

°C, 圧下率 60% では 800° から 900°C ぐらいである。

(2) 熱間圧延板の表面にはかなり拮つた(110)[001]方位が見られる。

(3) 冷間圧延集合組織と熱間圧延型集合組織とを有する熱間圧延板からともに(110)[001] 2次再結晶の起こることを確認し、熱間圧延板の集合組織が2次再結晶を支配するものではないことを確認した。しかし(110)[001] 2次再結晶の発達しやすいかんについては今後さらに研究すべきである。

本研究の遂行に当りご指導賜り、研究発表をお許し下さった住友金属中央技術研究所住友元夫所長、三好栄次主任研究員、猪熊武之助和歌山製鉄所技術管理部技師(元中研主任研究員)に、X線回折にご便宜いただいた白岩主任研究員に、また冷間圧延にご面倒をおかけした近藤主任研究員に、さらに種々の作業を担当された東勝也増池保両君に厚く感謝する。

最後に種々ご教示下さった東京大学工学部阿部秀夫助教授に御礼申し上げる。

#### 文 献

- 1) M. GENSAMER and P. V. VUKMANIC: Metal Technology, 125 (1937) p. 507~515
- 2) H. MÖLLER und H. STÄBLEIN: Arch. Eisenhüttenw, 29 (1958) p. 377~390
- 3) H. E. MÖBIUS: Arch. Eisenhüttenw, 29 (1958) p. 423~432
- 4) 阿部秀夫: 日本金属学会誌, 29 (1965) p.1221~1226
- 5) L. G. SCHULZ: J. Appl. Phys, 20(1949) p.1030~1033
- 6) K. SAGEL: Arch. Eisenhüttenw, 32(1961) p.153~164
- 7) E. A. CALNAN and C. J. CLEWS: J. Appl. Phys, 22 (1951) p. 1508

## 極低炭素鋼板のプレス加工性におよぼす集合組織の影響\*

伊 藤 庸\*\*・神 崎 文 暁\*\*\*

### Effect of Crystallographic Texture on Press Forming of Extra-Low Carbon Rimmed Steel Sheet.

Yō ITŌ and Fumiaki KANZAKI

#### Synopsis:

Effects of crystallographic texture on the plastic deformation of solid state decarburized rimmed steel sheets have been studied. Three typical textures composed of a main preferred orientation, (111)[110], (110)[001] and (100)±10° to the rolling plane, [011]±25° to the rolling direction, were obtained from the same mother hot coil. Tensile tests, cupping tests and Erichsen tests were carried out in the dead soft condition and effects of crystallographic texture on the press formability were investigated with specimens of the same chemical composition, the same second phase particles and almost the same grain size. Moreover, effects of interaction between crystallographic texture and mechanical fiber on the elongation and effects of interactions between texture, mechanical fiber, grain size and the dimensional effect of testing tool on the stretchability were examined.

The results obtained are summarized as follows:

- 1) The plastic anisotropy ratio "r" can be related to crystallographic texture and the deep-drawability is predominately influenced by the preferred orientation and the sharpness of texture.
- 2) Texture is a basic factor for the earing behaviour in deep-drawing test, but a more thorough-going study is necessary to get a clearer picture on the interrelation between the plane anisotropy of "r" and the earing.
- 3) Young's modulus and poisson's ratio are considerably influenced by texture, and the results of

\* 昭和40年10月本会講演大会にて発表 昭和41年5月18日受付

\*\* 川崎製鉄(株)千葉研究部 \*\*\* 川崎製鉄(株)千葉研究部 工博

testing agree with the estimates made by theoretical calculations.

4) Plane anisotropies of yield strength, tensile strength and strain hardening exponent are slightly influenced by texture, whereas plane anisotropy of elongation is remarkably influenced. The fact can be interpreted by considering the influence of "r" on the dimensional effect of local elongation and the interaction between "r" and mechanical fiber on uniform elongation.

5) As a result of stretching cup test, it was made clear that strain distribution is influenced by plastic anisotropy.

6) Stretchability is also remarkably influenced by texture. In this regard, interactions among the dimensional effect of testing tool, grain size and mechanical fiber should always be taken into consideration as important factors.

(Received 18, May, 1966)

## 1. 結 言

最近にいたるまで、プレス用材料の主流としては、Alキルド非時効性深絞り用鋼板が重要な地位をしめてきたが、これは本質的に製造原価が高いという欠点があり、このため需要者側においては、生産原価低減のために、従来Alキルド鋼板を使用してきた分野を積極的にリムド鋼板におきかえるべく努力をつづけてきた。しかし表面が美麗であるという優れた特徴を有し、生産性、経済性に優るリムド鋼板も、深絞り性に関してはAlキルド鋼板と大差があるため、この点の解決なくしては、実際に深絞り用材料として主流をしめることはできない状態にあった。

冷延鋼板の深絞り性に関する過去の研究をふりかえって見て、もつとも注目される報告は、1950年にLANKFORD, SNYDER, BAUSER<sup>1)</sup>らがそれまで主要因と考えられていた加工硬化係数  $n$  のほかに新たに塑性異方比  $r$  を導入し、この両者を組み合わせて深絞り性を表示したことであろう。この  $r$  値に関する研究は、1950年代も後半になつてから急激に発展し、BURNS, HEYER<sup>2)</sup>らは、これが集合組織によつて左右されることを報告し、またWHITELEY, WISE, BLICKWEDE<sup>3)</sup>らは、軟鋼板においてはこれが深絞り性のきわめて重要な因子であることを証明した。すなわちこの理論によれば、Alキルド鋼板のすぐれた深絞り性は、高い  $r$  値を生み出すような集合組織の強度が、リムド鋼板に比して強いということから説明することができ、さらにこの集合組織の形成は、熱延-冷延-焼鈍の工程でのAlNの固溶-析出現象に密接に結びついているものと考えられている。リムド鋼板においては、通常工程を通るかぎりこの種の効果は利用できないため、その他の機械的特性には差がなくても、こと深絞り性に関しては本質的にAlキルド鋼板に劣るものやむをえない。 $r$  値のほかに、 $n$  値も深絞り性の要因として重要であることは、山田<sup>4)</sup>が理論計算によつて明らかにしているが、この両要因を比較した場合、 $n$  値は深絞

り用として製造されている鋼板を全般的にみても変動は比較的小であり、その効果も  $r$  値に比して小さいので、現今の冷延鋼板の深絞り性の変動はほとんど  $r$  値によつて左右されているといえる<sup>5)6)</sup>。

BURNS, HEYER<sup>2)</sup>らは、冷延鋼板の  $r$  値と集合組織の間の関係を解析し、 $r$  値の平均値が大で板面内の  $r$  値の変動の少ない結晶方位、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として、(111)面が圧延面に平行な場合を選んでいいる。神崎, 中里, 伊藤<sup>7)</sup>らは、反極点図法による(111)集合組織の強度、および(111)  $\pm 20^\circ$  の範囲の集合組織の集積強度と  $r$  値の間の相関を広い範囲にわたつてしらべ、両者の間には非常に高度の相関があることを報告した。さらに彼らは、反極点図法における他の面の強度との間の関係についても重回帰分析を行ない、(111)  $\pm 30^\circ$  近傍の結晶方位は、深絞り加工にさいして有利に働く塑性異方性をうみだし、(100)  $\pm 30^\circ$  近傍の結晶方位は不利に作用することを結論したが、これはBURNS, HEYER<sup>2)</sup>らの結論、および岡本, 福田<sup>8)</sup>らの理論計算の結果とよい一致を示している。

冷延鋼板の焼鈍集合組織としては、(111)[1 $\bar{1}0$ ], (111)[1 $\bar{1}2$ ], (112)[1 $\bar{1}0$ ], (110)[001], (100)[011] 近傍の方位などが存在しうる<sup>2)9)10)11)</sup>。しかしこれらの集合組織を作る技術としては、N. P. Goss<sup>12)</sup>が2次再結晶を利用して(110)[001]方位の集合組織を有する一方向性珪素鋼板の製造方法を確立した業績を代表例として、過去においては研究活動は珪素鋼板の分野にのみ集中していた傾向がつよかつた。しかし最近深絞り用冷延鋼板に(111)近傍の集合組織が有用であることが明らかになつてから、一般の冷延鋼板についても研究がさかんに行なわれるようになり、吉田<sup>13)</sup>は、リムド鋼板の集合組織におよぼす添加元素の効果、冷延圧下率および脱炭焼鈍の影響について、また神崎, 中里, 伊藤<sup>7)</sup>らは、母材の熱延条件、冷間圧下率および脱炭焼鈍の効果について報告を行なつている。これらの技術は、ただちに冷延鋼板の製造工程に適用され、実際にリムド鋼でAlキルド鋼以上の

深絞り性を有するプレス用鋼板が製造されるにいたつている<sup>13)</sup>。

このように集合組織の管理製造技術が確立され、また実際に強い集合組織を有する冷延鋼板が製造されている現状において、プレス加工性におよぼす集合組織の影響を明らかにしておくことは、非常に重要なことである。

本報告は、プレス加工性におよぼす結晶集合組織の影響をできるだけ純粋に取りだすという目的で、同一の母板から、冷延焼鈍集合組織の代表的な3種の主方位を有する極低炭素冷延鋼板を製作し、他の要因、すなわち化学成分、異相粒子、内部歪の状態および結晶粒度などが同一という条件のもとで、深絞り性をはじめとして他の諸特性値についてもできるだけ広い範囲での検討を行ない、さらに延性、張り出し性については、集合組織と相互作用を有すると考えられる結晶粒度、寸法形状効果、結晶方位軸および引張軸と mechanical fiber の相対角度、mechanical fiber の分布形態の効果などについても検討を加えている。

## 2. 試料および実験方法

取鍋分析値、C : 0.08%, Si : trace, Mn : 0.40%, P : 0.007%, S : 0.012%, N : 0.0018% の一般低炭素リムド鋼の、hot coil の鋼塊中央部相当から採取した熱延板を本研究の母材として使用した。この熱延板から、A : cube-on-corner (111)[110], B : cube-on-edge (110)[001] および C : (100)[011] 集合組織の [011] 軸が圧延方向に左右に 25° 振れ、(100) 面が圧延面に対して最大約 10° 傾いた cube-on-face 類似の集合組織を有する3種類の冷延鋼板を製作した。また一部の試験には D : 結晶方位が不規則に近い冷延鋼板も比較に使用した。これらの冷延鋼板の製作方法については、本研究の主題からはずれるので多くはふれないが母板熱処理、中間熱処理を含む2回圧延法によるもので、最終板厚 0.53 mm に仕上げられ、最終焼鈍においては残留 C 含有量が 0.005%, N 含有量が 0.0006% となるまで脱炭脱窒が行なわれている。

この報告は、各々その目的を異にする数回の実験の結果をまとめたものであるが、各々の実験においては試料調整法も若干の差がある。

### [実験 1]

目的: 深絞り性、耳の形成、各種引張試験値、球底張り出しにおける歪分布におよぼす結晶集合組織の影響についての検討。

試料: 試料の集合組織の主方位とフェライト粒度を Table 1 に示す。これらの試料は同一熱サイクルで最終

焼鈍がなされているので、わずかに結晶粒度に差がある。Fig. 1, 2, 3 に集合組織の極点図を、Fig. 5 に磁気異方性の測定結果を示す。

実験方法: 引張試験は、圧延方向と 0°, 22.5°, 45°, 67.5°, 90° の角度をなす方向の5方向について、JIS 5号試験片を採取して行なった。ヤング率およびポアソン比<sup>\*</sup>は、試験片両面に直接ストレインゲージを貼布して測定した。荷重-伸び曲線は X-Y 記録計で記録し、一様伸

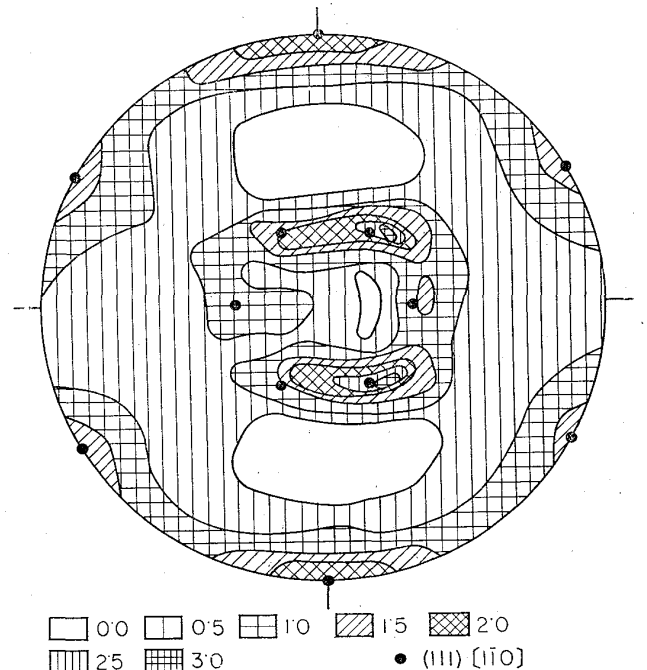


Fig. 1. (110) pole figure of I-A steel

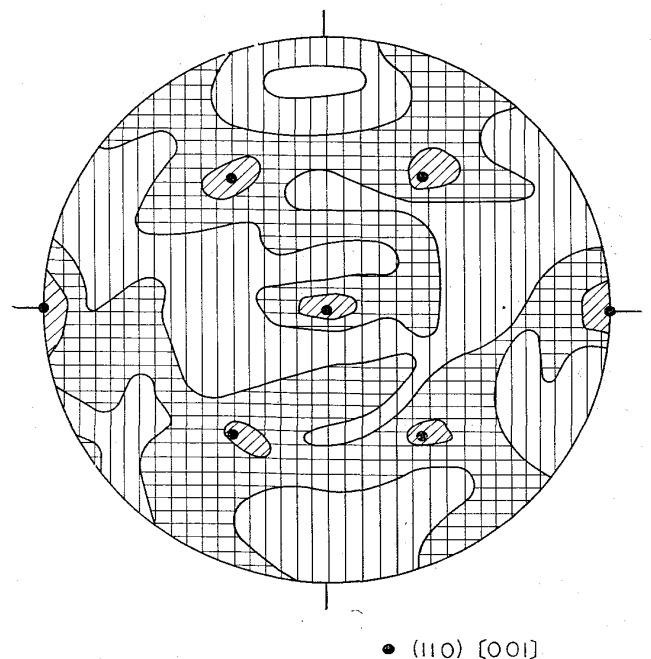


Fig. 2. (110) pole figure of I-B steel

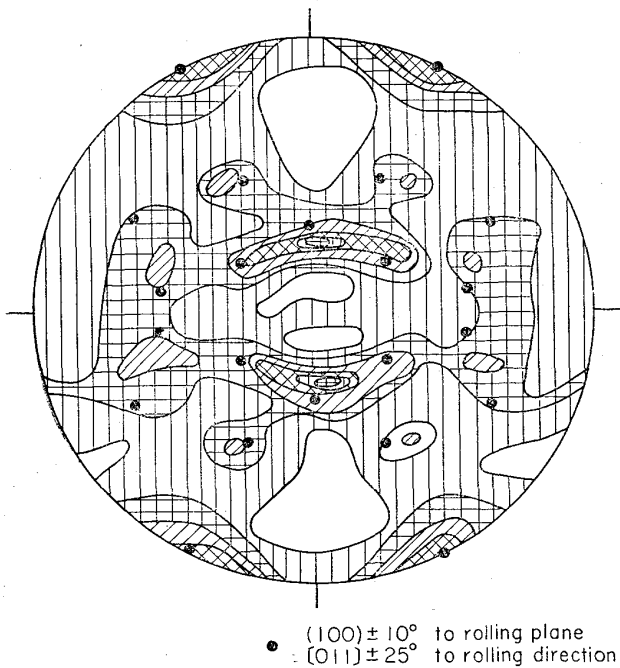


Fig. 3. (110) pole figure of I-C steel

びは最高荷重の終点において測定した。全伸びは 50 mm 標点について破断後に測定し、局部伸びは全伸びと一様伸びの差として計算した。加工硬化係数は歪 10%、20% の応力から計算した。 $r$  値は体積一定の条件を用いて 15% 引張り後の伸びと標点間の平均幅から計算した。 $r$  値の測定は dead soft の状態で行なつたが、本試料は極低炭素、極低窒素であり、引張試験時に顕著なリュダース帯は発生しなかつたため測定精度は良好であつた。下降伏点、抗張力、全伸び、一様伸び、局部伸び、 $n$  値、 $r$  値および試験片の破断角度について、試験は 2 回ないし 4 回繰返したが、これらの値に意味ある差は認められなかつたので、Table 2 に平均値として記載した。Photo. 3 に破断後の引張試験片の形状を示す。

ポンチ直径 40 mm の高速カップテスターによつて限界絞り比を測定した結果を Table 1 および Photo. 1 に示す。試験条件としては、平底ポンチ ( $r_p=4.5$  mm) を使用し、ポンチ速度 20 m/min、しわ押さえ圧力 0.7 t で潤滑剤として # 120 機械油を用いている。また深絞り時の耳の生成傾向を、絞り比 2.0 のカップで比較した結果を Fig. 4 および Photo. 2 に示す。

直径 40 mm の球底ポンチによる張り出しカップ試験における歪分布の状態を、割れ発生前（張り出し限界の約 85%）のポンチストローク 140 mm の時点において調べた。同心円および放射状に標線を 1 mm 間隔で焼付け、張り出し後にコンパレーターによつて歪量を測定した。結果を Fig. 14 に示す。

### 【実験 2】

目的: エリクセン値におよぼす結晶集合組織、結晶粒度の影響についての検討。

試料: 試料は【実験 1】と同様に 3 種の方に調整されているが、結晶粒度を変化させるための手段として、最終焼鈍の条件を変化させている。このさい若干集合組織の強度が変動することはやむをえないが、これが定性的な意味のみならず、定量的にも試験の目的に十分かなつた範囲の変動でしかないことを、X 線反極点図法によつてたしかめている。

実験方法: エリクセン試験片は、対辺長さ 8 cm の 8 角形に切断し、45° ずつ圧延方向と試験機の相対角度を回転せしめて、同一試料について 8 回の繰返しで測定した。測定にあつては、順位を不規則化し、さらに測定者は試料符号を未知の状態に測定するように管理した。

### 【実験 3】

目的: 張り出し性におよぼす集合組織、結晶粒度、工具の寸法効果の影響についての検討。

試料: 試料は【実験 2】と同様の方法で製作した。なおこの実験ではあらたに方位が不規則に近い試料をも加えている。

実験方法: 張り出し性の試験としては、a) ポンチ直径 17.4 mm、ねぢしわ押さえ、荷重-張り出し深さ曲線記録による張り出し試験、b) JIS エリクセン試験機を用いてしわ押さえを完全にしめつけたままで行なつた試験、c) エリクセン社のエリクセン・カップテスターを用い、油押しわ押さえ、荷重-張り出し深さ曲線記録によるエリクセン試験、d) エリクセン社のカップ・テスターを用い、ポンチ直径 33 mm、油押しわおさえ、荷重-張り出し深さ曲線記録による張り出し試験の 4 種類を行なつた。測定の方法、試料数などは【実験 3】と同様である。

### 【実験 4】

目的: (110)[001] 集合組織における mechanical fiber 軸と方位軸、引張軸の間の交互作用の間の、延性におよぼす影響についての検討。

試料: 面内異性をもつとも強く出る (110)[001] 集合組織について、mechanical fiber との交互作用を見るために、縦横冷間圧延比は一定として、2 回圧延法において 15° ずつ方向をかえて圧延し、集合組織の [001] 軸と mechanical fiber 軸の相対角度が 15° ずつずれている試料を製作した。

実験方法: 引張試験、ならびに特性値の測定法は【実験 1】と同様である。さらにエリクセン試験も【実験 2】と同様な方法で行なつた。

【実験 5】

目的: エリクセン値におよぼす集合組織と, 冷間圧延における straight rolling, cross rolling との交互作用の影響についての検討.

試料: 【実験 1】と同じ工程により 3 種類の集合組織を調整するさい, 冷間圧延を straight rolling, cross rolling の 2 種類として, 介在物の分布形態に差のある試料を作成した. X線解析の結果によれば, この 2 つの工程は最終製品の集合組織に本質的な差をもたらさないことが確認された.

実験方法: エリクセン試験は【実験 2】と同様な方法

で 6 回のくりかえしで行なった.

3. 実験結果およびその検討

3.1 深絞り性-r 値-n 値-集合組織

引張試験における塑性異方性については, Table 2 に示すように (111)[110] 集合組織を有する I-A 鋼がもつとも高い  $r$  値を示し平面異方性  $\Delta r$  が小さい. この鋼板の深絞り成形性は, Table 1, Photo. 1 に示すように在来の鋼板よりも非常に優れており, これは BURNS, HEYER<sup>2)</sup>らの結論とまったく一致している. (110)[001] 集合組織は圧延方向に直角な方向では非常に高い  $r$  値を示すが,  $r$  ではむしろ小さく特有の大きい平面異方性を有している. I-B 鋼の深絞りカップ試験結果からは, (110)[001] 近傍の集合組織は, 深絞り成形に対しては有利には作用しないことが結論される. I-C 鋼は (100)  $\pm 10^\circ$  to rolling plane, [011]  $\pm 25^\circ$  to rolling direction 近傍の集合組織を有し, これは深絞り加工にさいしては (100)[011] の cube-on-face 集合組織と類似の作用をおよぼすと考えられる. したがってこの試料は非常に  $r$  値が低く深絞り成形性が劣っている.

山田<sup>4)</sup>によれば, 深絞り性の基本要因としては,  $n$  値が  $r$  値とともに重要であることが明らかとなつている. しかし, これらの 3 種類の試料に

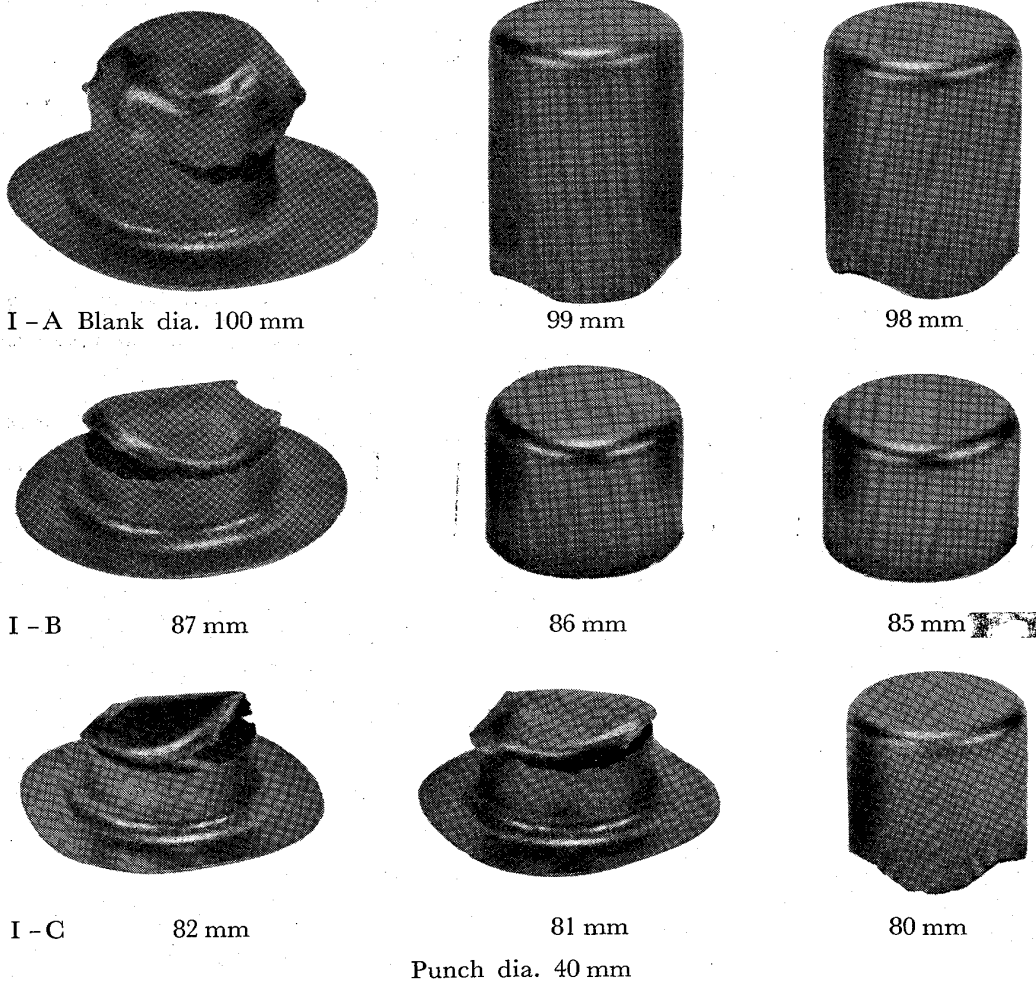


Photo. 1. Cup test results of steels tested

Table 1. Main component of preferred orientation, grain size and L.D.R. of the steels tested.

Steel	Main component of preferred orientation	Intensity	Grain shape	Grain size in ASTM No.	L. D. R.
I - A	(111)[110]	Strong	Equi-axed	5.0	2.475
I - B	(110)[001]	Moderate	Equi-axed	4.3	2.125
I - C	(100) $\pm 10^\circ$ to R. P. [011] $\pm 25^\circ$ to R. D.	Strong	Equi-axed	4.0	2.025

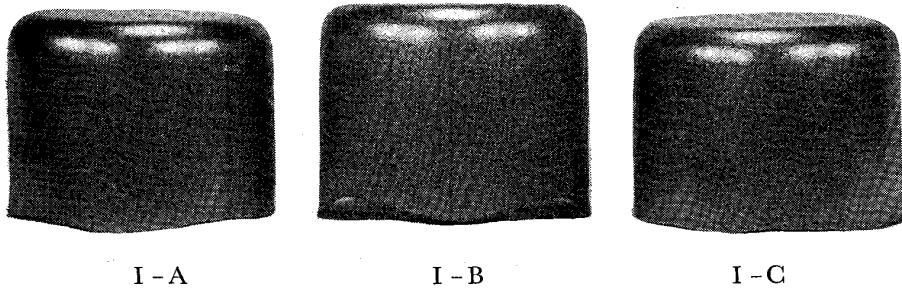


Photo. 2. Earing of drawn cups

おける  $n$  値あるいは降伏比の差はわずかであり、これから半定量的に深絞り性への効果を推定しても、本実験の範囲においては一応  $n$  値からの影響は無視してよいほど小さいと考えられる。すなわち、この実験から結論されることは、他の要因の効果はまったく無視できる状態で、実際に製造が可能である程度の集合組織の変動によって、冷延鋼板の限界絞り比は 2.0 から 2.5 の範囲で変化するということであり、これから冷延鋼板の深絞り性が、根本的に  $n$  値の変動よりも集合組織の変動によって左右されているという事実も理解される。

3.2 耳- $\Delta r$ -磁気トルク曲線-集合組織

プレス加工における耳の形成はやはり集合組織に起因するものであるか、これまでも  $r$  値の板面内異方性な

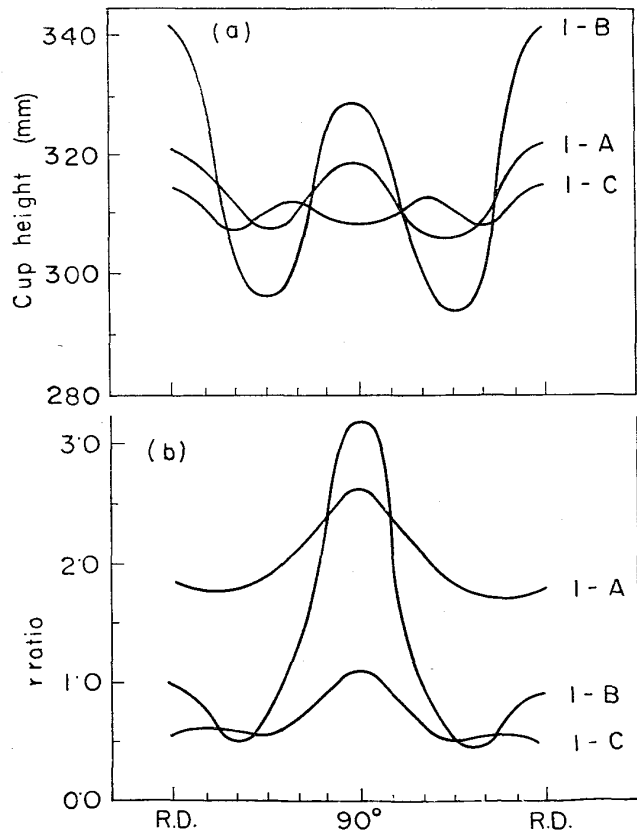


Fig. 4. a) Earing of drawn cups. b) Distribution of  $r$  ratio.

どの観点からかなり検討されてきている<sup>14)</sup>。本実験においても、深絞りカップの耳の大きさは一応  $\Delta r$  の大小と関係があり、Photo. 2に示すように、(110)[001]集合組織の I-B 鋼はもつとも大きい耳が生じた。しかし Fig. 4 を比較して明らかなように、詳細には耳の最高部と  $r_{max}$  の方向は一致

していないし、さらに I-C 鋼は 60° 間隔に小さい耳を生じるが、これも  $r$  値の板面内異方性とはよい対応は示していない。したがってプレス加工時の耳の発生は、本質的には鋼板の集合組織に起因するとはいつても、これをただちに一軸応力下の  $r$  値の異方性と単純かつ直接的に結びつけることには若干の飛躍が感じられる。

また磁気トルク曲線を耳の形状および大きさと関連づけることも非常に困難であることは、Fig. 4 および Fig.

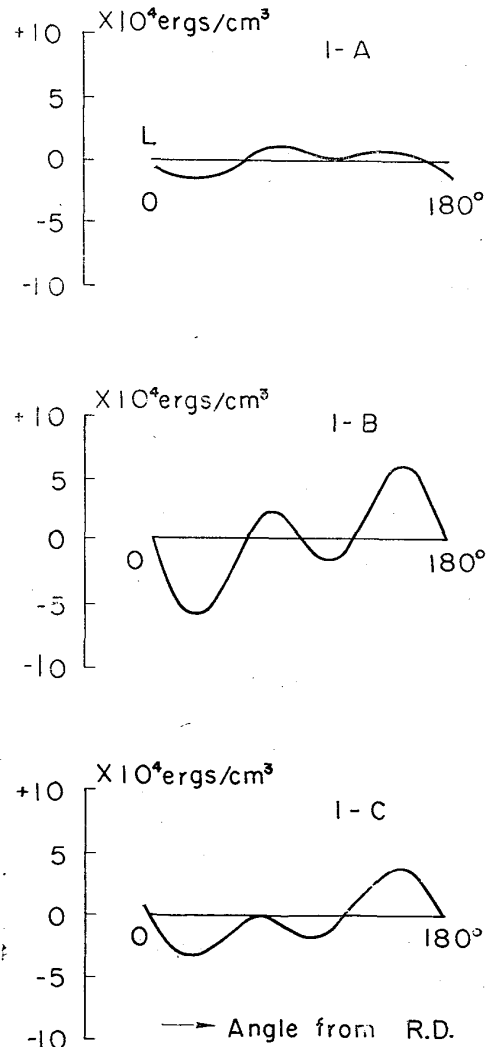


Fig. 5. Results of Torque-Magnetometer Tests

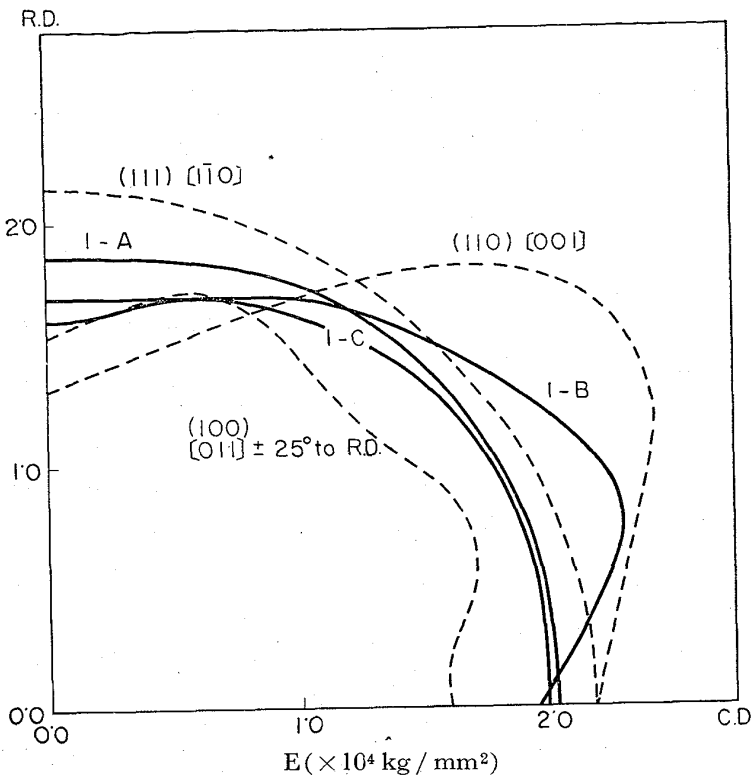


Fig. 6. Young's modulus of steel sheets tested and theoretical value

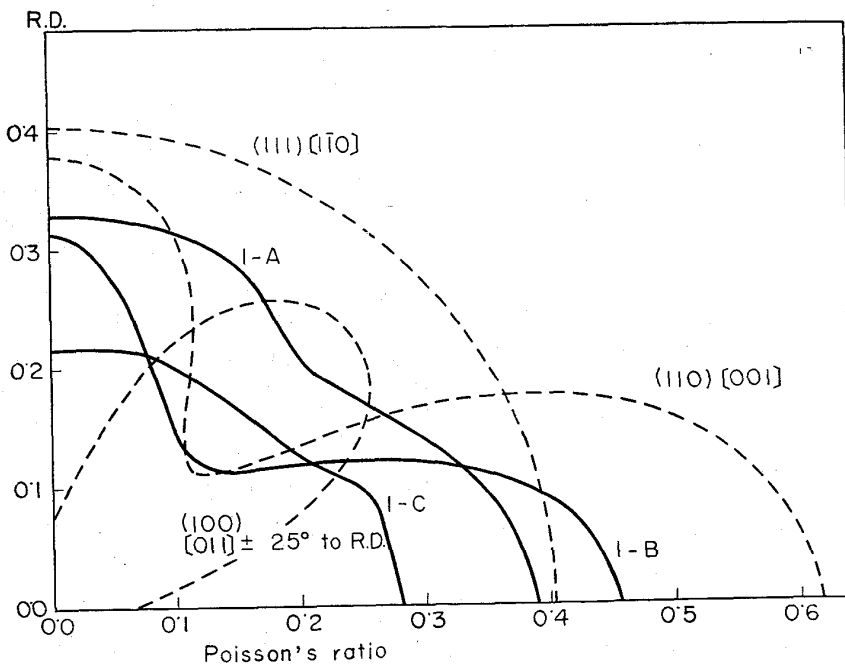


Fig. 7. Poisson's ratio of steel sheets tested and theoretical value

5とを対比しても明らかであろう。

3.3 ヤング率-ポアソン比-集合組織

形状性、張り剛性の要因として重要なヤング率、ポアソン比\*(ここでは引張歪に対する板巾方向の歪の比を見掛け上のポアソン比とする)は、結晶方位の影響を強く

受けることが明らかとなっている<sup>15)</sup>。Fig. 6に示したヤング率の測定値は、理論計算値ほどには明瞭な差は示さないがそれでも(110)[001]集合組織のI-B鋼は、ヤング率の板面内異方性が大きく、(111)[110]集合組織のI-A鋼は板面内異方性が小さくてその平均値が大きく、またI-C鋼は、平均的にヤング率が小さいという定性的な傾向を有することは明らかである。ポアソン比については、Fig. 7に理論計算値と測定値を比較したが、ヤング率と同様によい傾向の一致が見られる。

3.4 降伏点-加工硬化係数-抗張力-集合組織

[実験1]における3種類の試料は、同一化学成分で結晶粒度も大体同程度であるため、降伏点と抗張力は平均的にはほとんど等しい。しかし板面内異方性は、Table 2に示されているように明瞭な傾向を示すが、五弓<sup>15)</sup>が述べているようにその差は絶対的にはそれほど大きいものではない。(111)[110]のI-A鋼、(110)[001]のI-B鋼は45°方向近傍に降伏点、抗張力の最大があり、延性も最小となるが、I-A鋼に比して、I-B鋼はとくに極端な伸びの減少が認められる。これはn値の変動が、降伏点と同様に絶対的にはかなり小さく、0.29~0.32程度であり、一樣伸びに換算すれば数%程度の板面内異方性しか示していないにもかかわらず、実際にはそれ以上の一樣伸び変動が存在するという点で注目される。またI-C鋼においては、90°方向でもっとも高い降伏点、抗張力を示し顕著な最小延性を示す45°方向との不一致が認められる。これらの結果から、本実験においては、強度特性と延性を単純にむすびつけて考えることはできないということが結論されよう。

3.5 全伸び-一樣伸び-局部伸び-r値-集合組織

引張試験における延性特性の板面内異方性は、強度特性、すなわち降伏点、抗張力、降伏比あるいは加工硬化係数などよりも一見して著しい。Fig. 8-a)は、引張試験における全伸びとr値の関係を示したものであるが、これから明瞭な正相関が認められる。しかしFig.

Table 2. Mechanical properties of steels tested.

Properties	Steel	Angle from the rolling direction					$\bar{x}$	$\Delta$	Test numbers
		1	2	3	4	5			
		0°	22.5°	45°	67.5°	90°			
L.Y.P. (kg/mm <sup>2</sup> )	I-A	10.7	10.8	11.2	11.2	11.1	11.0	0.5	n = 4
	-B	10.4	10.7	11.4	11.3	10.9	11.0	1.0	
	-C	10.9	10.8	11.1	11.3	12.1	11.2	1.2	
T.S. (kg/mm)	I-A	24.7	25.7	26.4	25.9	25.6	25.8	1.7	n = 4
	-B	24.3	24.6	26.1	25.8	24.5	25.2	1.8	
	-C	24.7	24.9	25.3	25.6	26.2	25.3	1.5	
T.E. (%)	I-A	49.3	48.0	47.8	49.8	53.3	49.2	5.5	n = 4
	-B	44.5	41.5	33.0	43.5	52.5	41.6	19.5	
	-C	44.0	44.5	38.3	44.3	48.0	43.3	9.7	
U.E. (%)	I-A	36.5	36.5	35.0	35.5	36.0	35.8	1.5	n = 2
	-B	37.8	38.0	26.0	33.5	38.0	33.8	12.0	
	-C	39.0	39.5	32.5	36.5	36.5	36.6	7.0	
L.E. (%)	I-A	13.5	13.5	14.0	15.5	16.5	14.5	3.0	n = 2
	-B	8.0	5.5	3.5	11.5	19.0	8.5	15.5	
	-C	8.5	0.0	5.0	9.5	12.5	8.0	7.5	
L.Y.P./T.S. (%)	I-A	43.3	42.0	42.4	43.2	43.4	42.7	1.4	n = 4
	-B	42.8	43.5	43.7	43.8	44.5	43.7	1.7	
	-C	44.1	43.4	43.9	44.1	46.2	44.1	2.3	
n value	I-A	0.312	0.299	0.304	0.299	0.313	0.304	0.014	n = 2
	-B	0.316	0.319	0.298	0.309	0.292	0.308	0.027	
	-C	0.315	0.303	0.323	0.298	0.308	0.309	0.025	
r value	I-A	1.86	1.72	1.88	2.18	2.70	2.02	0.98	n = 2
	-B	1.00	0.62	0.61	1.82	3.18	1.29	2.57	
	-C	0.57	0.62	0.58	0.81	1.15	0.72	0.58	
Fracture Angle $\theta$ (degree)	I-A	57	57	57	57	54	56.6	3	n = 4
	-B	63	62	65	56	56	60.6	9	
	-C	62	63	62	59	58	61.0	5	

8-b) によれば、一様伸びと  $r$  値の間にはそのような相関関係は存在せず、とくに I-B 鋼, I-C 鋼の 45° 方向の一様伸びの異常減少だけが注目される. Fig. 8-c) は局部伸びと  $r$  値の関係を示したものであるが、この両者の間には強度の相関関係があることが明らかである. Photo. 3 および Table 2 によれば、 $r$  値の低い試験片は巾縮みが非常に小さく、切断角度も引張軸に対して鈍角であることが示されている.  $r$  値と局部伸びが相関を示す理由としては、引張試験片の寸法形状効果と、塑性変形における異方性の交互作用が考えられる. すなわち  $r$  値の高い試験片は、一様伸びをすぎてもなお巾方向に収縮しやすく、 $r$  値の低い材料は板厚方向に necking を起こしやすいと考えれば、前者の場合のほうが寸法効果的に局部伸びが大なることは容易に推論することができよう.

**3.6 一様伸び- $n$ 値- $r$ 値-mechanical fiber-集合組織 cube-on-edge 集合組織の I-B 鋼, および cube-on-face 類似の集合組織を有する I-C 鋼における 45° 方向**

の一様伸びの異常減少については、Fig. 9 に示すようにこれを  $n$  値から説明することはできない. この現象を解明するために、[実験 4]として板面内異方性をもつとも強くあらわれる (110)[001] 集合組織を選び、集合組織の圧延軸すなわち [001] 軸と mechanical fiber 軸を相対的に 15° ずつ回転させた試料を製作し、そのおののについて圧延方向、45° 方向、90° 方向の引張試験片を採取し、 $n$  値、全伸び、一様伸びを測定した. 結果を Fig. 10, 11, 12 に示す. Fig. 11 に明らかなように、10~20% で測定した  $n$  値から計算した一様伸びと、直接に最大荷重点の終点として測定した一様伸びの間の関係には、各方向によつて差が認められる. (20% まで伸びなかった試料はその伸びの最大範囲内で  $n$  値を計算した.) この場合  $r$  値が大巾に異なると、最大荷重点からの荷重の落下時の様相が若干異なるようで、圧延方向引張試験片と 90° 方向引張試験片のわずかな差はこれが原因となつて一様伸びの終点判定に差が生じたものとも考えられるが、45° 方向はバラツキが大きく、明らかに、



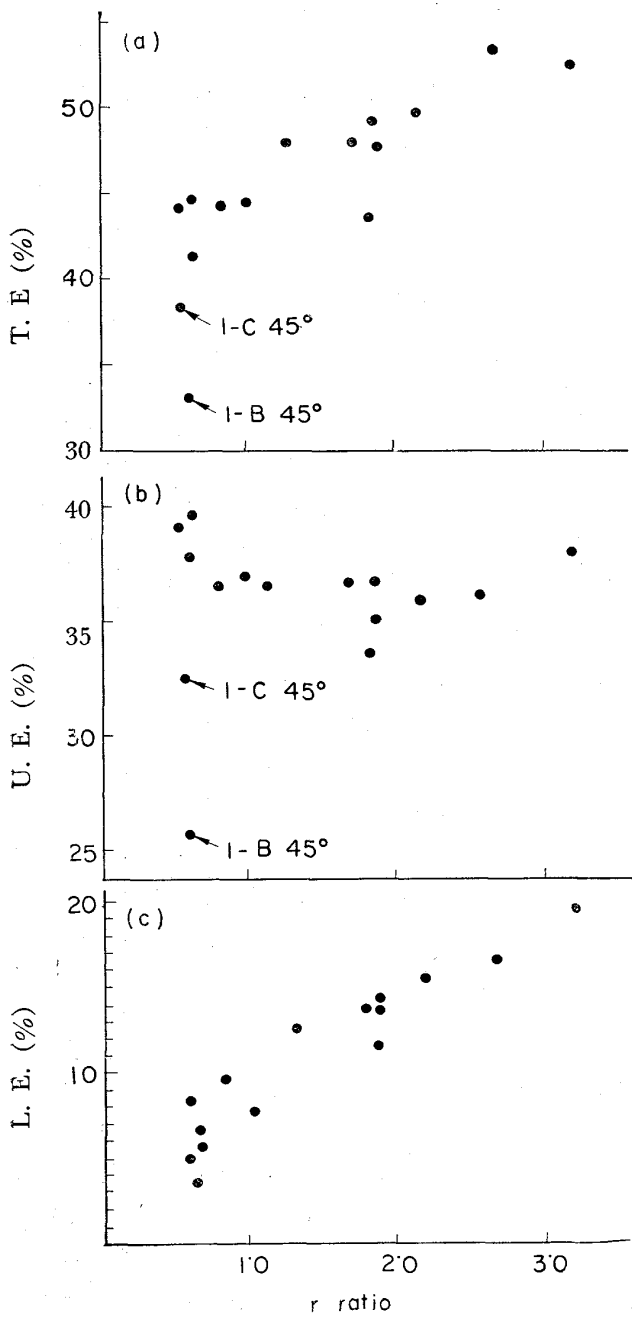


Fig. 8. Elongation v. s.  $r$  ratio.

引張試験における加工硬化係数と一様伸びの関係を、はなはだしく乱すならぬかの要因が働いていることがわかる。Fig. 12 は  $n$  値から計算した一様伸びと、直接測定した一様伸びの差について、mechanical fiber 軸と引張軸の相対角度の影響を示したものであるが、これから (110)[001] 集合組織の  $45^\circ$  方向の異常延性低下は、 $r$  値と引張軸と mechanical fiber 軸の相対角度の交互作用の影響をうけることが明らかである。すなわち引張試験において、 $r$  値が非常に低い場合は mechanical fiber の不安定条件におよぼす影響は非常に大きいこと、しかし mechanical fiber 軸が引張軸と平行であれば、 $r$  値が低

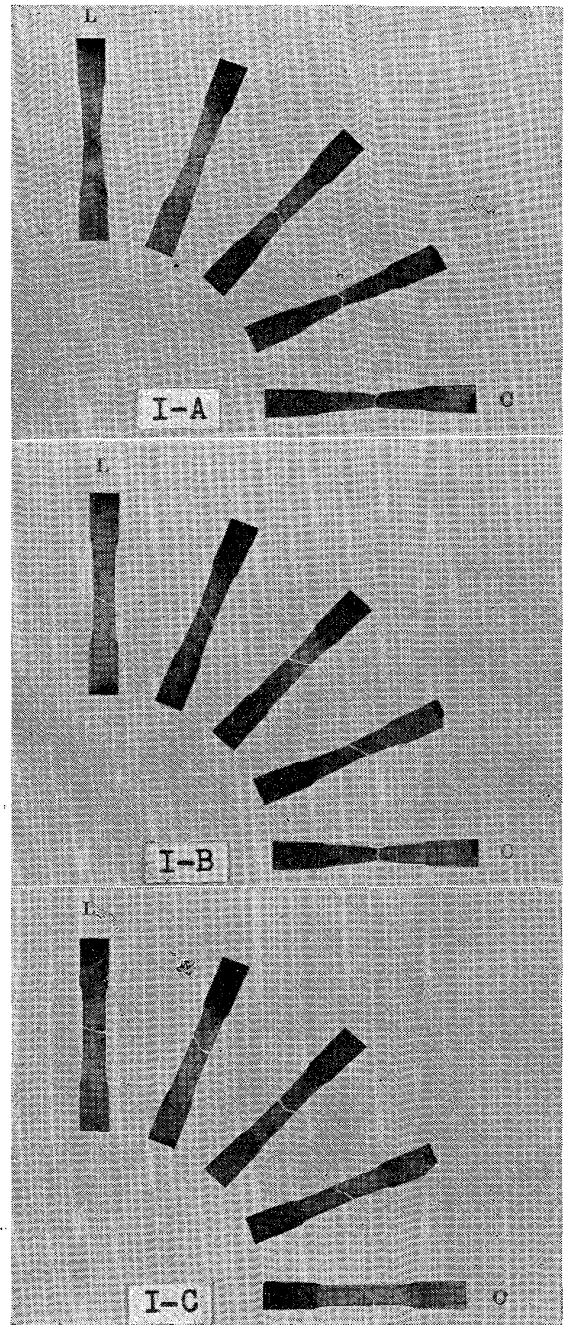


Photo. 3. Tension test piece of steels tested after fracture.

くてもほとんどその影響はないことが結論される。異常延性低下について、バラツキが大きいことも破断現象および mechanical fiber の存在を確率論的に考えれば妥当な結果であろう。 $r$  値が 1 に近い圧延方向の引張試験においては、 $45^\circ$  方向に mechanical fiber が走っている場合にやはり一番延性が低下するが、値としてはそれほど大きいものではない。 $r$  値が大きく板巾方向に強い necking を起こす  $90^\circ$  方向の引張試験値は、 $n$  値と一様伸びの間の関係にバラツキが少なく、 $45^\circ$  方向に mechanical fiber が存在しても延性低下を示していない。

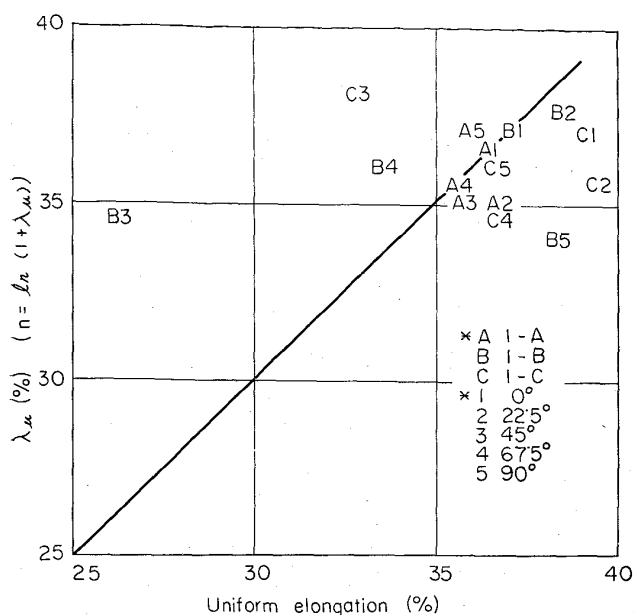


Fig. 9. Relation between  $n$  value and uniform elongation.

むしろこの場合は、 $90^\circ$  方向に存在するときの影響がわずかにあらわれているようである。

以上の説明は、材料の加工硬化特性が一応  $\sigma = ce^n$  で近似でき、したがって  $n$  値と一様伸び  $\lambda_u$  の間に  $n = \ln(1 + \lambda_u)$  なる関係が成り立つことを仮定し、mechanical fiber の存在が、 $r$  値ならびに引張試験片破断

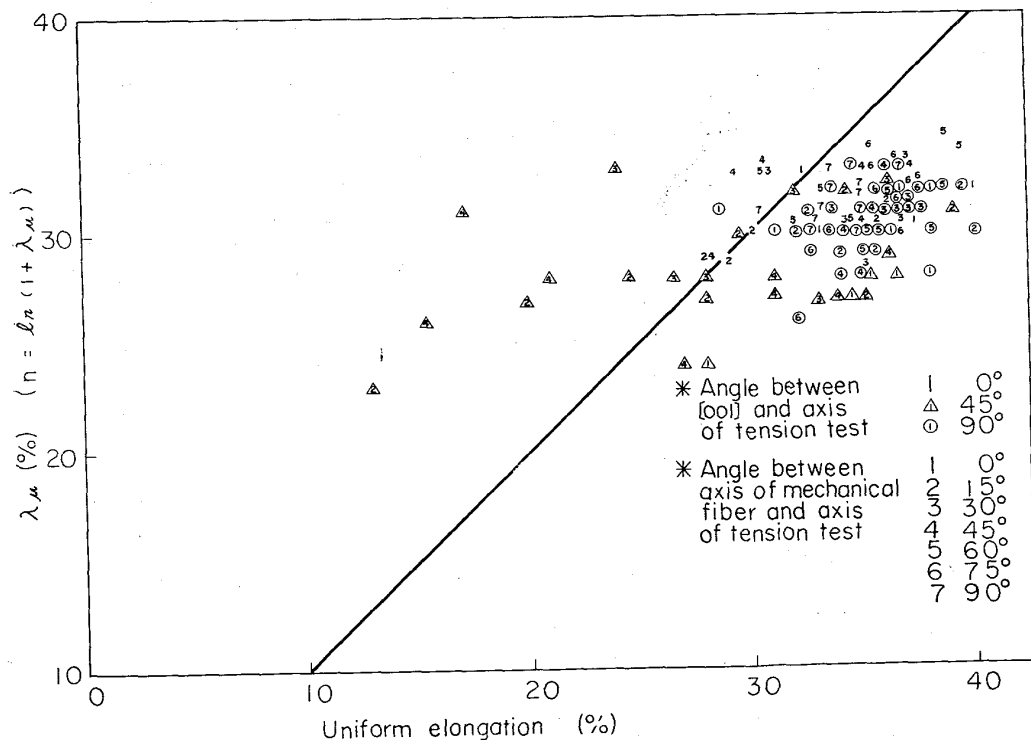


Fig. 11. Relation between  $n$  value and uniform elongation in (110)[001] oriented steel.

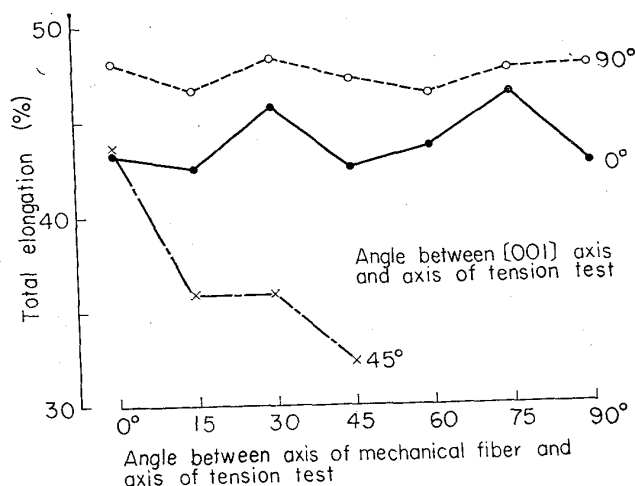


Fig. 10. Effect of angle between [001] axis of preferred orientation, axis of mechanical fiber and axis of tension test on total elongation

時の寸法形状効果との交互作用を伴って、最大荷重点近傍での不安定条件を乱すことによつて異常延性低下が生じるという考え方にもとづいたものであるが、実際に  $45^\circ$  方向あるいは圧延方向の引張試験片においても、異常延性低下が生じた場合は  $\sigma = ce^n$  なる近似は、Fig. 13 に示すようにあまり成立していないようである。したがつて上述の説明にはまだ基本的な問題が残されている。

### 3.7 歪分布-r値-集合組織

プレス部品の歪分布は材料の加工硬化係数  $n$  によつて本質的に決定されることはすでに明らかとなつているか、Fig. 14 に示すように、 $r$  値、すなわち集合組織も要因となり得る。すなわち I-A 鋼は板厚方向に薄くなりにくい強い異方性を有しているため、張り出し加工においてポンチ頭部で局所的な necking を起こしにくく、周囲からの引張り込みが大きい。ここで注目されるのは、他の方位の試験片に比してポンチ頭部の necking 量が減少し、ダイス肩部の

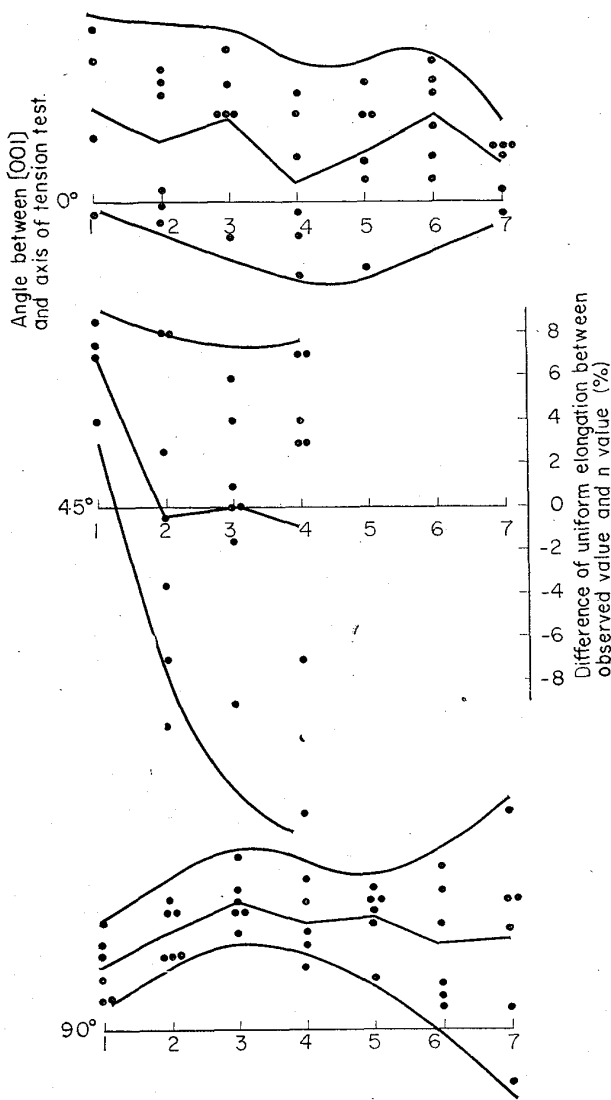


Fig. 12. Interaction of crystallographic orientation with mechanical fiber.

Angle between axis of mechanical fiber and axis of tension test

1:0°, 2:15°, 3:30°, 4:45°, 5:60°, 6:75°, 7:90°

necking 量が大となっていることである。r 値の低い I-C 鋼は局部的な necking を起こしやすいが、周縁部に歪をおよぼす程度は小さい。Goss texture の I-B 鋼は、necking 特性は I-C 鋼と平均的には同程度であったか、非常に大きい板面内異方性  $\Delta r$  を有しているため、歪分布の平面的な不均一性もやはりもつとも大きい。

### 3.8 張り出し性-形状効果-結晶粒度-集合組織

冷延鋼板の張り出し性については、化学成分、調質度、あるいは異相粒子などの要因が大きな影響をおよぼすことが一般的に理解されている。しかし集合組織については、いままではこれらの他の要因をそろえることが至難であったという理由から、その効果は確認されていな

い。本実験においては、単に集合組織の影響のみならず、張り出し加工の形状効果と結晶粒度の影響まで含めて調査したが、その結果は Fig. 15 に示すとおりである。これから明らかなように、集合組織と結晶粒度はともに張り出し性に大きな影響をおよぼし、しかも形状効果と間の交互作用も認められる。すなわち深絞り性の優れている cube-on-corner 結晶方位の I, III-A 鋼は、同一結晶粒度において他の方位の鋼板よりもすぐれた張り出し性を示している。r 値の低い結晶方位の試料は前項で述べたように板厚方向に local necking を起こしやすいために、張り出し性も若干劣る結果になったのではないかと考えられる。結晶粒度の影響は、粒度番号 8 付近をピークとして結晶粒度が微細となつても、また粗大となつても張り出し性は低下する傾向が認められる。結晶粒が微細であると延性が低下することは、一軸応力の引張り試験における伸びについても一般的に認められる現象であるが、この観点からすれば、粒度番号 8 ~ 6 程度の範囲で結晶粒の粗大化につれて延性が低下するとは考えられず、したがってこれを説明するためには、伸びの場合と張り出しの場合では別の機構を考えなければならない。前にも述べたように、これを結晶粒度の変化に伴う集合組織の消長に結びつけることは妥当でない。

実際にエリクセン試験を観察して気がつくことは、張り出しドーム面の肌荒れがはなはだしいと局部的な necking による破断が起こりやすいということである。結晶粒が小であるような場合には、エリクセンドームの破断はリング状に生じる場合がしばしば見られるが、肌荒れが生じた場合はこのような破断形態は絶対にとらない。したがって結晶の粗粒化に伴う張り出し性の劣化は、この肌荒れによる応力集中によつて生じるとする機構かもつとも確からしいと考えられる。さらに local necking しやすい r 値の低い結晶方位の試料ほど、結晶粒粗大に起因する張り出し性の劣化もはなはだしいという交互作用も無理なく説明できる。同じ直径のポンチを使用しながら、実験 c) と d) で若干傾向が異なるのは、しわ押さえ方法の差ということよりも、張り出し応力最大点をもつて張り出し限界とするか、あるいは目視判定によつて限界を定めるかの違いが強く出ているものと考えられる。すなわち後者のほうが肌荒れ、あるいは local necking に対して厳しい判定が出るといえよう。

張り出し性の形状効果と結晶粒度の間の交互作用については、概括的について局部張り出しになるほど張り出し性のピークに相当する粒度は微粒側に移行し、またポンチ直径が大になるほど、さらに絞り込みの要素が含ま

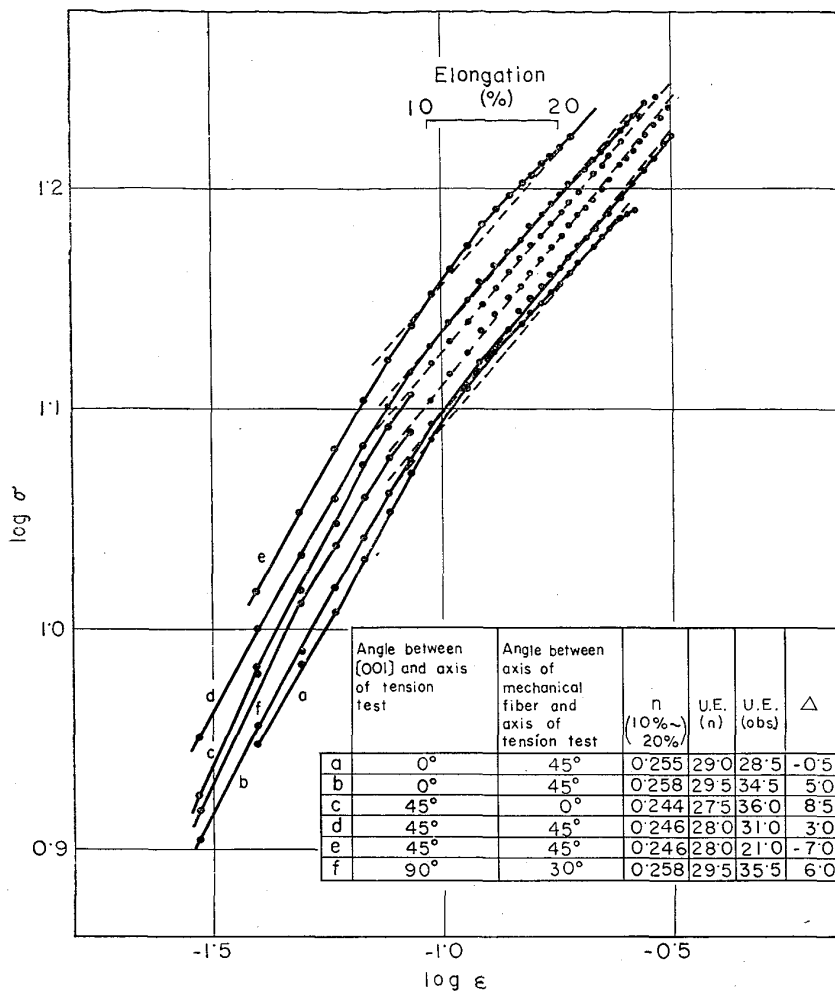


Fig. 13. Strain hardening properties of steels tested

れてくると粗粒側に移行するようである。

**3.9 張り出し性-r 値-mechanical fiber-集合組織**

非金属介在物およびカーバイドなどの存在は、割れ発生の源としてエリクセン値に影響をおよぼすことが明らかとなっているが<sup>5)</sup>、本実験においては試料が十分に脱炭されているためカーバイドの影響は無視することができよう。しかし母材が一般用低炭素リムド鋼であるために酸化物や硫化物の影響は防ぐことができない。3.6で述べたように、一軸応力下における一様伸びにおいてさえも、板厚方向への local necking 特性と mechanical fiber との交互作用がある以上、2軸応力下の張り出し加工においても同様な効果があらわれることが考えられる。実際に【実験4】においてエリクセン試験を行なった結果は、Table 3に示すごとく、エリクセン値のみならずその破断の様相まで影響をうける。もちろんこれだけの結果から厳密な推論を行なうことはできないけれども、少なくともこれから張り出し加工限を論ずる場合には、不安定条件から変形限界を定めるさいに重

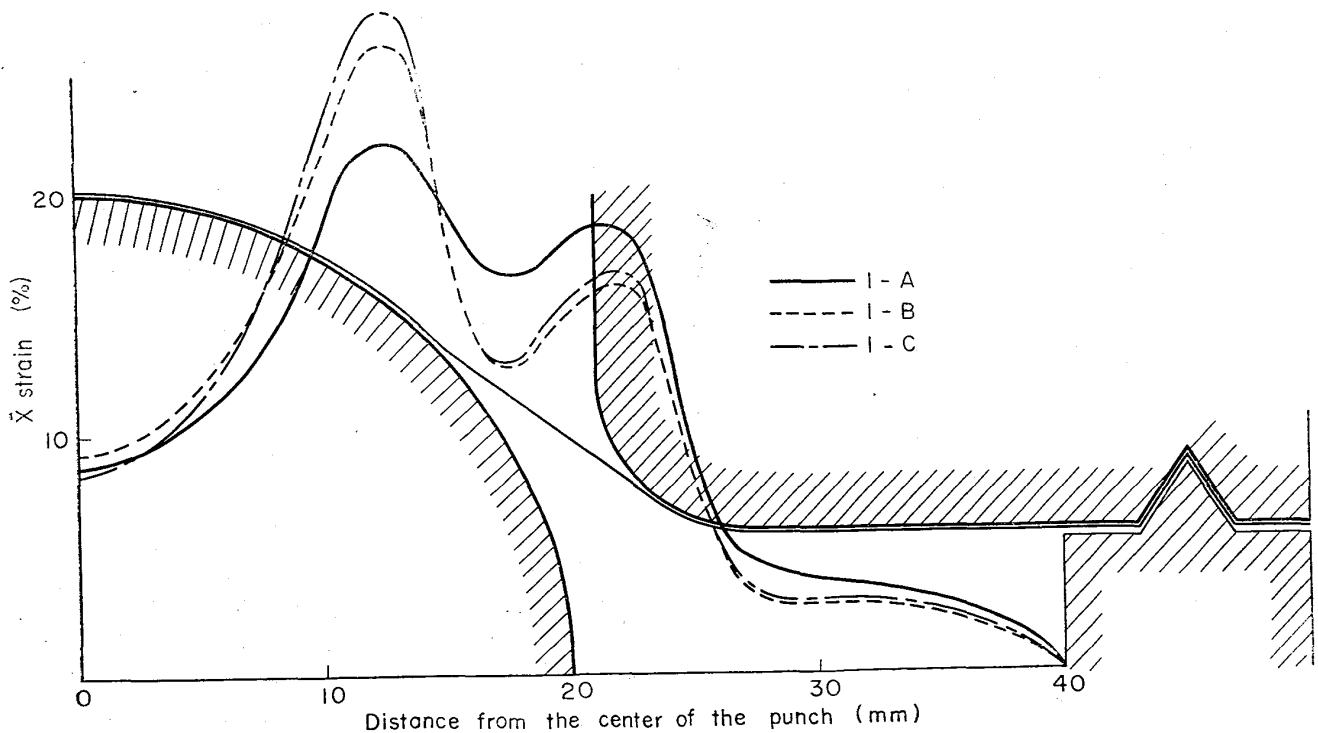


Fig. 14. Strain distribution in steels tested.

Table 3. Effect of angle between [001] axis of preferred orientation and axis of mechanical fiber on Erichsen value.

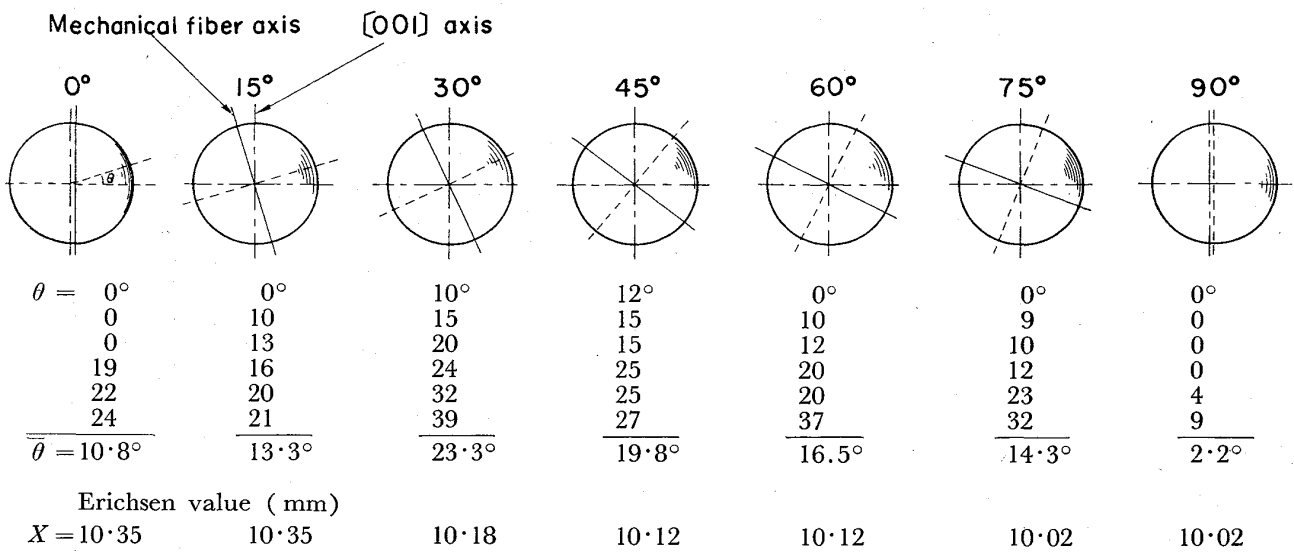


Table 4. Effect of cold rolling direction on Erichsen value.

n = 8	Cold rolling direction	Erichsen value (mm)	
		$\bar{x}$	$\sigma$
V-A	Straight rolling	9.44	0.144
	Cross rolling	9.46	0.187
V-B	Straight rolling	9.28	0.271
	Cross rolling	9.07	0.176
V-C	Straight rolling	9.21	0.258
	Cross rolling	8.87	0.224

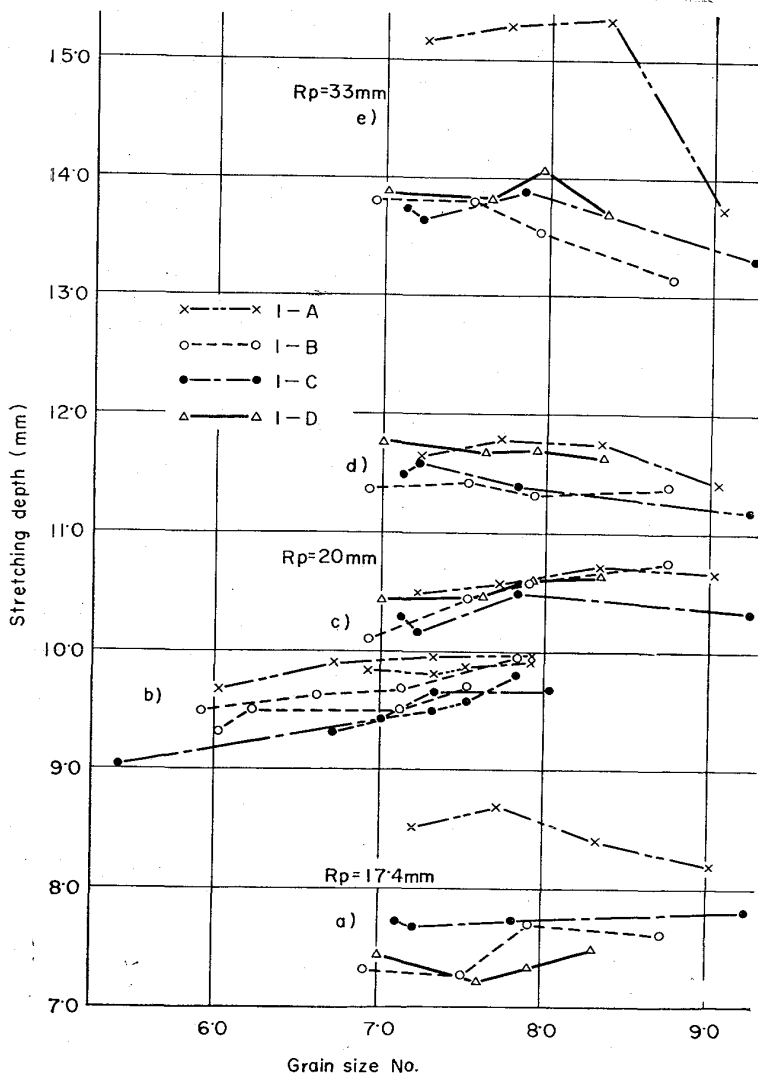


Fig. 15. Results of stretching cup test.

要となる加工硬化係数以外にも、重要な問題、重要な要因が残されていることが結論されよう。

Table 4 は熱延母板からの冷間圧延を straight rolling から cross rolling に変えた場合、エリクセン値にどのような影響があらわれるかを各集合組織について比較したものである。これによれば、mechanical fiber と集合組織の交互作用はエリクセン値についても明らかに存在するようで、cube-on-corner 集合組織の V-A 鋼は優れたエリクセン値を示すのみならず、圧延方向の影響もほとんど受けない。これに対し V-B 鋼および V-C 鋼は、エリクセン値が低く mechanical fiber の形態との交互作用も大なるものがあるようである。

#### 4. 総 括

cube-on-corner : (111)[110], cube-on-edge : (110)[001] および (100)[011] 集合組織の [011] 軸が圧延方向に対して左右 25° 振れ、(100) 面が圧延面に対して約

10° 傾いた Cube-on-face 類似の集合組織を有する 3 種類の試料を、同一の母材より製作し、引張試験、深絞り試験および張り出し試験を行ない、プレス加工性におよぼす集合組織の単独効果を明確にとりだし、さらに延性特性については集合組織および mechanical fiber と方位軸、引張軸との交互作用の効果、張り出し性については、集合組織、結晶粒度、寸法効果、mechanical fiber と方位軸の交互作用、および mechanical fiber の形態との交互作用の影響を調査した。その結果を総括すると次のごとくである。

1) 塑性異方比  $r$  は集合組織によつて左右され、したがって冷延鋼板の深絞り性の要因として集合組織の選択方位、強度は非常に重要である。

2) プレス加工時の耳生成については集合組織がその基本的な要因と考えられるが、一軸引張試験における  $\Delta r$  との対応関係についてはさらに詳細な検討を必要とする。

3) ヤング率、ポアソン比\* は集合組織の影響を受け、理論計算値の傾向に一致した明らかな異方性を示す。

4) 降伏点、加工硬化係数、抗張力などの強度、加工硬化特性についても、集合組織によつて板面内異方性が生じるが、絶対的にはそれほど大きいものではない。

5) これに対して、延性特性の板面内異方性は著しいものが認められるが、これは  $r$  値が局部伸びにおよぼす形状効果と、 $r$  値と mechanical fiber の交互作用による一様伸びの異常減少の 2 つが原因であることが明らかとなった。

6) 球底張り出しにおける歪分布は  $r$  値によつても影響をうける。

7) 張り出し性自体も  $r$  値によつて影響をうけるが、この場合寸法形状効果との交互作用、結晶粒度との交互作用、mechanical fiber との方位軸との交互作用、mechanical fiber の形態との交互作用などが重要である

ことが明らかとなった。

最後に、深絞り試験、張り出し試験にさいしてご援助を賜った東京大学生産技術研究所、山田嘉昭教授、輪竹千三郎技官に深甚なる謝意を表するとともに、本実験にあたり終始ご指導をいただき、かつ発表を許可していただきました今井技術研究所長、吉田千葉製鉄所副工場長に厚く御礼を申し上げます。

## 文 献

- 1) W. J. LANKFORD, S. C. SNYDER and T. A. BAUSHER: Trans. Amer. Soc. Metals, 42 (1950), p. 1197
- 2) R. S. BURNS and R. H. HEYER: Sheet Metal Ind., 35 (1958), p. 261
- 3) R. L. WHITELEY, D. E. WISE and D. J. BLICKWEDE: Sheet Metal Ind., 38 (1961), p. 349
- 4) 山田: 日本機械学会誌, 67 (1964), p. 542
- 5) 佐々木, 伊藤: 金属材料, 3 (1963), p. 8
- 6) 福田: 塑性と加工, 5 (1964), p. 3
- 7) 神崎, 中里, 伊藤: 鉄と鋼, 50 (1964) 4, p. 588
- 8) 岡本, 福田: 薄鋼板のプレス成形と試験法研究会第三期報告書, (1964), p. 457
- 9) M. GENSAMER and B. LUSTMAN: Trans. Met. Soc., Amer. Inst. Min., Met. & Pet. Eng., 62 (1930), p. 501
- 10) C. S. BARRETT, G. ANSEL and R. F. MEHL: Trans. Met. Soc., Amer. Inst. Min., Met. & Pet. Eng., 125 (1937), p. 510
- 11) R. M. BOZORTH: Trans. Amer. Soc. Metals, 23 (1935), p. 1107
- 12) N. P. GOSS: Trans. Amer. Soc. Metals, 23 (1935), p. 511
- 13) 吉田: 第 7 回塑性加工シンポジウム前刷, July (1963)
- 14) J. C. WRIGHT: Sheet Metal Ind., Nov. (1965), p. 814
- 15) 五弓: 日本機械学会誌, 67—542 (1964), p. 140