

純Tiの深絞り成形時の結晶方位変化 制御によるプレス成形性の向上

湘南工科大学 工学部 機械工学科

教授 稲垣裕輔

(研究開発助成 AF-97001)

1. 研究の目的

純Tiは耐食性、加工性がきわめて良好であるため、現在、魔法瓶、カップ容器類、熱交換器プレート、化学プラント部品、海水脱塩装置、医療関係、宇宙航空関係などに、広く使用されている。

しかしながら純Tiは最密六方格子を有し、塑性異方性が大きいために、プレス成形において、所定の寸法、形状を得るのにかなりの困難を伴う。とくに、もっとも一般的なプレス成形である円筒カップ深絞りにおいては、大きな耳が発生し、製品歩留まりの低下につながっている。このため、耳制御は大きな課題となっている。

一方、アルミニウムなど面心立方金属の場合、このような耳発生は、冷間圧延、焼鈍する場合に形成、発達する優先結晶配向、つまり集合組織と密接な関係にあることが知られており(1-3)、純Tiにおいても、耳発生は同様に集合組織に起因することは、十分推測されていた。

しかしながら、現在までのところ、純Tiに形成する集合組織のうち、どの様な方位成分が耳発生の原因になっているか、あるいは、どのような方位成分を発達させれば耳発生を抑制出来るか等、集合組織制御の指針はまったく得られていない。一般に、深絞り成形における耳発生に対しては、成形前に存在する集合組織と、成形過程においてこれら集合組織成分が結晶方位回転によって生ずる方位変化が重要支配因子であると考えられる。

本研究では、標準的な製造プロセスによって製造された商用純Ti薄板をもちいて、深絞り成形前に存在する集合組織と、深絞り成形後の耳高さを対比し、耳形成に大きく寄与する方位成分を同定した。次に、これらの方位について結晶塑性理論をもちいて、深絞り成形において形成する耳の高さを理論的に予測し、実測結果と最も良くあうモデルを探し出し深絞り成形において作動する塑性変形機構を考察した。

さらに、これらの結果にもとづいて、純Tiに形成する集合組織のうち、どのような方位成分を発達させれば耳発生を抑制出来るかを考察した。

2. 実験方法

供試材は厚さ1mmの商用純Ti (JIS 1種)である。この試料の集合組織をしらべるために50mm角のサンプルを切りだし、弗化水素酸と過酸化水素の混合水溶液をもちいて厚さ0.1mmまで薄くした。これらについて $\{1010\}$ (0001)、 $\{1011\}$ 、 $\{1012\}$ X線極点図を測定し、それらを

もとに三次元結晶方位分布関数 (ODF) を Roe (4) の方法で計算し集合組織の主方位を決定した。

供試材から直径105mm ϕ の円形素板を切り出した。これらを東京衡機製万能深絞り試験機によって円筒深絞り加工した。もちたポンチは直径50mm ϕ 、肩R5mm、ダイスは直径53mm ϕ 肩R8mm、ポンチスピードは0.3mm/secである。原板の圧延方向を基準にとり、この方向から種々の角度の位置で、得られたカップの縁の高さを測定した。

3. 理論計算の方法

面心立方金属、体心立方金属の場合、深絞りカップの耳の高さは、しばしば、Tuckerの理論 (1) によって計算されている。

しかしながら、この理論には種々の不備な点があるので (3)、本研究ではこれらに必要な修正を加えた上で、最密六方格子金属にも適用出来るよう拡張した。

理論計算にあたり、深絞り成形の途中にフランジ部に働く外部応力は、図1に示すように、円周方向の圧縮応力、 $-\sigma$ 、半径方向に働く引張応力 $+\sigma$ からなる2軸引張応力であると仮定する。ここで円周方向をあらわす単位ベクトルをT、半径方向をあらわす単位ベクトルRであらわすことにする。いま、この外部付加応力のもとで、あるすべり系が活動したとする。このすべり系のすべり面の法線が単位ベクトルn、すべり方向が単位ベクトルbであらわせられるとき、このすべり系に働く分解せん断応力は (1) 式で与えられる。

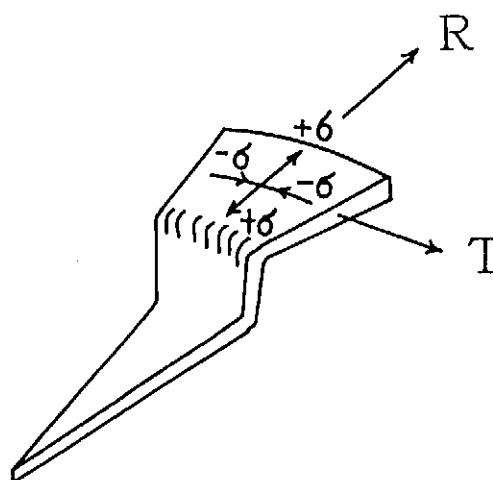


図1 深絞り円筒カップのフランジ部に働く外部応力

$$\tau = S \sigma = \{(R \cdot n)(R \cdot b) - (T \cdot n)(T \cdot b)\} \sigma \quad (1)$$

ここにSは定数である。この分解せん断応力のもとにこのすべり面上、すべり方向に誘起されるせん断歪は(2)式で与えられる。

$$\nu = kr^2 \quad (2)$$

さらに、このせん断歪によってフランジ部の半径方向に生ずる歪、つまり耳形成につながる歪 ϵ_r は次式

$$\epsilon_r = |\cos \phi| \cdot \nu \quad (3)$$

で与えられる。ここに、

$$\cos \phi = (n \cdot R) \quad (4)$$

である。(3)式に(1)式を代入すると次式をうる。

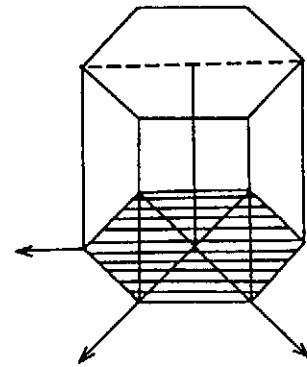
$$\epsilon_r = |(n \cdot R)| \cdot \{(R \cdot n)(R \cdot b) - (T \cdot n)(T \cdot b)\}^2 \cdot k \sigma^2 \quad (5)$$

もし、全部でN個のすべり系が同時に活動するとすれば、フランジ部の半径方向に生ずる歪は

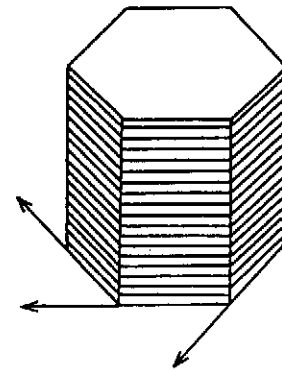
$$E(\alpha) \sum_{i=1}^N |(n_i \cdot R)| \cdot \{(R \cdot n_i)(R \cdot b_i) - (T \cdot n_i)(T \cdot b_i)\}^2 \quad (6)$$

で与えられる。

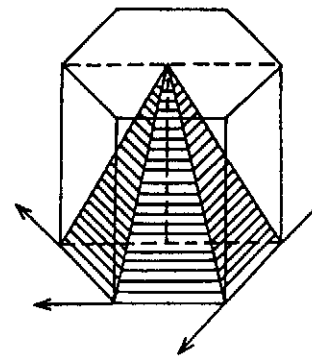
最密六方格子の金属において問題となるのはすべり系であって、図2に示すように(0001) <1210>底面すべり、{1010} <1210>プリズムすべり、{1011} <1210>ピラミッドすべりがある。本研究ではこれらのすべてが単独で、あるいは組み合わせられて活動する場合のすべてについて計算した。その場合、これらのすべり系の臨界せん断応力は同じと仮定した。また、純度の高いTiでは双晶変形も起こり得るがここでは双晶変形の寄与は無視した。すべての計算はパソコンによっておこなった。



(a) (0001) <1210>底面すべり



(b) {1010} <1210>プリズムすべり



(c) {1011} <1210>ピラミッドすべり

図2 純Tiのすべり系

4. 実験結果

(0002)、 $\{1010\}$ 、 $\{1011\}$ 、 $\{1012\}$ 極点図の測定結果から原板の集合組織をあらわす三次元結晶方位分布関数を計算した。各 ϕ 断面上の最大値を結んでえられたスケルトンラインを図3に示す。この図から $\{1013\}$ $\langle 1210 \rangle$ 方位が主方位であることが分かる。 $\{2115\}$ $\langle 0110 \rangle$ 方位もかなり強い。

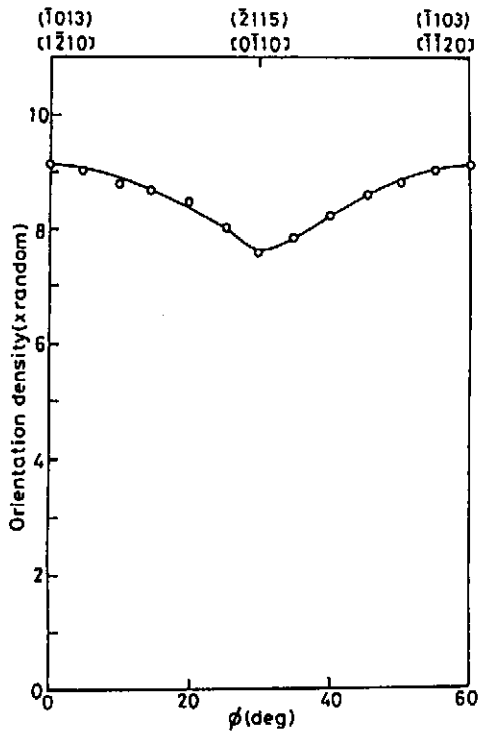


図3 原板の集合組織のスケルトンライン

図4に、絞り抜けたカップの外観を示す。このカップの縁の高さを原板の圧延方向を基準として、この方向から種々の角度で測定した。図5にこのようにして求めたカップ縁の高さを圧延方向からの角度に対してプロットして示す。最大値の部分が耳の頂点に相当するが、 45° 、 135° の位置に大きな耳の頂点が形成していることが分かる。これは、従来 45° 耳とよばれているものに相当している。一方、耳の谷は 0° と 90° の位置に形成しているが、 0° 方向のほうが 90° 方向より低いことが分かる。また、これらの耳の大きさは、Alや軟鋼で見うけられるものよりもはるかに大きい。

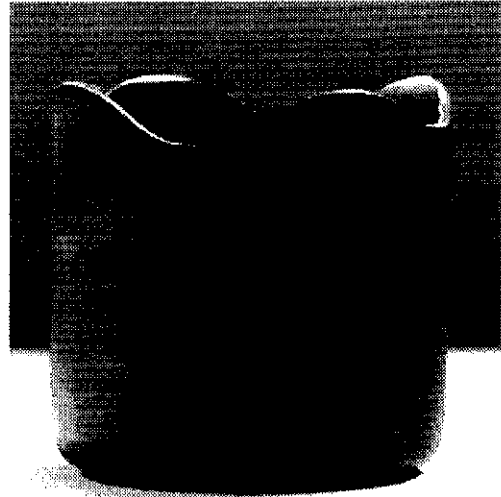


図4 絞り抜けたカップの外観

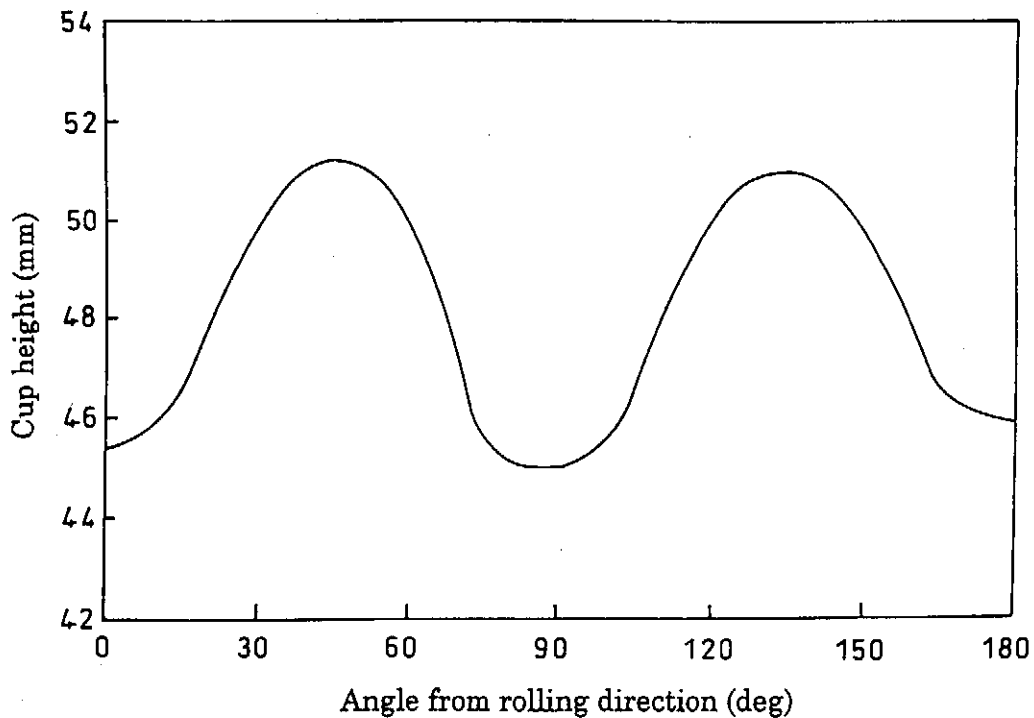


図5 圧延方向から種々の角度で測定したカップ縁の高さ

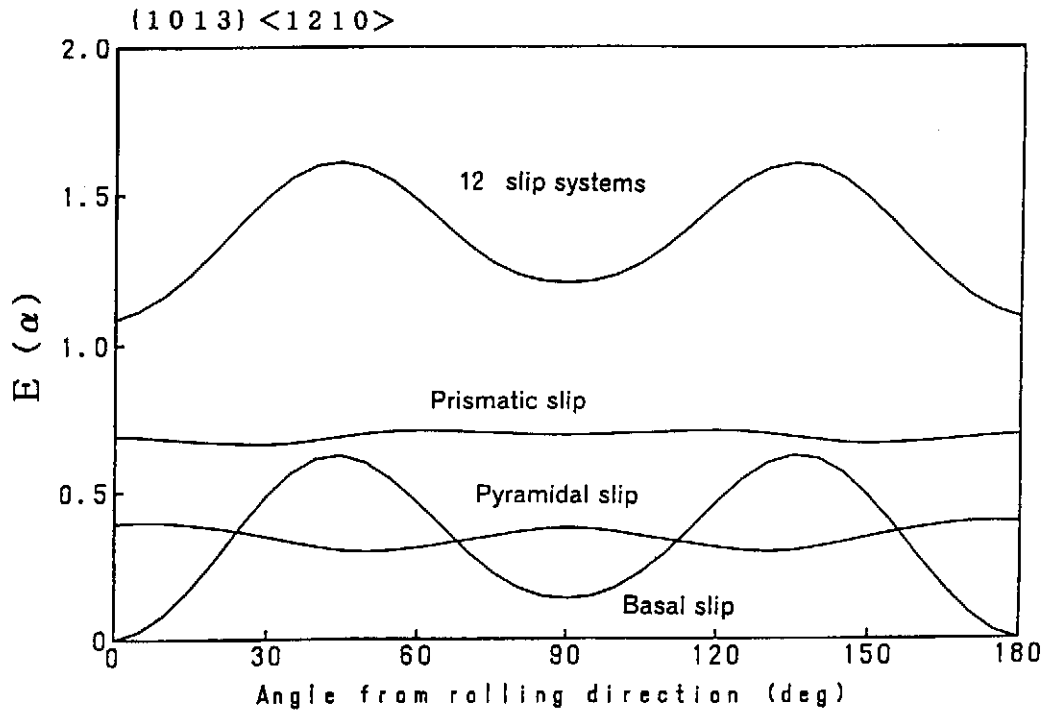


図6 $\{1013\} \langle 1210 \rangle$ 方位をもつ原板を深絞り成形した場合に生ずる耳の形状の理論計算結果

5. 理論計算の結果と考察

供試材の集合組織の $\{1013\} \langle 1210 \rangle$ 主方位について、 $(0001) \langle 1210 \rangle$ 底面すべり、 $\{1010\} \{1011\} \langle 1210 \rangle$ ピラミッドすべりが各々、単独に活動すると考えて耳の高さを計算した。計算結果を図6に示す。プリズムすべり、ピラミッドすべりを仮定した場合には大きな耳は生じない。大きな耳は、底面すべりの場合のみに生じ、しかも、実測された耳と同じく 45° 、 135° の位置に発生している。したがって、この試料における耳発生には、 $\{1013\} \langle 1210 \rangle$ を主方位とする集合組織と底面すべりによる変形が寄与していると推測できる。しかし、底面すべりには3つのすべり系しか存在しない。一方、一般に、多結晶体においては、結晶粒界における歪の連続性を保つためには、少なくとも、5個以上のすべり系が活動しなければならない。したがって、プリズムすべり系、ピラミッドすべり系に属するすべり系もそれぞれに働く分解せん断応力の大きさに比例して変形に寄与していると考えざるを得ない。

そこで、本研究では、これら12個のすべり系がそれぞれの分解せん断応力の大きさ、言い換えれば、シュミット因子の大きさに比例した歪を生ずると考えて計算を行った。その結果を同じく図6に示す。この計算結果は、図5に示した実測の耳形状とかなりよく一致している。

したがって、以上の計算結果から、標準的な製造プロセスで製造された商用JIS1種純Ti薄板において 45° 、 135° の位置に大きな耳を生ずる原因はこの板に存在する $\{1013\} \langle 1210 \rangle$ 集合組織と変形時における底面すべりの活動にあると結論できる。

したがって、純Tiの耳発生を抑するためには

(1) 底面すべりを抑制し、プリズムすべり、ピラミッドすべりを促進させる。

(2) $\{1013\} \langle 1210 \rangle$ 方位の発達を抑制する。

これら2つの対策が考えられる。

$\{1013\} \langle 1210 \rangle$ 方位は純Tiを 650°C 以上の高温で焼鈍した場合に発生する方位なのでそれ以下の温度で焼鈍すればそのをある程度抑制できる。

6. 結論

商用純Tiにおいて、顕著な 45° 耳を誘起するのは $\{1013\} \langle 1210 \rangle$ 方位である。耳発生を防止するためには 650°C 以下の温度域で再結晶焼鈍すればある程度、防止できる。根本的には、底面すべりを抑制することが望ましい。

7. 謝辞

本研究は天田金属加工機械技術振興財団の研究助成によりおこなわれたものであり、ここに財団に心からお礼申し上げます。

8. 文献

- (1) C.E.G.Tucker; Acta Metall.9 (1961) 275.
- (2) H.Inagaki; Zeit. Metallkde.82 (1991) 361.
- (3) H.Inagaki; Zeit. Metallkde.84 (1994) 494.
- (4) R.J.Roe; J.Appl.Phys. 36 (1965) 2024.