

# アルミ板材の成形性シミュレーション

前田恭志\*・服部重夫(工博)\*・林田康宏\*・柳川政洋(工博)\*\*・松井邦昭\*\*\*・吉澤成則\*\*\*

\*技術開発本部・生産技術研究所 \*\*技術開発本部・材料研究所 \*\*\*アルミ銅事業本部・アルミ板研究部

## Numerical Simulations for Formability of Aluminum Alloy Sheet with a Crystallographic Texture

Yasushi Maeda・Dr .Shigeo Hattori・Yasuhiro Hayashida・Dr .Masahiro Yanagawa・Kuniaki Matsui・Nariyoshi Yoshizawa

Crystallographic texture is an important factor for formability .To produce aluminum alloys with high formability, it is necessary to understand the qualitative relationships between process conditions and texture , as well as texture and formability . To this end , we have developed total numerical simulators which can predict deformed textures during cold rolling ,and ,plastic anisotropy textures ,and anisotropic yeild functions and strain during the press forming process . These simulators can be used successively , and are capable of predicting the relation between the production process and the forming process by making use of crystallographic texture .

まえがき = 近年、自動車軽量化の動きが活発化し、自動車パネル材へのアルミ板の適用が本格化してきた。このパネル材には成形性に優れたアルミ板が望まれている。高成形性アルミ板の開発には、材料要因のみならず成形技術の観点からの技術開発が必要である。材料開発においては、伸び・強度を決める主要因である合金成分以外に集合組織の制御が重要な役割を果たすことが知られている<sup>1)</sup>。このために、温間圧延<sup>2)</sup>、クロス圧延<sup>3)</sup>およびせん断付加圧延<sup>4)</sup>などによる集合組織制御の実験的アプローチがおこなわれるとともに、数値計算による集合組織予測技術も進歩を遂げている<sup>3)5)~10)</sup>。 いっぽう、成形技術の観点からは、成形における異方性と集合組織に注目し、実験的な成形限界と集合組織<sup>11)</sup>、材料異方性を取り入れた成形シミュレーション<sup>12)~17)</sup>などの研究も活発におこなわれている。さらに、近年は成形シミュレーションに集合組織を直接考慮することにより最適な集合組織を求めようとする研究も試みられている<sup>18),19)</sup>。しかしながら、実験のおよび数値解析によるアプローチとも系統的におこなわれていないため、いまだに成形性と製造条件の定量的な関係は明らかになっていない。

著者らは数値シミュレーションを基本にし、製造条件と成形性の関係を明らかにする目的で、統合シミュレーション技術を開発したので以下に報告する。

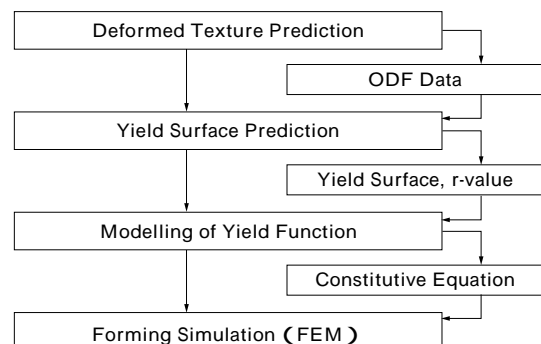
### 1. 統合シミュレーションの概要

板成形性を左右する異方性は集合組織と深く関わっている。このために、著者らは1次加工である圧延から2次加工である板成形までをシミュレートするモデルを提案した(第1図)。圧延中には、変形により変形集合組織が発達する。この変形集合組織は、主に初期集合組織(熱間圧延あるいは熱処理後の集合組織)と冷間圧延の圧下率によって決まる。したがって、圧延集合組織予測モデルでは、初期集合組織と圧延条件(圧下率、圧延ロール径、摩擦係数など)を入力とし、圧延後の集合組織をODF(Orientation Distribution Function)データ<sup>20)</sup>として予測する。

次に、この集合組織(ODFデータ)をもとに変形異方性を予測する必要がある。このため、降伏曲面予測モデルでは、集合組織を入力とし、変形異方性である降伏曲面およびr値の板面内分布を予測する。次に、成形シミュレーション<sup>14)</sup>をおこなうために、有限要素法に変形異方性を導入する必要がある。このために、降伏曲面とr値の板面内分布から降伏関数のパラメータを決定<sup>16)</sup>した。最後に、降伏関数と実験により求めた加工硬化式から構成方程式を決定し、有限要素法に組み込むことにより、実成形条件である金型形状、摩擦係数などの考慮を可能とした。

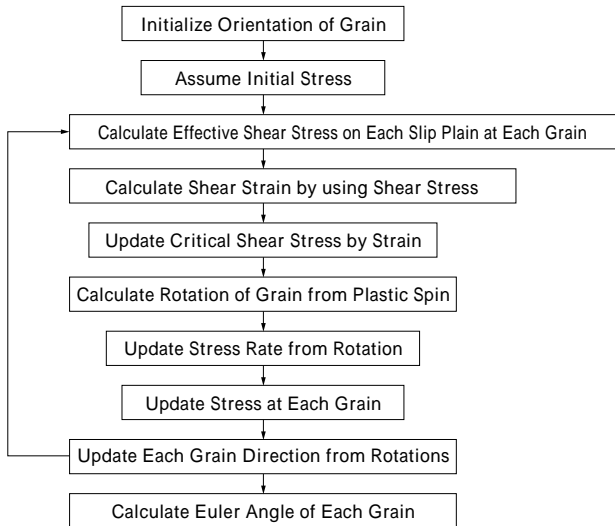
### 2. 圧延集合組織予測モデル

変形集合組織の予測モデル<sup>21)</sup>は古くから提案されており、近年はFEMをもちいた集合組織予測計算も可能となっている<sup>3)</sup>。筆者らは、集合組織分布の計算が可能であり、比較的計算時間が短いAsaroら<sup>5)</sup>による歪み速度依存型結晶粘塑性モデルをもちいた。圧延集合組織の予測モデルは結晶粘塑性モデルによって各結晶粒の回転を計算する部分と結晶粘塑性モデルに与える歪み速度分布を計算するための圧延の三次元定常解析部分に分かれている。結晶粘塑性モデルの計算フローを第2図に示す。結晶粘塑性モデルでは、与えられた初期集合組織に対して、外から与えられた速度場における応力増分と結晶回転を求める。このとき、すべり系に作用する歪み速度と



第1図 統合シミュレーションの概念図

Fig. 1 Schematic figure of total simulation



第2図 集合組織の計算アルゴリズム  
Fig. 2 Flow chart of deformed texture prediction

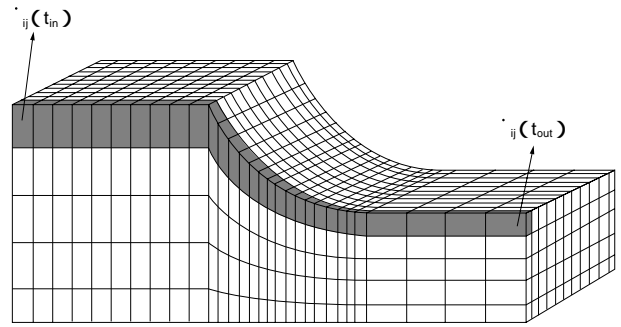
応力の関係を、すべり系に働くせん断応力とせん断歪み速度 $\dot{\gamma}(\cdot)$ として以下の関係式で与える。

$$\dot{\gamma}(\cdot) = \dot{\gamma}_0 \left[ \frac{\tau(\cdot)}{g(\cdot)} \right] \frac{\tau(\cdot)}{g(\cdot)} \left( \frac{1}{m} - 1 \right) \dots\dots\dots (1)$$

ここで、 $\dot{\gamma}_0, m, g(\cdot)$ は定数である。いっぽう、各結晶粒ごとに計算された結晶回転をオイラー角として求め、その頻度分布から集合組織をODFとして求める。

他方、圧延現象と組み合わせるため、三次元定常圧延解析によって結晶粘塑性モデルに与える歪み速度履歴を求めた。この歪み速度履歴は第3図に示す解析の流線に沿った要素ごとの時間と歪み速度から求めた。

シミュレーション精度の検証を目的とし、Al-2.5%Mg(板厚5mm)の熱間圧延板を冷間圧延により1mmまで

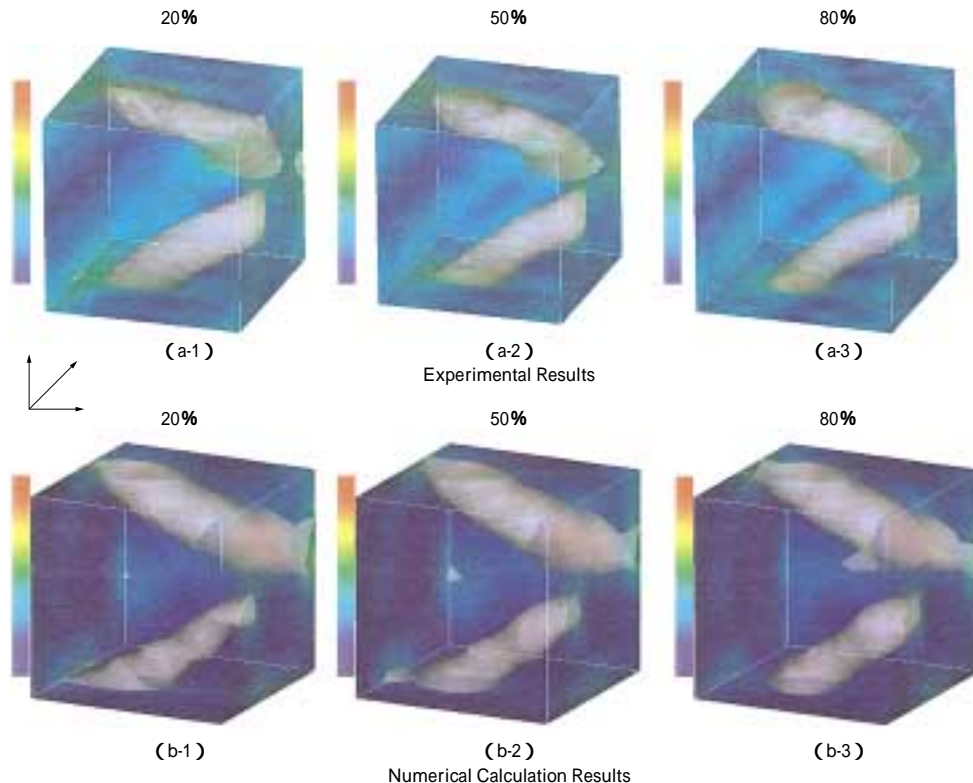


第3図 3次元圧延解析の概念図  
Fig. 3 Schematic figure of 3 dimensional FEM analysis for strain rate history

圧延し、圧下率を20%から80%まで変えたときの集合組織の変化を測定した。集合組織として板厚中央部をX線解析によりODFを求め、第4図に計算結果と比較して示した。

第4図に示すODFは、色の濃淡でODFの密度を表し、等密度分布面を面表示で示している。計算、実験とも圧下率の増加にともないFCC金属の圧延集合組織であるファイバが発達し<sup>1)20)</sup>、計算による圧縮集合組織のパターンは実験結果と非常に良い一致を示していることがわかる。ただし、等密度面は計算値のほうが実測値よりも広く、かつ計算値では低密度域には結晶方位がほとんど見られず、定量的には計算値の集合組織の集積度が高くなりすぎていることがわかる。この不一致については、すでにいくつかの対応法<sup>3)8)</sup>が提案されているが、今後の課題である。

本シミュレーションでは圧延変形と結晶粘塑性モデルを組み合わせることにより、短い計算時間で圧延条件による集合組織への影響を検討することが可能となった。圧



第4図 冷延集合組織の計算結果と実験と比較  
Fig. 4 Comparison between experimental and calculated results for texture developments during cold rolling

延条件の例として、高摩擦係数での圧延における表面のせん断集合組織の発達を予測することも可能である。第5図に計算例として、 $\mu = 0.3$ での板厚・板幅断面内の集合組織分布を示す。

### 3. 降伏曲面予測モデル

集合組織から降伏関数を予測する方法として、上記の結晶粘塑性モデルをもちいる方法もおこなわれているが<sup>6)</sup>、計算時間が長くなる。いっぽう、集合組織から降伏曲面を予測する手法として、Taylor-Bishop-Hillによって定式化された結晶塑性論に基づくTBHモデルが古くからもちいられている<sup>21)</sup>。そこで、著者らは上記圧延集合組織予測モデルによってえられたODFデータからTBHモデルをもちいて降伏曲面を予測するシミュレータを開発した。

まず、TBHモデルの精度を検証するために、2軸圧縮試験により降伏曲面を実験的に求めた<sup>22)</sup>。さらに、X線をもちいて集合組織を測定し、測定結果をもとにして降伏曲面の計算をおこなった。第6図に、計算した降伏曲面(●印)と実測値(破線)の比較を示す。計算値と実測値はよく一致しており、本モデルの妥当性が理解できる。

### 4. 降伏関数モデル

前章で求めた降伏曲面をFEM解析にもちいるために、降伏関数の定式化をおこなった。降伏関数としてBarlatら<sup>12)</sup>によって提案された式(2)をもちいる。

$$= \sqrt[1]{|s_1 - s_2|^M} + \sqrt[2]{|s_2 - s_3|^M} + \sqrt[3]{|s_3 - s_1|^M} = 2 \sqrt[eq]{M} \dots (2)$$

ここで、 $s_i$  は応力を異方性回転Lで回転した応力についての主応力成分であり、式(3)から式(5)で表される。

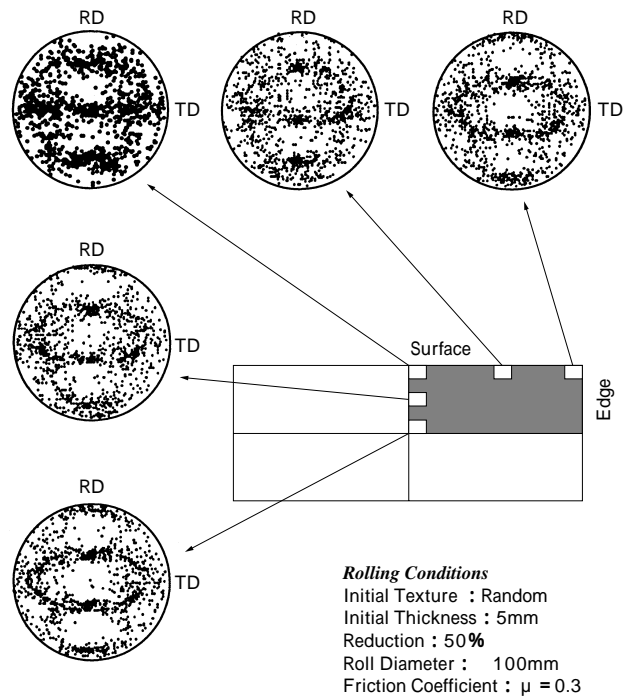
$$\begin{pmatrix} s_1 & 0 & 0 \\ 0 & s_2 & 0 \\ 0 & 0 & s_3 \end{pmatrix} = R^T \cdot \begin{pmatrix} x & y & z \\ xy & y & yz \\ xy & yz & z \end{pmatrix} \cdot R \dots (3) \begin{pmatrix} x \\ y \\ z \\ xy \\ yz \\ z \end{pmatrix} = L \begin{pmatrix} x \\ y \\ z \\ xy \\ yz \\ z \end{pmatrix} \dots (4)$$

$$L = \begin{pmatrix} (c_2 + c_3)/3 & -c_3/3 & -c_2/3 & 0 & 0 & 0 \\ -c_3/3 & (c_3 + c_1)/3 & -c_1/3 & 0 & 0 & 0 \\ -c_2/3 & -c_1/3 & (c_1 + c_2)/3 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & c_4 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & c_5 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & c_6 \end{pmatrix} \dots (5)$$

また、 $s_1$ から $s_3$ は降伏関数パラメータである $x \sim z$ と、主応力を求めるときにもちいた回転マトリックスRにより式(6)によって与えられる。

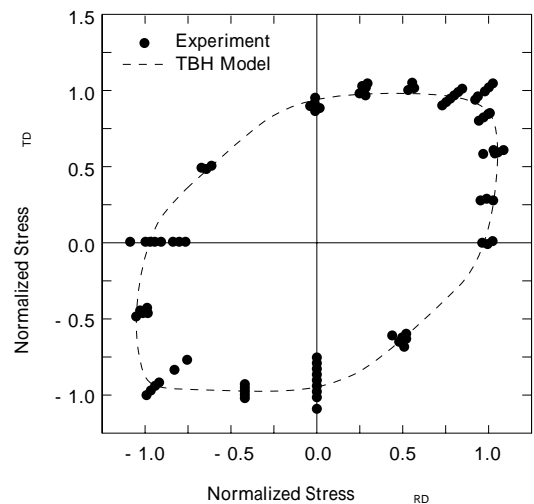
$$\left. \begin{aligned} 1 &= xR_{11}^2 + yR_{21}^2 + zR_{31}^2 \\ 2 &= xR_{12}^2 + yR_{22}^2 + zR_{32}^2 \\ 3 &= xR_{13}^2 + yR_{23}^2 + zR_{33}^2 \end{aligned} \right\} \dots (6)$$

これらの降伏関数パラメータ( $C_1 \sim C_6, M, x \sim z$ )を一義的に決定することは困難である。このため、降伏曲面と $r$ 値の板面内の測定データから最小2乗法により決定する。本降伏関数をもちいて計算した降伏曲面と $r$ 値の結果を第7図、第8図に示す。なお、図中には前



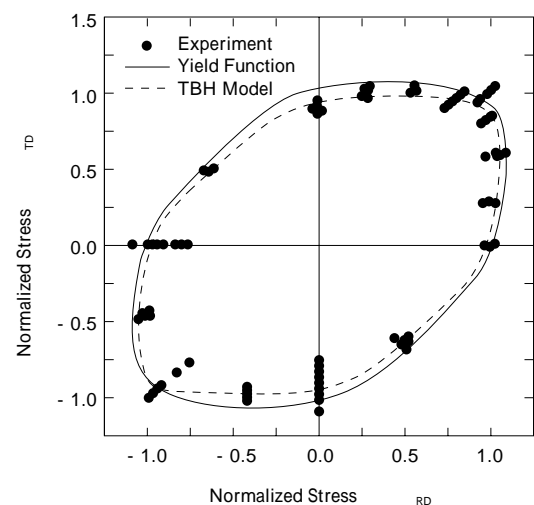
第5図 集合組織予測の計算例

Fig. 5 Example of predicted deformed texture distribution after rolling



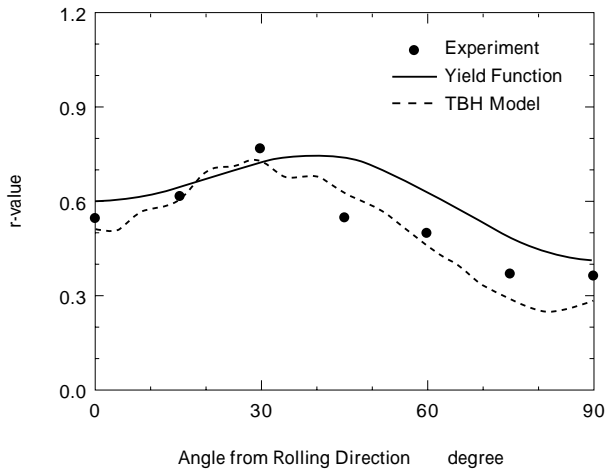
第6図 降伏曲面の実験値と計算値の比較

Fig. 6 Predicted yield surface comparing with experimental results



第7図 降伏曲面の実験値と降伏関数の比較

Fig. 7 Predicted yield surface by using yield function comparing with experimental results and TBH model



第8図 r 値の実測値と計算値の比較  
Fig. 8 Predicted yield r-value distribution by using yield function comparing with experimental results and TBH model

章で述べた TBH モデルによる計算値もあわせて示す。これらの図より、本降伏関数は高い予測精度を有していることがわかる。

### 5. 成形シミュレーションモデル

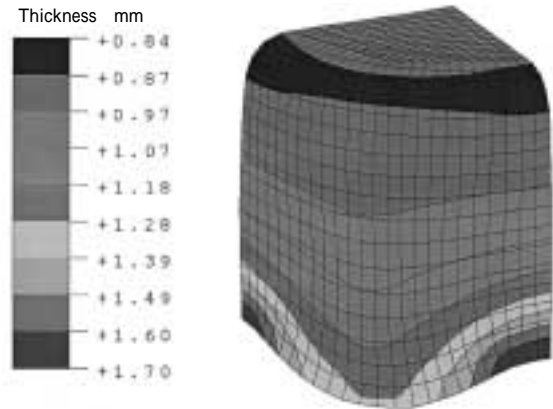
4章で求めた降伏関数をもちいて板成形シミュレーションをおこなうために、FEM コードに降伏関数を導入した。FEM コードとして商用の ABAQUS / Explicit をもちい、構成方程式を降伏関数と加工硬化式によって与えた<sup>14)</sup>。本モデルをもちいて、円筒深絞りをおこなった場合の板厚分布の計算結果を第9図に示す。また、第10図に、このとき生じたカップ壁高さの円周方向分布の計算値と実験値の比較を示す。両者は非常に良く一致していることが分かる。

むすび= 圧延によって生じる集合組織を予測し、その集合組織から降伏曲面、さらに、降伏曲面から降伏関数を求めるとともに FEM コードに構成方程式を導入し、成形シミュレーションをおこなうまでの統合シミュレーションプログラムを開発した。本シミュレーションは、各予測値について実験値と良い一致を示していることを確認した。今後、本シミュレーションを活用することにより、効率的な材料開発、成形技術の開発を進める所存である。

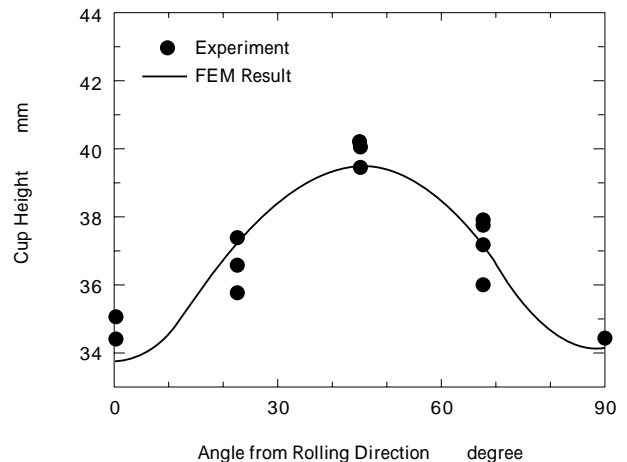
なお、本研究の集合組織と成形性(3章から5章)については米国アルコア社との共同研究であり、アルコアテクニカルセンターの F. Barlat, J. C. Brem, D. J. Lege, S. J. Murtha, R. Becker およびソウル大学 K. Chung 教授に感謝いたします。

#### 参考文献

- 1) 長嶋晋一: 集合組織, (1984), 丸善社。
- 2) 上城太一ほか: 第5回日本金属学会分科会研究グループ, 集合組織と材料特性研究会, (1997), p.45.



第9図 成形シミュレーションによる板厚分布の計算結果  
Fig. 9 Predicted thickness distribution for cup drawing test by using anisotropy yield function



第10図 円筒深絞り加工による成形高さの計算結果  
Fig. 10 Predicted cup height for cup drawing test by using anisotropy yield function

- 3) 高橋 寛: 塑性と加工, Vol.37, No.431 (1996), p.1244.
- 4) 左海哲夫: 第147回塑性加工シンポジウム (1997), p.33.
- 5) R. J. Asaro et al.: Acta Metall., Vol.33, No.6 (1985), p.923.
- 6) D. E. Green et al.: Recent Advances in Heat Transfer and Micro-Structure Modelling for Metal Processing, ASME (1995), p.117.
- 7) C. A. Bronkhorst et al.: Phil. Trans. R. Soc. Lond. A, Vol.341 (1992), p.2863.
- 8) 前田恭志ほか: 平成8年塑性加工春季講演, (1996), p.62.
- 9) 前田恭志ほか: 第47回塑性加工講演, (1996), p.61.
- 10) 前田恭志: 第147回塑性加工シンポジウム (1997), p.51.
- 11) 松井邦昭ほか: 第47回塑性加工講演, (1996), p.355.
- 12) F. Barlat et al.: Int. J. of Plasticity, Vol.13, No.4 (1997), p.385.
- 13) 金武直幸ほか: 塑性と加工, Vol.24, No.266 (1983), p.283.
- 14) Y. Hayashida et al.: NUMIFORM 95 (1995), p.717.
- 15) 林田康宏ほか: 第46回塑性加工講演, (1995), p.235.
- 16) 林田康宏ほか: 第47回塑性加工講演, (1996), p.351.
- 17) 前田恭志ほか: 第47回塑性加工講演, (1996), p.353.
- 18) 仲町英治: 第147回塑性加工シンポジウム (1997), p.59.
- 19) K. K. Mathur: NUMIFORM 95 (1995), p.109.
- 20) 井上博史ほか: 軽金属, Vol.47, No.4 (1997), p.246.
- 21) J. Hirsch et al.: Acta Metall., Vol.36, No.11 (1988), p.2863.
- 22) 前田恭志ほか: 第46回塑性加工講演, (1995), p.231.