

科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成 24 年 5 月 18 日現在

機関番号：17104

研究種目：基盤研究（C）

研究期間：2009～2011

課題番号：21560127

研究課題名（和文） プレス加工とエッチングを併用した多数列微細精密穴あけ技術の開発

研究課題名（英文） Development of Fine Multi-hole Piercing Process by Using Press Indenting and Chemical Etching

研究代表者

廣田 健治（HIROTA KENJI）

九州工業大学・大学院工学研究院・准教授

研究者番号：50273256

研究成果の概要（和文）：金属薄板に複数の圧痕を成形し裏面を化学的に除去して多数列の微細穴を加工する手法を提案し板厚 0.1mm の銅合金箔に対して加工精度を検証した。圧痕成形が干渉しない最小の隣接距離が存在し、それは丸穴よりスリット穴の方が大きくなった。その隣接距離以上であれば破断やバリ等の欠陥を生じることなく数十 μm 寸法の丸穴およびスリット穴を加工できた。また、圧痕成形よりエッチング量の誤差の方が穴の寸法精度への影響が大きいことが判明した。

研究成果の概要（英文）：A new micro piercing process was developed; after a deep indentation is formed on a sheet metal, the other side of the sheet is removed uniformly by chemical etching until the dissolution reaches the tip of indentation. In this study, multi-holes were pierced by the process and the influence of the hole-pitch on the accuracy of the adjacent holes was investigated. Experiments were carried out for a 0.1mm thick copper alloy sheet. By using conical and V-shaped indenters, circular and rectangular holes having tens of micrometers in size were successfully produced, respectively. The error of thickness reduction by etching was more influential on the dimensional accuracy of the hole than that of the indenting depth. The hole shape was distorted when the pitch between holes was below a specific threshold. The threshold pitch for rectangular holes was considerably larger than that for circular holes, which was explained by the metal flow during indenting.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2009年度	1,200,000	360,000	1,560,000
2010年度	1,300,000	390,000	1,690,000
2011年度	600,000	180,000	780,000
年度	0	0	0
年度	0	0	0
総計	3,100,000	930,000	4,030,000

研究分野：塑性加工，精密加工

科研費の分科・細目：分科：機械工学，細目：生産工学・加工学

キーワード：微細穴，プレス加工，塑性加工，エッチング，加工精度

1. 研究開始当初の背景

燃料噴射ノズルや濾過用フィルター等では直径数十 μm の多数列の微細な穴が求められ、穴の大きさや加工精度が機器の性能に

大きく影響する。微細穴加工技術に関しては国内外で様々な方法が用いられている。レーザー加工では波長の短いUVレーザーを用いて集束スポット径を絞ることで 20 μm 程

度の微細穴の加工が実現されている。放電加工や切削加工においても、微細寸法に特化した加工条件を見いだすことで数〜数十 μm 寸法の加工が実現されている。また、せん断加工についても微細放電加工により製作した金型により同程度の寸法の穴あけ加工が可能である。このうち、穴縁の加工精度に関して放電加工以外ではバリや破断、熔融痕などの欠陥が残る。一方、放電加工では生産性や加工コストの面で量産技術としての課題が残る。また、産業界からは量産性に優れるプレス加工による実現を望む声が多いが、上述の通り破断やバリが生じることが問題であり、その有効な対策は未だ見られない。

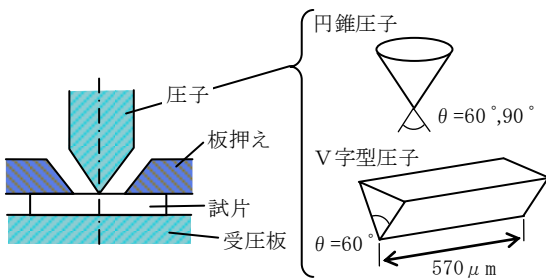
2. 研究の目的

申請者はプレス加工により板材表面に微細圧痕を成形し、その裏面を化学的に溶解除去して貫通させることで、圧痕の横断面形状に沿った微細な穴を破断、バリ等の欠陥を生じることなく加工する手法を開発している。本研究では、この手法により近接した多数の微細穴を高精度、且つ、効率的に加工しうる要件を明らかにすることを目的とする。

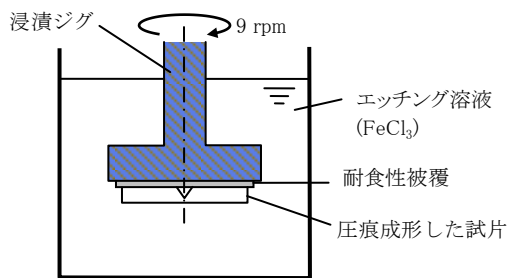
3. 研究の方法

(1) 試験片および圧子形状

被加工材には板厚 0.1mm のベリリウム銅箔を用い、直径 6mm の円形に加工して試験片とした。圧痕成形には円錐圧子（先端角 $\theta=60^\circ$ 、 90° ）および V 字型圧子（先端角 $\theta=60^\circ$ 、稜線長さ $570\mu\text{m}$ ）を用いた。いずれも頂部はダイヤモンド製で先端 R は約 $5\mu\text{m}$ である。これらの圧子により円形断面および矩形断面の圧痕を試験片に成形する。



(a) 圧痕成形工程



(b) エッチング工程

図 1 加工工程と加工条件

(2) 圧痕成形工程

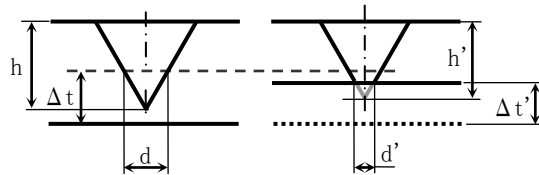
分解能 $2\mu\text{m}$ の電動アクチュエータを用いて卓上プレスを製作し圧痕成形に用いた。図 1(a)に加工工程と加工条件を示す。隣接距離 Δ を変化させて深さ $70\mu\text{m}$ の圧痕を逐次的に成形した。その後、圧痕側の表面を耐食性樹脂で覆ってから、裏面側をエッチングにより一様に除去した。

(3) エッチング工程

エッチングには工業用の塩化第二鉄液 (JIS K1447 第 1 種) を用い、湯煎により 40°C に保持した溶液に圧痕を成形した試片を図 1(b)のように下向きに浸漬し 9 rpm の水平回転を与えた。浸漬時間と板厚減少量から板厚方向の溶解速度は $4.2\mu\text{m}/\text{min}$ となり、浸漬時間により残留板厚を管理した。

(4) 加工精度の評価

穴の形状や欠陥の有無は SEM 観察により行った。穴の寸法精度に関しては図 2 に示す目標穴径と実際に得られた穴径を比較した。目標とする穴径、押込み量および溶解量を $d, h, \Delta t$ 、実際の押込み量、溶解量を $h', \Delta t'$ とする。ここで、 h' と $\Delta t'$ から幾何学的に求まる穴径を d' 、エッチング後に実測した穴径を d^* とする。 d' と d^* が同等になれば、図 2 のように幾何学的に加工穴の寸法が予測できると言える。



(a) 目標寸法 (b) 実際の寸法

図 2 穴の寸法精度の評価

(5) 隣接圧痕距離と圧痕の変形

圧痕間距離が小さくなると圧痕成形時の変形が干渉して、エッチング後の穴の形状精度が劣化する可能性があり、近接して加工しうる限界の隣接距離があると考えられる。この点に関して、三次元剛塑性有限要素解析により考察を行う。

4. 研究成果

(1) 丸穴の加工

① 隣接圧痕距離と圧痕の変形

圧痕の隣接間距離が近づくと図 3 のように先に成形された圧痕 (左) が後続圧痕 (右) に押されて変形することがわかった。隣接距離を変えて圧痕成形を行い、隣接方向 x とその直交方向 y で、先に成形された圧痕の直径をそれぞれ測定した。図 4 にその変化を示す。変化の現れる圧痕の縁間距離は圧子先端角によらず $40\sim 50\mu\text{m}$ 程度でほぼ等しい。また、どちらの圧子先端角でも圧痕の縁間距離が

10 μm となる隣接距離を最小としているが、その状態でも dy は変化しておらず、穴の縁だけが局所的に変形していると言える。

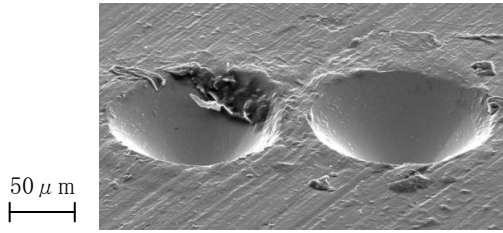


図3 圧痕近接時の変形

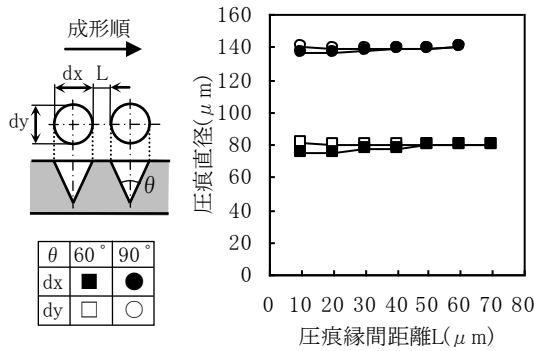


図4 圧痕の隣接距離と変形

② 寸法精度

それぞれの圧子先端角に対して隣接圧痕が変形しない縁間距離 $L=100\mu\text{m}$ および変形する縁間距離 $L=10\mu\text{m}$ で成形した圧痕群に対して、裏面側をエッチングして穴を加工した。図5に3. (4)で述べた3種類の圧痕径を示す。横軸は圧痕の識別番号で、(c)、(d)では最小隣接距離 $L=10\mu\text{m}$ で3個ずつ成形した6組の圧痕群を表している。 d' のプロットには圧痕近傍の溶解量のばらつきから予想される加工穴径のばらつきを表記しているが、実際の穴径 d^* は概ねその範囲に収まっている。

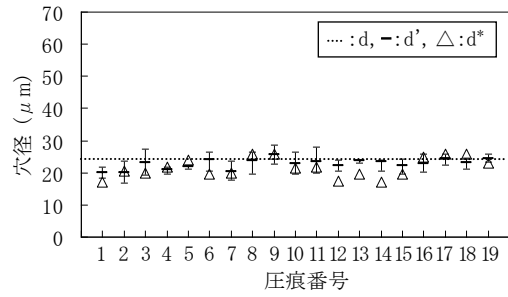
穴径のばらつきは圧子先端角が小さいほど小さいことがわかる。これは圧痕錐面の傾斜が緩やかなほど溶解量の誤差が径の誤差に影響しにくいためと考えられる。また、隣接距離による差は見られず、(c)、(d)のように隣接圧痕の一部が変形する程度まで近接させても、穴の寸法精度には差は見られない。このことから、隣接圧痕の変形の干渉は穴の形状を規定する圧痕の深い部分にまでは及んでおらず、穴縁が変形していても圧痕底部の横断面形状は維持されていると言える。

(2) スリット穴の加工

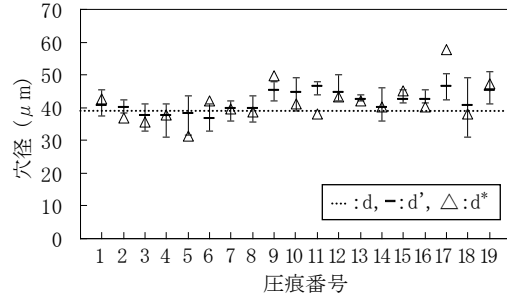
① 隣接圧痕距離と圧痕の変形

V字型圧子を用いた場合、圧痕間距離が近づくと図6の写真のように先に成形された圧痕の中央部の幅が狭くなるような変形が確認された。このため、圧痕間距離を変えて矩形圧痕の端部と中央部の幅を測定した。図6

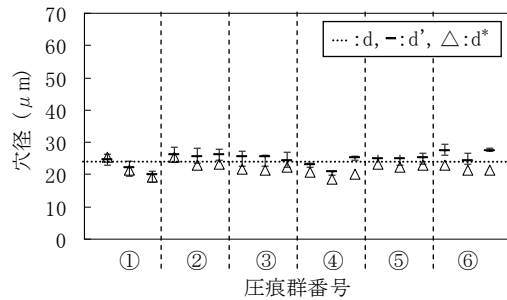
右側に縁間距離とスリット幅の変化を示す。円錐圧痕に比べ、隣接圧痕が変形し始める圧



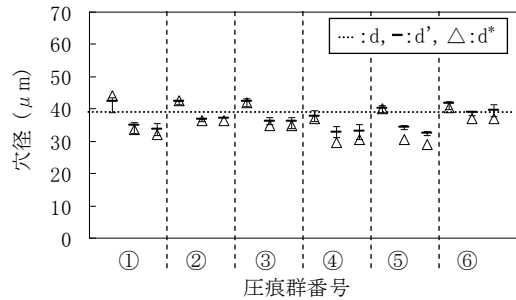
(a) $\theta=60^\circ, L=100\mu\text{m}$



(b) $\theta=90^\circ, L=100\mu\text{m}$



(c) $\theta=60^\circ, L=10\mu\text{m}$



(d) $\theta=90^\circ, L=10\mu\text{m}$

図5 圧子先端角、隣接距離と穴の寸法精度

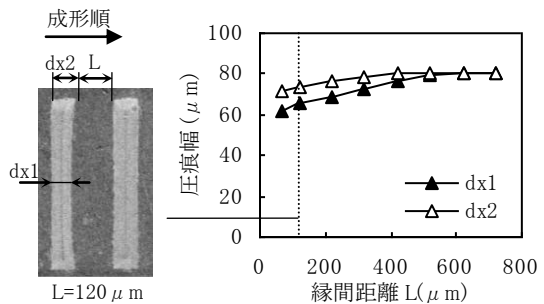


図6 V字型圧痕での隣接距離と圧痕の変形

痕間距離が大きいがわかる。また、圧痕の中央だけでなく端の寸法も小さくなっており、隣接圧痕の変形の影響が大きいことがうかがえる。

②寸法精度

図6の写真の縁間距離 ($L=120\mu\text{m}$) の条件で裏面側をエッチングしてスリット穴を加工した結果、エッチング後のスリット穴も中央部で幅が狭くなり圧痕上部の変形が圧痕底部にまで及んでいることがわかった。この点に関しては(3)で述べる。一方、圧痕が変形しなかった縁間距離 ($L\geq 520\mu\text{m}$) では良好なスリット穴が得られた。 $L=520\mu\text{m}$ で図5と同様にスリット穴の加工精度を整理した結果を図7に示す。ここで、 d 、 d^* 、 d' は図2の定義において丸穴の穴径をスリット中央部の幅 dx_1 に置き換えている。スリット幅は目標値をやや下回っているがばらつきは同じ圧子先端角 ($\theta=60^\circ$) における丸穴 (図5(a)、(c)) と同等であった。

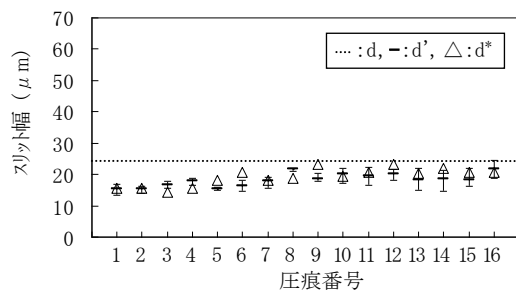


図7 スリット穴の寸法精度 ($L=520\mu\text{m}$)

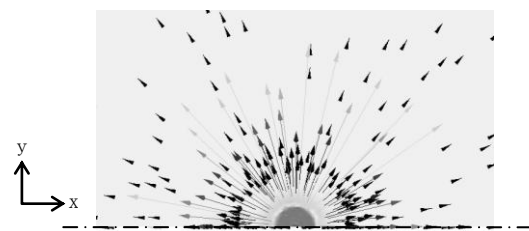
(3) 圧子形状と圧痕成形挙動

① 隣接圧痕の変形

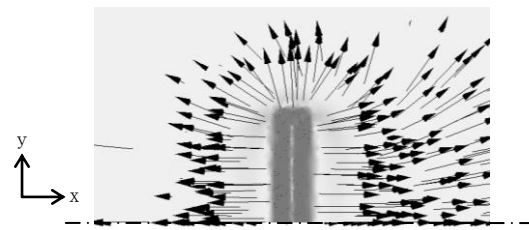
円錐圧子およびV字型圧子を用いて圧痕成形を行った場合の材料流動を三次元剛塑性有限要素解析により比較した。図8に両圧子による圧痕成形時の表面付近の材料流動を、また、図9には圧痕縁に変形が生じた近接距離で2つの圧痕を成形したときの断面形状を示す。円錐圧子では、図8(a)のように放射状に材料流動が生じ、x方向に後続の圧痕成形を行う場合には縁間距離は対称中心から外れるほど広がる。このため、最初に成形された圧痕は対称中心付近でのみ隣接方向に押されるだけで、図9(a)のようにその変形は局所的で圧痕底部にまでは及んでいない。

これに対しV字型圧子では、図8(b)のように長手方向に沿って縁間距離は一定であり、且つ、その範囲では一様にx方向への材料流動が生じている。このため、最初に成形された圧痕は後続の圧痕成形の際に広範囲にわたって隣接方向に剛体的に押し戻される。その結果、斜面全体が変形し図9(b)のように圧痕底部付近まで変形が及んだと考えられる。

図9(b)の解析結果において実験でエッチングが到達した板厚で切断することで擬似

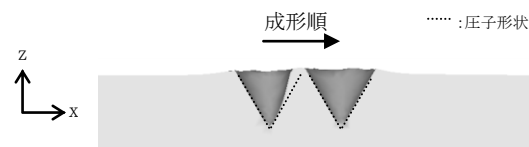


(a) 円錐圧子の場合

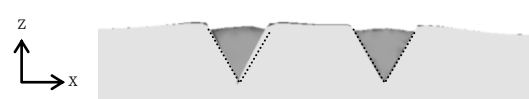


(b) V字型圧子の場合

図8 圧痕成形時の材料流動

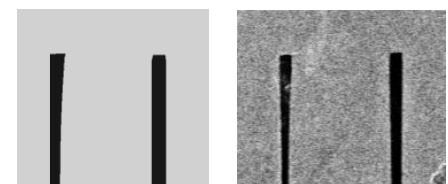


(a) 円錐圧子 (縁間距離 $L=10\mu\text{m}$)



(b) V字型圧子 (縁間距離 $L=120\mu\text{m}$)

図9 隣接圧痕の変形



(a) 解析結果

(b) 実験結果

図10 スリット穴形状の比較 ($L=120\mu\text{m}$)

的にエッチングによる溶解除去を再現した。図10(a)にその結果を示す。図7の圧痕の縁と同様にスリットの中央部が狭くなっており、実験で得られたスリット穴においても図10(b)のように同じ形状が現れていることがわかる。

② V字型圧子における改善策

V字型圧子では円錐圧子に比べて隣接圧痕が変形する限界の近接距離が数倍大きく、近接したスリット状の穴を加工することが難しい。この課題に対しては、圧子を同時に押し込むことで改善が見込まれる。W字型圧子を用いた場合の解析結果を図11に示す。W字型圧子中央の空隙部に盛り上がりが生じるが、圧痕の斜面部分の形状は圧子で拘束されている

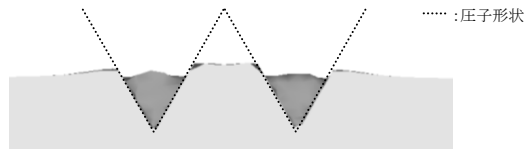


図 11 W 字型圧子による圧痕成形(解析結果)

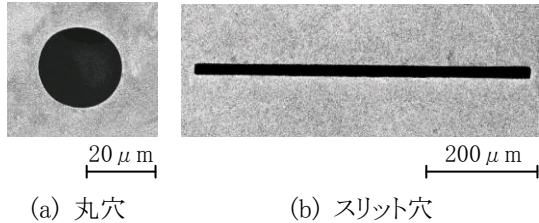


図 12 本方法で加工した穴の外観

ため維持される。実験で確認するには至っていないが、このような圧子を用いることでスリット穴の近接限界を向上させることが可能であると考えられる。

(4) 総括

本方法による特徴を他の競合技術と比較して整理する。

①加工精度

貫通工程にエッチングを用いることで穴縁にバリや破断面が生じることなく、プレスせん断加工や溶融をとまなう他の手法に比べて高精度な微細穴加工が可能となる。また、単純な丸穴だけでなく、非軸対称形状に対しても適用可能である。

②加工の容易さと加工効率

せん断加工では微細化とともに微小クリアランスが求められ金型製作が難しくなるが、本方法のプレス工程では型を嵌合させる必要がないため穴寸法が微細になっても金型製作が容易である。一方、エッチング工程では僅かな板厚を除去するのみであり、レジストへのパターンニング(露光、現像)も不要のため、通常の化学エッチング加工に比べて短時間、少工程で実現できる。

本方法では2工程を要するが、圧痕成形およびエッチングの工程は多数穴に対して同時に行えるため、フィルターなど多数の微細穴を要する部品に対して効率的な加工が可能であり、レーザーなど逐次的な加工となる競合技術に比べると有利である。

③課題

寸法精度に関して、エッチング工程での溶解量の誤差により目標値に対して穴寸法にばらつきが生じた。この点に関しては圧子先端部分に溶解量の誤差程度の平行部を設けることで対応可能であると考えられる。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計 1 件)

- ① Kenji Hirota, Hiroaki Cho, Accuracy of Micro Piercing Process Using Press Indenting and Chemical Etching, Steel Research International, 査読有、Vol.82, Special edition, 2011, pp.559-563

[学会発表] (計 3 件)

- ① 廣田 健治, 長 洋聡, コイニングとエッチングを併用した微細穴あけ精度に対する影響因子、第 60 回塑性加工連合講演会、2009 年 11 月 1 日、信州大学(長野)
- ② Kenji Hirota, Hiroaki Cho, Development of Micro Piercing Process Using Press Coining and Chemical Etching, International Forum on Micro Manufacturing 2010, 2010 年 10 月 21 日、長良川国際会議場(岐阜)
- ③ Kenji Hirota, Hiroaki Cho, Accuracy of Micro Piercing Process Using Press Indenting and Chemical Etching, The 10th International Conference on Technology of Plasticity, 2011 年 9 月 28 日、Eurogress Convention Center (Aachen, Germany)

6. 研究組織

(1) 研究代表者

廣田 健治 (HIROTA KENJI)

九州工業大学・大学院工学研究院・准教授
研究者番号：50273256