

電磁圧力による極薄金属板の穴あけ加工

相沢 友勝*

1. まえがき

フレキシブルプリント基板、電子回路部品など軽薄化した高精度金属部品の使用が広まるにつれ、その穴あけ技術が重要になる。従来の加工法では、板厚が薄く、穴径が小さくなると、いろいろな難点が生じる⁽¹⁾。例えば、厚さが極めて薄くなると、ポンチとダイスを用いるせん断加工では、クリアランスの正確な設定が困難となる。このため、型摩耗が激しく、生産性、加工精度が制限される。ポンチを用いない穴あけ法として、他の物質を圧力媒体とする方法⁽²⁾、レーザ加工法⁽³⁾などもあるが、生産性、費用の点に問題がある。

以上の欠点を除くため、筆者らは電磁圧力を利用する穴あけ法を研究してきた⁽⁴⁻¹⁰⁾。圧力媒体に相当するものは磁界であり、穴あけは高速で行われる。他の方法と異なり、物質が圧力媒体として接触することなく穴あけできる。従来のせん断加工技術がそのまま利用でき、型としてダイスだけでよく、クリアランスをはじめ穴あけ加工の問題点はほぼ解決する。

金属薄板に小径の穴をあける場合、磁束を穴あけする部分に集中して、大きな電磁力を発生させる必要がある。簡単な方法として、小径のソレノイドコイルの使用が考えられる。しかし、コイル巻線に大電流が流れるので、コイルの強度に限界があり、小径の穴あけは制限される。

このため、新しく2種類の平板状ワンターンコイルを開発した。これらのコイルは、小径の穴あけや幅の狭いスリット状の穴あけに適している。平板状ワンターンコイル L_A は、磁束を細長い場所に集中させる構造であり、同コイル L_B は、磁束を局所的に集中できる構造をしている。

また、コイルを使用せず、金属薄板に直接通電する方法でも電磁圧力を発生させ、穴あけすることができる。

ここでは、電磁圧力による金属薄板(板厚0.1mm)の穴あけ加工について、ソレノイドコイル L_S を用いた実験、平板状ワンターンコイル L_A 、 L_B を用いた実験、直接通電方式を用いた実験について報告する。電磁力による穴あけ加工の特徴、有効性および加工限界を明らかにする。

2. 穴あけ原理

電磁力で金属薄板に穴あけする典型的な原理を図1に示す。ダイス、金属薄板および磁束の断面が示されている。高密度の磁束(磁束密度 B)が、図1のように金属薄板の下側に急激に発生し、薄板に交差すると、薄板に

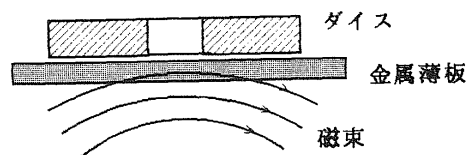


図1 穴あけ原理図(断面)

うず电流(電流密度 i)が流れる。この結果、薄板には単位体積あたり $i \times B$ なる電磁力が上向きに働く。上向きに力を受けた金属薄板はダイスの刃でせん断され得る。

ダイス穴部分に働く電磁力の大きさは、電磁圧力または磁気圧力として次のように求められる⁽¹¹⁾。図1に示すダイス穴付近の磁束密度は、穴径が小さいとき、一様で金属薄板に平行と見なせる。このとき、穴部分に働く圧力 p_m [Pa]は次式で与えられる。

$$\begin{aligned} p_m &= (B^2 - B_0^2) / 2\mu \\ &= (B^2 / 2\mu) [1 - \exp(-2t/\delta)] \end{aligned} \quad (1)$$

ここで、 B および B_0 は、穴付近での薄板下側および上側の磁束密度[T]、 t は板厚[m]、 $\delta = \sqrt{2/\omega\kappa\mu}$ [m]は表皮効果の深さ、 ω は磁束が変化する角周波数、 κ は金属薄板の導電率、 μ は透磁率である。

3. 磁束発生装置

高密度の磁束を急激に発生させるため、高電圧、低インダクタンスのコンデンサ電源からコイルに放電電流を急激に流す装置を使用する。この種の放電装置の構成要素を図2に示す。コンデンサ電源を大きなエネルギーに充電した後、トリガ装置を起動し、放電スイッチを閉じ、コイルに振動する大電流を流す。この結果、コイル近くに電流に比例した高密度の磁束が発生する。

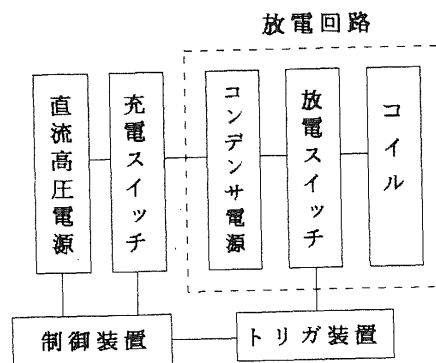


図2 磁束発生装置構成図

4. ソレノイドコイル L_s を用いた実験

4.1 実験装置

装置の概略を図3に示す。コンデンサ電源 C ー放電ギャップスイッチ G ーソレノイドコイル L_s は、図2に示した放電回路である。金属薄板および穴あけ用ダイスは、コイルの近くでコイル軸と垂直に固定してある。コイルに放電電流が流れると、発生する磁束が金属薄板に交差し、薄板に電磁圧力が働く。

コンデンサ電源 C の容量は $12\mu\text{F}$ である。典型的なコイルは、太さ 1.6mm の絶縁被覆銅線を巻いて作られ、内径 8mm 、長さ 40mm 、インダクタンスは約 $1\mu\text{H}$ である。コイルをのぞく放電回路のインダクタンスは、約 $0.03\mu\text{H}$ である。金属薄板の材質は、アルミニウム(A1050)、銅(C1100)、厚さは 0.1mm であり、これらを熱処理せずに使用した。薄板の上に置かれたダイスの材質は、SK3などである。ダイス穴の形状は、直径 $0.4\sim 16\text{mm}$ の円などである。絶縁材としてポリエステルシートを使用した。

コイルに流れる電流波形を、ロゴスキーコイル、サーチコイル、積分器などを使用してオシロスコープで観測した。図3のように通したレーザ光を受光し、光信号の変化を同時に測定した。放電実験ごとに金属薄板の状態を調べ、ダイスで打抜かれた部分が切り放された場合、穴があいた状態とした。

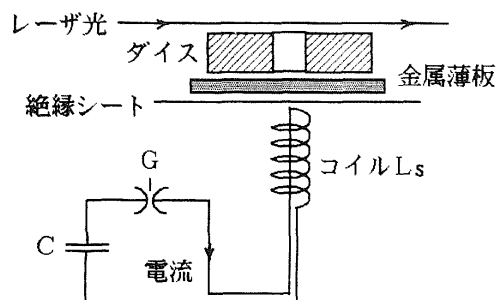


図3 実験装置概略 (コイル L_s 使用)

4.2 実験結果

実験は、コイルー板材間距離 l を約 0.5mm とし、コンデンサ電源の充電エネルギー、ダイスの穴径などを変えて行われた。充電エネルギーについては、充電電圧を変え、 0.1kJ ごとに变化させた。

(1) 電流波形および光信号 穴あけの際、コイルに流れる典型的な電流波形を図4に示す。電流の最大値は充電エネルギー 0.5kJ のとき、約 26kA であった。このときコイル端面での最大磁束密度は、約 10T となる。電流波形の振動周期は、約 $21\mu\text{s}$ であり、発生する磁束のCu板に対する表皮効果の深さ δ は、約 0.3mm であった。

光信号は、電流波形に対応して図4のように観測された。ダイスでせん断された金属片がレーザ光を横切るとき、波形がこのような変化した。

(2) 穴あけ実験 穴あけ加工したAl板の写真を図

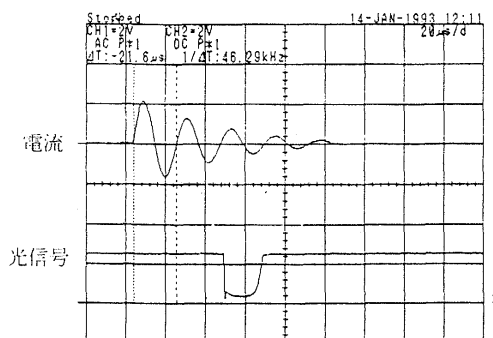


図4 観測波形例 (コイル L_s 使用) $20\mu\text{s}/\text{div}$.

5に示す。図5(a)~(c)は充電エネルギー不足で穴あけできなかった例、図5(d)は穴あけできた例である。穴をあけるのに必要な最小充電エネルギーは、穴径に対して図6のように変化した。厚さ 0.1mm のAlおよびCu板に直径 6mm までの穴あけができた。小径の穴をあけるのに大きなエネルギーを必要とした。直径 5mm 以下の穴あけは、コイルが破損するため困難であった。

電流が流れ始めてから穴があくまでの時間は、充電エネルギーが増加すると短くなり、 $150\sim 40\mu\text{s}$ であった。

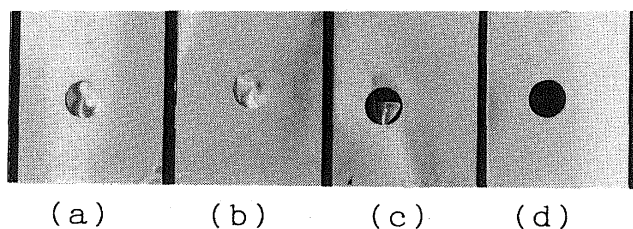


図5 穴あけ加工例 (コイル L_s 使用)

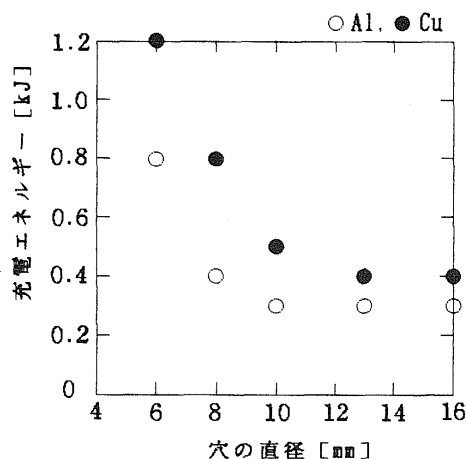


図6 穴あけに必要な最小充電エネルギー
コイル L_s 使用、内径 8mm 、長さ 40mm

5. ワンターンコイル L_A を用いた実験

5.1 実験装置

装置の概略を図7に示す。コンデンサ電源 C ー放電ギ

ヤップスイッチG-平板状ワンターンコイル L_A は放電回路であり、図7(a)にコイル平面図、(b)にダイス、金属薄板、コイルの断面などが示されている。コイルに放電電流が流れると、電流が集中するコイル中央の細長い部分に強い磁束が発生する。この磁束が金属薄板に交差する。薄板中央部のうず電流は、図7(b)のようにコイル中央部の電流と反対向きに流れる。

コンデンサ電源Cの容量は12 μ Fである。コイル L_A は銅製で、大きさ200 $\times$ 145mm、厚さ2mm、 $a_1=5$ mm、 $a_2=10$ mm、 $a_3=80$ mmであり、インダクタンスは、約0.02 μ Hである。コイルをのぞく放電回路のインダクタンスは、ソレノイドコイル L_S を用いた前実験と同じ約0.03 μ Hである。このため、電源の充電エネルギーがコイルへ磁気エネルギーとして移る割合は、ソレノイドコイル L_S の場合に比べ小さくなる。その他については、前実験と同様である。

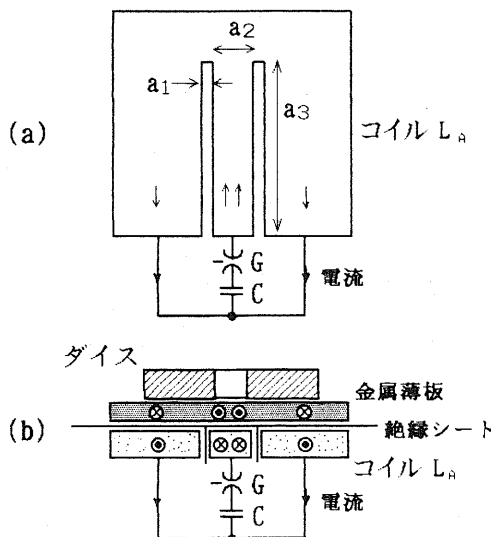


図7 実験装置概略(コイル L_A 使用)
(a)コイル正面および放電回路、(b)コイル、金属薄板、ダイス断面および放電回路

5.2 実験結果

実験は、コイル-板材間距離 l を約0.15mmとし、コンデンサ電源の充電エネルギー、ダイスの穴径などを変えて行われた。充電エネルギーについては、0.1kJごとに变化させた。

(1) 電流波形 穴あけの際、コイルに流れる電流波形例を図8に示す。電流最大値は、充電エネルギーが0.5kJのとき、約110kAであった。このとき、コイル中央部表面での最大磁束密度は、約5Tとなる。振動電流の周期は4.9 μ sであり、Cu板に対する表皮効果の深さ δ は、約0.14mmとなる。このとき、式(1)から最大磁気圧力は、約8MPaと概算される。

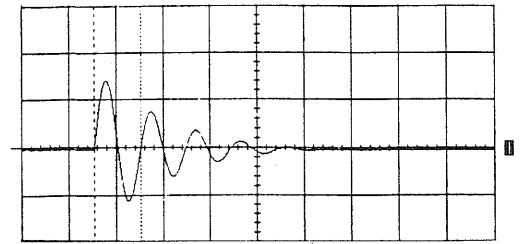


図8 電流波形例(コイル L_A 使用) 5 μ s/div.

(2) 穴あけ実験 穴あけするのに必要な電源の最小充電エネルギーは、穴径に対して図9のように变化した。厚さ0.1mmの金属薄板に対し直径1mmまでの穴あけができた。ソレノイドコイル L_S を用いた前実験より小径の穴あけが可能となった。この充電エネルギーは、板厚およびコイル-板材間距離 l にも依存した⁽¹⁰⁾。

電流が流れ始めてから穴あけされるまでの時間は、充電エネルギーが増えると短くなり、120~30 μ sであった。この種のコイル L_A を使用して同様に実験すると、長さ50mm、幅0.4mmの細長いスリット状の穴をあけることもできる⁽¹¹⁾。

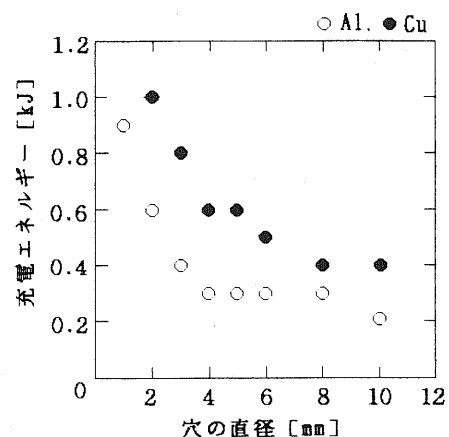


図9 穴あけに必要な最小充電エネルギー
コイル L_A 使用、 $a_2=10$ mm

6. ワンターンコイル L_B を用いた実験

6.1 実験装置

装置の概略を図10に示す。コンデンサ電源C-放電ギヤップスイッチG-平板状ワンターンコイル L_B は放電回路であり、図10(a)にコイル上板、(b)にコイル側面および放電回路、(c)にコイル下板、(d)にダイス、金属薄板、コイル中央部の電流方向断面および放電回路、(e)にはダイス、金属薄板、コイル中央部の電流に垂直な断面が示されている。コイル L_B に放電電流が流れると、電流が集中するコイル中央付近に強い磁束が発生する。この磁束が金属薄板に交差する。薄板中央部のうず電流は、図10(e)のようにコイル中央部の電流と反対向きに流れる。コイル L_B は銅製で、大きさ200 $\times$ 145mm、

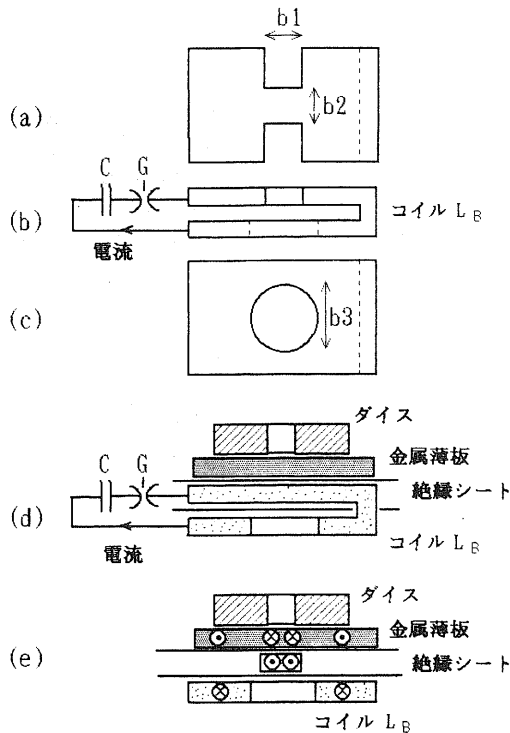


図10 実験装置概略 (コイル L_B 使用)
 (a) コイル上板, (b) コイル側面および放電回路,
 (c) コイル下板, (d) ダイス, 金属薄板, コイル中央の電流方向断面および放電回路, (e) ダイス, 金属薄板, コイル中央部の電流に垂直な断面

厚さ2mm, $b_1=23\text{mm}$, $b_2=5, 10\text{mm}$, $b_3=25\text{mm}$ である。コイルのインダクタンスは, $b_2=5\text{mm}$ の場合, 約0.01 μH である。

この実験では, 円形の穴あけの他に, 細長いスリット状の穴をあけるため, 長さ11mm, 幅0.3~2.0mmのダイスをコイル中央幅 $b_2=5\text{mm}$ のコイルとともに使用した。ダイス穴の長手方向11mmをコイル中央部の電流が流れる方向に向けた。その他については, 前実験と同様である。

6.2 実験結果

実験は, コイル-板材間距離 l を約0.15mmとし, 電源の充電エネルギー, ダイスの穴径などをえて行われた。充電エネルギーについては, 穴直径1mm以上の穴をあける場合 0.1kJごとに变化させ, 穴直径0.8mm以下の穴をあける場合 0.025kJごとに变化させた。

(1) 電流波形 穴あけの際, 中央幅 $b_2=10\text{mm}$ のコイルに流れる典型的な電流波形を図11に示す。電流最大値は, 充電エネルギーが0.5kJのとき約118kAであり, コイル中央部表面での磁束密度は, 約5Tであった。このとき, Cu板に対する磁気圧力は, 式(1)から約9MPaと概算される。ただし, 中央の幅が狭い $b_2=5\text{mm}$ のコイルに電流を流す場合, 充電エネルギーが0.5kJのときでも,

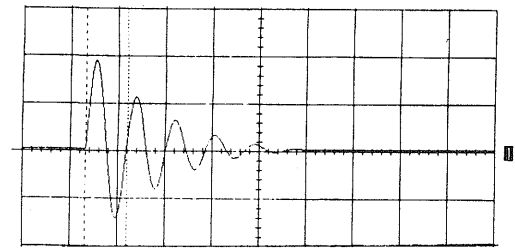


図11 電流波形例 (コイル L_B 使用) $5\mu\text{s}/\text{div}$.

磁束密度は約8Tとなり, 磁気圧力は約20MPaとなる。

(2) 穴あけ実験 円形の穴をあけるのに必要な電源の最小充電エネルギーは, 穴径に対して図12のように变化した。厚さ0.1mmの金属薄板に対し 直径1mmまでの穴あけができた。この結果は図9の結果 (前実験) に比べ, 効率よく穴あけされている。この最小充電エネルギーの変化は, コイル上板の中央幅 b_2 を変えると 図13のようになった。コイル中央幅 b_2 を5mmと狭くすると, 小径の穴を効率よくあけることができた。このコイルを使用し, 直径1mm未満の穴をあけるのに必要な最小充電エネルギーは, 穴径に対して図14のように变化した。直径0.4mmまでの穴をあけることができた。ただし, 大きすぎる充電エネルギーで直径1mm以下を穴あけすると,

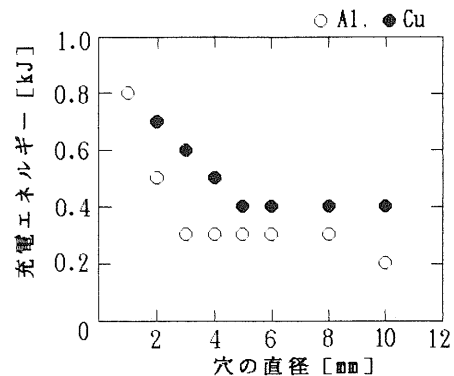


図12 穴あけに必要な最小充電エネルギー
 コイル L_B 使用, $b_2=10\text{mm}$

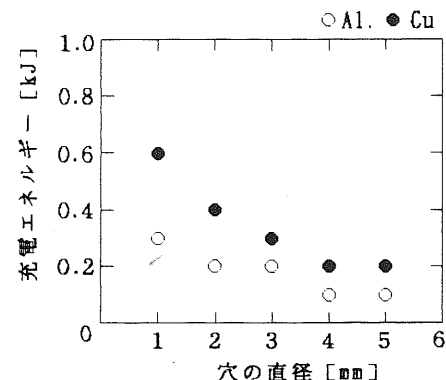


図13 穴あけに必要な最小充電エネルギー
 コイル L_B 使用, $b_2=5\text{mm}$, 穴径 $> 1\text{mm}$

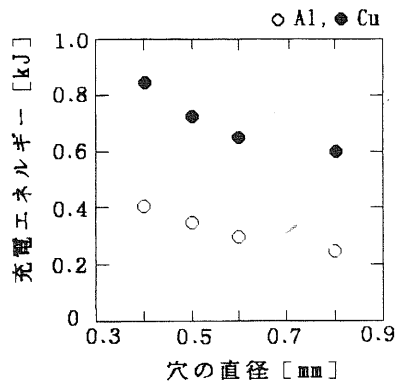


図14 穴あけに必要な最小充電エネルギー
コイル L_0 使用, $b_2 = 5\text{mm}$, 穴径 $< 1\text{mm}$

穴付近の金属が部分的に溶解することがあった。

電流が流れてから穴あけされるまでの時間は、充電エネルギーが増加すると短くなり、 $60 \sim 20\mu\text{s}$ であった。

〈3〉スリット状穴あけ実験 スリット状の穴をあけるのに必要な電源の最小充電エネルギーは、スリット幅に対して図15のように変化した。スリット幅が狭くなると、穴あけに必要なエネルギーが増加している。厚さ 0.1mm の金属薄板に対しスリット幅 0.3mm まで穴あけできた。

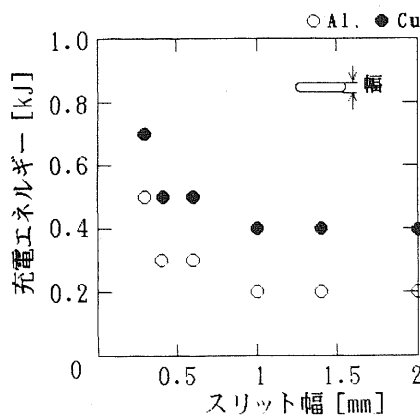


図15 穴あけに必要な最小充電エネルギー
コイル L_0 使用, $b_2 = 5\text{mm}$, スリット長さ 11mm

〈4〉加工例 金属薄板に直径 1mm および 0.5mm の穴をあけたときの加工例を図16に示す。黒いところが穴あけされている。穴あけた金属薄板のダイス側およびコイル側の面が示されている。ダイス側の穴周囲は、コイル側に比べて鋭い角度でせん断されていた。見た目ではカエリ（バリ）のほとんどない良好なせん断加工であった。コイル側の穴周囲は、比較的滑らかな切り口であった。

スリット状に穴あけ加工したときの写真例を図17に示す。全長 11mm にわたり穴あけされている。

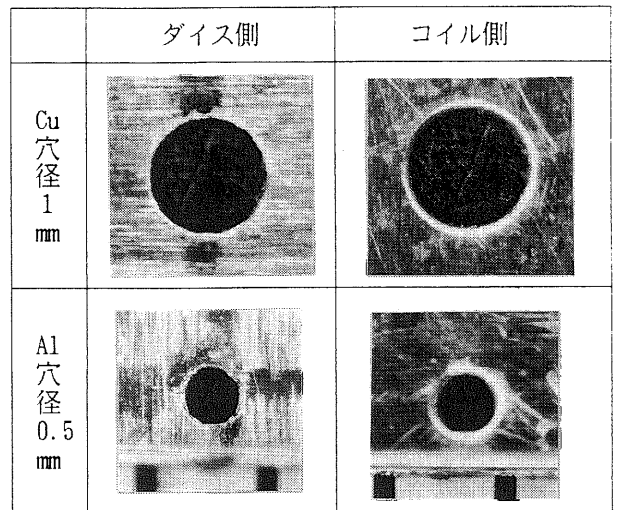


図16 円形の穴あけ加工例（コイル L_0 使用）

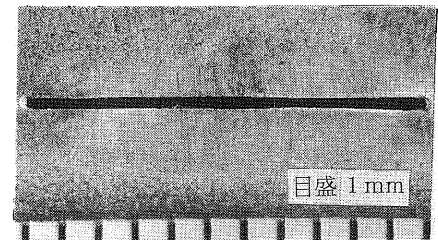


図17 スリット状穴あけ加工例（コイル L_0 使用）

7. 直接通電方式を用いた実験

7.1 実験装置

電磁力は、金属薄板に直接電流を流しても発生する。これまで述べた実験のようなコイルを使用しない。装置の概略を図18に示す。コンデンサ電源 C —放電ギャップスイッチ G —金属薄板—通電用導体が放電回路である。スイッチ G を短絡すると、金属薄板と板状の通電用導体に大きな放電電流が往復して流れる。絶縁された金属薄板とこれに密着した通電用導体の間には、強い磁界が発生し、電磁力が働く。通電用導体の電流に垂直方向の幅が小さい場合、金属薄板には、通電した放電電流とうず電流が重畳して流れる。

コンデンサ電源 C の容量は、 $1600\mu\text{F}$ である。電源部分はスイッチ G を含めて4並列になっている。スイッチを含めた電源部分の残留インダクタンスは、約 $0.01\mu\text{H}$ である。通電用導体は銅製で、厚さ 2mm 、幅 $10 \sim 40\text{mm}$ である。ダイスには、刃の近く以外、できるかぎり放電電流が流れないようにしてある。金属薄板（Al）の板幅は

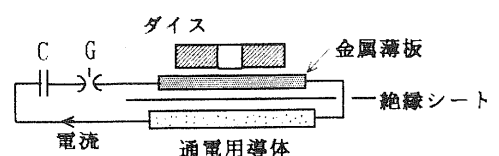


図18 実験装置概略（直接通電方式、断面）

40mm, 長さは 約100mmである. その他については前実験と同様である.

7.2 実験結果

実験は, 通電用導体-板材間距離を約0.15mmとし, 電源の充電エネルギー, ダイスの穴径, 通電用導体幅などを変えて行われた. 電源エネルギーについては, 0.1kJごとに变化させた.

〈1〉電流波形 穴あけの際, コイルに流れる典型的な電流波形を図19に示す. 最大電流値は, 充電エネルギー0.5kJ, 通電用導体幅20mmのとき, 約150kAであった. 最大磁束密度は約7Tとなる.

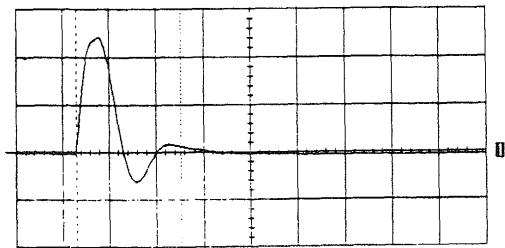


図19 電流波形例 (直接通電方式) 20 μ s/div.

〈2〉穴あけ実験 穴あけするのに必要な最小充電エネルギーは, 穴径に対して図20のように变化した. 結果は 通電用導体幅に大きく依存した. 厚さ0.1mmの薄板に対し直径2~20mmまでの穴あけができた. 板厚, 板材質への依存性⁽⁵⁾, 穴あけ精度⁽⁷⁾についても調べられている. 大きすぎるエネルギーで穴あけすると, 金属薄板への通電部分などが溶解することがあった.

電流が流れ始めてから穴あけされるまでの時間は, 充電エネルギーが増えると短くなり, 70~30 μ sであった.

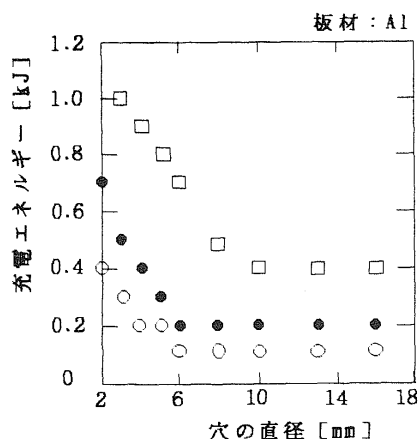


図20 穴あけに必要な最小充電エネルギー
直接通電方式, 通電用導体幅: ○10mm,
●20mm, □40mm

8. まとめ

電磁力を利用して厚さ0.1mmの Al, Cu 板に穴あけする実験を行った. ソレノイドコイル L_s , 平板状ワンターンコイル L_A, L_B および直接通電方式を用いて穴あけした. その結果, 電磁力による穴あけ加工の特徴および加工限界を以下のとおり明らかにすることができた.

- (1) 短時間 (数10 μ s) で穴あけできる.
- (2) ソレノイドコイル L_s を用い, 直径5mm以下の穴をあけるのは困難である.
- (3) 平板状ワンターンコイル L_A を使用すれば, 直径1mmまでの穴あけ加工が容易にできる. また, 長さ50mm, 幅0.4mmまでのスリット状穴あけ加工ができる.
- (4) 平板状ワンターンコイル L_B を用いれば, 直径0.4mmまでの穴あけ加工ができる. また, 長さ11mm, 幅0.3mmまでのスリット状穴あけ加工ができる.
- (5) 電流を金属薄板に直接通電しても, 直径2mmまで穴あけできる.

なお, コイル L_B を用いてフレキシブルプリント配線基板上に直径1mmまでの穴あけ加工^(12, 13)が可能である.

本研究は天田金属加工機械技術振興財団の研究助成金を使用して行われた. 関係各位にお礼申し上げます.

参考文献

- (1) 青木: 塑性と加工, 33-379 (1992), 943.
- (2) 村田, 上出, 鈴木: 平5塑性加工春季講演会論文集, (1993), 737.
- (3) 宮崎, 宮沢, 村川, 吉岡: レーザ加工技術, (1994), 25, 産業図書.
- (4) 相沢: 電子情報通信学会技術報告 EMD93-55 (1993).
- (5) 相沢, 前田, 朱: 電子情報通信学会技術報告 EMD93-79 (1994).
- (6) 相沢, 長野, 皆川: 電子情報通信学会技術報告 EMD94-42 (1994).
- (7) 張, 村田, 相沢, 鈴木: 機械学会論文集C, 62-599 (1996), 2873.
- (8) 相沢: 塑性と加工, 38-438 (1997), 621.
- (9) 相沢, 石川: 平6塑性加工春季講演会論文集, (1994), 357.
- (10) 相沢, 羽賀, 池上: 47回塑性加工連合講演会論文集, (1996), 333.
- (11) 相沢: 高エネルギー速度加工 (塑性加工学会編, コロナ社, 1993), 165.
- (12) 相沢: 電子情報通信学会技術報告 EMD97-15 (1997).
- (13) 相沢, 岡川, 池上: 平9塑性加工春季講演会論文集, (1997), 417.