

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

三井 公之 木部 義幸

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行われているが,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には,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)}が行われてきた. しかしながら,これらの研究の多くは,板厚 0.5~3.0 mm 程度の被加工材を対象としており,電気・電子・精密機器の分野で近年使用されることの多い板厚数十 μm から 0.25 mm の被加工材を対象としたものは少ない. 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.

そこで本研究では,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金属薄板に対する穴あけ加工実験を行うこととする. クリアランスをパラメータとして加工精度を調査するためには,せん断輪郭に沿ってクリアランスを一定に保つことが重要となる. つまり,工具の位置を正確・精密に一致させる技術が必要となる. これまでに, WEDG⁶⁾や静電容量⁷⁾を用いた方法などが,そのための技術として開発されてきているが,本研究では,新たに画像処理を利用した方法を考案し,試作したプレス穴あけ機にこれを組み込んだ. そして工具位置合わせを $\pm 2 \mu\text{m}$ 以上の精度で行った上でプレス穴あけ加工を行い,得られた切り口面形状,穴直径の評価を行った.

2. 工具位置合わせ方法

2. 1 クリアランス

プレス穴あけ加工における工具の位置関係を模式的に示したものが図 1 である. クリアランス C とは工具間の距離を表し,一般的に被加工材の板厚に対する量として次式で表される.

$$C = \frac{(D_d - D_p)/2}{t} \times 100 [\%t] \quad (1)$$

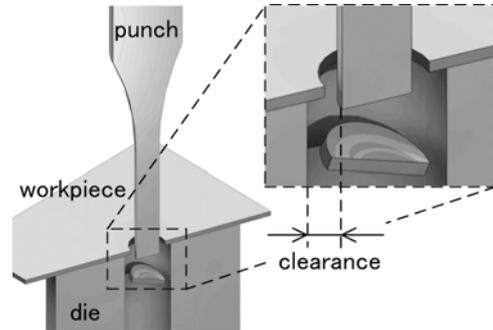


Fig.1 Clearance

ここで, D_p はパンチ外径, D_d はダイ内径, t は被加工材の板厚を表している.

ただし,式(1)は工具中心が一致している理想的な状態を考えたものである. 実際には,プレス機の組立誤差などの問題から,工具の中心が正確に一致しているとは限らない. また,被加工材が薄くなるにつれて同一のクリアランス条件であっても,実際の工具間の距離は小さくなることで式(1)から分かる. つまり,被加工材が薄くなればなるほど,パンチをダイに進入させることさえ,非常に困難となる. そのため,工具の位置を正確・精密に測定し,その位置を微調整する技術が必要である.

2. 2 工具中心位置の測定方法

工具の中心位置を測定する際,接触を伴う測定方法を選択すると,その接触力により工具位置に微小変位が生じるおそれがある. また,微細工具になると工具破損の原因ともなりかねない.

そこで本研究では,次に示す画像処理を利用した工具中心位置の測定方法を考案した. まず図 2 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 2 倍の顕微鏡を接続した CCD カメラを配置した. この CCD カメラにより,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刃先をそれぞれ撮像した. 取得した画像に対して,市販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,パンチ,ダイそれぞれの中心位置を測定した. これにより,非接触での工具中心位置の測定が可能となった.

この方法による測定精度を確認するため,以下の方法で工具中心位置の測定実験を行った. まず,初期位置においてパンチ,ダイそれぞれの中心位置を測定した. その後,市販の電動ステージを用いて CCD カメラを工具に対して 5 μm 水平方向に移動させ,その位置におけるパンチ,ダイそれぞれの中心位置を測定した. 次に, CCD カメラをさらに 3, 2, 1, 1, 1 μm と順次水平方向に移動させ,それ

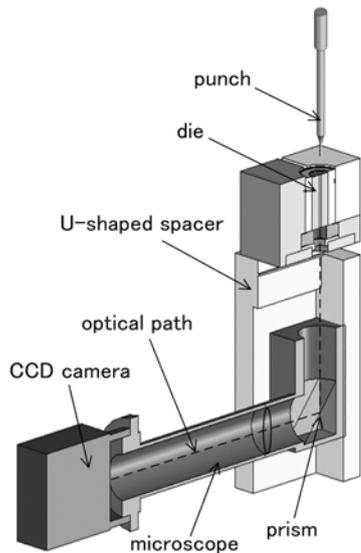


Fig. 2 Measurement of tool position

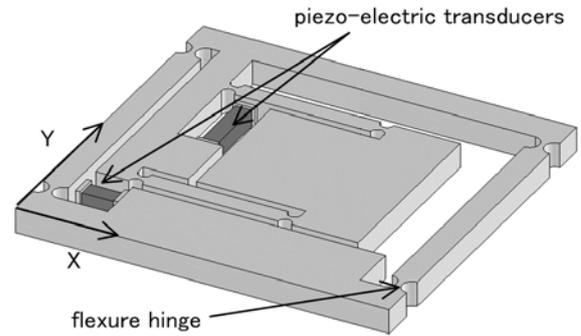


Fig. 3 XY stage

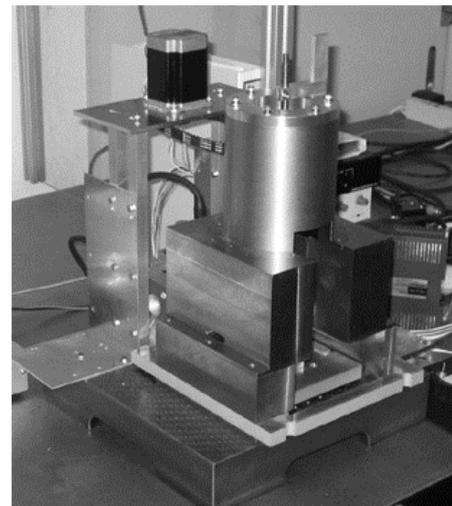


Fig. 4 Small punch press

Table 1 Results of displacements measurements

Setup displacement [μm]	Punch [μm]		Die [μm]	
	Displacement	σ	Displacement	σ
5	4.8	0.3	4.7	0.1
3	3.4	0.5	2.9	0.1
2	2.1	0.4	1.8	0.1
1	1.1	0.4	1.2	0.1
1	1.0	0.4	1.0	0.1
1	1.2	0.4	1.0	0.1

らの位置における工具中心位置をそれぞれ測定した。そして、それらの測定結果を直前の測定結果と比較し、工具中心位置の変化量を算出した。表 1 にその結果を示す。なお、測定はそれぞれの位置において 10 回ずつ行い、その平均値をその CCD カメラ位置における工具中心位置としている。

これより、工具中心位置と CCD カメラの間に相対的な移動が生じた際、その変位を $\pm 1 \mu\text{m}$ 以上の精度で測定可能であることが確認できる。つまり、今回考案した画像処理による工具中心位置の測定方法が、工具中心位置をそれぞれ $\pm 1 \mu\text{m}$ 以上の精度で測定することが可能であるといえる。

2. 3 工具位置の微調整機構

上記方法でパンチ、ダイの中心位置を測定した結果に基づき、工具位置を調整するための機構が必要となる。後述するが、本研究で試作した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、ダイを水平面で直交 2 軸に動作可能なステージ上に固定することで、ダイの位置を微調整することにした。この場合、プレス荷重がダイを固定してい

るステージに加わることになるが、この荷重に耐えることができ、さらにプレス穴あけ機を試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かったため、図 3 に示す XY 微動ステージを製作した。

この XY 微動ステージは、圧電素子をアクチュエータとし、4 つの弾性ヒンジばね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, Y 方向にそれぞれ最大 $76 \mu\text{m}$, $69 \mu\text{m}$ 程度微動することが可能となり、金属薄板の穴あけ加工におけるクリアランスをせん断輪郭に沿って均一に調整するために十分な移動量を有している。

3. プレス穴あけ機

上記の工具中心位置の測定方法および工具位置の微調整機構を搭載したプレス穴あけ機を試作した。その外観を図 4 に、構造を図 5 に示す。本プレス穴あけ機ではステップ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する。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て穴あけ加工を行う。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、現状では今回穴あけ加工実験を行うにあたって十分な量である

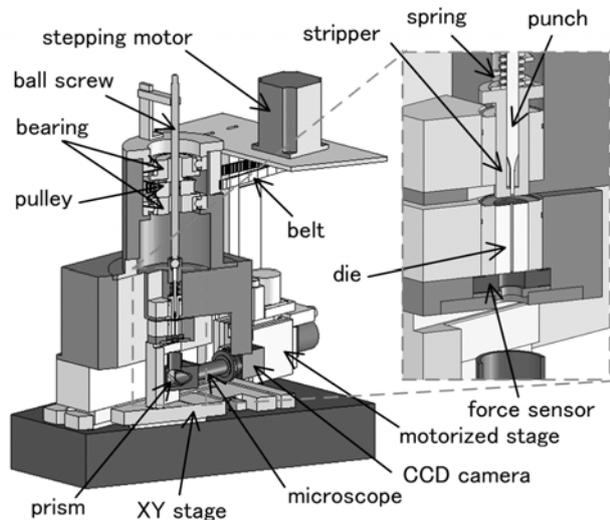


Fig. 5 Structure of small punch press

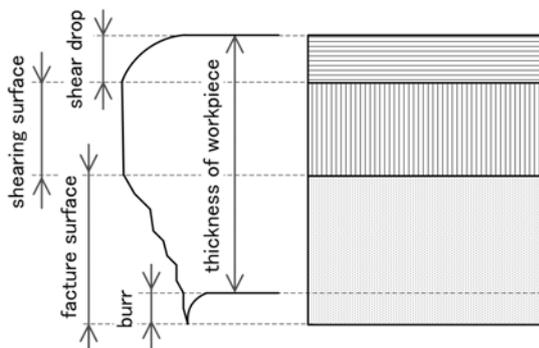


Fig. 6 Shape of cross-section

1000 N 程度と設定している．また、ストリッパにはパンチのガイドと可動板押えの役割を併せ持たせている．

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

4. 穴あけ加工実験

4. 1 加工条件

加工精度を調査するために、被加工材としてりん青銅 (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．また、それらの板厚は 0.2 mm で統一した．工具には材質が粉末ハイス鋼製の市販品を用い、パンチ外径を 1.000 mm に固定し、ダイ内径を 1.010~1.180 mm の間で 6 種類に変化させた．つまり、クリアランスで表現すると 2.5~45.0 % となる．なお、摩耗による影響を減らすため、加工条件が 2 回変化する度に、使用する工具を新品と取り替えた．また、ストリッパによる板押え力は、最大せん断荷重の約 20 % となるよう、図 5 に示されているストリッパ直上のスプリングを各被加工材に合わせて選択した．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

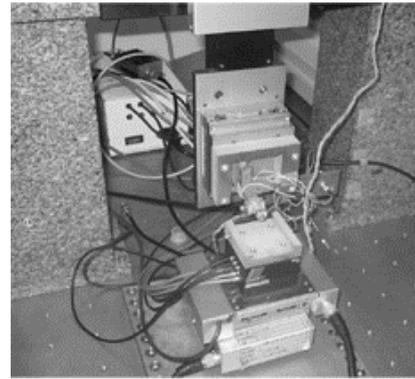


Fig. 7 Small 3D-CMM

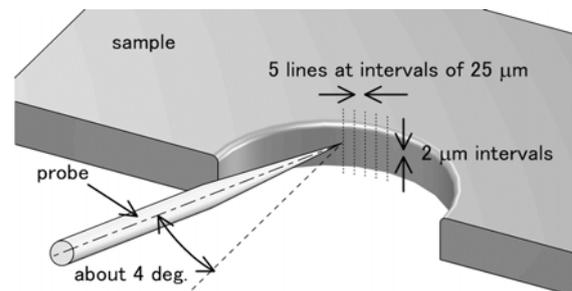


Fig. 8 Measurement point by a small 3D-CMM

れ⁸⁾を避けるため、無潤滑の状態で行った．

4. 2 加工精度の評価方法

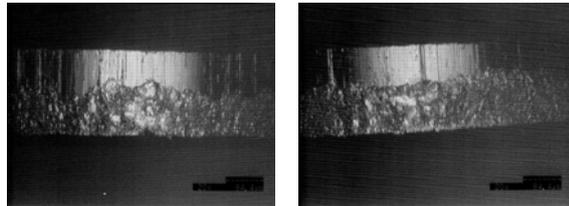
せん断加工製品の切り口面形状は、図 6 に示すように、だれ、せん断面、破断面、かえりから構成される．

本研究では、得られた穴の切り口面形状の評価を行うため、レーザ顕微鏡および図 7 に示すマイクロ部品用形状・寸法測定装置⁹⁾ (以下、小型 3D-CMM と略記する) 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なく一様に分布しているか、また、2 次せん断面の発生状況の確認に使用した．一方、小型 3D-CMM では任意の直径の両端にあたる切り口面を、図 8 に示すように 25 μm 間隔で 5 列の測定列を設定し、各列内において板厚方向に 2 μm 間隔で座標点の取得を行った．それらの結果から列毎に、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．

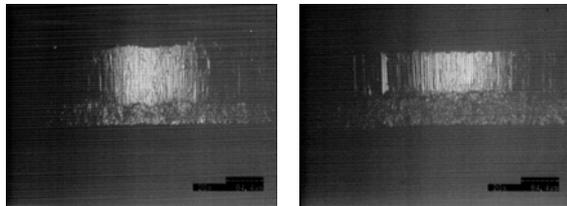
また、穴の寸法精度はだれ側に LED 光源を用意し、加工された穴を通過した光をかえり側から CCD カメラを用いて撮像した．そして、得られた画像に市販の画像処理ソフトウェアを用いて画像処理を施すことにより、穴直径の平均値と標準偏差を求めた．なお、この方法の測定精度を確認するために、市販の公差 ±2.5 μm でガラスに蒸着されている 3 種類の直径の円を同様の方法でそれぞれ 10 個ずつ測定し、その平均値と標準偏差を予め求めた．その結果を表 2 に示す．これより、上記方法で円直径を ±1 μm 程度の精度で測定可能であることが確認できる．

Table 2 Measurement results for a standard test circles

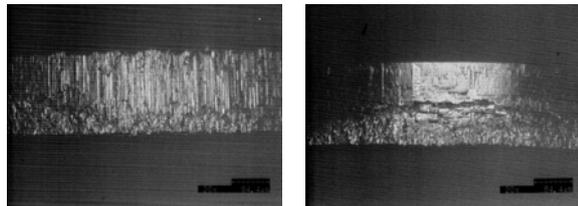
Diameter [μm] (Tolerance: $\pm 2.5 \mu\text{m}$)	Measurement vale [μm]	
	Mean value	σ
250	249.8	0.3
500	500.2	0.4
1000	999.7	0.2



(a) 5.0 %t (b) 20.0 %t
Fig. 9 Machined surface (C5191 H)



(a) 5.0 %t (b) 20.0 %t
Fig. 10 Machined surface (C2801 1/4H)



(a) 5.0 %t (b) 20.0 %t
Fig. 11 Machined surface (A1050 H18)

5. 実験結果

レーザ顕微鏡を用いて、穴あけ加工実験により得られたせん断切り口面を撮像した画像の代表例を図 9~11 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る。これより、本研究において考案した工具位置調整方法が有効に働いていると考えられる。なお、本実験をおこなった範囲内では、2次せん断面を生じたものは見受けられなかった。

小型 3D-CMM により得られた切り口面形状の一例を図 12 に示す。なお同図は、りん青銅、クリアランス 20 %t の条件で穴あけ加工を行ったものである。図 6 と比較すると、小型 3D-CMM が金属薄板に対するせん断加工の切り口面形状を捉えていると考えられる。これらの測定結果から、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た。その結果を図 13~15 に示す。これらより、だれ、かえりはクリアランスの増加に伴い、その板厚に占める割合が増加していく傾向があると見られる。また、か

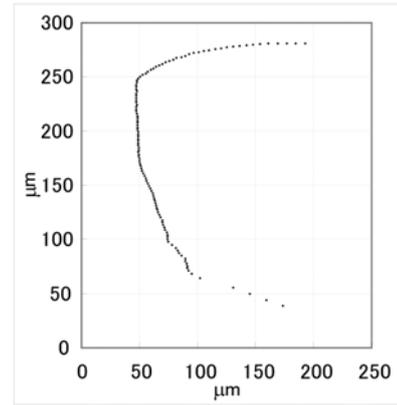


Fig. 12 Measurement example of cross-section

えりに比べてだれの方がクリアランスの影響を受けやすいことが分かる。ただし、クリアランスを極端に大きくした 45.0 %t ではその関係は逆転し、今回穴あけ実験を行ったどの材料においても板厚の約 40 % の巨大なかえりが発生している。せん断面については、材料によりその幅は異なるが、クリアランスの比較的小さな領域において、急激に減少する傾向のあることが見てとれる。つまり、せん断面領域を重視する穴あけ加工を行う場合には、クリアランス条件の選択を十分注意して行う必要がある。

詳細な材質や加工速度などの加工条件に相違はあるが、精機学会塑性委員会による板厚 1.6 mm の被加工材に対する研究報告²⁾と比較すると、それらの傾向は大まかに見て同様であるといえる。しかしながら、各クリアランスにおけるそれぞれの部位の割合に着目すると、だれ、せん断面、かえりとも、板厚の薄い本研究の結果の方が大きくなる傾向がある。すなわち、破断面のみが小さくなる傾向にある。これは、当然上述した加工条件の相違の影響もあるはずだが、各部位の形成に板厚に対する工具刃先の丸みの大きさの影響なども関与しているものと考えられる。

また、画像処理を利用することにより得られた各加工条件における穴直径の測定結果を図 16 に示す。これより、全体的な傾向として、クリアランスが 20 %t 程度まではその増加に伴い、穴の直径が大きくなることが分かる。また、その後ある値を境に小さくなっていく可能性があると考えられる。切り口面形状の場合と同様、精機学会塑性委員会による研究報告²⁾と比較すると、大まかに見て同様の傾向が表れているといえる。しかしながら、本実験における結果では、すべての穴直径はパンチ外径を上回っており、精機学会塑性加工専門委員会による研究報告に存在した穴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いなどの相違点もある。

これらの加工精度評価の結果から判断すると、本研究の結果は、神馬らの、薄板の場合を厚板の実験でシミュレートできないという指摘⁵⁾を再確認できるものとなりえる。

ここで視点を変えて、加工精度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度合いが大きくなっていると判断できる。これより、製品精度の

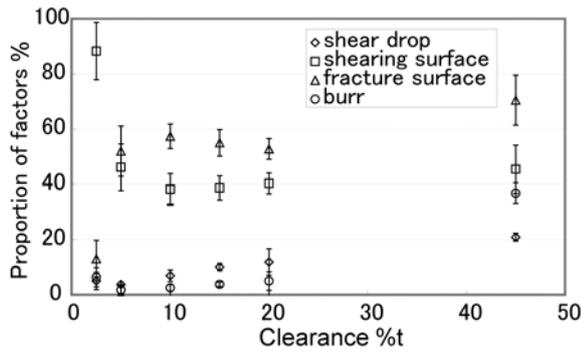


Fig. 13 The relation of clearance and proportion of cross-sectional shape (C5191 H)

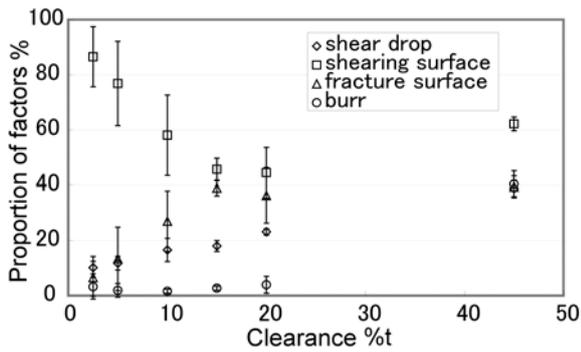


Fig. 14 The relation of clearance and proportion of cross-sectional shape (C2801 1/4H)

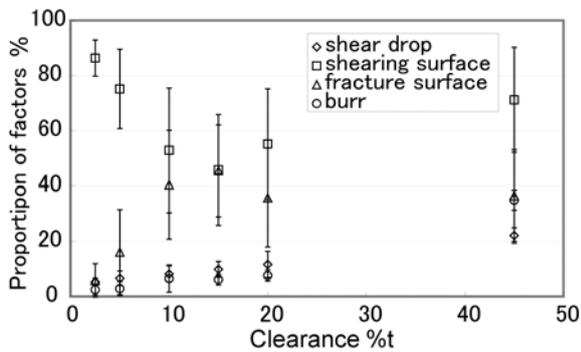


Fig. 15 Fig. 14 The relation of clearance and proportion of cross-sectional shape (A1050 H18)

加工安定性にのみ焦点を当てた場合では、この3種の材料の中では、りん青銅が最もせん断加工に適した材料であるといえる。

適正なクリアランス条件は、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ことが妥当であると考えられる。このため、一概に適正なクリアランス条件を提示することは難しい。そのため、これまでに提示されている、板厚3 mm以下を対象とした適正クリアランス¹⁰⁾などをそのまま用いるのではなく、図13~16に示した切り口面形状、穴直径などの各種加工精度評価のデータや、せん断線図が存在する場合にはクラックの成長、会合の具合などから総合的に、製作する製品の板厚や要求される加工精度により、その都度判断されることが望ましい。

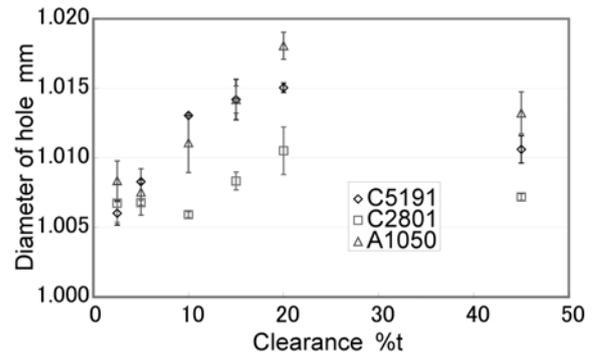


Fig. 16 The relation of clearance and diameter of hole

6. 結言

本研究では、画像処理を用いてパンチとダイの工具中心位置を $\pm 1 \mu\text{m}$ 以上の精度で測定する方法を考案、開発した。また、圧電素子、弾性ヒンジばねを用いたXY微動ステージを製作し、プレス機に工具中心位置測定方法とともに組み入れることにより、せん断輪郭に沿ってクリアランスを一定に保つことが可能なプレス穴あけ機の試作を行った。そして、パンチとダイの工具中心位置を $\pm 2 \mu\text{m}$ 以上の精度で一致させた状態で、3種類の金属薄板に対して穴あけ加工実験を行い、その切り口面形状と穴直径の精度評価を行なった。その結果、薄板の場合の加工精度は厚板の場合と全体的な傾向としては類似したものを示すものの、各クリアランスにおける各種パラメータ量は異なる値をとることを示した。これより、金属薄板の適正なクリアランス条件に、厚板で得られたデータを用いて判断することへの危惧を示した。

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(AF-2003011)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) 前田禎三：精密機械，**25-8** (1959) 364.
- 2) 精機学会塑性専門委員会：精密機械，**25-11** (1959) 601.
- 3) 和田和夫，小松広之：塑性と加工，**13-134** (1972) 898.
- 4) F. Faura, A. Garcia, M. Estrems: Journal of Materials Processing Technology, **80/81** (1998) 121.
- 5) 神馬敬，足立達也：塑性と加工，**33-379** (1992) 898.
- 6) 藤野正俊，山本正樹，増沢隆久：塑性加工シンポジウム，**122** (1989) 9.
- 7) 青木勇：塑性加工連合講演会講演論文集，**42-2** (1991) 583.
- 8) 森敏彦，中島邦彦：日本機械学会論文集(C編)，**65-629** (1991) 369.
- 9) T. Shiramatsu, K. Kitano, M. Kawada, K. Mitsui: JSME International Journal, Series C, **47-1** (2004) 369.
- 10) 型技術協会編：型技術便覧，(1989) 335，日刊工業新聞社