

超高压気体を用いた板材のパンチレス穴あけ加工

村田 眞*

1. 緒 言

大量生産において最適な加工法である塑性加工は、金属加工製品の多くに用いられている。塑性加工の中でも、せん断加工は板材の加工に多く用いられ、その加工法については多くの研究がなされている。このせん断加工において薄い板に小径の穴をあける(たとえば、板厚 1.0mm の薄板に直径 1mm 程度の穴をあける)ことは困難であるとされている。そこでここでは超高压ガスによる薄板への穴あけ加工法を開発し¹⁾、有用性について検討を行った。この穴あけ加工法においては、穴あけされた製品は良好な破断面を有すること、弾性体パンチを使用した穴あけの特徴であるせん断部のくびれ変形による板面方面へのかえりが生じないこと、さらに、小径穴あけを困難なものとしている最も要因であるダイスとパンチのクリアランスの調節を必要としないことなどの特徴を用いる。さらに、この穴あけ加工法では塑性加工に必要な潤滑油を用いないために、環境に優しいという利点を有している。本報においては、本加工法の実用性を評価するために、アルミニウム薄板を対象として穴あけ機構・寸法精度や穴あけに必要なガス圧力を知るために、穴あけ時に抜きかす部分に作用するガス圧力の昇圧・減圧の実態を実験的に測定し検討を行った結果を記述する。

2. 実験装置と実験手順

Fig.1 は、実験装置全体の写真である。この実験装置内部のシステムを概略図に示したものが Fig.2 である。実験装置は、超高压ガスを発生する圧縮システム部と、穴あけを行うワーク部に分けられる。圧縮システム部では、ポンプ①を圧縮シリンダ内②にオイルを供給し

窒素ガスを圧縮する仕組みとなっており、最高 200Mpa まで昇圧可能である。昇圧された窒素ガスはワーク部の容量のアリクター③に貯められる。設定された圧力に達したところで圧縮システム部とワーク部は分断され、以後、ワーク部の操作のみで穴あけ加工は行われる。穴あけ試験は Fig.2 におけるワークベース⑤上に Fig.3 示すようにワークベース、試料、ダイスの順に重ねボルトで固定し、セットした後リアクターとワークベースをつなぐワーク弁⑥を開き、試料に衝撃的にガス圧力を負荷することで完了する。このときの昇圧の様子を加圧ノズル手前に取付けたひずみゲージ式圧力変換器⑦により測定し、オシロスコープに取込み観察する。ダイスは SKD11 に穴を焼入れ処理し、加圧面を研磨したものを使用した。穴径は 1.0~15mm の 11 段階のものを用意した。

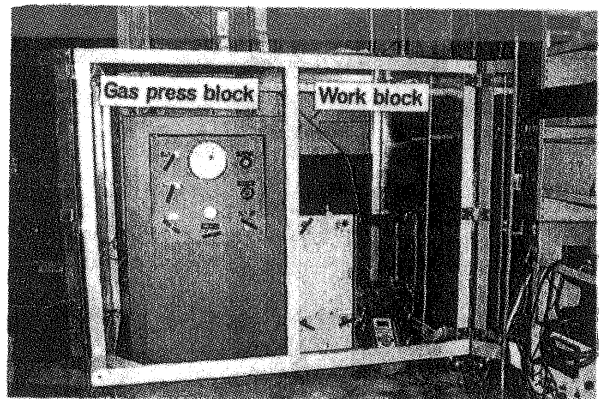


Fig. 1 Appearance of punching machine.

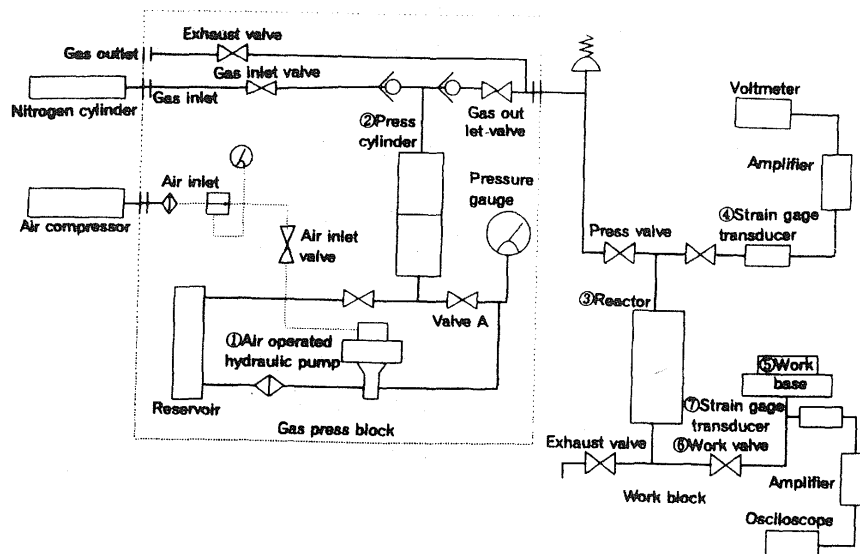


Fig. 2 Block diagram of system of punchless punching of a circular hole in thin sheet metal by ultrahigh pressure gas.

また、穴寸法・だれ幅の測定には工具顕微鏡を使用した。

試料は、アルミニウム材 A1050-H18 および A1060-H18 を使用した。

3. 実験結果

3.1 穴あけ機構

Fig4 は板厚 0.8mm のアルミニウム板にガス圧力を逐次増大させ直径 15mm の穴あけを行った場合の板のダイス側表面および断面の写真である。Fig4(a)は加工された試料のダイス側表面を、(b)は断面を、(c)は(b)における切れ刃近傍の拡大図を示している。これらは本加工法における被加工材の変形過程を表しており、高压ガスが作用したとき、ダイス穴部に対面する試料の一部がバルジ変形し穴部周辺にある試料がくびれを起こすと同時に、ダイス切れ刃によってせん断されていく様子がみられ、ガス圧力を用いた典型的な穴あけの様子がよく表されている。板厚が変わっても、この穴あけの様子には差が見られないため、本加工機を用いて穴あけを行った場合、板厚の変化によらず試料は上記のような過程を経て穴あけがなされるといえる。ただし、板厚が 0.05~0.5mm の場合はやはりまったく見られなかったが、0.6~0.8mm では穴の一部に小さなばりが生じることがあった。なお、同図(c)中に穴周辺に発生するだれの寸法 e を示す。

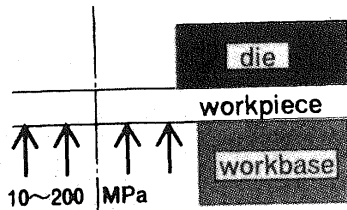


Fig. 3 Schematic illustration of method of setting up workpieces.

Fig.5 は板厚が 0.4, 0.6, 0.8mm の試料にダイス孔径 5mm の穴あけを行ったときの穴あけ部断面写真である。同図(a), (b), (c)ともにその形状に大きな差はみられない。したがって、板厚変化による穴部断面の形状変化はないと考えられる。すなわち、板厚が変化しても先のFig4とまったく同様なプロセスを経て穴が生成されることが、これらの写真から推測される。

Fig6 は加圧ノズル手前に取付けたひずみゲージ式圧力変換機で測定したガスの圧力を観察したものである。加工条件として、試料板厚 0.6mm のアルミニウム (A1050)、リアクター内圧力 $p=1280$ (MPa)、ダイス径 3mm で穴あけを行ったときの一圧力と時間の関係を示している。試料に作用する圧力は開弁とともに指数関数的に昇圧し、ピーク値約 72MPa に達すると、圧力は急激に減圧を見せ、最終的に大気圧に戻る。これを前述の各変形段階と対応させると、まず圧力の指数関数的な昇圧とともにバルジ変形を起こし、ピーク値で抜きかすが分離され、穴あけは完了し、ガスは開放されて急激に圧力は減少する。

(a) $t=0.4$ mm

(b) $t=0.6$ mm

(c) $t=0.8$ mm

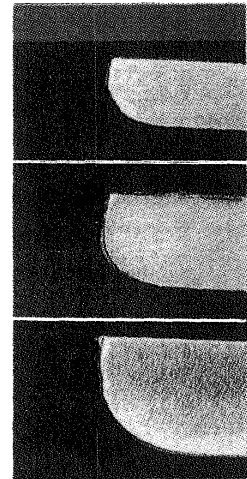
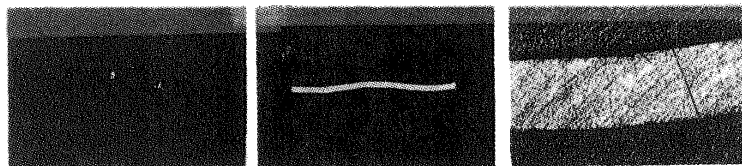
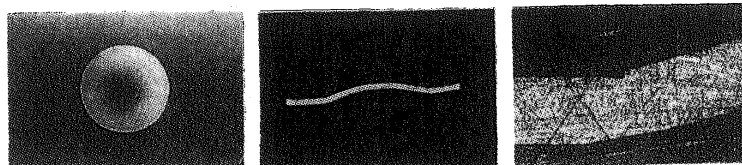


Fig. 5 Cross sections of workpieces.

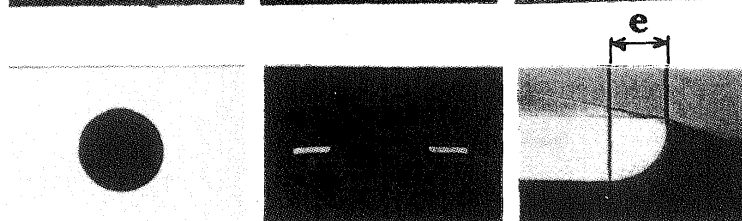
$p=8.20$ MPa



$p=10.0$ MPa



$p=12.3$ MPa



(a) Die-side

(b) Cross section

(c) Microphotography

Fig. 4 Bulge deformation and punching of workpiece.

Aluminum (JIS A1060-H18), $t=0.8$ mm, $d_0=15$ mm.

この場合、同図より弁開放後約0.1sで穴あけは完了している。減圧過程において穴あけ後ただちに大気圧には戻らないが、これは、開弁から穴あけまでの時間が0.1~0.15sと非常に短いため弁の開閉において、穴あけ後もリアクターから高压ガスの放出が続いているためである。この現象は、穴径あるいは板厚が変化した場合、ピーク値や減圧傾向に多少の差は見られるものの、ほぼ同様に観察される。

3.2 寸法精度

この穴あけ加工法において、加工後の製品の寸法精度を表す指標として Δd を採用した。ただし、

$$\Delta d (\text{寸法誤差}) = d_0 (\text{ダイス直径}) - d (\text{穴あけ製品の肉径})$$

である。

Fig.7はガス圧力を変えて直径3mmの穴あけ板厚0.3, 0.5, 0.8mmにあけたときの寸法精度を調べた結果である。穴あけ最小圧力付近において寸法精度の低下が見られる。これは穴あけが可能な最小の圧力よりわずかに大きな圧力で穴あけを行った場合、穴あけが終了するまでに通常の場合よりも長い時間圧力が負荷される。そのため、長い時間材料の流動が許され、ダイス内側に入り込む量が大きくなり、結果として寸法精度の低下を招くと考えられる。3種類の板厚ともにガス圧力による寸法精度はわ

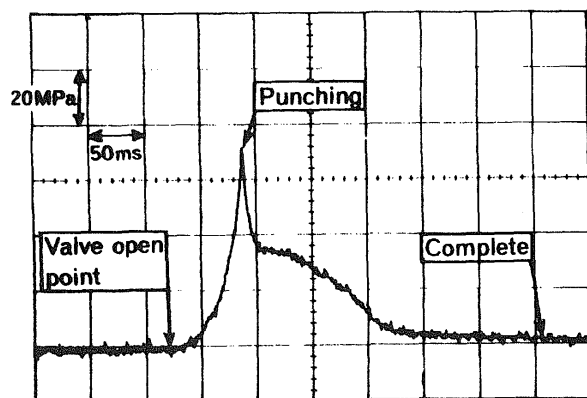


Fig. 6 Osirodiagram of gas pressure as a function of time.

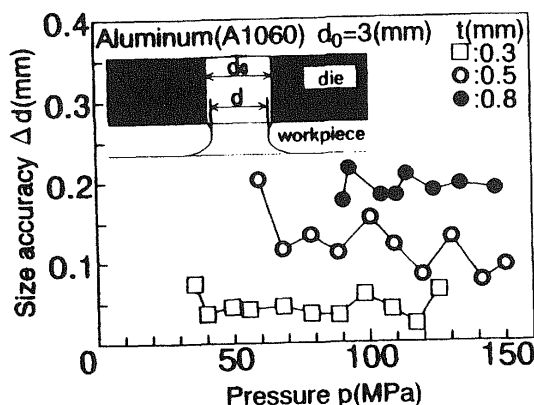


Fig. 7 Relationship between pressure p and size accuracy of punched hole Δd for different thickness t .

ずかに向上する傾向は認められる。しかし、ある値を越えたとほぼ一定位置を示し影響は少ない。つまり、ポンチとダイスを用いた穴あけの場合と同様、本加工法による穴あけでも、穴あけスピードが大きい方が材料の流動も少なく精度がよくなるといえる。そこで、この方法で、後述の最小圧力よりも10MPa程度高い圧力を使用することがより好ましい。また、必要以上に圧力を負荷しても十分な精度の向上は望めない。

Fig.8は、ダイス穴径が3.0, 6.0, 12.0mmのときの各板厚と平均寸法精度の関係を示している。Fig.7より寸法精度は、圧力に対してほぼ一定の値を取るから、平均寸法精度には、各圧力における寸法精度の総和平均で示した。直線はそれぞれの穴径についての最小二乗法による近似直線を示している。寸法精度は板厚に比例して低下し、穴径が大きくなるに従って良好になることがわかる。

Fig.9は、穴径が増大するにつれて寸法精度は向上し、板厚による差が小さくなることを示している。すなわち、本加工法では多くの穴あけ加工法の場合と同様に同じ穴径においては板厚が薄い場合、また同じ板厚においては、穴径が大きい場合に高精度な穴あけが可能となることを示している。

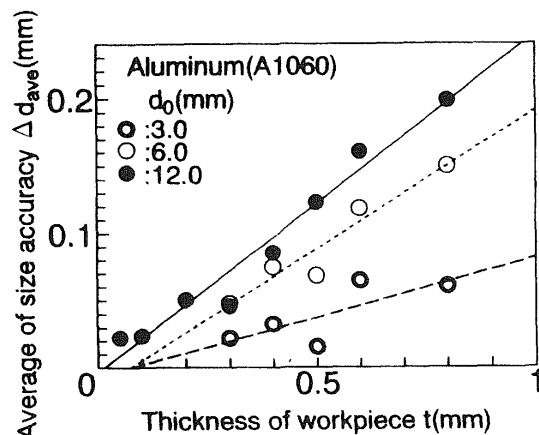


Fig. 8 Relationship between thickness t and average of size accuracy of punched hole Δd for different diameter of dies hole d_0 .

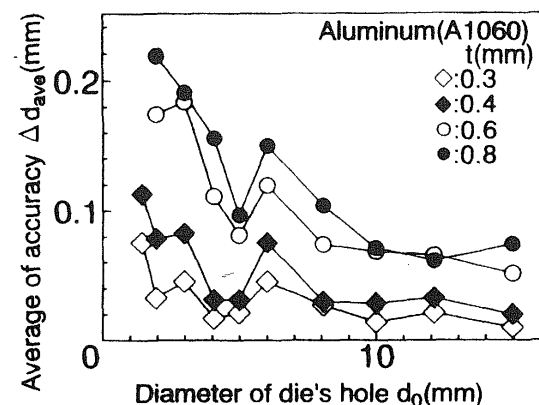


Fig. 9 Relationship between diameter of dies hole d_0 and average of size accuracy of punched hole Δd for different thickness t .

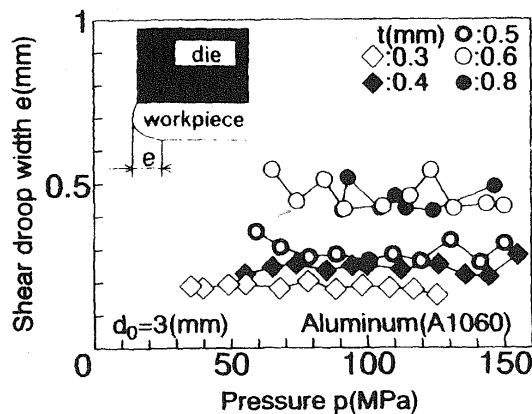


Fig. 10 Relationship between pressure p and shear droop width e for different thickness t .

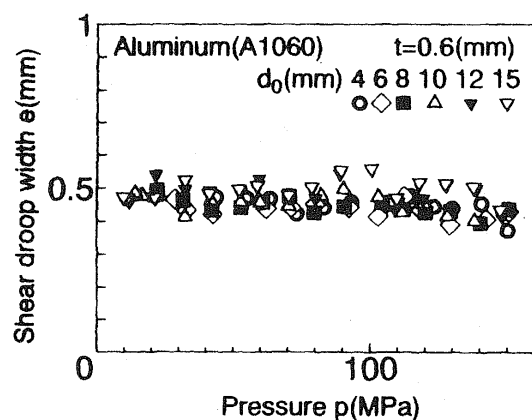


Fig. 11 Relationship between pressure p and shear droop width e for different diameter of dies hole d_0 at a thickness of 0.6 mm.

Fig.10 は寸法精度に大きな影響を及ぼすだれ(同図中の e)についてダイス径 3mm の穴あけを板厚とガス圧力を変化させて調べた結果である。だれ e 値は板厚が増加するにつれて増加している(寸法精度の評価と同じ理由で、 e 値も、無次元化していない)。

Fig.11 は板厚 0.6mm の試料にガス圧力を変化させて直径 4.0~15mm の間で、6 段階のダイス径で穴あけを行ったときの e 値を示している。ガス圧力に対しては、その増加とともに微小が e 値は減少する傾向にある。他の板厚については同様な結果を得ている。しかし、減少幅が大変小さいので圧力操作による十分なだれの抑制効果は期待できない。

Fig.12 は e 値の平均値 e_{ave} は穴径の関係を各板厚について調べた結果である。平均値 e_{ave} は、穴径・板厚が同じであればわずかな減少傾向はあるものの圧力に対してはほぼ一定値を示していることから各圧力における e 値の総平均を使用した。 e_{ave} 値は板厚にほぼ比例して大きくなる。これは、板厚が増加するにつれ材料の流動範囲が広がるためである。また、同じ板厚でも穴径が大きくなるに従ってわずかに増加する傾向がある。穴径に対してバルジ変形の形状がわずかに異なることが確かめられた。つまり、穴径が小さい場合は、試料の加工側は Fig.13(a)

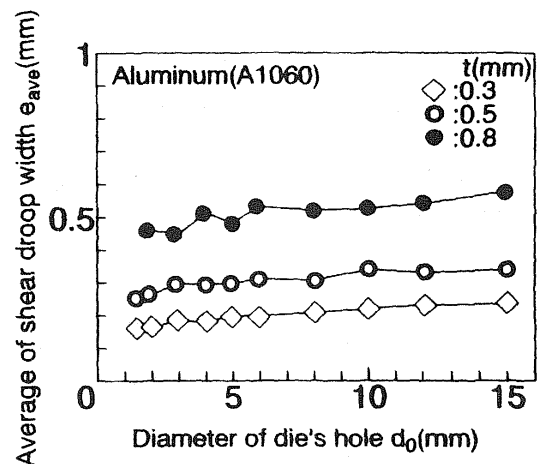


Fig. 12 Relationship between diameter of dies hole d_0 and the average shear droop width e for different thickness t .

のようにお椀を伏せたような形状をしているのに対し、穴径が大きい場合は、同図(b)のように大皿を伏せたような形状になる。通常、だれはバルジ変形時の引張りにより材料がダイス内側へ流動し、くびれを起こして減少すると、バルジ変形の曲率が増し、そのためダイス肩部付近を中心とする材料の流動半径が減り、たれすなわち e 値は減少するものと考えられる。

3.3 穴あけ最小ガス圧力

穴あけに必要な最小ガス圧力を求めることは装置の設計時には必要不可欠であるばかりでなく、ガスの浪費を押さえるという点でも大変重要である。そこで、所要の寸法の穴の穴あけに必要な最小圧力を実験および計算から求める。計算値はせん断部のつりあいにより求められる。つまり、抜きかすがダイス切れ刃によってせん断されるとすれば、穴あけ部に加わる力とせん断加工するための力のつり合いより式(1)が成立する。

$$\frac{2\pi d_0 p}{4} = \pi d_0 k_s \quad (1)$$

式(1)より穴あけを行うための圧力 p は式(2)で示す条件が満たされれば可能となる。

$$p \geq \frac{4k_s t_s}{d_0} \quad (2)$$

ただし、 k_s :せん断抵抗、 d_0 :ダイス穴直径、 t :板厚、 p :穴あけガス圧力である。

なお、せん断抵抗 πk_s は通常引張強さの 0.8 倍が使用される²⁾が、本加工法ではポンチとダイスを用いた慣用的な穴あけ加工法とは異なりポンチとダイス間の摩擦による損失などがないこと、トレスカの条件に合致することから引張強さの 0.5 倍の値を採用した。

Fig.14 は板厚 0.4, 0.6, 0.8mm の試料についてのダイス穴径と最小ガス圧力の関係について示しており、図中の点

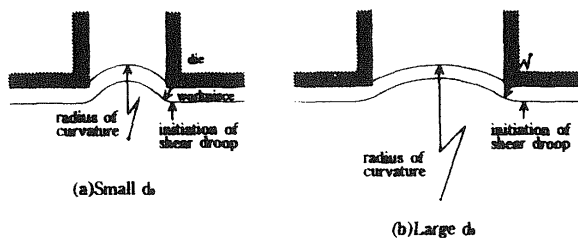


Fig. 13 Changes in shape of bulge by difference of hole diameter d_0 .

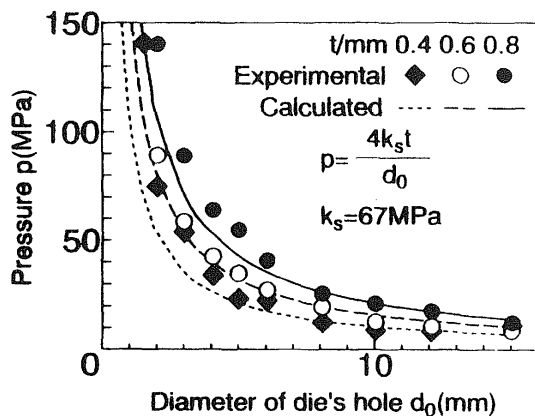


Fig. 14 Minimum pressure p required to punch circular holes with diameter d_0 for different thickness t .

と曲線はそれぞれ実験値，計算値を表し，両者はほぼ一致している。最小ガス圧力は，穴径が増加するにつれて減少し，板厚の増加とともに増加する傾向がある。これらは，板厚 0.05, 0.1mm の場合と同じ結果である。

4. 結 言

超高圧ガスを用いた穴あけにおいて，この加工法の特徴について実験的に検討を加えた。板厚や穴径が変化した場合について調べた結果は以下の通りである。

- (1) 板厚が 0.5mm くらいまでは穴あけは可能であり，穴あけの機構に変化はない。
- (2) 通常のポンチとダイスを用いた穴あけと同じく，寸法精度は板厚の増加に比例し，穴径に反比例して低下する。また，圧力に対して，その上昇とともにわずかに向上する傾向があるが，十分な効果は期待できない。
- (3) 穴あけ最小圧力は理論的に求められ，その値は実験値とよく一致する。

この研究は天田金属加工機械技術振興財団の援助によってなされたことを示すとともに，同財団に感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 村田 眞・上出 靖・鈴木秀雄：平成 5 年度塑性加工春季連合講演会論文集 (1993), 737.
- 2) 前田禎三：塑性加工，誠文堂新光社，(1972), 208.