

マイクロプレス穴あけ加工における 適正クリアランスに関する研究

慶應義塾大学 理工学部 機械工学科

教授 三井公之

(平成 15 年度研究開発助成 AF-2003011)

キーワード：適正クリアランス，マイクロプレス加工，画像計測

1. 緒言

近年，さまざまな工業製品の小型化・軽量化が進められ，それらを構成する部品・デバイスの微細化・高品質化が求められている．微細部品における穴あけ加工は，プレス・放電・レーザ・エッチングなど，さまざまな加工方法によりおこなわれているが，塑性加工の一種であるプレス穴あけ加工は高い生産性と加工安定性を誇ることから，その適用分野は今後一層広がることが予想される．

プレス穴あけ加工の加工精度は，主として切り口面形状および寸法精度により評価される．加工精度に影響を及ぼす加工因子は，被加工材の材質，拘束条件，クリアランス，加工速度などが挙げられ，適正な加工条件を調査するため，現在までに数多くの研究^{1)~4)}がおこなわれてきた．しかし，これらの研究は板厚 0.5~3.0 mm 程度の被加工材を対象としたものがほとんどであり，電気・電子・精密機器の分野で使用されることの多い板厚数十 μm から 0.25 mm の被加工材と比較すると相当厚い．被加工材の粒径や工具刃先の丸みの影響から，薄板の穴あけを厚板の実験でシミュレートすることはできない⁵⁾という指摘もあり，現状では金属薄板における適正な加工条件は未解明であるといえる．

プレス穴あけ加工において最も重要な加工因子の一つであるクリアランスをパラメータとして実験をおこない，適正な加工条件を調査するためには，せん断輪郭全周にわたってクリアランスを一定に保つことが重要となる．

そこで本研究では，パンチとダイの中心軸の関係を高精度で測定する測定手法を考案し，その測定結果に基づき，パンチとダイの位置を制御する機構を開発した．また，開発した方法でクリアランス制御をおこなった後にプレス穴あけ加工をおこない，各種クリアランスにおける切り口面形状・寸法精度・せん断荷重を測定することで，金属薄板における適正なクリアランス条件を明らかにする．

2. プレス穴あけ機

2. 1 工具中心軸測定方法

パンチとダイの軸心を測定する際，接触をとまなう測定方法を選択すると，接触力によりその位置に微小変位が生じるおそれがある．そこで，本研究では以下に記す画像処理を利用した非接触式測定方法を用いることとした．

まず，図 1 に示すようにダイ下部にスペースを設け，プリズムおよび顕微鏡を接続した CCD カメラを配置することにより，全長 16 mm のダイの下側からダイ穴の奥にあるパンチ端面とダイ穴入口端面を撮像する．そして取得した画像に対して，市販の画像処理ソフトウェア(Adept 製 HexSight Vision Software)を使用して画像処理を施すことにより，パンチ・ダイそれぞれの軸心を測定する．

この方法による測定精度を確認するため，初期位置においてあらかじめパンチ・ダイ軸心位置を測定しておき，CCD カメラを市販の電動ステージを用いて 5 μm 移動させた際のパンチ・ダイ軸心位置の測定値と比較した．次いで，さらに CCD カメラを 3 μm 移動させパンチ・ダイ軸心位置の測定をおこない，初期位置から 5 μm 移動させた際の測定値と比較した．同様に順次 2, 1, 1, 1 μm と CCD カメラを移動させ，その都度，パンチ・ダイ軸心位置の測定をおこない，その直前の測定値と比較した．この一連の測定結果を表 1 に示す．なお，測定はそれぞれの位置で 10 回ずつおこない，その平均値を直前の位置からの変位

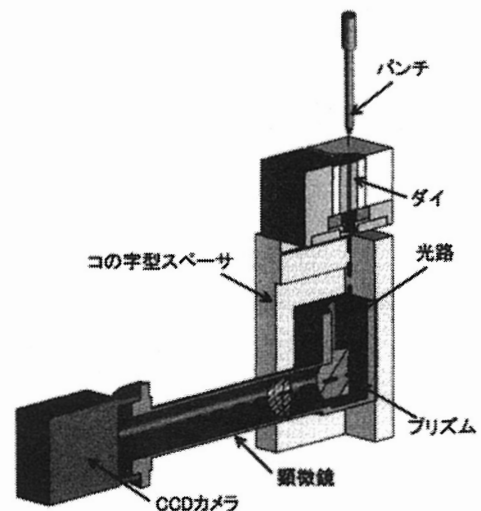


図 1 撮像方法

表 1 軸心位置測定精度評価

| CCD カメラ移動量(μm) | | 5 | 3 | 2 | 1 | 1 | 1 |
|-----------------------------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|
| 軸心位置変位(μm) | パンチ | 4.2 | 2.9 | 2.1 | 0.9 | 1.2 | 1.3 |
| | ダイ | 4.7 | 2.9 | 1.8 | 1.2 | 1.0 | 1.0 |

として記してある。

これより、工具軸心が CCD カメラに対して相対的に移動した際、その変位を $\pm 1 \mu\text{m}$ 以上の精度で測定できていることが確認できる。つまり、上記方法により、工具軸心位置をそれぞれ $\pm 1 \mu\text{m}$ 以上の精度で測定することが可能であるといえる。

2. 2 位置微調整機構

上記方法でパンチとダイの軸心を測定した結果に基づき、その位置を調整するための機構が必要となる。後記するが、本プレス穴あけ機ではパンチが鉛直方向に動作するため、この位置を水平方向に調整することは難しい。そこで、水平面内で直交する 2 軸方向に動作するステージ上にダイを固定することで、ダイの位置を微調整することとした。この際、最大 1000 N 程度のプレス荷重がステージにかかることになるが、この荷重に耐えることができ、さらに本研究室においてプレス穴あけ機を製作する上での種々の制約条件を満たす市販の微動ステージは見受けられないため、図 2 に示す X-Y 微動ステージを製作した。

圧電素子をアクチュエータとし、弾性ヒンジばね 4 つから構成される平行ばねにより、その微小変位を各方向に拡大させている。この機構により、ダイは X 方向に最大 $75.9 \mu\text{m}$ 、Y 方向に最大 $68.8 \mu\text{m}$ 微動可能となり、金属薄板のクリアランス制御をするために十分な移動量を確保することができた。

2. 3 プレス穴あけ機

開発した工具軸心測定方法および位置微調整機構を搭載したプレス穴あけ機を、図 3 に示す。ステッピングモータの回転運動をプーリおよびタイミングベルトを介してボールねじに伝えることで鉛直運動に変換し、これをパンチに伝えることにより、パンチを鉛直方向に動作させる。プーリによる減速比を調整することで最大プレス能力は変更可能であるが、現状では今回実験をおこなうにあたって十分な量である 1000 N 程度を最大プレス能力としている。ストリップにはパンチをガイドする役割と可動板押えの役割を持たせている。また、ダイ直下にフォースセンサを配置することで、せん断荷重の測定を可能としている。

なお、プレス穴あけ機の寸法は $405 \times 440 \times 340$ (H×W×D) であり、デスクトップに設置可能な大きさとなっ

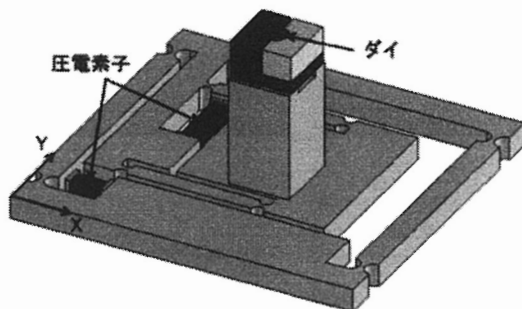


図 2 X-Y 微動ステージ

ている。

3. 実験方法

3. 1 加工条件

被加工材は板厚 0.2 mm で統一し、実際にせん断加工により製作される工業製品において使用されることが多いと考えられるりん青銅 (JIS C5191 H)、黄銅 (JIS C2801 1/4H)、アルミニウム (JIS A1050 H18) の 3 種類を選択した。工具には材質が粉末ハイス鋼の市販品を用い、パンチ外径を 1.000 mm に固定し、ダイ内径を $1.010 \sim 1.180 \text{ mm}$ の間で変化させた。クリアランス (片側) C は板厚を t 、パンチ外径を D_p 、ダイ内径を D_d とすると、次式で表される。

$$C = \frac{(D_d - D_p)/2}{t} \times 100 [\%t] \quad (3.1)$$

よって、クリアランスで表現するとプレス穴あけ加工は $2.5 \sim 45.0 \%t$ の間でおこなわれたことになる。また、ストリップによる板押え力は、最大せん断荷重の 20% 程度となるよう、図 3 に示したストリップ直上のスプリングを各被加工材に合わせて調整した。なお、加工速度は 1.00 mm/s 、加工温度は室温とし、さん幅はせん断製品の加工精度に影響を及ぼすことのないよう、送り・縁側とも 5.0 mm 以上を確保した。また、潤滑剤の流動・表面張力の影響によるパンチの心ずれのおそれ⁹⁾を避けるため、無潤滑の状態での加工をおこなった。

3. 2 測定方法

せん断加工製品の切り口面形状は主に、図 4 に示すように、だれ、せん断面、破断面、かえりから構成される。

本研究では、プレス穴あけ加工により得られた穴の切り口面形状を測定するため、レーザ顕微鏡および図 5 に示すマイクロ部品用形状・寸法測定装置⁷⁾ (以下、小型 3 次元測定機と表記する) を用いた。

レーザ顕微鏡では任意の直径の両端を撮像し、せん断輪郭に沿ってせん断面、破断面が極端なばらつきがなく一様に分布しているかを簡易的に測定、また、2 次せん断面の

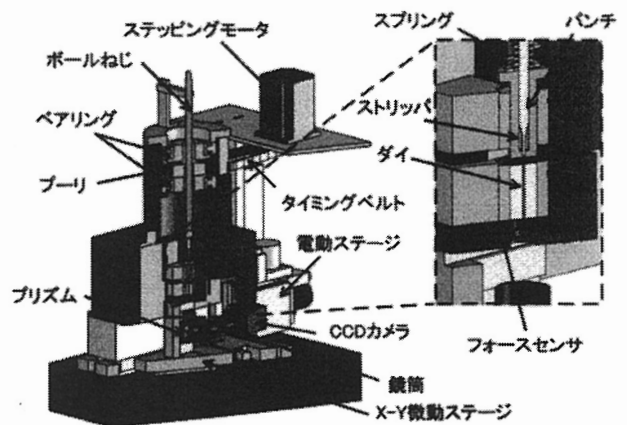


図 3 プレス穴あけ機 (断面図)

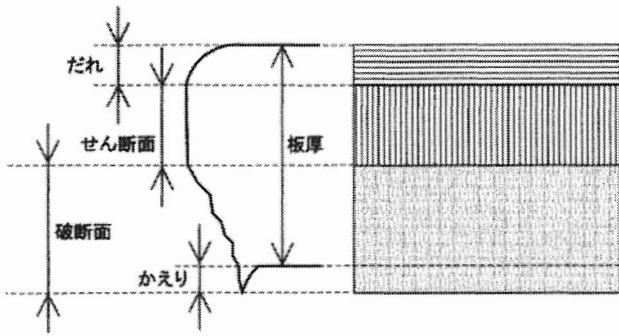


図4 せん断加工の切り口面形状

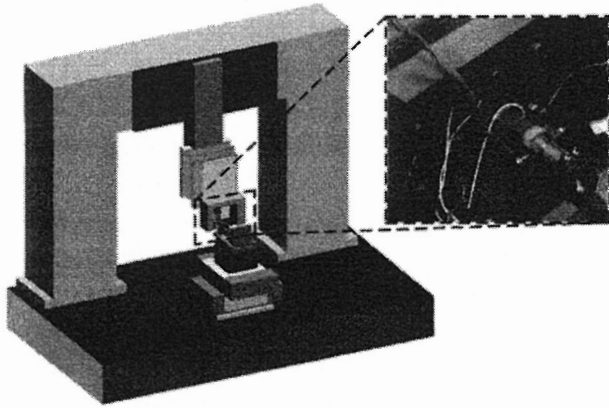


図5 小型3次元測定機

有無の確認に使用した。

一方、小型3次元測定機では任意の直径の両端にあたる切り口面を、図6に示すように板厚方向に $2\mu\text{m}$ 間隔で測定し、これを $25\mu\text{m}$ 間隔で5列ずつ測定した。それらの結果から列ごとにだれ、せん断面、破断面、かえりの板厚に占める割合を算出し、それぞれの平均値および標準偏差を求めた。

また、穴の寸法精度はだれ側に光源を用意し、加工された穴を通過した光をかえり側からCCDカメラを用いて撮像し、得られた画像を上記の画像処理ソフトウェアを用いて画像処理を施すことにより、直径の平均値と標準偏差を求めた。なお、あらかじめエドモンド・オブティクス・ジャパン株式会社製グリッド・ディストーション図票(商品コード46250-F)の公差 $\pm 2.5\mu\text{m}$ 以内の3種類の円を同様の方法でそれぞれ10個ずつ測定し、その平均値と 3σ を求めた。この結果を表2に示す。これより $\pm 1\mu\text{m}$ 程度の精度で直径が測定可能であることが確認できる。

せん断荷重については、上記のようにダイ直下に配置したフォースセンサの出力電圧を利用することにより測定した。

4. 実験結果

レーザー顕微鏡により撮像した穴の切り口面の代表例を図7~9に示す。これらより、せん断面、破断面はせん断輪郭に沿って極端なばらつきはなく、ほぼ一様に分布していることが確認でき、上記の工具中心軸測定方法および位置微調整機構が有効に働いていることが確認できる。また、

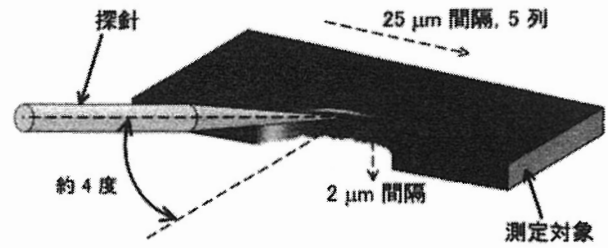
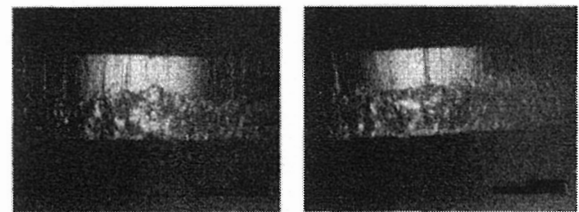


図6 測定方法

表2 直径測定精度評価

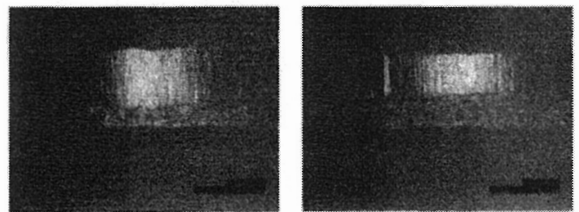
| 円 | カタログ値 (μm) | | 測定値 (μm) | |
|---|-------------------------|-----|-----------------------|-----------|
| | 直径 | 公差 | 平均値 | 3σ |
| A | 1000 | 2.5 | 999.7 | 0.5 |
| B | 500 | 2.5 | 500.2 | 1.1 |
| C | 250 | 2.5 | 249.8 | 0.9 |



(a) 5.0 %t

(b) 20.0 %t

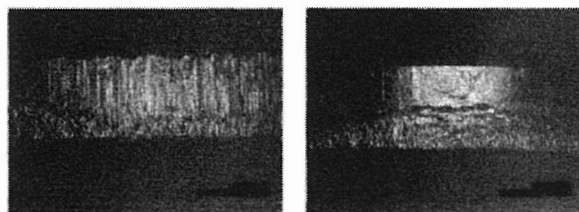
図7 レーザ顕微鏡撮像例 (C5191 H)



(a) 5.0 %t

(b) 20.0 %t

図8 レーザ顕微鏡撮像例 (C2801 1/4H)



(a) 5.0 %t

(b) 20.0 %t

図9 レーザ顕微鏡撮像例 (A1050 H18)

本実験をおこなった範囲内では、2次せん断面を生じた加工条件は見受けられなかった。

小型3次元測定機により得られた各加工条件における切り口面形状の測定結果を図10~12に示す。図中のプロットは各測定の平均値、エラーバーは標準偏差を示している。これらより、全体的な傾向として各被加工材とも、だれはクリアランスの増加にともない単調増加していることが、せん断面はクリアランス10%以下の領域において急激に減少していることが、かえりの発生は15%程度までは比較的安定していることが理解できる。

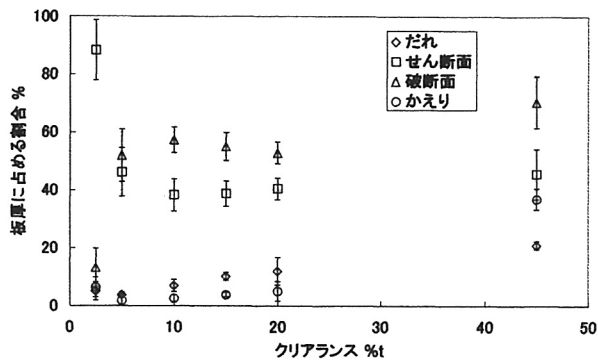


図 10 切り口面形状 (C5191 H)

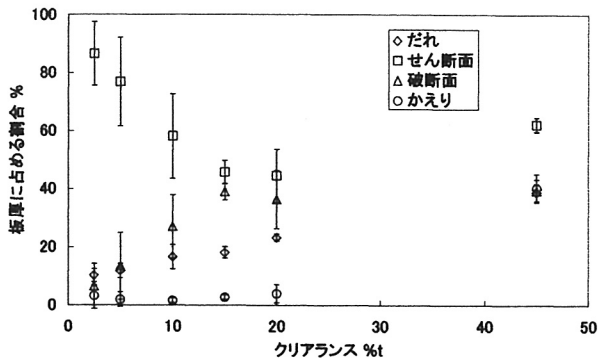


図 11 切り口面形状 (C2801 1/4H)

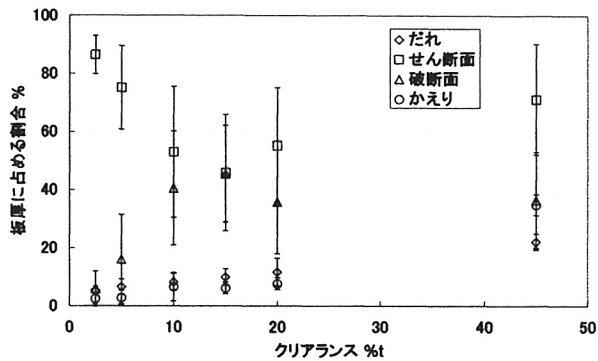


図 12 切り口面形状 (A1050 H18)

精機学会塑性加工専門委員会による板厚 1.6 mm の被加工材に対する実験報告¹⁾と比較すると、加工条件において違いがあるものの、切り口面形状の各部位の板厚に占める割合のクリアランスに対する変化の様子は、同様の傾向が表れていると考えられる。しかしながら、各クリアランスにおけるそれぞれの割合に着目すると、だれ、せん断面、かえりは板厚が薄い本研究の結果の方が大きくなる傾向があると考えられる。この要因の一つとして、各部位の形成に、板厚に対する工具刃先の丸みの大きさが関与していることが考えられる。

また、各部位の板厚に占める割合のばらつきについて着目すると、りん青銅、黄銅、アルミニウムの順にその割合が大きくなっていると判断できる。つまり、製品精度の安定性のみに着目すると、この 3 種の被加工材の中では、りん青銅が最もせん断加工に適した材料であるということがいえる。

画像処理により得られた各加工条件における穴の直径

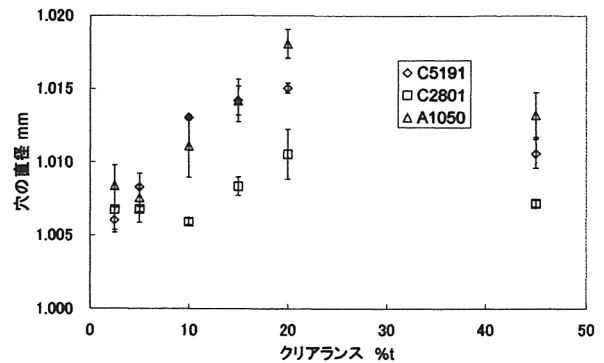


図 13 穴の直径

測定の結果を、図 13 に示す。図中のプロットは各測定の平均値、エラーバーは標準偏差を示している。これより、全体的な傾向として各被加工材とも、穴の直径はクリアランス 20 %t 程度まではクリアランスの増加にともない大きくなり、その後ある値を境に小さくなっていくものと判断できる。

切り口面形状と同様、精機学会塑性加工専門委員会による板厚 1.6 mm の被加工材に対する実験報告¹⁾と比較すると、こちらも同様の傾向が表れていると考えられる。しかし、本実験をおこなった範囲内では、すべての穴の直径はパンチ外径を上回り、精機学会塑性加工専門委員会による報告に存在した穴の直径がパンチ外径を下回るクリアランス領域は見受けられなかった。

次に、ダイ直下に配置したフォースセンサにより得られたせん断線図を図 14~16 に示す。なお、時間軸に対するサンプリング周波数は 512 Hz であり、同一加工条件において複数回穴あけ加工した際の、代表的な 1 例のみをそれぞれ示している。これらより、各加工条件におけるクラックの成長・会合の具合を判断すると、りん青銅 (C5191 H)、黄銅 (C2801 1/4H) ではクリアランス 5.0~15.0 %t 程度において、アルミニウム (A1050 H18) では 10.0~15.0 %t 程度において比較的スムーズにおこなわれていると見られる。なお、横軸に注目してせん断線図をみると、クラックの成長・会合はすべて 0.2 s 程度もしくはそれ以降の時間帯で生じていると判断できる。本研究では上記のとおり、被加工材の板厚は 0.2 mm、加工速度は 1.00 mm/s であるため、0.2 s 以降にクラックの成長・会合がおこなわれるとは考え難い。これは、切り口面形状の測定結果を見ても明らかである。今回せん断線図上でクラックの成長・会合はすべて 0.2 s 程度もしくはそれ以降の時間帯で生じてるように示されたのは、図 3 に示すステッピングモータの回転運動をボールねじに伝えるために用いたタイミングベルトが加工中に伸縮を生じてしまったことが主な原因であると考えている。

適正クリアランスは製品精度、加工安定性、生産コストなど、主眼を置く観点により異なる値を選択する方が妥当であると考えられる。このため一概に適正クリアランスを定めることは難しいが、上記の切り口面形状、寸法精度、クラックの成長・会合の具合を判断から総合的に判断する

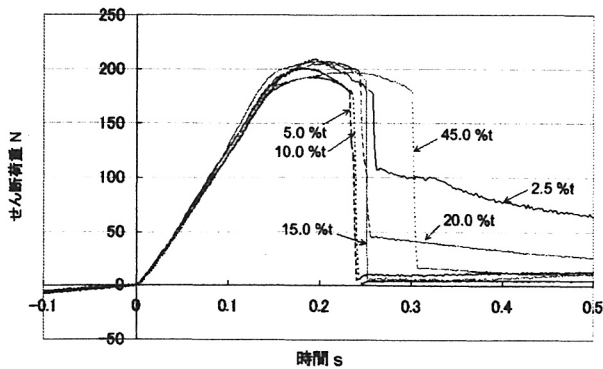


図 14 せん断線図 (C5191 H)

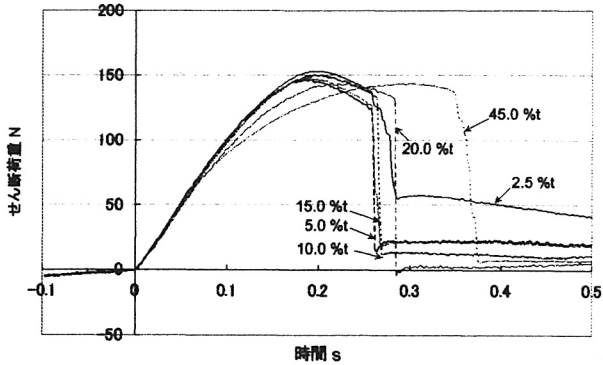


図 15 せん断線図 (C2801 1/4H)

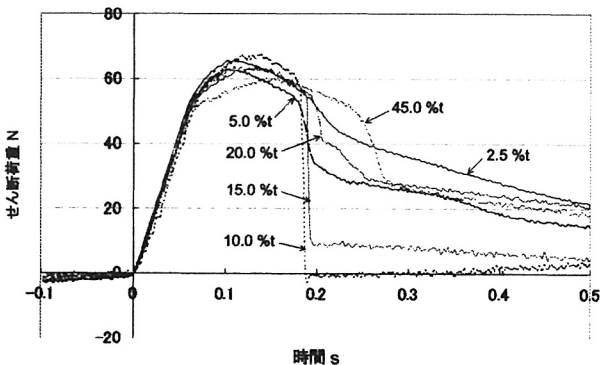


図 16 せん断線図 (A1050 H18)

と、りん青銅 (5191 H) についてはクリアランス 5.0～10.0 %t 程度、黄銅 (C2801 1/4H) についてはクリアランス 10.0 %t 前後、アルミニウム (A1050 H18) についてはクリアランス 10.0～15.0 %t 程度が、その範囲としてふさわしいと考えられる。なお、切り口面形状に関してはせん断面と破断面の割合が 50 % 付近⁴⁾、だれ、かえりが小さい、各部位のばらつきが小さいなどの観点から判断し、寸法精度に関してはパンチ外径に近い、ばらつきが小さいなどの観点から判断した。これまでりん青銅、黄銅、アルミニウム (硬質) の適正クリアランス (板厚 3 mm 以下) は、

それぞれ 6～10 %t とされており⁸⁾、金属薄板の適正なクリアランス条件は、この値とは多少異なる値をとる可能性のあることが本研究により示された。

5. 結言

本研究では、パンチとダイの中心軸の関係を高精度に測定する手法、およびその結果に基づき工具軸心位置を調整可能な機構を開発し、クリアランス制御をおこなった上で実験的に金属薄板における適正なクリアランス条件についての検討をおこなった。その結果、以下の結論を得た。

- ・ 全長 16 mm のダイ下側から工具端面を CCD カメラにより撮像し、得られた画像データに画像処理を施すことにより、工具軸心をそれぞれ $\pm 1 \mu\text{m}$ 以上の精度で測定する方法を確立した。
- ・ 圧電素子および弾性ヒンジばねを用いた X-Y 微動ステージを製作し、工具軸心測定方法とともにプレス穴あけ機に搭載することにより、クリアランス制御が可能なプレス穴あけ機を開発した。
- ・ クリアランス制御をおこなった後、穴あけ加工実験をおこない、切り口面形状、穴の直径、せん断荷重を調査・総合的に判断することで、3 種の金属薄板において適正と思われるクリアランスの範囲を示した。
- ・ 金属薄板と金属板での適正クリアランスは異なる可能性があることを示した。

なお、本研究は (財) 天田金属加工機械技術振興財団の研究開発助成を受けておこなわれたものであり、関係各位に深く感謝いたします。

参考文献

- 1) 精機学会塑性専門委員会：精密機械，25-11，(1959)，601.
- 2) 和田和夫，小松広之：塑性と加工，13-134，(1972)，898.
- 3) F.Faura, A.Garcia, M.Estremis：Journal of Materials Processing Technology，80/81，(1998)，121.
- 4) 坂田誠一郎，富田一男：溶接学会誌，69-3，(2000)，216.
- 5) 神馬敬，足立達也：塑性と加工，33-379，(1992)，898.
- 6) 森敏彦，中島邦彦：日本機械学会論文集 (C 編)，65-629，(1991)，369.
- 7) 白松和也，北野賢一，川田昌義，三井公之：日本機械学会論文集 (C 編)，68-673，(2002)，2783.
- 8) 型技術協会編：型技術便覧，(1989)，335，日刊工業新聞社