

■ 報 文 ■

誘導形リニアモーターを用いたアルミニウム回収システムの解析と特性

Analysis and Characteristic of Linear Induction Motor Recovery System of Al

鈴木 茂行*・福光 賢祐**・沖津 泰***
Takayuki Suzuki, Kensuke Fukumitsu, Hiroshi Okitsu

1. まえがき

最近、資源は有限であるとの認識から、各種廃棄物の中から再使用可能な資源を回収して利用することが、国際的な課題となっている。回収資源の重要なものの中に我々の生活に密着しているアルミニウムがある。アルミニウムは電気の缶詰と言われるぐらい精練に多量の電力を必要とする。そこで、不用のアルミニウム缶等を回収し利用することは資源の再利用ばかりでなく、省エネルギーや公害の面からも意義深いことと考えられる。しかし、現時点においては、アルミニウム回収手段が提案され^{1)~3)}、その一部が市販運転されているが、今なお解決すべき問題点も多く残されている⁴⁾。

そこで、本報告では、アルミニウム回収の有効な方法の一つである誘導形リニアモータ方式について、アルミニウム片（以後「Al片」と略す）に働く推力特性や飛距離特性等を理論的に解析し、実験結果と比較検討している。その結果、誘導形リニアモータ固定子の印加電圧がAl片に作用する各特性にどのような影響をおよぼすか、また、Al片を移動させる為にはリニアモータ固定子のポールピッチをどのくらいにすればよいか等が明らかとなったので、以下に報告する。

2. 構成と基本方程式

誘導形リニアモーターを用いたアルミニウム回収システムの基本構成を図-1に示してある。固定子を上下に設置し、その間でAl片を可動させるものである。その原理は、リニアモータの固定子間にAl片が置か

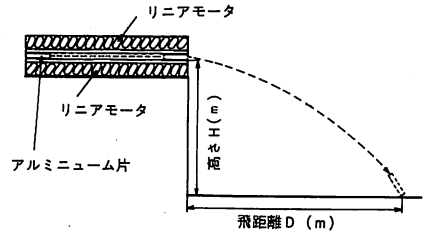


図-1 アルミニウム回収システム構成図

れると、固定子による移動磁界により電磁誘導作用によってAl片に渦電流が発生し、固定子側の磁束とこの電流によって推力が生じ、Al片を動かすものである。この装置を開発するに必要な推力特性や飛距離特性について近似的な解析を行う。

Al片に作用する推力を求める場合、まずAl片に生じる渦電流を解析しなければならない。この解析に用いるMaxwellの電磁方程式は次式である⁵⁾。

$$\text{rot } \mathbf{E} = - \frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t} \tag{1}$$

$$\mathbf{J} = \sigma \mathbf{E} \tag{2}$$

ここで、 \mathbf{E} ；電界の強さ、 \mathbf{B} ；磁束密度、 \mathbf{J} ；二次電流、 σ ；導電率である。

そこで、図-2の固定子上（上側の固定子省略）にAl片を固定する。固定子巻線により発生する移動磁界を正弦波とし、Al片が薄い場合（実際に廃棄物中に存在するアルミニウムはその缶の厚さが1 (mm)以下が多い）について検討することにし、二次元解析を行う。固定子印加電源により強制的に磁界 \mathbf{B}_{z0} が与えられているとすれば、このときAl片に誘導電界 \mathbf{E}_i が生じ、

* 徳島大学工学部電気工学科教授

〒770 徳島市南常三島町2-1

** 徳島大学工学部電気工学科教務員

*** 徳島大学工学部電気工学科教授・工学部長

(註) 本研究会第3回研究発表会 (59/4/26) で講演 原稿受付日 (59/12/12)

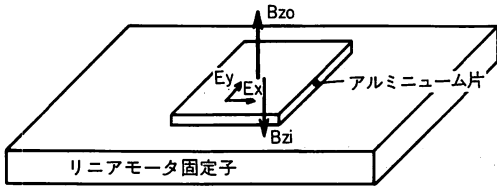


図-2 アルミニウム片に働く磁束密度と電界

E_i によって電流が流れる。二次電流 J_i によって作られる磁界 B_i は B_o を弱める方向に作用する。したがって、(1)式より

$$\text{rot } E_i = -j\omega (B_o - B_i) \quad (3)$$

となる。次に、二次電流 J_i に対する電流ポテンシャル A を次式で定義する。

$$J_i = \text{rot } A \quad (4)$$

そこで、(2)式~(4)式より、二次元であることを考慮すると次式が得られる。

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{1}{\sigma} \cdot \frac{\partial A_z}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{1}{\sigma} \cdot \frac{\partial A_z}{\partial y} \right) = -j\omega (B_{zo} - B_{zi}) \quad (5)$$

2次電流は、(5)式から導かれる差分方程式を解いて電流のベクトルポテンシャル A_z を求め、この値を用いて(4)式から求められる。

次に、 A_l 片の微小部分に働く推力 f_r はローレンツの式より計算され、 A_l 片全体に働く1周期当りの平均始動推力 (A_l 片が停止している時に発生する推力) F_o は次式で求められる。

$$F_o = \text{Re} \left[\frac{1}{T} \sum_{k=1}^L \sum_{m=1}^M \sum_{n=1}^N \frac{T}{L} f_r \right] \quad (6)$$

ここで、 T ; 電源周波数の周期、 L ; 1周期の分割数、 M 、 N ; A_l 片の x 軸方向および y 軸方向の分割数である。

(6)式は始動推力であるが、 A_l 片が移動速度 v で動いている場合の推力 $F(v)$ が与えられると、 A_l 片の運動方程式は、

$$F(v) = m \frac{dv}{dt} + f_o + f_i v \quad (7)$$

である。ここで、 m ; A_l 片の質量、 f_o ; A_l 片のクーロン摩擦トルク、 f_i ; 粘性摩擦トルク係数である。

ここで、通常のリニアモータにおいても、推力 $F(v)$ はほぼ速度に比例して減少することが分っている⁶⁾。したがって、 $F(v)$ は次式で表わせる。

$$F(v) = F_o \frac{u_s - v}{u_s} \quad (8)$$

ここで、 u_s ; 同期速度である。

そこで、(7)式と(8)式より、速度 v は次式となる。

$$v = \frac{F_o - f_o}{F_c / u_s + f_i} \left[1 - \exp \left\{ - \left(\frac{F_o}{u_s} + f_i \right) \frac{t}{m} \right\} \right] \quad (9)$$

次に、 A_l 片が比較的小さいために、空気抵抗や揚力を無視し、 A_l 片が固定子を離れる時の速度を vd とすると、 A_l 片の飛距離 D は次式となる。

$$D = vd \sqrt{\frac{2H}{g}} \quad (10)$$

ここで、 H ; 高さ、 g ; 重力加速度である。

図-3は渦電流、推力、飛距離を理論的に計算するためのフローチャートを示してある。

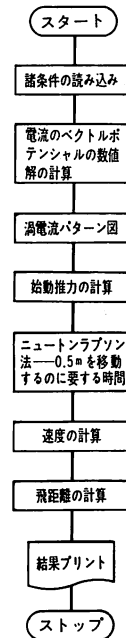


図-3 フロートチャート

3. 諸特性

実験用に試作した誘導形リニアモータの固定子は3相7極で、定格電圧は200 [V]で、その仕様を表1に示してある。実験に際しては固定子間の空隙を30 [mm]に設定し、印加電流が24.8 [A]の場合に磁束密度は300 [Gauss]となる。そして、磁束密度は印加電流に比例して増加している。なお、本装置は、固定子間のエアギャップが大きいため磁束密度は印加電圧に対してもほぼ比例している。

3.1 渦電流

A_l 片に働く始動推力を求める場合、まず A_l 片に流れる渦電流について把握する必要がある。そこで、前節の解析方法で電流の流線を求め図示したのが図-4である。なお、 A_l 片の流線は移動磁界と直角な方向

表 1 供試リアモータの諸定数

極数	7	スロット数	24
ポールピッチ	75 mm	相数	3相
リアモータ長さ	610 mm	定格電圧	200 Volt
リアモータ幅	180 mm	周波数	60 Hz
スロット幅	16 mm	同期速度	9 m/sec
スロット長	43 mm		

には対称性を持つので上半分は省略してある。流線から渦電流は(4)式を用いて計算され、流線と同一パターンを描く。また、計算値の妥当性については実測値と比較して確かめてある⁷⁾。なお、実測は4現象シンクロスコープを用いて、A_l片に渦電流が流れることによって生じた電圧降下を測り、その電圧の大きさと位相により渦電流の方向および大きさを求めた。(付録参照)

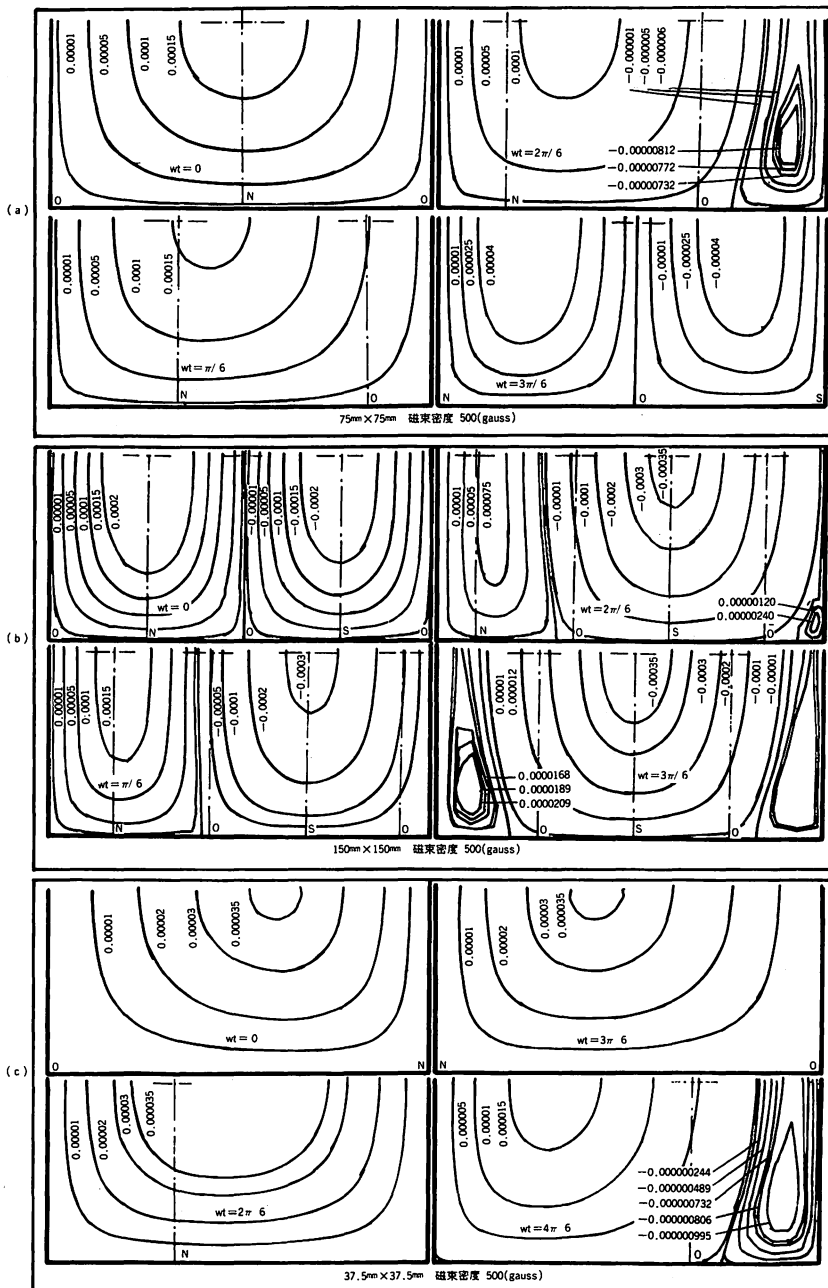


図-4 電流等ポテンシャル線

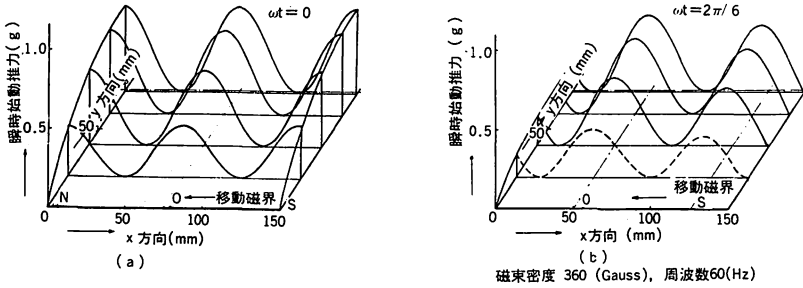


図-5 始動推力の位置変化 (時間固定)

図-4よりAl片の大きさと移動磁界の磁極の位置によって渦電流のパターンはかなり変化していることが分る。たとえば、図-4(a)(b)の $\omega t = 2\pi/6$ の場合のように局部的に渦電流が流れるときや、同図(C)の $\omega t = 4\pi/6$ のように流線が方向の異なる磁界の下に現われている場合がある。また、流線の間隔が狭いほど電流密度が大きいことを示している。そして、流線や渦電流は固定子電流の大きさによって、その大きさは変わるが、パターンは変化しない。

3.2 始動推力特性

図-5はAl片上に発生する始動推力の理論値の分布を示した一例である。同図より時間的变化に対して各微小片に働く瞬時推力が渦電流の流れ方によって影響を受けていることが分る。図-6は始動推力の時間的变化を示している。

さて、図-7(a)(b)はAl片の大きさをパラメータとした入力電圧と始動推力の関係のグラフである。前節の方法で計算した理論値と実測値はほぼ一致しているが、Al片の大きさが大きくなると相違が認められる。これは、固定子間の移動磁界が固定子の端ではもれ磁束の為に様でなくなり、Al片が大きい場合には一様磁界で駆動されなくなる為と考えられる。始動

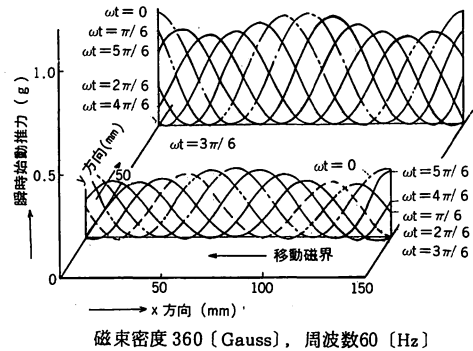


図-6 始動推力の時間変化 (y方向一定)

推力は電圧の2乗に比例して増加している。これは、Al片に流れる渦電流が磁束の大きさに比例するため、磁束と渦電流の積で求まる推力は固定子電流の2乗になっている。

次に、Al片の形状について考察する。Al片の長辺を移動磁界に対して平行に置いた場合をA方向、垂

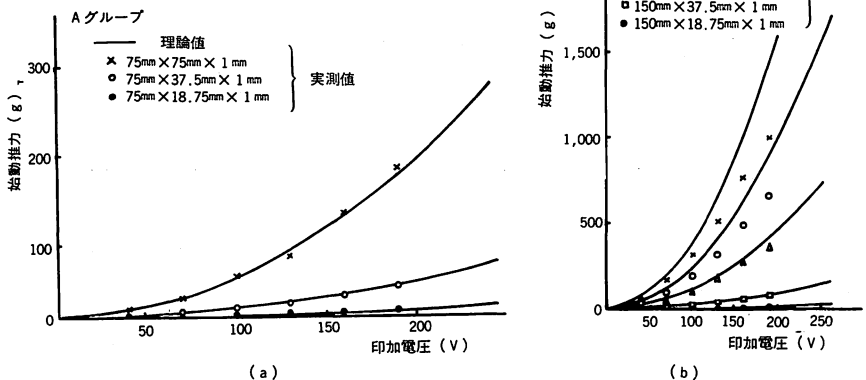


図-7 印加電圧—始動推力特性

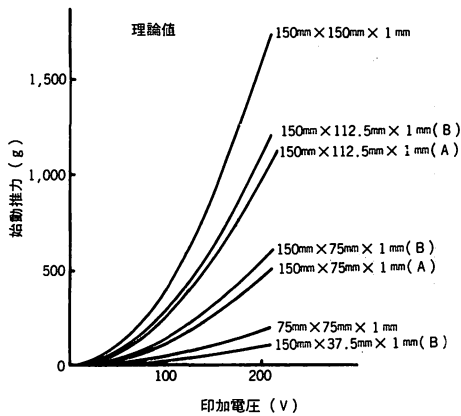


図-8 資料の置き方による始動推力の比較

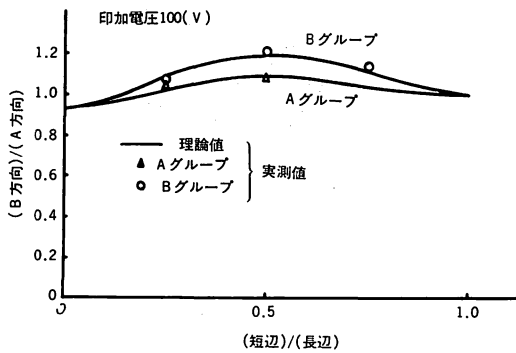


図-9 形状による始動推力の比較

直に置いたものをB方向とすれば、図-8に示すようにB方向の場合が始動推力が大きいことが分る。図-9はA方向とB方向の始動推力について、A片の短辺と長辺の比を横軸にとって示してある。同図より短辺が長辺の1/2の場合、B方向の推力がA方向の推力の20%増しになっている。また、短辺と長辺の比が小さくなると、A方向の推力がB方向の推力に比して大きくなっている。

図-10には同一面積で形状の異なるA片の始動推力について理論値と実測値を示してある。同図から、長方形のものより正方形に近いものが始動推力が大きいことが分る。

3.3 速度特性

A片がリニアモータ固定子を離れる時の速度について検討する。A片をリニアモータ固定子上を500〔mm〕移動させた場合、印加電圧と速度との実測値が図-11である。同図から速度は、ほぼ印加電圧に比例して増加している。また、当然ながら、A片が大きい

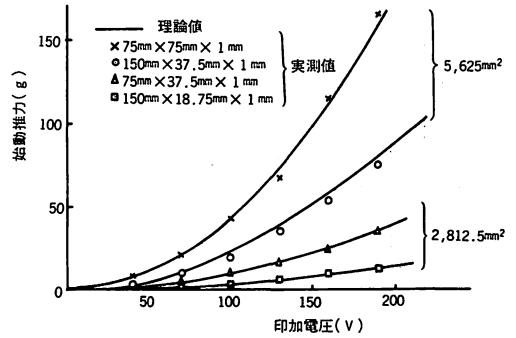
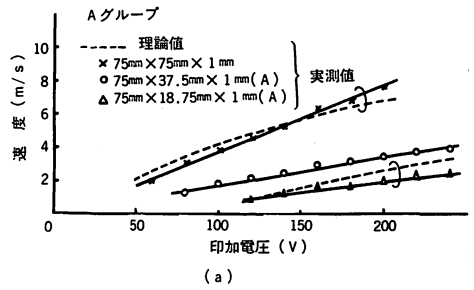
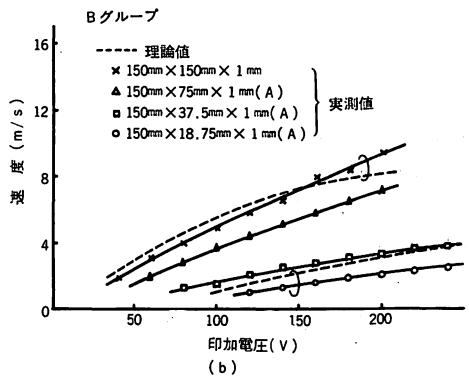


図-10 同一面積で形状の異なる場合の始動推力の比較



(a)



(b)

図-11 印加電圧—速度特性

ほど速度は大きくなっている。なお、A片の移動方向（前述のA方向とB方向）における相違はほとんど認められない。A片の大きさや印加電圧が増加しても同期速度（この装置の場合は9〔m/s〕）を超えることはない。同図に(9)式を用いた理論値を点線で示してある。この値と実測値とを比較するとA片が大きい場合にはほぼ一致しているが、A片が小さい場合には相違が認められる。これは、A片が移動する固定子との間の摩擦（ f_o と f_i ）が場所によって変化し、A片が小さい場合には推力も小さいために、相対的に摩擦の影響が大きく現われるためであると思われる。

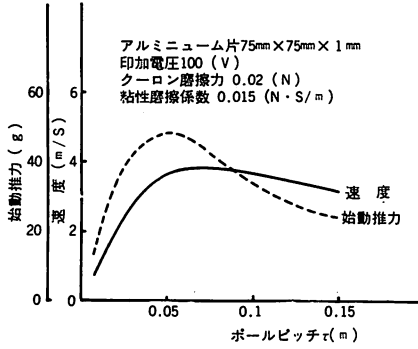


図-12 ポールピッチと始動推力、速度の関係

次に、始動推力および速度について前述の各式を用いて、Al片と固定子ポールピッチの関係を示したのが図-12である。同図より、最大速度および最大始動推力が生じるポールピッチが存在することが分る。従って、Al片の大きさが与えられると固定子のポールピッチが決定される。

3.4 飛距離特性

飛距離特性の実測は、Al片の固定子上の移動距離を500[mm]とし、高さHは455[mm]で行った。図-13、図-14はAl片の形状をパラメータとした印加電圧に対する飛距離の関係を示している。同図には、前述の解析結果より求めた理論値も記入してある。理論値と計算値を比較すると、一般に実測値が小さくなっている。これは解析に際して空気抵抗を考慮していない為と考えられる。さて、印加電圧に対する飛距離はほぼ比例して増加している。しかし、Al片が大きい場合には、印加電圧が大きくなって飛距離はあまり変わらないことが分る。また、飛距離もAl片の形が正方形に近いほど大きくなっている。

4. むすび

以上、誘導形リニアモータを用いたアルミニウム回収装置のAl片に作用する推力、速度および飛距離について理論的・実験的に検討を加えた。その結果、要約すると次の結論が得られた。

- 1) 始動推力は固定子電流の2乗に比例する。
- 2) 速度および飛距離はほぼ印加電圧に比例する。
- 3) Al片の形は正方形の場合が、推力、速度、飛距離とも最大になる。従って、回収用アルミニウムを裁断する必要がある場合には、出来るだけ正方形にすることが望ましい。
- 4) Al片の形は移動方向によって、推力については相違が生じるが、速度、飛距離についてはほとんど

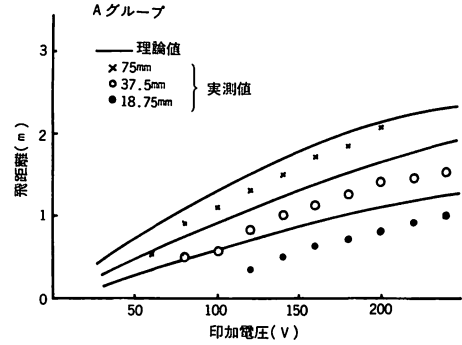


図-13 印加電圧—飛距離特性

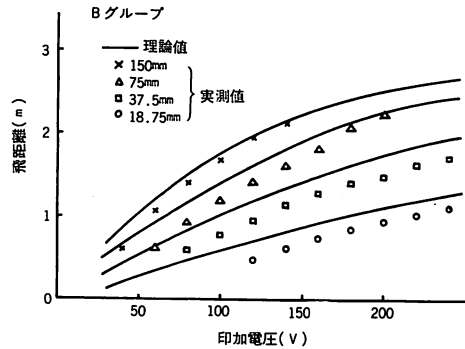


図-14 印加電圧—飛距離特性

差がない。

- 5) Al片の形が与えられる場合には、推力や飛距離を最大にする固定子ポールピッチが存在する。
- 6) 解析結果は実測値と必ずしも一致していないが、アルミニウム回収装置の特性を算定する場合には、この程度の計算精度で十分有用であると思われる。アルミニウム回収用誘導形リニアモータを設計製作するに当たっての基本事項は「固定子ポールピッチはいかにするか、印加電圧はどのくらいにするか」ということであるが、本論文の結果はこの点に対して十分寄与するものと考えられる。

付録

Al片に流れる渦電流の大きさや方向の測定は次の方法で行った。Al片の渦電流によって、付図-1のa₁a₂間およびb₁b₂間に電圧降下を生じる。a₁a₂間、b₁b₂間の長さをℓとすれば、

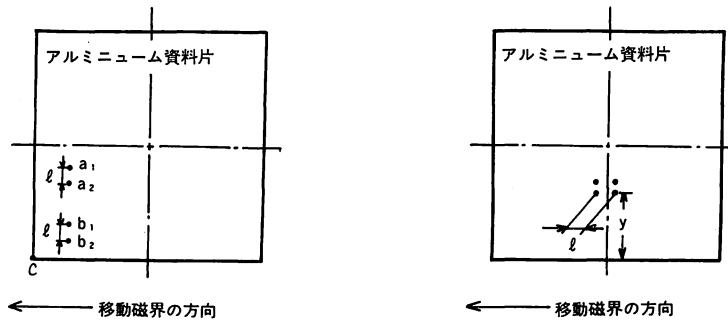
$$V = RI = \left(\rho \frac{\ell}{S} \right) \cdot (J_i S) = \rho \ell J_i$$

となる。たゞしρ; 抵抗率, S; 断面積である。上式より、電圧降下Vを測定すれば、渦電流密度J_iは求められる。そこで、4現象シンクロスコープを用いて、付図-1のように共通アースをC点に選び、a₁, a₂, b₁,

b_2 の各電位をシンクロスコープに入力し、 a_1 点と a_2 点の差の電圧および b_1 点と b_2 点の差の電圧をブラウン管に表示させれば、その波形の大きさと位相より流線が測定出来る。

参 考 文 献

- 1) 保持; リニアモータの産業分野への応用, 電気学会雑誌 98巻, 4号, 53~55, 1978年
- 2) 高橋他; 非鉄金属性ごみの選別機—富士ロータリ式アルミ選別機, 富士時報, 第54巻, 第6号, 63~68, 1981年
- 3) 芳賀, 高橋; 誘導うず電流を応用した非鉄金属選別技術; 電気学会雑誌, 101巻 1号, 29~32, 1981年
- 4) 沖津, 鈴木, 福光; リニアモータを用いたアルミニウム回収システムの特性, 徳島大学工学部研究報告, 第26号, 61~68, 1981年
- 5) 竹山; 電磁気学現象論 (1965), 329~330
- 6) 山田; リニアモータと応用技術 (1976), 18~19
- 7) 沖津, 鈴木, 福光; 非鉄金属回収システムの回収用アルミニウム片のうず電流の検討, 電気学会全国大会788, 1981年



付図-1

