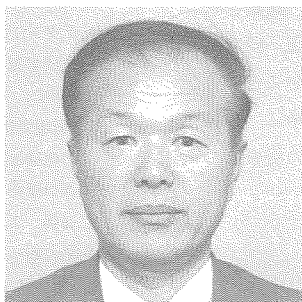


工業用純チタン板のプレス成形性

Press Formability of Commercially Pure Titanium Sheets



臼 田 松 男^{*(1)}
Matsuo USUDA

抄 録

優れた加工性が要求される工業用純チタンのプレス成形性を検討した。チタンは結晶構造に起因する特異な変形挙動を示すが、すべりや双晶の寄与により他の最密六方晶金属より変形しやすい。深絞り用鋼板と比較すると引張り強さ-全伸びバランスは同等であり n 値は小さく r 値は大きい。変形応力の変形モード依存性と引張り特性の板面内異方性はすべり系が限定されるためと考えられる。延性特性が小さいにも関わらず比較的良好な張出し性を有するが、 r 値で表されるほど深絞り性は高くない。成形限界ひずみと平面ひずみ張出し性は r 値の高い圧延直角方向で優れていて延性特性とは無関係である。その機構はすべり変形と双晶変形の効果と思われる。チタンの潤滑、型材質、温度、速度の利用、材料に適した成形システム、成形シミュレーション用材料構成式と材料データベースの研究が重要である。

Abstract

This paper describes the press formability of commercially pure titanium sheets for the use to require excellent workability. Titanium shows the peculiar characteristic which is caused by the structure of crystal, but by the contribution of slips and twinings it is easy to deform than the other hexagonal close-packed lattice metals. When comparing with a deep-drawing quality steel sheet, the tensile strength to total elongation balance is equal, the n value is small and the r value is large. Deformation-mode dependence of flow stress and planar anisotropy of tensile properties are, it thinks, caused by that slip systems are limited. Though it has a comparatively good stretchability regardless of a poor ductility, a deep-drawability isn't as high as to be shown at the r value. The forming limit diagram and the stretchability in plane strain deformation are excellent in the transverse direction of the rolled sheet with r value's being high and are unrelated to the ductility characteristics. The mechanism is, it seems, the effects of slip and twinning. As for the press-formability of titanium sheets, it is important to study that the effects of lubrication and die material, the use of the temperature and the speed during pressing, the press-forming system which suited material, and the numerical simulation system of press-forming together with the constitutive equation and data base of material.

1. 緒 言

チタンは地殻中で4番目に多く存在する金属であり今日では一般生活用品にも広く使われ出しているが、精錬が難しいためその利用の歴史は浅く工業化されてからほんの数十年しか経っていない。し

かし、a)軽くて強い、b)耐食性に優れるなど各種材料性能が時代の要求にマッチしていることからチタンの用途は多方面に拡大している。その状況をわが国の場合について示したものが表1¹⁾である。表から明らかなようにチタンの用途は化学工業用機器から始まり電力設備機器、海水淡水化装置に拡大した。そして最近では建築外装、

^{*(1)} 金沢大学工学部 人間・機械工学科(元新日本製鐵 鉄鋼研究所)
教授 工学博士
金沢市角間町 ☎920-1192 ☎076-264-5763

表1 我が国におけるチタン材料の用途拡大¹⁾

時期	市場、技術動向	用途例
1950年代中期～後期	・工業化の実現 ・需要開拓開始	化学工業(プラント配管、熱交換器)
1960年代	・高級耐食材料	塔槽類のライニング、熱交換器用管材 配管類
1970年代	・ソーダ工業用電極材 ・大気汚染問題	チタン製電極、チタン製電解槽 排煙脱硫装置
1970年代後半～80年代初頭	・電力需要増大 ・海水淡水化プラント	発電所の復水器、コンデンサー 海水淡水化装置の電熱管
1980年代中期～最近	・建築、海洋、土木など ・民生品、レジャー用品 ・自動車、二輪車	ドーム屋根、外装パネル 食器、眼鏡、ゴルフ用品、プレート熱交換器 エンジン部品、マフラー

民生品分野などの薄板製品でその用途が増加しているが、そうした用途向けチタン材料には曲げ、絞りなど薄板特有の加工が施される。そのため深絞り鋼板やステンレス鋼板と同程度の高度な加工性を要求される場合も多い。

そこで本報では、プレス加工用途に適用される工業用純チタン板(以下純チタンと略記)に焦点を当て物理的性質や加工硬化挙動、塑性異方性の特徴を概観した後、それらの材料特性とプレス成形性との関係について述べる。

2. 純チタン板の材料特性

2.1 物理的性質(表2²⁾参照)

チタンの融点は1 668℃と表中の金属の中で最も高く、また密度は鋼の60%であり強度が鋼と同程度であることから比強度は金属材料中で最も大きい³⁾。一方、熱伝導性と電気伝導性は汎用金属材料としては最も小さい。また比熱は鉄やオーステナイト系ステンレス鋼とほぼ同じであるが密度が小さいので熱容量は小さい。そのほか線膨張係数が小さいことも特徴で鉄の約2/3、オーステナイト系ステンレス鋼の約半分である。

表2 各種金属及び合金の物理的性質²⁾

金属	原子量	融点 (℃)	密度 (g/cm ³)	熱伝導率 (cal/cm ² /s /℃/cm)	比熱 (cal/g/℃)	線膨張係数* cm/cm/℃
アルミニウムAl	26.97	660	2.70	0.487	0.21	23.0×10 ⁻⁶
チタン Ti	47.90	1 668	4.51	0.041	0.12	8.4
鉄 Fe	55.85	1 530	7.86	0.145	0.11	12.0
銅 Cu	63.57	1 083	8.93	0.923	0.09	16.8
チタン合金Ti-6%Al-4%V		1 540-1 650	4.42	0.018	0.13	8.8
18%Cr-8%Niステンレス鋼		1 400-1 427	8.03	0.039	0.12	16.5

*0～100℃

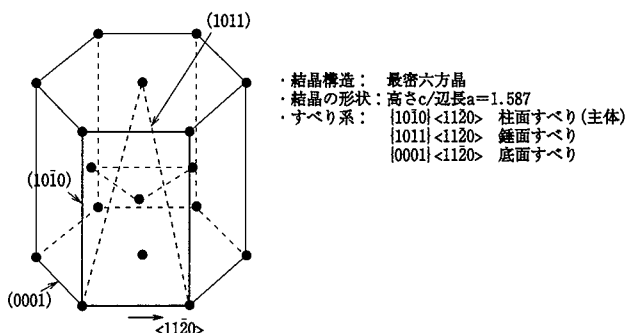


図1 チタンの結晶構造とすべり系

2.2 結晶構造

チタンの結晶構造は最密六方晶であり特徴的な塑性変形挙動は結晶構造に依存している。すべり系は{1010}<1120>(柱面すべり)、{1011}<1120>(錐面すべり)で、特殊な方位に関しては{0001}<1120>(底面すべり)もあるが柱面すべりが主体である(図1参照)。以上のほか{1012}、{1021}面などでの双晶変形も認められている。最密六方構造は面心立方構造や体心立方構造よりすべり系が少ないため延性が劣るとされているが、チタンの場合にはすべりや双晶の寄与が大きく、同じ最密六方金属のZn、Mgに比べ変形しやすい³⁾。

2.3 引張り特性

2.3.1 板面内の平均的特性

純チタンの引張り特性を深絞り用の低炭素アルミキルド冷間圧延鋼板SPCE及び18%Cr-8%Niステンレス鋼板SUS304と比較した例を表3^{4,5)}、図2に示す。各引張り特性の板面内平均値 $\bar{X}$ は圧延方向に対して0°、45°、90°方向の値 X_0 、 X_{45} 、 X_{90} を式(1)に代入して求めた。

$$\bar{X} = (X_0 + 2X_{45} + X_{90})/4 \quad \dots\dots (1)$$

これらから以下のことが言える。

- 純チタンの縦弾性係数EはSPCEやSUS304の約半分である。
- 金属材料では一般に引張り強さTSが大きいほど全伸びEIが小さいという傾向がある(強度-延性バランスまたはTS-EIバランスと言う)。このTS-EIバランスに関して純チタン板はSPCEとほぼ同じ位置にあるが、SUS304はこのバランスより上方に大きく外

表3 代表的な金属板の機械的性質例(板厚0.8mm、板面内平均値)^{4,5)}

金属	E ^{*1} (GPa)	YS ^{*2} (MPa)	TS(MPa)	EI(%)	n値	r値
純チタン	106	274	332	47.1	0.086	4.41
SPCE	206	169	300	49.4	0.224	1.54
SUS304	200	241	605	65.4	0.433	0.84

*1縦弾性係数 *2降伏強さ

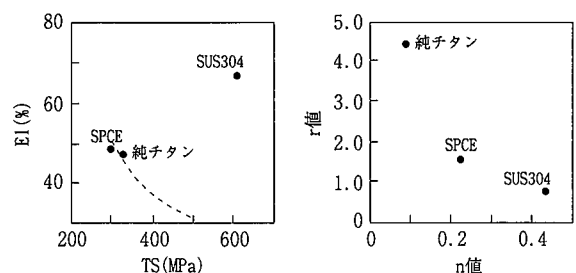


図2 TS-EIバランス及びn値-r値の対応

れている。

c) 加工硬化指数 n 値と塑性ひずみ比 r 値については純チタンでは SPCE に比べて n 値が小さく r 値が大きい。反対に SUS304 では n 値が大きく r 値が小さい。このように n 値と r 値との対応では SPCE を基準として SUS304 と純チタンとは対照的な材料である。

2.3.2 加工硬化特性

純チタンを引張り試験すると SPCE や SUS304 よりかなり小さいひずみで最大荷重点に達したあと荷重低下して破断する。この傾向が単軸引張り (1 方向応力による引張り) だけでなくプレス成形と同様の 2 軸引張りで生じるかを調べるため、通常の引張り試験 (単軸引張り) と液圧パルジ試験 (等 2 軸引張り) とを行って真応力 σ —対数ひずみ ε 線図を比較した結果を図 3⁶⁾ に示す。なお、等 2 軸引張りの σ — ε 線図の求め方については 3.1.1 に示す。これらから以下のことが分かる。

- a) SUS304 では単軸、等 2 軸引張とも $\varepsilon \geq 0.40$ まで加工硬化を続ける。
- b) 純チタンの場合には単軸引張は $\varepsilon \approx 0.10$ までしか行えないが等 2 軸引張は $\varepsilon \geq 0.60$ まで可能である。
- c) 同様の傾向は SPCE にも認められるが純チタンほど顕著でない。

次に単軸、等 2 軸引張りの σ — ε 線図から次式を用いて求めた瞬間 n 値 (n^*) の変化を図 4⁶⁾ に示す。純チタンの場合、等 2 軸引張りの n^* の値は小ひずみ域では小さいがその後大きくなり、 $\varepsilon = 0.20 \sim 0.40$ のひずみ域では SPCE より大きい。

$$n^* = (\Delta \sigma / \sigma) / (\Delta \varepsilon / \varepsilon) \quad \dots (2)$$

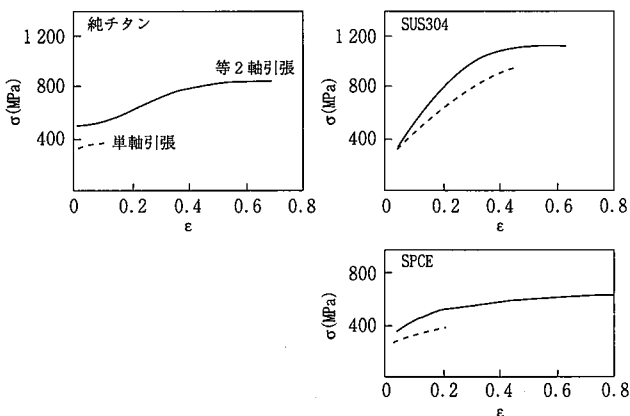


図 3 単軸及び等 2 軸引張りの応力～ひずみ線図⁶⁾

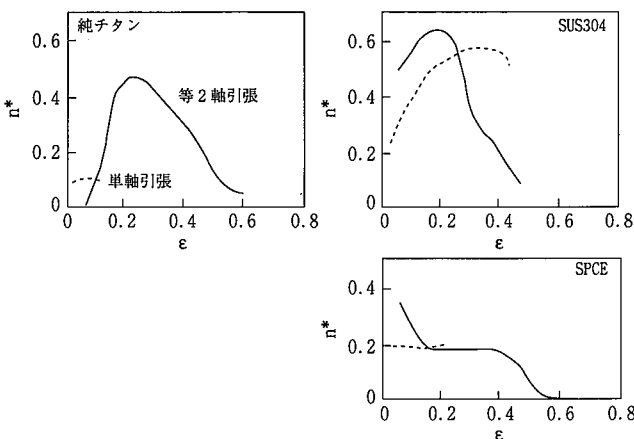


図 4 単軸及び等 2 軸引張りに伴う瞬間 n 値 (n^*) の変化⁶⁾

このように純チタンの加工硬化挙動が変形モードによって大きく異なる機構について考える。図 5 は説明を容易にするため、単軸と等 2 軸引張りの代わりに平面ひずみ引張りと純粋せん断の最大せん断応力面 (この面の近くにすべり系があるとそのすべり系が最初に活動する) を比較したものであるが、両方の変形モード間で最大せん断応力面が全く違っている。従って図 3、4 において純チタンの σ と n^* が単軸引張りとは等 2 軸引張りとの間で大幅に異なっているのは、最大せん断応力面の近くにすべり系が存在するか否かによって変形しやすさに大きな差が生じるためと考えることができる。

2.3.3 板面内異方性

製造条件の異なる各種純チタンを用いて、圧延方向に対し 0° 、 45° 、 90° 方向の引張り特性を求めた。主な材料と比較材 SPCE の結果を図 6 に示す。この図から以下のことが分かる。

- a) 全伸び EI では 0° 、 45° 方向は SPCE より優れ 90° 方向は SPCE より大幅に劣っている。
- b) 均一伸び u-EI では 0° 方向は SPCE より優れているが 45° と 90° 方向は SPCE より大幅に劣っているものが多い。
- c) r 値は SPCE より大きい。
- d) 純チタンの各特性値は大きな板面内異方性を示し異方性パターンは EI では 90° 方向を最低値とする逆 V 型 ($45^\circ > 0^\circ > 90^\circ$) であるのに対し、 r 値では 90° 方向を最大値とする直線型であり、u-EI では逆 V 型と直線型の両方がある。

このように純チタンの引張り特性が顕著な板面内異方性を示すのは、図 5 の例で示したように結晶構造に起因して塑性変形しやすい

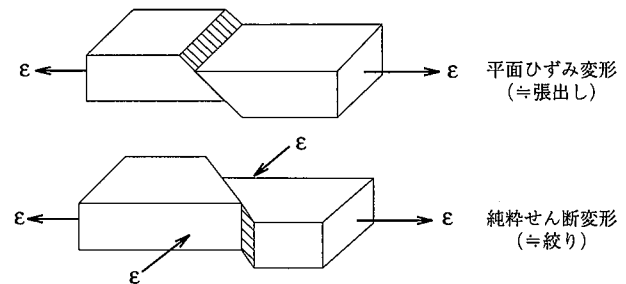


図 5 主要な変形モードの最大せん断応力面

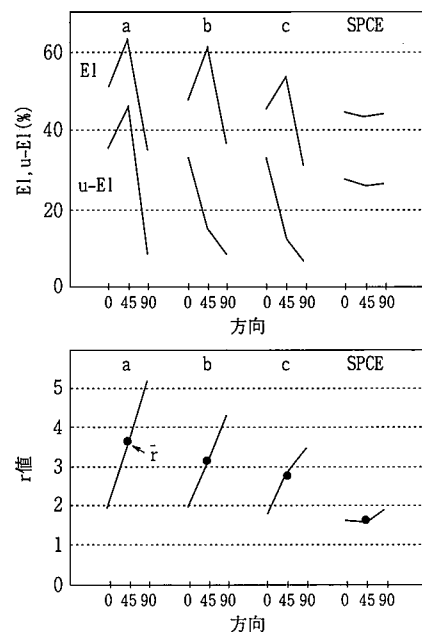


図 6 引張り試験値の板面内異方性 (板厚 0.5mm, JS13 号試験片, 引張り速度 10mm/m)

結晶面と方向が限定されるためと考えることができる。

3. 純チタンのプレス成形性

3.1 軸対称成形性

3.1.1 張出し

純チタン、SPCE、SUS304のほかに銅、7-3黄銅、2000系及び5000系Al合金を含めた各種金属板を用いて直径 $d=32\text{mm}$ の球頭ポンチによる張出し成形を行ない、成形限界高さ n と単軸引張りまたは等2軸引張りの加工硬化指数 n 、 $[n]$ との関係を調べた。単軸引張りの n は通常の引張り試験の最大荷重点までの真応力 σ -対数ひずみ ε 線図に n 乗硬化則を適用して各方向の値を導出し、式(1)により板面内平均値 n を求めた。また等2軸引張りの $[n]$ は液圧バルジ試験から求めた。

すなわち液圧-成形高さ線図の塑性不安定点(最大液圧点)までの液圧 p 、頂点付近の曲率半径 R 及び板厚 $t(t_0$:初期板厚)を測定し、次式を用いて σ - ε 線図を作成した。この σ - ε 線図に n 乗硬化則を適用して得られた指数を板面内平均値 $[n]$ とした⁵⁾。

$$\sigma = pR/(2t), \quad \varepsilon = |\ln(t/t_0)| \quad \dots\dots(3)$$

成形限界高さ n 、 $[n]$ との関係を図7⁶⁾に示す。この結果から n を用いると純チタンや銅などで対応関係が非常に悪いが、 $[n]$ を使用すると純チタンを含めたすべての材料が良い直線関係を示している。円筒ポンチを用いた張出しの場合にも成形限界高さ n 、 $[n]$ との関係は図7とほぼ同様であった。これらの結果は以下のことを示している。

- a) 純チタンは単軸引張りの n 値が小さいにもかかわらず比較的良好な張出し性を有する。
- b) 純チタンの張出し性は等2軸引張りの n 値 $[n]$ により評価可能である。

3.1.2 深絞り

純チタンのほか8種類の軟鋼、SUS304、銅及びアルミ合金(2000系、5000系)を用いて直径32mmの円筒ポンチによる深絞り成形を行った。成形条件としては、全ての材料で絞り抜けが起きないようにするため素板直径を限界絞り条件よりやや大きめ(80mm一定)とした。この条件は張出し気味の深絞りになっていると言える。成形限界高さ n と板面内平均 r 値との関係を図8⁵⁾に示す。図から明らかなようにSPCEを含む各種軟鋼や銅に限ると成形高さは r 値(板面内平均値)と良い直線関係を示すが、純チタンやSUS304を含めると両者は対応しない。すなわち $r > 4.0$ である純チタンの成形高さは r 値=1.5の軟鋼と同程度であり r 値で表されるほど深絞り性は高くない。反対に $r < 1.0$ のSUS304は $r=2.0$ の軟鋼と同等の深絞り

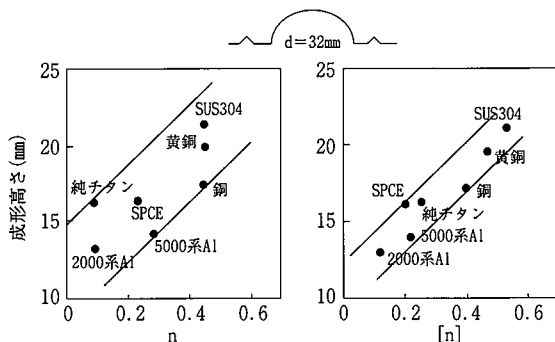


図7 球頭張出し成形高さ n 、 $[n]$ との関係(板厚0.8mm、ポンチ直径32mm、ポンチ面にプレス潤滑油塗布)⁶⁾

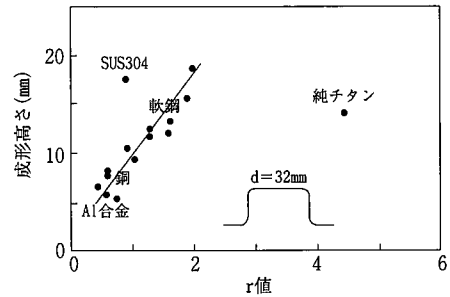


図8 深絞り成形高さ r 値との関係(板厚0.8mm、素板直径80mm、ポンチ直径32mm、 $r_p=r_d=5\text{mm}$ 、板両面にプレス油塗布)⁵⁾

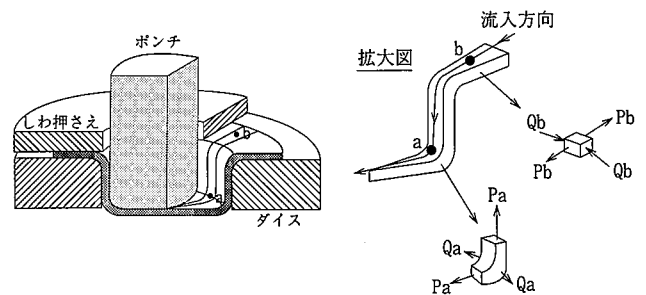


図9 深絞りのa,b部に加わる力(a部:平面ひずみ変形,b部:絞り変形)

性を示している。

(1) 純チタンの深絞り性と r 値との対応

①塑性変形による r 値の変化: 深絞り限界はポンチ肩部の材料(図9のa点)に加わる流入方向の力 P_a と縮みフランジ部の材料(図9のb点)に加わる流入方向の力 P_b により決まり、 P_a が大きき P_b が小さいほど深絞り性が優れている。またR.Hillの塑性異方性理論を用いると、 P_a 、 P_b は r 値の影響を受け、 r 値が大きいくほど P_a は大きく P_b は小さいという結果が導かれる(ただし r 値の影響は P_a のほうが大きい)⁷⁾。従って r 値が高い材料では両方の条件が満たされるので純チタンでは深絞り性が優れていることになる。一方、塑性変形により結晶のすべりや回転が起き r 値が変化することが知られていて深絞りのように変形量が多い場合には、その影響が無視できない⁸⁾。そこで“R.Hillの2次降伏曲面の異方性係数(r 値に対応)が塑性変形により変化する”、“異方性係数の変化は塑性仕事量が最小になるように起きる”と仮定し流入方向と直角方向の r 値(r_x 、 r_y)と塑性ひずみ ε_x との関係を計算すると、平面ひずみ変形では ε_x の増加により r_x が減少し(r_y の変化は小)、絞り変形では r_x 、 r_y とも増加する、という結果が得られる。これらの計算結果を純チタンの深絞りに適用すると、a部の材料では平面ひずみ変形により r_x が減少するため P_a が低下し、その分だけ深絞り性が劣化する。またb部の材料では絞り変形により r_x 、 r_y が増加するため P_b は減少して深絞り性は向上するが、 P_b に及ぼす r 値の影響は小さい。以上のように高 r 値である純チタンでは成形による r 値の低下が大きく深絞り性の劣化も大きかったものと思われる。

②板面内平均値の有効性: 材料特性が軸対称でない板面内異方性材料を軸対称成形する時の成形性を平均的材料特性によりどこまで評価可能かの問題と思われる。軟鋼とは違って純チタンのように板面内異方性が非常に大きい材料の場合にどのような材料特性で評価すべきかは今後の課題である。

③摩擦の影響: 材料表面と金型表面間の摩擦状態は深絞り性に大きな影響を及ぼす。特に純チタンでは軟鋼用の通常の金型を用いて深

絞りと摩擦抵抗が増大し、成形限界が低下することが良く知られている。この点が図8における成形高さが r 値と対応しなかった要因と考えることができる。純チタンの摩擦状態の問題については4.2で取り扱う。

(2) SUS304の深絞り性と r 値の対応

図8においてSUS304が r 値と対応せずに優れた深絞り性を示した理由として、張出し成形要素の影響と加工誘起変態特性の効果が考えられる。前者については、全ての材料で絞り抜けが起きないようにするため素板直径を限界絞り条件よりやや大きめとしたことにより、純粋な深絞りではなく張出し要素を含んだ深絞りになっている。その結果 r 値のほかに n 値の影響が加わったことが考えられる。また後者については、SUS304に加工を加えるとオーステナイトがマルテンサイトに変化する、いわゆる加工誘起変態が深絞り性を向上させたと考えられる。これはマルテンサイト変態により材料が硬化する現象であるが、この硬化量は変形モードの影響を受け体積減少を起こす張出し変形では硬化が大きく、体積増加となる絞り変形では硬化が小さい⁹⁾。この硬化量の変形モード依存性が深絞り性の向上に寄与したものと思われる。

3.2 非軸対称成形性

3.2.1 成形限界ひずみ

直径50mm(肩半径5mm)の円筒ポンチを用いて長方形素板の張出しを行った。概略の成形条件を図10に示す。その際、試験片の板幅を変化させて得られた成形品破断部から試験片の長手方向ひずみ(大きい方の主ひずみ: ϵ_{major})と幅方向ひずみ(小さい方の主ひずみ: ϵ_{minor})を測定し、 ϵ_{major} 、 ϵ_{minor} を縦軸、横軸として成形限界線図FLD(Forming Limit Diagram)を作成した。ここで破断ひずみの測定には直径5mmのスクライブドサークルを用いた。また測定点が少ないので各点を結んで概略の成形限界線とした。

板面内異方性の調査に用いた各種純チタンと比較材のSPCEについて、試験片の長手方向を圧延方向に対して 0° 、 90° 方向として得られたFLDを図11に示す。図から明らかなように平面ひずみ変形域(図の縦軸)付近で成形限界ひずみが最小になっている。またSPCEでは 0° 、 90° 方向間でFLDの差はほとんどないが純チタンでは 0° 方向に比べ 90° 方向の成形限界ひずみが非常に大きい。FLDは材料の延性に支配されると考えられるので、図11のFLDを図6の引張り特性と比較すると、延性特性値である全伸び El 、均一伸び $u-El$ の板面内異方性とは全く対応しない。それに対して塑性異方性 r 値とは良く対応し r 値の高い 90° 方向でFLDが大きくなっている。

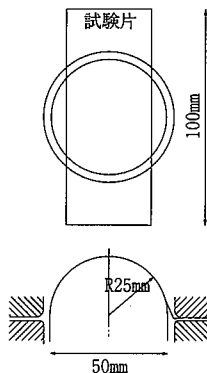


図10 平面ひずみ張出し試験

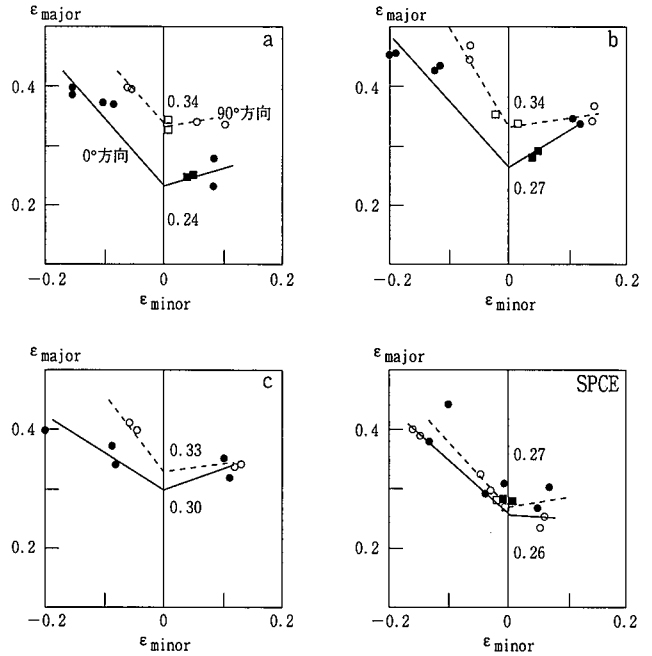


図11 成形限界ひずみ線図

3.2.2 平面ひずみ張出し

FLDを求める場合と同じ成形工具、成形条件における成形限界高さを測定した。成形限界ひずみの実験と同じ供試材について、縦軸に限界高さLDH(Limiting Dome Height)、横軸に試験片幅方向ひずみ ϵ_{minor} として作成した成形限界高さ線図の主な結果を図12に示す。図から明らかなように全ての材料の成形限界高さは平面ひずみ変形域(図の縦軸)付近で最小になっている。また平面ひずみ変形の成形限界高さ LDH_0 は、SPCEでは 0° 方向の値が 90° 方向の値にほぼ等しいが、純チタンでは 90° 方向の値が 0° 方向より10%程度大きい。 LDH_0 の方向による違いを図6の引張り特性と比較すると、図11のFLDの場合と同様、 LDH_0 は延性特性である全伸び El や均一伸び $u-El$ とは全く対応しないが r 値とは良く対応し、 r 値の高い 90° 方向で LDH_0 が大きくなっている。

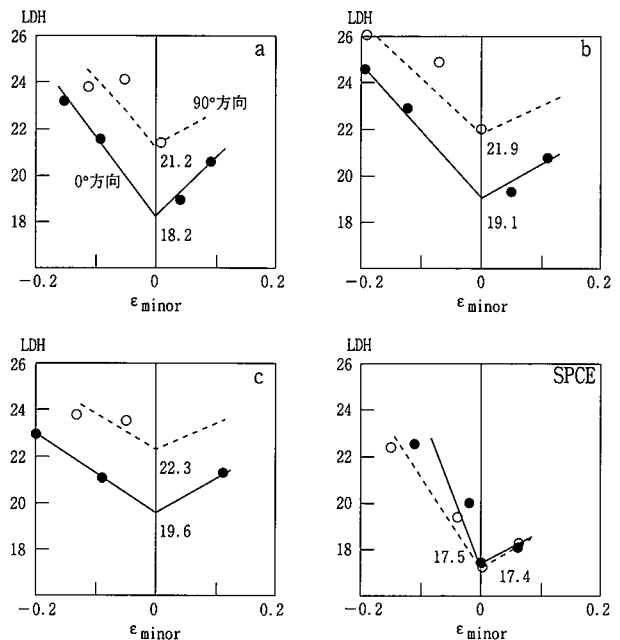


図12 成形限界高さ線図

3.2.3 成形性に及ぼすr値の影響について

曲げ成形は非軸対称成形の典型であるが、純チタン及びチタン合金の曲げ限界とr値との関係についていくつかの研究が行われている。それらを要約すると、(1)材料間では板面内平均r値が低いものほど曲げ性が良好であるが、(2)同一材料内の板面内異方性との対応に関してはr値の高い90°方向曲げ(90°方向の曲げひずみが最大)の方が曲げ性が優れていて、(1)、(2)で曲げ性とr値との対応が反対になっている。その理由としてすべり変形と双晶変形とがFLDを介して曲げ性に影響する機構が考えられている¹⁰⁾。しかし、各種の変形モードに対してそれらの要因がどのように影響するかなどについて十分明らかにされているわけではない。それゆえ加工硬化や変形集合組織などをも考慮した詳細な検討が必要である。

4. 今後の検討課題

プレス加工は材料、金型、成形条件の3要素から成立している。これまで純チタンの成形性を材料特性との関係から調べた結果は、a)予想外に良く絞れる、b)板面内の異方性が非常に大きい、c)プレス成績と引張り試験値とが対応しないことに要約された。チタンを扱う実プレス現場では金型や成形条件に多くの工夫が凝らされていて、それら要素技術の重要性が予想される。そこで、チタンの更なる利用拡大のために必要と思われる検討事項を以下に示す。

4.1 潤滑、型材質

純チタンの深絞りでは潤滑不良に起因する成形不具合が良く知られている。例えば低粘度潤滑剤を塗布した純チタン板をSKD11製平面工具で挟み、面圧を加えた状態で引抜き試験すると引抜き荷重に激しいセレーションが生じる。これは純チタン表面の酸化膜が引張り変形により破壊し、表面に露出した純金属が摺動により金型材料と接触して焼き付いたり滑ったりする現象と推定される。これは表面酸化膜、被加工金属、金型材料の間でなされる摺動と変形により焼き付きが生ずる現象であるが、純チタンでは他の金属に比べてその現象が顕著のようである。こうした現象を回避するため、a)焼き付きの起こりにくい潤滑剤の塗布、b)純チタンと金型との金属接触を防止するための樹脂フィルムの使用、c)純チタンとの凝着を起こしにくい金型材料の選択などが行われている¹¹⁾。しかし現状では潤滑剤の性能不足やプレス作業性の低下、型材摩耗などの問題があり、より優れた方法が求められている。

4.2 温度、成形速度と材料基盤

チタンは比較的低い温度で軟化するため、曲げ加工に200～300

℃程度の温度域での温間加工が利用されることがある。ただし純チタンでは200～400℃域での曲げ性劣化が知られていて双晶変形の温度依存性がその理由と考えられている¹⁰⁾。またチタン合金では500℃以上における超塑性的変形挙動を利用する絞り加工も実用化されている。

これらはいずれもチタンの延性不足を成形条件で補うものであるが、温度上昇による材料特性の変化は工具材料をも含めた材料と変形(または摺動)速度に強く依存するため、材料の基盤研究との連携が非常に重要である。

4.3 チタンに適した成形システムの研究

従来のプレス加工技術は主として鋼板を対象に構築されアルミ合金などの非鉄金属にも拡大してきたが、そうした材料加工システムは素材、加工設備、生産性に関わる経済性原理に基盤を置いている。しかし変形特性や材料価格が従来材料とは大きく異なり利用加工データも少ないチタンのような材料に関しては、生産性に難点があるものの材料の延性不足と摺動性不良を同時に解決できる液圧成形のような要素技術が有効である。

またチタンのように変形特性が十分解明されていない材料を複雑加工する場合には、互いに影響しあう材料、成形の両要因を統括管理し最適化する成形シミュレーション・システムが威力を発揮する。ところがそうしたシステムの開発に際して、特異な変形特性と表面特性を併せ持つチタンのような材料に既存の概念や手法をそのまま適用することには無理があり、新しい材料構成式の研究と材料データベースの構築が必要である¹²⁾。それらの研究はチタン材料の開発にも貢献するものと思われる。

参考文献

- 1) 北岡一泰:第17回塑性加工技術改善セミナー, 東京, 1998-3, 日本塑性加工学会
- 2) 日本チタン協会:チタンの加工技術, 初版, 東京, 日刊工業新聞社, 1996, p.9
- 3) 西川精一:金属工学入門, 初版, 東京, アグネ技術センター, 2001, p.375-377
- 4) 日本チタン協会:チタンの世界, 初版, 東京, 日本チタン協会, p.20
- 5) 吉田清太, 吉井康一, 小森田浩, 白田松男:塑性と加工, 11(114), 513-521(1970)
- 6) 吉田清太, 吉井康一, 白田松男, 渡辺肇:塑性と加工, 11(116), 670-675(1970)
- 7) 白田松男:第96回塑性加工シンポジウム, p.25-34, 1985
- 8) 中岡一秀:塑性と加工, 9(93), 718-728(1968)
- 9) 樋渡俊二, 白田松男, 片山知久, 高橋学:塑性と加工, 35(404), 1109-1114(1994)
- 10) 石山成志:プレス技術, 36(3), 77(1998)
- 11) 村田裕滋:チタン・ジルコニウム, 40(2), 81-86(1992)
- 12) 桑原利彦, 菊池正夫, 進藤卓嗣:第51回塑性加工連合講演会論文集, p.245-246, 2000