学工学部講師, 助教授をへて67年から92年まで同教授。ブラジレス同期発電機, パワーエレクトロニクス, リニアモータ, 磁気浮上式鉄道などの研究に従事。92年電気学会業績賞受賞, 現在, 近畿大学九州工学部教授, 学校法人九州電気専門学校校長。工博。

生澤 通人 (学生員) 1973年11月10日生まれ。96年3月近畿大学九州工学部電気工学科卒業。同年4月近畿大学大学院産業技術研究科博士前期課程入学, 現在に至る。リニア誘導モータに関する研究に従事。

(a) 二次が単一アルミニウム板の場合

(b) 二次が単一鉄板の場合

(c) 二次が裏張り鉄板付きアルミニウム板の場合

(d) 種々の二次導体板の場合

図11 垂直力-速度特性の比較

Fig. 11. Comparison of vertical force-speed characteristics.