

で、Si脱酸における一次生成物の鉄浴からの浮上分離性は、シリコン添加量の多少にかかわらず一般に良好である。

5. 介在物粒子の浴中での濃度が高いときは凝集作用をもつ粒子はすべて同様に浮上中の凝集に寄与し、粒子径による差異はほとんど認められなかつた。

6. 一次生成物が酸化物 mixture であるとき粒子の組成構造は介在物の浮上分離性に大きく影響する。

終わりに本論文をまとめるにあたって有益な討論と検討を賜った東北大学大森康男助教授、ならびに実験に協力された大西、西山両氏に感謝の意を表します。

文 献

- 1) 河合, 小林: 鉄と鋼, 52 (1966) 4, p. 546
- 2) 河合, 小林, 米沢, 足立: 鉄と鋼, 52 (1966) 4,

p. 549

- 3) 河合, 小林, 米沢: 鉄と鋼, 53 (1967) 3, p. 336
- 4) 川和, 大久保, 笹島, 郡司: 鉄と鋼, 52 (1966) 4, p. 531
- 5) 宮下, 西川: 鉄と鋼, 52 (1966) 9, p. 1454
- 6) 坂上, 鈴木, 佐藤, 笹井: 日本鉄鋼協会第75回大会概要集, p. 303
- 7) 宮下: 鉄と鋼, 50 (1964) 3, p. 509, 日本鉄鋼協会第75回大会概要集, p. 299
- 8) H. LAMB: Hydrodynamics. Camb., (1932)
- 9) J. F. ELLIOTT and M. GLEISER: Thermochemistry for Steelmaking Vol. 2, Addison, (1963)
- 10) E. PLÖCKINGER und M. WAHLSTER: Stahl u. Eisen, 80 (1960), p. 659
- 11) H. STRAUBE, G. KÜHNELT und E. PLÖCKINGER: Arch. Eisenhüttenw. 38 (1967), p. 509, 607.

621.979.011:539.22:669.141.24-415
薄鋼板の変形に伴う異方性の挙動と二次成形性*

吉田清太**・宮内邦雄***・水沼 晋****

Anisotropic Behaviors of Prestrained Sheet Steels and Subsequent Formability

Kiyota YOSHIDA, Kunio MIYAUCHI and Susumu MIZUNUMA

Synopsis:

The development of planar anisotropy and the abrupt change in the mechanical properties of sheet steels (four Al-stabilized and one rimmed) due to the increase of prestrain are investigated in relation to the variation of crystallographic texture for different prestraining modes of uniaxial tension, biaxial tension, tension-compression, and bending-unbending.

The mechanical properties of those variously prestrained sheet steels may be explained more reasonably by employing the latent workhardening theory in a macroscopic deformation model having the active and latent slip systems resolved into width and thickness components in addition to the information from the variation of pole figure.

A concept of "re-formability", the formability of prestrained sheet metal having a certain deformation texture developed in it, is proposed for more systematic understanding of press formability, where it is distinguished from the ordinary or primary formability of sheet metal in terms of the variation of deformation path from the first forming to the subsequent one.

The variation of mechanical properties including the r value during the first forming of monotonic deformation path is generally increased by increasing the difference in the mode of deformation between the first forming and the subsequent one, and also by increasing the difference between the strain ratio (r value) of the virgin material and that forcedly given in the first forming, that is, the difference between the preferred orientation of sheet metal and the stable end orientation in the forming.

(Received June 12, 1968)

1. 緒 言

薄板のプレス成形性に関する研究は、成形技術に関する研究と併行して、近年多くの成果をあげつつある。特に r 値を媒体として、深絞り性を集合組織と結びつけ、深絞り用薄鋼板製造の場に有益な情報をもたらしたことは、巨視的から微視的に至る異なつた分野間の結びつき

の典型的な成功例といえよう¹⁾²⁾。現在、 n 値³⁾ならびにくびれ伸び⁴⁾または極限変形能を表現する特性値、たと

* 昭和42年10月, 43年4月本会講演大会にて発表
昭和43年6月12日受付

** 理化学研究所 工博

*** 理化学研究所

**** 八幡製鉄(株)東京研究所

例えば、極限(伸びまたは板厚)ひずみ⁹⁾などと張出し性および伸びフランジ性¹⁰⁾との関係が明らかになりつつあるが、これら材料特性値についても、結晶塑性的な立場からの検討がなされており、近い将来、これらの成果にもとづく新しい軟鋼板の出現が期待できるように思われる。

薄鋼板製造技術の指針となり、かつ、成形性判定の基準となる上記の材料特性値が、プレス成形における薄鋼板の塑性変形挙動をどのように支配するかを推定する場合に、従来、次のような仮定を基礎としてきた。すなわち、塑性変形により、 r 値および n 値は変化しない。さらに、一様伸び、全伸びなどにより表わされる変形能は消費した変形量に対応して連続的に漸減する。このような仮定が成立するのは、変形中のひずみ比が一定のごとき単純な変形経路の場合と考えるべきであるが、実際のプレス作業に対して、いままでに寄与してきた成形性の研究と適用化の実績は、プレス成形において、上記の仮定が、実用的に満足していたというべき経験であろうか。

プレス成形における素板各部の変形経路はたとえ単純な形状の成形でも単調なひずみ経路をたどるとは限らないことが徐々に明らかになりつつある。労働力の減少ならびに生産性向上の要求などが、プレス部品の大型化をもたらし、薄鋼板にあたえられる変形様式を複雑化せしめつつある⁷⁾。また、多段化されたプレス工程においては、変形経路は一般に著しく変化する。このようなことからさきに著者らは、変形経路の変化が材料の成形性評価に際して問題となることを指摘した⁹⁾。その結果は薄鋼板成形技術研究会を中心とする各鋼板ならびに自動車メーカーの研究技術者による多大の情報収集活動となつてあらわれてきた。たとえば、スクライブド・サークル・テストを各種の変形様式における薄鋼板の極限ならびに平均変形能決定に適用した結果、異なつた変形様式間におけるスクライブド・サークル値の格付け順位が一致しない場合が認められた⁹⁾。特に、変形経路が変化すると問題がさらに複雑になることが明らかになった。最近著者らが明らかにした典型的な例としては、縮みフランジまたは張出し変形後の伸びフランジ変形特性の挙動がある⁹⁾。

ここでは、変形経路が変化する場合のプレス成形性を対象とする。変形経路をひずみ比などにより示される変形様式の違いに応じて、一次と二次に分ける。一次変形(または成形)は、ひずみ比一定という形の直線的な単純変形経路により代表される。二次成形における予変形材の成形性を二次成形性とする¹⁰⁾。これは、変形経路の変化と材料特性の結びつきが量的に体系化されたあかつき

には、総合化された成形性として、単一の表現があたえられるべき性質のものであろう。

予変形材の成形性に関する研究問題は大別してふたつに分けることができる。

(1) 一次変形により材料の力学的諸特性がどのように変化し、どのような変形集合組織が生じるか。

(2) 二次変形において、予変形材の力学的諸特性がどのように変化し、一次変形集合組織から二次変形集合組織がどのように生じるか。

これらの問題は実に多くの観点から研究されてきたが現在のところ、一般に複雑な変形経路により特徴づけられるプレス成形、繊維組織、集合組織、結晶粒ならびに転位にかけて、巨視から微視の間における各分野間の断層を埋めることに成功しているとはまだいいがたい。このため、力学的諸特性に代表される巨視的立場と集合組織を媒体とする微視的立場の両面から、一次変形集合組織の成長がもたらす薄鋼板諸特性の異方性の変化挙動を追究し、さらに二次成形性の概念の必要性を検討する。

2. 予変形による変形ならびに強度の諸特性の異方性の挙動

2.1 実験方法

塑性変形の特徴を理解する手段として、それにより生ずるところの加工硬化状態、変形集合組織、変形繊維組織などを利用することは、すでに述べたことから明らかごとく、非常に有効と考えられるから、まず、加工硬化をほとんど受けていないと思われる非常に軽度の調質圧延軟鋼板の力学的諸特性値が、単純な変形形式における塑性変形の進行により、どのように変化していくかを、変形集合組織と関連づけるために、それらの板面異方性の発達に着目しつつ調べた。

使用材料はアルミニウムキルド軟鋼板がおもで、一部に目的に応じて、リムド軟鋼板を用いた。これらを Table 1 に示す。

与えたおもな予変形様式は、

一軸予引張材: Fig. 1 に示すごとく、約 $900 \times 200 \text{ mm}^2$ の長方形素板を溶接し、ストレッチ・エキスパンド成形装置により引張つた。一部は、約 $500 \times 60 \text{ mm}^2$ の長方

Table 1. Sheet material used.

Material	Sheet thickness (mm)
Al-stabilized steel (A)	0.8
" (B)	0.86
" (C)	0.8
" (D)	0.9
Rimmed steel (E)	0.8

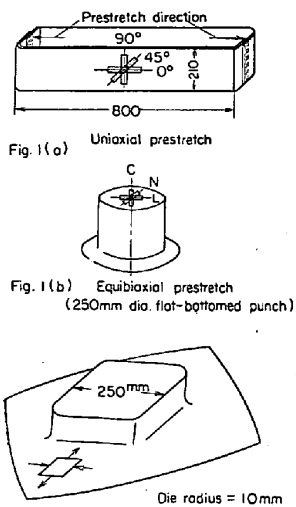


Fig. 1(a)

Fig. 1(b)

Fig. 1(c)

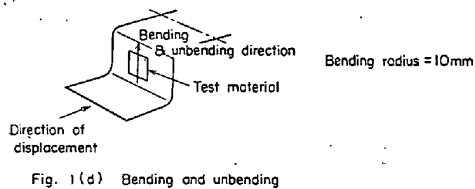


Fig. 1(d)

Fig. 1. Preparation of prestrained material.

形素板を引張試験機により引張つた材料を用いた。

等二軸予引張材：直径 250 mm の平底円筒ポンチによる張出しを行ない、Fig. 1 に示すごとく、平底中央付近ではほぼ等二軸張出し変形している部分を用いた。

予引張圧縮材：同じく Fig. 1 に示すごとく、四角筒深絞りにおいて、フランジ外周形状を適当に変えることにより、直辺部の縮みフランジ部でのひずみができるだ

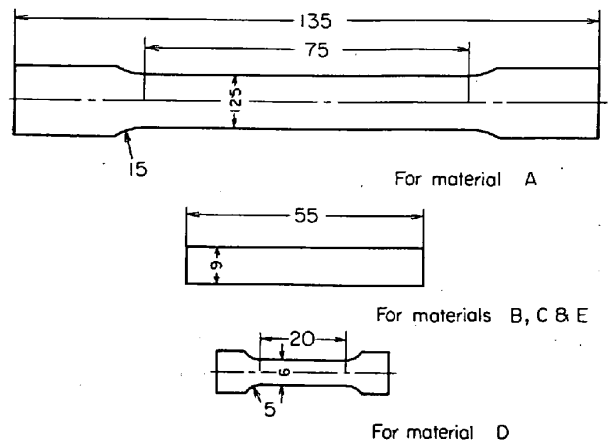


Fig. 2. Dimensions of tensile specimens.

け広い範囲で均一になるようにした。

そのほか、曲げ・曲げもどし材は、短ざく型試験片を用いて Fig. 1 に示した角筒直辺部側壁からとり出した。

母材および予変形材の引張試験に用いた試験片は、原則として、Fig. 2 に示すごとく ISO 5/8 試験片であるが、予引張圧縮材などでは、作りうる変形部の寸法制約のため、さらに小寸法の試験片を用いた。

引張試験機は荷重および伸びを電氣的に自動記録（ペン書き）するインストロン型引張試験機を用い、試験速度は、クロスヘッド速度で 10 mm/min である。

2.2 強度特性

降伏点は、予変形形式の特徴を比較的純粋に示す強度特性値といえるが、Fig. 3 にその例を示す。板面各方向の記号は、常に圧延方向を L、45° 方向を N、直角方向

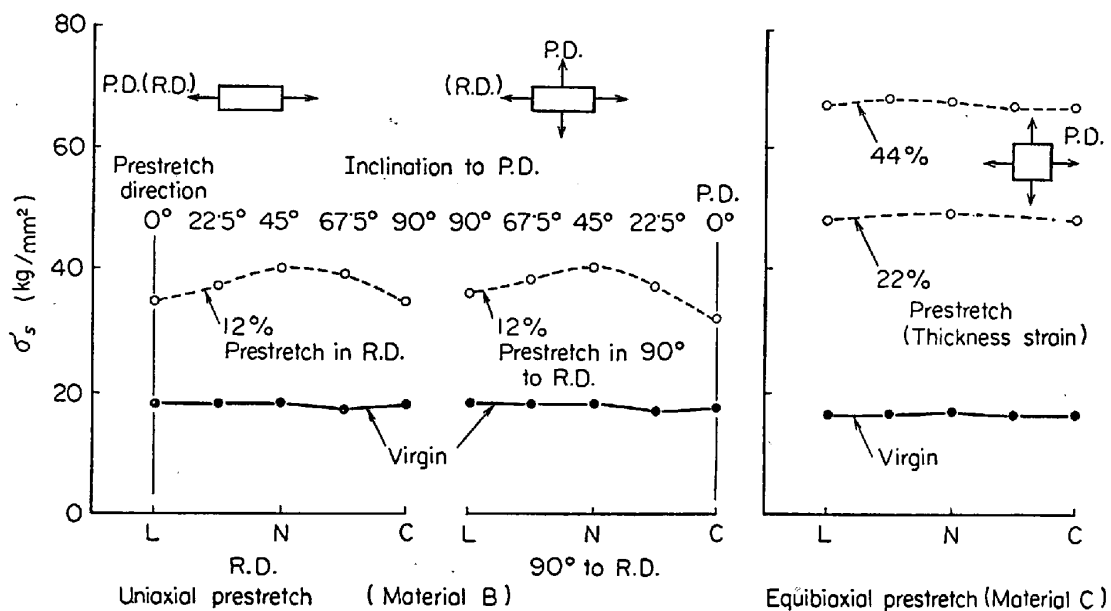


Fig. 3(a). Yield point of uniaxially and equibiaxially prestretched steel sheets.

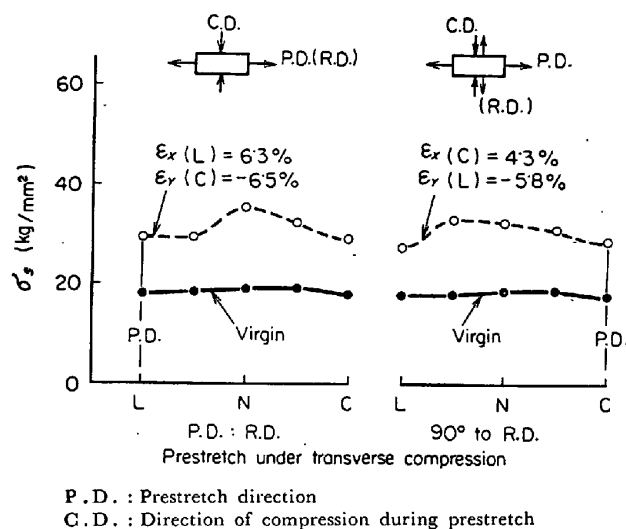


Fig. 3(b). Yield point of prestrained steel sheet due to prestretch under transverse compression (material D).

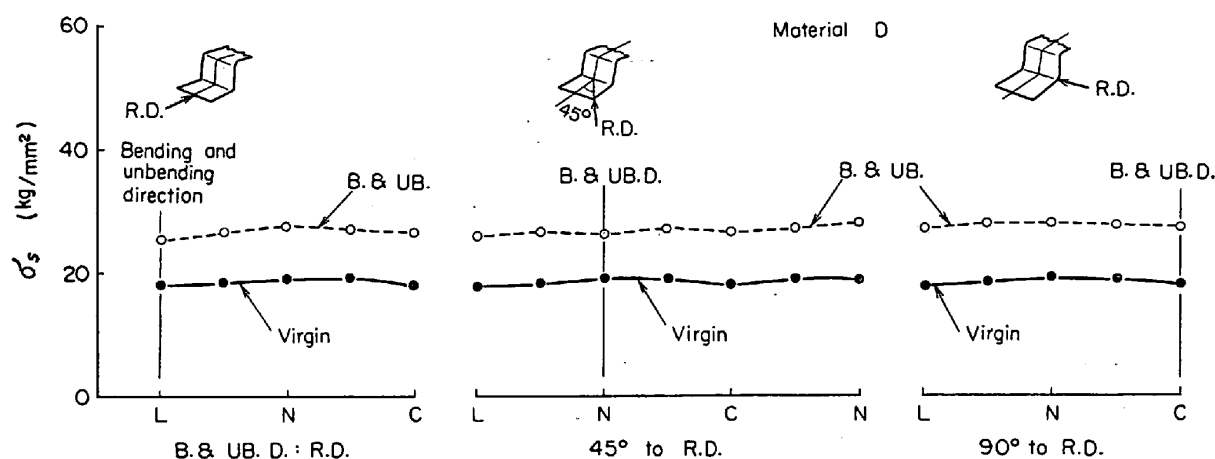


Fig. 3(c). Yield point of steel sheet after being bent and unbent.

をCとし、予変形に対しては、板面最大主ひずみ方向を0°とし、それに対する角度を45°、90°のごとくに数字で示すことにする。等二軸予引張材では、降伏点の板面異方性はほとんど変わらず、相対的にはむしろ弱まる傾向を示す。一軸予引張りおよび予引張圧縮材では、最大主ひずみ方向(予引張方向)に45°付近の方向で降伏点の著しい上昇が認められ、板面異方性が強くなる。90°方向では、0°方向と比較してあまりはつきりした傾向的变化が認められない。一軸予引張材は、Fig. 3では、方90°向の降伏点上昇が0°方向よりわずかに大きい、ほとんど無変化または逆の傾向を示す場合も経験している。予引張圧縮材では、0°方向より90°方向のほうが降伏点上昇が小さいようである。

ただし、降伏点の比較にあたっての最大の問題点は、予変形により鋭くはつきりした降伏点が消滅する方向ま

たは変形形式が存在することである。たとえば、一軸予引張方向と異なる方向、等二軸引張変形後の引張試験など、予変形形式とそれに続く引張試験での変形形式とが異なる場合に上記の現象が著しい。このため、降伏点決定に関して降伏付近における荷重・伸び曲線形状の判定に主観的要素はいりやすく、今後の検討を待たねばならない点である。ここでは、荷重・伸び曲線の立上りがはつきりと横に曲がる丸味部分の立上り側の点を降伏点とした。

曲げ・曲げもどし変形後の板は、約1/100 mm精度で標点距離100 mmの伸びがほとんど認められない状態であつたが、板面各方向の降伏点は virgin 材と比較しかなり上昇し、板面異方性に関しては、曲げ・曲げもどし(B & UB)方向に45°~90°方向で降伏点上昇がやや大きいようである。

Fig. 4は、予変形材の引張強さの実験例を示す。予変

形による降伏点の板面異方性は、たとえば、4%程度の一軸引張りひずみで新しい板面異方性が認められるのと比較して、引張強さの板面異方性の発達は、二次変形自身における加工硬化特性の影響を受けるためややおそいことはすでに報告したが¹⁰⁾、一軸引張りでは、引張方向に45°および90°方向で引張方向より引張強さの増加が大きく、等二軸引張りでは、新たな板面異方性の成長は認められていない。引張圧縮では、ここでは予ひずみ量が小さいため明確でないが、引張りひずみ方向およびそれに45°方向の引張強さは、90°方向より大きくなる傾向がある。

Fig. 5に降伏比の板面異方性を例示する。降伏点と引張強さの板面異方性に対する予変形の影響の違いのため、予ひずみ量により降伏比の板面異方性のあらわれかたが異なる。予ひずみ量が小さいときは、一軸引張り

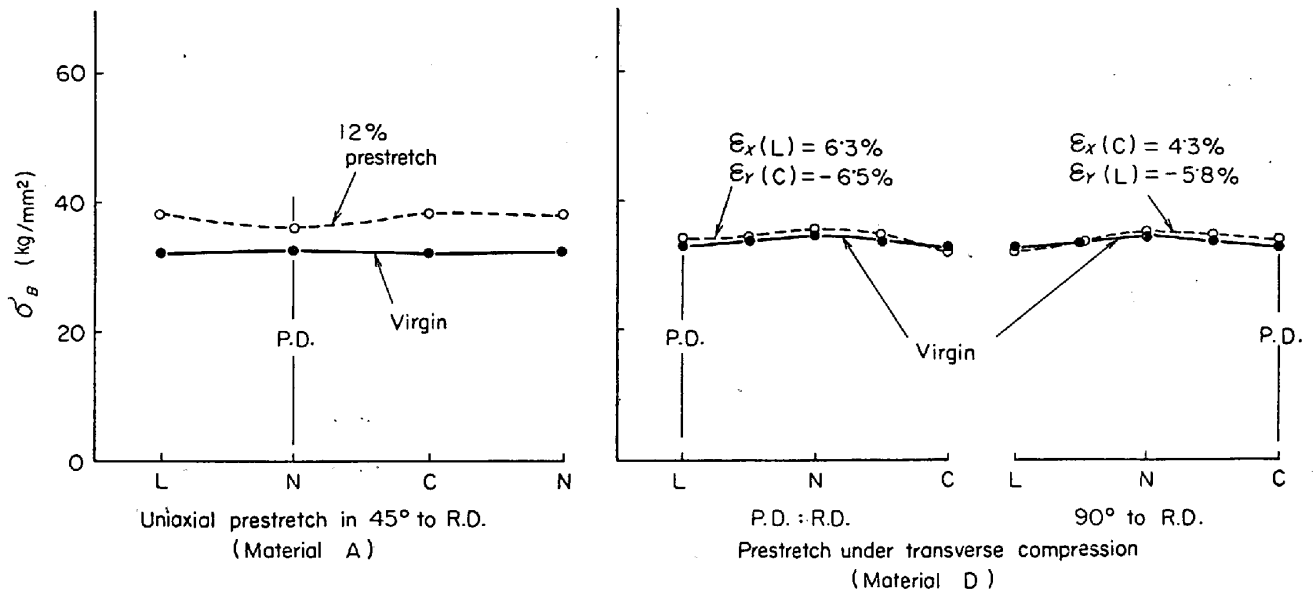


Fig. 4. Tensile strength of prestrained steel sheets due to uniaxial prestretch and prestretch under transverse compression.

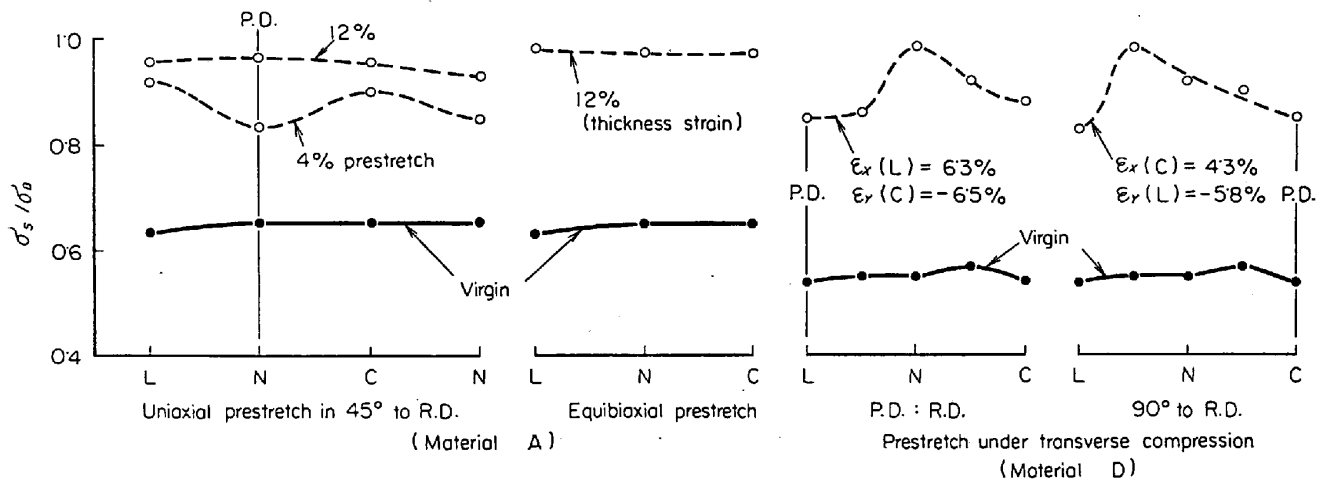


Fig. 5. Yield ratio of various prestrained steel sheets.

(4%) および引張圧縮に認められるごとく、予引張方向(P.D.)に45°方向での降伏比増加が著しい。予ひずみ量が大きくなると、降伏点と引張強さが接近し、降伏比の板面異方性は低下する。等二軸予引張りでは、予ひずみ量が小さくても、一軸引張りの場合と異なり、板面異方性の成長は認められず、むしろ板面等方化の傾向が認められる。

2.3 変形特性

予変形後の引張試験における変形挙動を示すもののひとつとして、 r 値がある。従来、 r 値測定の標準にあたって、引張試験中の r 値の不変性が検討され、一般のプレス成形用軟鋼板ではほとんど問題のないことを明らかにしたが¹¹⁾、二次変形における r 値の不変性に関する問題も重要である。この問題はなお検討中であるので、その検討は別の機会にゆずり、ここでは、二次変形での r

値は原則として約 10% 伸びで抽出し、予変形量が大きく、10% 伸び以前にくびれが開始するものについては、くびれ形状が r 値測定に支障ないかぎり、できるだけ 10% に近い伸びのところで、標点距離内の 3~5 点の幅測定から、平均幅ひずみを求めて、 r 値を決定した。このようにして求めた予変形材の r 値を Fig. 6 に示す。

一軸予引張りでは、引張方向に 90° 方向で r 値が著しく増大する。45° 方向では変化しないか、または、先に報告したように低下の傾向が認められる。これに関しては、引張方向以外の方向で r 値が増加するとの報告もあるため¹²⁾、なお検討が必要と思われる。

等二軸予引張りでは、すべての方向において r 値の低下が認められ、特に r 値の大きい方向でその低下が著しい。その結果、 r 値の板面等方化が生じ、 r 値の大きな軟鋼板では、垂直異方性も弱まる。

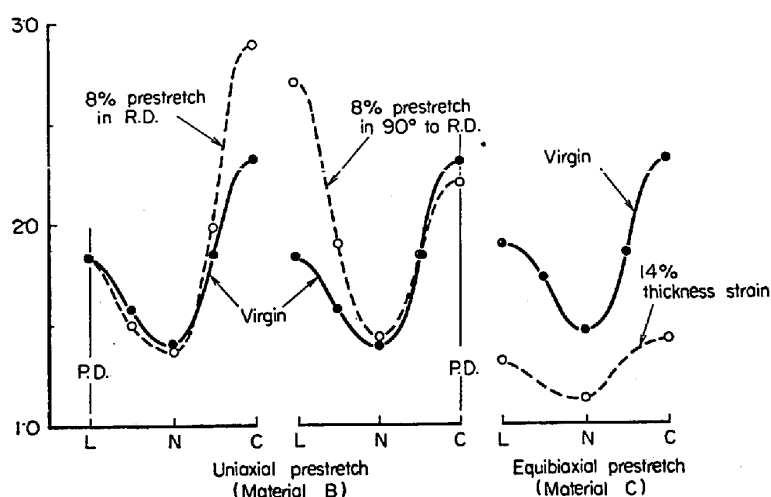


Fig. 6(a). The r value of uniaxially and equibiaxially prestretched steel sheets.

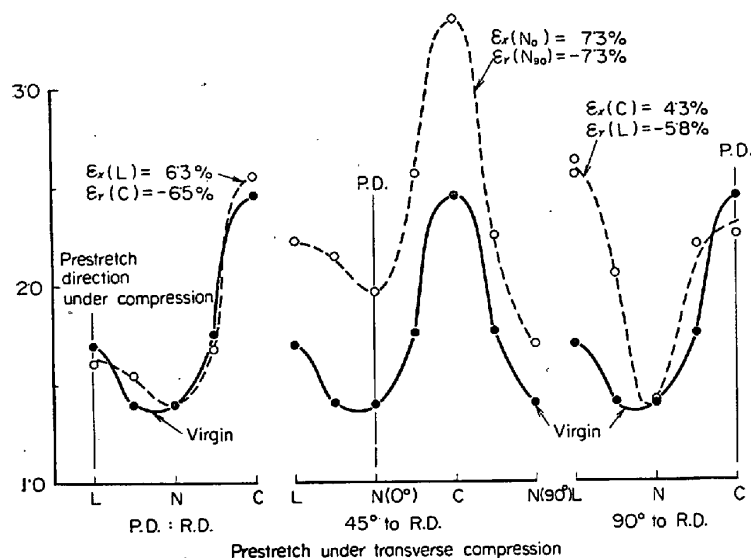


Fig. 6(b). The r value of prestrained steel sheet due to prestretch under compression (material D).

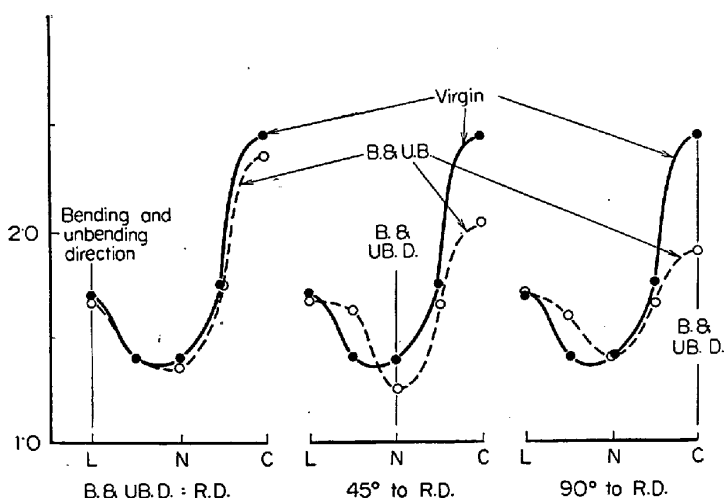


Fig. 6(c). The r value of steel sheet after being bent and unbent (material D).

引張圧縮では、予ひずみ量が小さく、圧延材としての履歴の影響が強く残存しているためかどうか明らかでないが、板面上の変形方向の違いにより r 値に対する影響が異なる。予引張方向が N 方向では、すべての方向で r 値が増大し、C 方向では、予引張方向に 90° 方向付近での r 値が著しく増大するのに対して、予引張方向が圧延方向では r 値の変化がほとんど認められない。引張圧縮では、 r 値低下の方向がないようである。これは、薄鋼板の深絞りにおいて、縮みフランジ部における変形の進行にともなう r 値変化に近い傾向を示していると思われる。縮みフランジ変形の進行にともない r 値の変化する方向ならびに材料があることは十分に予想され r 値による深絞り性評価能力を低下せしめる原因のひとつになると考えられる。

曲げ・曲げもどしでは、曲げ・曲げもどし方向 (B & U B, D) が N および C 方向の場合に、C 方向での r 値低下が著しく、B & U B D が圧延方向の場合 r 値はほとんど変化しない。先に報告した軽度の曲げ・曲げもどし変形を繰返してあたえるローラー・レベリングの r 値に対する影響で、微調質リムド鋼板で C 方向のみいくらか r 値の低下が見られたのと類似している¹³⁾。

Fig. 7 は、一軸ならびに等二軸予引張材および予引張圧縮材の全伸びの板面異方性を例示する。等二軸の場合、virgin 材の板面異方性をあまり助長することなく、各方向同程度に全伸びが低下し、その低下量は、等二軸予引張りの板厚ひずみと一軸予引張の伸びが等しい点で、一軸の場合と比較してかなり大きい。一軸予引張材では、予引張方向に 45°、次いで 90° 方向の全伸び低下が引張方向より著しく大きく、このため、全伸びの板面異方性は非常に強くなる。

これに対して、引張圧縮後の全伸び変化は引張方向に 45° 付近の方向でその低下がもつとも著しい点は一軸引張りの場合と似ているが、引張方向の全伸びがかなり低下するのに圧縮方向はあまり低下せず、その結果全伸びの板面異方性は引張りおよびそれに直角 (圧縮) 方向に関して一軸予引張材とは逆の傾向が認められた。

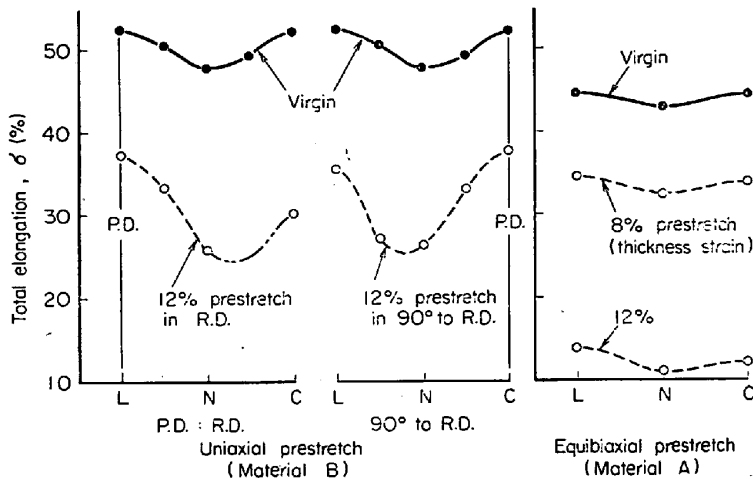


Fig. 7(a). Total elongation in 50 mm gage length of uniaxially and equibiaxially prestretched steel sheets.

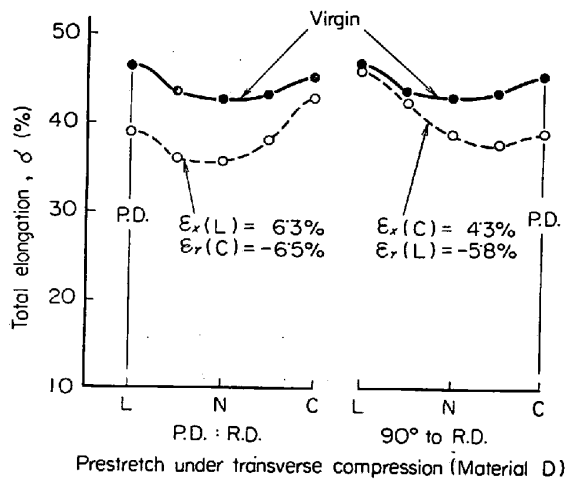


Fig. 7(b). Total elongation in 20 mm gage length of prestrained steel sheet due to prestretch under transverse compression.

2.4 強度・変形組み合わせ特性

通常の軟質鋼板とそれの予変形材の強度ならびに変形特性の違いを予変形様式と板面異方性の関係を中心に前節で検討したが、プレス成形性を支配する因子のひとつとして、成形品中のひずみ分布勾配を決定する強度と変形の組み合わせ特性（どれだけの応力にどれだけの変形を生じるか、またはその逆の関係として認識される。）を一軸引張試験で見れば、荷重・伸び曲線がそれに相当する。

Fig. 8は、一軸および等二軸引張材ならびに引張圧縮材の荷重・伸び曲線例である。

一軸予引張材では、予引張方向と同方向の引張試験における荷重・伸び曲線がその形状にあまり変化もなく、予ひずみ量だけ原点を移動させた virgin 材の曲線とほぼ一致するのに対して、すでに降伏点、全伸びなどにつ

いて述べたとき、各特性の板面異方性発達の様子は、荷重・伸び曲線形状の変化を媒体としてより特徴的に理解され、たとえば、降伏点および引張強さの上昇、最高荷重点までの伸びの減少などの傾向は、90°、さらに 45° 方向の順に強くなる。特に最高荷重点以後 virgin 材で伸びとともに荷重が滑らかに減少するのに対して、予変形後 45° および 90° 方向では、荷重がいつたん減少した後、荷重がほとんど無変化 ($dp=0$) またはわずかに増加する変形領域を存在せしめるようなある範囲の予ひずみ条件が認められる。

等二軸予引張材では、新たに板面異方性が発達したり、存在していた板面異方性が助長されはしないようである。最大荷重点伸びの減少、最大荷重点以後を中心とした荷重・伸び曲線形状変化は、同程度予ひずみの一軸予引張材と比較するとき、予引張方向に 45° 方向に非常に似ており、平均的には一軸予引張材より著しい。

予引張圧縮材では、予引張方向に 45° 方向ではほぼ全ひずみ領域にわたって変形抵抗が他方向より上昇するのに対して、90° 方向では予引張方向より低くなることは一軸予引張りの場合と比較して注目すべきことである。0°

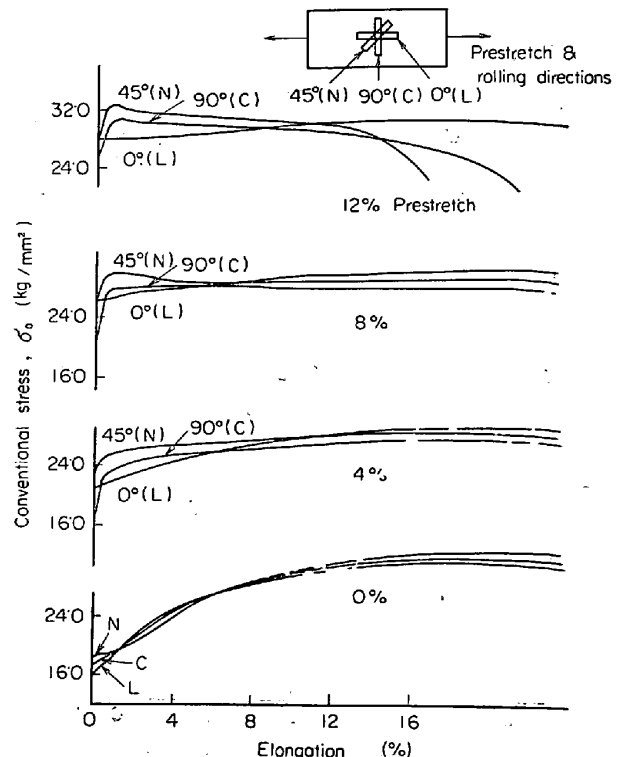


Fig. 8(a). Load-elongation curve of uniaxially prestretched steel sheet.

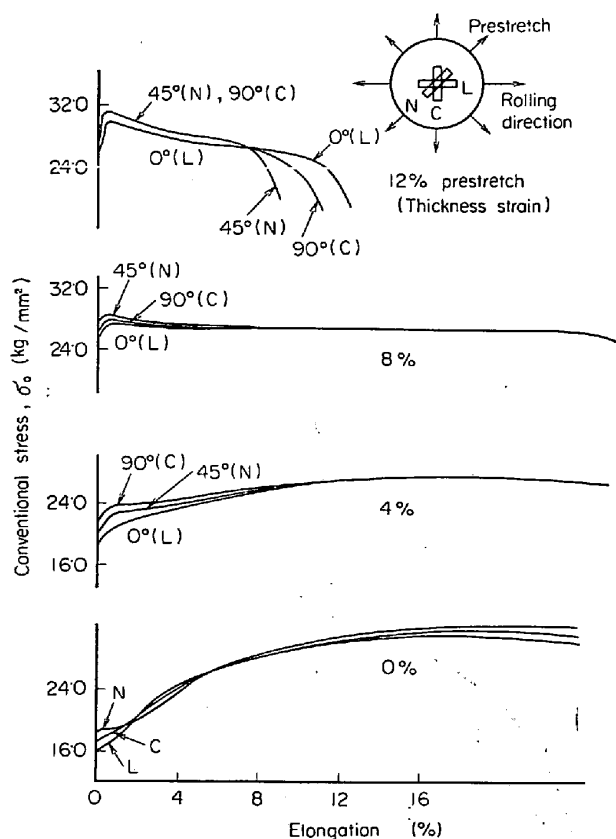


Fig. 8(b). Load-elongation curve of equibiaxially prestretched steel sheet.

方向より 90° 方向の降伏点が低くなる現象は、Bauschinger 効果で説明されるが、一軸予引張り後予引張方向に 90° 方向に引張る場合の降伏点については、Bauschinger 効果を消すような現象の仮定が説明のために必要であろう。予引張圧縮材の 90° 方向引張りの荷重・伸び曲線全体が 0° 方向より低いことについては、Bauschinger 効果から説明できない。

以上述べたごとく、塑性変形の進行にともなつて、各変形様式に応じた板面異方性の成長が巨視的な塑性変形挙動について認められたが、これらの結果、プレス成形における薄鋼板の成形性の評価にあつて以下のような点についての注意が必要であることがわかる。

(1) 単純な変形様式で、ひずみ比がほとんど変わらない変形経路の場合でも、変形中の r 値が必ずしも一定と考えることはできない。このため、変形前の材料の r 値をそのまま成形性の判定に用いることが好ましくない場合も生じうる。

(2) 従来、プレス成形用の薄板の板面異方性は、深絞りにおける耳の発生に対応して r 値の板面異方性が問題になるぐらいであつたが、予変形材のプレス成形においては、 r 値ばかりでなく、ほとんどの力学的特性に板面異方性が生じるため、それらの成形性への重畳的効果

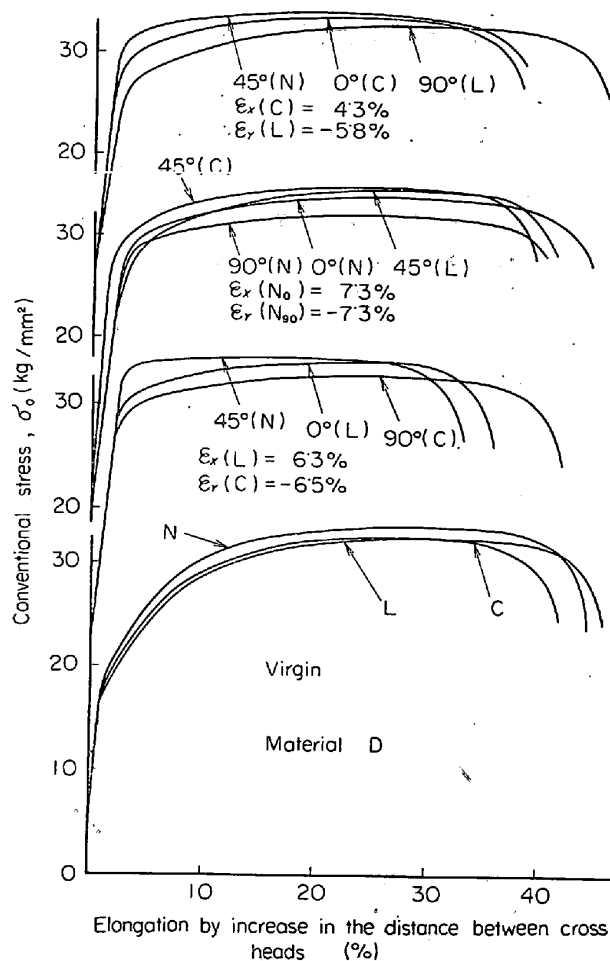


Fig. 8(c) Load-elongation curve of prestrained steel sheet due to prestretch under compression.

を考えねばならなくなる。

(3) 一軸予引張方向に対して 45° ならびに 90° 方向または、等二軸予引張り後、引張試験を行なうと最大荷重点までの伸びが予引張方向（または、予ひずみ量）と比較して急激に低下する。さらに、最大荷重点以後の変形挙動がすでに述べたごとく、通常材料と比較して異常であり、かつ、破断までの伸びも著しく大きい点から考えて、予変形材（加工硬化しているという意味で、市販の硬質材も含めて）は焼鈍後軽度の調質圧延をされただけの通常の軟鋼板とは本質的に性質が異なる材料と考えるほうが現在のところ成形性の体系化のためにより有効であろう。

上記の理由により、予変形材の成形性を、単純変形経路を主体としたこれまでの成形性と区別して、二次成形性という新しい分野を設けることが最終的には総合されるものであつても、成形性の理解への道として必要と考える。

3. 変形様式と変形集合組織

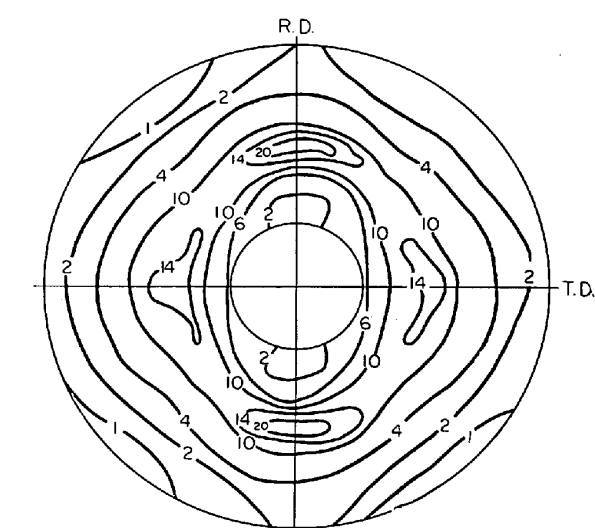
塑性変形の進行により、圧延を中心にして、引張り、圧縮などの変形様式に応じた変形集合組織の発達が認められることは古くからよく知られており、実験的ならびに理論的に多くの研究がなされている¹⁴⁾。しかし、塑性変形の結果である変形集合組織の力学的特性に結びつくような観点からの結晶塑性的研究はほとんどないようである。

最近、中岡らにより塑性変形における集合組織の挙動が最小仕事の原理を基にして数値解析された結果¹⁵⁾、「あたえられる塑性変形における最終安定方位に一致する初期方位を有する結晶は、他の方位の結晶と比較して加工硬化が少ない。」

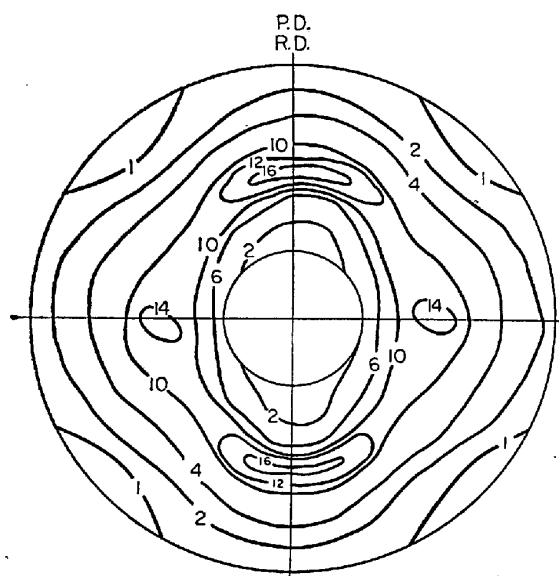
という仮説が実験的裏づけとともに証明され、さらに、新しい相当ひずみの定義ならびに直交異方性材料の塑性変形における r 値の変化挙動についてかなり満足すべき説明があたえられたことを、二次成形性への研究の有力な足がかりのひとつとして期待したい。

3.1 Pole figure の作製

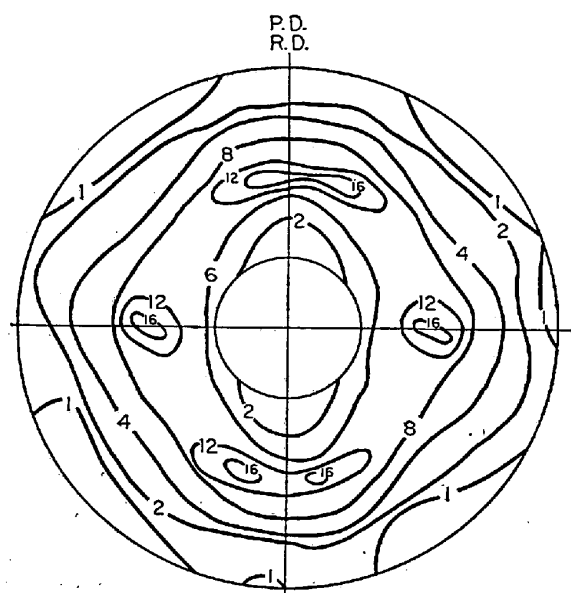
試験片の板面の両面から、chemical etching を行ない原板厚中央部から約 0.1 mm 以下の pole figure 作製の試験片をとり出した。pole figure から、各方位の挙動を定性的に知ることを、本実験では、とりあえず目的としたので、各材料ごとにランダム強度を抽出する手間を省いた。このため、pole figure はすべて任意強度で示した。



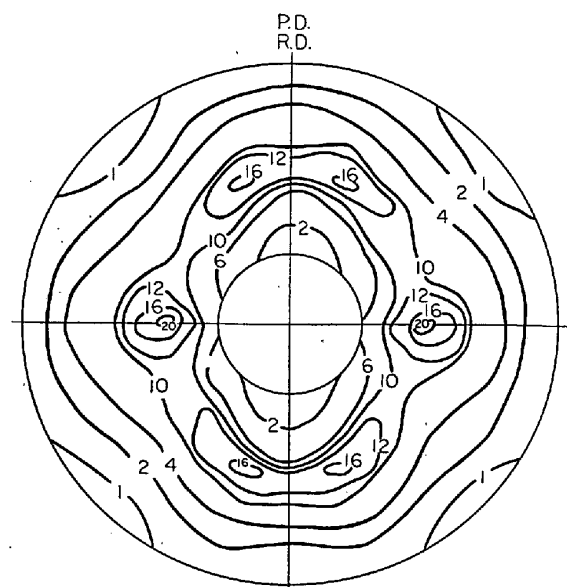
(a) Virgin



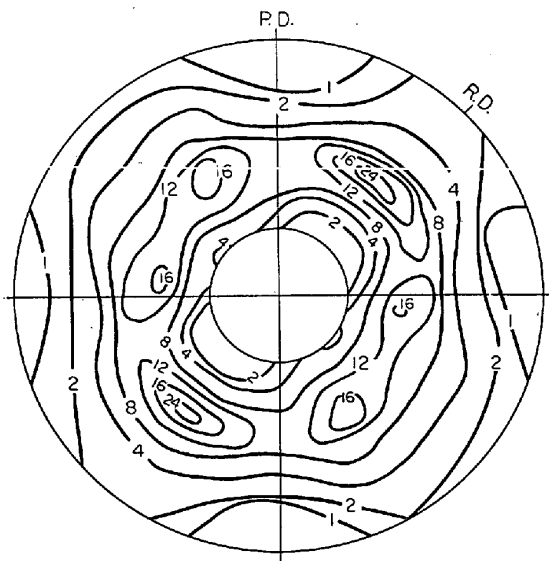
(b) 4% uniaxially prestretched in R.D.



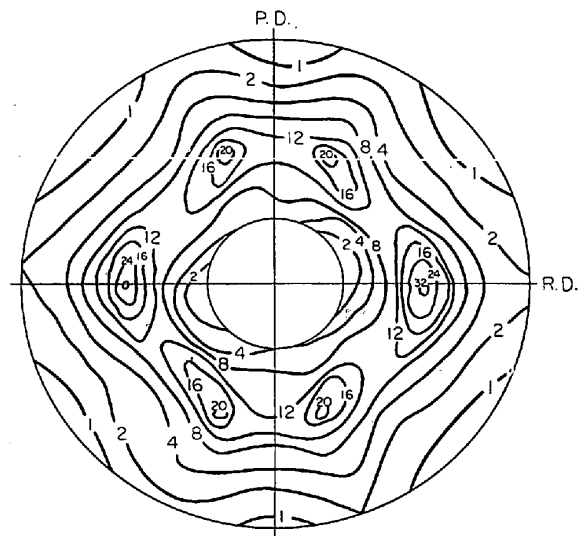
(c) 8% uniaxially prestretched in R.D.



(d) 12% uniaxially prestretched in R.D.



(e) 8% uniaxially prestretched in 45° direction to R.D.



(f) 8% uniaxially prestretched in 90° direction to R.D.

Fig. 9. (200) pole figures of uniaxially prestretched steel sheet (material A).
 R.D. : Rolling direction, T.D. : Transverse direction,
 P.D. : Prestretched direction.

3.2 一軸引張変形

Fig. 1 に示した方法で一軸引張変形を圧延方向、それに 45° および 90° 方向にあたえられたアルミニウムキルド軟鋼板の pole figure と virgin 材との比較を Fig. 9 に示す. virgin 材 (A 材) における優先方位は (111) [112] および (111) [110] であるが, (111) [112] がいくらか強いようである. (111) 面密度がかなり高い材料であることは, Fig. 10 から明らかである. Fig. 10 は同材の板面に平行な各結晶面の X 線反射強度比を示したものである.

Fig. 9(a)-(d) は, 圧延方向の一軸引張変形の進行にともなう pole figure の変化を示す. Fig. 10 から考えて, 主要な結晶面の板面内密度に著しい増減がないようであるが, (111) 面に関しては, 4% 程度の小さなひ

ずみで明らかに $[11\bar{2}]/R.D. (=P.D.)$ が減少し $[01\bar{1}]/P.D.$ に増加し始めるのが認められ, 8% 程度ではほぼ (111) $[110]/P.D.$ が主体の変形集合組織が形成される. 約 12% まで伸びると, (111) $[1\bar{1}0]/P.D.$ の発達はさらに著しくなるが, (112) $[1\bar{1}0]/P.D.$ の成長がわずかに認められる.

Fig. 9(e) and (f) は, 圧延方向に 45° および 90° 方向に約 8% の一軸引張りを行なった場合の pole figure であるが, virgin 材および約 8% 圧延方向一軸引張材と比較すると, すべて予引張方向 (P.D.) に $[1\bar{1}0]$ が一致するような (111) 面の成長が認められる. 一軸引張変形におけるこれら集合組織の変化は, これまでに知られているものと傾向的に一致している. 予引張方向 (P.D.)

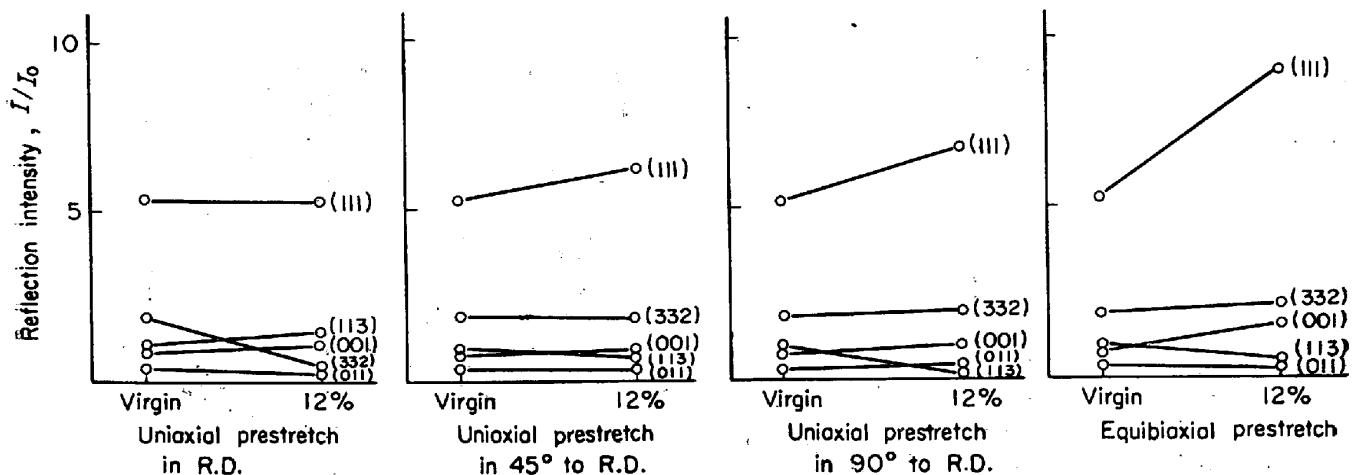


Fig. 10. X-ray reflection intensity of crystallographic planes in prestrained steel sheet (material A).

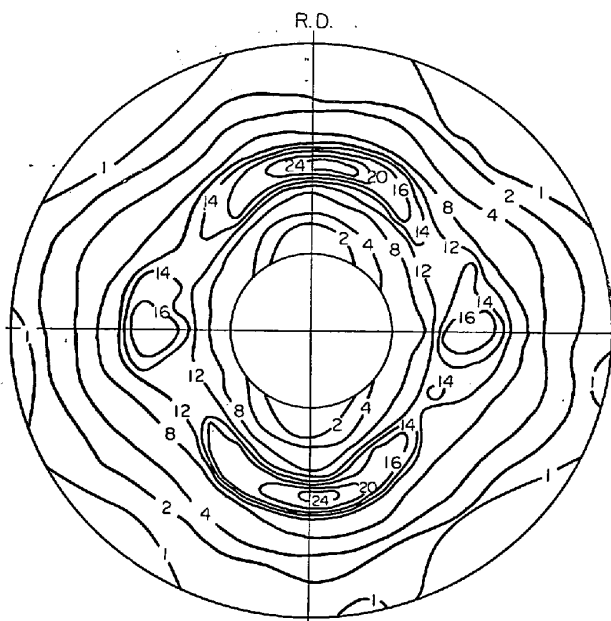
と圧延方向(R.D.)が同一方向では、 $(111)[\bar{1}\bar{1}0]//R.D.$ が安定で、それより高密度で存在すると思われる $(111)[11\bar{2}]//R.D.$ が不安定で減少の傾向を示し、それと 30° 異なる $(111)[\bar{1}\bar{1}0]//P.D.$ に $(111)[11\bar{2}]//D.R.$ を含む他方位から収束すると推測されるのに対して、P.D. が C 方向 (90°) では、*virgin* 材の最優先方位と思われる $(111)[11\bar{2}]//R.D.$ が引張変形における安定方位 $(111)[\bar{1}\bar{1}0]//P.D.$ と一致し、 $(111)[\bar{1}\bar{1}0]//R.D.$ が $(111)[11\bar{2}]//P.D.$ で $(111)[\bar{1}\bar{1}0]//P.D.$ へと変化する。また N 方向 (45°) 引張りでは、 $(111)[\bar{1}\bar{1}0]$ および $[11\bar{2}]//R.D.$ とともに

$(111)[\bar{1}\bar{1}0]//P.D.$ との間の角度は 15° で比較的小さい。このため、 $(111)[\bar{1}\bar{1}0]//P.D.$ の発達 は C 方向でも つとも容易であり、N 方向がそれに次ぎ、圧延方向がも つともおそいように思われる。各方向 8% 伸び材の比較では、 $(111)[\bar{1}\bar{1}0]//P.D.$ の *ideal point* への *peak* の移動、分離、成長が C 方向がも つとも早く、圧延方向がも つともおそい。すでに述べたごとく、変形集合組織の発達が変形における最終安定方位と *virgin* 材の優先方位との一致度に支配されることが、これらの比較からも示される。

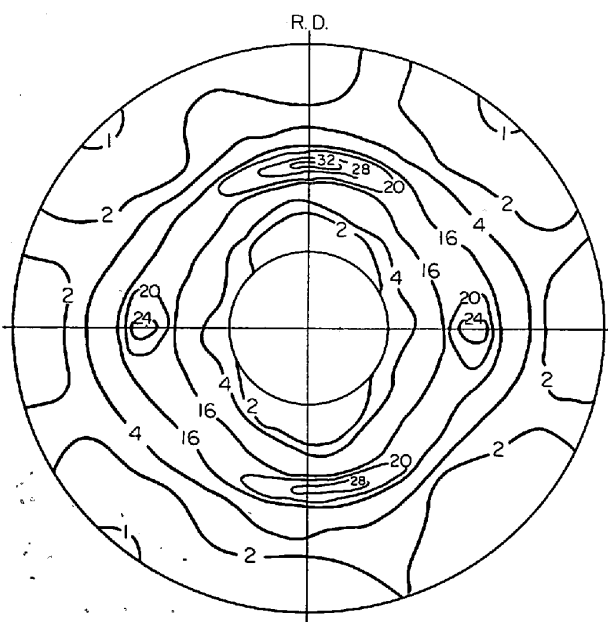
これらの変形における X 線反射強度の変化を Fig. 10 に示したが、約 12% 伸びひずみで、P.D. が N および C 方向で (111) 面反射強度が増加し、圧延方向ではほぼ変化しない。このことは、 $(111)[\bar{1}\bar{1}0]//P.D.$ に近い結晶方位をもつ集合組織の種類または変形における挙動を示すものとして興味深い、*pole figure* で $(111)[\bar{1}\bar{1}0]//P.D.$ の *ideal point* への集積の速度と対応している。

3.3. 等二軸引張変形

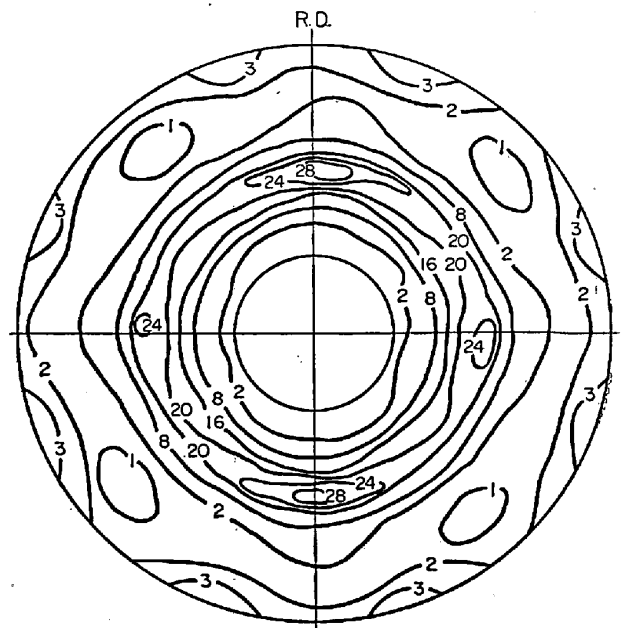
Fig. 11 は等二軸引張変形による *pole figure* の変化を示す。Fig. 9 の A 材と比較して、C 材は $(111)[\bar{1}\bar{1}0]//R.D.$ の密度が $(111)[11\bar{2}]$ より大きい材料と思われる。Fig. 10 における等二軸引張変形による X 線反射強度の変化が (111) についても つとも著しい。*pole figure* からは、22% 板厚ひずみで (111) 組織がさらに強調されるが、板面方向性に関しては顕著な等方化の傾向が認められるにもかかわらず、*virgin* 材の特徴は 48% 板厚ひずみでも消えてはいない。板厚ひずみ 22% から 48% への間に (111) 組織はさらに板面等方化され、かつ、成長するが、それ



(a) *virgin*



(b) 22% (thickness strain) equibiaxially prestretched



(c) 48% (thickness strain) equibiaxially prestretched

Fig. 11. (200) pole figures of equibiaxially prestretched steel sheet (material C).

と同時に (001) 組織の成長が認められるようになる。これは Fig. 10 に示した板厚ひずみ約 12% の等二軸引張りにより (001) 面反射強度が増加する傾向を示すことと一致し、pole figure 上では鈍感でも、等二軸引張り変形により (111) と (001) のふたつの方位が発達する。この集合組織の変化は、SACHS らが指摘したように¹⁶⁾、圧縮における集合組織の挙動によく似ており、応力とは関係なく、virgin 材の集合組織と塑性変形状態によりほぼ一義的に変形集合組織が決まると考えられる。

3.4 幅収縮をともなわない引張り変形

一般には、不等二軸引張り応力下で生じる変形の一つで

ある幅収縮をともなわない平面ひずみ条件下の引張り変形における pole figure の変化を Fig. 12 に示す。ここで用いた D 材は、A 材の集合組織に近く、わずかに (112) $[1\bar{1}0]$ //R.D. が A 材より多いようである。引張方向がどの方向でも、(111) $[1\bar{1}0]$ および $[11\bar{2}]$ //R.D. は板面等方化の傾向を示す。圧延において一般に言われている安定方位 $[11\bar{2}]$ //R.D. が $[1\bar{1}0]$ より安定かどうか、すなわち、ここでの板厚減少のみによる引張り変形と圧延による変形が変形機構が異なるにもかかわらず集合組織的に同一かということはここではあまりはつきりしない。引張りひずみ ϵ_x の方向が L 方向と C 方向の場合を比較すれ

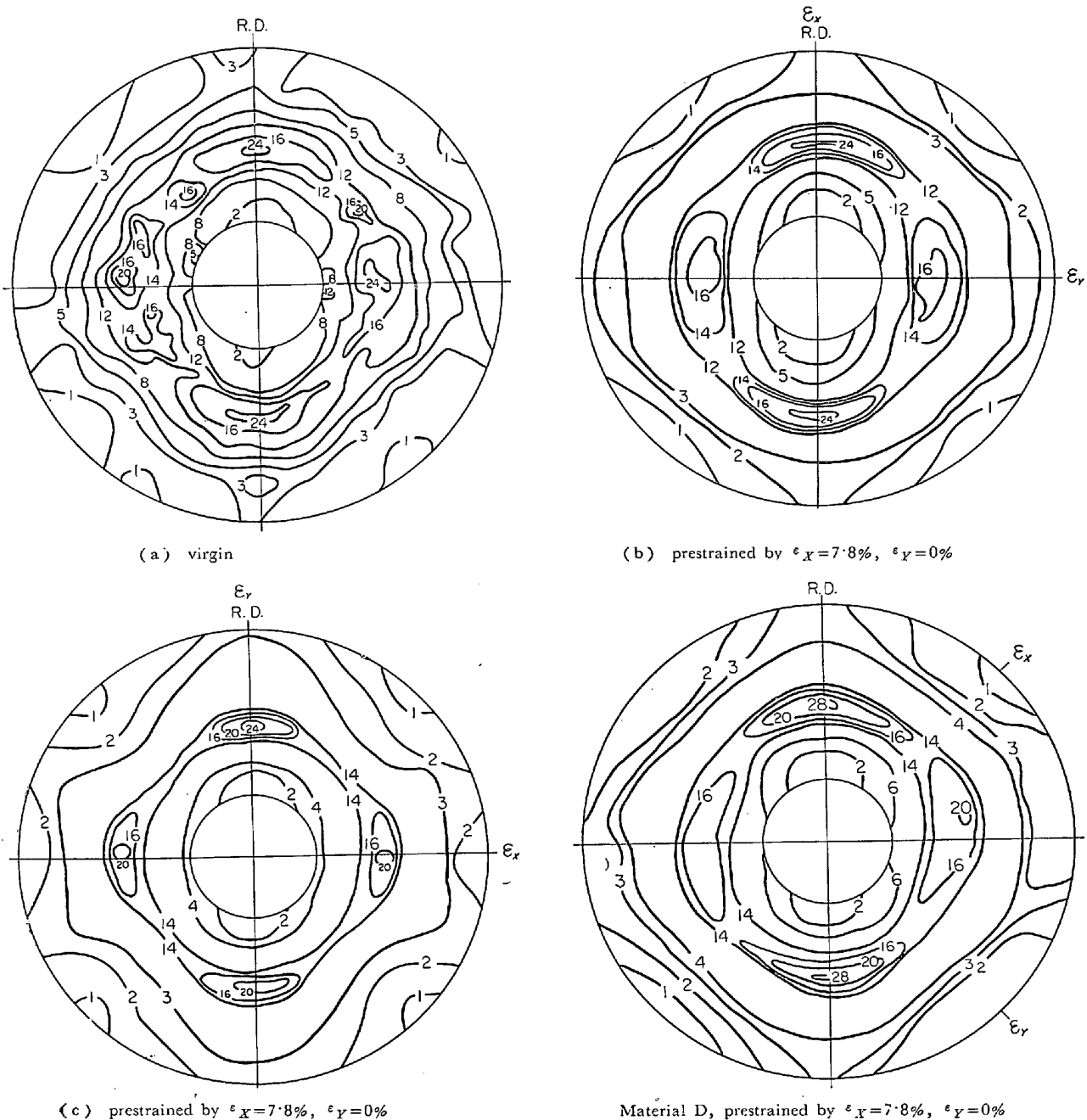


Fig. 12. (200) pole figures of steel sheet prestretched without width change (material D).

ば, わずかに ϵ_x 方向 (X.D.=P.D.) に $[1\bar{1}0]$ より $[11\bar{2}]$ が増加する傾向が認められる. $(100)[011]$ については, 他の軟鋼板の反射による pole figure の変化からその増加が認められた. ここにおける条件でもつと大きなひずみをあたえることができれば, 圧延による変形特性との比較がより明確に行なえるようになるであろうが, 現在のところ圧延の場合と著しく異なつた点は認められない.

N 方向が引張ひずみ方向の場合, 8% 程度のひずみでは変形の影響が小さいためか, ϵ_x が他の方向の場合と圧延方向に対して類似のパターンを示している. 変形の

進行とともにどのような変化経路をたどるかを調べることににより, 圧延との比較ならびにその特徴の浮きぼりがさらに容易になるであろう.

3.5 引張圧縮変形

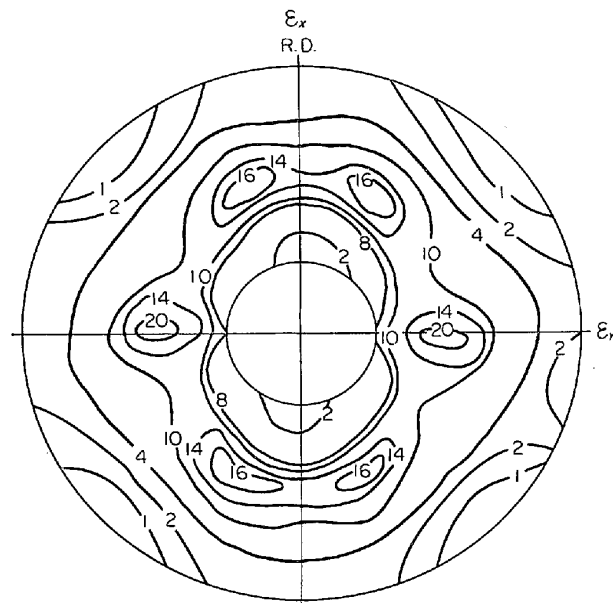
引張圧縮変形の一例として, 幅収縮で伸びを生じ, ほとんど板厚が変化しない場合の pole figure の変化を Fig. 13 に示す.

このような条件の変形における最終安定方位が, まず $(111)[1\bar{1}0]//X.D.(=P.D.)$ であることが明らかであり, 変形の進行にともなつてのその成長速度は同程度の伸びひずみで比較して一軸引張りの場合よりかなり大きい. 次には, $(112)[1\bar{1}0]//X.D.$ の成長が認められる. virgin 材で, (112) は $(112)[1\bar{1}0]//R.D.$ の状態が優先的であつたため, 引張方向と圧延方向が一致したときに, $(112)[1\bar{1}0]//X.D.$ の発達をもつとも早いようである. (112) は一軸引張りの場合よりも active に変形と結びついて変化する.

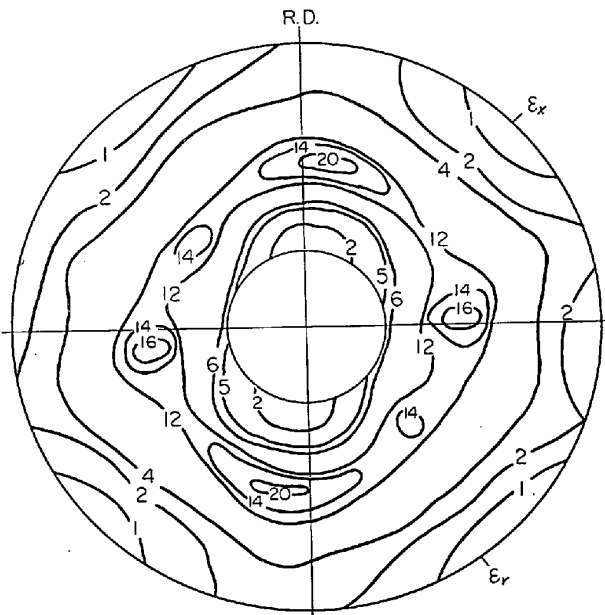
X.D. が L 方向と C 方向の比較からは, virgin 材において, $(111)[1\bar{1}0]//R.D.$ より $(111)[11\bar{2}]//R.D.$ のほうが優先的に存在していたことがうかがわれる.

3.6 変形状態図における変形集合組織

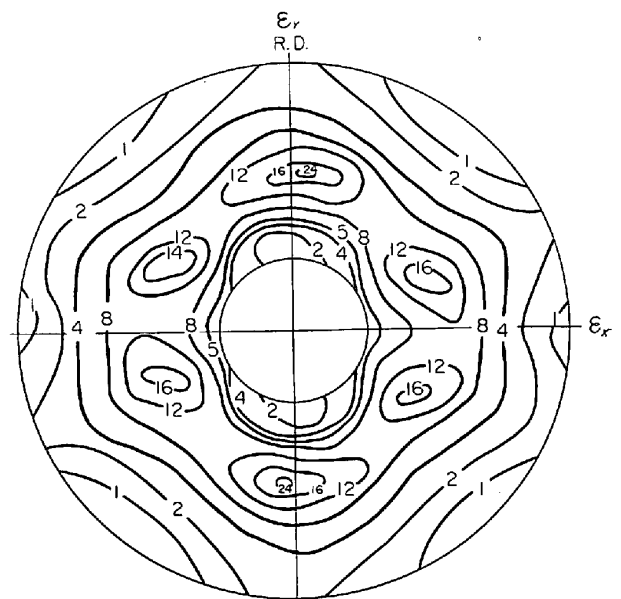
薄板の塑性変形において, その特徴を板面内のふたつの主ひずみの組み合わせにより示そうと試みるのが変形状態図で, ふたつの主ひずみを座標軸にとり, 極限ならびに平均変形能, プレス部品の変形の特徴などの表現に用いる. この変形状態図上に, 変形様式と変形集合組織の結びつきの一例を示したのが Fig. 14 である.



(a) prestrained by $\epsilon_x=6.3\%$, $\epsilon_y=-6.5\%$



(b) Prestrained by $\epsilon_x=-7.3\%$, $\epsilon_y=7.3\%$



(c) prestrained by $\epsilon_x=4.3\%$, $\epsilon_y=-5.8\%$

Fig. 13. (200) pole figures of steel sheet prestretched under transverse compression (material D).

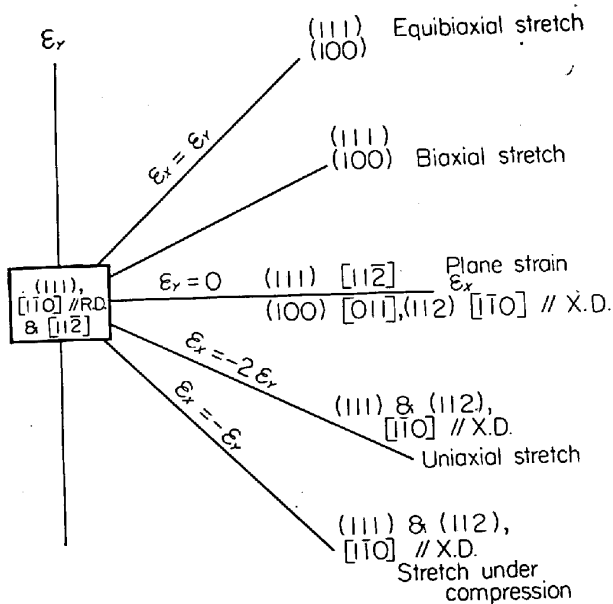


Fig. 14. Deformation textures in various deformation modes for mild steel sheet of (111), [112] and [110]//R.D.

本実験に用いたのが、(111)[110] および [112]//R.D. が優先方位である軟鋼板であるため、(111) 面密度が増加するような変形様式でのその増加が鈍感であると思われるほか、各段階のひずみが得られなかつたので、たとえば、大きなひずみで始めて pole figure 上に出現してくるような方位を検出できない可能性もある。しかし、軟鋼板において、ここに示したごとき方位が各変形様式の最終安定方位と考えてほぼ十分であろう。

$\epsilon_y = 0$ の条件で、圧延では (111)[112]//X.D. は優先方位のひとつと考えられているが、本実験では確かめなかつた。引張圧縮から等二軸引張りまでの変形様式の違いに応じた優先方位の変化が連続的であると考えれば [110]//X.D. が優先的である引張圧縮および一軸引張りとは板面異方性の低下する二軸引張変形の中間の変形様式である、 $\epsilon_y = 0$ の場合に [110]//X.D. に代わって [112]//X.D. が強くなるのではなく、[110]//X.D. が弱まり等方化の過程にあるにすぎないと思われる。

面に関しては、 $\epsilon_y = 0$ を境界として、 $\epsilon_y > 0$ で (100)、 $\epsilon_y < 0$ で (112) が (111) に次ぐ最終安定方位ということができよう。このため virgin 材における (100) ならびに (112) の存在状態に変形集合組織が強く左右されるほどにそれらの密度が大きくなった場合の pole figure の変化は、Fig. 9 から Fig. 13 にかけてのものとは著しく異なることが期待される。

3.7 変形集合組織と r 値および降伏点

一軸引張変形の進行による (111)[110]//P.D. の発達には、 r 値が P.D. に 45° で低下し、 90° で増加する傾向と対応するが、これは経験的にはともかく、理論的には不明な点が多い。また、等二軸引張変形においても、(100) も増加するが、(111) 面密度が著しく増加するにもかかわらず、 r 値減少の傾向が認められたことは集合組織から説明しにくい現象のひとつである。また、引張圧縮での r 値またはその板面異方性の変化も pole figure との対応が付きにくい例であろう。

さらに、曲げ・曲げもどし材の pole figure は virgin 材とほとんど変わらないため省略したが、 r 値に認められる曲げ・曲げもどしの影響は pole figure からは説明できない。

降伏点についても、(311)[112] と (110)[112] の組み合わせが主方位である冷延アルミニウム板 (圧下率 79.6%) に TAYLOR の仮想仕事の原理を基礎とした最小すべりの理論を適用し、SVENSSON が実験結果とかなりよく一致する計算結果を降伏応力の板面異方性について求めているが¹⁷⁾、b.c.c. に TAYLOR の方法を適用して、CHIN が計算した各結晶方位の方位因子 $M^{18)}$ を一軸引張りまたは引張圧縮において減少する (111)[112]//P.D.、増加する (111)[110] および (112)[110]//P.D. に用いて降伏点の板面異方性を推定しても実験結果とのよい一致は得られない。すなわち、これらの方位に対する M の角度変化を Fig. 15 に示すが、上記三成分量をどう組み合わせても 45° 方向付近で降伏応力が最大にはならないようである。また、引張方向に対して各断面を切り出し、方位成分の量を X 線反射強度比から推定し¹⁹⁾、上記 M を適用するとほとんど降伏点の板面異方性は生じないで実験結果とよい対応を示さない。

4. 一次変形での潜在加工硬化の二次変形における挙動

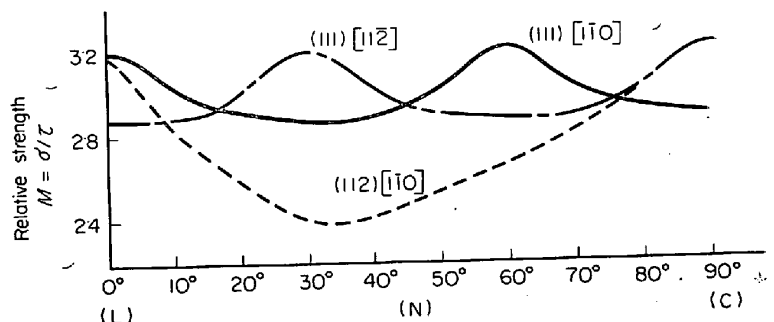


Fig. 15. Distribution of M for various directions of tensile test in steel sheets of ideal (111)[112], (111)[110] and (112)[110] textures, respectively.

集合組織からの降伏点ならびに r 値の推定法に関しては現在もお改良が試みられつつあり、完全に満足できる方法が確立されていない状態で、簡単な計算結果と実験結果の対比から、変形集合組織の力学的特性に集合組織がもたらしている情報の不十分性が本質的な問題であるとするのは非常に危険なことであろう。しかし、塑性変形により生ずる加工硬化の現象が、集合組織の変化が著しい場合ほど加工硬化しやすいなどの推測がなされている場を除き、集合組織とは独立して考えねばならない性格のものであることは古くから注目されてきた事実である。

金属単結晶または多結晶について、BISHOP²⁰⁾, GAROFALO および LOW²¹⁾, KOCKS および BROWN²²⁾, NAKADA および KEH²³⁾, 福田¹²⁾などにより加工硬化の挙動がいろいろな観点から研究されてきたが、それらの集約のひとつとして、潜在加工硬化の現象が一次変形と二次変形の接点における重要な問題として考えられねばなら

ない。

潜在加工硬化の概念は、最初は塑性変形を生ぜしめている active なすべり系以外のすべり系においては塑性変形による加工硬化が生じないという考えを否定するという目的で用いられたようであり、active なすべり系と同程度の加工硬化を生じるとする仮定が塑性理論への適用のしやすさからももつとも一般的であつたといえる²⁴⁾。これに対して、ここで問題にしている潜在加工硬化とは、一次変形において inactive であるすべり系 (latent slip system) が active なすべり系よりも加工硬化が大きくなるがごとき挙動を示す材料が存在する事実を基礎としている。単結晶についての実験からは、潜在加工硬化現象はすべり方向の違いよりもすべり面の違いに支配されやすいようであるが、もしそうであれば、多結晶金属のすべり変形には巨視的なすべり模型が潜在加工硬化の理解に十分適用できると考えられる。

Fig. 16 は、通常巨視的に考えられている最大せん断

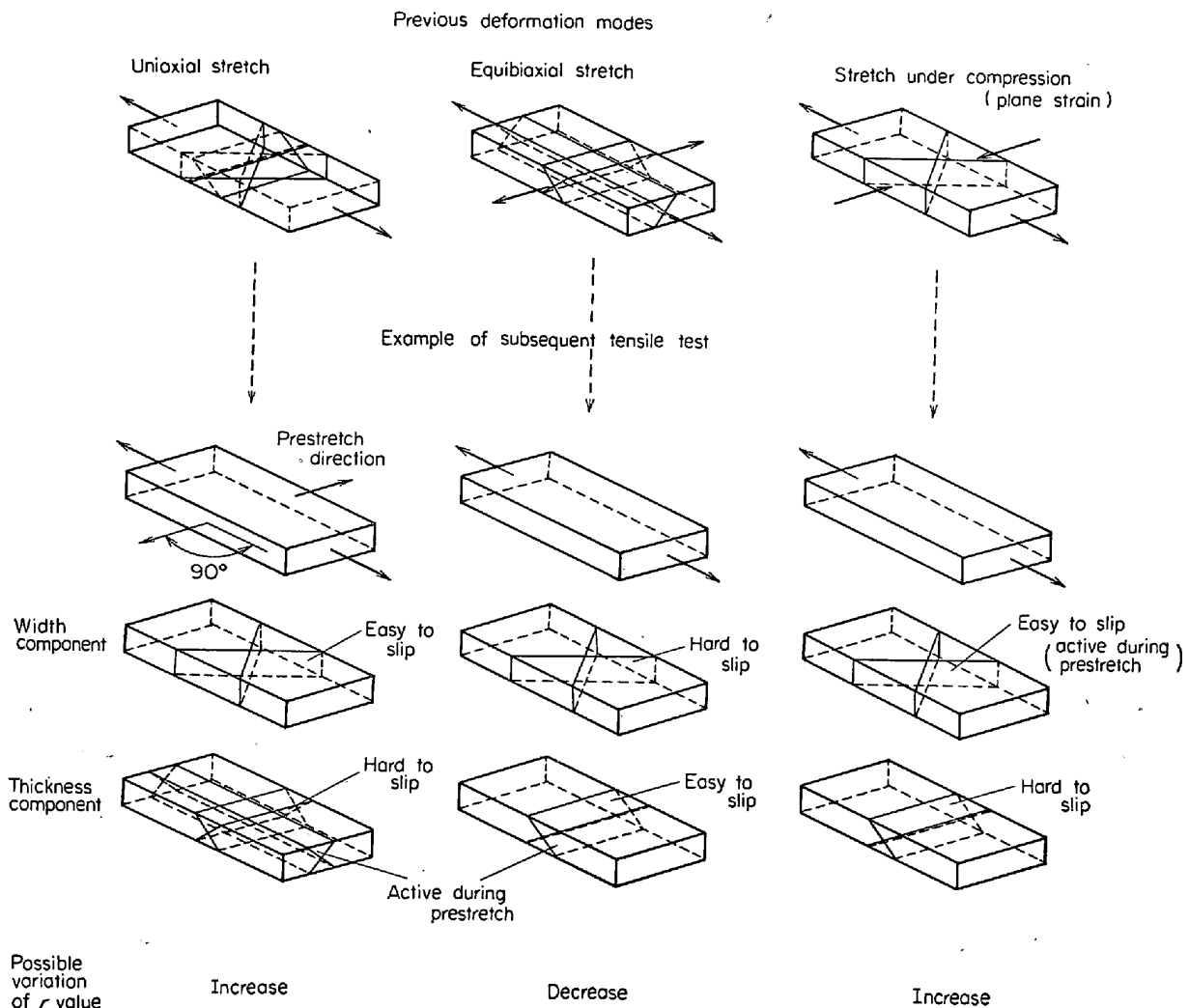


Fig. 16. Schematic representation of latent workhardening effect on the subsequent deforming behavior (r value) in tensile test.

応力面を板厚成分および幅成分に分離して、実際のすべり面に近似せしめた模型的表現として用いた場合の潜在加工硬化と r 値との結びつきの説明図である¹⁰⁾。潜在加工硬化が集合組織よりさらに微視的現象に支配されるものであり、かつ、対象が多結晶であるため、このような粗な巨視的、すなわち、連続体的表現がかなり有効と思われる。

板厚成分および幅成分として示されているすべり面を変形における実際のすべり面を代表すると考えることにより、潜在加工硬化性材料では、一軸引張り後 90° 方向の引張試験で r 値は virgin 材よりも増加し、等二軸引張り後は一般に低下し、引張圧縮(板厚一定)で r 値は増加の傾向を示すことが期待される。引張圧縮後、予引張方向に、また、それに直角方向に引張試験を行なった場合のごとく、十分な説明が得られない場合もあるが、総体的に集合組織の変化からまだ説明できない点の解釈にかなり有効であることがわかる。

また、一軸引張りまたは引張圧縮後、予引張方向に 45° 方向の引張試験において active なすべり面が予変形による潜在加工硬化面であることから、この方向における降伏点の上昇もよく説明できる。

さらに、この概念の利点は、変形経路の変化により象徴される二次変形における変形能を含む変形特性の推定に有効な手段となりうることである。すなわち、一次変形において潜在硬化したすべり系の性質と二次変形において active なすべり系の種類およびそれを支配する変形の自由度などの組み合わせにより、二次変形における加工硬化特性ならびに極限変形能が支配されることが考えられる。

いろいろな塑性変形条件または形式間で、どれだけ共通に active なすべり系を有しているかを知ること、潜在硬化現象の有無、さらに、その影響度の推定に重要な条件である。これを間接的に調べる手段のひとつとして、予変形において active であったすべり系の転位をひずみ時効で固着せしめることにより active なすべり系についての各変形条件間の共通性を調べる方法がある。一軸引張変形後、 50°C 、15hr の時効をあたえ、予引張方向に対して 22.5° おきの各方向の引張試験を行なった結果を荷重・伸び曲線の比較で Fig. 17 に示す。ひずみ時効による降伏現象の再現が 0° および 22.5° 方向で認められるのに対して、 $45^\circ \sim 90^\circ$ では生じない。このため、予引張中に雰囲気にとらえられていた転位がどのような順序で解放されるかを調べた。圧延方向に降伏伸びが消えるまで一軸引張りを行なった後、各方向に切り出した試験片の荷重・伸び曲線を Fig. 17(b) に示

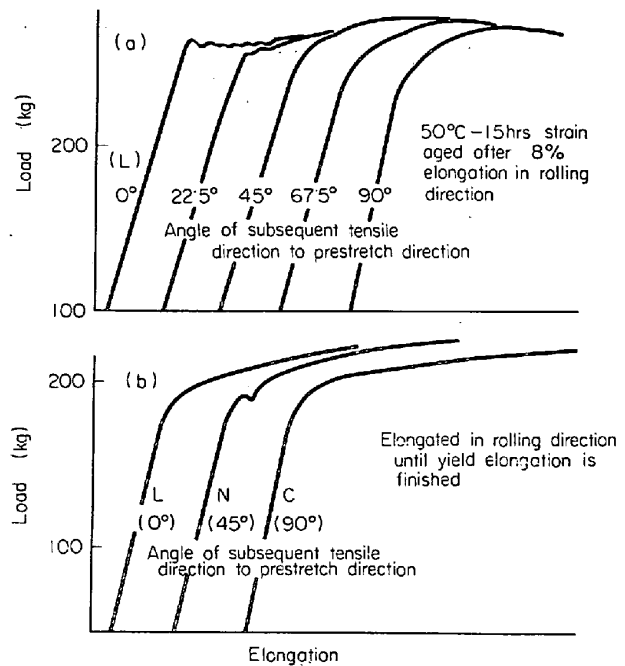


Fig. 17. Difference in slip system among tensile test in various directions according to variation of yield behavior.

す。予引張方向に 90° 方向でも降伏伸びが消えているのに対して、 45° 方向では降伏伸びが見られる。これから、 90° のほうが 45° よりも 0° と共通する性質を有しているといえよう。

これらの結果をまとめると、圧延方向(0°)の一軸引張変形において active な転位ならびにすべり系に関して共通の性質を多く有する順に、引張試験各方向を示すと $(0^\circ) > 22.5^\circ > 90^\circ > 67.5^\circ > 45^\circ$

のようになるであろう。これは、一次変形も二次変形も一軸引張変形である場合の active なすべりの模型的表現として、Fig. 16 に示したごとき方法が実用的にかなり有効であることを示している。

ここで論じてきた潜在硬化の現象は、金属材料の種類により異なり²⁰⁾単結晶と多結晶でも異なるが、原因としては、塑性変形にともなう内部応力の増加、せん維状組織の形成に帰する向きもあり、より微視的立場から、転位の増殖ならびに移動の機構、たとえば、cross slip の難易のごとき点からの説明も期待されるが、まだ明確な解釈はあたえられていないようである。しかし、再結晶集合組織と変形集合組織が異なる最大の点は加工硬化状態ならびに変形における加工硬化の挙動にあることは事実であり、二次成形性の概念の必要性は変形集合組織を有する薄板の力学的特性の特異性により理解される。この問題の解明には、集合組織を中心とした、より微視的ならびに巨視的な力学的特性の総合的立場からの追究が

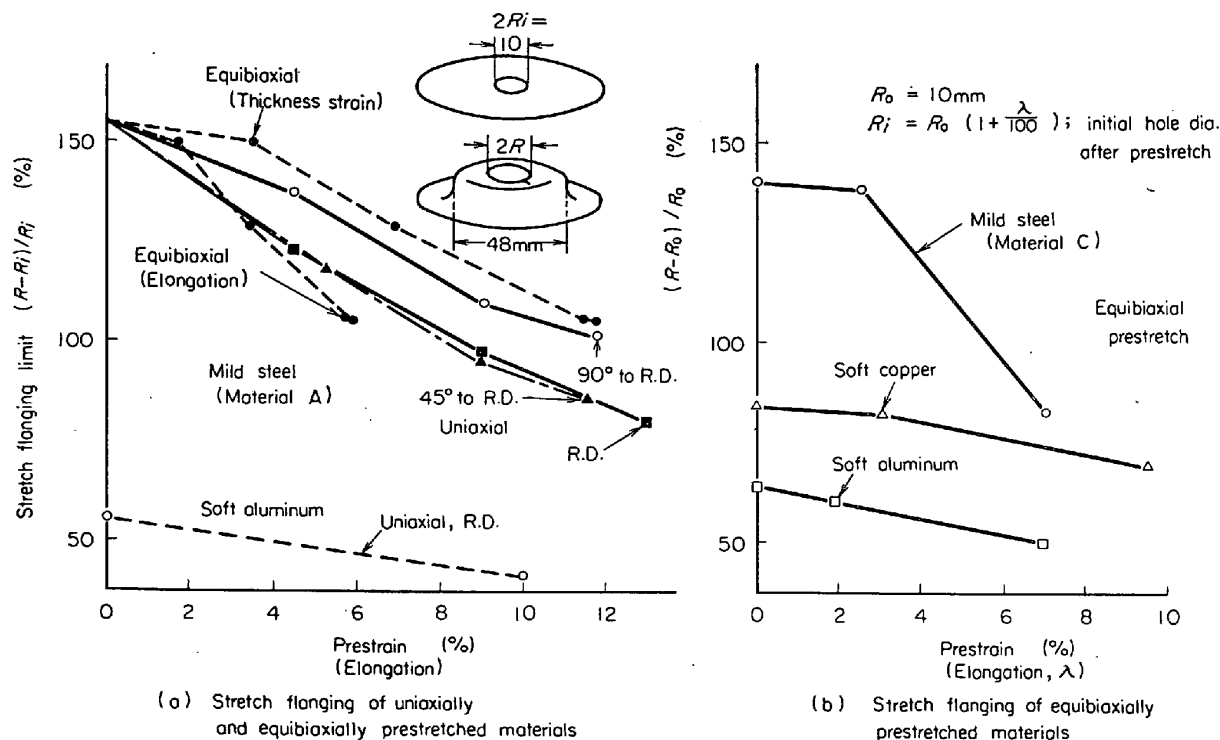


Fig. 18. Stretch flanging limit of prestrained sheet metals.

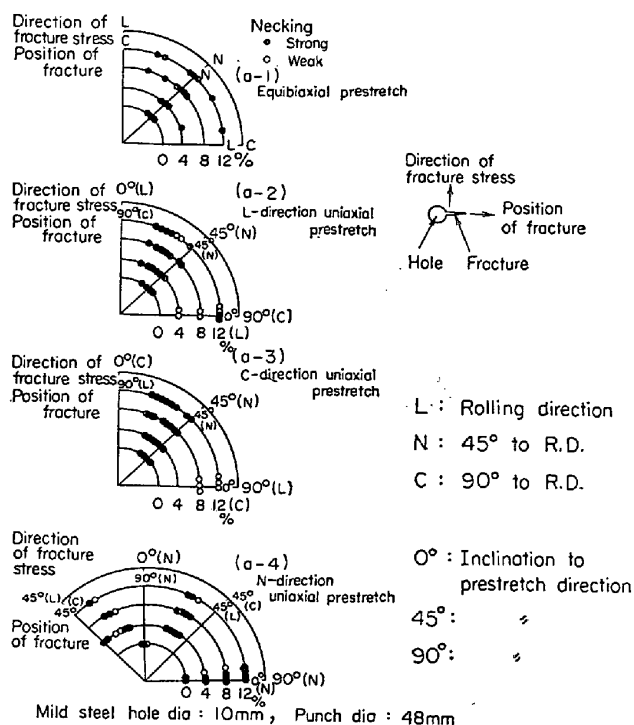


Fig. 19. Variation of fracture pattern of stretch-flanging due to prestrain.

必要といえる。

5. 二次成形における変形および破断の挙動

すでに述べたごとく、予変形材の特徴のひとつは、変形集合組織の発達、加工硬化の異方性などにより生じた

各種の強度ならびに変形特性についての板面異方性である。これら板面異方性の存在のために、一軸予引張材の張出し、伸びフランジなどの変形および破断挙動がどのように変わるかを先に報告した¹⁰⁾。たとえば、*virgin* 材 (軟鋼) で軸対称伸びフランジにおける破断が圧延方向に 45° (N 方向) であるのに対して、一軸予引張材では破断位置が予引張方向に対して、0° および約 45° になる傾向が生ずる (Fig. 19)。また張出しでは、縮みフランジ部からダイス穴への流入の有無、ポンチ形状などにより破断位置がかなり変化することがわかった。

それゆえ、ここでは板面異方性の影響を著しく受けやすい典型的な例のひとつである軸対称伸びフランジについておもに述べる。

軸対称伸びフランジ限界を支配する因子として、くびれ (または破断) の挙動、具体的には、その形態、位置および数 (穴周長に対する) がある¹⁰⁾²⁵⁾。変形経路の変更により、伸びフランジにおけるこれら成形限界支配因子は一般に著しく変化する。この変化の様態は、材料の種類、力学的特性、ポンチ径、穴径、厚板のような寸法効果などにも強く支配される。

Fig. 18 は、一軸および等二軸引張材の伸びフランジ限界である。Fig. 19 は、Fig. 18(a) の軟鋼の破断位置変化を示す。また、Photo. 1 は、Fig. 18(b) における破断挙動の変化を例示する写真である。

二次成形における伸びフランジ破断の挙動は、寸法効

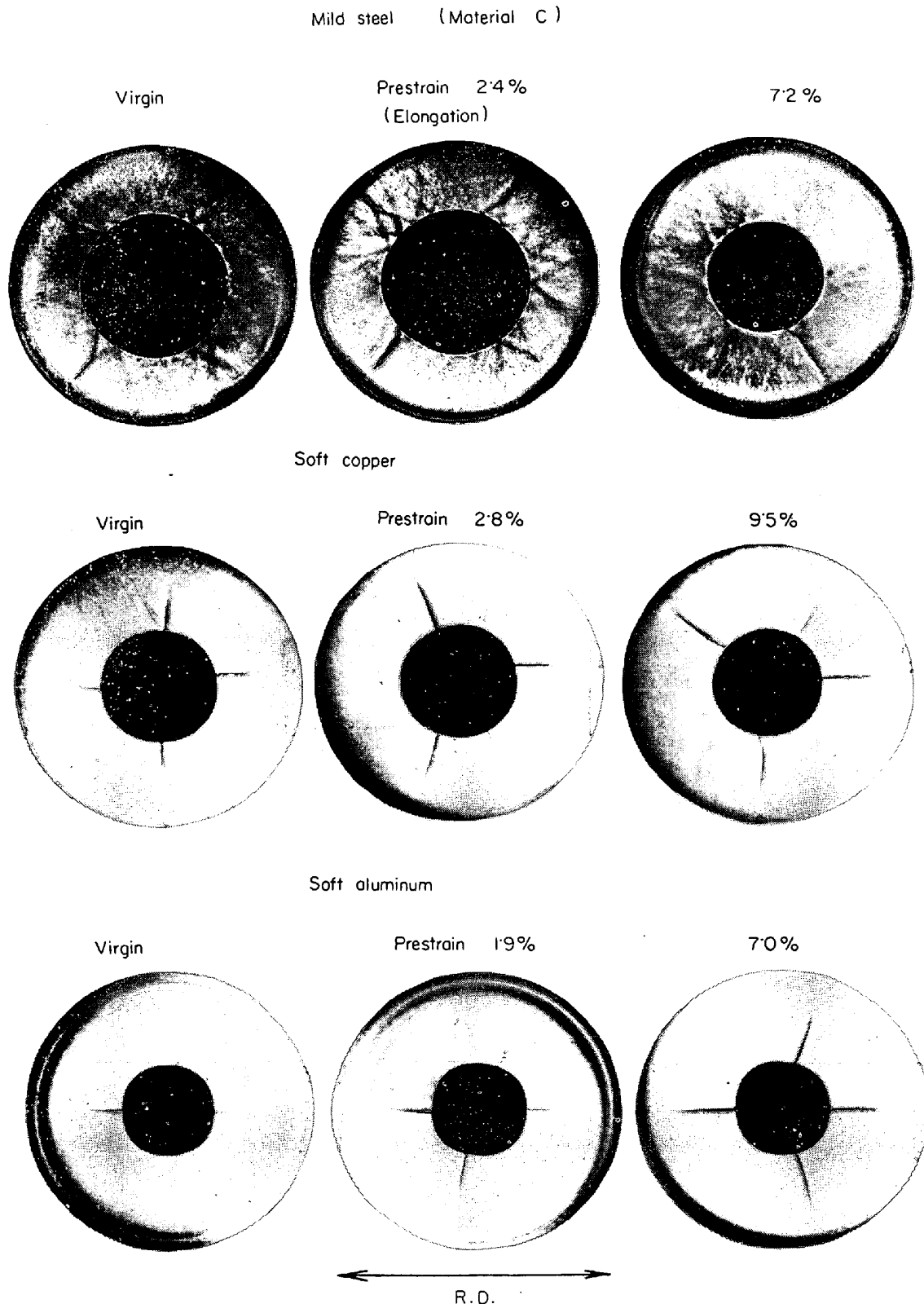


Photo. 1. Fracture patterns in stretch flanging of some sheet metals after equibiaxial prestretch.

果を著しく受けるため、常にここに示したと同様な傾向が認められるとは限らないが、材料特性、特にその板面異方性と伸びフランジの結びつきにおける基本的現象はこの実験範囲でも十分観察される。

伸びフランジ成形における破断は、穴縁周上の各方向の変形抵抗により決まるひずみ分布を保ちつつ変形が進行する過程で、変形能が限界に達した方向で生ずる。軟鋼の virgin 材では、破断位置はほぼ圧延方向に 45° の

方向であるが、軟質アルミニウムでは圧延方向および 90° で、 90° のほうがいづらか破断しにくい。両者とも、一軸予引張りにより、予引張方向にほぼ 0° および 45° の位置でくびれが先行し、破断しやすくなる傾向がある。これは予変形により変形能が著しく低下する方向と一致する。このため、破断の可能性を有するくびれの数、*virgin*材で4、一軸予引張材で6になる。

等二軸引張変形は、力学的諸特性の板面異方性を助長せず、むしろこの場合には、 r 値などの板面異方性を弱めるため、くびれ数は増加し、板面方向性が低下し、破断は不規則にどこでも生じるようになる。くびれ数の増加は予変形による伸びフランジ限の低下を緩和していると考えられるが、一軸と等二軸引張りのごとく変形様式の異なる予変形式間の予変形が力学的諸特性へ及ぼす影響の比較は、相当ひずみのような量的表現に疑義が生じ、再検討されている現在、すべり変形量に対応すると思われる一軸予引張伸びと等二軸予引張りの板厚ひずみを対応する量として考えるのが実用的である。この場合一軸より等二軸予引張りのほうが伸びフランジ限が高くなり、くびれ数の大小との対応が説明しやすくなる。

軟鋼と他の金属板の比較では、予変形、特に等二軸引張変形による伸びフランジ限の低下が軟鋼で著しい。この原因が b.c.c. および f.c.c. のごとき結晶構造または材種などの材料の本質的な差にあると考えるべきであろうが、巨視的な材料特性の立場からは、以下に述べるよ

うに r 値とくびれ伸びが軟鋼で著しく大きいことが注目される。

先に述べた中岡らの集合組織と加工硬化の関係の拡張の形で、Fig. 18 から次のような仮説が考えられる。

「 r 値または変形強度の異方性から予想される一軸引張りでのひずみ比と変形様式により強制的にあたえられるひずみ比が(変形の方法の違いも含めて)異なるほど、潜在すべり系の硬化が大きい。」

さらに、

「ひずみ比および変形の方法によりあたえられる変形様式が一次変形と二次変形の間で異なるほど、力学的諸特性は急激に変化し、一般に変形抵抗は増大し、変形能は低下する。」

巨視的立場からのこのような見方がどこまで有効かは今後の実験の蓄積に待ちたい。

Fig. 18 に示した伸びフランジ限界は、穴縁全周の平均変形能に対応する。この平均変形能は、破断部の極限変形能および穴縁周方向のひずみ分布により決まる。予変形により、この周方向のひずみ分布がどのように変わるかを Fig. 20 に示す。一軸予引張りにより、変形抵抗の板面異方性が強くなるのに対応して、各方向の伸びの差が増加する。等二軸予引張りにより、各方向の伸びの差は減少する。このように変形様式自身が有するところの変形の方法性は、変形の結果得られる予変形材の力学的特性の方向性と密接な関係にあることは明らかであ

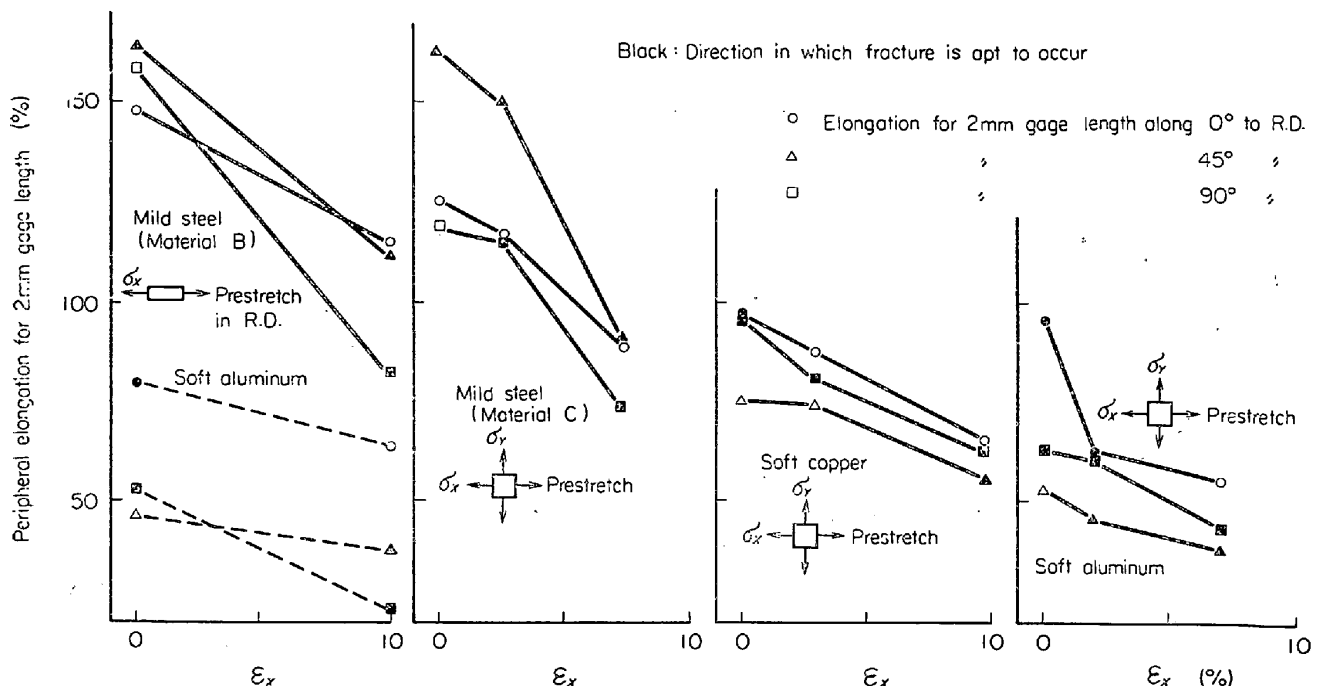


Fig. 20. Distribution of peripheral elongation for 2 mm gage length in various directions when fractured.

性、集合組織、プレス成形および成形性などいろいろの観点から検討を行なってきたが、両者の相違が非常に本質的かつ不連続的な性格を有していることは明らかであり、これまでの成形性の概念を、単純変形経路での成形性（一次成形性）と予変形材を出発点とする成形性（二次成形性）に分けることは実用的な意味からも有効であろう。いいかえれば、二次成形性は一次変形経路と変形様式を異にする成形における変形集合組織体の成形性である。

各種変形様式における変形挙動の追跡が十分に行なわれ、その体系的認識が完成されたあかつきには、一次成形性と二次成形性は総合されて新しいひとつの概念となり、さらには、成形性という概念自身もより普遍的かつ基礎的な他の材料特性にとつて代わられる日がくるであろうが、それまでの間、二次成形性という概念がうつたえる感覚は、従来と全く無視されがちであつた一次成形における変形挙動の再認識をうながし、材料特性を支配する微視的から巨視的までの諸因子の位置づけを容易にせしめるなど、それ自身の重要性に加えて、その存在理由を十分に示すことが期待される。

ここで論じてきたことは、二次変形とその変形を伴う成形に対する成形性の認識の必要の主張であり、そのためにとりあげた問題は二次成形性の支配因子群のうちの一部にすぎない。ここでとりあげなかつた問題について以下に簡単にふれてみたい。

(1) 一次変形におけるものとしては、変形の不均一または不連続がある²⁶⁾。これは、二次変形における平均変形能の推定を困難にせしめるが、単にひずみ勾配のためばかりでなく、変形の自由度にも強い影響をあたえる因子であるためと思われる。ストレッチャ・ストレインを生じる程度の子変形の場合、予変形様式によりいろいろな模様の網状構造を生ずるが、これなどは材料本来の性質に依存する不連続現象であり、変形経路の変化により破断に近い大きなひずみがあたえられても、いつたん生じたストレッチャ・ストレインは消えなくなる²⁶⁾。

これに対して、ひずみ分布に対する成形技術の影響は実に多種多様で、その体系化への展開には非常に多くのデータが必要な分野である。ここで新たに加わるもうひとつの重要な問題は、予変形材の幾何学的因子である。今回の実験で用いた予変形材はすべて平板形状であつたが、一般のプレス成形では曲げの存在により予変形材は曲面形状をとるようになる。この場合、曲げの効果が板厚方向のひずみ勾配により理解される場も存在するであろうが、予変形材の幾何学的形状そのものが変形拘束（変形の自由度）にあたえる影響が最大の因子として期待

される。

(2) 一次成形と二次成形の間における問題として、ひずみ時効および焼なましがある。変形の厳しい成形の途中で焼なましを行なうことは成形限界を向上せしめる技術のひとつとして一般に用いられていることは周知のとおりである。それも、焼なましの場所、程度などに関する高度の現場技術が経験的には得られているにもかかわらず、学問的にはほとんど検討の対象になつていないようである。一次変形における各部分のひずみの違いによる再結晶温度の違いを利用して、二次成形性を向上せしめる研究²⁷⁾などが行なわれているにすぎないようである。温間深絞りなどの研究はかなり多数あるが²⁸⁾、加工中の加熱による変形抵抗の直接的低下が主因子であるため、異なつた問題であろう。むしろ圧延、伸線などいわゆる一次加工後の焼なましによる再結晶組織の発達に関する研究は、プレス成形中途の焼なましに本質的に一致するものであり、その数も多く²⁹⁾、すでに二次成形性研究のための強力な武器と考えてよいであろう。

ひずみ時効の問題は一般に好ましくない印象をあたえるだけのようであるが、それを抑制する条件の研究ばかりでなく、逆用する可能性についても検討を期待する。

(3) 二次変形においては、ここで検討することができなかつた興味ある現象のひとつは、active なすべり系の交替挙動であろう。二次変形に相当する引張試験での最高荷重点以後の荷重・伸び曲線の異常な形状から考えて、一次変形におけるすべり系の挙動とかなり異なると思われる。このためと考えられるが、一次成形で有効であつた引張試験値からの情報が二次成形性判定に必ずしも満足すべきものでないことは先に報告した⁹⁾¹⁰⁾。

最後に、一次成形も含むが、特に二次成形において重要な問題になるものとして、ひずみ速度の効果が予想される。転位がほぼ一定のある種のパターンに従つて、増殖および移動することが予想される一次変形に対して、二次変形では転位の移動に関係のあるすべり系の強制的変更により、転位の挙動が複雑になるのみならず、転位密度の増加そのものが、関連する諸特性のひずみ速度依存性を増大せしめると考えられる。

軟鋼板を中心に、二次成形性の場を設定し、いろいろの問題を論じてきたが、著者らの実験と異なる傾向を示す事実が他の非鉄材料について報告されており³⁰⁾、この問題にはここで気がつかなかつた多くの難問が前途に横たわつていようである。

終わりに、pole figure の作製と研究の遂行にあたり有益なご助言を下さつた日本鋼管株式会社技術研究所久保寺治朗、中岡一秀両氏、実験結果について貴重な示唆に

富んだご討論を下さつた八幡製鉄株式会社東京研究所青木宏一、速水哲博両氏および同研究室の諸氏、研究の遂行に重要な役割を果たして下さつた川崎製鉄株式会社岩崎利雄氏および富士製鉄株式会社田川彬氏に深く感謝する。実験の遂行、測定、計算にあたつて、磯部伸幸、山口厚両君の協力を得た。ここに心から感謝する。

文 献

- 1) R. L. WHITELEY: Trans., ASM, 52 (1960), p. 154; W. F. HOSFORD, Jr. and W. A. BACKOFEN: "Fundamentals of Deformation Processing", Syracuse Univ. Press., N. Y., (1964), p. 259
- 2) 岡本, 白岩, 福田: 住友金属, 14 (1962), p. 211; 福田: 塑性と加工, 5 (1964), p. 3; 加藤, 武智, 長島: 塑性と加工, 7 (1966), p. 13
- 3) 吉田, 宮内, 岡, 他: 理研報告, 41 (1965), p. 208
- 4) 小森田, 宮内, 沼沢, 吉田: 理研報告, 44 (1968), p. 43
- 5) 福田, 林: 鉄と鋼, 54 (1968) 3, S 150; 吉田, 阿部, 細野, 竹添: 理研報告, 44 (1968) p. 128
- 6) 中川, 吉田: 理研報告, 44 (1968), p. 150
- 7) 小林: 塑性と加工, 9 (1968), p. 117
- 8) 細野, 阿部, 吉田: 鉄と鋼, 54 (1968) 3, S 155
- 9) たとえば, 宮内: 第23回塑性加工シンポジウム前刷, 東京(1968-5), p. 107
- 10) K. YOSHIDA, K. MIYAUCHI, A. TAJIKAWA, T. IWASAKI and S. MIZUNUMA: Sci. Papers I.P.C.R., 61 (1967), p. 119
- 11) 薄鋼板のプレス成形と試験法研究会: 第三期報告書, 東京 (1964), p. 326
- 12) 福田: 塑性と加工, 7 (1966), p. 349
- 13) 宮内, 岩崎, 坂口, 吉田: 理研報告, 44 (1968), p. 30
- 14) たとえば, E. A. CALNAN and C. J. B. CLEWS: Phil. Mag., 41 (1950), p. 1086 および 42 (1951), p. 616; C. S. BARRETT: "Structure of Metals", McGraw-Hill Book Co., N.Y., (1952); J. BENNEWITZ: Arch. Eisenhüttenw., 33 (1962), p. 393
- 15) H. KUBOTERA and K. NAKAOKA: 5th I.D.D.R.G. Congress, Working Group II Meeting, Turin, Oct. (1968), to be published; 中岡: 第23回塑性加工シンポジウム前刷, 東京, 5月(1968), p. 93
- 16) L. HERMANN and G. SACHS: Metallwirtschaft, 13 (1934), p. 745
- 17) N. L. SVENSSON: Trans. Met. Soc. AIME, 236 (1966), p. 1004
- 18) G. Y. CHIN and W. L. MAMMEL: Submitted to Trans. Metall. Soc. AIME
- 19) S. L. LOPATA and E. B. KULA: Trans. AIME, 224 (1962), p. 865
- 20) J. F. W. BISHOP: J. Mech. Phys. Solids, 3 (1955), p. 130
- 21) F. GAROFALO and J. R. LOW Jr: ibid., p. 275
- 22) U. F. KOCKS and T. J. BROWN: Acta Met., 14 (1966), p. 87
- 23) Y. NAKADA and A. S. KEH: ibid., p. 961
- 24) R. HILL: 塑性学, 培風館, 東京(1955), p. 6 および p. 22
- 25) 中川, 吉田: 理研報告, 44 (1968), p. 91
- 26) 吉田, 宮内, 田地川, 副田: 理研報告, 43 (1967), p. 135
- 27) 吉井: 第13回塑性加工連合講演会前刷集, 名古屋 (1962-11), p. 81
- 28) たとえば, 戸沢: 塑性と加工, 1 (1960), p. 23; 両角, 松下: 同上, p. 432 耳野, 木下, 服部, 松下: 同上, p. 432
- 29) たとえば, C. A. STICKELS: Trans. Met. Soc. AIME, 233 (1965), p. 1550; 藤井, 小川, 日野: 塑性と加工, 7 (1966), p. 315; 松藤: 同上, p. 376; 松藤, 下村, 橋本: 同上, 8 (1967), p. 381; 済木: 同上, 9 (1968), p. 108
- 30) 吉井: 第17回塑性加工連合講演会前刷, 東京, (1966-11), p. 101