

## 金属薄板の純粋張出し深さに及ぼす板厚の影響\*

小林政教\*<sup>1</sup>, 黒崎 靖\*<sup>2</sup>, 河合 望\*<sup>3</sup>Effect of Thickness on the Pure  
Stretchability of Sheet Metals

Masanori KOBAYASHI, Yasushi KUROSAKI, and Nozomu KAWAI

Recently, the thinning and strengthening of sheet metal is of importance for conserving natural resources and energy. In this paper, the effects of the thicknesses, lubricants and temper of metals on the pure stretchability of aluminum sheets are studied. The pure stretchability of sheet metals deteriorates with a decrease in thickness. The optimum frictional coefficient, which gives a maximum of critical forming depth, was found in this experiment. The thickness dependence of the critical forming depth was analytically calculated by means of Hill's diffuse neck criterion, Yamaguchi's method based on M-K theory and the criterion proposed by Gotoh, and the results were discussed in detail.

**Key Words:** Pure Stretch Forming, Thickness Effect, Aluminum Sheet, Roughness, Effect of Frictional Coefficient

## 1. ま え が き

近年, 省資源省エネルギーの観点から, 軽薄短小という言葉で代表されるように各種機械部品の軽量化が計られている。そのため例えば, 機械部品の成形では, 素板の強化と薄肉化が大きな課題となってきた。このように材料性質と板厚寸法が同時に変化する場合, 成形性がどのように変化するかは極めて重要な問題となりつつある。特に材料の薄肉化は, 破断限界の低下, しわの発生, 成形性の劣化をもたらすものと考えられる。成形性や限界ひずみへの板厚の影響については, 引張試験について, 宮野<sup>(1)</sup>, 山口ら<sup>(5)</sup>が, 複合成形について, 宮川ら<sup>(2)</sup>, 西川<sup>(3)</sup>が報告している。山口ら<sup>(9)</sup>は表面あらさを不整として導入する不安定条件を用いて板厚依存性を検討している。小原ら<sup>(10)</sup>は実験によって, 後藤ら<sup>(14)</sup>は理論によって FLD に及ぼす板厚の影響について報告している。しかし, ブランク周辺部を完全にクランプした純粋張出し加工において張出し性に及ぼす板厚の影響を解明した報告は見当たらない。

い。

そこで, 本研究では金属薄板の純粋張出し加工を取り上げ, 純粋張出し深さへの板厚の影響について探るとともに潤滑および材質との関係をも明らかにする。

## 2. 実 験 方 法

**2・1 供試材および機械的性質** 使用した材料は工業用純アルミニウム (JIS 規格 A 1050) の軟質材および半硬質材 (H 24) で, それぞれに対し板厚 0.2, 0.6 および 1.0 mm の 3 種類を準備した。軟質材は, 半硬質材を 350°C, 1 時間焼なましたものである。これらの材料の単軸引張特性値を表 1 に示す。ここに, 半硬質材の  $n$  値は一樣伸びが非常に小さく引張試験から求めることが困難であった。そこで液圧バルジ試験も行い, それから求まる相当応力-相当ひずみの関係から  $n$  値を求めた。また, 半硬質材の板厚 0.2 および 0.6 mm の  $r$  値も, 伸びひずみが非常に小さく引張試験から求めることが困難であったので, Chan ら<sup>(13)</sup>の解析より, 引張軸とくびれ (imperfection) とのなす角度から  $r$  値を求めた。それらの結果および軟質材の結晶粒径の測定結果を表 1 にまとめて示す。これらの結果をながめると, 板厚が変化すると,  $r$  値と全伸びはかなり変化するが, 引張強さ,  $F$  値,  $n$  値および結晶

\* 平成元年 3 月 10 日 東海支部第 38 期総会講演会において講演, 原稿受付 昭和 63 年 5 月 6 日。

<sup>1</sup> 正員, 豊田工業高等専門学校 (〒471 豊田市栄生町)。

<sup>2</sup> 正員, 三重大学工学部 (〒514 津市上浜町)。

<sup>3</sup> 正員, 名古屋大学工学部 (〒464 名古屋千種区不老町)。

粒径はほぼ類似の値となっていることがわかる。したがって、実験結果には、板厚と同時に材料性質の影響も含まれるが、後掲の図3または図7の結果にみられるように同一調質材の材料性質の範囲内では、板厚の影響のほうが他の性質に比べ優勢と考えられる。

**2.2 純粋張出し試験** 使用した純粋張出し実験装置は、既報<sup>(8)</sup>と同じであり、フランジ部を2条のビードにより完全にクランプできる。その試験条件等を表2に示す。ポンチは直径40 mmの球頭であり、ダイス穴径43 mm、ダイス肩半径5 mmである。

**2.3 摩擦試験** ブランクとポンチ間の摩擦が限界張出し深さに大きな影響を及ぼすことは既報<sup>(8)</sup>において明らかにした。したがって、板厚が変化した場合、限界張出し深さへの摩擦の影響を調べるため表3に示す4種類の潤滑材を用いた。そして、張出し加工のポンチ面における摩擦状態をできるだけシミュレートできる摩擦試験機により摩擦係数を測定した。試験機の原理図を図1に示す。(詳細は既報<sup>(8)</sup>を参照)。実験条件および摩擦係数 $\mu$ の測定結果を表3に示す。板厚による $\mu$ の相違は非常に小さかったので、表には軟質材、半硬質材別に各板厚の平均値を示す。

表1 試料の引張特性値および結晶粒径  
(工業用純アルミニウム)

	Uniaxial test						Equi-bi-axial test		Grain size d mm
	t mm	ST+ MPa	E++ %	F MPa	n	r	F MPa	n	
Half-hard	0.2	148	1.5	—	—	1.15*	168	0.100	—
Half-hard	0.6	143	3.3	—	—	0.65**	193	0.063	—
Half-hard	1.0	128	6.6	—	—	0.66	191	0.091	—
Soft	0.2	88	35.0	163	0.282	1.61	138	0.248	0.023
Soft	0.6	88	36.2	166	0.279	1.12	150	0.253	0.024
Soft	1.0	85	47.5	161	0.280	0.93	152	0.245	0.023

F- and n-value are material constants in  $\sigma = F\epsilon^n$   
 t:Nominal thickness  
 +:Ultimate tensile strength  
 ++:Total elongation(Nominal strain)  
 \*:Calculated value(13)

表2 純粋張出しにおける加工条件

Tool Material	Punch and Die	SK-5(JIS norm)
punch	Diameter	2r <sub>1</sub> 40 mm
	Profile Radius	r <sub>p</sub> 20 mm (hemi-spherical)
	Roughness	R <sub>max</sub> 0.8 μm
Die	Profile Radius	r <sub>d</sub> 5 mm
	Aperture Diameter	2r <sub>2</sub> 43 mm
Clamping Force		76 kN(7.7 tf)
Punch Travel Speed		about 0.15 mm/S
Room Temperature		19~25°C

3. 実験結果および考察

**3.1 引出し深さに及ぼす板厚、摩擦および材質の影響** 図2はテフロン膜にマシン油を塗布した潤滑によって軟質材を張出した場合に得られたポンチ力-ポンチ行程線図の一例を示したものである。板厚1.0 mmの場合、ポンチ力は最大点⑨に到達した後、ただちに急激に低下する。この急激低下点⑩の張出し深さを $(h_{cr})_{exp}$ と表示し、張出し性の検討対象とした。この時点で、ブランクに板厚方向に貫通したき裂が目視により観察できた。⑨と⑩の行程差は極めて小さく、第一近似としては両者は同一とみることができる。図に示したように、板厚が異なっても、同様な結果が示されている。図中の行程番号は、後掲の図5の説明において引用する。

図3は $(h_{cr})_{exp}$ と板厚との関係を各潤滑材についてみたものである。 $(h_{cr})_{exp}$ をポンチ半径 $r_1$ (=20 mm)で除して無次元化してある。図3によれば材質および潤滑材によらず板厚が薄くなれば、限界張出し深さは減少している。

また、 $(h_{cr})_{exp}/r_1$ を摩擦係数 $\mu$ に対して示したのが図4である。各実験点は、便宜的に直線で結んである。

表3 摩擦係数值(実験値)

Conditions:  
 sliding distance 2 mm  
 Relative sliding velocity 0.03 mm/S  
 Normal pressure about 20 MPa(2 kgf/mm<sup>2</sup>)  
 Specimens Commercially pure aluminum  
 Soft and Half-hard  
 Thickness 0.2, 0.6 and 1.0 mm

Lubricants	A1050-0	A1050-H24
PTFE* + Bt**	0.02	0.01
PTFE* + Machine Oil	0.03	0.03
Mixture of graphite & tallow	0.04	0.04
Rosin	0.54	0.57

\*:PTFE Polytetrafluoroethylene sheet  
 (nominal thickness is 0.05 mm)  
 \*\*:Bt Bright stock(high viscous oil)

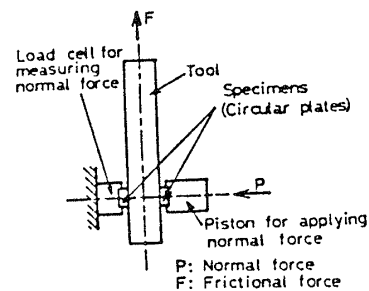


図1 摩擦係数測定装置原理図

軟質材の場合、比較的低摩擦領域で、張出し深さを最大にする  $\mu$  が存在し、この最適  $\mu$  は板厚が大なるほど小さくなる傾向を示す。これに対して、半硬質材の場合、板厚が大きいほど、この最適  $\mu$  は逆に増加するように見えるが、これはそれほど明りょうでない。

**3.2 張出し変形の進行に伴うブランク表面の性状変化** 本実験では、ほとんどの場合破断に先行してくびれが観察された。そのくびれ発生過程を明らかにするために、張出し変形の進行に伴うブランク表面の性状変化を詳細に観察してみた。図5は図2で  $t_0=1.0$  mm の場合について、破断予定部の表面プロファイルの変化を表面あらさ計によりトレースした結果の一例を示す。図中の破線は、板表面を球面と仮定した場合の仮想曲線を示している。また、図に付記する番号は、図2に示すポンチ力-ポンチ行程曲線に付記する番号と

対応している。図5より、次のことがわかる。張出し変形の進行とともに表面はしだいに粗面化してくる。そして粗面化と同時にいわゆるあらさとは異なる、長波長の凹凸曲線が出現してくる。この長波長の凹凸がくびれに発展し、ついには破断亀裂に至る。このような結果は Tadros ら<sup>(7)</sup> または小林ら<sup>(4)</sup> によっても報告されている。なお、ブランク内面では、外表面に比べ、この長波長の凹凸は多少遅れて発生する。

従来、純粋張出し性を論ずる場合、限界張出し深さとして、荷重最大時もしくは、目視によるくびれ発生時の深さが採用されてきた。前述の  $(h_{cr})_{exp}$  以外にくびれ発生時の張出し深さ  $h_{neck}$  を図5に示すプロファイル変化から求め、検討の対象とした。図6は、図5に示したあらさプロファイルの一部をモデル的に示すものである。厚さ方向および幅方向における仮想曲線からのずれの量を  $D$  および  $W$  とする。また、 $W$  のほぼ中央に現れるくぼみの幅および深さ寸法をそれぞれ  $W_0$  および  $D_0$  と表示する。図5の変形過程をみると、第4行程において、ブランク外表面プロファイルは、仮想曲線からずれ始め、以後  $D$ 、 $W$  とともに増していく。これはいわゆる拡散くびれといわれるものと考えられるが、この発生行程の同定は必ずしも容易ではない。第7行程以後になると、 $W_0$  はほぼ一定で  $D_0$  が顕著に増加していく。このような状態を局部くびれ発生とみなして、この行程を  $h_{neck}$  とした。他の材質、板厚の場合もほぼこれに準じて、 $h_{neck}$  を求めることができた。

図7は、一例として、テフロン膜にマシン油を塗布した場合の、 $(h_{cr})_{exp}/r_1$  および  $h_{neck}/r_1$  の板厚依存性を示すものである。 $h_{neck}$  は  $(h_{cr})_{exp}$  に比べわずかに小

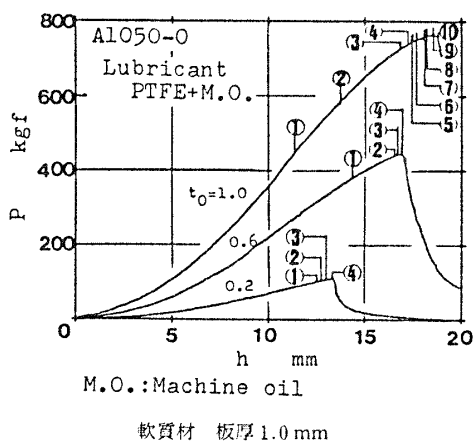


図2 ポンチ力-ポンチ行程線図(実験)

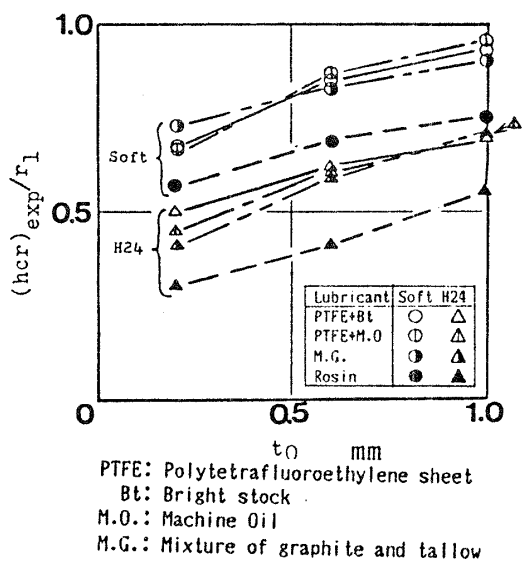


図3 限界張出し深さに及ぼす板厚、摩擦および材質の影響

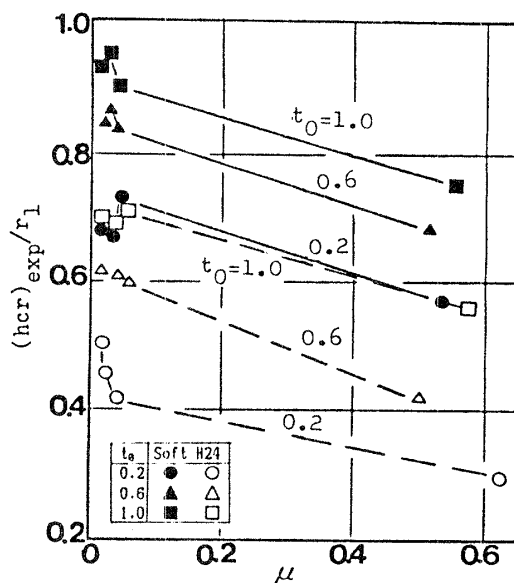


図4 限界張出し深さに及ぼす摩擦の影響

さく、くびれ発生後ただちに破断することがわかる。この結果は、潤滑材が異なっても同様である。

4. 理論的検討

本節では、限界張出し深さの理論値について次の三つの考え方によって考察してみる。

(1)  $h_{diff}$  拡散くびれ発生時の張出し深さ  $h_{diff}$  を求めるため、既報<sup>(8)</sup>に詳述したように、Hillの異方性降伏条件とHillの拡散くびれ条件を用いて、数値解析を行う。なお、計算の際の  $F$  および  $n$  値については、表1の等二軸引張試験値を用いた。この計算では、膜理論を用いているため、後に示すように板厚依存性は、原理的に求められない。そこで、板厚依存性に対する考え方として現在提案されている二つの考え方について以下検討する。

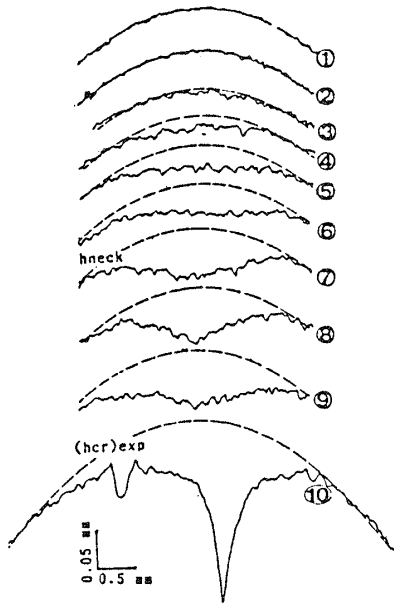
(2)  $h_{Rmax}$  山口ら<sup>(9)</sup>の考え方に従って、表面あ

らさを初期不整の原因として計算を行う。Hillの拡散くびれ発生行程を求め、その行程以後は拡散くびれ発生部の表面あらさを初期不整として、M-K理論により限界ひずみを求め、拡散くびれ発生部がこのひずみに到達したときの張出し深さを  $h_{Rmax}$  と表示する。

その場合の初期不整値  $f_0$  は、次式のようになる。

$$f_0 = 1 - 2 \cdot R_{max} / t_0 \dots\dots\dots (1)$$

また、拡散くびれ発生部の表面あらさは、図8に示すように張出し部の相当ひずみと表面あらさの実験関係から求める。図によると、多少のばらつきはあるものの、この関係は材質によって定まり、板厚の影響は



Al050-0  $t_0 = 1.0$  mm  
Location is the range of 12~14 mm from pole  
 $h_{neck}$  : Punch travel at necking(experiment)  
 $(hcr)_{exp}$  : Punch travel at fracture

図5 張出しブランクの表面プロファイルの変化

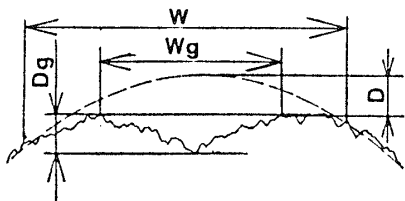


図6 ブランクの外表面プロファイル(モデル図)

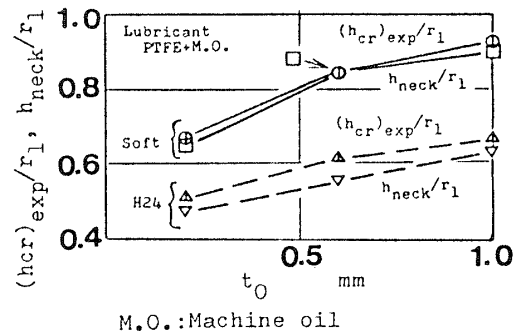
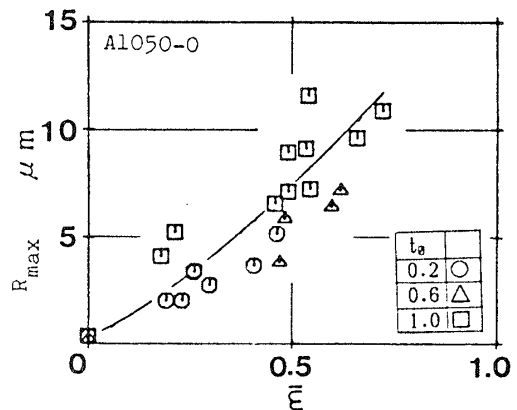
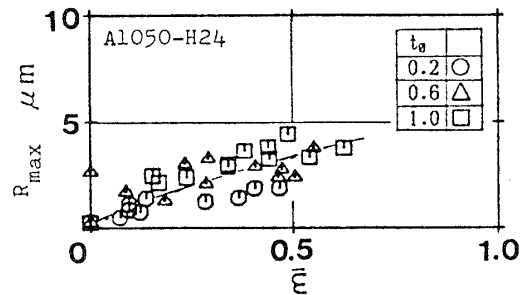


図7 張出し深さに及ぼす板厚の影響(実験)



(a) 軟質材



(b) 半硬質材

図8 ひずみの進行に伴う粗さの変化

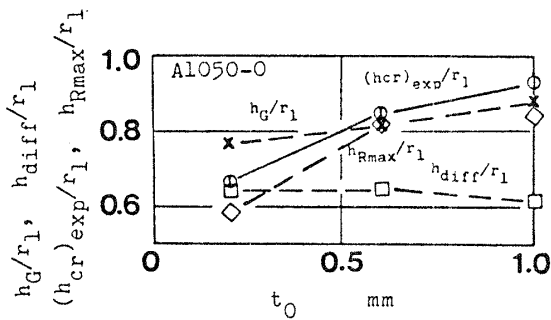
さほど受けまいようである。

(3)  $h_c$  半径方向一様引張りを受ける円板の板厚方向拡散分岐条件を三次元解として求めた結果、限界ひずみが、ほぼ板厚の二乗に依存するという、Needleman-Tvergaard<sup>(6)</sup>の結果が報告されている。この結果を用い、後藤ら<sup>(14)</sup>は、板厚依存性を式(2)のように仮定した。そこで、張出し中の板厚の一部が、このひずみに達するまでの張出し深さを  $h_c$  と表示する。

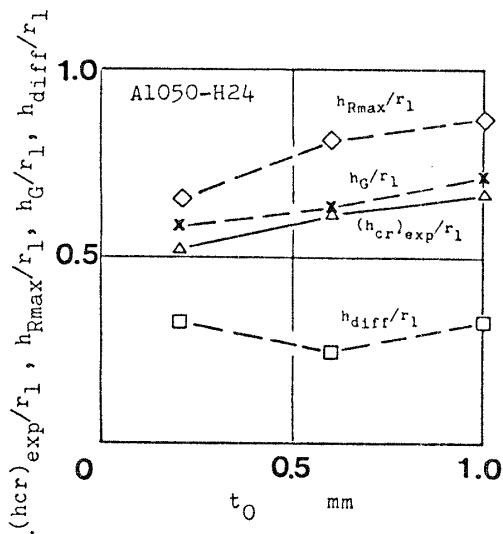
$$(\epsilon_1)_{cr} = ((\epsilon_1)_{cr})_{t=t^*} (1 + \xi(t^2 - t^{*2})) \dots \dots \dots (2)$$

ここに、 $t^*$  は規準板厚、 $((\epsilon_1)_{cr})_{t=t^*}$  は規準板厚での限界ひずみ (最大主ひずみ) で実験から求められる。 $\xi$  は正の定数である。ここでは、 $t^* = 0.6 \text{ mm}$ 、 $\xi = 0.412$  (等二軸変形) として計算した。

図9は、上述の  $h_{diff}$ 、 $h_{Rmax}$ 、および  $h_c$  の計算値の板厚依存性を示すものである。図9(a)は軟質材、(b)は半硬質材の場合である。また図には、 $(h_{cr})_{exp}$  (実験値) も併せ示す。図において  $h_{Rmax}$ 、 $h_c$  のいずれも、定性的には板厚依存性を示しているが、 $h_{diff}$  は板



(a) 軟質材



(b) 半硬質材

図9 種々の臨界条件による限界張出し深さの比較

厚依存性を示さない。また、定量的には、軟質材の場合には、 $h_{Rmax}$  が実験値によくあっている。

一方、半硬質材の場合、 $h_{Rmax}$  は実験値に比べかなり大きくなっているが、 $h_c$  は比較的よくあっている。このような理論と実験の対応関係は、結局理論に用いた仮定と実際に現れる破断現象との対応関係を帰せられるものと考え、以下実際に現れる破断現象を詳しく調べてみた。

ブランクが破断した瞬間の外観写真を図10に示す。軟質材の場合には、いずれの板厚においても、ポンチ頭部の全域にわたって大きな変形を生じた後、くびれが発生し、そこから破断亀裂が生じている。これは、 $h_{Rmax}$  を求めた仮定に類似するものである。一方、半硬質材の場合、板厚0.2 mmでは、圧延方向に亀裂が走り、くびれとは認めがたいが、0.6、1.0 mmと厚くなるに従って、はち巻状のくびれが認められる。

図11に、ブランク破面をほぼ垂直方向から撮影した走査電子顕微鏡写真を示す。軟質材の場合には、いずれも顕著な変形を生じた後、dimple-typeの破面(くびれ形破断)を呈して破断している。他方、半硬質材の場合には、板厚0.6 mmおよび1.0 mmでは外観的にはくびれが生じていたが、破面にはせん断破壊の様相が認められる。板厚0.2 mmの場合にはせん断破壊の様相がさらに顕著である<sup>(11)(12)</sup>。これは、 $h_{Rmax}$  の計算の仮定に一致しない。 $h_c$  の実験結果への一致についての物理的意味は明らかでない。

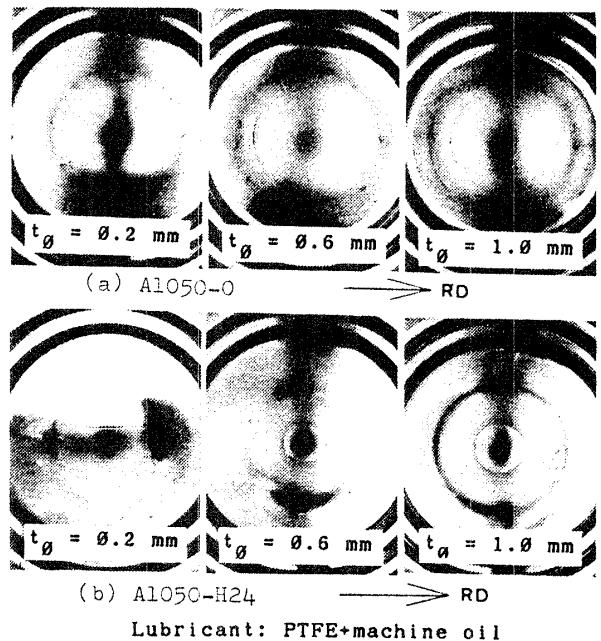


図10 ブランク破断部外観写真

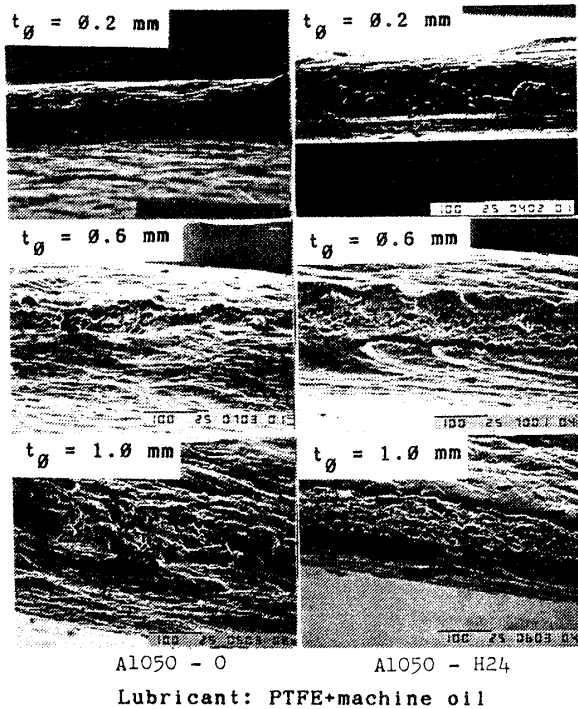


図 11 破断面の SEM 写真

## 5. 結 論

工業用純アルミニウム薄板の純粋張出し加工を取り上げ、張出し深さに及ぼす、板厚、ポンチ面の潤滑および材質の影響について調べた。そして以下の結果を得た。

(1) 限界張出し深さとして、張出し荷重急減行程における深さが明確に求められ、本研究ではこの値を検討対象とした。この時期に、破断亀裂が板厚方向に貫通することが認められた。しかし、局所くびれ発生

時の深さは、これよりわずかに小さく、局所くびれ発生直後に破断亀裂が発生することがわかった。

(2) 材質および潤滑材によらず板厚が薄くなれば限界張出し深さは減少する。

(3) 限界張出し深さを最大にする最適  $\mu$  が存在する。そしてこの最適  $\mu$  は板厚によって変化する。すなわち最適  $\mu$  に板厚依存性が現れる。

(4) Hill の拡散くびれ発生条件、M-K 理論を用いた山口理論および後藤の式を用いて、限界張出し深さを計算したところ、軟質材については、山口理論が実験値とよく一致した。これは理論に用いた仮定が実験に現れた現象に比較的よく類似したためと思われる。半硬質材については、後藤の式が比較的良い一致を示した。Hill の条件による計算結果は、板厚依存性を示さない。

## 文 献

- (1) 宮野, 塑性と加工, 1-4(1960), 335.
- (2) 宮川・西村, 塑性と加工, 7-68(1966), 481.
- (3) 西川, 塑性と加工, 13-140(1972), 655.
- (4) 小林・石垣, 塑性と加工, 15-158(1974), 197.
- (5) 山口・ほか 3 名, 塑性と加工, 17-191(1976), 995.
- (6) Needleman, A. and Tvergaard, V., *J. Mech. Phys. Solids*, 25(1977), 159.
- (7) Tadros, A. K. and Mellor, P. B., *Int. J. Mech. Sci.*, 20(1978), 121-134.
- (8) 小林・黒崎・河合, 機論, 45-393, C(1979), 584.
- (9) 例えば, 山口・ほか 3 名, 塑性と加工, 21-237(1980), 909.
- (10) 小原・勝田・青木, 軽金属, 31-9(1981), 602.
- (11) Rao, R. S. and Alexander, J. M., *Metallurg. Technol.*, 10(1983), 14-19.
- (12) Beaver, P. W., *J. Mech. Working Technol.*, 7(1982/1983), 215-231.
- (13) Chan, K. S., Koss, D. A. and Ghosh, A. K., *Metallurg. Trans.*, A15-2(1984), 323.
- (14) 例えば, 後藤・佐藤・田中, 塑性と加工, 27-301(1986), 268.

## 討 論

〔質問〕 山口 克彦

〔京都工芸繊維大学工芸学部〕

金属薄板の純粋張出し深さに対する板厚と潤滑の影響を、詳細に検討されたご研究として大変興味深く拝見した。

図 3 または図 4 によると、摩擦係数  $\mu$  が小さいほど限界張出し深さが大きくなるのは必ずしもなっていない。

(1) この理由についてはどのようにお考えか。

(2) 限界張出し深さの実験値 ( $h_{cr,exp}$ ) のばらつきはどの程度か。実験値のばらつきがあっても  $\mu$  の影響

は明白か。

(3) O 材で板厚が薄い ( $t=0.2\text{mm}$ ) の場合、テフロンシート潤滑のものは M・G 潤滑の場合よりも  $h_{cr}$  が小さくなっている。テフロンシートを使用すると、ブランク内面も自由表面と同程度にあれてくるため、M・G 潤滑の場合よりも表面あれによる板厚の不均一さが増大し、その結果として  $h_{cr}$  が小さくなったのではないかとも考えられるが、いかがか。ご見解をお聞かせ願いたい。

〔回答〕 (1) 文献(8)に示したように、 $\mu$  が小さくなると子午線方向ひずみ  $\epsilon_\theta$  はポンチ中心部で大

きくなりやすい。一方、 $n$  値または  $r$  値も小さくなるほど、 $\epsilon_0$  は中心部で大きくなりやすい。限界張出し深さを増すには、この  $\epsilon_0$  をポンチ接触部全体にわたることができる限り大きくすることが必要である。したがって、特定の  $n$  値および  $r$  値の組合せに対して、限界張出し深さを極大にする適当な  $\mu$  が存在することになったものと思われる。

(2) 実験日が異なる場合、天候、気温などの関係から、多少のばらつきは避けたいが、比較的短時間にまとめて行った実験の再現性は非常によく、張出し深さにして  $\pm 2\%$  以内のばらつきであった。ただし、半硬質材の板厚  $0.2\text{ mm}$  の場合はやや大きく、最大  $\pm 6\%$  であった。いずれにしても、図 3 または図 4 に示した  $\mu$  の影響についての定量的な関係が逆転することはなかった。

(3) 基本的には回答 (1) と同じ理由で説明できるものと考えている。M.G. 潤滑の場合のプランク内側の表面プロファイルの変化過程が測定してないので明言できないが、二次的にはご意見のような理由もありうると考えている。

〔質問〕 後藤 学〔岐阜大学工学部〕

純粋張出しにおける板材の破断過程の詳しい観察に対し敬意を表す。ただ、理論的考察の箇所でも多少不十分な点もあり、ご質問申し上げます。

(1) 図 5 の④を拡散くびれ発生点と言われているが、これは単に工具形状拘束と摩擦の効果からくる板厚の不均一化の表れにすぎないのではないか。

(2) Hill の拡散くびれ発生条件は近似的巨視理論、これに表面粗さという微視量を結びつけ、さらに

M-K 理論という別種の計算方式(巨視理論)を導入して変形限界を求めるのは、あまりにし意的・便宜的に思われ、理論の整合性および物理的意味付けに欠けるのではないか。

(3) 式(2)は質問者らが自らの実験データを整理するために導入した便宜的な式である。理論的に  $h_{cr}$  を予測するには、板厚方向も考慮した詳しい変形のシミュレーションを、質問者がかねてより提案しているようなひずみ集中化をよく表現できる構成式(MG または J 2 G 構成式)を用いて行い、局部くびれ発生ないし荷重の急落を計算の結果としてとらえる方法がよいと考える。現時点でその手段は与えられており、実行可能であるからである。

〔回答〕 (1) 拡散くびれや局部くびれの発生点を実験的にとらえるのは困難な問題と考えている。特に拡散くびれについては、その定義と実際の現象との対応については必ずしも明確になっていないように思われる。ご意見のように板厚不均一現象にすぎないのかもしれないが、一つの現象的解釈とみていただきたい。

(2), (3) 質問(2), (3)については、まとめて回答させていただく。理論的に厳密に板厚依存性を論ずるには、ご指摘の計算方法を採用するのが自然かと思われる。

本研究では、限界張出し深さへの板厚依存性について実験的に解明することを主眼とし、とりあえず限界ひずみの板厚依存性に関する従来の理論により、どの程度実験結果の説明が可能かを調べたものである。