
超深絞り用 KTS 冷延鋼板のプレス成形性

Press-Formability of KTS Cold-Rolled Steel Sheet for Deep Drawing

中里 嘉夫(Yoshio Nakazato) 伊藤 庸(Yo Ito) 佐々木 徹(Toru Sasaki) 野原
清彦(Kiyohiko Nohara)

要旨：

冷延鋼板のプレス成形性とは、深絞り性、張り出し性、形状性、張り剛性および二次成形性などの諸特性の総称である。深絞り性は r 値が高いほどよく、その意味で板面に平行な $\{111\}$ 集合組織をもつことが望ましい。張り出し性は延性破壊の起点となる非金属介在物や炭化物などが少ない板ほど良好である。形状性は降伏点が低いほどよい。張り剛性は弾性定数が高い $\{111\}$ 集合組織をもつ板が良好である。またこのような板は二次成形に関する異方性が少ない。KTS 鋼板は、微量の P, Sb, Bi などを添加し、オープンコイル焼鈍によって脱炭脱窒したリムド冷延鋼板で、プレス成形性に必要な諸特性がアルミキルド冷延鋼板よりもさらにすぐれている。

Synopsis：

"Press-formability" of cold-rolled sheet is a generic term of the properties such as deep-drawability, stretch-formability, shape-fixability, rigidity and so-called "re-formability" etc. Deep-drawability of sheet is excellent as its r -value on tensile testing is high and this may be achieved by the sheet having the texture of preferred orientation in which $\{111\}$ planes are parallel to the rolling surface. Stretch-formability of sheet is improved by minimizing the amounts of non-metallic inclusions or carbides etc. which can originate a ductile fracture in steel. The sheet of low yield strength is suitable for drawings which require good shape-fixability. Rigidity of drawings is enhanced if the sheet has " $\{111\}$ texture" because the elastic properties of specimens in all directions on tensile testing are higher than those of steels having other textures. Sheet with $\{111\}$ texture has little planar anisotropy for "re-formability". KTS sheet is a cold-rolled rimmed steel in which small amounts of special elements such as P, Sb and Bi etc. are added and the amounts of carbon and nitrogen are extremely decreased by open coil annealing, and its properties for press-formability described above are much superior than those of ordinary aluminum-killed steel for deep drawing quality.

本文は次のページから閲覧できます。

超深絞り用 **KTS** 冷延鋼板のプレス成形性Press-Formability of **KTS** Cold-Rolled Steel Sheet for Deep Drawing

中 里 嘉 夫*

Yoshio Nakazato

伊 藤 庸**

Yo Ito

佐々木 徹***

Toru Sasaki

野 原 清 彦****

Kiyohiko Nohara

Synopsis :

"Press-formability" of cold-rolled sheet is a generic term of the properties such as deep-drawability, stretch-formability, shape-fixability, rigidity and so-called "re-formability" etc.. Deep-drawability of sheet is excellent as its $\bar{r}$ -value on tensile testing is high and this may be achieved by the sheet having the texture of preferred orientation in which $\{111\}$ planes are parallel to the rolling surface. Stretch-formability of sheet is improved by minimizing the amounts of non-metallic inclusions or carbides etc. which can originate a ductile fracture in steel. The sheet of low yield strength is suitable for drawings which require good shape-fixability. Rigidity of drawings is enhanced if the sheet has " $\{111\}$ texture" because the elastic properties of specimens in all directions on tensile testing are higher than those of steels having other textures. Sheet with $\{111\}$ texture has little planar anisotropy for "re-formability".

KTS sheet is a cold-rolled rimmed steel in which small amounts of special elements such as P, Sb and Bi etc. are added and the amounts of carbon and nitrogen are extremely decreased by open coil annealing, and its properties for press-formability described above are much superior than those of ordinary aluminum-killed steel for deep drawing quality.

1. 緒 言

冷延鋼板の加工技術、とくにプレス成形性に関する塑性力学的解釈については、1959年吉田¹⁾によりプレス成形域区分の考えが提唱され、深絞り、張り出し、伸びフランジ、曲げの各成形性に対する材料特性の体系的な取扱いがなされるようになった。そして深絞り性については主として集合組

織を中心とした材料製造上の改良が行なわれてきたが、張り出し性についても塑性不安定や延性破壊の機構に関する基礎的な研究が行なわれてきた。また伸びフランジ性についても実験結果が集積されつつあるが、理論的検討はまだ十分なされていない。曲げ性は冷延鋼板の場合本来良好なので特別な問題となることはほとんどない。

さらに、曲率半径が比較的大きい曲面を有するプレス製品のように軽度の加工を受けるもので

* 千葉製鉄所管理部薄板管理課課長

*** 技術研究所水島研究室主任研究員

** 技術研究所薄板研究室主任研究員

**** 技術研究所薄板研究室

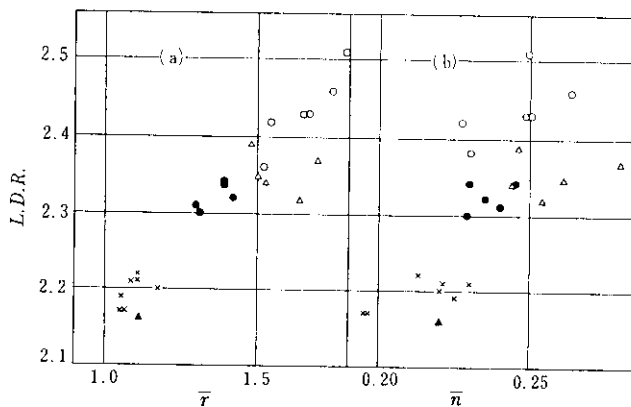


Fig. 1 Effects of $\bar{r}$ and n values on the limiting drawing ratio ($L.D.R.$) of cold rolled sheet (Spherical punch of 200mm dia.)
 × Rimmed steel
 Δ Aluminum-killed steel with elongated grain
 ▲ Aluminum-killed steel with equi-axed grain
 ● Rimmed steel decarburized by open coil annealing
 ○ KTS steel

は、破断の問題よりもむしろ成形後の寸法形状精度および張り剛性の問題が重要であり、成形性とならんで形状性なる概念が導入された。²⁾ そしてこの問題についても材料強度、集合組織などの面から多くの検討がなされている。

最近 wall breakage の研究³⁾や scribed circle test による自動車車体部品の変形経路の測定結果などから、経路が単純な場合の成形性すなわち“一次成形性”に対して、予変形を受けた材料の成形性もしくは変形経路が単純でない場合の成形性、すなわち“二次成形性”に対する材料特性に注意がそそがれるようになり⁴⁾、この観点からの検討がなされつつある。

プレス成形性として要求される上述の基本要因と鋼板の冶金学的特性—成分、内部欠陥および異相粒子、結晶粒度、結晶異方性、加工ひずみならびに巨視的、微視的な残留応力そしてひずみ時効の程度など—との結びつきは複雑で必ずしも明確にされているとはいえない。

一方当社では、特殊元素の添加とオープンコイル焼鈍を組合わせた製造技術により、深絞り性と耐時効性がきわめてすぐれたリムド冷延鋼板—KTS鋼板—を開発し、1961年10月以来本格的な大

量生産を行なっている。そして深絞り性をはじめとする上述の各種要因に対して冶金学的研究を重ねるとともに、実際の製造上では純酸素転炉製鋼、真空脱ガスなど新しい設備や技術の発達を取り入れ、また製鉄・製鋼工程における成分管理技術の進歩、焼鈍条件や調質度の厳密な管理など圧延工程におけるきめ細かい改良進歩の積み重ねが行なわれた。その結果通常の深絞り用アルミキルド冷延鋼板をしのぐすぐれた特性をもった超深絞り用 KTS 鋼板が製造され、現在自動車工業や電機工業をはじめ広い分野にわたって大量に使用されている。また単にプレス用鋼板としてだけでなくホーロー用鋼板および電気鋼板としての需要も多い。

本報ではプレス加工用鋼板に要求される基本特性として深絞り性、張り出し性、形状性および二次成形性をとりあげ、その一般的知識を概説するとともに、超深絞り用 KTS 鋼板の材質特性について述べる。

2. 深絞り性

深絞り性は材料特性以外に工具形状、潤滑条件、加工速度、板取りなど種々の条件によって変化するが、周知のとおり Lankford, Snyder, Bausher⁵⁾は、アルミキルド冷延鋼板のすぐれた深絞り性が加工の際板厚方向に薄くなりやすく、平面方向に縮みやすいという塑性異方性に起因していることを見出し、これを引張り試験片の厚さ方向ひずみ ϵ_t と幅方向ひずみ ϵ_w の比 ϵ_w/ϵ_t で表現し、 r 値と名づけて深絞り性をあらわす指標と考えた。

深絞りの塑性論としては、異方性材料の軸対称問題が全ひずみ理論を用いて解かれつつあり⁶⁾⁷⁾⁸⁾円筒深絞りの場合限界絞り比 $L.D.R.$ は絞り込み所要力と側壁部またはポンチプロフィール部における破断耐力で定まり、平頭ポンチの場合

$$L.D.R. \propto \sqrt{(1+r)/2} \{ (1+r)/\sqrt{1+2r} \}^n,$$

球頭ポンチの場合

$$L.D.R. \propto (\sqrt{1+2r/2}) (2\sqrt{1+r})^n$$

ただし加工硬化特性が n 乗硬化式 $\sigma = C\varepsilon^n$ で表わされるものとする。したがって r 値, n 値ともに $L.D.R.$ と正の相関関係を有することが予測されるが, その影響は r 値の方がずっと大きいことが指摘される。

一例として各種の冷延鋼板を球頭ポンチで絞ったときの実測値を Fig. 1 に示す。ここで $\bar{r} = (r_0 + 2r_{45} + r_{90})/4$ で r_0, r_{45}, r_{90} はそれぞれ圧延方向と $0^\circ, 45^\circ, 90^\circ$ 離れた方向の試片の r 値であり, $\bar{n}$ も同様の意味である (r 値は15%引張りひずみを与えて測定し, n 値は10%および20%引張りひずみに対する応力の値から計算した)。現在一般に製造されている冷延鋼板の $\bar{r}$ 値および $\bar{n}$ 値は大体 Fig. 1 に示した範囲内にあるが, $\bar{r}$ の影響の方が $\bar{n}$ にくらべて明瞭であり, また KTS 鋼板の $\bar{r}$ および限界絞り比は他の鋼板にくらべて著しく大きいことがわかる。

r 値が材料の結晶学的異方性から説明されることをはじめて提唱したのは Burns と Heyer である⁹⁾。彼らは α 鉄単結晶の r 値を, (1)すべりは最大せん断応力方向にもっとも近い $\langle 111 \rangle$ 方向に生ずる, (2)このすべり方向のひずみを板幅と板厚の両方向に分解してそれぞれひずみ成分を求めその比を r 値とする, という二つの仮定から計算した。そして cube on corner と呼ばれる $\{111\} \langle 1\bar{1}0 \rangle$ 方位, cube on edge と呼ばれる $\{110\} \langle 001 \rangle$ 方位, cube on face と呼ばれる $\{100\} \langle 011 \rangle$ 方位の3方位結晶について r_0, r_{45}, r_{90} を推算した結果, r 値の平均値が大きくしかも平面内における変動が少ない結晶方位, いいかえれば深絞り性が優秀で耳の発生も少ない結晶方位は, $\{111\}$ 面が圧延面に平行あるいはそれに近い方位であることを示した。Fig. 2 は Fig. 1 と同じ代表的な各種冷延鋼板について, 集合組織の共通的な主成分である $\{111\}$ 面の反射強度と $\bar{r}$ 値の関係を示したものであるが, この結果は Burns らの予測とよい一致を示している。さらに KTS 鋼板のすぐれた深絞り性とその集合組織に起因していることもこれから明らかであろう。

また Burns らが対象とした3種類の方位を優

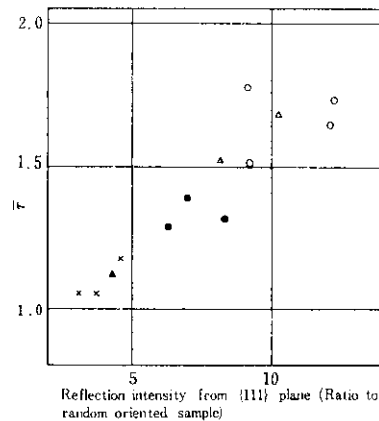


Fig. 2 Correlations between r value and the reflection intensities from $\{111\}$ plane parallel to the rolling surface of the specimens shown in Fig. 1

先方位とし, 化学成分, 組織, 炭化物および内部ひずみの状態はまったく同じでしかも結晶粒度も大体同程度である多結晶試片 A: $\{111\}[\bar{1}\bar{1}0]$, B: $\{110\}[001]$, C: $\{100\}[011]$ を同一の熱延コイル母板から製造し, その r 値の面内異方性と深絞り加工後の耳の出かたの関係を調べると Fig. 3 のようになる。なおその正極点図を Fig. 4 に, また逆極点図法による各面の回折強度と結晶粒度を Table 1 に示す。Fig. 3 によると, プレス加工時に発生する耳は r 値の平面異方性から大略推定できるが, 耳が最高になるところと $r_{\max}$ の位置とは必ずしも一致していない。この原因として, 深絞り成形のような3次元の塑性変形様式では応力の負荷され方が単純ではないこと, そして加工途中で活動すべり系の変化が起こることなどが考えられる。なおA材の r 値は平均値が大きく面内異方性が小さいことが注目される。

その後 α 鉄単結晶についての r 値の理論計算は長島¹⁰⁾, Vieth と Whiteley¹¹⁾ によってなされ, 多結晶鉄に関しても幾つかの報告がある¹²⁾¹³⁾¹⁴⁾。これらはいずれも結晶学的考察によって活動すべり系を仮定し, それからひずみ成分を計算するものであるが, 大久保ら¹⁵⁾はこれらとやや異なって, 単結晶もしくは多結晶の塑性変形を線型計画の双対問題として統一的に取扱えることを示している。いずれにしても Burns と Heyer の結論と本質的には変わらない。

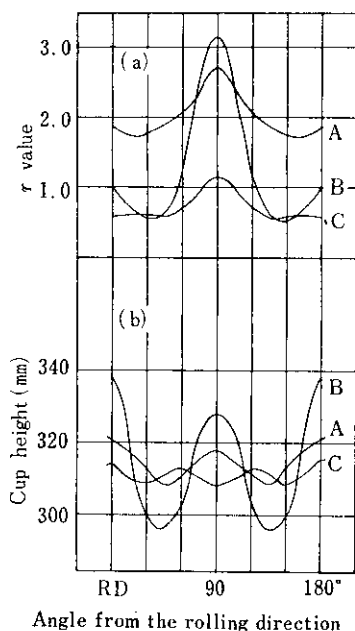


Fig. 3 Correlation between planar anisotropy of r value and the degree of earing after drawing

- A: Specimen with (111) $[1\bar{1}0]$ preferred orientation
 B: Specimen with (110) $[001]$ preferred orientation
 C: Specimen with (100) $[011]$ preferred orientation
 (See Fig. 4 and Table 1)

そこで工業的には深絞りには有利な {111} 集合組織をもつ板をリムド鋼で製造することが注目された。薄板の集合組織形成に影響をおよぼす因子のなかでは、熱延温度、熱延捲取温度、冷延圧下率および焼鈍条件などが重要であり¹⁶⁾¹⁷⁾¹⁸⁾¹⁹⁾、とく

Table 1 Reflection intensity from the (hkl) plane parallel to the rolling surface and ASTM grain size number of three specimens shown in Fig. 4

Specimen	Intensity of (hkl) peak ($\times$ random)				ASTM G. S. No.
	(110)	(200)	(211)	(222)	
A	0.16	0.57	1.4	6.5	7.4
B	2.3	0.47	0.92	1.1	5.8
C	0.07	1.2	0.92	3.0	6.2

に {111} 集合組織を発達させるには高温で熱延して低温で捲取り、70~80%の冷延率で冷延し、そして結晶粒を十分成長させるような焼鈍条件を選ぶのがよいとされている。しかしながらこれだけではアルミキルド鋼を凌駕するような深絞り性は得られず、無理に r 値を高めようとすれば苛酷な高温焼鈍もしくは脱炭焼鈍を行わねばならないが、その場合結晶粒の著しい粗大化を招き、プレス加工時に肌荒れの障害をひき起こす。

KTS 鋼板は、添加元素の効果とオープンコイル焼鈍による脱炭脱室効果を組合わせてこの問題を回避し、すぐれた深絞り性を得ている。添加元素は、たとえば P と Sb, Bi, Nb, Pb のうち 1 種または 2 種以上とし、P 含有量は 0.010~0.040%, Sb, Bi, Nb, Pb の単独または合計含有量は 0.003~0.050%である。²⁰⁾ Table 2 はその特性の一例を示すものであるが、アルミキルド鋼板や脱炭脱室のみ行なったリムド鋼板とくらべて、KTS 鋼板の r 値や C. C. V. がすぐれていることが明らかである。

Table 2 Typical properties of KTS steel

	Chemical composition (%)									
	C	Mn	P	S	Al	Sb	Bi	Nb	Pb	N
Commercial rimmed steel	0.055	0.32	0.010	0.013	tr.	tr.	tr.	tr.	tr.	0.0025
Rimmed steel decarburized by open coil annealing	0.006	0.33	0.010	0.014	tr.	tr.	tr.	tr.	tr.	0.0008
Aluminum-killed steel	0.043	0.30	0.008	0.010	0.043	tr.	tr.	tr.	tr.	0.0058
KTS steel with P and Sb	0.006	0.32	0.032	0.013	tr.	0.018	tr.	tr.	tr.	0.0010
KTS steel with P and Bi	0.008	0.34	0.034	0.013	tr.	tr.	0.010	tr.	tr.	0.0006
KTS steel with P and Nb	0.006	0.32	0.035	0.010	tr.	tr.	tr.	0.009	tr.	0.0008
KTS steel with P and Pb	0.006	0.34	0.030	0.014	tr.	tr.	tr.	tr.	0.035	0.0006

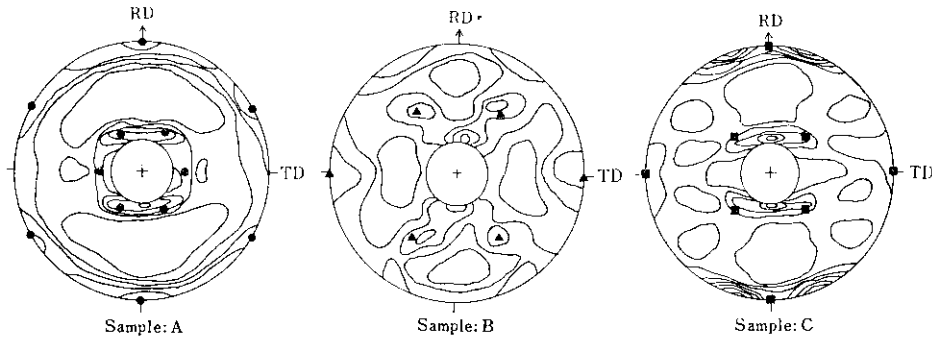


Fig. 4 {110} pole figures at the central layer of three specimens (See Table 1, Fig. 3, 7, 11 and 12)
 ● (111) [110] orientation ▲ (110) [001] orientation ■ (100) [011] orientation

3. 張り出し性

本来張り出し性とはフランジ部が完全に拘束されて縮み変形を伴わない場合の成形性をいうが、実際にはフランジ部の die cavity への流入と、die cavity 内での変形の各々に対する特性として 2 つに分けて考えられている。前者はフランジ最外周部の縮み変形を伴う縮み流入（複合張り出し）と、そして縮み変形を伴わない伸び流入（純

粋張り出し）から構成される。複合張り出しを伴う場合は絞り成形性を支配する材料特性としての r 値の影響も受ける。また後者は平底部、ポンチプロフィール部およびオーバーハング部の 3 箇所における変形に区分されるが、これら die cavity 部での変形能には材料の伸び性と加工硬化性が支配的な因子となる。すなわち延性破壊を起こすことなく張り出しが行なわれるためには、まず伸び性のよいことが必要であり、同時にひずみをでき

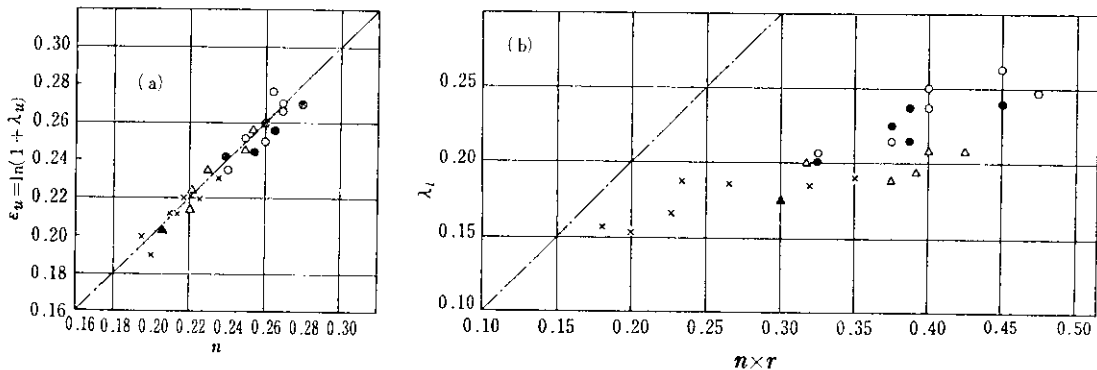


Fig. 5 Uniform elongation ϵ_u vs. n value and local elongation λ_l vs. $n \times r$ value on tensile testing of the specimens shown in Fig. 1

Mechanical properties								ASTM G. S. No.	{111} intensity (× random)
$\bar{r}$	Δr	C.C.V. (mm)	Er. (mm)	El. (%)	T.S. (kg/mm ²)	Y.P. (kg/mm ²)	Y.E.* (%)		
1.07	0.55	38.20	10.20	45	32.8	26.5	3.0	9.6	3.5
1.40	0.44	37.25	10.81	51	28.3	18.0	1.0	7.1	8.0
1.55	0.50	37.30	10.40	47	30.5	—	0.0	8.2	9.0
1.76	0.45	Inf.	10.90	47	30.2	—	0.2	7.3	11.8
1.70	0.37	Inf.	11.00	46	33.1	—	0.0	7.5	11.8
1.70	0.30	35.50	10.80	47	32.0	—	0.0	7.0	10.2
1.71	0.41	Inf.	11.50	47	31.2	—	0.0	7.4	12.0

Y.E.* : Yield elongation after ageing at room temperature for six months

るだけ均一に分布させるために加工硬化性の高いことが望ましい。また外的条件としては潤滑条件や型の幾何学的形状が重要であり、さらに成形速度も影響する。また張り出し成形能は実際の場合、平均的な張り出し度と局部的な張り出し度の2つに分けて取扱うべき事例が多く、その実態を知るために前者については最大張り出し深さ、平均板厚ひずみ、面積増加率などがその特性値の対象とされ、また後者については Nelson⁹⁾ によってはじめて試みられた scribed circle (or square) test 法による検討がよく行なわれている。

張り出し成形を行なう場合、変形が進行すると局部にくびれが発生し、この部分に応力集中が起こって破断に至る。したがってくびれ発生条件すなわち不安定変形への移行の問題が重要となる。この問題は Hill や Swift²¹⁾ らによって検討されている。それを単軸引張りの場合に適用すると、応力とひずみの関係を n 乗硬化式で近似したとき、まず一様伸び ϵ_u (真ひずみ) すなわち不安定限界ひずみ (拡散くびれ開始点) は $\epsilon_u = n$ で表わされ、また局部伸び λ_i (慣用ひずみ) は拡散くびれ開始点から局部くびれ開始点までの伸び量とすると、異方性パラメータ間の関係を $H/G = H/F = r$ において $\lambda_i = n \times r$ で表わされる。

Fig. 5 は $\epsilon_u - n$ および $\lambda_i - n \times r$ の関係を示したものである (n および r 値は $0^\circ, 45^\circ, 90^\circ$ 方向の測定値を含む)。 ϵ_u と n の関係はほぼ45度線に乗り、拡散くびれ発生条件が n 値によって左右されることを示している。しかも KTS 鋼板は ϵ_u, n とともに大きな値を示していることがわかる。 λ_i も $n \times r$ との間に正の相関が認められるが $\lambda_i < n \times r$ となっている。また KTS 鋼板は他の鋼種にくらべて $n \times r$ 値に対する λ_i 値の大きいことが特徴的である。 $\lambda_i = n \times r$ なる関係は変形される材料をあくまで連続体とし、その塑性挙動を解析したものであるが、実際にはくびれが発生して、3軸応力状態になったのちの挙動はむしろ延性破壊の問題を含んでいるために、実測値との不一致を生ずるものと考えられる。

この点に関連して0.05% C 程度の低炭素鋼板を単軸引張り試験し、延性破壊について若干の検討を加えた。破面を電顕観察すると、主として介在

物を発生源とする dimple pattern が見られ、大きな介在物の附近では dimple が大きく、小さい介在物の付近ではそれが小さい。また炭化物の形や分布形態を種々変えてみると dimple の大きさや形態が変化し、その大きさと試片の局部伸び λ_i との間には相関がみられる。また細かい void がみられるときは λ_i が小さい。void の生成、成長がどのようなところでどの程度の変形量から起こり、それがどのように連結していくかをみると、試片が8%程度伸びたときからまず介在物の近傍に void が発生するが、それ以後あまり成長しない。しかし局部収縮を起こす時点から、試験片の中央部で void が急激に成長連結して大きな cavity となり、それが最終的には最大せん断応力方向に shear fracture を起こす結果となる。このような破壊経過をたどったものはその破面がいわゆる cup and cone type となる。炭化物の周辺でも介在物付近におけるよりやや遅れて void が発生しはじめるが、やはりそれ以後はあまり成長しない。

結晶粒度の影響を調べるために炭化物を極度にすくなくした ASTM No. 3~8 の試料について同様の観察を行なったところ、脆性破壊の場合と違って dimple pattern 発生におよぼす結晶粒度の影響は認められず、void の形成はやはり主として介在物を核として起こることが確かめられた (なお後述するように巨視的には肌荒れによる応力集中現象が起こるので、結晶粒度が大きくなる

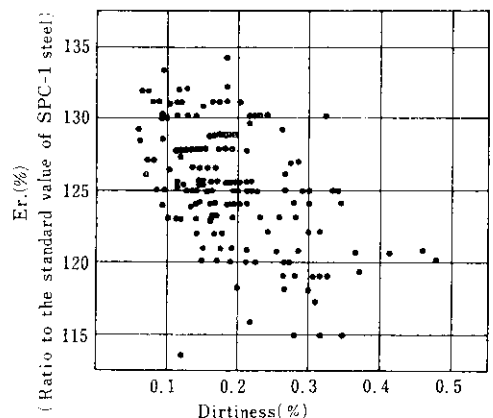


Fig. 6 Correlation between Erichsen value and dirtiness of cold rolled sheet

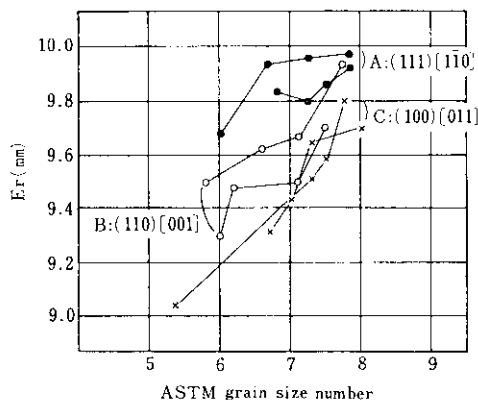


Fig. 7 Effects of grain size and preferred orientation on Erichsen value of the specimens shown in Fig. 3 and Table 1

と張り出し性が不良となることが確かめられている)。また介在物や炭化物が少ないものでは、それが存在しない部分にも void が発生することが観察される。

以上の実験事実から考えると、介在物や炭化物の量を減少させれば $\lambda_i - n \times r$ の関係は $\lambda_i = n \times r$ に近づくことが予想され、事実介在物がすくなく、かつ脱炭処理によって炭化物をほとんど除去した KTS 鋼板の λ_i 値が大きいことも理解される。Fig. 6 には張り出し性に関係深いエリクセン値と清浄度との関係を示した。

張り出し成形性に対する集合組織の影響は r 値を介して現われることが当然予想されるが、 n 値を介しても現われることが考えられる²²⁾。すなわち $\sigma = C\epsilon^n$ およびよく知られた $\tau = \alpha \mu b \sqrt{\rho}$

(μ : 剛性率, b : すべり転位のバーガースベクトルの大きさ, ρ : 転位密度) さらに $\sigma d\epsilon = \tau \Sigma d\gamma_i$ ($d\epsilon$: 応力 σ と同方向のひずみ増分, $d\gamma_i$: 各活動すべり系のすべり増分) などの関係式から

$$n = (K + \ln \mu b M \sqrt{\rho}) / \ln \epsilon$$

K : 定数

M : $\Sigma d\gamma_i / d\epsilon$ で方位因子

なる関係が得られる。したがって n 値はいわゆる方位因子 M を含むことになるので、鮮鋭な優先方位をもつ板においては、変形様式やその方向性と板の優先方位との角度関係によって値が変化することが考えられる。

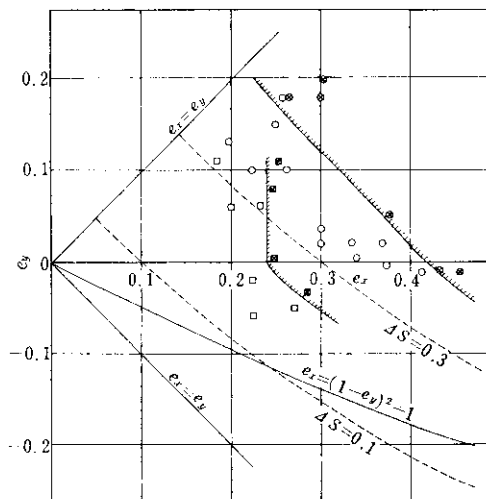


Fig. 8 Result of scribed circle ($\frac{1}{2}$ inch dia.) test for press forming of car fender: mark $\times$ shows the position of breaking (e is conventional strain; increase of area Δs is shown as $\Delta s = (1 + e_x)(1 + e_y) - 1$)
 $\square$ Aluminum-killed steel
 $\circ$ KTS steel

2 項に記したのと同じ 3 種類の試片すなわち優先方位がそれぞれ A: (111) [110], B: (110) [001], C: (100) [011] である鋼板について、結晶粒度を 4 段階ずつ変化させたのちエリクセンドーム試験を行なった結果を Fig. 7 に示す。この場合結晶粒度を変化させる過程で集合組織の発達や分散に多少の相異を生じた傾向はあるが、本質的な差は生じていないことを確かめてある。エリクセン値は明瞭に集合組織の影響を受け、結晶粒度の大小にかかわらず cube on corner 方位の A 鋼がもっとも高い値を示しかつ結晶粒度の影響も受けにくいのに対し、cube on face 方位の C 鋼は全般的に値が低くしかも結晶粒の粗大化に伴って急激に低下する傾向がみられる。

以上から張り出し成形性を向上させるための冶金学的要因としては、まず r 値を高めるために cube on corner 優先方位をできるだけ強く付与させ、ついで不安定限界ひずみを大きくするため n 値を高めることである。そのためには集合組織の調整とともに結晶粒度も適切にすることが必要であり、同時に局部伸びを増加させるために非金

属介在物や炭化物の存在量をできるだけ減らすことが不可欠の条件である。

なお実際の部品を加工するにあたって、破断局部における成形限界と材料特性との関係が scribed circle test により検出するかどうかについては、現在薄鋼板成形技術研究会²³⁾で検討されつつあるが、商用鋼板についての軸対称プレスの場合には明確な差は出ていないようである。

Wallace²⁴⁾ その他の解析によると、一般には平面ひずみを受ける局部において成形限がもっとも低下することが推測され、このことは実際によく観察される。成形難易度の高い自動車フェンダーのプレス加工において scribed circle test を行なった結果を Fig. 8 に示すが、通常のアルミキルド鋼板と KTS の差が明瞭に認められ、かつ KTS 鋼板については張り出し、平面ひずみ変形、絞りの各領域にわたって、面積増加率曲線にほぼ平行な破断限界線が引かれていることが注目される。

4. 形状性

薄板のプレス成形においては、よりきびしい成形がよりすくない工程で行なえることが理想である。そこで材料には深絞り性や張り出し性の向上が要求されてきたのであるが、一方プレス製品には形状や寸法精度の不良によりドラミング、たるみ、べこなどと呼ばれる種々の不具合現象が生じ、このことが實際上の大きな問題となることが多い。このような形状不良現象は従来の観点からみた材料のプレス成形性とは異なる要因が影響するものとして“プレス形状性”²⁵⁾と称され、形状が主たる問題となるプレス製品に対しては、いわゆる低降伏点鋼板が多く使用されるようになってきた。

しかし近年スタイリングや経済性の要請から、たとえば自動車車体のプレス成形などのように、全体としては浅絞りながら局部的にきびしい成形能を必要とする部品や、各部品を一体化して同時成形する傾向が増えつつあり、このような品物に対してはすぐれた成形性と形状性が同時に要求されることになる。

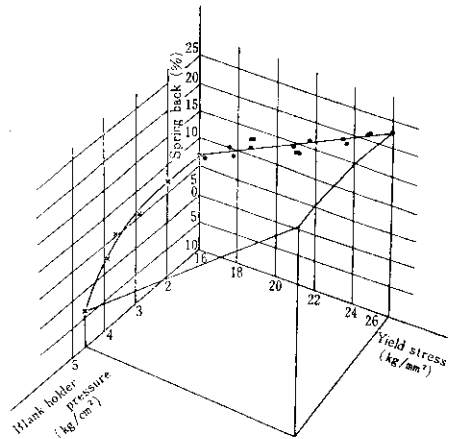


Fig. 9 Effects of yield stress and blank holder pressure on the amount of spring-back after press forming (Door-outer of car)

形状性に関する重要な現象としては、型へのなじみ不良、成形後のスプリングバックおよび張り剛性の3つがあげられよう。これらのうちなじみ不良については、成形中に直接的な変形規制を受けるボンチ底面のふくらみ、そして間接的な変形領域である側壁部のボディーシワ およびそりなどがあるが²⁶⁾、これらを抑制するには材料特性よりはむしろクッションパッドや合せ型の使用、型形状の改良あるいは付加張力の制御など、プレス技術上の問題が重要である場合が多い。

しかしスプリングバック現象については材料特性の影響の大きいことが理論的にも推定される。すなわち、薄板の単純曲げ理論の応用から、応力—ひずみ曲線を $\sigma = Ce^n$ で近似したとき、スプリングバック量は

$$\Delta\theta/\theta = \{3C/(n+2)E\}(t/2\rho)^{n-1}$$

θ : 板の中立軸を曲率半径 ρ で曲げた角度

$\Delta\theta$: はねかえり角度

E : ヤング率

t : 板厚

で表わされ、また Hill の塑性異方性理論を同様に2軸一様曲げ(すなわち応力比 $\alpha = 1$)の場合に適用して r 値の影響をみると²⁵⁾、 $r_0 = r_{90} = r$ であれば

$$\Delta\theta/\theta = \{3(1-\nu)C/2(n+2)E\} \cdot (t/2\rho)^{n-1} \cdot \{4(2+r)/3\}^{(n+2)/2} \cdot \{1+(n+2/n+4)(t/2\rho)^2\}$$

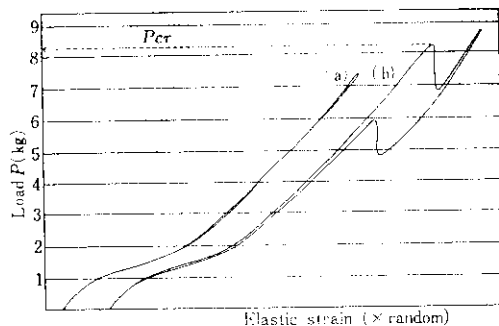


Fig.10 Hysteresis curve showing the relation of load and maximum elastic strain for 0.7mm thick SPC-1 sheet specimen which is loaded at the center of surface after press-forming with a die of 4000mm radius of curvature

ν : ポアソン比

$$\sigma = C\varepsilon^n$$

で表わされる。したがってスプリングバック量を減少させるためにはC値すなわち降伏点を低下させるのが効果的であると考えられ、一方 n 値、ヤング率 E 、ポアソン比 ν などは大きい方がよい。また r 値は、前式のように2軸一様曲げで面内異方性がないと仮定した場合には小さい方がよいと考えられ、実際にそのような報告もある²⁷⁾。また応力比が小さくなるとむしろ逆に r 値の大きい方がスプリングバック量が減少するという報告²⁸⁾もあるが、いずれにせよ r 値の効果は量的にはすくない。曲げひずみ $t/2\rho$ は大きいほどスプリングバック量が小さい。

実際の自動車ドア外板において、材料の降伏点に着目し、またしわ押え圧力を加減することによって付加張力を変化させたときのスプリングバック量の実測例をFig. 9に示す。降伏点が高くなるにつれて、スプリングバック量はしわ押え圧力の大小にかかわらずほぼ直線的に増大する。またしわ押え圧力を増すと、降伏点の低い材料ではスプリングバック量が急激に減少するが、降伏点が高い鋼板ではその影響が小さい。したがって低降伏点材をしわ押え圧力を強めにして成形すると、スプリングバックに対してのみならず、なじみ性に対してもよいことになる。しわ押え圧力を強くすると成形性を低下させる危険があるが、部品形状からの制約上やむをえないときは KTS 鋼板の使

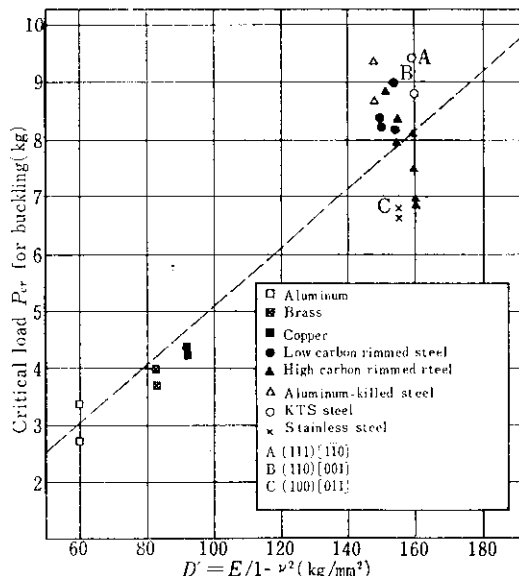


Fig.11 Correlation between critical load P_{cr} for buckling and $D' (=E/(1-\nu^2))$ value of SPC-1 sheet specimens which were examined with the condition described in Fig. 10 (See Fig. 3 and Table 1)

用が有効な場合が多い。なお鋼板のひずみ時効性がないことも実際使用上、スプリングバック抑制には大切な要件である。

次に、面積が広い絞り製品ではその張り剛性が問題となる。一般に両辺を支持した辺長 ℓ の平板中央に集中荷重 P が作用する場合、板中央部における弾性たわみ量 δ と荷重 P の関係は、平板を膜として近似したときの周知の基礎方程式 $d^2y/dx^2 = -M/D$ (M : 曲げモーメント, D : 板の曲げ剛性) を $x=0, \ell$ で $y=0$ なる境界条件の下に解けば

$$P = (48D/\ell^3)\delta$$

$$D = Et^3/12(1-\nu^2)$$

E : ヤング率

t : 板厚

ν : ポアソン比

である。実際の絞り製品について実験してみると P と δ の関係はFig.10のヒステリシス曲線に示すようになり、 P のある値で座屈を起こす。この座屈荷重を大きくすることが製品の張り剛性を高めることになるわけで、そのためには板厚が大き

絞りの曲率が小さい方がよいが、これらが一定のときにはヤング率とポアソン比の大きいことが望ましい。

そこで同一形状の絞りの製品について、非鉄金属を含む各種材料の P_{cr} と $D' = E/(1-\nu^2)$ の関係を実験した。その結果を Fig.11²⁹⁾ に示す。ここで E および ν は素板の面内各方向試片についての引張

り試験で求めた平均値を用いた。 P_{cr} と D' の間には正の相関が認められるが、軟鋼だけに限るとバラツキが大きく明瞭な関係がみられない。これは軟鋼の E および ν の値が本来大きくは変化しないことと、そしてこの種の実験の実験精度上の問題によるものと思われる。なお降伏点が高い材料は実際上一般に張り剛性が良好であるが、これは

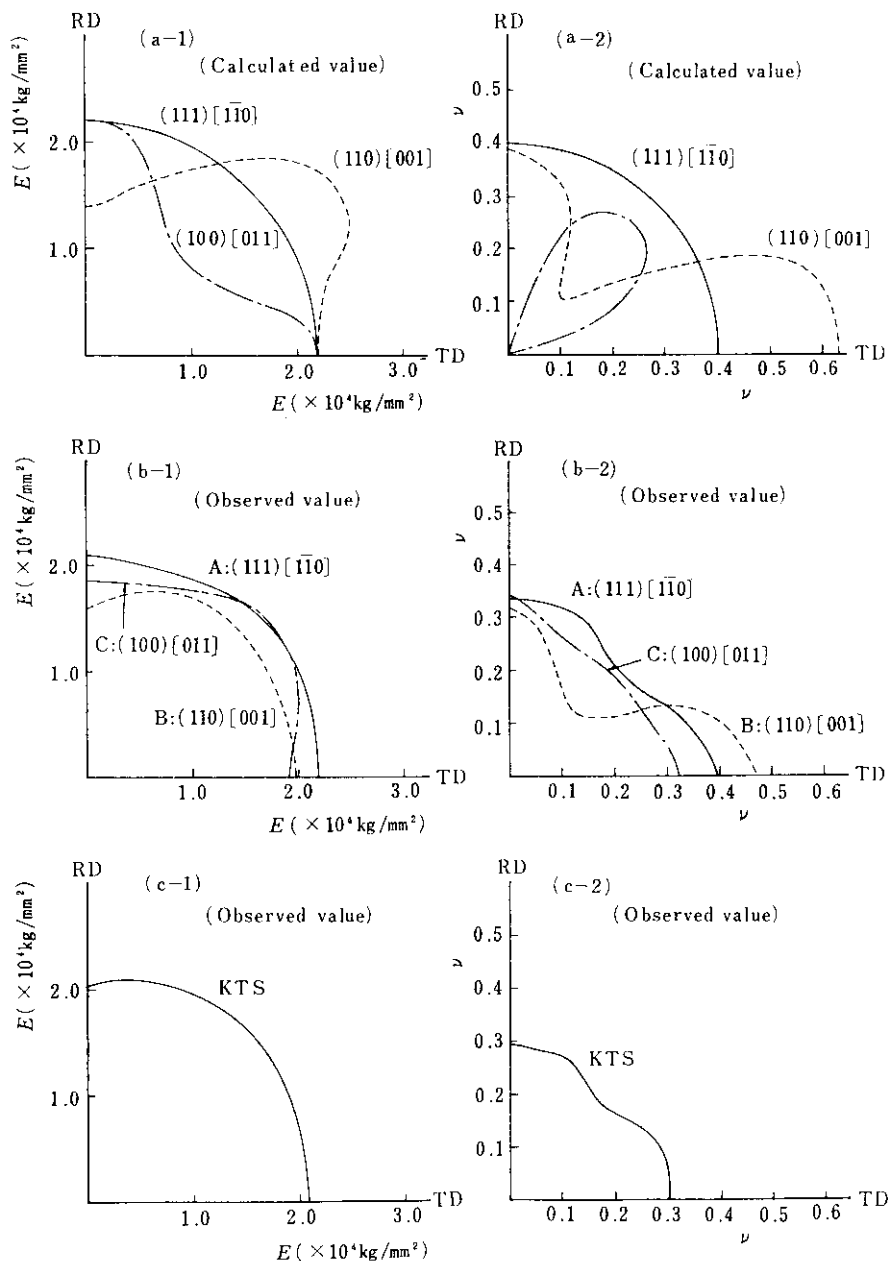


Fig.12 Comparison of calculated and observed values of Young's modulus E and Poisson's ratio ν for the specimens shown in Fig. 3 and Table 1 and KTS steel

降伏点の直接の寄与によるものではなく、絞り製品のスプリングバック量が減少することによって曲率半径が小さくなるためと考えられ、その意味で形状性についてはスプリングバックと張り剛性との間に相互関係が存在することになる。

薄鋼板の弾性的性質は成分によってはほとんど変化しないことが知られているが、板に結晶学的異方性が存在する場合には、面内各方向試片の引張り試験でえられるヤング率およびポアソン比が、全体的に高いものと反対に低いものが現われる可能性があり、そのような場合は前式にしたがって張り剛性に影響することが期待される。そこで(111)[1 $\bar{1}0$]、(110)[001]、(100)[011]の3方位の単結晶板を仮想して、そのヤング率とポアソン比の面内異方性を次式³⁰⁾から理論計算してみると、Fig.12(a-1)および(a-2)に示すようになる。

$$1/E = S_{11} - (2S_{11} - 2S_{12} - S_{44})$$

$$\cdot (\theta_{31}^2 \theta_{32}^2 + \theta_{32}^2 \theta_{33}^2 + \theta_{33}^2 \theta_{31}^2)$$

および

$$\nu/E = S_{12} + \{S_{11} - S_{12} - (S_{44}/2)\}$$

$$\cdot (\theta_{11}^2 \theta_{31}^2 + \theta_{12}^2 \theta_{32}^2 + \theta_{13}^2 \theta_{31}^2)$$

S_{ij} : 弾性係数

θ_{ij} : 結晶格子に付属した立方軸と試片上の固定座標軸との間の方向余弦

これによると(111)[1 $\bar{1}0$]方位結晶のEおよび ν は、(100)[011]方位結晶のそれよりすべての試験方向において大きくかつ面内異方性も少な

い。したがって前者の方が後者よりも張り剛性が良好なことが期待される。また(111)[1 $\bar{1}0$]と(110)[001]の両結晶を比較すると、各方向のEおよび ν を積分した値は大体等しいが、異方性は前者の方が少ない。この場合どちらの方位のものが張り剛性に有利かは一概にはいえない。

Fig.12(b-1)および(b-2)は、上記3方位と同じ優先方位の集合組織を有する3種の多結晶材料(2, 3項参照)についてEおよび ν の実測結果を示したものである。単結晶についての計算結果と定性的な傾向は大略合致しているが、面内での異方性は全体に少なくなっている。Eに関してはすべての方向について(111)[1 $\bar{1}0$]方位をもつA板が、(110)[001]のB板および(100)[011]のC板より大きな値となっている。したがってA板は他の2者にくらべて張り剛性が良好なことが期待され、実際Fig.11に示したようにわずかながらその差が認められる。このように弾性特性に関しては一般に、板面に{111}あるいは{110}が平行であるものが有利と考えられるが、前者は面内異方性が小さく後者は比較的大きい。

Fig.12(c-1)および(c-2)はKTS鋼板についての実測値を示したものであるが、絶対値はFig.12(a)および(b)の(111)[1 $\bar{1}0$]方位材料の値にほぼ等しくまた面内分布のむらも少ない。このことからKTS鋼板は、張り剛性に対しても好ましい特性を有していることがわかる。

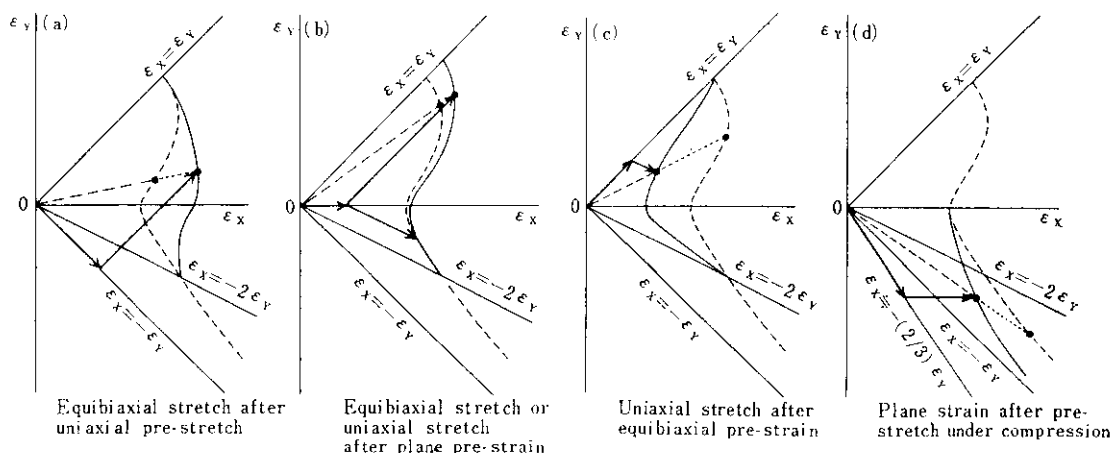


Fig. 13 Schematic expression of the experimental results concerning re-formability of steel sheet for press forming; dotted line shows primary formability (ϵ is true strain)

5. 二次成形性

緒言にも触れたようにプレス部品が多様化、大型化し、またプレス工程が多段化するにつれ、製品の部位によってその変形径路は一般に著しく異なることが scribed circle test などの結果明らかとなってきた。そこでひずみ一定の単調な変形径路をたどる場合のいわゆる“一次成形性”に対して、予変形材を出発点とする成形性、もしくは一回成形の途中でひずみの方向が変化するような複雑な変形径路を通る場合の成形性として、“二次成形性”なる概念が注目されるようになった^{4) 31)}。

現在薄鋼板成形技術研究会において、種々の変形様式を組合わせたときの変形能を、市販の冷延鋼板を対象として、軸対称形状プレスにより試験し検討がなされている²³⁾。その結果の一例を Fig. 13 に示す。これによると成形途中で変形径路を変えた場合の二次成形限界曲線は、一次成形限界曲線とは明らかに異なり、そして変形様式の組合わせによって大きく影響を受けることがわかる。

著者らは現在、二次成形性におよぼす冶金学的特性の一つとして集合組織の影響を把握する試みを行なっている。この結果については別報する予定であるが、まず単軸一次引張りにより圧延方向に一定の伸びひずみを与えたのち、種々の方向に単軸二次引張りを行なうと、二次降伏応力と二次伸びとは種々の材料について明瞭な負の相関関係にある。このような変形径路における二次降伏応力については、単結晶の場合幾つかの仮定のもとに理論計算して、初期方位による相異を予測することが可能である。

2, 3 および 4 章に引用した 3 つの異なる集合組織をもつ多結晶材について実験を行ない、各方位の単結晶について予測される結果と比較したが、二次降伏応力については、各材料間の差および各材料における面内異方性の両者について一つの知見を確かめることができ、また二次伸びと初期方位の関係についても同様の結果を得ている。それによると、初期方位が (100) [011] のものは二次伸びが大きく面内異方性が小さい。これに対

して (110) [001] 方位および (112) [$\bar{1}\bar{1}0$] 方位のものは、二次伸びが小さく面内異方性が大きい。また (111) [$\bar{1}\bar{1}0$] および (111) [$\bar{1}\bar{1}2$] 方位のものは、二次伸びは比較的大きく面内異方性もそれほど大きくない。

著者らはさらにこのような研究結果も参考にして、一般冷延鋼板ならびに KTS 鋼板の二次成形性を向上させるため、現場製造実験あるいは大型の現物プレス実験を平行して行ないつつある。

6. 総 括

冷延鋼板のプレス成形性におよぼす諸要因の影響を概説し、とくに当社が開発した超深絞り用リムド冷延鋼板 (KTS 鋼板) の特性について述べた。

(1) 深絞り性に関与する冶金学的因子のなかでは集合組織の影響がもっとも大きい。一般には {111} 面が圧延面に平行もしくはそれに近い優先方位をもつ板は、深絞り性が優秀でしかも耳の発生もすくない。KTS 鋼板は、製鋼および熱冷延工程の厳密な管理とともに、微量添加元素の効果とオープンコイル焼鈍による脱炭脱窒効果を組合わせて、結晶粒の粗大化を招くことなく {111} 集合組織を極度に発達させたリムド冷延鋼板で、一般に最良とされているアルミキルド冷延鋼板をしのぐすぐれた深絞り性を有している。

(2) 張り出し性を向上させるためには、一般に n 値、局部伸び さらには r 値を大きくする必要がある。そのためには非金属介在物や炭化物などをできるだけ減らし、{111} 集合組織を多くし、肌荒れが生じない範囲で結晶粒を大きくすることが望ましい。KTS 鋼板は、製鋼工程における厳格な成分規制と脱炭焼鈍により非金属介在物や炭化物がきわめてすくなく、また結晶粒度が適正なので張り出し性が非常にすぐれている。とくに平面ひずみ加工を受ける場合の張り出し成形限界はアルミキルド鋼板よりもすぐれている。

(3) 形状性に関して重要な“型へのなじみ性”については、プレス技術そのものが問題となる

場合が多いが、材料特性としてはスプリングバック性のすくないことが望まれる。そのためには降伏点を低くすることがもっとも効果的で、さらには n 値、ヤング率、ポアソン比などが大きいことが望ましく、また加工条件によっては r 値が小さい方がよい場合もある。一方製品の張り剛性を高めるためにもヤング率およびポアソン比は大きい方がよい。これらの特性は、板面に $\{111\}$ 面の多い集合組織をもつ板がすぐれており、しかも面内異方性が小さい KTS 鋼板は、これらの条件を満たしているため形状性も非常にすぐれている。

(4) 板の成形限界は変形様式によって大きな影響を受けるが、単軸応力による変形を組合わせたときの“二次成形性”におよぼす集合組織の影響を調べた結果、初期優先方位が $(100)[011]$ のものはこの性質がすぐれており、また $(111)[\bar{1}\bar{1}0]$ および $(111)[11\bar{2}]$ 方位のものも比較的良好であることがわかり、一般冷延鋼板ならびに KTS 鋼板の二次成形性の向上に対して有力な手がかりを得ることができた。

参 考 文 献

- 1) 吉田：理研報告，35 (1959)，199
- 2) 吉田：塑性と加工，5 (1964)，56
- 3) 岡本，林：塑性と加工，7 (1966)，584
- 4) 吉田，宮内，水沼：鉄と鋼，55 (1969)，26
- 5) W. T. Lankford, S. C. Snyder and T. A. Bausher: Trans. Amer. Soc. Metals, 42 (1950)，1197
- 6) 山田：東大生研報告，11 (1961)，238
- 7) 山田：日本機械学会誌，67 (1964)，453
- 8) 福田：塑性と加工，5 (1964)，3
- 9) R. S. Burns and R. H. Heyer: Sheet Metal Ind., 35 (1958)，261
- 10) 長島，関野，加藤：日本金属学会誌，29 (1955)，393
- 11) R. W. Vieth and R. L. Whiteley: Colloquium of IDDRG, Institute of Sheet Metal Engineering, London, (1964)
- 12) J. A. Elias, R. H. Heyer and J. M. Smith: Trans. AIME, 224 (1962)，679
- 13) 岡本，白岩，福田：住友金属，14 (1962)，211
- 14) 長島，武智，加藤：日本金属学会誌，29 (1965)，393
- 15) 大久保：第23回塑性加工シンポジウム前刷，(1968)，23
- 16) R. L. Whiteley and D. E. Wise: Flat Rolled Products III, 16 (1962)，47
- 17) 神崎，中里，伊藤：鉄と鋼，50 (1964)，588
- 18) 加藤，内田：プレス技術，5 (1967)，9
- 19) 高階，坂本，小森田：第23回塑性加工シンポジウム，(1968)，51
- 20) 川崎製鉄：特許 445011
- 21) R. Hill and H. W. Swift: J. Mech. Phys. Solids, 1 (1952)，1
- 22) 木原：第23回塑性加工シンポジウム前刷，(1968)，37
- 23) 薄鋼板成形技術研究会第5期報告書 (未発表)
- 24) G. G. Moor and J. F. Walloce: J. Inst. Metals, 93 (1964)，33
- 25) 阿部，矢能，副田，鈴木，鶴田，吉田：第17回塑性加工連合講演会前刷，(1966)，81
- 26) 薄鋼板成形技術研究会第2期資料，(1965)，20
- 27) 薄鋼板成形技術研究会第2期資料，(1965)，6
- 28) 中島，菊間：塑性と加工，9 (1968)，45
- 29) 伊藤，神崎：鉄と鋼，52 (1966)，1188
- 30) C. S. Barrett: Structure of Metals, (1952)，531 [McGraw-Hill, N. Y.]
- 31) 宮内：第23回塑性加工シンポジウム前刷，(1968)，107