

日本機械学会論文集(C編)  
51巻462号(昭60-2)

## 穴広げ試験における金属薄板の塑性異方性挙動\*

黒崎 靖\*\*, 海野 芳弘\*\*\*  
Yasushi KUROSAKI, Yoshihiro UNNO

**Key Words:** Forming, Sheet Metal Forming, Bore-Expanding Test,  $r$ -Value, Strain-Level Dependence, Stress-Ratio Dependence

### 1. 緒 言

金属薄板の単軸引張試験により測定される塑性異方性パラメータいわゆる  $r$  値は、1950年に Lankfordら<sup>(1)</sup>によってその重要性が指摘されて以来、プレス成形性評価の議論に欠かせない材料特性値となっている。しかしながら、このパラメータはひずみレベル<sup>(2)(3)</sup>や応力比(もしくは負荷形式)<sup>(4)(5)</sup>に依存して変化することが指摘されており、その材料定数としての意義あるいは成形性評価能についての疑問は絶えない。

実際のプレス成形では、素板に付加される応力状態は近似的に2軸であり、かつ生ずる相当ひずみの大きさも単軸引張りにおける一様伸びの2倍以上大きいことはまれでない。にもかかわらず、従来、 $r$ の測定手段として単軸引張試験に頼るほかはなく、実加工程度の大ひずみレベルにおける  $r$ の実態についての情報はきわめて少ない<sup>(6)</sup>。

よって本研究では、従来法より格段に大きなひずみレベルまで  $r$ を追究できる手法を開発することを主目的とし、その可能性をもつものとして穴広げ試験を検討対象とする。この試験法は Siebel-Pompの試験として古くから知られている成形性試験法の一つであるが、最近、Hillの新降伏関数における定数を定めるいわば材料試験的利用も試みられている<sup>(6)</sup>。本論文ではまず、穴広げ試験により  $r$ (以後  $[r]$ と記す)を測定できる可能性について計算機シミュレーションにより検討した後、各種金属薄板について  $[r]$ の測定を試み、その特性を調べる。この結果に基づき、 $[r]$ が従来法による  $r$ より優れた情報源となる実例を提示する。以下

では次の記号を用いる。

### 記 号

- $\sigma_r, \sigma_\theta, \sigma_{eq}$ : 半径方向, 円周方向の応力, 相当応力  
 $\varepsilon_r, \varepsilon_\theta, \varepsilon_t, \varepsilon_{eq}$ : 半径方向, 円周方向, 板厚方向の対数ひずみ, 相当ひずみ  
 $d\varepsilon_r, d\varepsilon_\theta, d\varepsilon_t, d\varepsilon_{eq}$ :  $\varepsilon_r, \varepsilon_\theta, \varepsilon_t, \varepsilon_{eq}$ の増分  
 $n, F$ : 加工硬化指数, 塑性係数( $\sigma = F\varepsilon^n$ )  
 $s, r_s$ : 要素の変形前・後の半径位置  
 $t_0, t$ : 変形前・後の板厚  
 $A_0, A$ : 変形前・後の穴の半径  
 $\varepsilon_{\theta e}, \varepsilon_{r e}, \varepsilon_{t e}$ : 穴壁における  $\varepsilon_\theta, \varepsilon_r, \varepsilon_t$   
 $\varepsilon_{r0}, \varepsilon_{t0}$ :  $\varepsilon_r, \varepsilon_t$ の穴壁への外そう値  
 $\varepsilon_{\theta cr}$ : 穴壁における限界円周ひずみ  
 $r, [r]$ : 単軸引張試験および穴広げ試験による塑性異方性パラメータ  
 $\bar{r}, [\bar{r}]$ :  $r, [r]$ の板面内平均値

### 2. 理論解析

**2.1 差分法による検討** 穴広げ試験の場合、穴近傍に高いひずみこう配の発生が予想されるので、そのような状況下で正確な  $r$ の測定が原理的に可能か否かがまず問題となる。本節では、差分法による数値解を用いてこの点の検討を行う。

**2.1.1 解析方法** 平頭ポンチの平底部での穴広げ変形を想定して、図1に示すように、外縁部におい

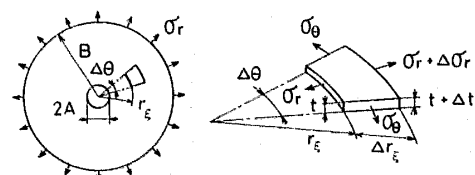


図1 穴広げの数値解析モデル図

\* 昭和58年11月1日 第34回塑性加工連合講演会において講演, 原稿受付 昭和58年12月19日。

\*\* 正員, 三重大学工学部 (〒514 津市上浜町1515)。

\*\*\* (株)東芝 小向工場 (〒210 川崎市幸区小向東芝町1)。

て  $\sigma_r$  が均一分布する穴あき円板に対して塑性変形解析を行った。解析方法は従来法<sup>(6)(7)</sup>に準じた。すなわち、面内等方性を仮定した Hill の異方性材に対して平面応力場を仮定し、ひずみ増分理論を採用して差分法により数値解を求めた。用いた基礎式を以下に列挙する。半径方向のつりあい式：

$$d(t\sigma_r)/dr_\epsilon + t(\sigma_r - \sigma_\theta)/r_\epsilon = 0 \quad \dots\dots\dots (1)$$

降伏条件式：

$$\sigma_r^2 - \alpha\sigma_r\sigma_\theta + \sigma_\theta^2 = \sigma_{eq}^2 \quad \dots\dots\dots (2)$$

ここに、 $\alpha = 2r/(1+r)$ 。

応力-ひずみ増分関係式：

$$\frac{d\epsilon_r}{(1+r)\sigma_r - r\sigma_\theta} = \frac{d\epsilon_\theta}{(1+r)\sigma_\theta - r\sigma_r}$$

$$= \frac{-d\epsilon_t}{\sigma_\theta + \sigma_r} = \frac{d\epsilon_{eq}}{(1+r)\sigma_{eq}} \quad \dots\dots\dots (3)$$

相当ひずみ増分の定義式：

$$d\epsilon_{eq} = \beta(d\epsilon_r^2 + \alpha d\epsilon_r d\epsilon_\theta + d\epsilon_\theta^2)^{1/2} \quad \dots\dots\dots (4)$$

ここに、 $\beta = (1+r)/(1+2r)^{1/2}$ 。

$n$ 乗硬化則：

$$\sigma_{eq} = F(\int d\epsilon_{eq})^n \quad \dots\dots\dots (5)$$

ひずみ成分の定義式：

$$\left. \begin{aligned} \epsilon_\theta &= \ln(r_\epsilon/s), \quad \epsilon_r = \ln(dr_\epsilon/ds), \\ \epsilon_t &= \ln(t/t_0) \end{aligned} \right\} \quad \dots\dots\dots (6)$$

体積一定則：

$$dr_\epsilon/ds = t_0 s / (tr_\epsilon) \quad \dots\dots\dots (7)$$

境界条件としては、穴壁に単軸引張応力条件 ( $\sigma_r = 0, \sigma_\theta > 0$ ) を適用した。得られた数値解は A. Parmar らの解<sup>(6)</sup>と比較し、ほぼ一致することを確認した。以下では、穴の初期半径  $A_0 = 2.5 \sim 12.5$  mm, 試験片の初期直径  $2B_0 = 32$  mm, 初期板厚  $t_0 = 0.8$  mm の場合の計算結果について述べる。

**2.1.2 計算結果** 図2は、円周方向ひずみ  $\epsilon_\theta$ 、半径方向ひずみ  $\epsilon_r$  および板厚ひずみ  $\epsilon_t$  の数値解を初期半径位置  $s$  に対して示したものである。 $A_0$  が小さいほど、穴近傍における  $\epsilon_\theta$  および  $\epsilon_r$  のひずみこう配

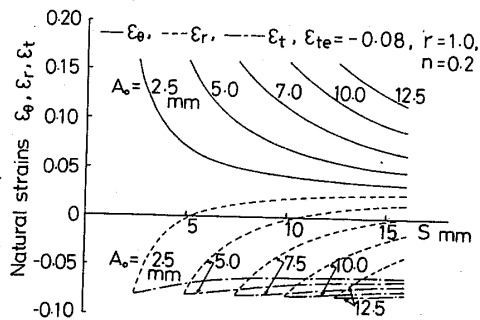


図2  $\epsilon_\theta, \epsilon_r, \epsilon_t$  の半径方向分布 (理論値)

は大きくなっているが、 $\epsilon_t$  のこう配は全般的に小さいことが分かる。同様の傾向は、 $n, r$  の変更および変形段階をとおして得られた。山田ら<sup>(7)</sup>は、外縁部において半径方向張力が最大に到達する時点が解の唯一性の十分条件が破れる時点と一致することを示した。そこで、これを穴広げ限界条件として採用し、穴壁における限界円周ひずみ  $\epsilon_{ocr}$  を求めた結果を図3に示す。 $\epsilon_{ocr}$  に及ぼす  $n$  および  $A_0$  の影響は著しく、 $A_0 \leq 5.0$  mm とすれば理論上、 $n$  の2倍以上の  $\epsilon_{ocr}$  が期待できることが知れる。

**2.1.3 [r] の測定法の設定と誤差の算定** 数値解析によって得られたひずみ分布から、逆に  $[r]$  を見積もることを考える。穴壁は単軸引張応力状態にあるから、体積一定則を適用すれば、この場所におけるひずみ成分  $\epsilon_{\theta\epsilon}, \epsilon_{r\epsilon}, \epsilon_{t\epsilon}$  のうちいずれか二つより  $[r]$  は定まることになる。実際には、 $\epsilon_{\theta\epsilon}$  は変形前・後の穴径を測定することにより求めることができるので、ここ

表1 [r] の相対誤差 (理論値)

n	r	Combination of strains	[r]	Relative difference $\gamma$ %
0.1	0.5	a	0.45	10.0
		b	0.49	2.0
		c	0.43	14.0
	1.0	a	0.92	8.0
		b	0.98	2.0
		c	0.88	12.0
0.2	1.5	a	1.40	6.7
		b	1.48	1.3
		c	1.29	14.0
	0.5	a	0.46	8.0
		b	0.49	2.0
		c	0.45	10.0
1.0	a	0.94	6.0	
	b	0.98	2.0	
	c	0.90	10.0	
1.5	a	1.41	6.0	
	b	1.47	2.0	
	c	1.34	10.7	

Combination of strains : a = ( $\epsilon_{r0}, \epsilon_{t0}$ ), b = ( $\epsilon_{t0}, \epsilon_{\theta\epsilon}$ ), c = ( $\epsilon_{\theta\epsilon}, \epsilon_{r0}$ ).  
 $\gamma = (r - [r])/r \times 100$ .

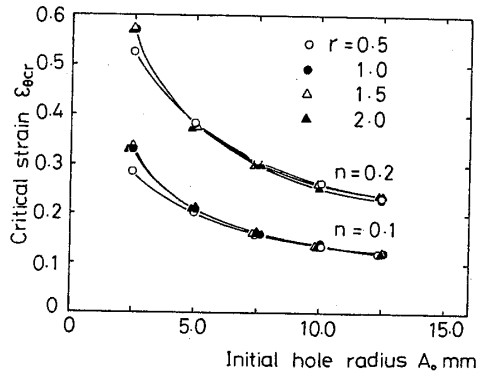


図3 限界円周ひずみ  $\epsilon_{ocr}$  の理論値

では  $\epsilon_{\theta e}$  の設定値をそのまま用いた。一方、 $\epsilon_r$  および  $\epsilon_t$  は穴周辺部において不均一に分布するので、 $\epsilon_{re}$  および  $\epsilon_{te}$  を正確に直接測定によって求めることは困難と予想される。よって、ここでは外そう法を適用することにした。外そう法には種々考えられるが、精度および簡便さの観点から二次回帰法を採用した。ひずみ成分を得る半径位置にはできるだけ穴壁に近いところを選び、 $s'=0.5, 1.5, 2.5, 3.5, 4.5$  mm の 5 箇所とした。ここに、 $s'$  は穴壁からの初期半径位置 ( $s'=s-A_0$ ) である。結局  $[r]$  は、 $\epsilon_{\theta e}$  および  $\epsilon_r, \epsilon_t$  の外そう値  $\epsilon_{r0}, \epsilon_{t0}$  を用いて式(8)のいずれかより定めた。

$$[r] = \frac{\epsilon_{r0}}{\epsilon_{t0}} = -\frac{\epsilon_{t0} + \epsilon_{\theta e}}{\epsilon_{t0}} = -\frac{\epsilon_{r0}}{\epsilon_{\theta e} + \epsilon_{t0}} \dots\dots (8)$$

表1は、前述数値解に対して上記方法を適用して得られた  $[r]$  の、与えた  $r$  の値に対する相対誤差（すなわち、測定誤差が介入しない場合の理論誤差）を示したものである。これらはいずれも、ひずみこう配が最大となる荷重最大点における算出値である。表1より、 $\epsilon_{t0}$  と  $\epsilon_{\theta e}$  の組合せ  $b$  を用いた場合相対誤差  $r$  が 2% 以下でもっとも小さいことが分かる。これは、 $\epsilon_t$  のほうが  $\epsilon_r$  よりはるかにそのひずみこう配が小さく、外そう精度が高いことに起因している。単軸引張試験によっても 5~10% 程度の測定値のばらつきはまれでない<sup>(6)</sup>、この程度の誤差は許容できると考える。

以上の結果から、穴広げ試験において  $\epsilon_{t0}$  と  $\epsilon_{\theta e}$  を測定すればもっとも精度よく  $[r]$  を求めることができ、測定可能なひずみ範囲も  $A_0 \leq 5.0$  mm とすれば従来法の 2 倍以上に拡大できる可能性のあることが結論できる。

**2.2 有限要素法による検討** 実際の素板では、多少とも面内異方性の存在は避けられないので、これと変形挙動の関係を調べておく。素板は弾性域で等方性を有し、塑性域で Hill の直交異方性伏条件に従うと仮定し、山田の増分的弾塑性有限要素解析法<sup>(9)</sup>に準じた計算法を採用した。ただし、剛性方程式には井関ら<sup>(10)</sup>による幾何学的非線形項を考慮したものとした。要素の分割例を 1/4 の試験片について図4に示す。x 軸上および y 軸上の節点において、それぞれ y 方向および x 方向の変位を零に拘束した。外縁上の節点ではいずれも同じ半径方向変位増分  $\Delta U_r = 0.01$  mm を与えた。解の妥当性は、図5に示すように、面内等方性材について前述差分法と比較することによりチェックした。

図6は、後述のキルド鋼板および工業用純アルミニウム (A 1100) の軟質板を対象として、 $\epsilon_t$  の半径方向分布を計算した結果を示したものである。材料定数に

は、キルド鋼板の場合ヤング率  $E = 2.06 \times 10^5$  MPa, ポアソン比  $\nu = 0.3$ , x 軸方向 (圧延方向) の降伏点  $\sigma_{rx} = 164$  MPa, A 1100 板の場合  $E = 6.87 \times 10^4$  MPa,  $\nu = 0.314$ ,  $\sigma_{rx} = 29$  MPa を用いた。塑性曲線、各方向の  $r$  値は後述の表2より引用した。図6によれば、 $\epsilon_t$  が初期半径  $s$  に対して単調増加を呈する場合と、穴壁 ( $s = 5$  mm) と異なる半径位置で極小を呈する場合の2種類の分布形態がみられる。後者の現象は、 $n = 0.1 \sim 0.3$ ,  $r = 0.5 \sim 1.5$  の範囲の面内等方性材料に対する

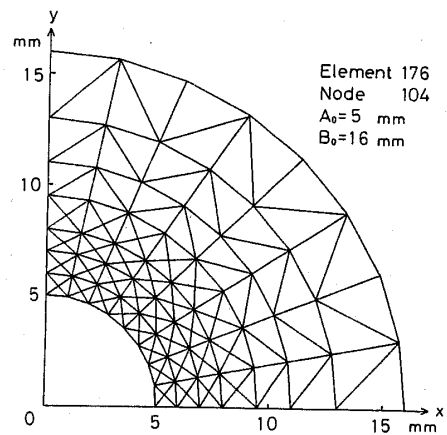


図4 有限要素解析における試験片の要素分割

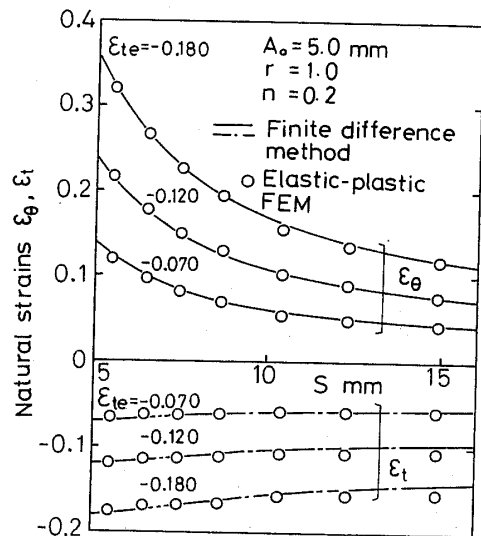


図5 有限要素解と差分法の比較

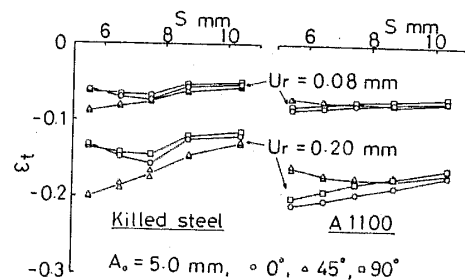


図6 有限要素法による  $\epsilon_t$  の半径方向分布の計算結果

計算では観察されなかったため、面内異方性材料特有のものと考えられる。いろいろの  $r$  の組合せについて調査した結果、この現象は、 $\Delta r = (r_0 + r_{90})/2 - r_{45}$  の値が正の時  $0, 90^\circ$  方向（両方向での  $r$  の相対差が大きい時は小さい方向にのみ）において、また  $\Delta r$  が負の時  $45^\circ$  方向において発生しやすいことが分かった。ここに、 $r_0, r_{45}, r_{90}$  はそれぞれ、圧延方向に対して  $0^\circ, 45^\circ, 90^\circ$  の方向における  $r$  値である。この傾向は図6にも現れている。本有限要素解析から、前述のような  $[r]$  の誤差の算定を行うことは困難であるが、二次回帰法であればいずれの分布形態にも順応できると考えられる。

3. 実験方法

3.1 供試材および単軸引張試験 使用した材料は市販のキルド鋼板、リムド鋼板、工業用純アルミニウム (A 1100) 軟質板および無酸素銅軟質板の4種類で、いずれも公称板厚は0.8 mmである。JIS 13号Bの規格（標点距離50 mm）に従って引張試験片を製作し、オルゼン形万能試験機（最大容量98.1 kN）によってチャック引張り速度10 mm/minで単軸引張試験を行った。その結果を表2に示す。 $r$  の値は、伸びひずみ  $\epsilon_l$  および幅ひずみ  $\epsilon_b$  を測定し、体積一定則より  $r = -\epsilon_b / (\epsilon_l + \epsilon_b)$  として定めた。 $r$  と  $\epsilon_l$  の関係を図7に示す。

3.2 穴広げ試験 使用した試験装置は市販の圧縮試験機に自作の工具を配備して板材試験機となしたもので（最大ポンチ力98.1 kN）、ポンチ力、ポンチ行程およびしわ押さえ力を±1%以内の誤差で自動記録できるようにしてある。採用した試験条件を表3に示す。穴広げはポンチ平底部で行うこととし、試験片寸法では穴の半径  $A_0 = 2.5, 5, 8$  mmの3種類、外径を

表2 供試材の引張り特性値

Materials	Direction	n-value **	r-value *	** F MPa	Tensile strength MPa	Total elongation %
Killed steel	0°	0.237	1.74	543	305	37.9
	45°	0.218	1.33	549	316	34.5
	90°	0.225	2.10	531	301	37.6
	Mean	0.225	1.63	543	310	36.1
Rimmed steel	0°	0.207	1.09	555	294	36.1
	45°	0.204	0.76	566	334	34.3
	90°	0.208	1.65	553	325	38.1
	Mean	0.206	1.07	560	322	35.7
Commercially pure aluminum, soft (A1100-0)	0°	0.248	0.70	159	88	30.5
	45°	0.262	1.00	154	84	37.2
	90°	0.277	0.82	161	86	39.5
	Mean	0.262	0.88	157	86	36.1
OFHC, soft	0°	0.444	0.90	513	221	44.4
	45°	0.444	0.98	501	218	47.6
	90°	0.450	1.00	509	219	48.3
	Mean	0.446	0.97	506	219	47.0

\* : 15% elongation, \*\* :  $\sigma = Fe^n$

$D_0 = 100$  mmとした。試験片の製作には旋盤を用い、±0.05 mmの誤差範囲内で所要寸法に仕上げた。穴壁の仕上げには特に注意を払った。穴広げ後の試験片の断面写真の一例を図8に示す。

3.3  $[r]$  の測定法 2.1.3項において設定した方針に従って  $[r]$  の面内平均値  $[\bar{r}]$  の測定を行った。ただし、 $\epsilon_{oe}$  については、圧延方向に対して  $0, 45, 90, 135^\circ$  の4方向において内側マイクロメータにより穴径を測定し、その平均値より平均円周ひずみ  $\bar{\epsilon}_{oe}$  を算出した。板厚の測定には先端丸み0.5 Rの端子を備えたデジタルダイヤルゲージ（最小目盛0.001 mm）を用いた。測定位置を図9に示す。各方向において、2.1.3項で設定した半径位置（ただし、合計10箇所）で  $\epsilon_l$  を測定し、二次回帰法により穴壁へ外そうして  $\epsilon_{i0}$  を定めた。こうして、板面内8方向で得られた  $\epsilon_{i0}$  を平均して  $\bar{\epsilon}_{i0}$  とし、 $[\bar{r}] = -(\bar{\epsilon}_{oe} + \bar{\epsilon}_{i0}) / \bar{\epsilon}_{i0}$  より  $[\bar{r}]$  を定めた。なお、ここには示さないが、 $\epsilon_{i0}$  の測定位置の変更、 $\bar{\epsilon}_{r0}$  を採用するなどの方法も試みた結果、この測

表3 穴広げ試験条件

Tools	Punch diameter : 40 mm Punch profile radius : 4 mm Die throat diameter : 42.5 mm Die throat radius : 6 mm	
Lubricants	Surface of blank-holder and die : Graphite grease Punch surface : PTFE sheet and graphite grease	
Punch speed	0.2 mm/s	Temperature : 20 ± 2 °C
Blank-holding force	Killed steel and rimmed steel : 9.81 KN A 1100 : 2.65 KN OFHC : 7.19 KN	

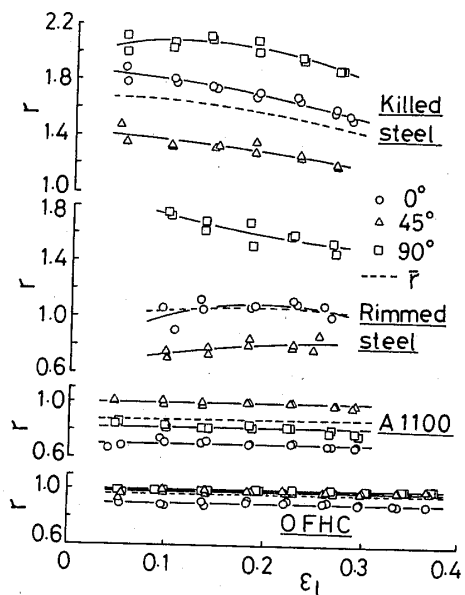


図7 r値と伸びひずみ  $\epsilon_l$  の関係

定条件がほぼ最適であることを確認した。

4. 実験結果

4.1 板厚ひずみ分布 図10(a), (b)はキルド鋼板およびA1100板について、 $A_0=5\text{ mm}$ の試験片における $\epsilon_t$ の半径方向分布を方向別に示したものである。図10中に示す曲線は二次回帰曲線であるが、実験点を比較的精度良く近似できることが分かる。 $\epsilon_t$ の大きさならびに分布形態と板面内方向との関係は、図6にみた有限要素解と定性的に一致している。ほかの $A_0$ の場合についても調べた結果、 $\epsilon_t$ の分布形態には単調増加形と極小形の2種類が存在すること、および $A_0$ を小さくするほど極小となる半径位置は減少し、ついには単調増加形となる傾向のあることが分かった。

4.2  $[\bar{r}]$ の測定結果 4種類の板材について得られた $[\bar{r}]$ を $\bar{\epsilon}_{oe}$ に対してプロットした結果を図11に示す。図11中に示した破線は単軸引張りによる $\bar{r}$ と $\bar{\epsilon}_t$ との関係を表す。また、矢印はくびれ開始点である。図11では次の2点が注目される。

- (1)  $[\bar{r}]$ の測定可能な $\bar{\epsilon}_{oe}$ の最大値は材料および $A_0$ により異なるが、単軸引張りにおける一様伸びのおよそ1.5~3.5倍に及ぶ。
- (2)  $[\bar{r}]$ の大きさ、 $\bar{\epsilon}_{oe}$ に対する変化傾向ともに $\bar{r}$ のものとは異なり、 $A_0$ が小さいほど両者の差はきわ立つ。

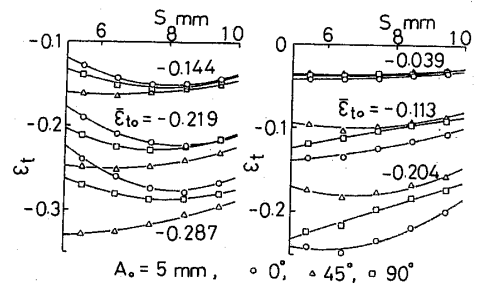
(1)の結果はひずみこう配による支持効果として知られている現象であるが、 $\bar{\epsilon}_{oe}$ の最大値は前述理論による $\epsilon_{ocr}$ と量的に差違があり、これの理論的予知にはなお検討の余地がある。(2)の結果は本実験で新た

に得た知見であるので、以下ではこれについて検討を行う。

4.3  $[\bar{r}]$ の特性の考察  $[\bar{r}]$ に特異現象をもたらした原因の一つとして、穴壁の幾何学的不完全さが挙げられるかもしれない。しかし、種々検討した結果、図8に示した程度の壁部形状が保たれていればほとんど問題にならないことが分かった。また、5.1節で述べる事実から、単なる測定誤差に起因するとも考えられない。

今一つの可能性として、穴壁およびその周辺部材料の結晶方位が応力分布に対応して変化したことが考えられる。応力分布の内容として、応力こう配(もしくはひずみこう配)と応力比の二つの因子が考えられるが、両者の分離は困難なため、ここでは後者の応力比依存性について調べてみる。

前述数値解によれば、 $A_0$ が小さいほど穴周辺部の平均応力比( $=\sigma_r/\sigma_\theta$ )は1に向かって増大する。よって、仮に $[\bar{r}]$ に応力比依存性が反映するとすれば、 $A_0$



(a) Killed steel (b) A1100

図10 板厚ひずみの測定結果

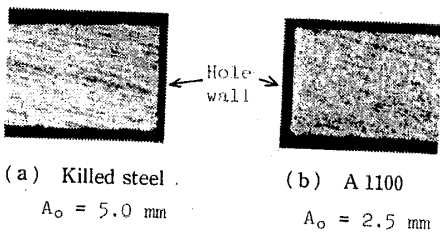


図8 試験片の断面写真

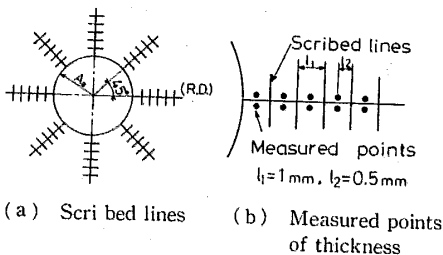


図9 板厚ひずみの測定位置

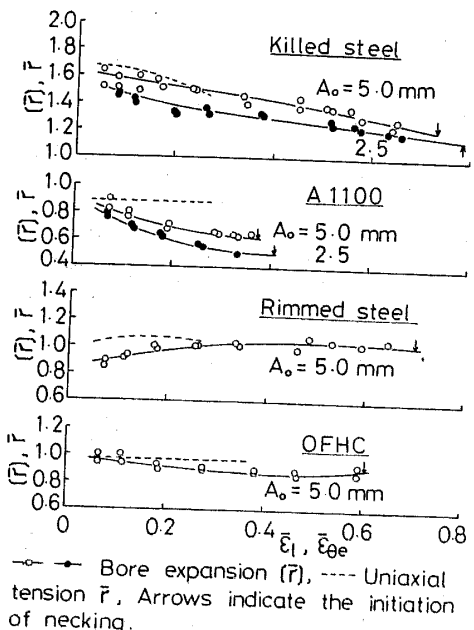
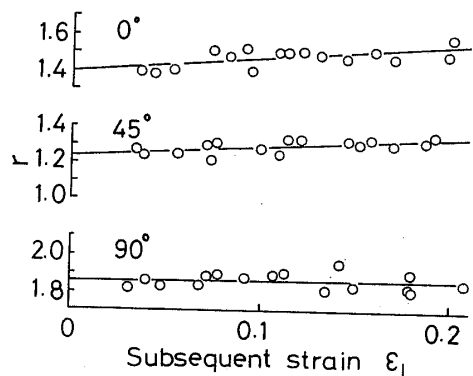


図11  $[\bar{r}]$ の測定結果

が小なるほど  $[\bar{r}]$  は等 2 軸引張り負荷における  $\bar{r}$  に近づくはずである。そこで、キルド鋼板および A 1100 板に対して平頭ポンチにより等 2 軸引張り変形を与え、平底部より長さ 32 mm、幅 6 mm の短ざく形試験片 (標点距離 6 mm) を採取した後、これに単軸引張り変形を与えて  $r$  を測定してみた。キルド鋼板について得られた  $r$  と付加伸びひずみ  $\epsilon_t$  との関係を図 12 に示す。図 12 中の直線は一次回帰直線で、 $\epsilon_t=0$  への外そう値が等 2 軸引張り予変形材の  $r$  値 ( $r_0$  と記す) に相当する。図 13 は、各種試験法によって得られた異方性パラメータの板面内平均値、 $\bar{r}$ 、 $[\bar{r}]$ 、 $\bar{r}_b$  を同一相当ひずみのもとで比較したものである。図 13 より、キルド鋼板、A 1100 板ともに、 $A_0$  が小さいほど  $[\bar{r}]$  は  $\bar{r}_b$  に漸近することが観察される。等 2 軸引張り負荷を与えると  $r$  が低下することは、従来、軟鋼板<sup>(4)(5)</sup>、工業用純アルミニウム板<sup>(11)</sup>、Cu-1/4H 板<sup>(6)</sup> などに対して報告されている。

以上のことから、 $[\bar{r}]$  に応力比依存性が反映した可能性が強いと考える。 $A_0$  と応力比の関係を陽の形で



Killed steel, ( $\epsilon_{eq}$ )<sub>pre</sub> = 0.083  
図 12 等 2 軸引張り予変形材の  $r$  値

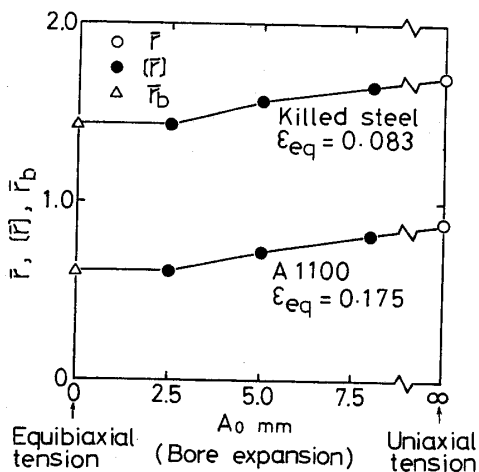


図 13 各種試験法で得られた異方性パラメータの比較

示すことはできない。しかし、以上の結果を前提とすれば、ある程度小さい  $A_0$  を採用することにより、図 12 に示した手順を経ることなく、しかも大変形に至るまで等 2 軸引張り応力下での  $r$  の挙動を推定できることになる。

### 5. $[r]$ の利用面の検討

5.1 穴広げ成形におけるひずみ分布の予測 図 14 は、キルド鋼板の穴広げ成形 ( $A_0=2.5$  mm) におけるひずみ分布について、差分法による理論値と実験値 (板面内平均値) を比較したものである。図 14 中の破線は 15% 伸びにおける  $\bar{r}$  を用いて求めた理論曲線、また実線は、 $[\bar{r}]$  と  $\bar{\epsilon}_{ee}(=\bar{\epsilon}_{eq})$  の関係を二次曲線に近似し、 $\bar{\epsilon}_{eq}$  によって  $[\bar{r}]$  が変化することを考慮した理論曲線である。ほぼ同じ  $\epsilon_{te}$  の値で比較すると、 $\bar{r}$  による  $\epsilon_0$  の理論値は特に穴周辺部において実験値より過大となっている。Parmar ら<sup>(6)</sup> は逆に  $\epsilon_{ee}$  を同じにして穴近傍での  $\epsilon_t$  の実験値と理論値を比較し、前者が著しく過小となることを指摘している。これらの結果は  $\bar{r}$  が実際に低下する可能性を示しており、結局、この効果を含む  $[\bar{r}]$  を用いたほうがより精度よくひずみ分布を予測できることが結論される。

5.2 平面ひずみ圧縮降伏応力の見積もり  $r$  の変化は降伏応力にも反映するはずである。面内等方性材の場合 Hill の異方性理論より、平面ひずみ圧縮試験における圧縮応力  $\sigma_p$  (正值表示)、板厚ひずみ  $|\epsilon_t|$  と

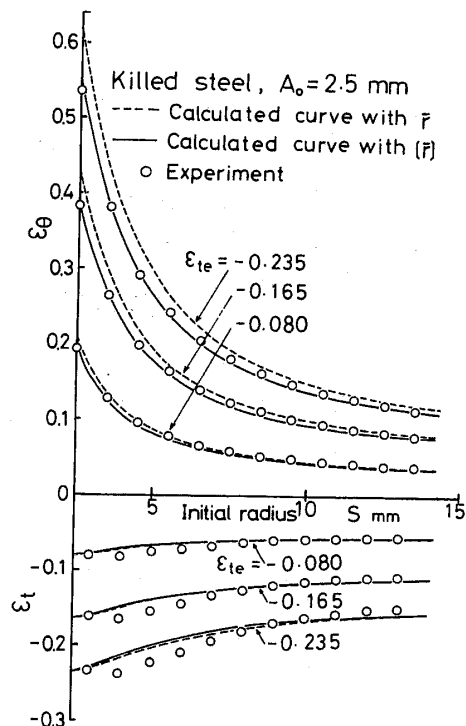


図 14 ひずみ分布の理論値と実験値の比較

単軸引張応力  $\sigma$ , 伸びひずみ  $\epsilon$  との間にそれぞれ  $\sigma_p = \beta\sigma, |\epsilon_i| = \epsilon/\beta$  の関係が成立する<sup>(12)</sup>. ここに,  $\beta = (1+r)/(1+2r)^{1/2}$  である.  $\sigma$  と  $\epsilon$  の間に  $n$  乗硬化則  $\sigma = F\epsilon^n$  を適用すれば, 式(9)が成立する.

$$\sigma_p = F\beta^{n+1}|\epsilon_i|^n \dots\dots\dots(9)$$

$r$  の値として  $\bar{r}$  および  $[\bar{r}]$  ( $A_0 = 2.5 \text{ mm}, \bar{\epsilon}_{oe} \approx 0.9 \cdot \epsilon_{ocr}$ ) を用いて式(9)より計算した  $\sigma_p - |\epsilon_i|$  曲線を図 15 に示す. 図 15 には,  $40 \text{ mm} \times 60 \text{ mm}$  の長方形試験片と一対の突起付き圧縮板(歯幅  $1.6 \text{ mm}$ ) を用いて得られた実験関係もプロットしてある. Hill の異方性理論を適用することの是非に問題はあつたものの, 大きなひずみ域に至るほど  $\bar{r}$  より  $[\bar{r}]$  を用いた理論線のほうが実験値に近づく傾向が見受けられる.

**5.3 深絞り性の評価** 表 2 に示した材料とは別に A 1100 板 9 種類 (O 材 A~G, H 24 材 B, C,  $t_0 = 0.8 \text{ mm}$ ) について  $[\bar{r}]$  を調べた. これらの材料は, 軽金属学会研究委員会金属成形部会における協同研究用として提供されたものの一部で, 安定伸びひずみが小さく  $\bar{r}$  もしくは  $[\bar{r}]$  の測定が困難であつた材料は除外してある. 限界絞り比 L.D.R. および  $\bar{r}$  の値を協同研究報告書<sup>(13)</sup>より引用して, L.D.R. と  $\bar{r}, [\bar{r}]$  との関係性を調べた結果を図 16 に示す (ただし,  $A_0 = 5 \text{ mm}, \bar{\epsilon}_{oe} \approx 0.9\epsilon_{ocr}$ ). 図 16 によれば,  $\bar{r}$  より  $[\bar{r}]$  のほうが L.D.R. との相関が高く, 深絞り性評価に優れていることが分かる.

**5.4  $[r]$  の面内分布**  $[r]$  を方向別に測定する試みも行って見た. この場合,  $\epsilon_{oe}$  を方向別に測定するため, 穴周に沿って穴壁より  $0.03 \text{ mm}$  以内の位置に微小硬度計により  $0.5 \text{ mm}$  の距離で 2 個圧こんを打ち,

これを標点とした. 変形前・後の標点距離の測定にはデジタル表示の工具顕微鏡(最小目盛  $0.001 \text{ mm}$ ) を用いた. 材料には上記共同研究用材料より 3 種類 (A 1100-O 材の D, F, G) および表 2 中の A 1100 板 (ここでは I 材と記す) の合計 4 種類を選んだ. この場合, 円周方向が測定方向に該当する.  $[r]$  および  $r$  の面内分布を図 17 に示すが, ほとんどの場合  $r > [r]$  となっているうえ, D 材および F 材では  $0^\circ$  と  $45^\circ$  における大小順位が  $[r]$  と  $r$  とで逆になっている. 前述共同研究報告によれば, D, F, G 材の深絞りおよび張出し成形の際  $0^\circ$  方向近辺において破断が生ずるとされている. I 材についても同様の結果を得た. また, いずれの材料も, 穴広げ成形の際  $0^\circ$  方向において最も早期に破断が生ずることが分かった. この方向は, 図 17 より  $[r]$  の最小方向と一致することになり, 結局,  $[r]$  は破断発生方向の予知にも役立つことが分かった.

以上, 図 14~17 にみた結果は, 2 軸応力下での素板の変形ならびに破断挙動についてはプレス成形性に対して, 従来の  $r$  による理解には限界があること, および 2 軸負荷履歴を反映した異方性パラメータがより優

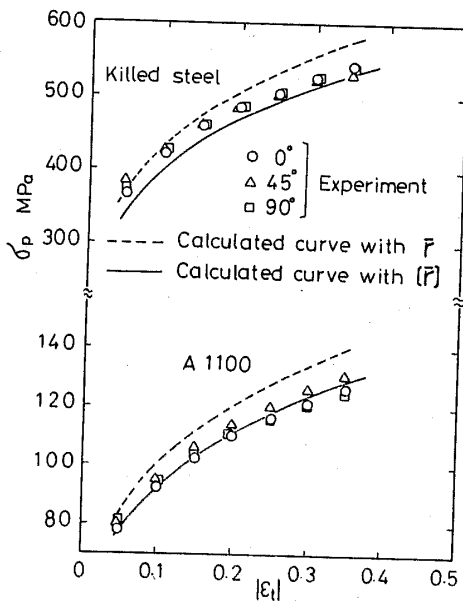


図 15 平面ひずみ圧縮試験における降伏曲線

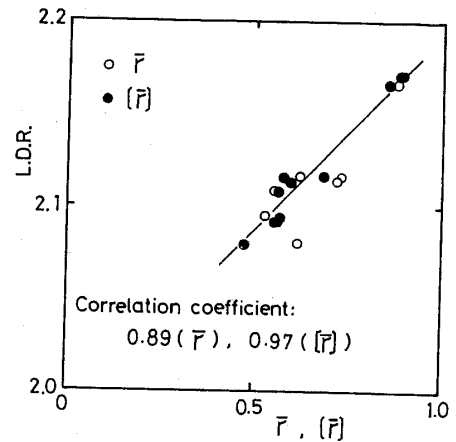


図 16 L. D. R. と  $\bar{r}, [\bar{r}]$  との関係

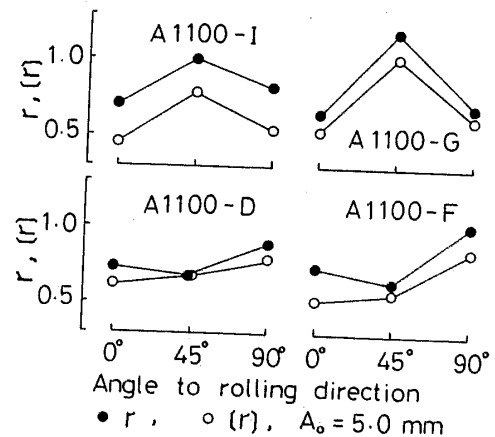


図 17  $[r]$  の面内分布

れた情報源となることを示唆している。[ $r$ ]もその一つと考えるが、現在のところ  $A_0$  の選択基準の究明が十分でない。この点の解明は今後の検討課題としたい。

## 6. 結 論

穴広げ試験により塑性異方性パラメータ [ $r$ ] を測定する手法の可否について、理論的ならびに実験的検討を行い、本法は十分実用に耐えることが分かった。すなわち、本法により、従来求め得なかった大きなひずみレベル ( $n$  値の 1.5~3.5 倍) まで安定して [ $\bar{r}$ ] ([ $r$ ] の板面内平均値) を測定することができた。多くの場合、 $[\bar{r}]$  は従来法による  $\bar{r}$  ( $r$  の板面内平均値) より低下し (最大で 40%)、その特異性は 2 軸引張応力依存性が現れたためと推定された。[ $r$ ] の利用面については、穴広げ成形におけるひずみ分布の予測、平面ひずみ圧縮降伏応力の見積もり、深絞り性の評価、軸対称プレス成形における破断発生方向の予知などの点で、従来法による  $r$  より有用な情報源となることが分かった。

終わりに、A 1100 板を提供された軽金属学会に感謝の意を表す。

## 文 献

- (1) Lankford, W. T., ほか 2 名, *Trans. Am. Soc. Met.*, **42** (1950), 1197.
- (2) Hsun Hu, *Metall. Trans.*, A, **6** (1975), 945.
- (3) Truskowski, W., *Metall. Trans.*, A, **7** (1976), 327.
- (4) 吉田・ほか 2 名, *機誌*, **72-600**(昭 44), 129.
- (5) Gotoh, M., *Res. Mech.*, **2** (1981), 123.
- (6) Parmar, A. and Mellor, P. B., *Int. J. Mech. Shi.*, **20** (1978), 707.
- (7) Yamada, Y. and Koide, M., *Int. J. Mech. Sci.*, **10** (1968), 1.
- (8) 軽金属圧延工業会技術委員会, *軽金属*, **27-7** (昭 52), 348.
- (9) 山田, *塑性・粘弾性*, (昭 47), 173, 培風館.
- (10) 井関・ほか 2 名, *機論*, **40-330**(昭 49), 372.
- (11) 河合・ほか 3 名, *昭和 56 年度塑性加工春季講演会講演論文集*, (昭 56-5), 505.
- (12) Johnson, W. and Mellor, P. B., *Engineering Plasticity*, (1978), 114, Van Nostrand Reinhold.
- (13) 軽金属学会, 軽金属学会研究委員会金属成形部会, A 1100 板の成形性, (昭 57), 9, 21.