電磁ランチャによるアルミ円板の非線形誘導飛翔

Nonlinear Guide Projection of Aluminum Discs by Means of an Electromagnetic Launcher

山田 一, 水野 勉*, 望月 大*, 渡辺 誠一**

博士国際協同研究所, 長野県長野市若里 5-8-2 (〒380-0928)

* 信州大学工学部, 長野県長野市若里 4-17-1 (〒380-8553)

** 長野工業高等専門学校電気工学科, 長野県長野市徳間 716 (〒381-8550)

H. Yamada, T. Mizuno*, D. Mochizuki*, and S. Watanabe**

Doctors International Collaboration Institute, 5-8-2 Wakasato, Nagano 380-0928

* Faculty of Engineering, Shinshu University, 4-17-1 Wakasato, Nagano 380-8553

** Nagano National College of Technology, 716 Tokuma, Nagano 381-8550

(2000 年 10 月 5 日受理, 2001 年 1 月 24 日採録)

Mechanical technology makes wide use of the separation and transfer of non-magnetic materials in various production manufacturing processes. This paper describes the fundamentals of projection, separation, and transfer of aluminum sheets as non-magnetic materials (for example aluminum disc), using a magnetic repulsion force, by means of a solenoid-type electromagnetic launcher.

The key points of this paper are as follows:

- (1) Linear projection of Al discs.
- (2) Nonlinear projection of Al discs.
- (3) Nonlinear guide projection of Al discs.

Key words: electromagnetic launcher, projection of aluminum sheets, separation of aluminum sheets, nonlinear guide projection, short-circuit plate

1. まえがき

非鉄金属板の磁気分離法については, これまでも様々な研究がなされており, リニア誘導モータ等を用いた非鉄金属回収装置がすでに実用化されているが¹⁾, 搬送・移送に関する研究は少ない。そのため, アルミニウムなどの非鉄金属板の生産加工ラインにおいて, これら金属板の移送・分離等の作業は, 種々のデメリットがありながらも機械式技術に委ねられている。

本論文は, 非鉄金属板の中から現在加工ラインで多用されているアルミニウム板を取り上げ, 新しい技術としての電磁ランチャ(Electromagnetic Launcher, 以下 EML と略記)の電磁力によるアルミ円板の飛翔・分離・搬送を目的とした非線形誘導飛翔について論ずるものである。

本論文では, 下記の項目に従って考察を加えている。

- (1) アルミ円板の線形飛翔
- (2) アルミ円板の非線形飛翔
- (3) アルミ円板の非線形誘導飛翔

2. 電磁ランチャを利用したアルミ円板の線形飛翔と分離

2.1 アルミ円板の線形飛翔原理

Fig. 1 に EML によるアルミ円板の線形飛翔についての基本構成を示した。この EML は, 主として GTO と IGBT を使用した電子スイッチ式充放電駆動回路とソレノイドコイルから構成されている²⁾。EML のコイル頭部にアルミ円板が配置されていた場合, ソレノイドコイルにパルス状の電流 I を流すと, コイルから発生するパルス状の磁界によってアルミ円板に同様のパルス状の渦電流 I_e が発生する。この電流 I と渦電流 I_e は互いに逆極性の磁束密度を発生しているために, 微小区間において考えた場合, コイルに流れるパルス電流およびアルミ板に流れる渦電流を線電流でかつ平

Fig. 1 Basic linear projection system of EML.

行に流れると仮定することができ, 次式で表される反発力 F_r が生ずる³⁾。

$$F_r = \frac{\mu_0}{2\pi z} II_e \quad [\text{N/m}], \quad (1)$$

ここに, μ_0 : 真空の透磁率 ($4\pi \times 10^{-7}$) [H/m], I : ソレノイドコイルに流れる電流 [A], I_e : アルミ円板に発生する渦電流 [A], z : ソレノイドコイルとアルミ円板との距離 [m]

本論文では, すでに Fig. 1 に示したように, この反発力 F_r によってアルミ円板が z 軸方向に垂直に上昇することを線形飛翔 (linear projection) と呼ぶことにする。

F. C. Moon は, その著書^{4),5)}において Fig. 1 に示したようなソレノイドコイルの上部に単巻導線を配置し, ソレノイドコイルにパルス電流を流した時, その単巻導線が飛翔することについて述べているが, アルミ円板については言及していない。

2.2 アルミ円板の線形飛翔

この EML に使用したコイルの形状を Fig. 2 に示した。直径 60 mm のボビンに, 線径 $\phi 1.2$ mm の銅線を 50 回巻とした。

Fig. 3 に飛翔させるアルミ円板の形状を示した。本論文で

Fig. 2 Solenoid coil for EML (unit: mm).

Fig. 3 Shape of aluminum disc for projection (material: Al, unit: mm).

は直径 50.3 mm, 厚さ 1 mm のアルミ円板 1 種類のみに限定した。後述する“アルミ円板の非線形飛翔”についてもすべてこのアルミ円板を使用した。

Fig. 1 に示した EML の上部にアルミ円板を配置し, その積層の枚数 n を 1 枚から 4 枚まで変化させ, パルス電流 $I = 1$ kA を流した線形飛翔の実験結果を Fig. 4 にまとめた。飛翔高さ z は目視によって確認した。

Fig. 4 Linear projection of Al disc ($I_m = 1$ kA, $\delta = 3$ mm).

アルミ円板が 1 枚の場合 ($n = 1$), その飛翔高さは $z = 0.4$ m と比較的低かった。しかし, $n = 2$ 枚以上になると, アルミ円板は一团 (ひとかたまり) となって飛翔した。これらの円板は, それぞれの円板が持つ反発力のために, 一团とはなっているものの, 互いに分離して飛翔していた。 $n = 4$ 枚以上になると, これらの円板は実験室の天井 ($z = 1.8$ m) に衝突し, 飛翔高さを確認することはできなかった。飛翔対象であるアルミ円板の厚さは 1 mm であるため, 渦電流の流れる断面積が小さく (渦電流路の抵抗が大きい) になっている。アルミ板の枚数を増やすことで, 断面積が大きく (渦電流路抵抗が小さい) になり, 反発力が大きくなって飛翔高さが増加したと考えられる。

3. アルミ円板の非線形飛翔

ここでは, 第 2 章で述べたアルミ円板の線形飛翔と区別するために, アルミ円板の飛跡が曲線を描く飛翔を非線形飛翔 (nonlinear projection) と呼ぶことにする。

3.1 短絡板を用いたアルミ円板の非線形飛翔

Fig. 5 に EML を用いたアルミ円板の非線形飛翔の基本原則を示した。Fig. 5 に示すように, ソレノイドコイルの内部に短絡板を設置した場合は, コイルに流れるパルス電流 I とは逆極性の渦電流 I_{cs} が短絡板に発生し, アルミ円板に作用する磁束密度は短絡板の上部において減少する。そのため, アルミ円板に発生する渦電流 I_e に非対称性が生じ, 非線形

飛翔が可能となる。

Fig. 5 Principle of nonlinear projection of an aluminum disc by EML.

3.2 非線形飛翔の実験条件

Fig. 6 に非線形飛翔に使用した銅製の短絡回路の構造を示した。本実験では, 短絡板の厚さおよび形状による影響を検討するために, 2 種類の短絡回路, すなわち短絡板と短絡リングについて, それぞれ厚さ 1, 2 および 3 mm のものを作り, 計 6 種類の短絡回路を用意した。

Fig. 6 Shapes of two short-circuits (material: Cu, $t_s = 1-3$ mm, unit: mm).

Fig. 7 に電磁ランチャのソレノイドコイル上の磁束密度測定回路を示した。コイルに流れるパルス電流 I は, ログスキーコイルを用いて, デジタルオシロスコープ (YOKOGAWA, DL1540) で測定した。磁束密度 B はさぐり

Fig. 7 Circuit for measuring the flux density on the solenoid coil (unit: mm).

コイルを用いて得られる誘起電圧 e から次式で算出した。

$$B = \frac{1}{N_s A} \int e dt \quad [\text{T}], \quad (2)$$

ここに、 N_s : さぐりコイルの巻数 (= 1) [回]、 A : 磁路断面積 ($= 5.94 \times 10^{-5}$) [m^2]、 e : さぐりコイルの誘起電圧 [V]

Fig. 8はソレノイドコイルに流したパルス電流の波形を示したものである。本実験ではパルス電流の最大値を $i_m = 1\text{kA}$ = 一定として測定を行った。また、Fig. 8に示したようにソレノイドコイルを固定し、アルミ円板と接触しないように配慮して、コイル端部とアルミ円板との距離 $\delta = 3\text{ mm}$ 一定に設定した。

Fig. 8 Pulse current wave form of a solenoid coil ($I_m = 1\text{ kA}$).

Fig. 9に短絡板を用いた場合のソレノイドコイル上の磁束密度分布を示した。短絡板がない場合の磁束密度分布(without short-circuit)に比べて、短絡板の厚さが $t_s = 1\text{ mm}$ から 2 mm 、 3 mm と次第に厚くなるにしたがって磁束密度分布の非対称性が大きくなった。短絡板の厚さ $t_s = 3\text{ mm}$ では磁束密度分布の非対称性は、最大で 19.2% となった。

Fig. 9 Flux density of top on the solenoid coil with and without short-circuit plate ($I_m = 1\text{ kA}$, $\delta = 3\text{ mm}$).

3.3 アルミ円板の非線形飛翔実験

Fig. 10はアルミ円板の z 軸方向への飛翔高さの最大値 z_m および x 軸方向への飛翔変位 x_m の定義を示したものである。線形飛翔では、短絡板が存在しないために、 $x_m = 0$ で

Fig. 10 Definition of the maximum height of projection, z_m , and maximum displacement, x_m , of a disc.

あり、飛翔高さの最大値 z_m のみを論議してきた。しかし、短絡板のある非線形飛翔では、 z_m のほかに飛翔変位の x も考慮しなければならないことになる。

厚さ $t_s = 3\text{ mm}$ の短絡板(Fig. 6(a))を使用した場合、アルミ円板の積層枚数 n をパラメータとしたアルミ円板の飛跡の様相を Fig. 11に示した。アルミ円板1枚($n = 1$)の場合は、最大飛翔高さ $z_m = 0.5\text{ m}$ 、飛翔変位 $x_m = 0.5\text{ m}$ であり、 $n = 5$ 枚の場合は $z_m = 1.4\text{ m}$ 、 $x_m = 0.7\text{ m}$ と実験中で最大値を得た。しかし、枚数が $n = 10$ 枚になると、Fig. 11のデータからもわかるように、 $z_m = 0.8\text{ m}$ 、 $x_m = 0.3\text{ m}$ と次第に減少した。このことは、 $n = 10$ 枚の場合はアルミ円板の自重が大きくなったために飛翔高さは大きくならなかったと思われる。

Fig. 11 Nonlinear projection of Al discs with short-circuit plates ($i_m = 1\text{ kA}$, $\delta = 3\text{ mm}$, $t_s = 3\text{ mm}$).

4. アルミ円板の非線形誘導飛翔

4.1 短絡リングを用いたアルミ円板非線形飛翔

今までの実験では、Fig. 6(a)に示した短絡板を用いていた。そこで、渦電流が一層集中すると予想される Fig. 6(b)の短絡リングを用いてアルミ円板の非線形飛翔を試みた。

Fig. 12はEMLに短絡リングを用いた場合のソレノイドコイル上の磁束密度分布を示したものである。短絡板の場合と同様に短絡板の厚さ t_s に比例して磁束密度は減少する傾向となったが、減少率は最大で 12.5% となり、予想に反して短絡板の場合に比べ小さくなった。その原因として、短絡リングは短絡板よりも磁束の作用する面積が小さくなっ

たために、渦電流の発生が減少し、これらの渦電流が短絡リングに集中して流れてもその効果が短絡板には及ばなかったことに起因している。

Fig. 12 Flux density of the top on the solenoid coil with and without a short-circuit ring ($I_m = 1$ kA, $\delta = 3$ mm).

4.2 アルミ円板の非線形誘導飛翔

Fig. 13 は短絡板の代わりに短絡リング (Fig. 6 (b) 参照) を使用した場合のアルミ円板の最大飛翔高さ z_m と飛翔変位 x_m のアルミ円板の枚数への依存性を示したものである。短絡リングの厚さ $t_s = 1$ mm の場合、円板が単数 $n = 1$ のときは $z_m = 0.1$ mm, $x_m = 0.35$ m である。しかし、 $n = 5$ 枚になると $z_m = 1.8$ mm, $x_m = 0.3$ m となり、 $n = 1$ 枚の場合と比べて、 z_m は増大するが x_m はあまり変化しないことを意味している。

また、短絡リングの厚さ $t_s = 1$ mm の場合は $t_s = 3$ mm よりも z_m が大きい傾向を示しているが、 x_m は逆に $t_s = 3$ mm の方が $t_s = 1$ mm 厚よりも大きくなる様相がわかる。

このような物理現象の説明は、今後の詳細な解析を待つとしても、短絡リングの厚さ、パルス電流 I_m 、円板とソレノイドコイルとの距離 δ などによって非鉄金属板の非線形誘導飛翔が実現可能なことを意味している。

Fig. 13 Nonlinear guide projection of discs with short-circuit rings ($I_m = 1$ kA, $\delta = 3$ mm).

すでに Fig. 11 に示した実験結果を Fig. 13 と比較したところ z_m , $x_m - n$ 特性にさほど大きな差異は認められなかった。

これら一連のソレノイド形電磁ランチアの実験には大電力が必要と思われるが、電源電圧 $V = 400$ V, パルス電流 $I = 1$ kA, そのパルス幅 $\Delta t = 10$ ms とし、電力量 P を概算すると次の値となる。

$$P = VI\Delta t = 400 \times 10^3 \times 10 \times 10^{-3} = 4 \text{ [kJ]} \quad (2)$$

1 kWh の電力量 P' は、次の値となる。

$$P' = 1 \text{ [kWh]} = 1 \times 10^3 \times 3.6 \times 10^3 = 3.6 \text{ [MJ]} \quad (3)$$

したがって、1 kWh の電力量で $P'/P \approx 10^3$ 回のアルミ円板の飛翔が可能となり、消費電力は大きな負担とならない。さらに、ソレノイド形 EML はレールガンと異なり、連続飛翔が実現できる点も経済的に効果がありそうに思える。

5. あとがき

ソレノイド形電磁ランチア (EML) を利用したアルミ円板の非線形誘導飛翔を実験した主な成果を以下にまとめた。

(1) アルミ円板の線形飛翔・分離: EML の上部一端にアルミ円板 $n = 1$ 枚を置きパルス電流 $I = 1$ kA を流した場合、アルミ円板は 0.4 m 垂直方向へ飛翔した。さらに、円板を複数枚置いた場合、これらのアルミ円板は互いに反発しながらも一団となって上方へ線形飛翔し、かつ互いが分離していることを実験的に確認し、その動作原理を説明した。

(2) アルミ円板の非線形飛翔: EML のソレノイドコイル内部に銅製の短絡板を配置し、同様にコイル上部一端にアルミ円板を置き、パルス電流 $I = 1$ kA を流したとき、このアルミ円板は上方向 (z 軸) に飛翔するだけでなく横方向 (x 方向) に曲線を描いて運動し、非線形飛翔することを明らかにした。さらに、コイル上部に置くアルミ円板の枚数によってそれぞれの最大飛翔高さ z_m や飛翔変位 x_m が変化することを定量的に確認することができた。

(3) アルミ円板の非線形誘導飛翔: 前述した短絡板の代りに短絡リングを用いたアルミ円板の飛翔実験では、円板の枚数 n に依存する z_m と x_m との関係を示した。これらの実験から渦電流に起因する磁気反発力を利用して、アルミ円板の非線形誘導飛翔が可能となる根拠を明示した。さらに、ソレノイド形電磁ランチアは、連続飛翔が可能なことから、比較的経済的な非鉄金属板の飛翔・分離・搬送技術となりえることをまとめて示した。

謝辞 本論文の作成にあたり、貴重なコメントを頂戴した慶応大学の杉浦壽彦講師について謝意を表する次第である。

参考文献

- 1) 太田, 菊田: リニアインダクションモータを使用した AI 選別回収装置, 神鋼電機技報, Vol. 27, No. 3, (1982).
- 2) 蔡 勝年, 七原 正輝, 水野 勉, 山上 廣, 山田 一: 日本応用磁気学会誌 22, No. 4-2, pp. 937-940, (1998).
- 3) 電気学会: 電気磁気学基礎論, pp. 108-116, (オーム社, 東京, 1995).
- 4) Francis C. Moon: Magneto-Solid Mechanics, pp. 345-353, (John Wiley & Sons, New York, 1984).
- 5) Francis C. Moon: Applied Dynamics, pp. 407-411, (John Wiley & Sons, New York, 1998).
- 6) 水野 勉, 望月 大, 渡辺 誠一, 伊東 博, 山本 栄, 山田 一: 第 12 回「電磁力関連のダイナミクス」シンポジウム講演論文集, pp. 423-426, (2000).