

電磁力による金属薄板の穴あけ加工

相 沢 友 勝

Magnetic-Pressure Punching of Sheet Metal

Tomokatsu AIZAWA

This paper clarifies an advantage of magnetic-pressure metal punching. Various methods for the punching are compared with each other. Two models of a one-turn flat coil have been designed, particularly for small hole punching. When an impulse current from a capacitor bank passes through the coil, eddy currents are induced in a 0.1 mm thick aluminum or copper sheet fixed between the coil and a die. Magnetic pressure acts on the sheet and punches it with the die hole. To obtain 0.4~10 mm diameter holes, the bank energy is required to be below 1 kJ.

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、私達は電磁力を利用する穴あけ法を研究してきた^{(4)~(9)}。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、本校では、2種類の平板状ワンターンコイルを開発した。このコイルは、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、磁束を局部的に集中できる構造をしている。

また、コイルを使用せず、金属薄板に電流を直接通電

する方法で電磁力を発生させ、穴あけする実験も本校で行われた。

ここでは、電磁力による金属薄板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総合的に報告する。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、金属薄板および磁力線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で急激に発生し、薄板に交差すると、薄板にうず電流（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、磁気圧力として次のように求められる⁽¹⁰⁾。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、穴部分に働く磁気圧力 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]

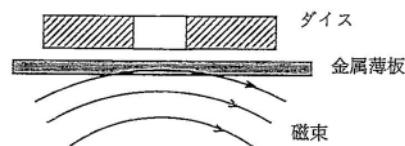


図1 穴あけ原理図（断面）

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. ソレノイドコイル L_S を用いた実験

3.1 実験装置

装置の概略を図2に示す。コンデンサ電源C-放電ギャップスイッチG-ソレノイドコイル L_S は、高密度の磁束を急激に発生させる放電回路である。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、薄板に電磁力が働く。

コンデンサ電源の容量C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。ダイス穴の形状は円で、その直径は $0.4\sim 16\text{mm}$ である。絶縁材として PET シートを使用した。

コイルに流れる電流波形を、ログスキーコイル、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2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。ダイスで打抜かれた部分が切り放された場合を、穴があいた状態とした。

3.2 実験結果

実験は、コイル-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、 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3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。振動電流波形の周期は、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。この電流波形は、ダイ

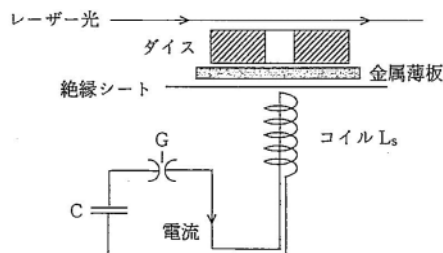


図2 実験装置概略 (コイル L_S 使用)

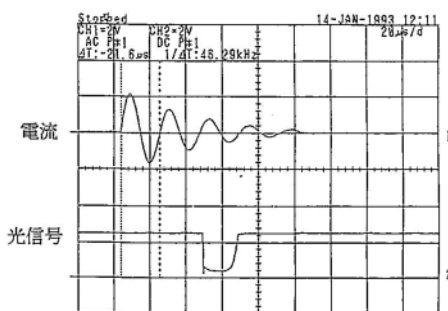


図3 観測波形例 (コイル L_S 使用) $20\mu\text{s}/\text{div}$

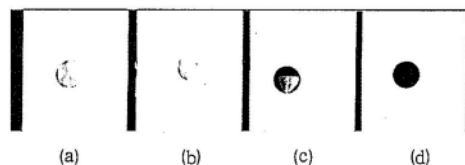


図4 穴あけ加工例 (コイル L_S 使用)

スおよび金属薄板の有無にほとんど影響されなかった。

光信号は、電流波形に対応して図3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、波形がこのようなに変化した。

(2) 穴あけ実験

穴あけ加工した Al 板の写真を図4に示す。図4(a)~(c)は充電エネルギー不足で穴あけできなかった例であり、図4(d)は穴あけされた場合である。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5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。さらに小径の穴あけは、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あけされるまでの時間は、光信号波形から推定された。この時間は充電エネルギーが

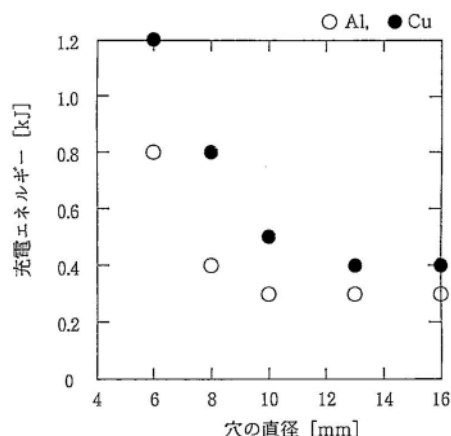


図5 穴あけに必要な最小充電エネルギー
コイル L_S 使用、内径 8mm 、長さ 40mm

増加すると短くなり、 $150 \sim 40 \mu\text{s}$ であった。

4. ワンターンコイル L_A を用いた実験

4.1 実験装置

装置の概略を図6に示す。コンデンサ電源C-放電ギャップスイッチG-平板状ワンターンコイル L_A は放電回路であり、図6(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付近に強い磁界が発生する。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6(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 $12 \mu\text{F}$ である。コイル L_A は銅製で、大きさ $200 \times 145 \text{ mm}$ 、厚さ 2 mm 、 $a_1 = 5 \text{ m}$ 、 $a_2 = 10 \text{ mm}$ であり、インダクタンスは、約 $0.02 \mu\text{H}$ である。コイルをのぞく放電回路のインダクタンスは、ソレノイドコイル L_S を用いた前実験と同じ約 $0.03 \mu\text{H}$ 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。

4.2 実験結果

実験は、コイル-板材間距離 l を約 0.15 mm 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、 0.1 kJ 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7に示す。電流最大値は、充電エネルギー 0.5 kJ のとき、約 110 kA 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 5 T となる。振動電流の周期は $4.9 \mu\text{s}$ であ

り、Cu板に対する表皮効果の深さ δ は、約 0.14 mm となる。このとき、式(1)から最大磁気圧力は、約 8 MPa と概算される。この電流波形は、金属薄板の有無に影響され、ダイスおよび金属薄板がない場合、振動電流の周期は $5.6 \mu\text{s}$ であった⁽⁴⁾。

〈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8のように变化した。厚さ 0.1 mm の金属薄板に対し直径 1 mm 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⁽⁴⁾。

電流が流れ始めてから穴あけされるまでの推定時間は、充電エネルギーが増えると短くなり、 $120 \sim 30 \mu\text{s}$ であった。

5. ワンターンコイル L_B を用いた実験

5.1 実験装置

装置の概略を図9に示す。コンデンサ電源C-放電ギャップスイッチG-平板状ワンターンコイル L_B は放電回路であり、図9(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

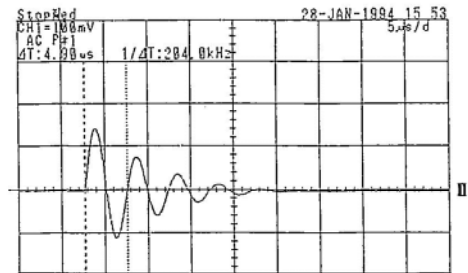


図7 電流波形例（コイル L_A 使用） $5 \mu\text{s}/\text{div}$

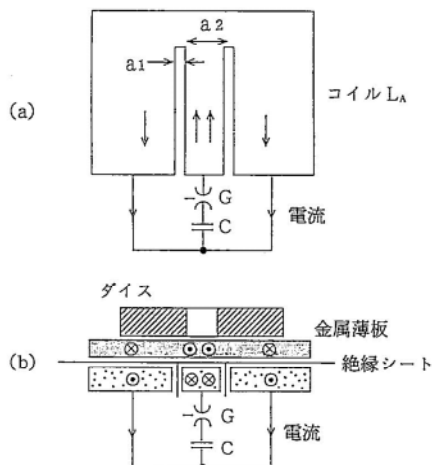


図6 実験装置概略（コイル L_A 使用）

(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

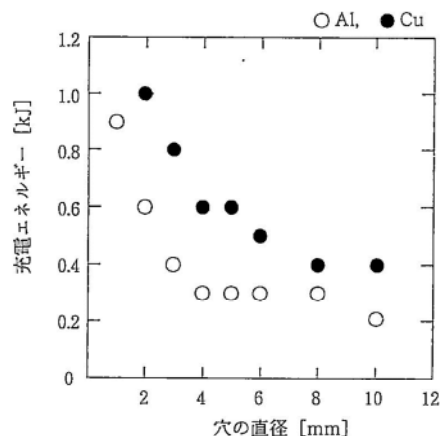


図8 穴あけに必要な最小充電エネルギー
コイル L_A 使用、 $a_2 = 10 \text{ mm}$

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9(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 200×145 mm、厚さ2 mm、 $b_1 = 23$ mm、 $b_2 = 5, 10$ mm、 $b_3 = 25$ mmである。コイルのインダクタンスは、 $b_2 = 5$ mmの場合、約0.01 μ Hである。その他については、前実験と同様である。

5.2 実験結果

実験は、コイル-板材間距離 l を約0.15 mmとし、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、穴直径1 mm以上の穴をあける場合0.1 kJごとに变化させ、穴直径0.8 mm以下の穴をあける場合0.025 kJごとに变化させた。

(1) 電流波形

穴あけの際、中央幅 $b_2 = 10$ mmのコイルに流れる典型的な電流波形を図10に示す。電流最大値は、充電エネルギーが0.5 kJのとき約118 kAであり、コイル中央部表面での磁束密度は、約5 Tであった。このとき、Cu板に対する磁気圧力は、式(1)から約9 MPaと概算される。ただし、中央の幅が狭い $b_2 = 5$ mmのコイルに電流を流す場合、充電エネルギーが0.5 kJのときでも、磁束密度は約8 Tとなり、磁気圧力は約20 MPaとなる。

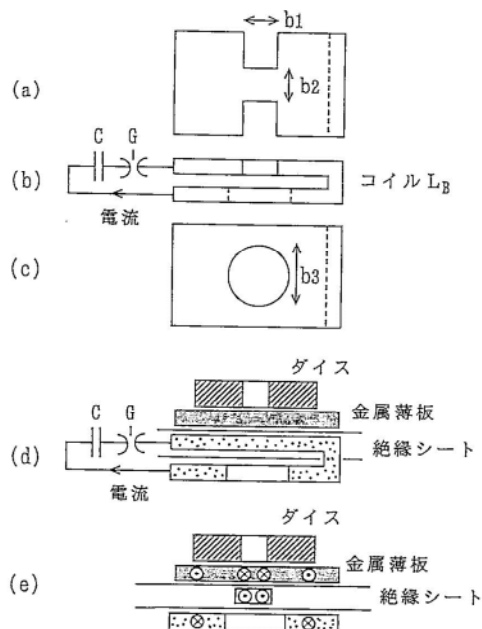


図9 実験装置概略 (コイル L_B 使用)

(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

(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11のように変化した。厚さ0.1 mmの金属薄板に対し直径1 mmまでの穴あけができた。この結果は図8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12のようになった。コイル中央幅 b_2 を5 mm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1 mm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13のように変化した。直径0.4 mm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1 mm以下を穴あけすると、穴付近の金属が部分的に溶解することがあった。

電流が流れ始めてから穴あけされるまでの推定時間は、充電エネルギーが増加すると短くなり、60~20 μ sであった。

(3) 加工例

金属薄板に小径の穴をあけたときの加工例を図14に示す。黒いところが穴あけされている。写真下部の目盛りの間隔は1 mmである。穴あけし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加工

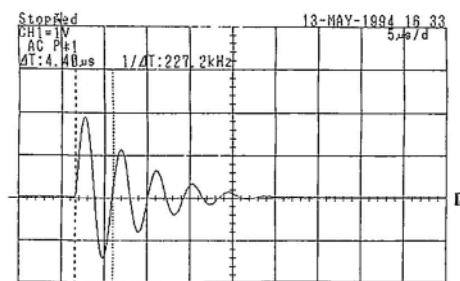


図10 電流波形例 (コイル L_B 使用) 5 μ s/div

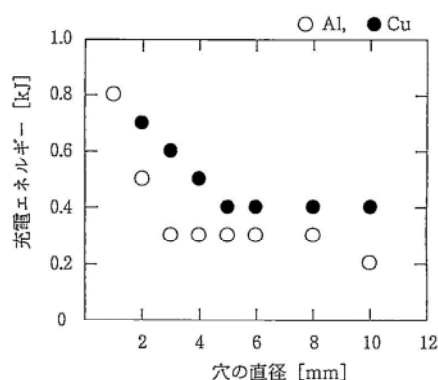


図11 穴あけに必要な最小充電エネルギー
コイル L_B 使用, $b_2 = 10$ mm

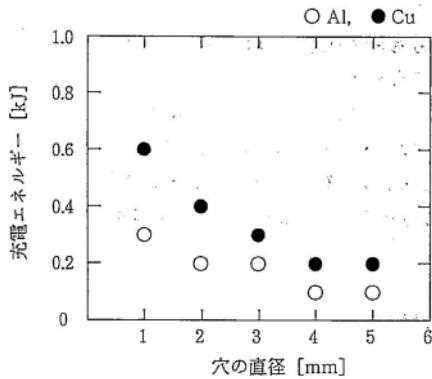


図12 穴あけに必要な最小充電エネルギー
コイル L_B 使用, $b_2=5$ mm, 穴径 > 1 mm

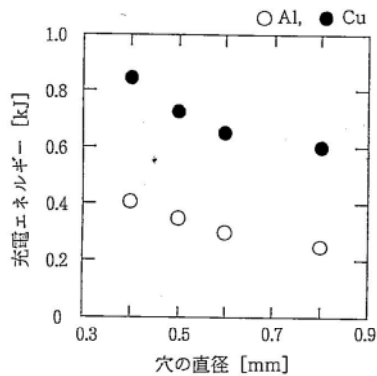


図13 穴あけに必要な最小充電エネルギー
コイル L_B 使用, $b_2=5$ mm, 穴径 < 1 mm

であった。コイル側の穴周囲は、比較的に滑らかな切り口であった。

6. 直接通電方式を用いた実験

6.1 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15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。コンデンサ電源の容量Cは1600 μ 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⁽⁶⁾⁽⁸⁾⁽¹²⁾。ダイスには、できるかぎり放電電流が流れないように処置してある。金属薄板の板幅は40 mm、長さは約100 mmである。その他はこれまでの実験と同様である。

6.2 実験結果

実験は、通電用導体—板材間距離を約0.15 mm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

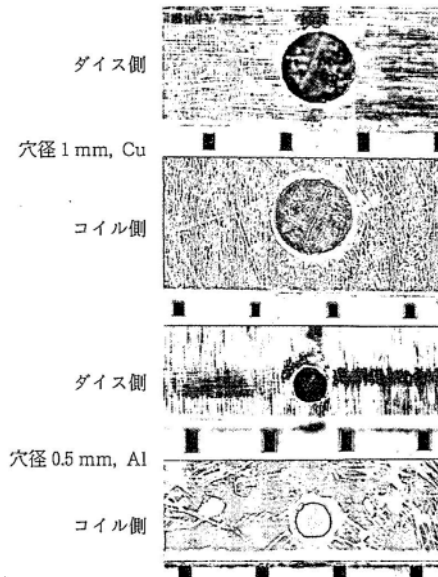


図14 穴あけ加工例（コイル L_B 使用）

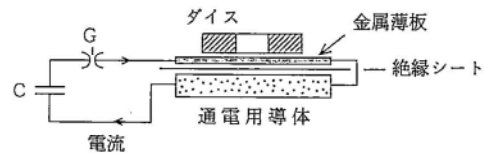


図15 実験装置概略（直接通電方式、断面）

どを変えて行われた。電源エネルギーについては、0.1 kJ ごとに変化させた。

〈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16に示す。最大電流値は、充電エネルギー0.5 kJ、通電用導体幅20 mmのとき、約150 kAであった。最大磁束密度は約7 Tとなる。

〈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17のように変化した。結果は通電用導体幅に大きく依存した。厚さ0.1 mmの薄板に対し直径2~16 mmまでの穴あけができた。板厚、板材質への依存性⁽⁶⁾、穴あけ精度⁽⁸⁾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推定時間は、充電エネルギーが増えると短くなり、70~30 μ sであった。

7. まとめ

電磁力を利用して厚さ0.1 mmのAl, Cu板に穴をあける実験を行った。ソレノイドコイル L_S 、平板状ワ

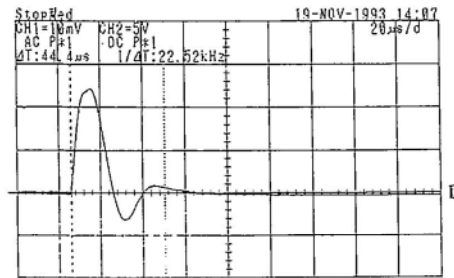
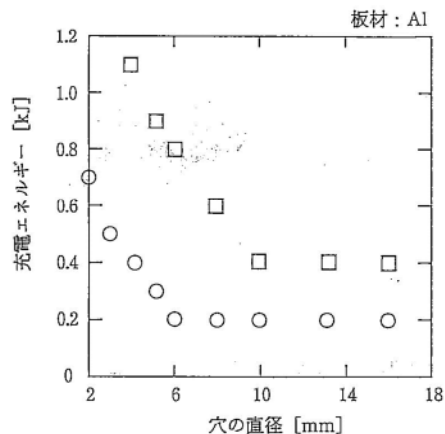


図16 電流波形例(直接通電方式) 20 μs/div

図17 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: ○20 mm, □60 mm

ターンコイル L_A , L_B および直接通電方式を用いる場合について調べた。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 μs)で穴あけできる。
- (2) ソレノイドコイル L_S を用い, 直径 5 mm 以下の穴をあけるのは困難である。
- (3) 平板状ワントーンコイル L_A を使用すれば, 直径 1 mm までの穴あけ加工が容易にできる。
- (4) 平板状ワントーンコイル L_B を用いれば, 直径 0.4 mm までの穴あけ加工ができる。
- (5) 直径数 mm 以下の穴をあける場合, ソレノイドコイル L_S に比べ, ワントーンコイル L_A , L_B が適している。この理由は主に, コイル-金属薄板間の電磁結合の違いによると考えられ, コイルを 1 次側回路, うず電流が流れる金属薄板を 2 次側回路としたとき, 両者間の結合係数は, 平板状のワントーンコイルのほうが, 円筒状のソレノイドコイル

ルに比べて大きいと言える。

- (6) 電流を金属薄板に直接通電しても, 直径 2 mm まで穴あけできる。

なお, 平板状ワントーンコイル L_B を用いて, 幅 0.3 mm までのスリット状穴あけ加工⁽¹³⁾, フレキシブルプリント配線基板に対し直径 1 mm までの穴あけ加工^{(10)~(17)}なども可能である。これらについては別の機会に報告したい。

謝 辞

本研究を進めるにあたり, 有益な助言をしてくださった電気通信大学 村田眞助教授, ご支援, ご協力くださった本校, 吉川幸宏校長, 前田治教授, 岡川啓悟教授, 吉沢昌純助教授ほかの皆さんに深く感謝いたします。本研究の一部を卒業研究として行った長野敏明君は「電磁力を利用した穴あけ加工」なるテーマで, '95 先端技術学生論文(日本工業新聞社主催)に応募して入賞した。同君をはじめ実験を行った学生諸君にも感謝いたします。

なお, 本研究は天田金属加工機械技術振興財団の研究助成金および東京都研究奨励費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 EMD92-71 (1992).
- (5) 相沢: 電子情報通信学会技術報告 EMD93-55 (1993).
- (6) 相沢, 前田, 朱: 電子情報通信学会技術報告 EMD 93-79 (1994).
- (7) 相沢, 長野, 皆川: 電子情報通信学会技術報告 EMD 94-42 (1994).
- (8) 張, 村田, 相沢, 鈴木: 機械学会論文集 C, 62-599 (1996), 2873.
- (9) 相沢: 塑性と加工, 38-438 (1997), 621.
- (10) 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.
- (11) 相沢, 石川: 平 6 塑性加工春季講演会論文集, (1994), 357.
- (12) 相沢: 論文集高専教育 18 号, (1995), 134.
- (13) 相沢, 羽賀, 池上: 47 回塑性加工連合講演会論文集, (1996), 333.
- (14) 相沢: 電子情報通信学会技術報告 EMD97-15 (1997).
- (15) 相沢: 高圧ガス, 33-2 (1996), 4.
- (16) 相沢, 岡川, 羽賀: 平 9 電気学会全国大会講演論文集 1, (1997), 101.
- (17) 相沢, 岡川, 池上: 平 9 塑性加工春季講演会論文集, (1997), 417.