

# 結晶集合組織を考慮した弾 / 結晶粘塑性有限要素法による 深絞り加工の解析

## Elastic/Crystalline Viscoplastic Finite Element Analysis of Deep Drawing with Consideration of Texture Structure

森本 秀夫\*  
Hideo Morimoto

仲町 英治\*2  
Eiji Nakamachi

**概 要** 薄板のプレス加工の中でも最も広く用いられる深絞り加工の際に現れる特異な現象として耳の発生があり、材料の異方性がその要因である。このような異方性を考慮して素材の特性を最大限に発揮させ、あるいはその悪影響を軽減させる集合組織制御技術が重要となるが、この手段として有限要素解析が用いられつつある。

本研究では、筆者らが開発した、結晶塑性理論を塑性加工解析に直接適用するという手法を用いた弾 / 結晶粘塑性有限要素法を、アルミニウム合金板材の深絞り加工に適用した。

解析モデルにいくつかの結晶方位を与えて耳の発生状態と集合組織との関係について解析を行い、材料の引張り試験結果に基づく推察と一致する妥当な解析結果を得た。

### 1. はじめに

薄板のプレス加工の中でも、深絞り加工は最も広く用いられている手法であり、板材からの立体化成形の中で最も重要な位置を占める。絞り成形を主体とした製品は非常に多く、自動車ボディ、家電器具、厨房器具など多くの分野にみられる。

この絞り加工の際に現れる最も特異な現象はしわと耳の発生である。耳は、絞った製品の上縁に生じる凹凸で、素材の圧延加工に伴う結晶方位の偏り、すなわち集合組織によって生じる異方性が原因であり、その種類や程度によって45°耳(素材圧延方向に対して45°方向に生じる合計4つの耳状突起)、あるいは0/90°耳(素材圧延方向及びそれと直角な方向に生じる合計4つの耳状突起)などとなる。

近年、耳あるいはくびれの発生を抑えた超成形能を有する板材料開発のための結晶制御技術の開発が進んでいる。そこで、筆者らは結晶構造を基に構成される数理モデルを用いた有限要素解析手法の開発及びその実成形への適用<sup>1)~2)</sup>を行ってきた。

従来、有限要素解析において、異方性は降伏曲面の変化としてモデル化され、Hillの降伏関数<sup>3)</sup>を始めとして種々提案されている。しかし、それらが有効なのは、比較的負荷履歴が単純で、異方性パラメータが大きく変化しない場合である。異方性の变形依存性を考慮した降伏曲面モデルの展開は、多くの困難さを抱えていると考える。

そこで本研究では、降伏関数を決定するという間接的なアプローチではなく、結晶塑性理論を塑性加工解析に直接適用するという手法を用い、その上で解析モデルにいくつかの結晶方位

を与えて弾 / 結晶粘塑性有限要素解析を行い、深絞り加工における集合組織の影響について調査した。

### 2. 弾 / 結晶粘塑性構成式

すべり系(a)において、結晶で定義されるすべり面に対する単位法線ベクトルを $m^a$ 、すべり方向の単位ベクトルを $s^a$ とする。

これらのベクトルは、変形に伴い回転する。そこで、変形後のベクトルを $m^{*a}$ 、 $s^{*a}$ とすると、変形速度こう配テンソル $L$ 、変形速度テンソル $d$ 及び連続体スピンテンソル $w$ は、次式のように表せる。

$$L = d + w \quad (1)$$

$$d = d^* + d^p, \quad w = w^* + w^p \quad (2)$$

$$L^p = d^p + w^p = \sum_a \dot{\gamma}^a s^{*a} m^{*a} \quad (3)$$

ここで、添字“\*”は格子の伸びと回転の成分、添字“p”はすべりの成分、 $\dot{\gamma}^a$ はすべり系(a)のせん断ひずみ速度をそれぞれ表す。

変形速度テンソルの塑性部分 $d^p$ 及びスピンテンソルの塑性部分 $w^p$ は、次式のようになる。

$$d^p = \sum_a P^a \dot{\gamma}^a, \quad w^p = \sum_a W^a \dot{\gamma}^a \quad (4)$$

ここで、

$$2P^a = s^{*a} m^{*a} + m^{*a} s^{*a}, \quad 2W^a = s^{*a} m^{*a} - m^{*a} s^{*a} \quad (5)$$

結晶のすべり変形によって、弾性構成関係式は影響を受けないとする、速度型の構成式は次式のようになる。

$$\dot{S}^* = D^e : d^* \quad (6)$$

\* 研究開発本部 横浜研究所 材料基盤技術センター 第1研究グループ

\*2 大阪工業大学 機械工学科 材料力学研究室

ここで、 $\hat{S}^*$  は客観性を持つ Kirchhoff 応力の共回転速度である。

連続体スピンテンソル  $w$  を用いて得られる Jaumann 速度  $\hat{S}$  を採用した速度形構成式は、次のように求めることができる。

$$\hat{S} = \hat{S}^* - \sum_{a=1}^N \beta^a \dot{\gamma}^a = D^e : d^* - \sum_{a=1}^N R^a \dot{\gamma}^a \quad (7)$$

ここで、 $N$  はすべり系の数であり、 $R^a$  は次式で表される。

$$R^a = D^e : P^a + \beta^a, \quad \beta^a = W^a \cdot \sigma - \sigma \cdot W^a \quad (8)$$

さらに、Cauchy 応力の速度  $\dot{\sigma}$  は、次式のようにになる。

$$\dot{\sigma} = \hat{S} - \sigma \operatorname{tr} L + w \cdot \sigma - \sigma \cdot w \quad (9)$$

ひずみ速度依存性の結晶すべりモデルにおいては、結晶のすべり系 ( $a$ ) におけるせん断ひずみ速度  $\dot{\gamma}^a$  は、次式に示すすべり面上の Schmid の分解せん断応力  $\tau^a$  と現在の变形状態の内部構造の変化によって決まるパラメータにより決定される。

$$\tau^a = s^{*a} \cdot \sigma \cdot m^{*a} = P^a : \sigma \quad (10)$$

せん断ひずみ速度  $\dot{\gamma}^a$  に対する構成式としては、次に示す Hutchinson<sup>4)</sup>、Pan-Rice<sup>5)</sup> の指数則粘塑性構成式を採用する。

$$\dot{\gamma}^a = \dot{a}^a \left[ \frac{\tau^a}{g^a} \right] \left[ \left| \frac{\tau^a}{g^a} \right| \right]^{\frac{1}{m}-1} \quad (11)$$

ここで、 $\tau^a$ 、 $g^a$  及び  $\dot{a}^a$  は、それぞれすべり系 ( $a$ ) の分解せん断応力、基準せん断応力及び基準せん断ひずみ速度、 $m$  はひずみ速度感度指数である。せん断ひずみがゼロの時、 $g^a$  は臨界分解せん断応力  $\tau_0$  であるとした上で、 $g^a$  に対して次に示す硬化発展方程式を採用する。

$$\dot{g}^a = \sum_{b=1}^N h_{ab} \dot{\gamma}^b \quad (12)$$

ここで、 $h_{ab}$  は  $\gamma$  の関数であり、次式を用いる。

$$h_{ab} = h(\gamma) q_{ab} \quad (13)$$

$$h(\gamma) = h_0 n C \{C(\gamma_0 + \gamma)\}^{n-1} \quad (14)$$

ここで、 $h_0$  は初期硬化率、 $C$  は硬化係数、 $n$  は硬化指数、 $\gamma_0$  は初期せん断ひずみである。また  $q_{ab}$  は潜在硬化の大きさを表すパラメータであり、次式のように表される。

$$q_{ab} = \begin{bmatrix} C & L_1 & L_2 & L_3 \\ L_1 & C & L_3 & L_2 \\ L_2 & L_3 & C & L_1 \\ L_3 & L_2 & L_1 & C \end{bmatrix} \quad (15)$$

ここで、

$$C = \begin{bmatrix} 1 & q_c & q_c \\ q_c & 1 & q_c \\ q_c & q_c & 1 \end{bmatrix}, \quad L_1 = \begin{bmatrix} q_v & q_l & q_l \\ q_l & q_c & q_l \\ q_l & q_l & q_v \end{bmatrix}$$

$$L_2 = \begin{bmatrix} q_c & q_l & q_l \\ q_l & q_v & q_l \\ q_l & q_l & q_c \end{bmatrix}, \quad L_3 = \begin{bmatrix} q_v & q_l & q_l \\ q_l & q_v & q_l \\ q_l & q_l & q_c \end{bmatrix}$$

であり、 $q_c$  はすべり系同士が同一面内または同一方向、 $q_v$  はすべり系同士が直交、 $q_l$  はその他の場合である。 $q_c$ 、 $q_v$  及び  $q_l$  の値は、アルミニウム合金の場合、それぞれ 1.0、1.2 及び 1.3 である<sup>6)</sup>。

### 3. 弾 / 結晶粘塑性有限要素解析

上述のようなせん断ひずみ速度依存の構成式及び  $n$  乗則硬化発展方程式を用いて、弾/結晶粘塑性モデルを構築した。3次元 8 節点アイソパラメトリック要素の積分点に、結晶方位を割り振る、“直接結晶”モデル<sup>7)</sup>を採用した。

また本解析では、純アルミニウムの結晶方位分布解析及び引張り試験結果を用い、単軸引張り過程の有限要素解析結果とそれらを比較することによりパラメータ同定し、材料特性を決定した。

#### 3.1 材料モデル

異方性が関係する塑性加工問題の解析を行う場合、材料試験によって降伏関数を求め、連続体塑性論によって解析を行うという手法がある。しかし、異方性を直接的に結晶方位分布という形で導入した結晶モデルを用いて解析すれば、変形による異方性の進展も自動的に考慮できる。本研究では、以下に示す材料モデルに、幾つかの結晶方位分布を与えて解析を行った。

アルミニウム板材を円筒深絞り成形する場合の適度な絞り比 ( $\beta = 1.6 \sim 2.0$ ) を考慮に入れて、1) 直径 80mm、板厚 1mm のアルミニウム板 ( $\beta = 2.0$ )、及び 2) 直径 64mm、板厚 1mm のアルミニウム板 ( $\beta = 1.6$ ) を使用した。また、圧延方向に関する対称性を考慮して、上述のアルミニウム板の 1/4 の部分を解析対象とした。図 1 に解析で用いた材料モデルを示す。要素分割は個々の要素の有効長さがほぼ同じになるようにし、板厚方向の分割数は 1 とし、総要素数は上述の 1)、2) の場合について 1200 及び 768、総節点数はそれぞれの場合について 2522 及び 1634 である。両モデルとも、圧延方向を  $y$  軸方向、板厚方向を  $z$  軸方向にとり、 $x$  軸に平行な面を  $y$  軸方向に拘束し、 $y$  軸に平行な面を  $x$  軸方向に拘束した。解析に用いる種々の材料パラメータは、上述のように純アルミニウム (1050-O 材) の引張り試験結果を用いて同定し、表 1 に示すようである。

#### 3.2 工具

絞り加工に用いる工具としては、図 2 に示すような円筒ポンチ及びダイスを想定した。

#### 3.3 解析条件

上述のような材料モデル及び工具を用い、材料モデル 1)  $\beta = 2.0$  の場合は、ポンチ速度 2m/s、2)  $\beta = 1.6$  の場合は 0.5m/s とし解析を行った。この際、素材の集合組織の影響を調査するため、上述の各条件について、以下の 3 種類の集合組織を想定して解析を行った。

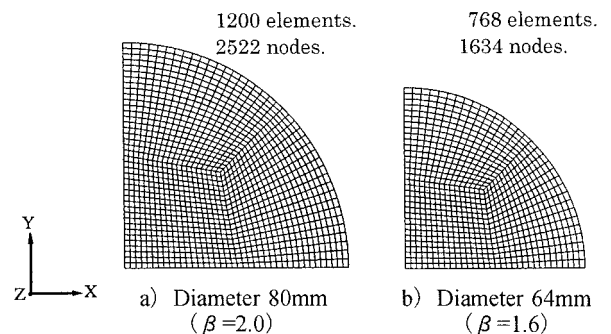


図 1 解析モデル  
Analytical models

- a) Cube type( 単結晶 ,( 100 ][001] 方位 )
- b) Brass type( 単結晶 ,( 110 ][1 $\bar{1}$ 2] 方位 )
- c) Copper type( 単結晶 ,( 121 ][1 $\bar{1}$ 1]方位 )

これらの集合組織について、それぞれの{111}極点図を後に示す図5中に示す。

#### 4. 解析結果及び考察

##### 4.1 耳の発生形態及び板厚ひずみ分布

図3に、絞り比 $\beta = 1.6$ で、素材の集合組織がBrass typeの場合についての、絞り加工過程における変形状態の解析結果を、また図4には、 $\beta = 2.0$ で、集合組織がCube typeの場合についての板厚ひずみ分布の解析結果を示す。またこれらの解析結果から、図5に $\beta = 2.0$ の場合の、ポンチ変位約30mmの時点における板厚ひずみ分布、及び $\beta = 1.6$ の場合の、ポンチ変位28mmの時点における変形状態の解析結果を示す。なお同図には、上述の3つの素材集合組織の{111}極点図を示してある。解析においては、図5中に示したような結晶方位分布を用いた。

さらに、絞り加工後の材料の円周方向位置による変形すなわち耳の相違を明確に把握するため、図6に $\beta = 2.0$ の場合について、素材の圧延方向からの角度を横軸に、その方向の絞り製品のフランジ半径を縦軸にとって、ポンチ変位27mmの時点におけるフランジ縁部の変形状態を示す。また同様に図7には、 $\beta = 1.6$ (素材の直径が小さいため、絞り製品にフランジができない)の場合について、絞り製品縁部の高さを縦軸にとり、ポンチ

表1 材料パラメータ  
Material parameters

|            |                                                                  |                      |
|------------|------------------------------------------------------------------|----------------------|
| 材 質        |                                                                  | 1050-O               |
| 縦弾性係数      | $E$ / GPa                                                        | 70.3                 |
| 密 度        | $\rho$ / $\text{MPa} \cdot (\text{mm} \cdot \text{s}^{-1})^{-2}$ | $2.7 \times 10^{-7}$ |
| 異方性パラメータ   | $c_{11}$ / GPa                                                   | 98.882               |
|            | $c_{22}$ / GPa                                                   | 60.662               |
|            | $c_{44}$ / GPa                                                   | 28.224               |
| ポアソン比      | $\nu$                                                            | 0.345                |
| 摩擦係数       | $\mu$                                                            | 0.1                  |
| 初期基準せん断応力  | $\tau_0$ / MPa                                                   | 10.0                 |
| 初期硬化率      | $h_0$ / MPa                                                      | 37.0                 |
| 基準せん断ひずみ速度 | $\dot{\alpha}$ / $\text{s}^{-1}$                                 | 0.01                 |
| ひずみ速度依存指数  | $m$                                                              | 0.07                 |
| 加工硬化指数     | $n$                                                              | 0.33                 |

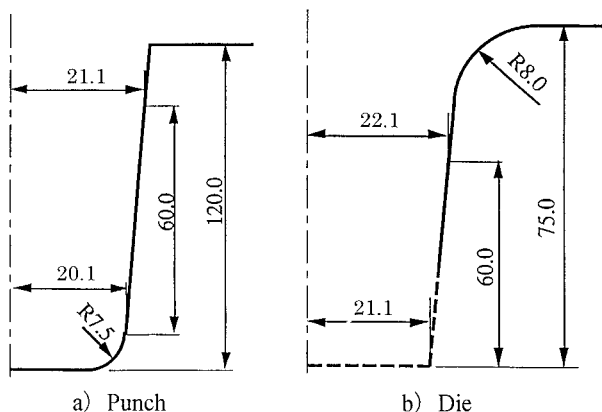


図2 工具データ  
Tool data

変位28mmの時点における製品縁部の変形状態を示す。

図6及び図7より、素材の集合組織がCube typeの場合は、素材の圧延方向から45°付近の材料が最も変形量が大きく、ダイキャビティ内によく流れ込んでおり、0°、90°方向では材料がダイキャビティ内に流れ込みにくい傾向がみられる。一方、Brass type及びCopper typeについては、これと逆に0°、90°方向近傍の材料が最もよくダイキャビティ内に流れ込む傾向であり、素材の集合組織により変形状態に著しい違いがみられる。これらの傾向に関しては、次節で考察する。

##### 4.2 絞り製品の変形状態と素材の引張り試験結果との比較

上述のような解析結果と、素材の機械的特性との関係について調査するため、アルミニウム合金5052及び5182のO材について、単軸引張り試験を行い、応力～ひずみ関係を求めた。単軸引張り試験においては、JIS 5号引張り試験片を用い、一般的な絞り加工時のひずみ速度とほぼ同等となるような引張り速度で試験を行った。

単軸引張り試験の試験片の材質は、5052-300、5052-12及び5182-12(ここで、材料名の後に示した数値は平均結晶粒径(単位 $\mu\text{m}$ )としたが、これらの材質について試験を行った理由は、下述のような極点図の測定結果による。

図8に、これら3種類のアルミニウム合金板材について測定した{111}極点図を示す。これら極点図をみると、5052-12はBrass type、また5182-12はCopper typeに近いことがわかる。5052-300は、結晶粒径が300 $\mu\text{m}$ と大きいため、優先方位が判別できるほどの方位分布が現れていない。しかし、中程度の冷間圧延後に焼鈍(再結晶)を行うと、Cube typeの集合組織が現れるという報告<sup>8)</sup>と、また結晶粒径が大きければ熱処理の影響が顕著に現れると考えられることから、5052-300はCube typeに近い材料であると判断する。

これらより、材料としては異なるが、集合組織の観点から、

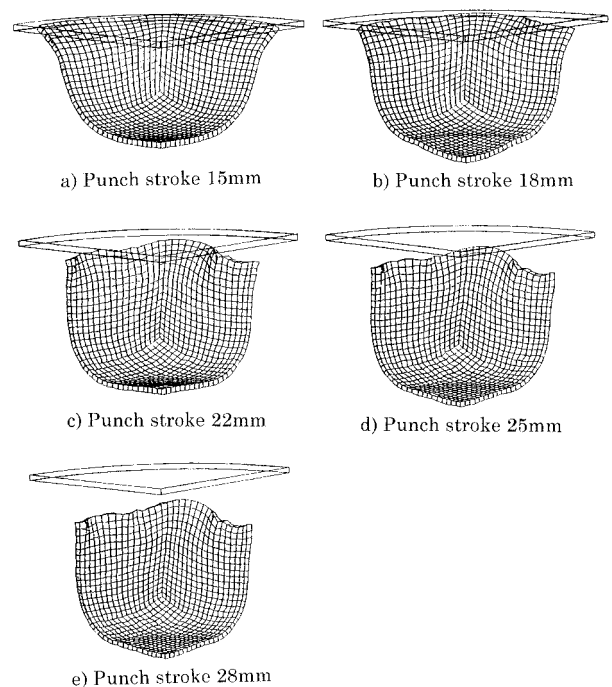


図3 変形形状 (Brass type,  $\beta = 1.6$ . 輪郭線は変形前の素材を表す)  
Deformed shape (Brass type,  $\beta = 1.6$ . The outline presents blank before deformation)

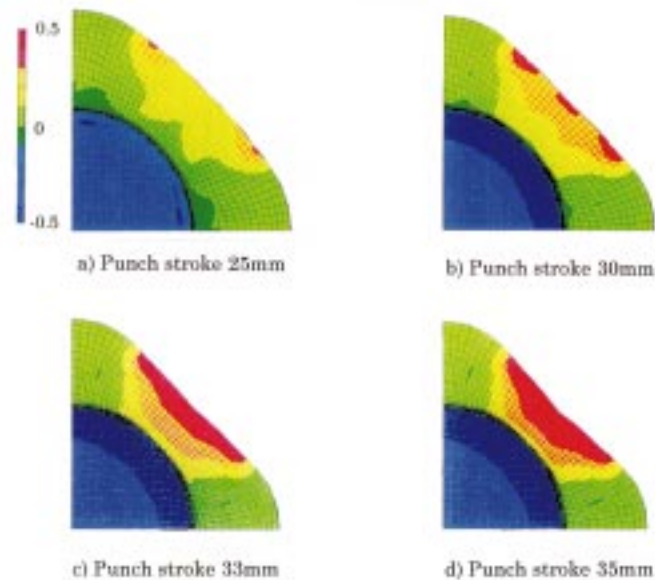


図4 板厚ひずみ分布 (Cube type,  $\beta = 2.0$ )  
Thickness strain distribution (Cube type,  $\beta = 2.0$ )

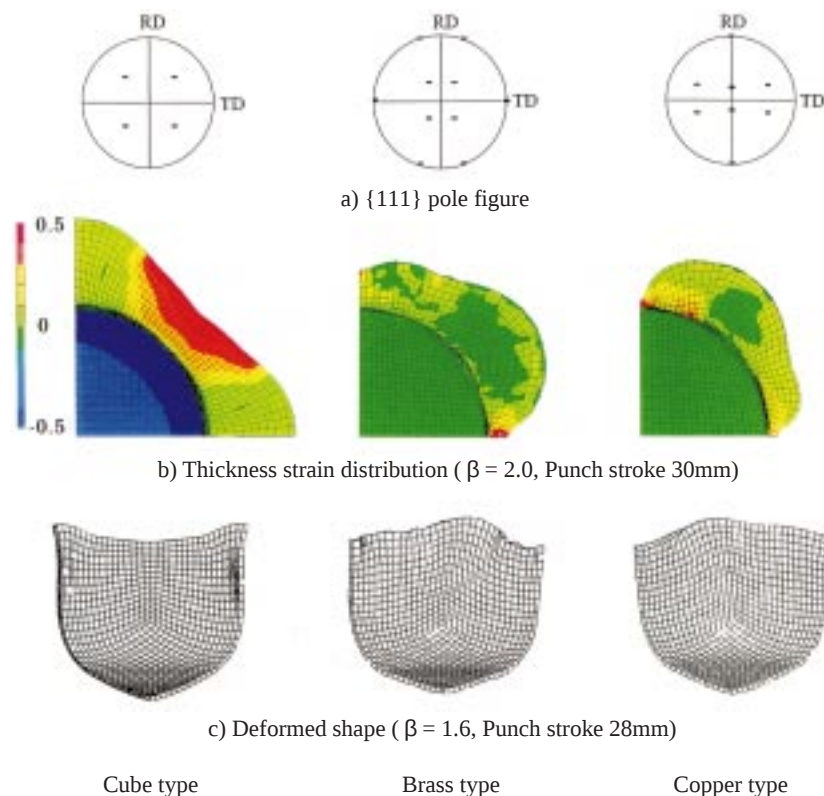


図5 板厚ひずみ分布および変形形状  
Thickness strain distribution and deformed shape

5052-300, 5052-12及び5182-12を,それぞれ上述の3種類の集合組織 a)Cube type, b)Brass type, 及び c)Copper type に近いと考えることにする。

これら3種類のアルミニウム合金板材の,圧延方向材,圧延直角方向材及び45°方向材 引張り方向を,それぞれ圧延方向,直角方向及びそれらと45°方向として採取した試験片 )について単軸引張り試験を行って求めた応力～ひずみ関係を図9に示す。応力～ひずみ関係をみると,集合組織がCube typeに近い

5052-300では45°方向材が最も破断ひずみが小さく,強度が高い。一方,Brass typeに近い5052-12及びCopper typeに近い5182-12では,45°方向材が破断ひずみが大きく,圧延方向材及び圧延直角方向材が45°方向材よりも強度が高くなっている。

これら引張り試験の結果から,円筒深絞り加工を行う際の製品の変形挙動を推測すると以下ようになる。5052-300(Cube type)では45°方向の強度が高いため,その方向に材料が伸び

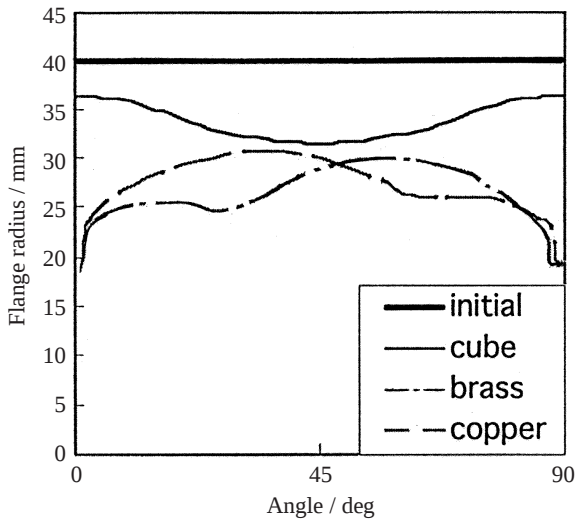


図6 フランジ半径と圧延方向からの角度との関係  
( $\beta = 2.0$ , ポンチ変位 27mm)  
Relationship between flange radius and  
angle from rolling direction ( $\beta = 2.0$ , Punch  
stroke 27mm)

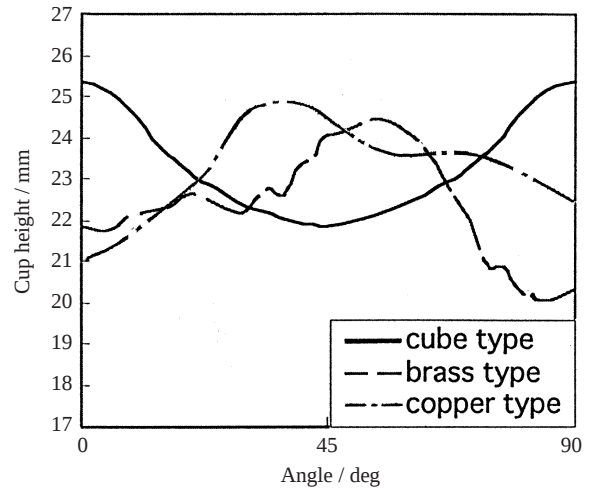


図7 壁の高さと圧延方向からの角度との関係  
( $\beta = 1.6$ , ポンチ変位 28mm)  
Relationship between wall height and angle  
from rolling direction ( $\beta = 1.6$ , Punch  
stroke 28mm)

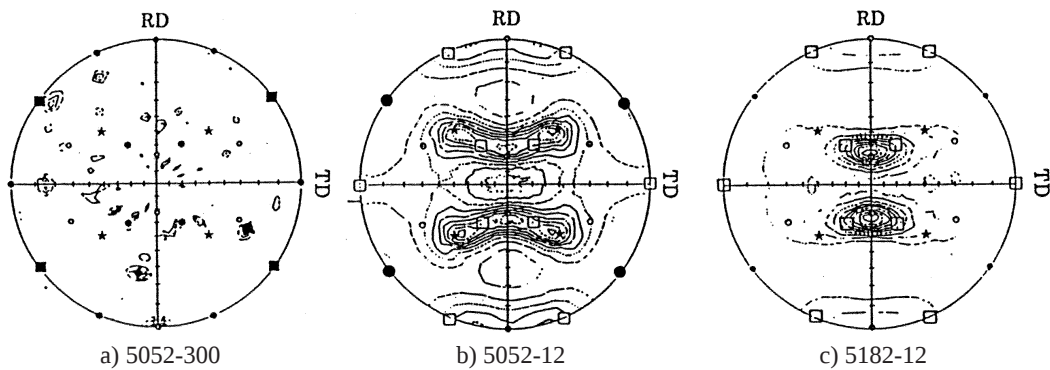


図8  $\{111\}$ 極点図  
 $\{111\}$  pole figure

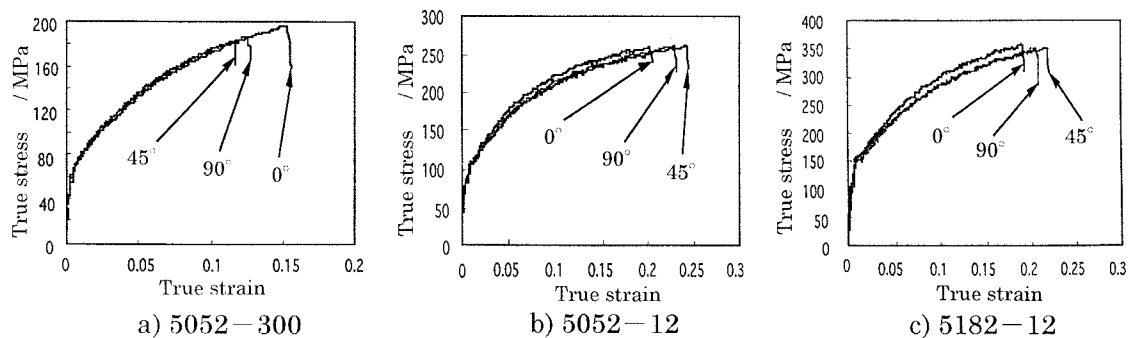


図9 真応力～真ひずみ関係  
Relationship between true stress and true strain

ずに、ダイキャビティ内に引きずり込まれるが、圧延方向( $0^\circ$ )、及び圧延直角方向( $90^\circ$ )では材料が伸びやすいため、 $0^\circ$ 及び $90^\circ$ 方向に耳状突起が生じ、すなわち $0/90^\circ$ 耳が形成されると推測できる。一方、5052-12( Brass type)及び5182-12( Copper type)では、逆に $0^\circ$ 及び $90^\circ$ 方向の強度が $45^\circ$ 方向よりも高いため、それらの方向で材料がダイキャビティ内に引きず

り込まれ、 $45^\circ$ 方向が伸びやすいため、 $45^\circ$ 方向に耳状突起が生じ、すなわち $45^\circ$ 耳が形成されると推測できる。

これらの、素材の引張り試験結果から得られる推測結果は、上述の解析結果と一致するものであり、本研究の解析結果は妥当なものであると考える。

## 5. おわりに

従来の塑性ポテンシャル論と異なり，結晶すべりという素過程に基づいて導出された結晶塑性理論を用いて異方性発展を記述する構成式を採用した，筆者らによる弾／結晶粘塑性有限要素解析手法をアルミニウム合金板材の深絞り加工に適用した。

深絞り製品の変形状態に対する素材の集合組織の影響について調査し，以下の結論を得た。

(1) 素材の集合組織として Cube type, Brass type 及び Copper type の 3 種類を想定し，円筒深絞り加工の解析を行ったところ，素材の集合組織が Cube type の場合は  $0/90^\circ$  耳が形成され，Brass type 及び Copper type の場合は  $45^\circ$  耳が形成される傾向となった。

(2) 上述の解析結果は，素材の引張り試験結果から推測される結果と一致しており，本解析結果は妥当なものであると考える。

今後，この解析手法を高成形能アルミニウム合金の開発に適用していきたい。

## 参考文献

- 1) 森本秀夫，仲町英治：48 回塑加連講論，(1997)，79.
- 2) 森本秀夫，仲町英治：平 10 春塑加講論，(1998)，241.
- 3) R.Hill: Mathematical Theory of Plasticity, Oxford Press, (1950), 332.
- 4) J.W.Hutchinson: Proc. R. Soc. London, Ser.A, 384 (1975), 101.
- 5) J.Pan and J.R.Rice: Int. J. Solids Struct, 19-11 (1983), 973.
- 6) Y.Zhou, K.W.Neal and L.S.Toth: Int. J. Plasticity, 9 (1993), 961.
- 7) E.Nakamachi and X.Dong: Engineering Computations, 13-2/3/4 (1996), 327.
- 8) 伊藤邦夫：軽金属，43-5 (1993)，285.