

パルス電流による重なり板金の分離実験

秋 山 勇 治*・江 川 要**

Separation Test of Overlaped metal plate
by the pulse Current

Yuji AKIYAMA and Kaname EGAWA

Abstract

Conventionally, various methods have been tried and considered for separation of overlapped metal plates in metal plate processing. Many of them were based on mechanical principles (such as compressed air blowing, negative pressure suction and mechanical vibration).

This study proposes an innovative method to separate overlapped metal plates utilizing electromagnetic induction bounce between metal plates caused by electromagnetic pulse. In the experiment, pulse current is applied to various overlapped metal plates with varying the pulse current conditions in order to investigate whether optimum conditions exist or not.

1. ま え が き

板金加工にはプレス加工を代表として、打ち抜き加工やしぼり加工などがある。これらの板金加工をおこなう際には必ず材料を1枚ずつ作業行程に供給しなければならない。この材料を1枚ずつ正確に分離することは大変難しく、油などによる重複状態の材料(重なり板金)が加工行程に供給されると加工機器に無理が加わり破損する可能性がある。現在の分離方式は圧縮空気の吹き付けや機械振動(後述)が主流である。しかしながらこれらの方法はあまり確実な分離法ではなく、かつ、作業の安全性や自動化に対しては十分なものとはいえず、新たな分離法が要求されている。

本研究では従来の分離方式に加え、新たに電磁力による反発を応用する新しい方式を提案している。また新方式の基礎実験結果として、非磁性体に対しては良好な結果が得られることが判明したが、強磁性体に対しては簡単ではないことが判明した。しかしながらパルスの条件により最適条件を選べば分離の可能性が有ることが判明した。

2. 重なり板金分離の各種方法

重なり板金を確実に1枚ずつ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: 被加工物間に直接圧縮空気を吹きつけ飛ばす方法, ③ 負圧吸引: 被加工物を直接把持し引き剥がす方法, ④ 電磁誘導: 被加工物間で電磁反発力を生じさせる法, ⑤ 超音波振動: 被加工物に連続振動を与え, 重なり板金を浮かせて分離する方法がある。また⑥として負圧吸引と電磁誘導を組み合わせる方法が考えられる。現在の重なり板金分離法は機械振動による分離法が主に用いられるが, 確実に分離できるとは限らない。一方⑥の電磁誘導反発力と負圧吸引を組み合わせれば機械振動単体よりより正確に分離することができる。

被加工物の重なりの原因として(A)油による粘着, (B)バリ, 錆その他の機械的要因, (C)作業ミス(加工物排除失敗)などが挙げられる。

各種重なり板金分離法の特徴および欠点を表1に示す。

1992年9月29日受理

* 電気工学科

** 電気工学科専攻大学院生

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
⑤ 機械振動	厚物板金が対象	金属/非金属	$\Delta(\times)$ 0.1 kgf/cm ² 以下
② 主 圧	板厚と無関係 (負圧)	金属/非金属	Δ 0.1~0.5 kgf/cm ²
③ 負圧吸引	力は強いが作業ににくい	金属/非金属	\bigcirc 2~5 kgf/cm ²
④ 電磁誘導	電磁誘導反発力	金 属	\bigcirc 0.2 kgf/cm ²
⑤ 超音波振動	超音波ベアリングの原理	金属/非金属	\odot 1~5 kgf/cm ²
⑥ (③+④)	確実, 発生力 (中)	金属/非金属	\odot 0.2 kgf/cm ²

3. 新方式板金分離法

本研究の板金分離法では電磁誘導反発力を利用する。電磁誘導反発力は導体に動磁界が作用すると内部にレンツの法則にしたがいうず电流 (EDDY CURRENT) が生じ、このうず电流による磁界と動磁界が相反する極性を有するため得られる。この動磁界を発生する方法として 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反発力の発生が挙げられる。しかしながら ① はかなりの大電流を持続的に流す必要があるが, ② は過渡現象を利用すれば容易に大電流が得られる。このため本研究では経済的, 技術的な面から後者を用いる。

パルス電流発生回路として図 1 のコンデンサバンク方式を用いる。この回路は内部低抗を無視すれば L-C 共振回路であり, インダクタおよびキャパシタを変更することにより容易に振動周波数を変更することができる。

重なり板金分離の原理は導体 1 (固定) を貫いた動磁界が導体 2 に作用すると内部にうず電流が生じ, 導体 1, 導体 2 間に電磁誘導反発力が生じ分離が行われる。この電磁誘導反発力による板金分離のモデルを図 2 に, またその写真を図 3 に示す。

4. マックスウェル方程式による定式化

準定常電流におけるマックスウェル方程式は次式で表される。

$$\nabla \times \mathbf{H} = \mathbf{J} \quad (1)$$

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

ここで \mathbf{B} , \mathbf{E} , \mathbf{H} , \mathbf{J} はそれぞれ磁束密度, 電界, 磁界および電流密度のベクトルである。また透磁率を μ , 導電率を σ とすれば次のような関係式が得られる。

$$\mathbf{J} = \sigma \mathbf{E} \quad (3)$$

$$\mathbf{B} = \mu \mathbf{H} \quad (4)$$

また電流密度 \mathbf{J} は回路電流 J_0 とうず電流 J_e の和として表される。

$$\mathbf{J} = \mathbf{J}_0 + \mathbf{J}_e \quad (5)$$

ここで次式で定義される磁気ベクトルポテンシャル \mathbf{A} を用いて定式化する。

$$\mathbf{B} = \nabla \times \mathbf{A} \quad (6)$$

(6) 式を (2) 式に代入し整理すると次式となる。

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

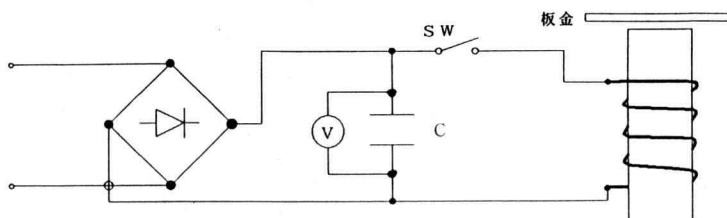


図 1. コンデンサバンク式回路

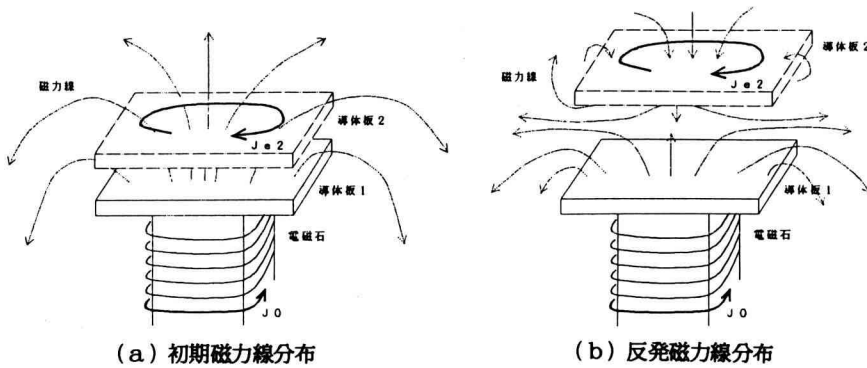


図2 分離モデル



図3. 実験の写真

$$\mathbf{J}_e = -\sigma \frac{\partial \mathbf{A}}{\partial t} + \nabla \phi \quad (8)$$

ゆえにベクトルポテンシャルを用いた支配方程式は次のようになる。

$$\frac{1}{\mu} \nabla \times \nabla \times \mathbf{A} + \sigma \frac{\partial \mathbf{A}}{\partial t} = \mathbf{J}_0 + \nabla \phi \quad (9)$$

上述の支配方程式により解かれた導体内の等ポテンシャル分布とうず電流分布を図4-a²⁾図4-b²⁾に示す。これらの理論式(1)～(5)までは代表的なマックスウェルの電磁方程式である。また(6)～(9)までは渦電流の関係を示す式である。これらの式より重り板金または単一板金に対し作用する電磁反発力を求めることができる。

5. 各種板金に対する実験

実験回路に用いるキャパシタおよびインダクタを表2に、対象板金特性を表3に示す。また調査実験のため導体板は単体である。実験には導体板がフリーな状態と拘束された状態の2状態を扱い、それぞれの測定条

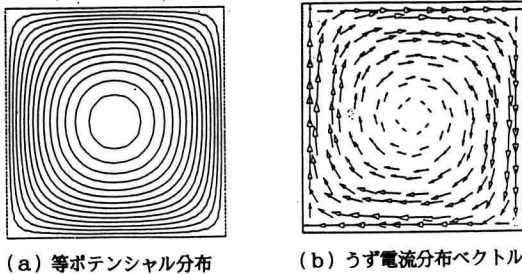


図4. 薄板内のうず電流分布図

$\therefore \phi$ スカラポテンシャル

(7) 式により電磁誘導起電力を生じる為の電界が得られる。また(7) 式を(3) 式に代入することにより次式のうず電流密度が得られる。

表2. 実験素子および共振周波数

		キャパシタ [μF]				
		2700	2000	1250	1000	330
インダクタ [mH]	1.9	70.3	81.6	103.3	115.5	200.0
	0.8	108.3	125.8	159.2	177.0	309.8

\therefore 周波数単位 [Hz]

表 3. 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	$6.67 * 10^6$
真鍮	100 * 100 * 1	83	(1.0)	$16.67 * 10^6$
Al	100 * 100 * 3	80	1.00002	$36.36 * 10^6$
Cu	100 * 100 * 1	90	0.999991	$58.14 * 10^6$

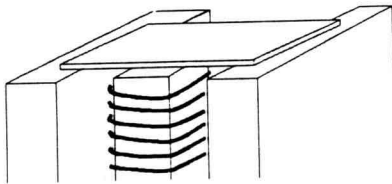


図 5. フリー状態実験モデル

件に対し 5 回実験を行う。

5-1 フリー状態

この実験は電磁誘導反発力を板金のはね上げ距離と想定した。実験の特徴としては図 5 に示すように導体支持部以外は導体板を拘束するものではなく、導体板は自由な運動(磁気誘導反発力が $X-Y-Z$ 方向に任意に作用)ができる。ただし導体は $x-y$ 平面に存在し、電磁コイルによる磁界は z 方向に作用している。実験のパラメータをキャパシタと導体とし図 6 と図 7 に示す(インダクタ: 1.9 [mH])。ここで図 6 中の h は電磁コイルと導体板の距離を表したものである。なお、データのバラツキの原因としては自由運動のピーク値を常に測定したことと、磁気反発作用以外にも機械系の振動力が作用したためと考えられる。

5-2 拘束状態

この実験は図 8 のように導体上部に測定装置が接続されており、導体板は拘束された運動となる。拘束状態実験の目的は、フリー状態実験の任意方向性反発力(要因: 測定環境によるうず電流の不均一分布)を測定するものではなく、導体に作用する反発力の主成分である Z 方向(導体平面の法線方向)成分のみを測定する観点からである。実験パラメータとしてキャパシタと導体を取り、図 9 と図 10 に示す。また各要因における単位エネルギー当たりの平均磁気誘導反発力を図 11

に示す。なお、図 10 において真鍮を表示しないのはその値が Al, Cu に比べはるかに小さいためであり、図 11 における記号は導体およびインダクタの種類を表し、A180L08 は導体の種類がアルミニウムでその重量が 80 [g]、インダクタが 0.8 [mH] であることを表す。

6. 重なり板金に対する検討

新分離方法の原理はうず電流が導体内に生じなければならない。分離対象となる重り板金の 2 枚目以降の導体が分離できるかどうかの是非は電磁コイルによる動磁界 H_0 が固定された導体 1 をどのように透過し、また導体 1 のうず電流による誘導動磁界 H_1 が導体 2 にどのように作用するかにある。そして導体 2 に作用する動磁界 H_2 は H_0' と H_1 の和となる。ここで導体 1 を透過した動磁界を H_0' とすれば H_2 , H_0' および H_1 の間には次のような関係式が考えられる。

$$H_2 = H_0' + H_1 \\ = H_2' * \text{EXP}(-\alpha z) * \text{EXP}(j(\omega t - \beta z)) \quad (10)$$

$\therefore H_2'$: 状態により定められる動磁界

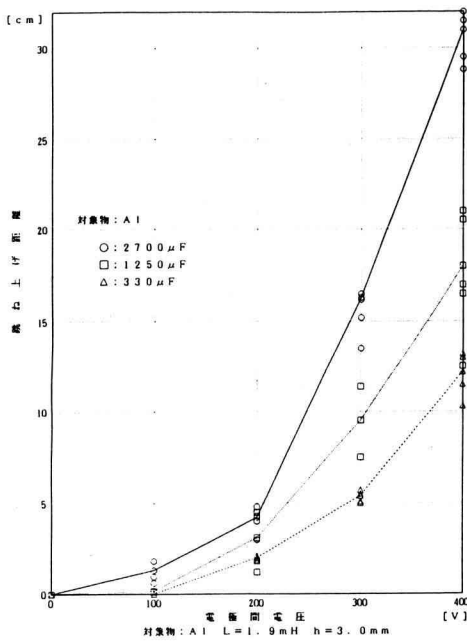
α : 減衰定数 (Attenuation Constant) β : 位相定数 (Phase Constant)

よって新原理分離法は複数枚の重なり板金に対して、その重なり厚が磁界の浸透深さ (Skin Depth) δ 以内であれば有効なものであるといえる。なお準定常状態における減衰定数 α および位相定数 β は次式で表される skin Depth の逆数と同じ値となる。

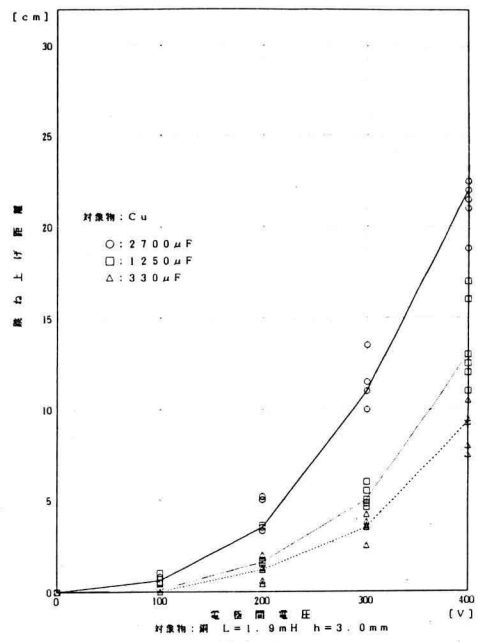
$$\delta = \sqrt{2/\omega\mu\sigma} \quad (11)$$

7. パルス電流による反発力の検討

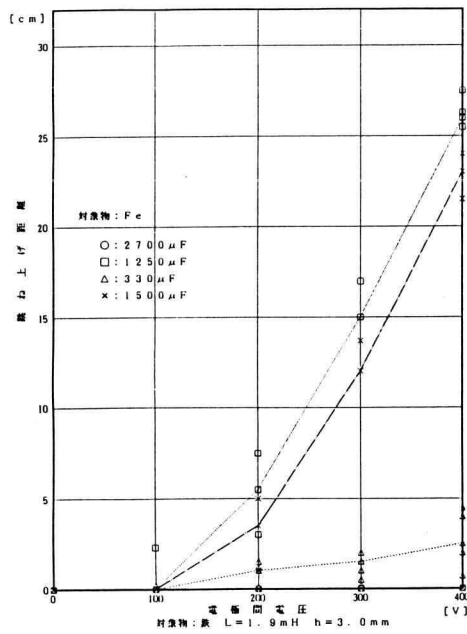
フリーおよび拘束状態の電磁誘導反発力の特性を図 6 から図 10 に示す。この特性図により非磁性体 (Cu,



(a) Al



(b) Cu



(c) Fe

図6. キャパシタに対する反発力特性図 (フリー状態)

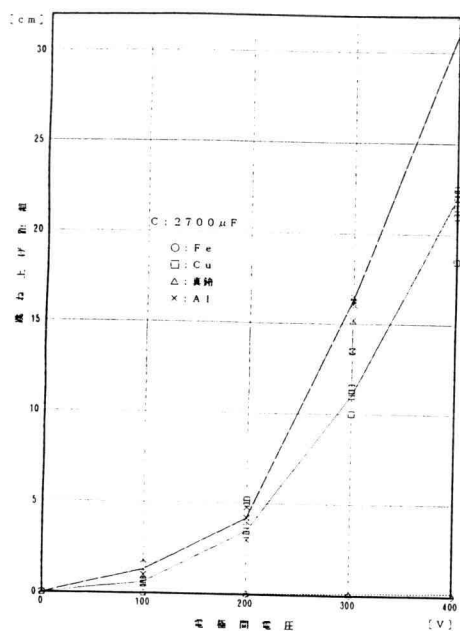
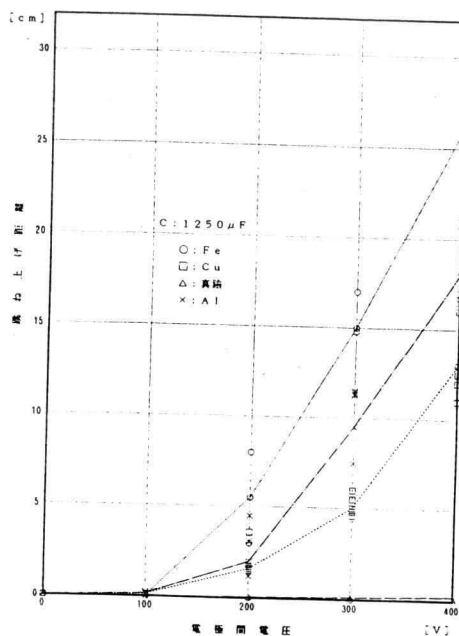
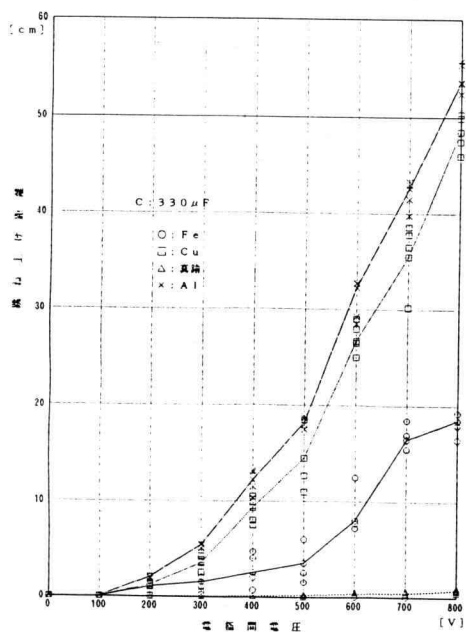
(a) 2700 [μF](b) 1250 [μF](c) 330 [μF]

図7. 導体に対する反発力特性図 (フリー状態)

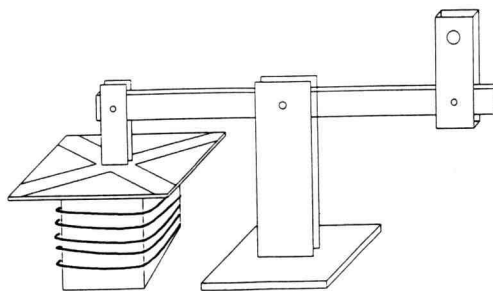
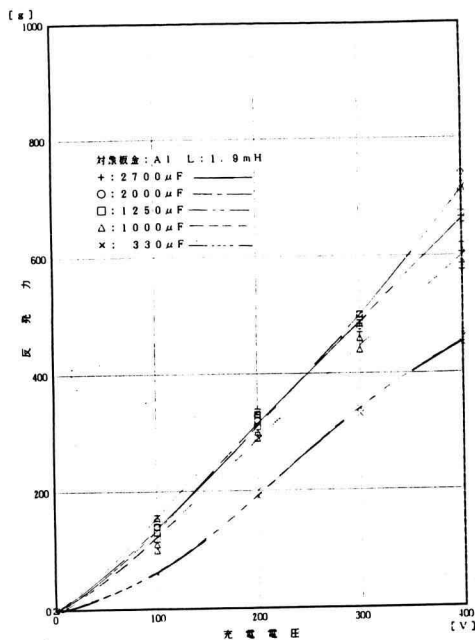
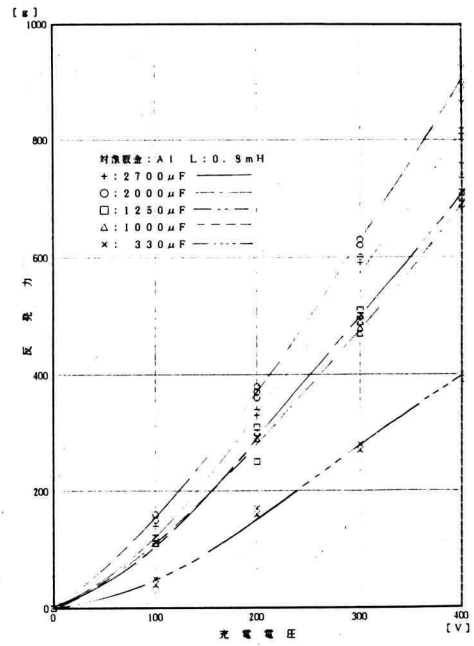


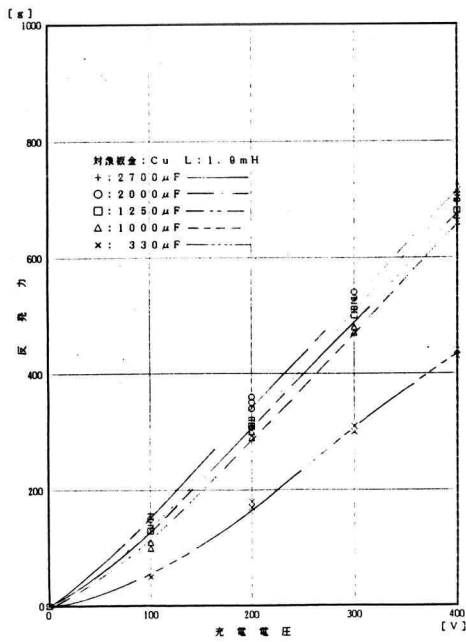
図8. 拘束状態実験モデル



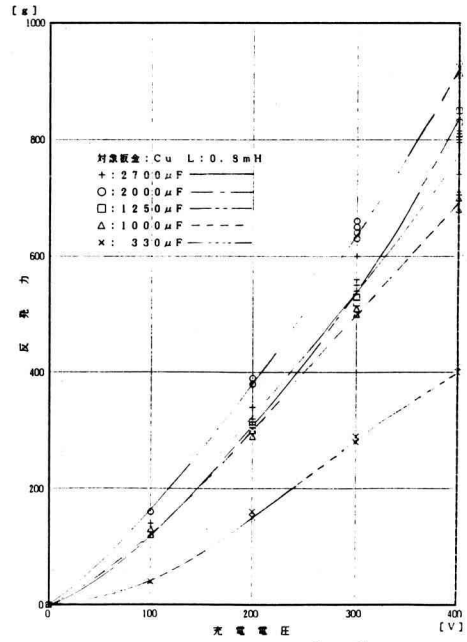
(a) Al, 1.9 [mH]



(b) Al, 0.8 [mH]

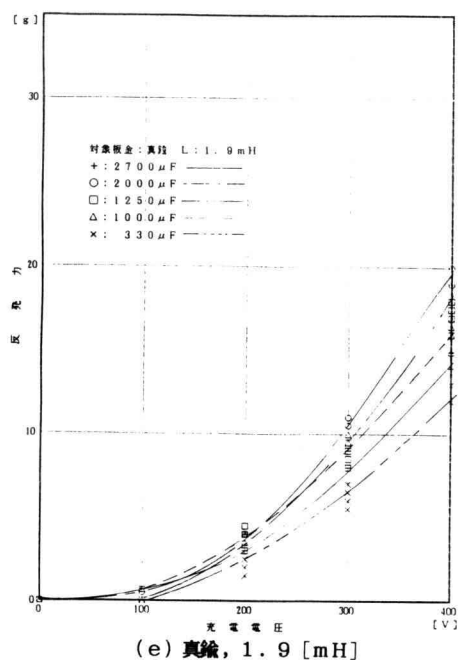


(c) Cu, 1.9 [mH]

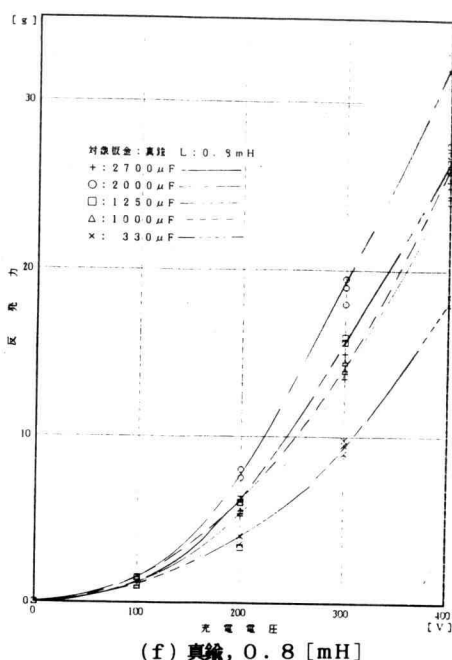


(d) Cu, 0.8 [mH]

図9. キャパシタに対する反発力特性図 (拘束状態)



(e) 真鍮, 1.9 [mH]



(f) 真鍮, 0.8 [mH]

図9. つづき

Al, 真鍮) に関しては反発力はほぼ電圧の2乗に比例していることが分かる。強磁性体に関してはフリー状態で反発力を確認できたが、拘束状態に関しては確認することができなかった。この原因は非磁性体および強磁性体双方に作用する力として機械振動(パネ)系が含まれるからである。非磁性体では機械振動系より磁気反発作用の影響が強く現れるが、強磁性体では磁気吸引作用となる可能性が強い。そのためフリー状態では機械振動を効率的に利用できたが、拘束状態では測定装置に固定されるためパネ系を構成することが難しくなる。このことにより非磁性体および強磁性体ともに測定状態によりバラツキが生じず原因と考えられる。よって本研究の分離方式は磁気誘導作用と機械振動作用を組み合わせることにより、より効果的な重なり板金の分離を可能にしている。

8. 考 察

この基礎研究により電磁誘導作用を用いた重なり板金分離法は条件を整えれば有効な分離方法となる。その条件として次の要因につき考察する。これはうず電流に必要な要因となる導電率、磁気特性および周波数

が大きく影響している。

(1) 導電率について

各種導体の導電率を表3に示す。また図9の特性図により導電率の影響を知ることができる。この表3と図9により導電率の低い真鍮よりも導電率の高いCuやAlの方が効果的に電磁誘導反発力が得られるといえる。また導体板の厚みが薄くなるとインピーダンスが増しうず電流値が減少する。よって電磁誘導反発力が低下する。

(2) 磁気特性について

非磁性体と強磁性体では磁気誘導作用が異なり、前者は反発力を後者は主に吸引力を生じる。このためフリー状態実験での強磁性体は反発力が得られるときと得られないときがあった。強磁性体では導体表面におけるうず電流を大きくするため、時間に対する磁界の変化量を大きくする必要がある。また、吸引力を陰要素(Passive Factor)とせず機械振動(パネ)作用のエネルギー源と考えれば陽要素(Active Factor)となる。

(3) 周波数について

キャパシタおよびインダクタの組合せによる周波数の値を表2に示す。各測定条件に対する単位エネル

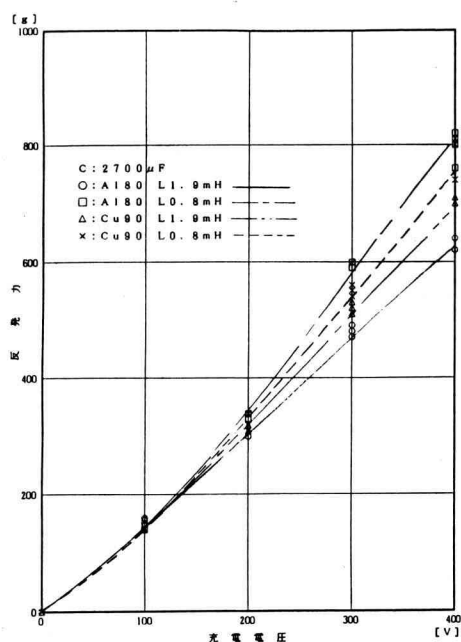
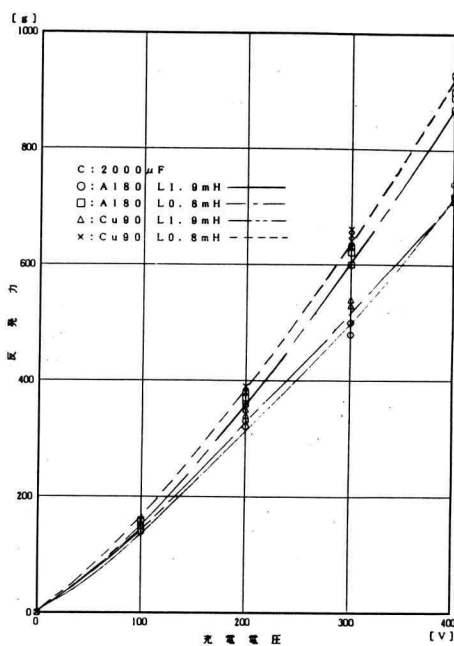
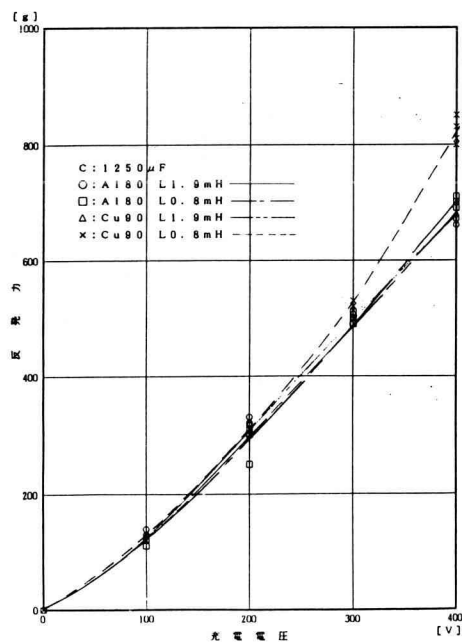
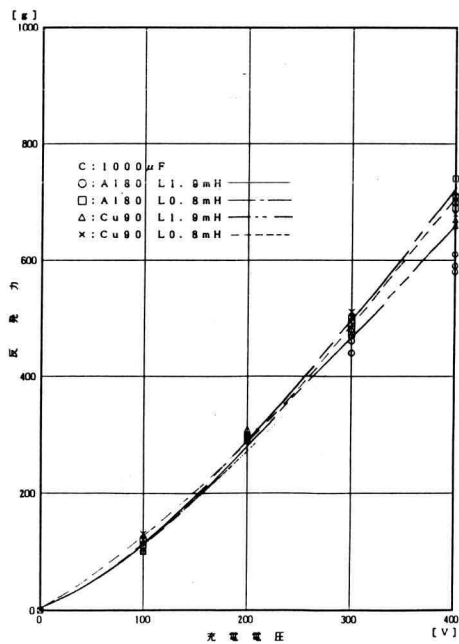
(a) 2700 [μF](b) 2000 [μF](c) 1250 [μF](d) 1000 [μF]

図 10. 導体に対する特性図 (拘束状態)

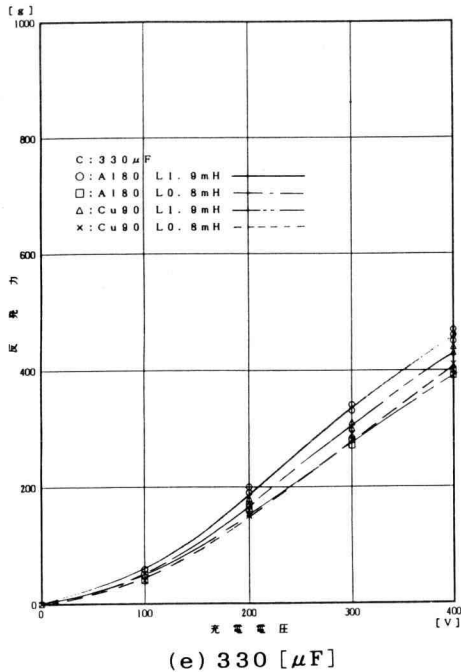


図 10. つ づ き

ギー当りの磁気誘導反発力を図 11 に示す。この特性図は周波数と単位エネルギー当たりの磁気反発力の間に、導体の種類に関わらず比例関係が存在することを示す。すなわち周波数が高いほど電気-磁気エネルギー変換効率が良い。ゆえに新方式板金分離の回路定数設定としては共振周波数を高く、充電電圧を大きくする必要がある。これは短時間で充電可能となり、実用面からも好条件と言えよう。

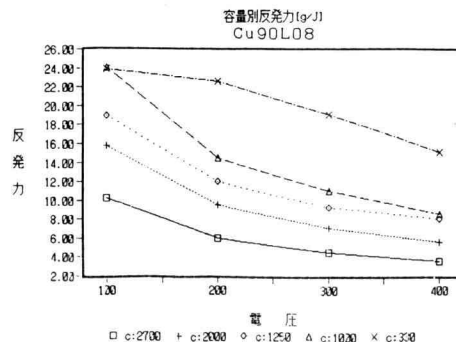
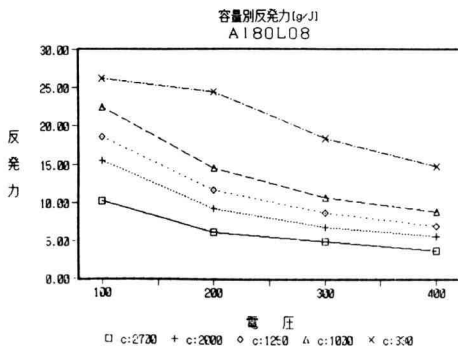


図 11. 周波数依存特性図 (拘束状態)



図 12. 拘束実験装置

(4) 位相差について

分離対象となる導体に作用する動磁界は式 10 により与えられる。すなわち電磁コイルによる動磁界とらず電流による動磁界に位相差が生じ、この位相差 (Phase Difference) または位相速度 (Phase Velocity) を大きくすることにより電磁誘導反発力の発生効率を高くできる可能性がある。

9. ま と め

本研究に対する基礎実験の結果、重なり板金の分離性能を良くするためにはコンデンサに蓄えられる電気エネルギーが一定であれば低周波よりも高周波 (準定常電流範囲内) を用いる方が良いことが分かった。うず電流は時間に対する磁界の変化量に比例するため、磁界の変化量が大きな高周波ほど大きな誘導磁界が発生し、その結果電磁コイルによる磁界との間に生じる反発磁界が大きくなる。また導体の諸特性 (導電率, イ

ンピーダンス、透磁率 etc) に対し最適条件 (Optimum Point) が存在することが判明した。(重なり板金に対する本調査実験の結果最も効率的な電磁誘導反発力を得るキャパシタおよびインダクタの設定値は 2,000 [μ F] および 0.8 [mH] であった)。

本方式の場合、作用する力としては電磁誘導作用と機械振動（バネ）作用がある。特に非磁性体に対しては電磁誘導作用を、強磁性体に対しては機械振動作用の効果が有効である。ゆえに負圧吸引と組み合わせる際、機械振動が有効に作用するように導体接触部を加工すれば、導体の種類に関わらず重なり板金の分離が

可能と考えられる。

最後に本研究はアマダ金属加工機械振興財団の助成金によるものであり、財団に対し深く感謝致します。

参 考 文 献

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