

# 超高压流体を利用した板材の新しい加工

村田 眞\*

## はじめに

塑性加工法は板等の被加工材に所要の形状の剛体工具を押付け、その形状をコピーする加工法である。そのため、形状の安定しない流体が塑性加工に使用されることはほとんど見られなかった<sup>1)</sup>。しかし、流体も超高压となれば、剛体工具になる可能性もあると考え、超高压の気体と液体を塑性加工法に応用した研究報告をする。

である。昇圧された窒素ガスはワーク部のリアクター③に溜められる。リアクター内の圧力は圧力変換器④により測定される。リアクター内の圧力が設定する値に達したところで、圧縮システム部とワーク部は分断され、以後、ワークベース、板材、ダイスの順に重ね固定する。セットした後にリアクターとワークベースをつなぐワーク弁⑥を開き、板材に衝撃手にガスの圧力を負荷することで穴あけが完了する。この加工時の負荷圧力の状態を、加圧用ノズルの

## 1. 超高压ガスによる板材の穴あけ加工

### 1-1 緒言

せん断加工は板材の代表的な塑性加工で多くの研究がなされている<sup>1)~3)</sup>。せん断加工において薄板に小径の穴加工を行うことは困難であるとされている。そこで超高压ガスを用いた穴あけ加工を開発した<sup>4),5)</sup>。この穴あけ加工の特徴として、穴あけされた断面は良好な破断面を有し、かえりが生じないことが上げられる。さらに、超高压ガスがポンチの役割を果たすため、ダイスのみで穴あけ加工が可能である。以下に、板厚や穴径等の加工条件が、穴あけ機構や寸法精度に与える影響に実験的に検討を加え、本穴あけ加工の特徴を明らかにする。

### 1-2 実験装置

実験装置全体の写真をFig.1-1に示す。この実験装置のシステムの概略を示めたものがFig.1-2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、穴あけ加工を行うワーク部より構成される。圧縮システム部では、空気圧によりポンプ①を作動させ圧縮シリンダ内②にオイルを供給し窒素ガスを圧縮し、最高200MPaまで昇圧が可能

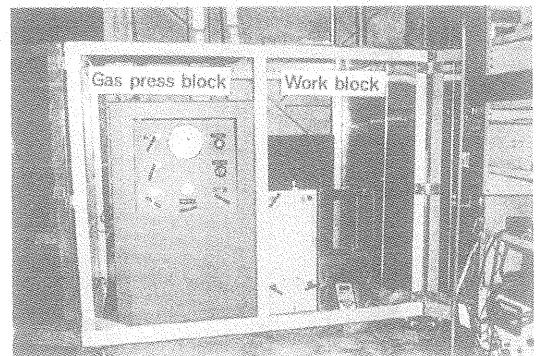


Fig.1-1 Appearance of punching machine

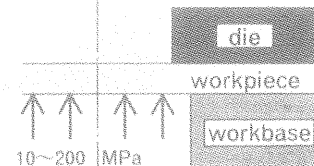


Fig.1-3 Schematic illustration of method of setting up workpieces.

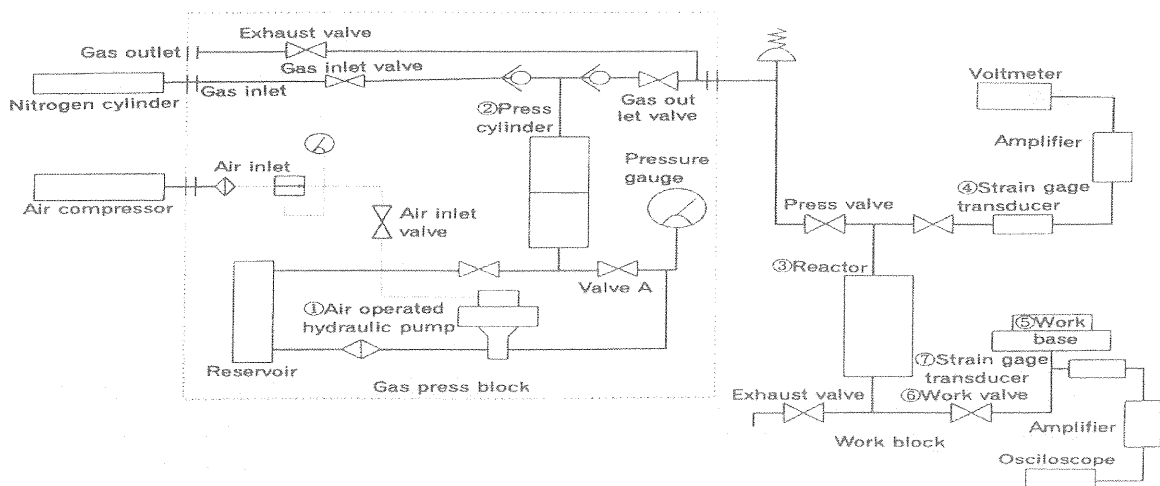


Fig.1-2 Block diagram of system of punches punching of a circular hole in thin sheet metal by ultrahigh pressure gas.

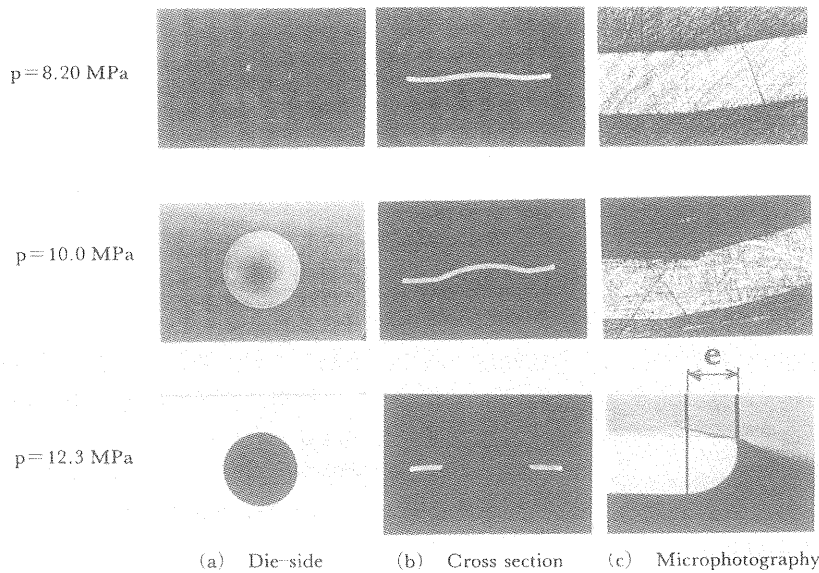


Fig.1-4 Bulge deformation and punching of workpiece.  
Aluminum (JIS A1060-H18),  $t=0.8\text{mm}$ ,  $d_0=15\text{mm}$

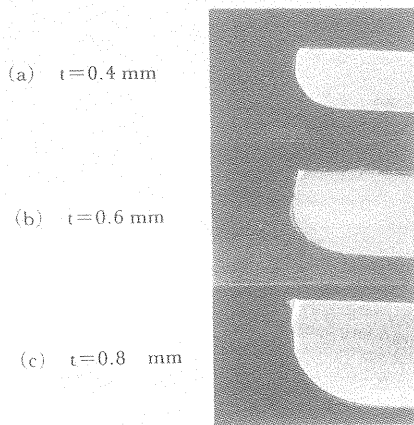


Fig.1-5 Cross section of workpieces.

手前に取付けた圧力変換器⑦により測定し、オシロスコープに取り込み観察する。穴あけダイスにはSKD11を使用し、焼き入れ後に研磨を施した。穴径には1.0~15mmの11種類を用意した。板材はアルミニウム合金A1060-H18である。

### 1-3 実験結果

#### 1-3-1 穴あけ機構

Fig.1-4は板厚0.8mmの板材にガス圧を逐次増大させ直径15mmの穴あけを行った時の、板のダイス側面と断面の写真である。同図(a)は穴あけ加工された板材のダイス側表面を、(b)は断面を、(c)は(b)における切れ刃近傍の拡大写真を示している。これらは本加工における板材の穴あけ過程と見なせる。高圧ガスが穴あけ部に作用すると、ダイス穴部に対面する板材の一部がバルジ変形し、穴部周辺にある材料がくびれを起こすとともに、ダイス切り刃によってせん断される。これはガス圧を用いた穴あけの典型的な例で、板厚が変化しても、この穴あけの様子には差が見られない。

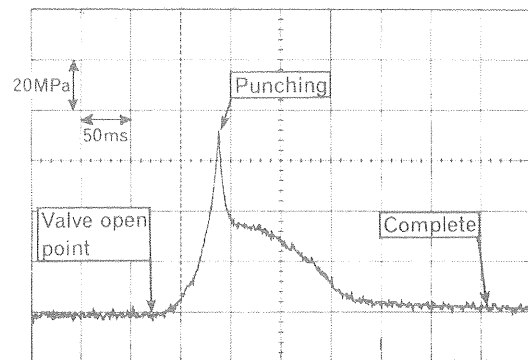


Fig.1-6 Osirodiagram of gas a function of time.

本加工法によって穴あけを行った場合、同じ過程を経て穴あけが成されているといえる。ただし、板厚が0.05~0.5mmの場合にはバリがまったく観察されなかったが、0.6~0.8mmでは穴の一部にわずかであるがバリが生じた。同図(c)に穴部周辺に生ずるだれの寸法  $e$  を示す。板厚が0.4、0.6、0.8mmの板材にダイス径5mmの穴あけを行った時の穴あけ部断面写真を Fig.1-5 に示す。同図(a)、(b)、(c)ともに、その断面形状に差は見られない。すなわち、板厚が変化しても Fig.1-4 で前述したと同様な穴あけプロセスを経て、穴あけが生成されるであろうことがこの写真から推測される。

Fig.1-6は加工ノズル手前に取付けた圧力変換機で測定したガスの圧力を電圧変換してオシロスコープで観察したものである。板厚0.6mm、ダイス3mm、リアクター内の圧力  $p=1280\text{Mpa}$  の加工条件下で、穴あけ加工を行ったときの圧力と時間の関係を示している。板材に作用する圧力は弁の開放とともに、急激に指数関数的に昇圧し、約50msでピーク値72Mpa達する。その後、圧力は急激に減圧し、さらに

時間が経過すると緩やかな減圧をし、最終的には大気圧に戻る。この波形は各穴あけ段階に対応している。まず、急激に指数関数的に昇圧するとともに板材はバルジ変形をし、バルジ変形した抜きかすは、ピーク値で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。同図によると弁の開放後 0.1s 以内に穴あけは完了している。減圧過程において穴あけ後、直ちに大気圧には戻らないが、これは弁の開放から穴あけまでの時間が約 0.1s と非常に短く、弁の開閉において、穴あけ後もリアクターから高圧ガスの放出が続いているためである。

### 1-3-2 寸法精度

この穴あけ加工において、加工後の穴の寸法精度を表す指標として  $\Delta d$  を採用した。ただし、

$$\Delta d = d_0 \text{ (ダイス直径)}$$

$$- d \text{ (穴あけされた穴の内径)}$$

である。

Fig.1-7 にガス圧力を変化させて、直径 3mm の穴径で、板厚 0.3、0.5、0.8mm の板材に穴あけ加工を行った時の寸法精度を示す。穴あけ最少圧力付近において、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行った場合、穴あけが終了するまでの時間は、通常に圧力が負荷された場合よりも長くなる。そのため、せん断される材料が、ダイス内側に入り込む量が大きくなり、その結果寸法精度の低下を生ずる。3種類の板厚においてガス圧の増加につれて、寸法精度がわずかに向上する傾向が認められる。しかし、ガス圧がある値を超えると、寸法精度はほぼ一定となる。本加工方法で穴あけを行う場合には、寸法精度の低下を避けるために、穴あけ最小圧力よりも 10MPa 程度高い圧力を使用することが望ましい。また、必要以上の高いガス圧を負荷しても、寸法精度の向上は困難である。

Fig.1-8 はダイス穴径 3.0、6.0、12.0mm をパラメタとし、板厚に対する穴の平均寸法精度の関係を示している。前述したように、ガス圧力に対して、寸法精度はほぼ一定の値を取るため、平均寸法精度は各圧力における総和平均値である。直線はそれぞれの穴径に対して最小二乗法によ

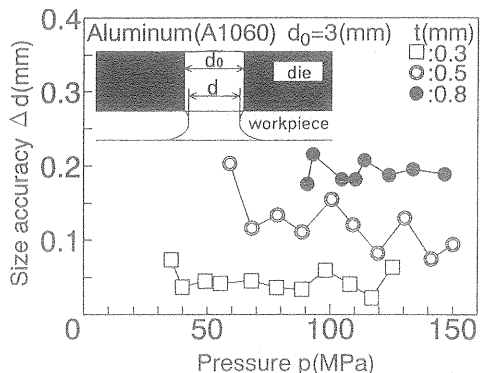


Fig.1-7 Relationship between pressure  $p$  and size accuracy of punched hole  $\Delta d$  for different thickness  $t$ .

る近似である。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い向上する。

Fig.1-9 は板厚をパラメタとし、穴径に対する穴の平均寸法精度の関係を示している。穴径が大きくなるにつれて、寸法精度は向上し、板厚が薄くなるにつれ、寸法精度の向上は減少する傾向が認められる。多くの慣用的な穴あけ加工法と同様に、本加工法も同じ穴径においては板厚が薄いほど、また同じ板厚においては穴径が大きいほど、高精度の穴あけが可能となる。

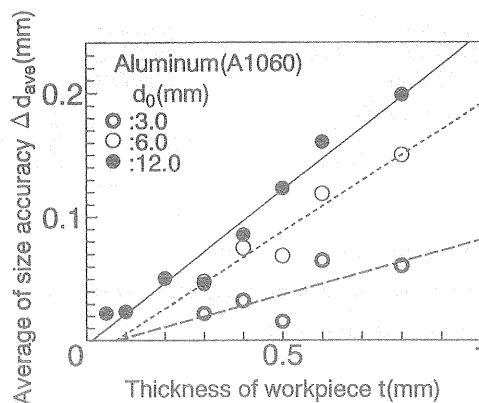


Fig.1-8 Relationship between thickness  $t$  and average of size accuracy of punched hole  $\Delta d$  for different diameter of dies hole  $d_0$

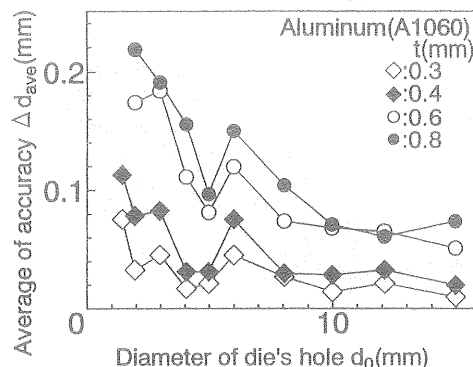


Fig.1-9 Relationship between diameter of dies hole  $d_0$  and average of size accuracy of punched hole  $\Delta d$  for different thickness  $t$ .

## 2. 超高压水による潤滑油を用いない板材加工

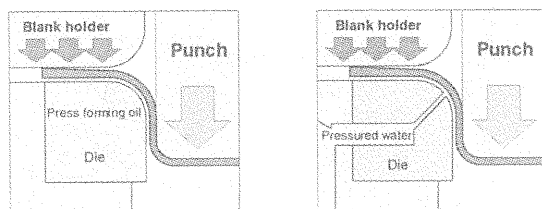
### 2-1 緒言

深絞り加工においては、工具と材料との間の潤滑が製品の品質、加工力および成形限界に大きな影響を与える。しかしながら、成形後に製品に付着した潤滑剤を洗い落とさなければならず、環境に負荷を加えるとともに洗浄のためのコストも必要となる。そこで、対向液圧成形において、しわ押さえ部の摩擦低減のために、被加工材と工具との隙間に高圧の液体を供給しながら成形を行う“液圧潤滑成形法 (H.P.L.L.法)”が考案されている<sup>8)~9)</sup>。後藤ら<sup>10)・11)</sup>によれば深絞り加工においては、フランジ部に比べダイス肩部の摩擦係数が高くなること示されている。そこで本研究では、ダイスの肩部、フランジ部に複数の微小なノズルを配

置し、ここから直接、高圧水を強制的に送り込み潤滑を行う加工機を開発した。この加工法の可能性について実験的に検討し、その特徴を明らかにした。

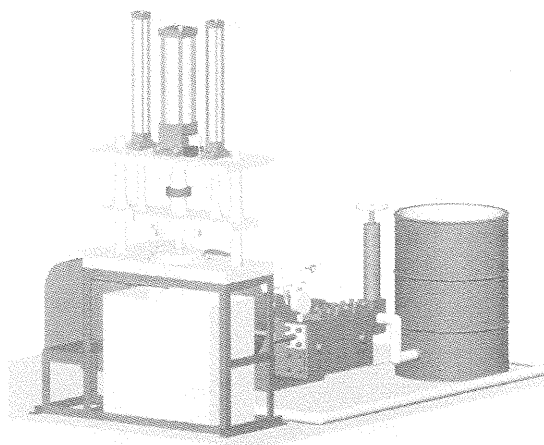
## 2-2 水圧潤滑による深絞り加工の原理

従来の深絞り加工は、Fig. 2-1 に示すように、ダイスとブランクの間にプレス油の潤滑膜を作り成形が行われたため、



(1) Conventional deep drawing (2) New deep drawing

Fig.2-1 Conventional deep drawing using press forming oil and New deep drawing using high pressure jet water



①Cylinder for punch ②Cylinder for blank holder ③Encoder  
④Load cell ⑤Blank holder ⑥Punch ⑦Die ⑧High pressure pump ⑨Tank for exhaust water ⑩Tank for lubricant water

Fig.2-2 Prototype deep drawing equipment

Table 1 Dimensions of tools

Punch	Diameter	$D_p$ / mm	30.0
	Radius of corner	$D_p$ / mm	2.5, 5.0
Die	Diameter	$D_d$ / mm	32.30
	Radius of corner	$r_d$ / mm	2.5, 5.0
Blank holder	Diameter	$D_b$ / mm	32.2
	Corner of radius	$r_b$ / mm	5
Clearance		$c$ / mm	1.15

Table 2-2 Properties of water

Products name	pH	Main ingredients
Natural cleanser	7.6-8.8	palm oil 24%

成形後に溶剤等を用いて洗浄する必要がある。洗浄工程を省略できる水を潤滑剤として使用する深絞り加工法を考案した。水の粘性はプレス油に比べ極めて小さく、潤滑効果はほとんど期待できない。高圧の水をダイス肩部分あるいはフランジ部からノズルを通し噴射し、水はダイスとブランクの間に強制的に送り込まれ、潤滑膜として作用する。

## 2-3 実験条件

実験装置の概略図を Fig. 2-2 に示す。本体の上部には①パンチ用シリンダが設置されており、④ロードセルを挟んで⑥パンチが取り付けられている。パンチ用シリンダには位置検出の③ストローク用エンコーダが付けられている。本体上部両脇には②しわ押さえ用シリンダが設置されており、⑤しわ押さえが取り付けられている。油圧ポンプのしわ押さえ用シリンダの圧力制御弁を制御することによってしわ押さえが上下する。⑧高圧プランジャポンプの圧力制御弁を制御することによって⑩潤滑剤のタンクに満たされた水を吸い込み、加工中にダイス表面にノズルから潤滑水を強制的に送り込む。水の圧力は高圧プランジャポンプの圧力制御弁を制御することで5~40MPa に設定する。使用した潤滑水は⑨受水槽に貯えられる。使用した工具寸法を Table 2-1 及び Fig. 2-3 に示す。図に示すように各ダイスに潤滑水を噴射するため、φ0.6mm のノズルが円周方向等間隔に8個作製してある。タイプCはダイス肩部とフランジ部のノズルは互いに22.5°ずれるように配置した。

## 2-4 実験結果

### 2-4-1 潤滑水成分による影響

高圧水のみを潤滑剤として用いた場合、プレス油に比べ水の粘性が低く、潤滑膜が薄く切れやすいため、潤滑性の向上と防錆効果の期待できる植物性石鹼を潤滑水に加える。

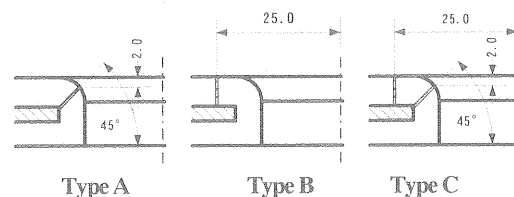


Fig.2-3 Position of water holes

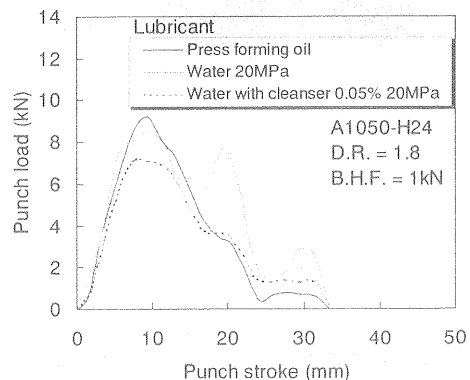


Fig.2-4 Relationship between punch stroke and punch load

使用した植物性石鹼の性状を Table2-2 に示す。なお pH 値は添加量 0.05% のとき 7.6, 0.5% のとき 8.8 である。Fig. 2-4 は潤滑剤をプレス油, 水及び水+石鹼(0.05%)とした場合のパンチストロークとパンチ荷重との関係を示す。水のみを潤滑剤とした場合, 3つのピークが発生する。(以下それぞれを Peak1, 2, 3 と呼ぶ) Peak1 は, パンチ肩部での曲げ, ダイス肩部での曲げ曲げ戻し, ダイスフランジ部分での圧縮による変形抵抗, 及びダイス表面との摩擦抵抗の合力として発生する。これは通常のプレス油を用いた場合にも生ずる現象である。Peak2 は, 絞り工程において増加した板材をダイスとパンチにより, アイオニングが行われるため発生する<sup>12)</sup>。噴射された潤滑水はダイスとblank間に入り込まず, 上方へ抜けてしまうためプレス油に比べ荷重は高くなる。アイオニング時の潤滑状態が悪いため, 板の一部がダイスにより削られ, アルミ粉は加工後期においてダ

イス側壁部に蓄積され, 潤滑状態を悪くし, Peak3 が発生するものと考えられる。水+石鹼(0.05%)を潤滑剤とすると, 全体的にパンチ荷重が低下し, 成形品の表面損傷も改善された。

Fig. 2-5は水に添加する石鹼の濃度と, Peak1, 2の関係を示す。潤滑剤に加える圧力に関わらず, 0.05~0.1%程度の添加でパンチ荷重が大幅に下がっている。Fig. 2-4の場合と同様にPeak2での荷重は低下する。これは潤滑剤に含まれていた石鹼成分がダイス表面に吸着し, 膜を生成していたためである。また0.1%以上の場合については, 十分な潤滑膜を生成されるが, 余剰の界面活性剤はミセルを潤滑水中で生成する<sup>13)</sup>。そのため潤滑状態に影響を与えないためパンチ荷重には変化がない。Fig. 2-6に潤滑剤を, 水及び水+石鹼(0.1%)とした, 水の圧力と限界絞り比の関係を示す。圧力の上昇に従い限界絞り比は両者ともに上昇する。水のみでは, 液圧30MPaで限界絞り比1.85, 石鹼との併用では20MPa以上で限界絞り比2.0であった。

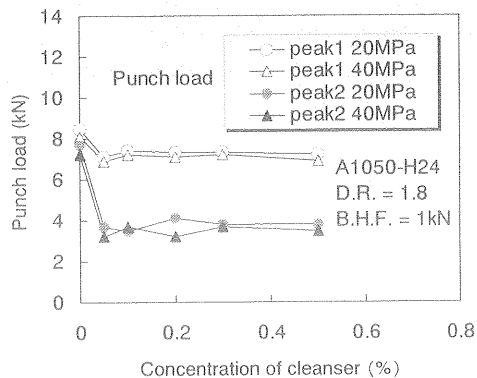


Fig.2-5 Relationship between concentration of cleanser and punch load

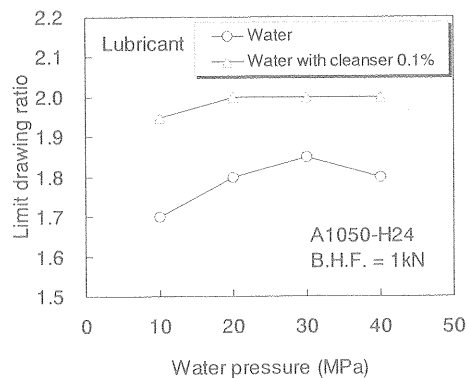


Fig.2-6 Relationship between water pressure and limit drawing ratio

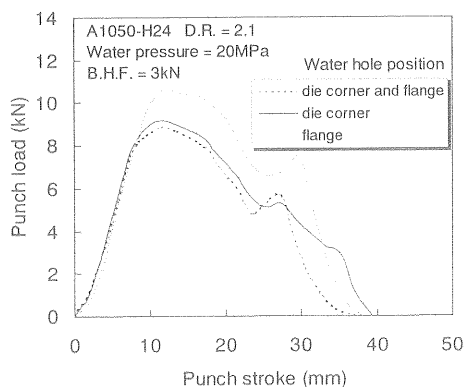


Fig.2-7 Relationship between punch stroke and punch load

#### 2-4-2 潤滑用ノズル位置の影響

Fig. 2-7は潤滑用ノズル位置を変化させた場合におけるパンチストロークとパンチ荷重の関係を示す。ダイスはFig. 2-3に示したダイスA, B, Cの3種類である。フランジ部にのみ潤滑ノズルを配したダイスを用いた場合パンチ荷重は最も高い値を示した。これは深絞り加工において最も接触が激しいダイス肩部分の潤滑状態が悪いためである。ダイス肩部, あるいは肩部とフランジ部に潤滑用ノズルを

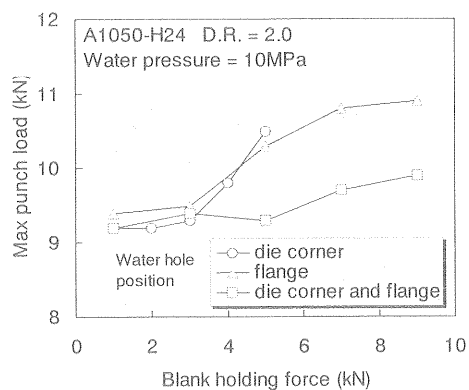


Fig.2-8 Relationship between blank holding force and max punch load

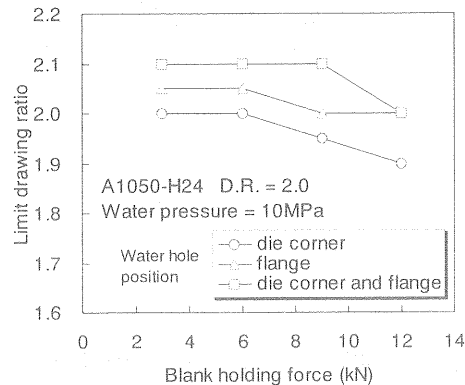


Fig.2-9 Relationship between blank holding force and limit drawing ratio

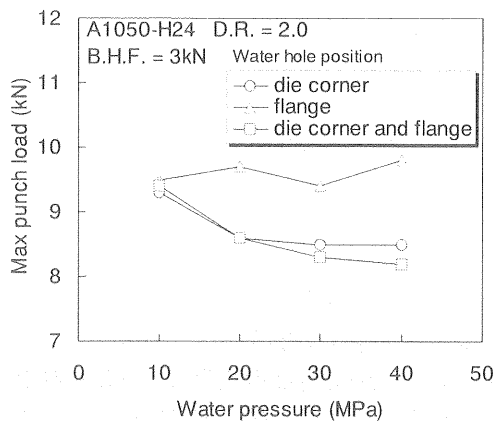


Fig.2-10 Relationship between water pressure and max punch load

配したダイスでは、ダイス表面全域で潤滑が良好となるため荷重は低い。

Fig. 2-8はしわ押さえ力と最大パンチ荷重の関係を示す図である。肩部のみの潤滑ではしわ押さえ力の増加に従い荷重の増加の割合も大きくなる。これは肩部から噴射された潤滑剤がフランジ部分まで行き渡らないためである。一方、フランジ部のみの潤滑では、しわ押さえ力が比較的小さい場合パンチ荷重が最も大きくなる。荷重の上昇割合は肩部のみのものに比べ、フランジ部での潤滑状態が良好なため緩やかである。肩部とフランジ部の両方に潤滑ノズルを配した場合、パンチ荷重が全体的に小さくなる。これは肩部の潤滑とフランジ部の潤滑状態がともにより良好となるためである。以上のことから潤滑用ノズルをダイス肩部及びフランジ部の両方に配した場合が、最もよい潤滑状態が得られるといえる。

しわ押さえ力と限界絞り比の関係をFig. 2-9に示す。ノズルの位置にかかわらず、しわ押さえ力の増加に従い限界絞り比は低下している。しかし、フランジ部のみの場合では限界絞り比の低下は0.05にとどまっている。これはフランジ部分の潤滑状態が良好となるためである。一方、両方に潤滑ノズルを設けた場合、しわ押さえ力が小さい場合には3パターン中最高の限界絞り比2.1に達している。

Fig. 2-10は潤滑剤に加える液圧と最大パンチ荷重の関係を示す。フランジ部のみの潤滑ではダイス肩部での潤滑状態が悪いためパンチ荷重が大きくなる。また液圧を上げてもこの傾向に変わりはない。一方、ダイス肩部に潤滑ノズルを配したものではその部分の潤滑が良くなるため液圧を上げるによりパンチ荷重を低く押さえることが可能である。また水圧が20MPa程度で、ほぼ荷重が最低となることから、この程度の水圧で理想的な潤滑状態が達成されたものと考えられる。

## おわりに

ポンチに代用し超高压ガスを用いた板材の穴あけ加工機と、高圧水を潤滑剤として用いた深絞り加工機を試作し、

その可能性と加工法における特徴を明らかにした。このように、既成概念に囚われることなく、超高压流体を従来の剛体工具に代用することにより、塑性加工法の拡大を示す一つの指針となれば幸いである。

この研究は天田金属加工機械技術振興財団の援助(AF-1991018, AF1999908)によってなされたことを記すとともに、同財団に感謝の意を表します。

## 参考文献

- 1) T. Sano: J. Mater. Process. Technol., 30-3(1992), 341-346
- 2) 莫健華, 村川正夫: 塑性と加工, 39-448(1998), 31-35.
- 3) J. Harding: Proc. 2<sup>nd</sup> Int. Conf. H.E.F. (1997), 4-8.
- 4) 村田眞: 軽金属, 43-12(1993), 709-714.
- 5) 村田眞: 塑性と加工, 35-402(1994), 829-834.
- 6) 中村和彦: 塑性と加工, 41-471(2000), 84-88.
- 7) 日経メカニカル, (2001, 3), 日本経済新聞社, 74.
- 8) 山崎雄司・由田征史: 48回塑加連講論, (1997), 341-342.
- 9) 山崎雄司・由田征史: 49回塑加連講論, (1998), 349-350.
- 10) 後藤学・山下実・鈴木淳: 51回塑加連講論, (2000), 405-406.
- 11) 後藤学・山下実・鈴木淳: 平13塑加春講論, (2000), 405-406.
- 12) 鈴木弘: 塑性加工(改訂版), 株式会社裳華房, 263.
- 13) 荻野圭三: 表面の世界, 株式会社裳華房, 58.