

# 板金加工における加工物の重なり分離方法

(パルス電流による重なり鉄板の分離実験)

神奈川工科大学 電機工学科

教授 秋山勇治

(平成2年度研究開発助成 AF-90006)

## 1. 研究の背景

板金加工の代表例としてプレス加工があるが、打ち抜きおよびしぼり加工時には板金を正確に一枚ずつ供給することが必要である。もしも複数枚同時に供給されるとプレス型の破損等重大事故に至る場合がある。このために現在圧縮空気の吹き付けとか機械振動、人間の目による判断などにより重なり板金供給の防止が試みられてはいるが十分とは言えない。特に自動化、無人化作業の場合、この技術は重要なものとなる。

本研究では従来の板金の分離法に加え、新たに電磁力による反発力を応用する方法を提案している。また電磁パルスによる重なり板金の分離に関する基礎実験を行った結果、非鉄金属に関しては非常に良好な結果が得られたこと、および鉄板に関しては吸引力と反発力の両方が発生するためパルス時間等特定な条件下では重なり板金の分離が可能であることが判った。<sup>3)4)</sup> これらの実験をもとに鉄板に関しても実用できる条件を調査、検討した結果、パルス電流方式による板金分離の実用性を確信するに至った。

なお、本方式に関し多くの示唆を与えてくれた

E.R.Laithwaite 教授の「Induction Machines for special purposes」は非常に参考になった。<sup>1)</sup>

## 2. 重なり板金分離の各種方法

重なり板金を確実に一枚にする方法としては①機械振動；直接被加工物にインパルスの衝撃を与える方法、②風圧；被加工物間にエアースプレーを与え吹き飛ばす方法、③負圧吸引；被加工物をそれぞれ掴み引き剥がす方法、④電磁誘導；被加工物間で電磁反発力を発生させる方法、⑤超音波振動；連続振動を与え、余分な被加工物を浮き上がらせる方法、⑥負圧吸引+電磁誘導を組み合わせる方法、などが考えられる。このように重なり板金分離方法は主として機械的分離法が主であり、電気的分離法は皆無に等しいといえる。

しかしながら①を代表とする機械的振動が主要となる分離方法は、厳密に分離できる保証はないが、⑥の電気的分離方法は分離の可能性が高い。

これらの重なり板金分離法の特徴、欠点をまとめて表1に示す。

供給板金の重なり原因としては、(A) 油による粘着、(B) バリ、錆その他機械的要因による場

表1 各種重なり板金の分離法

方法	特徴	材質	単位面積当たりの力の大きさ
①機械振動	圧物板金が対象	金属/非金属	△ (×) 0.1kgf/cm <sup>2</sup> 以下
②風圧	板厚と無関係 (負圧)	金属/非金属	△ 0.1~0.5kgf/cm <sup>2</sup>
③負圧吸引	力は強いが作業にくい	金属/非金属	○ 2~5kgf/cm <sup>2</sup>
④電磁誘導	電磁誘導反発力	金属	○ 0.2kgf/cm <sup>2</sup>
⑤超音波振動	超音波ベアリングの原理	金属/非金属	◎ 1~5kgf/cm <sup>2</sup>
⑥ (③+④)	確実、発生力 (中)	金属/非金属	◎ 0.2kgf/cm <sup>2</sup>

合、(C) その他（供給ミスetc）、(D) 加工物排除失敗etcが考えられる。一般に順送り（プログレッシング加工）工程での重なりは例外的であるが、例えばあらかじめ加工板金としてブランピングしておいた材料の供給などでは注意を要する（例えばしぼり作業とか回転機の回転子鉄心の再打ち抜き作業等）。

### 3. 電磁反発力を用いる板金分離法

電磁力を用いる方法として二つの方法が考えられるが、いずれも重なった板金間に発生するうず電流（Eddy Current）による反発力（フレミングの左手の法則）を利用するものである。よって対象板金内に電流が流れることが必要条件である。

電磁反発力の二つの方法とは①交流電流による連続的な反発力の発生、②パルス電流による瞬時

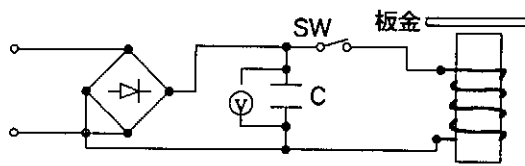


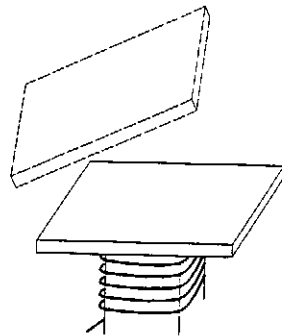
図1 コンデンサ・バンク式回路図

反発力の発生、であるがエネルギー利用の面から後者②の方が本目的には有効である。

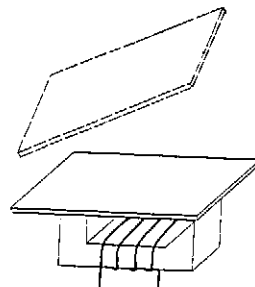
板金分離法として先に述べた電磁誘導型を用いる方法としては、直流電源によりコンデンサを充電して蓄えられた電気エネルギーを瞬時に電磁エネルギーに変換する図1のようなコンデンサ・バンク方式の回路を用いる。また当コンデンサ・バンク式回路はL-C共振回路でもあるため、コンデンサ容量を変えることにより容易に電流周波数を変化させることができる。電磁誘導反発力による板金分離のモデルを図2に示す。重なり板金分離の原理は電磁石により生じる磁束が固定された導体1を貫き、さらに導体2を貫こうとすることにより導体2内にはレンツの法則にしたがう電流が流れる。このうず電流による磁束と導体1を貫いた磁束との間で電磁反発力を生じる。その結果、重なり板金を確実に1枚づつに分離することができるのである。

図3には磁路として(A) 漏れ磁路方式と(B) 閉磁路方式を示したが、両方式には長、短があり現時点ではどちらが有利かは断言できない。

(注) 鉄板間での電磁反発力の発生の理解は困難

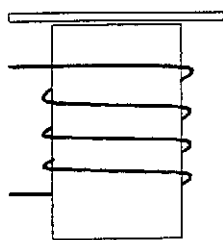


(A) 漏れ磁路方式

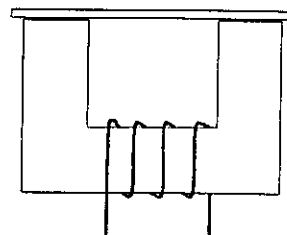


(B) 閉磁路方式

図2 磁気反発モデル図



(A) 漏れ磁路方式



(B) 閉磁路方式

図3 磁気回路図

であるが、各板金内に流れるうず電流の位相差により反発力を生ずるものと理解すると判りやすい。

#### 4. マクスウェル方程式による定式化

変位電流を無視するとマクスウェル方程式は次のように表される。

$$\nabla \times H = J \quad \dots\dots\dots (1)$$

$$\nabla \times E = -\frac{\partial B}{\partial t} \quad \dots\dots\dots (2)$$

ここでH、E、B、Jはそれぞれ磁界、電界、磁束密度、電流密度のベクトルである。

そして導電率 $\sigma$ 、透磁率を $\mu$ とすれば、それぞれの間には次のような関係がある。

$$J = \sigma E \quad \dots\dots\dots (3)$$

$$B = \mu H \quad \dots\dots\dots (4)$$

また、電流密度Jは回路電流 $J_0$ とうず電流 $J_e$ の和として与えられる。

$$J = J_0 + J_e \quad \dots\dots\dots (5)$$

磁気ベクトルポテンシャルAを次式で定義する。

$$B = \nabla \times A \quad \dots\dots\dots (6)$$

(2) 式を(4)、(6)式を用いて電界ベクトルEについて表示する。

$$E = -\frac{\partial A}{\partial t} + \nabla \phi \quad \dots\dots\dots (7)$$

ただし $\phi$ はスカラー・ポテンシャルである。そしてうず電流密度は(7)式を(3)式に代入することにより得られる。

$$J_e = -\sigma \frac{\partial A}{\partial t} + \sigma \nabla \phi \quad \dots\dots\dots (8)$$

ゆえに系全体に関する支配方程式は次式で表される。

$$\frac{1}{\mu} \nabla \times \nabla \times A + \sigma \frac{\partial A}{\partial t} = J_0 + \sigma \nabla \phi \quad \dots\dots (9)$$

ここでベクトル演算を行い、かつスカラー・ポテンシャルが無視できるものとすれば(9)式は(10)式のように近似できる。

$$\frac{1}{\mu} \nabla^2 A - \sigma \frac{\partial A}{\partial t} = -J_0 \quad \dots\dots\dots (10)$$

以上の条件で解いた板金内うず電流による反発力およびうず電流の分布状態の一例を図4、図5に模擬的に示す。

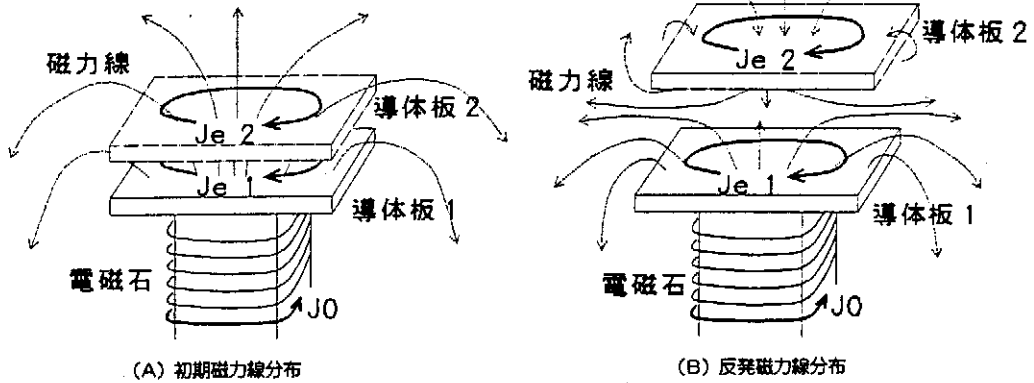


図4 うず電流磁力線分布図

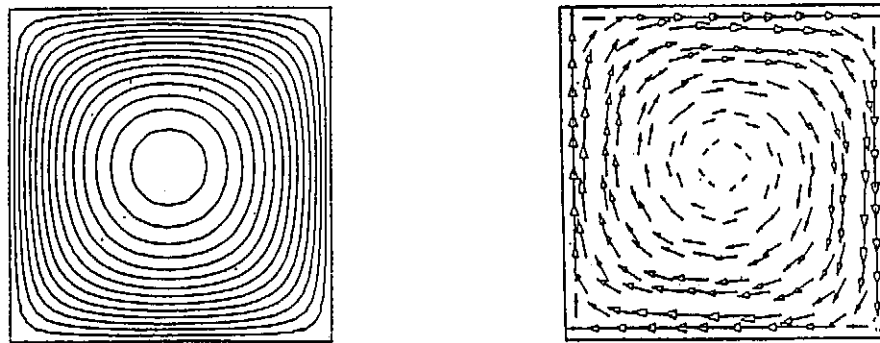


図5 うず電流分布図<sup>2)</sup>

### 5. 各種板金による実験（1枚の実験）

実験対象物として表2に示す導体を用いる。

またコンデンサ・バンク式回路に用いるコンデンサ容量は330 [ $\mu$ F]、1250 [ $\mu$ F] および2700 [ $\mu$ F] とし、電磁コイルのインダクタンスは1.9 [mH] である。このような回路定数を用い実験を

行う。ただしこの調査実験においては導体板は単体（一枚のみ）の基礎実験をまず最初に行った。

この実験では実験データに大きなバラツキが見られた。その原因の一つとして跳ね上げ距離は単に電磁反発力のみではなく機械系の振動力などが関係しているようである。

表2 各種対象導体分類表

対象物	形状 [mm]	重量 [g]	比透磁率 [-]	導電率 [1/Sm]
Fe	100 * 100 * 1	74	1000	6.67 * 10 <sup>6</sup>
真 鍍	100 * 100 * 1	83	(1.0)	16.67 * 10 <sup>6</sup>
Al	100 * 100 * 3	80	1.00002	36.36 * 10 <sup>6</sup>
Cu	100 * 100 * 1	90	0.999991	58.14 * 10 <sup>6</sup>

### 6. 重なり板金に対する実験 （2枚重ねの実験）

導体板単体における調査実験を考慮して、被加工物が重なりあった場合における電磁誘導法の有効性を検討する。フリーな状態にある導体がコンデンサ電圧を増すことによりその跳ね上げ距離は増す。すなわち導体板を固定した状態を仮定した場合においても、電圧を増すことによりその導体を貫通する磁束が増え反発力が大きくなるということである。よって固定された重なり板金に対してもこの電磁誘導法は有効である。ただし、板金物の物性（磁性、導電率など）がその種類により異なるため一概にはいえない。なぜならば、1枚目の導体を買いた磁束の大きさが2枚目の導体に向う電流を生じさせることが可能でも、強磁性体のような場合では板金間の磁気的關係で磁気吸引力が勝り、反発力が得られない可能性が生じる場合がある。<sup>3)4)</sup>

### 7. パルス電流による板金の反発力の検討

コンデンサ電圧すなわち初期電流値を上昇させると図6、図7に示されるように、跳ね上げ距離はほぼ電圧（電流）値の2乗に比例する。

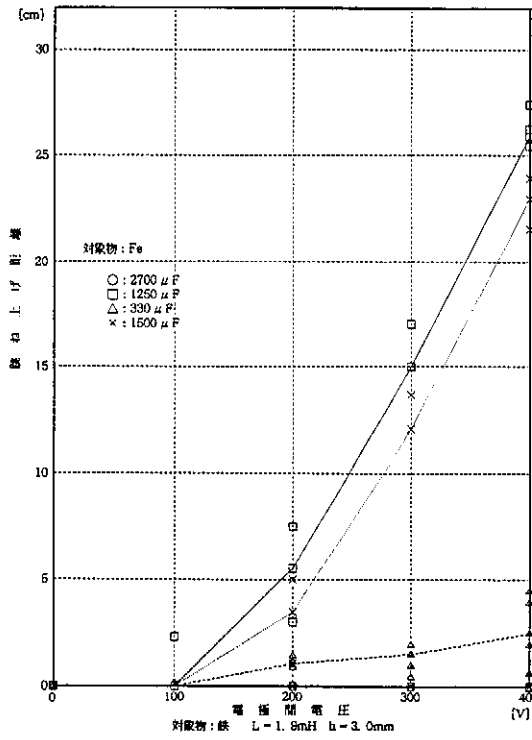
これは電磁エネルギーと位置エネルギーは理論的に等しいと考えられ、次の関係式が成り立つことからいえる。ここで跳ね上げ距離をhとする。

$$h \propto i^2 \propto v^2 \dots\dots\dots (11)$$

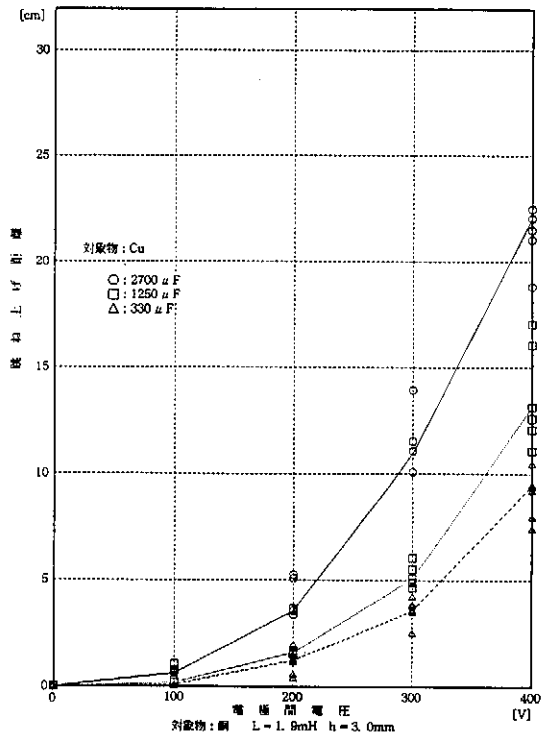
またコンデンサ容量を変化させる実験を図7に示す。

これらの図からキャパシターの増加と跳ね上げ距離の間にある種の比例した関係があることが判る。

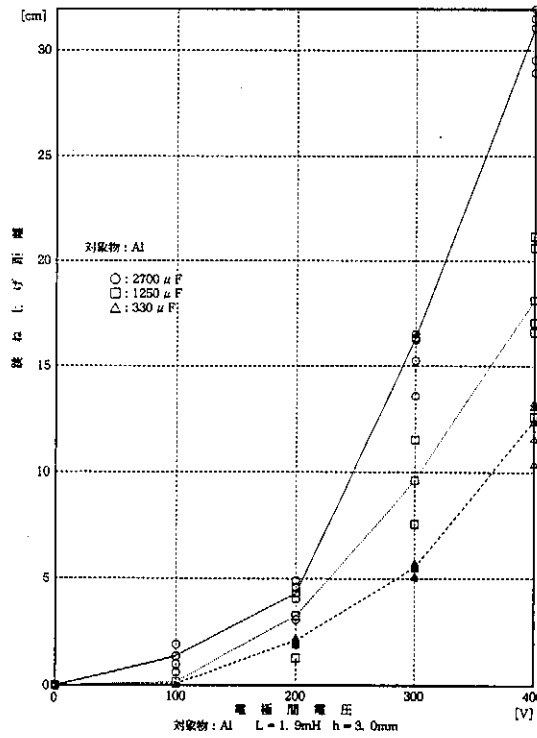
これはエネルギー的にみても当然のことではあるが、キャパシターの増加と共に非測定物である導体の跳ね上げ距離は増加する（強磁性体に関しては別の要因が働きこのとおりににはゆかない場合が多い（後述））。



(A) Fe

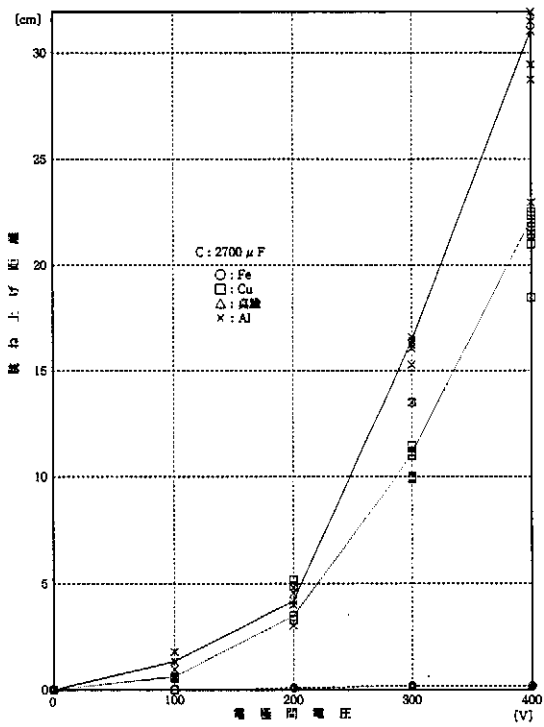


(B) Cu

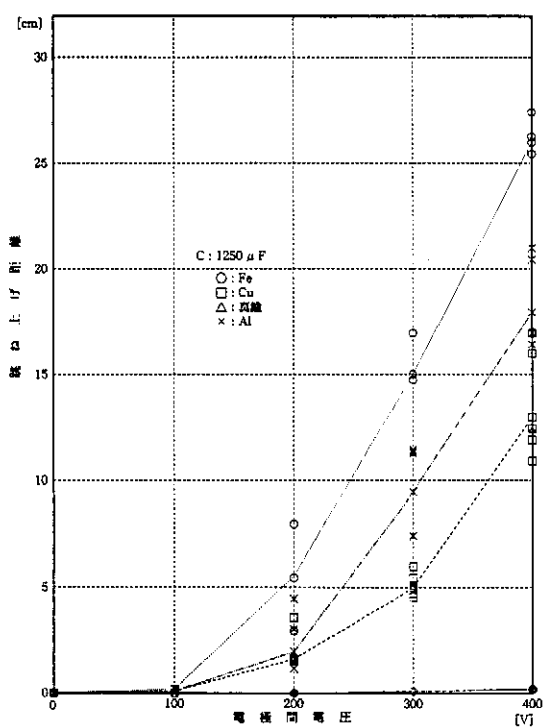


(C) Al

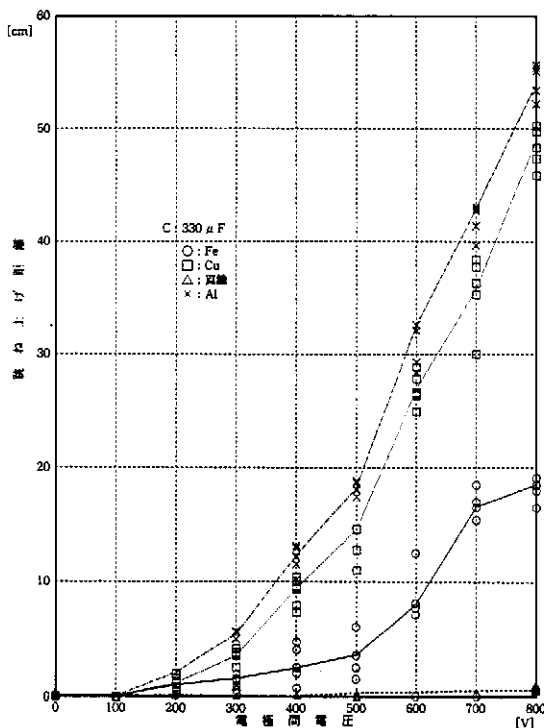
図6 各種材料に対する跳ね上げ距離



(A) 2700 ( $\mu\text{F}$ )



(B) 1250 ( $\mu\text{F}$ )



(C) 330 ( $\mu\text{F}$ )

図7 各容量に対する跳ね上げ距離

キャパシターを変化することは共振周波数を変化させ、導体を貫かんとする磁束の時間的変化やそれに伴う電流密度を変化させることになる。また電流密度は磁気ベクトル・ポテンシャルで表された(8)式からも分かるように、コンデンサ・バンク式回路電流の時間的変化量に依存する。このように回路の共振周波数が高くなると(板金)導体内の電流(密度)が大きくなり磁気反発力が増加する。そのためコンデンサ容量と磁気浮上距離との関係は、単純に  $h \propto C$  とは言い切れない。また、強磁性体に関しては磁気飽和の影響もあり非磁性体板金ほど単純にはゆかない。<sup>3) 4)</sup>



写真 1

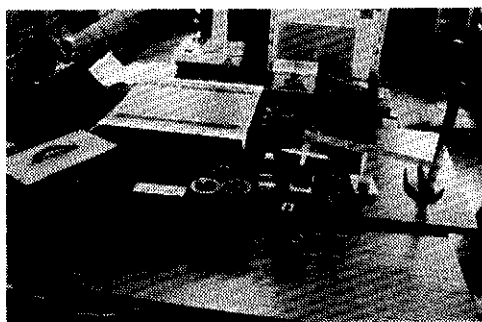


写真 2

## 8. 考察

本調査実験から電気現象を用いた電磁誘導(反発)法は、重なり板金分離法として有効的なものであるといえる。この分離方法は機械的振動法の

ように被加工物への損傷を与えることはなく、且つ、より正確に分離できる。<sup>6)</sup>

磁気反発力には電流(板厚、導電率、形状、電流変化率etc)と磁気特性が関係する以下導電率、磁気特性、磁束の時間変化率等、板金の電磁反発力に関するファクターにつき検討してみる。

(1) 板金の導電率( $\sigma$ )について…板金の導電率と板厚の関係であるが、板金の固有抵抗が低く板厚が厚いほど電流は流れやすくなる。反面磁束を透過しにくくなる。

(2) 磁性について…強磁性体と非磁性体板金を比較すると、強磁性体には電磁反発力と同時に磁気吸引力が作用するので強力な反発力(瞬時反発力)が発生しない限り、磁気吸引力に負け板金の跳ね上げ(分離)に失敗する。実験では同一条件で数回の実験を試みたが分離できる場合とできない場合があった…(機械振動系も関与していると思われる)。つまり急激な時間的変化に対する磁気反発力を利用すると有効であるが、時間変化の長い磁場変化では磁気吸引力が反発力に勝り実用でなくなるものと考えられる。

(3) コンデンサ容量と電圧…コンデンサーディスチャージ・パルスによる場合全体の回路はL-R-C直列回路であり、パルス電流の周期はほぼLとCで決まり  $f_0 = 1/2\pi\sqrt{LC}$  [Hz] となるので磁束の時間変化を大きく取るためにはL、Cの値を小さく充電電圧(E)を高くする事が有効である。このことが今回の実験により確認された。

(4) 重なり板金の分離に関しては主磁束は各板金にほぼ共通して貫通するが各板金内の電流には位相差を生ずるので、この位相差を大きくしてやる技術が板金間の反発力に大きな影響を有するようである。そのため的手段として急激な時間変化(タイムコンスタント)の利用は有効である。

## 9. 結 言

重なり板金分離の実験で採用した電磁誘導(反発)法は、被加工物の電氣的、磁氣的特性(物性)を知ることにより効率的に分離作業を行うことが

できる。たとえば、強磁性体は常磁性体の導体を分離するときよりキャパシターを小さくし共振周波数を高くする必要がある。このことにより強磁性体板金に対しても反発力を得ることができる。また導電率の低いものに対してはコンデンサ印加電圧を大きくして反発力を強くする必要がある。

このように現在研究されていない電気現象（電磁誘導法）による重なり板金分離法は、迅速かつ無損傷という点で機械振動による分離法よりも優れているといえる。さらにパルス電流の調整により強磁性体板金の分離にも有効である事が判明した。

最後に本研究は天田金属加工機械技術振興財団の助成金によるものであり、財団に対し感謝致し

ます。

また、当研究室院生江川要君の協力に対し感謝致します。

#### 参考文献

- (1) E.R.Laithwaite : Induction Machines for special purposes (London)
- (2) 坪井 他 : 薄板導体内のうず電流解析 (1989) 電気学会、回転機研究会 RM - 89 - 35
- (3) 秋山、江川 : 板金物の重なりと分離実験 H4、電気学会、全国大会
- (4) 秋山、江川 : パルス電流による重なり鉄板の分離実験 (1992) 電気学会、回転機研究会 RM - 92 - 15