板材の穴拡げにおける変形限界ひずみ*

後藤 學^{*1}, 林 哲 録^{*2}, 三 沢 正 幸^{*3}

Forming Limit Strains of Sheet Metals in Bore-Expanding Process

Manabu GOTOH, Cheal-Rok LIM and Masayuki MISAWA

The bore-expanding process is performed on commercially pure aluminum (Al-0 and Al-1/4H) and 60/40 brass (Bs-0 and Bs-1/4H), and an aluminum alloy (A5182-0). Except for in the case of Al-1/4H, breakage (or the localized neck) starts at the rim of the bore and extends obliquely to the rim circumference. The issue of limiting strain for this case is raised to some extent when compared with that in uniaxial tension. We refer to this phenomenon as "strengthening due to constraint effect by surrounding material". To verify this point, strain distributions along the radial line are measured to determine whether or not the steep negative gradient of hoop strain exists. The constraint effect is greater for a steeper gradient. As for Al-1/4H, breakage starts at the point 3 mm from the rim edge and extends along the radial line. The strain gradient around this point is almost 0 and thus little constraint effect exists. Moreover the state consists almost entirely of in-plane strain with no radial strain. This is why breakage starts at an inner point. It is emphasized that most breakage conditions derived thus far for a uniform field should be employed not at one point but over a range for breakage judgement, especially in the case where the localized neck extends along the direction of negative strain gradient. The effect of planar anisotropy on the direction of the starting point of the breakage is discussed. It is also emphasized that appearance of the localized neck (localized-type instability) may precede diffuse-type instability in bore-expansion with a small-diameter bore, and that localized-type instability predominates to induce breakage. Finally, the critical bore diameter such that the punch penetrates through the sheet without breakage is discussed.

Key Words: Plastic Forming, Press Working, Sheet Metal Forming, Bore-Expanding, Forming Limit Strain

1. 緒 言

金属板材の変形限界ひずみに関しては、従来実験・理論の両面から多くの研究が行われている^{(1)~(6)}。しかし、特に理論的考察の多くは一様変形が前提となっている。一般のプレス成形に見られる応力・ひずみに勾配が存在する場合の限界条件に関する研究は非常に少ない。とはいえ、あまり複雑な変形を対象にしては、明確な結論を得ることは困難である。応力・ひずみ勾配が変形限界ひずみに特に影響を与えるのは、局部くびれの進展方向に応力・ひずみレベルが急激に減少する場合であろう。その種の場合で比較的単純な成形として、穴拡げ成形が考えられる。

穴拡げ成形は、プレス成形の一つとして基本的で、また大変よく行われている。この成形法だけについても従来様々な観点から多くの研究がなされている。破

断問題を論じた研究もいくつかあり^{(7)~(11)}、荷重最大条件による限界条件⁽⁷⁾、寸法効果⁽⁸⁾、臨界穴拡がり率⁽⁹⁾および面内等方性仮定下の異方性理論の検討⁽¹⁰⁾などがなされている。破断条件との関連で、拡散型の塑性不安定条件を綿密に検討した例もある⁽¹¹⁾。

本論文では、平頭剛体ポンチを用いた穴拡げ成形における破断問題について広範に検討した。すなわち、破断の形態、穴縁付近のひずみ分布とひずみ履歴、そして限界ひずみを測定し、単軸引張下のデータと比較しつつ、板厚や穴径の影響などについて検討し、ひずみ勾配の影響について従来とは異なった視点から考察した。また、穴縁(近傍)での破断個所の方向の面内異方性との関連や、ポンチすり抜け限界の穴径などについても検討した。さらに、特にひずみ勾配がある場合の、変形の数値シミュレーションなどにおける理論的な破断予測法や、穴拡げにおける拡散型不安定と局部くびれの関係などについて考察した。

* 原稿受付 平成4年12月3日。

^{*1} 正員、岐阜大学工学部(〒501-11 岐阜市柳戸1-1)。

^{*2} 正員、岐阜大学大学院(同上)。

^{*3} 正員、岐阜大学工学研究科[現:トヨタ自動車(株)(〒471 豊田市トヨタ町1)]。

表1 材料の引張り特性値

Material		t mm	$\bar{r}$	K MPa	$\bar{n}$	U.T.S. MPa
Al 1050	O	0.3	0.949	149	0.246	84.3
		0.6	0.981	155	0.256	87.2
		1.0	0.898	161	0.272	85.9
	1/4H	0.3	1.336	142	0.145	95
		0.6	1.234	125	0.039	107
		1.0	1.243	125	0.062	100
Al 5182	O	1.0	0.578	549	0.318	273
Brass 60/40	O	0.3	1.029	851	0.421	384
		0.6	0.958	862	0.439	382
		1.0	0.987	844	0.440	384
	1/4H	0.3	0.950	743	0.377	368
		0.6	0.980	751	0.313	396
		1.0	1.019	700	0.324	378

t: Thickness

 $\bar{r}$: Mean r-value; $\bar{n}$: Mean n-valueWork hardening property: $\sigma = K\epsilon^n$

U.T.S.: Ultimate Tensile Strength

表2 実験条件

Nominal thickness mm	0.3	0.6	1.0
Diameter of punch mm	40.0		
Die profile radius mm	6		
Punch profile radius mm	4		
Diameter of die hole mm	42.2		
Diameter of clamp mm	64.4		
Punch speed m/s	2.5×10^{-5}		
Lubricant on punch	Bees-wax		

めに、マイクロダイヤルゲージを用いて、穴縁を含まない標点の実験前後の板厚を測定した。測定精度はいずれも $\pm 1 \mu\text{m}$ である。この場合、局部くびれが発生する直前にポンチ荷重を除荷し、その時点での板厚を測定した。以上の測定を同一の試験片形状につき6枚行い、その平均値を採用した。

本実験では、試験機の本体の上部から目視観察し、局部くびれの発生した時点をもって破断と判定した。この時破断部はすでに局部くびれを伴っており、限界ひずみを精密に測定することはできない。ここでは、多少の誤差の介在を許して、破断部近傍におけるひずみをもって限界ひずみとした。

2・4 ひずみ経路測定法 破断位置付近のひずみを追跡するために、‘初期標点間距離及び初期板厚測定→1段階負荷→除荷→1段階標点間距離及び板厚測定→2段階負荷→除荷→・・・→限界まで負荷→標点間距離及び板厚測定’の手続きにより、ひずみ経路を測定する。この過程で、板厚の測定のために除荷するごとにミツロウをアセトンで十分に拭きとり、再試験時に塗り直した。

また、穴拡げ試験での限界ひずみと比較・検討するために、単軸引張りでの限界ひずみも求めた。穴拡げ試験における測定と同様の手続きで、板幅ひずみ ϵ_b と板厚ひずみ ϵ_t を測る。その後、体積一定則によって $\epsilon_s = -(\epsilon_b + \epsilon_t)$ として、伸びひずみ ϵ_s を算出した。

3. 実験結果及び考察

3・1 局部くびれ発生の様子 すべての板厚をとおして、Al軟質材と黄銅では、局部くびれは穴縁上で発生した。一方、Al-1/4Hでは穴縁から3mmほど離れた内部点で発生した。その様子を図1に示す。

図1より、穴縁から局部くびれが発生する場合は、穴縁に対してある角度をなすが、やや進展後は半径線に沿うようになることがわかる。これは、穴縁では円周方向が引張り軸のほぼ単軸引張り状態であること、単軸引張りでの局部くびれは引張り軸に斜交して発生することを考えると諾ける。また、穴縁からやや離れ

2. 実験方法

2・1 実験装置及び供試材 剛体ポンチによる穴拡げ成形には、市販の深絞り試験機を用いた。その際、多ペン・レコーダによって、ポンチ荷重-ポンチストローク関係を自動記録した。

供試材は、市販の、公称板厚 0.3、0.6及び1.0mmの純アルミニウム板と、黄銅板(60/40)の軟質材及び1/4硬質材、そして公称板厚1.0mmのアルミニウム合金(A 5182-O)である。表1に、これら供試材の引張り特性値を示す。同質材では、Al-1/4Hにおいて、板厚0.3mm材が他に比しn値が際立って大きい。

直径80mmの円形素板の中心に穴を開け、その穴縁のばりをサンドペーパーで除去した。穴径は、各材質について 6, 8, 10, 及び 12mmの4種類とした。さらに、ポンチ荷重-ストローク曲線を得るために数種類、またポンチすり抜け限界を得るために各材質・各板厚について適当な穴径のものを数種類用意した。

2・2 実験条件 おもな実験条件を表2に示す。直径D=40mm、肩半径 $r_p=4\text{mm}$ の円平頭ポンチ及びD=42.2mm、クランプ部D=64mm、肩半径 $r_a=6\text{mm}$ のダイスを使用した。ポンチ速度は約 0.025mm/secの低速で行った。また潤滑剤はポンチ頭部にミツロウを塗布した。

2・3 ひずみ測定法 まず予備試験を行い、それぞれの材質の試験片の破断発生個所を調べた。各材質に対し予備実験で確認した破断方向に、円の中心を通るように十字のケガキ線を引く。そして、穴縁から1mm間隔で各半径方向へ3本のケガキ線を引いて、穴縁を含めた標点の変形前後の距離を工場顕微鏡で測定し、円周方向ひずみ ϵ_θ 、半径方向ひずみ ϵ_r を算出した。また、穴縁での板厚ひずみ (ϵ_t) の分布を求めるた

た位置で発生する場合は、当初から半径線に沿っている。これは、後述するように、局部くびれ発生点ではほぼ平面ひずみ状態であることと関係がある。

3・2 限界ひずみの検討 図2に、各種材質及び板厚に関して、穴拡げにおける穴縁でのひずみ経路と変形限界点（白抜きマーク）を、単軸引張りにおけるそれら（黒塗りマーク）と共に示した。ここに、 $\varepsilon_1 = \varepsilon_\theta$ 、 $\varepsilon_2 = \varepsilon_r$ である。 ε_1 はちょうど穴縁上での値であるが、測定法上 ε_2 は穴縁上と1mmの間の平均的な値である。Al-1/4H以外について、やや小さめの白抜きマークは、穴縁上では単軸引張り状態のはずなので、その状態に推定換算してプロットし直した限界点である。また、図示の便宜上、穴拡げに関しては穴径6mmの場合について示してあるが、他の穴径の場合も同様

となることを確かめてある。さらに、Al-1/4Hの場合、前述のように局部くびれ、したがって破断はちょうど穴縁から始まるわけではないが、比較の便宜上穴縁について図示してある（破断発生位置に関する同様の図は後出の図5）。

3・2・1 ひずみ経路の検討 まず、実測されたひずみ経路に注目する。図2より、いずれの材質及び板厚についても、穴縁でのひずみ経路は比較的直線的である。そして、ひずみ比 $\alpha = \varepsilon_2 / \varepsilon_1 (= \varepsilon_r / \varepsilon_\theta)$ は単軸引張りに比べて平面ひずみ（縦軸）寄りである。上述したように、図2に示されているのは、厳密には穴縁そのもののひずみ経路ではないが、穴縁に非常に近接した点での経路には違いない。 ε_2 としてわずか0.5mm穴縁から入った点での値を採用したことで、図2に見られるほどに、ひずみ経路が単軸引張りから離れることがむしろ注目される。これは、穴縁近傍で応力・ひずみ状態が大きく変化していることを示している。

3・2・2 限界ひずみの板厚依存性 次に、限界ひずみに注目する。穴拡げ及び単軸引張りとも、Al-1/4Hを除いて、板厚の増加に伴って限界ひずみが増加している。こうした変形限界ひずみの板厚依存性は、従来いわれているとおりである⁽³⁾。しかし、Al-1/4Hの場合、一番薄い厚さ0.3mm厚さの板材が最も大きな変形限界ひずみとなっている。この理由は、2・1節で述べたように、同じ1/4H材でありながら、0.3mm材のn値が他の厚さのものに比し、かなり大きいことにある（表1参照）。

3・2・3 限界ひずみに対するひずみ勾配の影響 次に、穴拡げと単軸引張りに対する限界ひずみの比較をする。これは、図2の各図において、同一記号のマークの白抜きと黒塗りを比較することでできる。簡

(a) 穴縁で発生した場合(材質:Al-O, 潤滑:ミツロウ)

(b) 穴縁から離れたところで発生した場合
(材質:Al-1/4H, 潤滑:ミツロウ)

図1 実験で発生した局部くびれの拡大写真(板厚1.0mm)

図2 ひずみ経路と変形限界ひずみ(穴拡げに関しては穴径6mmでの、穴縁でのひずみ経路)

単のため大きい方の主ひずみ(ε_1)の限界値で比較しよう。図(a)のAl-1/4Hを除き、ほとんど例外なく、穴拡げにおける限界ひずみが単軸引張りにおけるそれより大きいことがわかる。

図3は、各種比例負荷(ひずみ比 α = 一定)に対する限界ひずみを結んで得られる、一般的な変形限界ひずみ線図(比例負荷FLD; prop. Forming Limit Diagram)を模式的に示したものである⁽¹⁾。この図のように、 ε_1 の限界値でみると、 $\alpha = -1/2$ (単軸引張り)から $\alpha = 0$ (平面ひずみ)にかけて、変形限界ひずみは小さくなるのがごく一般的である。一般に、 $\alpha = 0$ から $\alpha \approx -0.5$ にかけての変形限界線図は、勾配-1の直線に近くなる^{(1)~(5)}。図2, (a)Al-1/4Hの図中の、縦軸上の×印は、このようにして推定した、この材料の平面ひずみ($\alpha = 0$)での限界ひずみの推定点である。

次に、図4は限界ひずみを相当ひずみ化し、これと n 値の関係を見たものである。ただし、穴拡げのうち

Al-1/4H以外の板材では穴縁上(単軸引張り状態)で破断するから、限界の ε_e をそのまま用いた。黒塗りマークが単軸引張りのデータである。図(a)にはA5182-Oのデータも加えてある。また、Al-1/4Hについては、局部くびれ発生個所における限界ひずみが、○などの記号で加えてある。

図4から、穴拡げで穴縁から破断発生する場合(Al-1/4H以外の材料)、穴拡げでの限界ひずみが単軸引張りでのそれを超えることが明瞭にわかる。(これを穴縁の強化作用と呼ぼう。)しかもその傾向は、特に黄銅において、 n 値が大きいほど顕著であると言える(O材と1/4H材の比較で)。Alについては、A1050-OやA5182-Oにおいて穴縁での強化作用が見られる。A5182-Oでは、 n 値の大きさに比し限界ひずみが低いことが注目される。この点については別報で検討する⁽¹²⁾。

図5に、Al-1/4Hについて、局部くびれ開始点でのひずみ経路と変形限界点を示した。ひずみ経路はほぼ平面ひずみ($\alpha \approx 0$)である。限界点は、上で図2(a)中に推定した破線と縦軸との交点(×印)に近い。この意味で、この点での強化作用はないことになる。

以上に述べた穴縁上での強化作用は、穴縁近辺での応力・ひずみ分布の特性に起因すると考えられる。そこで、特に破断発生直前でのひずみ分布を測定し、図6に示した。この図に見られるように、穴縁から半径線に沿って、ひずみがかなり急激に低下している。

すなわち、穴縁上で局部くびれ発生条件が成立するひずみ状態となったとしても、局部くびれが実際に生ずるときは、その影響が周辺のある範囲(特に局部く

図3 比例負荷変形限界ひずみ線図(模式図)

(a) Al

Equivalent strain at bore-rim in bore-expanding then when breakage occurs
Thickness mm
○ : 0.3
△ : 0.6
□ : 1.0

Equivalent strain at point from bore-rim by 3mm when breakage occurs
Thickness mm
● : 0.3
▲ : 0.6
■ : 1.0

Equivalent strain in uniaxial tension
Thickness mm
● : 0.3
▲ : 0.6
■ : 1.0

(b) Brass

図4 変形限界相当ひずみと n 値との関係

びれの進行方向)に及ぶことは避けられない。ところが、穴縁からすこし離れた、局部くびれの進行方向にあたる場所では、まだ局部くびれ発生条件が満たされていない。すなわち、穴縁からすこし離れた、ひずみレベルの低い部分が、穴縁上での局部くびれ発生

図5 穴縁から3mm離れた点における破断ひずみ (材質: Al-1/4H, 板厚0.3mm)

を遅らせることが考えられる。この現象は、周辺材料による‘拘束作用’と解釈される⁽⁸⁾。ここでは、この作用と破断についてさらに詳しく考察する。

図6によると、図(b)のAl-1/4Hを除いて、穴縁近傍のひずみの低下割合が大きいことのほか、穴縁からやや入ったところでもひずみレベルの落下は持続している。(縦軸の尺度が異なる。)特にn値の大きいBrass-Oにおいて、その傾向が顕著である。図2や図4に関して述べた、n値が大きいほど‘強化作用’ないし‘拘束作用’が大きいという知見は、こうしたひずみ分布の特徴によって、ある程度理解できよう。

‘拘束作用’の考えを補強するために、別のデータを示す。図7は、Al-Oに関するひずみ分布図で、穴径依存性を示している。この図では穴径の小さい場合ほど、穴縁近傍のひずみ勾配が急になっていることがわかる(とくに ϵ_θ)。この図に対応するものとして、図8にこの場合の破断箇所(穴縁上)のひずみ経路と限界点を示した(ただし、表示の都合上、 $\epsilon_2 = \epsilon_r$ は穴縁から0.5mmの点での値)。測定誤差の介入もあって

(a)Al-O

(b)Al-1/4H

(c)Brass-O

(d)Brass-1/4H

図6 穴拡げにおける破断直前の穴縁付近のひずみ分布(穴径6mm)

不明確なところもあるが、大体穴径の小さい場合に限界ひずみが高い傾向を示している ($\varepsilon_1 = \varepsilon_0$ の限界値で比較している)。これは、図7のひずみ勾配の大きさに対応しており、ひずみ勾配に起因する‘拘束作用’が、ひずみ勾配の大きいほど大きいことを示しているといえよう。すなわち、‘拘束作用’の存在がより詳細な形で裏付けられた。

なお、この種の拘束作用については直感的にも予想され、従来、特に文献(8)などにも記述がみられるが、

図7 破断直前でのひずみ分布の穴径依存性
(材質: Al-O, 板厚1.0mm)

図8 穴縁でのひずみ経路 (材質: Al-O, 板厚1.0mm)

以上のような実測データに基づく確認はない。

3・2・4 破断発生個所についての考察 次に、穴縁から約3mmの点で、平面ひずみ状態に近い個所においては、図3に見るように限界ひずみが低いので、穴縁上以外の破断発生個所となり得る。しかし、Al-1/4H以外の、n値が大きい場合は、拘束作用が穴縁からやや入ったところまで及ぶことと、ひずみレベル自体の低さのため、局部くびれ発生条件成立即破断とはならない。結局、もともとひずみレベルの高い穴縁上で優先的に破断するものと思われる。

一方、n値の低いAl-1/4Hの場合、図6.(b)に見るように、限界ひずみがもともと低いため、破断発生時におけるひずみレベルが穴縁上も含め全体的に低い。そのため、ひずみ勾配も大きくない。特に ε_0 の分布は、穴縁から約3mmの点付近でほとんど水平に近くこの点近傍では‘拘束作用’はほとんど存在しない。また $\varepsilon_2 \approx 0$ の平面ひずみ状態に近い。したがって、この点で局部くびれ発生条件が成立すれば、直ちに破断発生となる。このことは、前述のように、図2(a)中の×印と、図5中の限界点がほとんど等しいことによって裏付けられる。これが、この材料では穴縁から約3mm入ったところから破断発生した理由であろう。

従来破断発生個所に関する以上のような考察はない。

3・2・5 理論的取扱いに関する考察 緒言でも述べたように、破断ひずみの理論的予測法は例外なく一様応力・ひずみ場を前提としている。しかし、以上の知見から、そうした局部くびれ発生条件⁽⁴⁾などを、穴拡げのように局部くびれの進展方向に負の勾配を持つようなひずみ分布場に適用する場合、注意を要することがはっきりした。すなわち、この条件で破断発生と判断されても、‘拘束作用’が存在するため、実際にはまだ破断は発生しない。したがって、この条件による判定を一点について行うのではなく、ひずみ勾配の強さに応じたある範囲Lにわたって適用し、その範囲の全域で破断と判定された時点をもって、実際の破断発生とする、といったような補正が必要である。

図9 面内穴拡げにおける局部くびれ発生条件成立場所の進展例⁽¹³⁾
(弾塑性有限要素法解析; 平面応力; 初期穴径6.0mm; 外周を半径方向へ引張)

表3 破断発生個所の方角

Material	t mm	Angle from rolling direction and its probability	Governing factor estimated
Al-O (A1050-O)	0.3	0(37.2%), 90(62.8%)	r_{min}
	0.6	0(89.6%), 90(30.4%)	r_{min}
	1.0	0(74.6%), 90(25.4%)	r_{min}
Brass-O	0.3	0(55.5%), 90(44.5%)	r_{min}
	0.6	0(50.0%), 90(50.0%)	r_{min}
	1.0	0(63.5%), 90(36.5%)	r_{min}
Brass-1/4H	0.3	0(52.2%), 90(47.8%)	n_{min}, r_{min}
	0.6	0(58.3%), 90(41.7%)	$r_{min} ?$
	1.0	0(8.3%), 90(91.7%)	$r_{min} + n_{min}$
Al-1/4H (A1050-1/4H)	0.3		
	0.6	45 (100%)	n_{min}
	1.0		

r_{min} : Minimum value of r
 n_{min} : Minimum value of n (see Table 1)

例として、著者らによる有限要素法解析⁽¹³⁾を引用する。それによると、著者の一人が提案している破断判定式⁽⁴⁾を用いる場合、破断判定点列は当初穴縁上から半径線上をたどり、ややあってある角度で曲がり始める。その時点をもって実際の破断発生と判定すると、実験によく一致する、という結果を得ている。これは上の所論を裏付ける。その種の一例を図9に示した⁽¹³⁾。

一方、Al-1/4Hの例でも見られたように、ひずみ勾配があまりない個所については、一様応力・ひずみ場を仮定した破断判定式により、一点での判定で十分破断予測が可能である⁽¹⁴⁾。

3・3 穴拡げにおける破断発生個所の方角 局部くびれ（または破断）の発生個所は、各材料・板厚ごとに特定の方向である。発生頻度を含めて詳細に測定し、表3に示した。

このように、破断発生が特定方向に偏るのは、もちろん材質の面内異方性に起因する。表1には省略したが、引張り試験から得た面内異方性のデータを参照しつつ、破断発生の直接の引き金となっていると思われる材料因子を、表3の最右欄に記入した。ここに、 (n_{min}, r_{min}) とあるのは、両者が個々に同程度に効いている、と思われる場合であり、 $(r_{min} + n_{min})$ とあるのは、両因子が相乗して効いている、と思われる場合である。

この表より、軟質材では r_{min} が破断の引き金となり易いこと、1/4H材でも n 値が0.3を超える場合はいぜん r_{min} も効くが、 n_{min} の影響も無視できないこと、そして n 値が小さい場合は n_{min} が支配的因子となること、などがわかる。これは、軟質材では n 値の面内異方性は小さいが、焼鈍の程度が減るほどその面内異方性が増してくるため、と思われる。

3・4 拡散型不安定と局部くびれ 図10に、ポンチ荷重のポンチ行程に対する変化の様子を例示し

図10 破断時までのポンチ荷重
 (材質: Brass-1/4H, 板厚0.6mm, 潤滑: ミツロウ)

た。

穴拡げにおける拡散型不安定は、ポンチ荷重が最大になる前の、最大付近で生ずるとされる⁽¹¹⁾。それゆえ、通常穴拡げの成形限界は最大荷重点で決まる、といわれる。この考えでいけば、最大荷重点まで破断せずとも、ポンチすり抜けまで破断せずに加工可能、ということになる。

しかしながら、図10に示した例でもわかるように、cやdのように荷重が最大点を過ぎて落下しつつある状態で、破断が生ずることもめずらしくない。

従来の考えは、拡散型不安定が破断を律する、としており、図10の例はその考えが誤りであることを示している。同図によれば、穴径が小さいほどポンチ荷重は高い。穴径が最小のaの例では、破断が最大荷重点よりかなり前に生じている。よって、拡散型不安定発生以前に、穴縁に局部くびれを生じて破断したと考えられる。すなわち、この例は、局部型不安定が拡散型に先行する場合があることを示す。bの例は、拡散・局部の両不安定がほぼ同時に発生し、その時点で破断したと考えられる（ほぼ荷重最大点）。穴径がさらに大きいcやdの例は、拡散不安定成立後、かなり荷重が落下した時点で穴縁に局部くびれが生じ、破断に至ったものである。

3・5 ポンチすり抜け限界 破断せずポンチがすり抜ける限界の穴径を図11に示した。軟質材で板厚が大きいものほど、限界穴径が小さく、バーリング加工に適していることがわかる。図4.を参照すると、同一板厚では穴縁での限界ひずみが大きいものほど、限界穴径は小さく、理解できる。ただし、A5182-Oは例外であり、Al-1/4Hより限界穴径は大きい。

しかし、異なる板厚どうしで比較すると、必ずしも

図 11 ポンチすり抜きの限界穴径

限界ひずみと限界穴径はタイアップしない。とくに、Al-1/4Hでは、限界ひずみの大きさの大小と全く無関係に、板厚の順に限界穴径が小さくなっている。限界穴径の板厚依存性（板厚小ほど大）は、いずれの材料に関しても同様である。Alでは0.6mm以上の、黄銅では0.6mm以下の板厚で、限界穴径の板厚依存性は強い。

5. 結 言

本研究で得られた主な結論を以下に記す。

- (1) 供試材のうちAl-1/4Hを除き、局部くびれ（破断）発生個所はすべて穴縁上で、穴縁に斜交する方向に入り、やがて半径線に沿う方向に進展する。Al-1/4Hmmでは穴縁から約3mm入った個所から発生し、当初から半径線に沿う。
- (2) 破断が穴縁上から発生する場合の変形限界ひずみは、単軸引張り限界ひずみなどから予想される値よりかなり大きい。これは周辺材料による‘拘束作用’に起因した強化である。穴縁から約3mm入った点から発生する場合（Al-1/4H）は、限界ひずみは予想値にほぼ一致する。
- (3) 穴縁近傍の円周方向ひずみ（ $\varepsilon_\theta > 0$ ）の分布は、穴縁上から半径線に沿って負の勾配をもつが、この負の勾配が強いほど、またn値が大きいほど拘束作用が大きい、などがわかった。
- (4) 穴縁から約3mm入ったところで、半径方向ひずみ（ ε_r ）がほぼ0となる平面ひずみ状態の点がある。Al-1/4Hでは、その点付近のひずみ勾配がほとんど0で、拘束作用がなく、全体的にひずみレベルが低いこととあいまって、その点から破断が発生したものと解釈した。
- (5) 多くの破断判定の理論式（局部くびれ発生条件式）は、一様応力・ひずみ場に関して導かれている。

穴拡げのような、局部くびれ進展方向に負のひずみ勾配を生ずるような場にその種の判定式を用いるときは、一点での判定ではなく、ある長さにわたって判定式の成立をチェックするといった注意が必要であることを指摘し、数値例を示した。

- (6) 穴縁（近傍）での破断発生個所の、圧延方向からの角度を詳しく調査した。軟質材（O材）ではn値の面内異方性が小さいので、r値の最小方向となる。焼鈍の程度が減るにつれn値の面内異方性が増し、n値の最小方向となってくる。つまり、破断の主支配因子が r_{min} から n_{min} へと変化する。
- (7) 穴拡げでは、局部くびれ（局部型不安定）発生が拡散型不安定に先行することがある（とくに、穴径が小さいとき）。拡散型不安定は変形形状全体にかかわるが、通説のように、穴拡げの成形限界は最大ポンチ荷重点（拡散型不安定点近傍）で支配されるのではなく、破断の直接の契機は局部くびれの発生である。
- (8) 破断せずにポンチがすり抜ける限界の穴径を調査した。板厚が異なる場合、限界ひずみと限界穴径は相関しないこと、Alでは0.6mm以上、黄銅では0.6mm以下の板厚で、限界穴径の板厚依存性（板厚小で限界穴径大）が強いこと、などを示した。

参 考 文 献

- (1) 後藤学（解説），機械の研究，33-3(1981)，369-374；33-4(1981)，600-606。
- (2) 後藤学・ほか2名，塑性と加工，27-301(1986)，268。
- (3) 後藤学，機論，A，53-490，A(1987)，1141。
- (4) 例えば，後藤学，同上，49-437，A(1983)，92。
- (5) 後藤学，同上，A，56-526，(1990)，1421。
- (6) Gotoh, M., JSME Int., Ser. I, 34-3(1991)，297。
- (7) 益田・戸沢，機論，27-178(1961)，776。
- (8) 中川・吉田，理研報告，44-2(1968)，91。
- (9) 間島・ほか2名，第26回塑性加工連合講演会講演論文集，(1975)，233。
- (10) Kurosaki, Y., and Matsumoto, M., Advanced Technology of Plasticity 1987, Vol. II, (ed. K. Lange), (1987), Springer-Verlag, 689。
- (11) 山田嘉昭・青木至，塑性と加工，7-67(1966)，405。
- (12) Gotoh, M., Misawa, M. and Lim, C. R., JSME Int. J., Ser. A, Vol. 36, No. 2(1993)，172。
- (13) 黒田吉孝・ほか2名，平2塑性加工春季講演会講演論文集II，(1990-5)，433。
- (14) 岩田徳利・ほか2名，塑性と加工，33-381(1992)，1196-1202。