

# 鋼板のプレス成形性試験法

大阪大学工学部 朝倉健二

## 1. ま え が き

プレス加工により金属薄板を成形する場合、製品の形状・加工法に応じて、成形性や価格などの点から、最適の材料を選定しなければならないが、このような材料の選定には、原寸法の型による試験成形か、あるいは成形形状にあわせた模型試験を行なうのが、最も確実な方法である。しかし、このような方法を日常の成形性試験に採用するには、経費がかかりすぎるので、特殊な場合以外は実施できない。そのため、成形性試験として必要な最低の条件を満たす範囲内において、形状的に、また寸法的に模型化した各種の直接試験法が考案されている。

現在実用されているプレス成形性試験法を大別すると、実際の成形において素板が受けると同様な、もしくはそれに近い変形を試験片に与える直接試験法と、引張試験のような、材料の基礎的性質を求める間接試験法にわけることができる。

本文は、まずプレス成形性の区分について説明し、ついで鋼板に対して現在実用されている、各種の直接および間接的なプレス成形性試験法を解説したのち、筆者の提唱する、板幅ひずみによる深絞り性の新しい間接試験法が、工場での日常の試験法としてすぐれていることを明らかにする。

## 2. プレス成形性

プレス加工における板材の変形は、縮みフランジ変形・伸びフランジ変形および曲げ変形の3種の基礎的変形からなっている。このうち、縮みフランジ変形は、図1に示すダイス面上にあるフランジのように、半径方向応力 $\sigma_r$ によって生ずる、2次的な圧縮の円周方向応力 $\sigma_\theta$ により、フランジ部が円周方向に縮まる変形である。また、伸びフランジ変形は、ポンチ底部のフランジのように、2次的な引張の円周方向応力 $\sigma_\theta$ によって、フランジ部が円周方向に伸びる変形である。この2つの変形と曲げ変形の組合せにより、種々のプレス成形が行なわれるのである。

これらの変形の限度を支配する破断は、基本的には引張破断であり、この破断は強度不足によっておこる破断

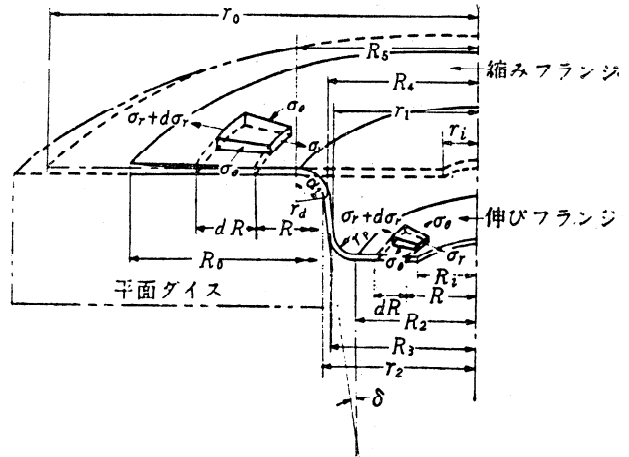


図1 円筒形のプレス成形

( $\alpha$  破断), 伸び不足によっておこる破断 ( $\beta$  破断) および曲げ破断の3種にわけられている。そうして、これら3種の基本的な変形と破断の組合せにより、プレス成形は、表1および図2に示すように、絞り成形・張出し成形・伸びフランジ成形および曲げ成形の4種に区分されている。したがって、プレス成形性は深絞り性・張出し性・伸びフランジ性および曲げ性の4種の基礎成形性に区分して検討するのが合理的である。<sup>1)</sup>

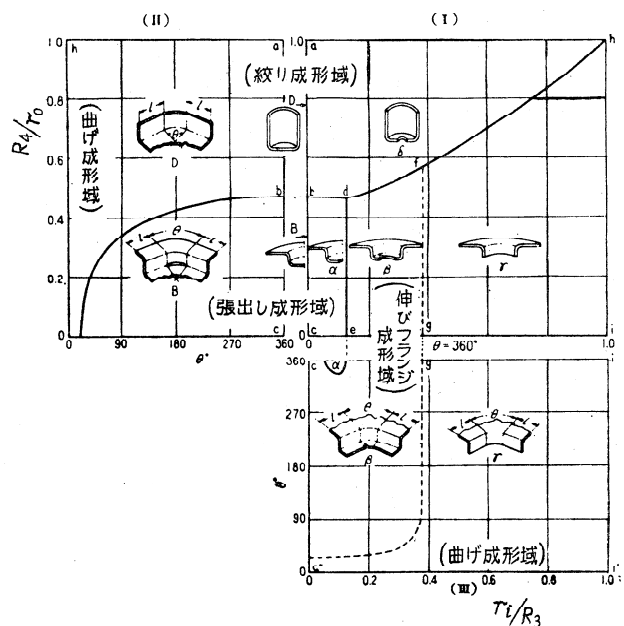


図2 プレス成形域区分図<sup>1)</sup>

表1 プレス成形と成形性の区分

変形 破断	縮みフランジ 変形	伸びフランジ 変形	曲げ変形
α 破断	絞り成形 (深絞り性)	張出し成形 (張出し性)	—
β 破断	—	伸びフランジ成形 (伸びフランジ性)	—
曲げ破断	—	—	曲げ成形 (曲げ性)

### 3. 成形性直接試験法

成形性の直接試験法は、実際のプレス成形における素板の変形に近い変形を、試験片に与える方法であり、実際のプレス成形品は、前述の4つの基礎的な成形を単独に利用することよりも、幾つかの基礎的成形が組合わされて加工されることが多いので、これらの基礎成形性に対応した試験法のみならず、基礎成形性が組合わされた、複合成形性に対応した試験法も考える必要がある。

表2 プレス成形性直接試験法の分類

	プレス成形性	成形性試験法
基礎 成形 性	深絞り性	エリクセン深絞り試験(平底ポンチ使用)
		Swift 深絞り試験( " )
		Sweden 深絞り試験( " )
		福井式コニカルカップ( " ) 深絞り試験
張出し性	エリクセン試験	
	オルゼンカップ試験	
	伸びフランジ性	エリクセン穴拡げ試験 福井一吉田の方法
曲げ性	曲げ試験	
複合成形性	深絞り—張出し 複合成形性	Swift 深絞り試験(球底, 楕円底) ポンチ使用 福井式コニカルカップ(球底ポンチ使用) 深絞り試験 コニカルカップ試験( " )

表2は、鋼板に対して現在実用されている各種の成形性直接試験法を、各プレス成形性に対応させて示したものである。

#### 3.1 深絞り性試験法

純深絞り性試験および深絞り性を含んだ複合成形性試験には、表2の第1および第5欄に示した各種の方法が用いられている。これらの方法は、コニカルカップ試験を除き、いずれも限界絞り比 L.D.R, すなわち破断せずに絞り得る最大の素板直径  $D_{max}$  を、ポンチ直径  $d_p$  で割った値  $D_{max}/d_p$ , もしくは深絞り限界の最大素板

直径  $D_{max}$  を求める試験法であるが、深絞り限界を求めるのに手数がかかるので、公的な規格として定められていない。JIS において規定されている深絞り性試験法は、去年採用されたコニカルカップ試験(Z 2249, 1963)のみで、古くから薄板の成形性試験に用いられているエリクセン試験(B 7777)は、張出し性試験法である。

#### 3.1.1 平面ダイスによる円筒深絞り試験

円筒深絞り試験のうち、平面ダイスと平底ポンチを用いる主な試験法の工具寸法と試験条件は、表3に示すとおりである。

表3 エリクセンおよび Swift 深絞り試験の工具寸法と試験条件

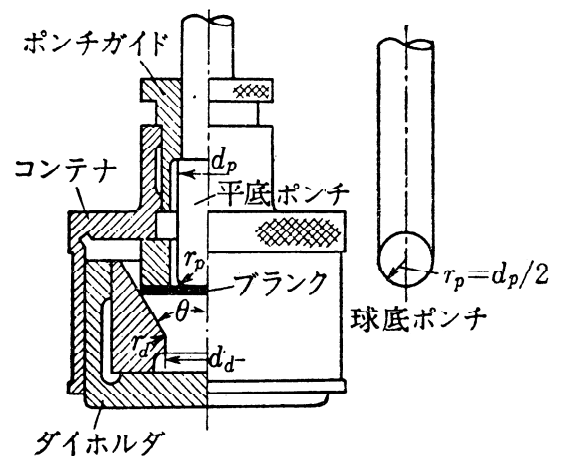
試験法 工具寸法 と主要な 試験条件	エリクセン 深絞り試験	Swift 深絞り試験	
		標準	選択
板厚範囲 (mm)	0.2~1.2	0.3~1.2	0.45~1.9
ポンチ直径 (mm)	33	$32^{+0}_{-0.05}$	$50^{+0}_{-0.05}$
ポンチ頭部角 半径 (mm)	5	$4.5 \pm 0.1$	$5.0 \pm 0.1$
ダイス穴直径 (mm)	$33.45 \sim 35.88^*$	$33.20 \sim 35.48^*$	$51.89 \sim 55.20^*$
しわ抑え力	必要最底	必要最底	必要最底 × (1.5~1.75)
絞り速度 (mm/sec)	1	35以下	
試験値	原則的には深絞り限界の素板直径(mm)	絞り比で 0.025 単位に素板直径を変えて求めた限界絞り比	

\* 板厚に対し一定

#### 3.1.2 福井式コニカルカップ深絞り試験

福井式コニカルカップ深絞り試験<sup>3)</sup>は、円錐ダイスと平底もしくは球底ポンチを用い、限界絞り比 L.D.R を求

図3 福井式コニカルカップ深絞り試験およびコニカルカップ試験工具



める方法で、平底ポンチを用いる場合が純深絞り性試験、球底ポンチを用いる場合が深絞り一張出しの複合成形性試験である。

福井式コニカルカップ深絞り試験の適用範囲は、板厚 0.5~1.6mmで、図3および表4に試験工具の形状および寸法を示す。この試験法の特徴は、円錐ダイスを用いることにより、外部から特別なしわ抑えを加えなくても、しわが生じないで深絞りができることで、しわ抑えを必要とする平面ダイス法にくらべて、簡便な方法といえる。

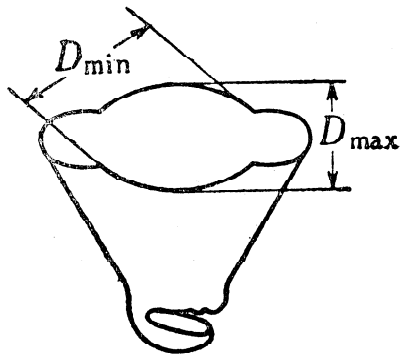


図4 破断カップ

表4 福井式コニカルカップ深絞り試験およびコニカルカップ試験の工具寸法 (mm)

型別	13型	17型	21型	27型
適用板厚範囲 $t_0$	0.5以上 0.8未満	0.8以上 1.0未満	1.0以上 1.3未満	1.3以上 1.6未満
ダイス開き角度 $\theta$	60°	60°	60°	60°
ダイス穴直径 $d_a$	14.60	19.95	24.40	32.00
ダイス角半径 $r_a$	3.0	4.0	6.0	8.0
ポンチ直径 $d_p$	12.70	17.46	20.64	26.99
コニカルカップ ポンチ頭部 角半径 $r_p$	3.0	4.0	6.0	8.0
コニカルカップ 深絞り試験 ポンチ頭部 鋼球半径 $r_p$	$d_p/2$	$d_p/2$	$d_p/2$	$d_p/2$
コニカルカップ 試験片 鋼球半径 $r_p$	$d_p/2$	$d_p/2$	$d_p/2$	$d_p/2$
コニカルカップ 試験片 試験片直径 $D_0$	36	50	60	78

### 3.1.3 コニカルカップ試験

コニカルカップ試験は、図3および表4に示した福井式コニカルカップ深絞り試験工具（ただしポンチは球底ポンチ）を用いて行なう。試験法は、プレスまたは材料試験機に試験工具を取付け、板厚に対して表4に示した一定直径の円板試験片を絞り、底が抜けたときの破断カップ上縁部外径の最大値および最小値（図4）の平均値を求め、コニカルカップ値 C.C.V とする。そうして、この値が小さいほど、深絞り一張出しの複合成形性がよいと判定するのである。なお、潤滑剤としては、#120の

マシン油を用いると規定されている。

### 3.2 張出し性試験法

張出し性試験には、エリクセン試験法が古くから用いられており、各国において規格が定められている。エリクセン試験法は、1912年に薄板の成形性試験法として発表されて以来、深絞り性の判定に適しないとされていたが、試験法が簡便なため、深絞り性試験法として広く用いられてきた。しかし、試験片の変形を考えれば、当然張出し性試験であることがわかる。

エリクセン試験機の構造は図5に示すとおりで、規定されている主要寸法は、ポンチ頭部が半径  $10 \pm 0.05$ mm の球面で、ダイス内径が  $27 \pm 0.05$ mm、外径が 55mm である。試験の適用範囲は、板厚 0.1~2.0 mm で、試験片は幅 90 mm の帯、一辺 90 mm の正方形または直径 90 mm の円板と定められている。

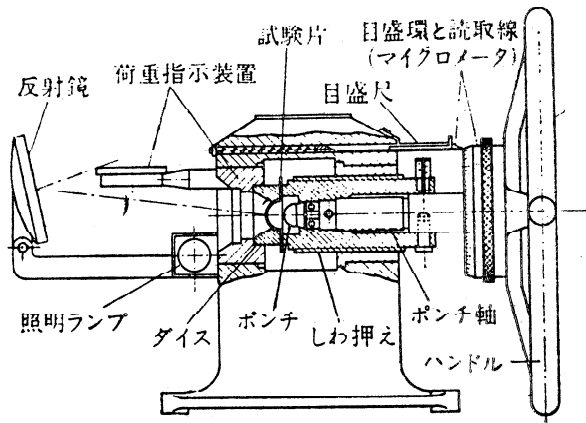


図5 エリクセン試験機

試験法は、試験片をダイスとしわ抑えで固定したのち、約 0.1mm/sec の速さでポンチを板に押し込み、少なくとも1箇所、裏面に達する割れができたときに試験を中止する。そうして、そのときのポンチの移動距離 (mm) をエリクセン値とするのである。なお、潤滑剤としては、ワセリンを用いると定められている。

オルゼンカップ試験は、エリクセン試験とほとんど同じであるが、厚さ 1.6mm 以下の板に対して、試験片の幅は 33/4 in、ダイス内径は 1 in、ポンチ先端の球面半径は 7/16 in である。

### 3.3 伸びフランジ性試験法

伸びフランジ性試験には、エリクセン穴拡げ試験法が用いられており、その試験工具の形状および寸法を図6および表5に示す。試験法は平底ポンチを押し込み、円板試験片の中心にあけた半径  $r_i$  の穴を拡げ、その周縁にき裂 (R破断) が認められたときの穴半径  $R_i$  を測定する。そうして、試験値として、 $R_i/r_i$  または  $(R_i - r_i)/r_i$  をとるのである。なお、表5に示した穴半径  $r_i$  は、

現在市販されている軟鋼板に対して大きすぎるので、 $r$  をポンチ半径  $r_i$  まで拡げても、 $\beta$  破断が生じない場合もある。

そこで福井一吉田両氏は、この試験法を改善し、平底ポンチの代わりに球底ポンチを使用し、 $r_i$  を  $r_1$  の 20~25% の範囲にとることを提案している。

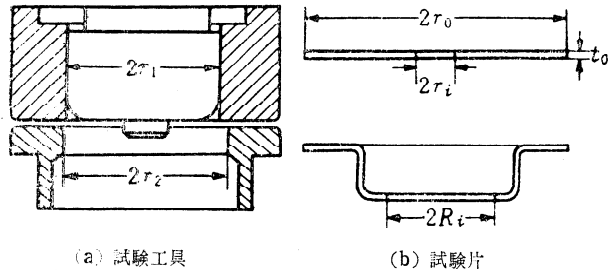


図6 エリクセン穴拡げ試験

表5 エリクセン穴拡げ試験工具および試験片寸法 (mm)

型 別	No. 1	No. 2
$t_0$	1.2 以下	0.8 以下
$2r_i$	12	7.5
$2r_1$	44	27
$2r_2$	40	25
$(2r_0) \text{ min}$	70	45

### 3. 4 曲ご性試験法

曲げ試験は JIS に規定されており、一定の曲率に沿って板を曲げ、き裂ができるかどうかを調べるのであるが、薄板では折りたたんで密着させても、き裂を生じない場合が多く、曲げ性の差が求まらない場合がある。しかし実際のプレス成形では、引張力が附加された状態で曲げ加工を行なう場合も多いので、このような状態での曲げ成形性試験について検討する必要がある。

### 4. 成形性間接試験法

成形性の直接試験法には、試験にかなり手数のかかるものが多いので、日常の試験には、もっと簡単な方法が望ましい。

引張試験で求められる試験値のなかで、引張強さ・降伏点および伸びは、材料の基本的な性質を示すものであるが、いずれも単純な 1 軸応力状態のもとでの、材料の変形抵抗もしくは変形限度を示すものである。したがって、複雑な応力状態のもとでの、実際のプレス成形性の判定基準として、これらの値を単独で用いることは不適當である。しかし、これらの試験値を組合わせて考えれば、プレス成形性のおおよその判定が可能となり、通常、降伏点が低く、引張強さおよび伸びが大きいものは

ど、プレス成形性がよいとされている。

現在、成形性間接試験値として最も関心をもちられているのはランクフォード値で、深絞り性または深絞りりと張出しの複合成形性間接試験値として、高く評価されている。

#### 4. 1 ランクフォード値

ランクフォード値は、引張試験片を一様伸び範囲（通常 15~20%）まで引張ったときの、幅ひずみ  $\epsilon_w$  と厚さひずみ  $\epsilon_t$  の比で表わされ、R 値ともよばれている。

$$R = \frac{\epsilon_w}{\epsilon_t} \quad (1)$$

引張試験片の変形前後の幅をそれぞれ  $w_0$  および  $w$ 、厚さを  $t_0$  および  $t$  とすれば、R 値は (2) 式で与えられる。

$$R = \frac{\ln \left( \frac{w}{w_0} \right)}{\ln \left( \frac{t}{t_0} \right)} \quad (2)$$

ここで  $\ln$  は自然対数を表わす。 $\epsilon_w$  と  $\epsilon_t$  はいずれも負の値で、両者の比である R 値は正の値である。

等方性の材料では、板幅の減少と板厚の減少とが同じ割合でおこり、 $\epsilon_w = \epsilon_t$  となるから、R 値は 1 である。しかし異方性の材料では  $\epsilon_w \neq \epsilon_t$  となるから、R 値は 1 と異なった値となる。なお、R 値が 1 より大きいということは、板厚方向の変形抵抗が、板の平面での変形抵抗より大きいことを示している。深絞り成形の場合、一般に R 値の大きい板材では、素板が破断する危険のある、ポンチ頭角の丸味部に接する部分での板厚が減少しにくいので、図 7 に示したように、すぐれた深絞り性を有していると考えてよい。低炭素鋼板では、R 値が 1.0 以上のものが多く、高級深絞り用鋼板では 2.0 以上のものもある。

図7 平均ランクフォード値と限界絞り比の関係<sup>6)</sup>

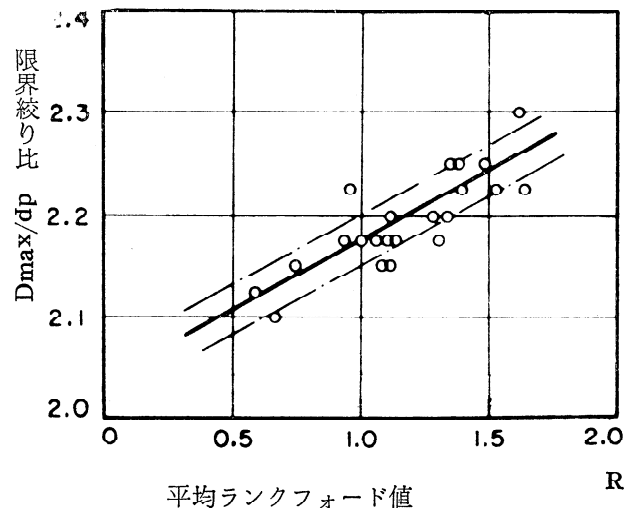
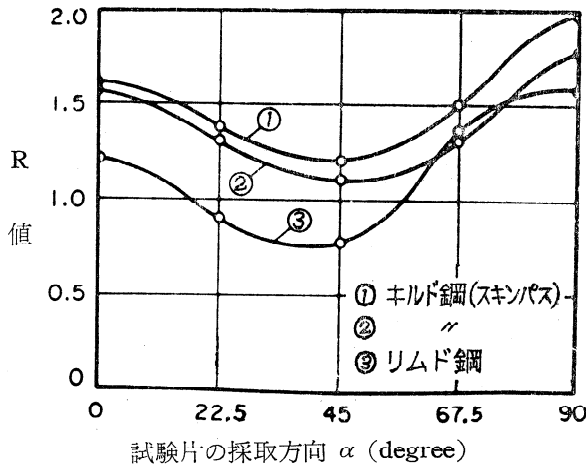


図8 試験片の採取方向によるR値の変化<sup>6)</sup>



ランクフォード値の測定法は、厚さひずみ  $\epsilon t$  の求め方によって、直接法と間接法にわけられている。直接法は簡易であるが、板厚によって精度が異なること、またわずかな表面荒れによって、敏感に影響されるなどの欠点がある。そこで最近<sup>7)</sup>は、変形前後の標点距離  $l_0$  および  $l$  を測定し、塑性変形の体積一定の式(3)から、板厚ひずみ  $\epsilon t = \ln(t/t_0)$  を間接的に求め、(4)式より R 値を算出するのが普通である。

$$w_0 l_0 t_0 = w l t \quad (3)$$

$$R = \frac{\ln\left(\frac{w}{w_0}\right)}{\ln\left(\frac{w_0 l_0}{w l}\right)} \quad (4)$$

なお、図8に示すように、ランクフォード値は試験片の採取方向  $\alpha$  (圧延方向を基準にとる) によって異なるため、 $\alpha=0^\circ, 22.5^\circ, 45^\circ, 67.5^\circ, 90^\circ$  の各試験片について求めた、 $R_0$  値、 $R_{22.5}$  値、 $R_{67.5}$  値、 $R_{90}$  値より(5)式を用いて算定した平均ランクフォード値 ( $\bar{R}$  値) をとるのが普通である。

$$\bar{R} = \frac{R_0 + R_{90} + 2(R_{22.5} + R_{45} + R_{67.5})}{8} \quad (5)$$

筆者は最近<sup>8)</sup>、ランクフォード値を検討するため、鉄鋼大手3社の各種冷延鋼板(板厚 0.8 mm—14種)について、 $R_0$  値、 $R_{45}$  値、 $R_{90}$  値、 $\bar{R}$  値を測定し、限界絞り比 L.D.R との相関を求めた。表6は各種の R 値と限界絞り比との相関係数を示し、 $R_{45}$  値は

表6 ランクフォード値と限界絞り比の相関係数

	限界絞り比(平底ポンチ)	限界絞り比(球底ポンチ)
$R_0$	0.78	0.81
$R_{45}$	0.94	0.95
$R_{90}$	0.84	0.88
$\bar{R}$	0.93	0.95

限界絞り比に対して、R 値と同じ程度に高い相関を示すことがわかった。したがって、ランクフォード値としては、5方向の試験片から求める従来の  $\bar{R}$  値をとるよりも  $45^\circ$  方向の試験片から求める  $R_{45}$  値をとるべきであるといえる。

#### 4.2 W値およびB値

ランクフォード値は、鋼板の深絞り性の間接試験値としてすぐれているけれども、その測定には、(4)式に示したように、間接的に求めた板厚ひずみを用いなければならないので、測長器により標点距離の変化を精密に測定する必要があり、測定および計算に相当な手数と時間がかかる。したがって、ランクフォード値を求める間接試験法は、工場での日常の深絞り性試験として不適当である。

そこで筆者はランクフォード値に代わる実的な深絞り性の間接試験値として、板幅ひずみによる W 値および B 値を考案し、鋼板の新しい深絞り性の間接試験法として提唱している<sup>8)</sup>。

##### 4.2.1 W値

R 値が板幅ひずみ  $\epsilon w$  と板厚ひずみ  $\epsilon t$  の比であるのに対し、筆者は板幅ひずみのみをとり、引張試験片を一定伸び率(20%または25%)まで引張ったときの板幅ひずみ  $\epsilon w$  を W 値(W20値またはW25値)と定め、深絞り性の間接試験値として提唱する。

$$W = -\epsilon w = \ln\left(\frac{w_0}{w}\right) \quad (6)$$

いま、試験片の軸方向の長さひずみ  $\epsilon_l$  を一定値  $\alpha$  ( $\alpha_{20}=0.182, \alpha_{25}=0.223$ ) にとると、塑性変形の体積一定の条件  $\epsilon_l + \epsilon w + \epsilon t = 0$  から、W 値は(7)式に示すように、R 値の関数で表わされる。

$$W = \alpha \cdot \frac{R}{R+1} \quad (7)$$

試験法は、標点距離 50mm の JIS 5号引張試験片を一定速度で引張り、W20値およびW25値に対して、それぞれ長さ 60 mm および 62.5 mm のゲージを使用し、標点距離が所定の長さまで伸びたときに、直ちに負荷を停止し、除荷する。そうして、試験片の中央部 20mm における板幅をノギスで測定して、板幅ひずみ  $-\epsilon w$  を求め、各引張り率に対する W 値とする。

表7は、前述の冷延鋼板14種類について測定した、各種の W 値と限界絞り比との相関係数を示す。ここで、 $W_{20_{45}}$  値および  $W_{25_{45}}$  値は、いずれも圧延方向に対し  $45^\circ$  方向に採取した試験片の W 値であり、また  $\bar{W}_{20}$  値および  $\bar{W}_{25}$  値は、いずれも(5)式に示した  $\bar{R}$  値と同じように、5方向の試験片の W 値から算出した値である。これらの W 値と限界絞り比との相関係数は、いずれも 0.94 以上で、

表7 W値, B値と限界絞り比の相関係数

	限界絞り比(平底) ポッチ	限界絞り比(球底) ポッチ
W20 <sub>45</sub>	0.95	0.95
W25 <sub>45</sub>	0.95	0.94
$\bar{W}20$	0.97	0.98
W25	0.94	0.95
B	0.96	0.97

R45値または $\bar{R}$ 値と限界絞り比との相関係数(表6)にはほぼ等しいか、すこし大である。しかもこれらのW値(とくにW20<sub>45</sub>値およびW25<sub>45</sub>値)は、測定が容易であり、試験時間が短かくてすむので、ランクフォード値よりすぐれた深絞り性の間接試験値であるといえる。

#### 4. 2. 2 B値

W値の試験法は、負荷中に標点間距離を正確にチェックしなければならない欠点がある。そこで筆者は、圧延方向に対し45°方向に採取した引張試験片を、最高荷重降下点まで引張ったときの板幅ひずみ $\epsilon_w$ をB値と定め、深絞り性の間接試験値として提唱する。

荷重一伸び曲線の最高荷重点に対する伸びひずみ、すなわち一様伸び限界のひずみ $\epsilon_i$ は加工硬化係数 $n$ に等しいが、軟鋼板においては、最高荷重がある伸び範囲続くので、最高荷重降下点に対する伸びひずみが $n$ に比例するものとするれば、B値は(8)式で与えられる。

$$B = -\epsilon_w = K \cdot n \frac{R}{R+1} \quad (8)$$

試験法は、45°方向に採取したJIS5号引張試験片を一定速度で引張り、荷重目盛板の指針が最高荷重点より下がり始める瞬間に負荷を停止し、除荷する。そうして、試験片の中央部20mmの板幅をノギスで測定して板幅ひずみ $\epsilon_w$ を求め、B値とする。

表8 各種深絞り性間接試験の試験所要時間

試験値	R	R45	$\bar{W}20, \bar{W}25$	W20 <sub>45</sub> , W25 <sub>45</sub>	B
試験時間 (min)	81	16	36.5	10	9.5
Rの試験時間 に対する比率	1	0.20	0.45	0.12	0.12

B値と限界絞り比との相関係数は、表7に示したように0.96~0.97で、B値は限界絞り比に対して、R45値 $\bar{R}$ 値、W20<sub>45</sub>値、W25<sub>45</sub>値よりもすぐれた相関関係を有している。表8はB値、W値およびR値の各種深絞り性間接試験値の試験所要時間を示しており、B値およびW20<sub>45</sub>値、W25<sub>45</sub>値は、いずれも $\bar{R}$ 値の試験時間の約1/10ですむことがわかる。なお、この試験時間は、4種類の

試料を連続して試験したときの1試料当りの平均所要時間で、試験片の製作時間は含まれていない。

したがって、B値は鋼板の深絞り性間接試験値として、試験の容易さ、試験時間の短縮、限界絞り比に対する高い相関などの点から、ランクフォード値よりもはるかにすぐれているといえる。

## 5. あとがき

プレス成形性試験において、最近非常に関心を集めている深絞り性間接試験値としてのランクフォード値は、工場での日常の試験に適しないというらみがある。そこで、これに代るものとして、筆者が提唱するB値およびW値、このうちとくにB値は、試験に手数がかからず、しかも、鋼板の深絞り性の判定基準としてすぐれているので、日常の試験に広く利用されることを期待する。

### 文献

- 1) 吉田清太; 理化学研究所報告, 35, 199 (1959)
- 2) O.H. Kemmis; Sheet Metal Indust., 31, 203 (1957)
- 3) S. Fukui; Sci. Pap. Inst. Phy. Chem. Res., 34, 1422 (1938)
- 4) 吉田清太; 理化学研究所報告, 34, 103 (1958)
- 5) W.T. Lankford, S.C. Snyder and J.A. Bauscher; Trans. ASM., 42, 1197, (1950)
- 6) R.L. Whiteley; Trans. ASM., 52, 154 (1960)
- 7) 松藤和雄; 塑性と加工, 5, 85 (1964)
- 8) 朝倉健二, 上田太郎; 材料学会第13期総会講演会前刷