

電磁圧力による極薄金属板の穴あけ加工

東京都立工業高等専門学校 電気工学科

教授 相沢友勝

(平成4年度研究開発助成 AF-92005)

1. 研究の背景と目的

フレキシブル基板を利用した電子回路部品など軽薄化した高精度金属箔製品の使用が広まるにつれ、極薄金属板の穴あけ技術が重要となる。従来の加工法では、板厚が薄くなると、いろいろ難点が生じる。例えば、厚さが極めて薄くなると、型（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。型を用いない非せん断加工法としてレーザ加工なども採用されているが、生産性、費用の点に問題がある。現在のせん断加工技術がそのまま使えれば好都合である。

このような状況のなかで、本研究では電磁圧力を利用したポンチ不要の高速穴あけ法に着目した。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打ち抜き技術の問題点の多くは、解決する。電磁エネルギーを直接利用するので、エネルギー制御、自動化、生産ライン化も容易である。

本研究の目的は、電磁圧力を利用して極薄金属板に対する穴あけ加工を行い、その特徴および加工限界を明らかにすることである。

2. 穴あけ原理

電磁圧力で金属薄板に穴をあける典型的な原理を図1に示す。図1にはダイス、金属薄板および磁力線（磁束密度 B ）の断面が示されている。磁束密度 B の強い磁束が、図1のように金属薄板の下側で急激に発生し、金属薄板（導電率 κ ）に鎖交すると、薄板にうず電流 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。ここで、電流 i は、 $\text{rot } i = -\kappa (\partial B / \partial t)$ から定まる。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。

磁束が正弦的に変化する角周波数を ω とすると、磁界の金属薄板に対する表皮効果の深さ δ は一般的に、

$$\delta = (2 / \omega \kappa \mu)^{1/2}$$

と表される。ただし、 μ は金属板の透磁率である。深さ δ が板厚に比べ小さい場合、電磁力は金属薄板の下側表面部分に集中して働き、大きな力となる。逆に、 δ が板厚に比べ大きすぎる場合、磁束は大部分が金属薄板を通り抜けてしまうので、電磁力は比較的弱くなる。

以下の実験A～Dでは、大きな密度の磁束を急激に発生させるのに高電圧のコンデンサ放電装置を使用する。

3. 実験A

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-円筒状コイルLは放電回路である。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鎖交し、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、外径 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。コイルの外側はエポキシ樹脂、コンクリート、鋼鉄で固定された。金属薄板の材質はアルミニウム (A1050)、銅 (C1100)、厚さは 0.1mm などであり、これを熱処理せずに使用した。ダイスの材質はS45C、SK3、穴形状は円などで、その直径は $0.4 \sim 20\text{mm}$ 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はロゴスキーコイル、サーチコイル、積分器、オシロスコープなどを使用してシールド室内で観測された。

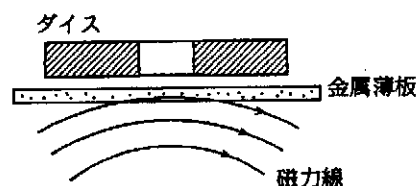


図1 穴あけ原理図

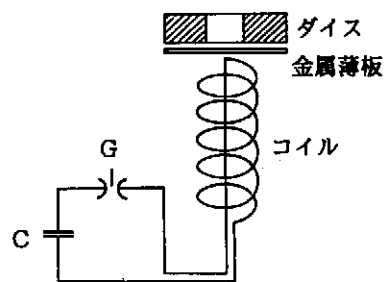


図2 実験A 装置概念図

3.2 実験結果^[1,2]

実験は、コイル-板材間距離を約0.5mm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。電源エネルギーについては、0.1kJ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3に示す。電流の最大値は充電エネルギー1kJのとき、約40kAであった。コイル端面での最大磁束密度は、約15Tとなる。この振動電流の周期は約20 μ sであり、Al板に対する表皮効果の深さ δ は、約0.4mmである。

(2) 穴あけ時間

放電電流が流れてから穴があくまでの時間は、40~160 μ sであり、充電エネルギーを大きくすると、短くなった。

(3) 穴あけに必要なエネルギー

円形の穴あけ加工に必要な最小充電エネルギーは、穴径に対して図4のように変化した。厚さ0.1mmのAlおよびCu板に6~20mmの穴あけができた。このエネルギーは、板厚、穴形状、コイル-板材間距離、コイル内径、コンデンサ容量にも依存した^[1]。しかし、これらの条件を変えても、直径4mm以下の穴あけは困難であった。主な理由は次のとおりである。

- ・大きなエネルギーで実験すると、コイルが破損する。
- ・コイルと金属薄板間の磁氣的結合が弱い。

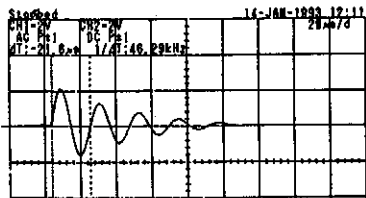


図3 実験A 電流波形例 20 μ s/div.

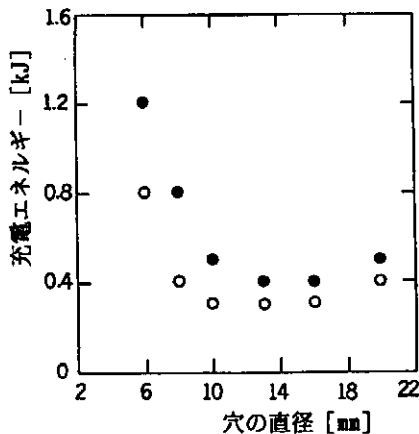


図4 穴あけに必要な最小充電エネルギー (A)
○Al, ●Cu, 板厚0.1mm, コイル内径8mm

4. 実験B

4.1 実験装置

装置の概略を図5に示す。コンデンサ電源C-放電ギャップスイッチG-平面状ワンターンコイルLは放電回路であり、図5 (a) にコイル正面図、(b) にダイス、金属薄板、コイルの断面が示されている。コイルL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鎖交する。薄板中央部のうず電流は、図5 (b) 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は、銅製で大きさ200 \times 145mm、厚さ

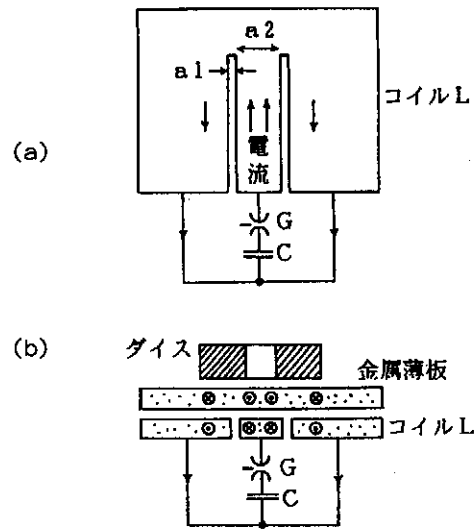


図5 実験B 装置概念図

- (a) コイル正面図および放電回路,
(b) コイル, 金属, 薄板, ダイス断面図および放電回路

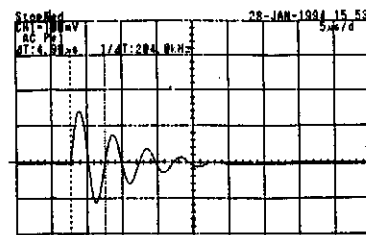


図6 実験B 電流波形例 5 μ s/div.

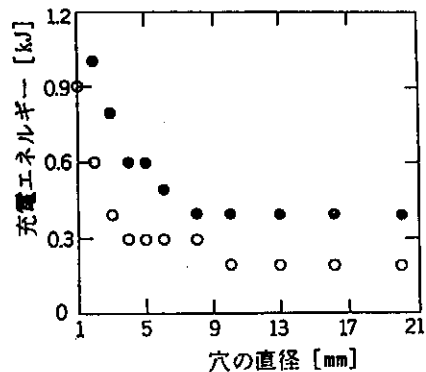


図7 穴あけに必要な最小充電エネルギー (B)
○Al, ●Cu, 板厚0.1mm, a1 = 5mm, a2 = 10mm

2mm, $a_1 = 5\text{mm}$, $a_2 = 10\text{mm}$ などである。その他の実験装置は実験Aの場合と同様である。

4.2 実験結果^[3]

実験は、コイル-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6に示す。電流の最大値は、コンデンサC ($12\mu\text{F}$)の充電エネルギー0.5kJのとき、約110kAであった。コイル中央部表面での最大磁束密度は、約7T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は、約0.15mmである。

(2) 穴あけに必要なエネルギー

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7のように变化した。、厚さ0.1mmの薄板に対し直径1~20mmまでの穴あけができた。この最小充電エネルギーは、板厚およびコイル-板材間距離にも依存した。、また、コイルの中央幅 a_2 を狭くすると、小径の穴を効率よくあけることができた。

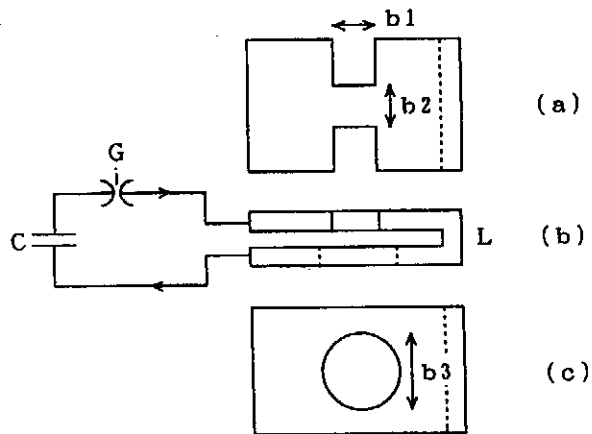


図8 実験C 装置概念図

(a) コイル正面図、(b) コイル側面図および放電回路、(c) コイル背面図、(d) ダイス、金属薄板、コイル中央部の電流方向断面図および放電回路、(e) ダイス、金属薄板、コイル中央部の電流に垂直方向断面図

5. 実験C

5.1 実験装置

装置の概略を図8に示す。コンデンサ電源C-放電スイッチG-平面状ワンターンコイルLは放電回路であり、図8 (a)にコイル正面図、(b)にコイル側面図および放電回路、(c)にコイル背面図、(d)にダイス、金属薄板、コイル中央部の電流方向断面図および放電回路、(e)にはダイス、金属薄板、コイル中央部の電流に垂直方向断面図が示されている。コイルL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鎖交する。薄板中央部のうず電流は、図8 (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は銅製で大きさ $200 \times 145\text{mm}$ 、厚さ2mm、 $b_1 = 23$ 、 $b_2 = 5$, 10mm、 $b_3 = 25\text{mm}$ である。その他の実験装置は実験A、Bの場合と同様である。

5.2 実験結果

実験は、コイル-板材間距離を約0.15mmとし、電源の充電エネルギー、ダイスの穴径などを変えて行われた。電源エネルギーについては、穴直径1mm以上の実験では、0.1kJごとに、穴直径0.8mm以下では、約0.01kJ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9に示す。実験Bの場合とほぼ同様の波形であった。

(2) 穴あけに必要なエネルギー

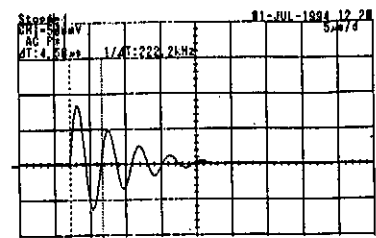


図9 実験C 電流波形例 $5\mu\text{s}/\text{div}$.

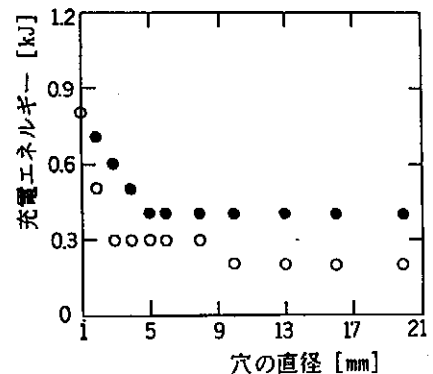


図10 穴あけに必要な最小充電エネルギー (C1)
○Al, ●Cu, 板厚0.1mm, $b_1 = 23\text{mm}$,
 $b_2 = 10\text{mm}$, $b_3 = 25\text{mm}$

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10のように変化した。厚さ0.1mmの薄板に対し直径1~20mmまでの穴あけができた。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11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5mm幅のコイルを使用した小径の穴あけは、今回の実験A、B、Cのなかでエネルギー効率が最も良かった。このコイルを使用し、直径1mm未満の穴をあけるのに最適な充電エネルギーは、穴径に対して図12のように変化した。厚さ0.1mmの薄板に対し直径0.4mmまでの穴あけができた。ここで、大きすぎるエネルギーで穴あけすると、穴部分の金属が部分的に溶解することがあった。

(3) 穴あけ加工例

金属薄板に小径の穴をあけたときの写真例を図13に示す。写真下部の目盛りの間隔は1mmである。写真の表および裏側は、穴あけした金属薄板のダイス側およびコイル側の面である。表の穴周囲は、裏に比べて鋭い角度でせん断されていた。見ためでは、カエリ（バリ）のほとんどない良好な加工であった。裏の穴周囲は、ダレが大部分を占めるようにせん断され、表に比べ滑らかな切り口であった。

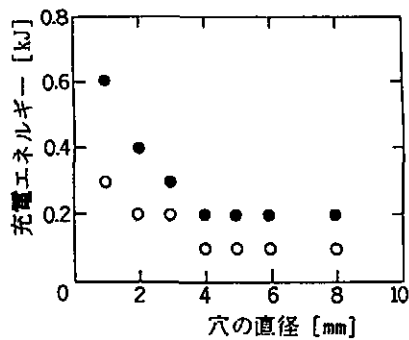


図11 穴あけに必要な最小充電エネルギー (C2)
○Al, ●Cu, 板厚0.1mm, $b_1 = 23$ mm,
 $b_2 = 5$ mm, $b_3 = 25$ mm

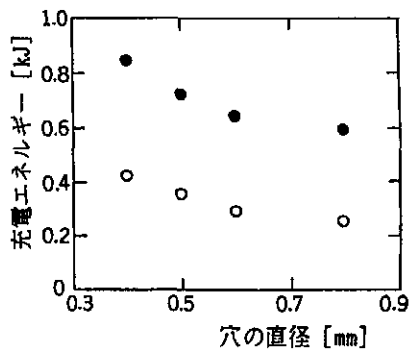


図12 穴あけに最適な最小充電エネルギー (C3)
○Al, ●Cu, 板厚0.1mm, $b_1 = 23$ mm,
 $b_2 = 5$ mm, $b_3 = 25$ mm

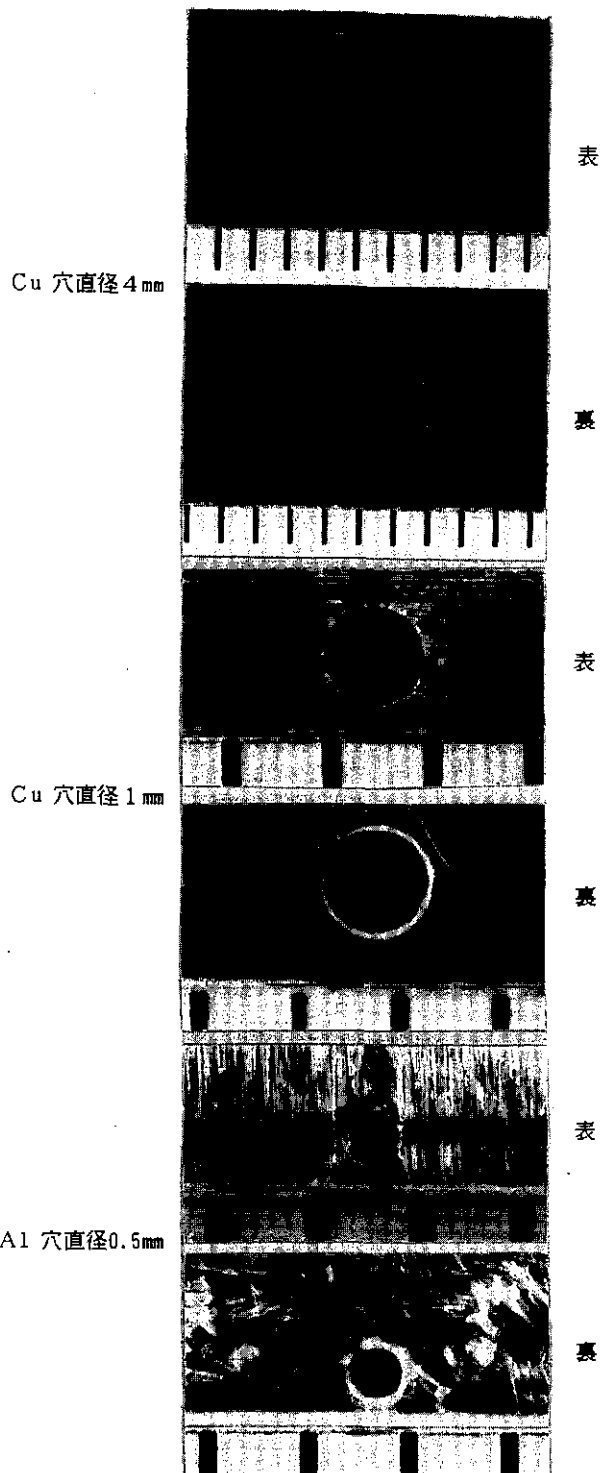


図13 穴あけ加工例

6. 実験D

6.1 実験装置

電磁圧力は、金属薄板に直接電流を流しても発生する。実験A～Cのようなコイルは使用しない。実験装置概念図を図14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、電磁圧力が働く。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。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40mm、長さは約100mmである。その他の実験装置は実験A～Cの場合と同様である。

6.2 実験結果^[4,5]

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15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。

(2) 穴あけ時間

薄板に放電電流が流れてから穴があくまでの時間は、30～90 μ sであり、充電エネルギーを大きくすると、短くなった。

(3) 穴あけに必要なエネルギー

穴あけするのに必要な最小充電エネルギーは、穴径に対

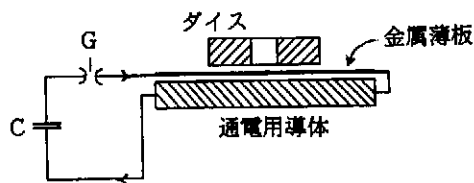


図14 実験D 装置概念図

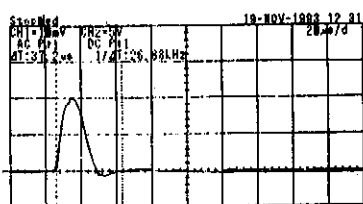


図15 実験D 電流波形例 20 μ s/div.

して図16のように变化した。、厚さ0.1mmの薄板に対し直径2～20mmまでの穴あけができた。結果は通電用導体幅に大きく依存している。板厚、板材質、穴形状への依存性^[4]、穴あけ精度^[7,8]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。

7. まとめ

電磁圧力により厚さ0.1mmのアルミニウムおよび銅薄板に穴あけする実験を行った。実験Aで円筒状コイルを、実験Bで中央を流れる電流が左右に分流するタイプの平面状ワンターンコイルを、実験Cで平面状往復電流を中央で集中、周回させるタイプの平面状ワンターンコイルを使用した。また、実験Dではコイルを用いず、金属薄板に直接電流を流して実験した。今回の研究開発で、電磁力による穴あけ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。

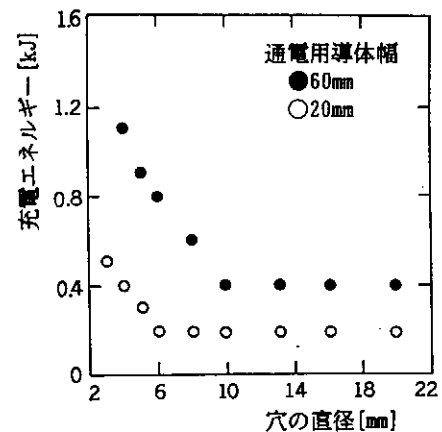
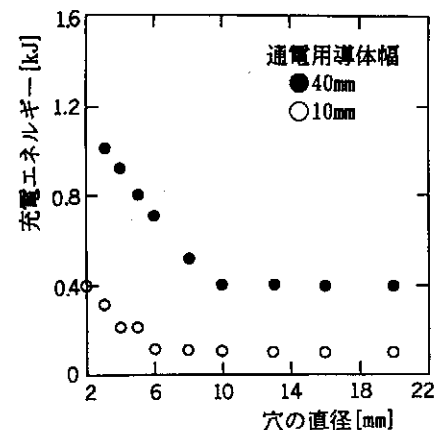


図16 穴あけに必要な最小充電エネルギー (D) Al, 板厚0.1mm

- (1) 円筒状コイルを使用して直径5~20mmまでの穴あけ加工ができる。
- (2) 本研究で開発した平面状ワンターンコイルを使用すれば、さらに直径0.4mmまでの穴あけ加工ができる。
- (3) 金属薄板に直接電流を流しても、直径2mmまで穴あけできる。
- (4) 穴あけに必要な電源エネルギーは1kJ以下である。
- (5) 数10 μ sの短時間で穴あけすることも可能である。
- (6) 見ためでは、カエリ（バリ）のほとんどない良好な穴あけ加工ができる。
- (7) 金属薄板に大きな電流を流しすぎると薄板の一部が溶解することがある。

平面状ワンターンコイルによる穴あけ性能が良い理由は、コイルと金属薄板間の磁気的な結合が強いためである^[3]。また、金属薄板の穴あけ位置へ局所的に強いうず電流を流せるからである。うず電流を局所的に集中して流すため、磁束制御板の使用も考えられる^[6]。今後、コイル、磁束制御板など装置を改良すれば、さらに小径の穴あけも可能である。実用化に向けてさらに研究を続けたい。

謝 辞

本研究を助成して下さった天田金属加工機械技術振興財団にお礼申しあげて報告を終わる。

参考文献（兼、発表論文）

- [1] 相沢：電磁力による金属薄板の穴あけ、電子通信情報学会技報 EMD 93-55 (1993)
- [2] 相沢、吉沢、小林：電磁力による金属薄板の穴あけ（第2報）平成5塑性加工春講論 531 (1993)
- [3] 相沢、石川：電磁力による金属薄板の穴あけ（第3報）、平成6塑性加工春講論 357 (1994)
- [4] 相沢、前田、朱：インパルス電流通電による金属薄板の穴あけ、電子通信情報学会技報 EMD 93-79 (1994)
- [5] 相沢、吉沢、前田、朱：インパルス電流通電による金属薄板の穴あけ、平成6電気学会全国大会講論2、31 (1994)
- [6] 相沢、岡川、大橋、清水：平面状ワンターンコイルを用いた金属薄板の電磁穴あけ、45回塑性加工連合講演会、451 (1994)

参考文献

- [7] 村田、相沢、鈴木：直接通電電磁成形による薄板の穴あけ加工に関する研究、平成3塑性加工春講論 203 (1991)
- [8] 村田、相沢、鈴木：電磁力による薄板材の穴あけ加工平成4塑性加工春講論 629 (1992)