

# 塑性加工のための結晶塑性モデル技術の確立

静岡大学 学術院工学領域工学専攻 吉田 健吾

## 1. はじめに

有限要素法 (FEM) を用いた塑性加工シミュレーションが広く普及し、金型設計にとって有用なツールとなっている。しかしながら、FEM による予測と実際のトライの間には未だに無視できない差がある。特に、アルミニウム合金板の FEM 予測精度は不十分である。金型設計を効率的に行うためには、FEM の予測精度の一層の向上が期待される。

アルミニウム合金に対する FEM の予測精度を改善するには、アルミニウム合金の塑性異方性を忠実に表現するような材料構成則を使用することが挙げられる。その方策として、様々な負荷条件のもとで実験を行い、利用するアルミニウム合金の塑性異方性を詳細に測定し、把握することが考えられる。しかしながら、開発期間・コストを踏まえると、多種多様かつ詳細な実験を多数行うことは得策ではない。

実験に代わる手法として、結晶塑性を用いた数値材料試験がある。結晶塑性は金属中の結晶内部で発生するすべり変形をモデル化した塑性理論である。微視的な物理現象をもとに巨視的な応力・ひずみ・異方性を予測できる手法として、近年、高い注目を集めている。結晶塑性を使う場合、試験片内に無数にある結晶の方位を統計的に表すデータ (集合組織) を X 線回折装置などによって測定する。通常、統計的な結晶方位データは方位密度関数 (以後、ODF : Orientation Distribution Function) によって表される。この ODF の偏りが塑性異方性の源である。ただし、ODF を直接的に結晶塑性解析に使用することはできないため、統

計的な ODF から複数の結晶粒を人工的に創生する離散化プロセスが必要となる。その結果、結晶塑性による巨視的な応力-ひずみ曲線および塑性異方性の予測結果は、この離散化プロセスに依存することとなる<sup>1)</sup>。統計的な ODF を有限の結晶粒で再現するため、結晶粒数ならびに離散化手法の影響を強く受ける。

そこで本研究では、結晶粒数やプロセスに依存することない ODF の離散化方法を新たに構築する。そして、それが結晶塑性によるアルミニウム合金板の塑性異方性の予測に与える影響を明らかにする。

## 2. 目的

結晶塑性解析によって得られる材料特性値は ODF の離散化方法に依存する。この影響を極力小さくするような、離散化手法を開発することが本研究の目的である。

## 3. 実用的な価値、実用化の見込など

近年、結晶塑性解析は高い注目を集めている。特に、様々な応力状態に対する塑性変形挙動を数値解析によって予測することができ、その解析が材料の集合組織といった内部組織に由来する点が魅力である。この様に有望な結晶塑性解析が入力データである結晶方位の取得方法によってばらつくのは好ましくない。本研究によってより効率的かつ正確な離散化方法が開発されれば、それは解析精度の改善に繋がり、成形シミュレーションの精度向上ならびに金型修正回数削減に貢献できる。

#### 4. 研究内容の詳細

##### 4.1 STAT

結晶方位は Euler 角  $(\phi_1, \phi, \phi_2)$  によって表される. その強度を示した ODF を図 1 に示す. ある方位  $g = (\phi_1, \phi, \phi_2)$  における角度空間の微小体積  $dg$  と方位密度関数 (ODF)  $f$  を掛けることで, その方位の体積分率  $v$  が得られる. 一般的には,  $5^\circ$  間隔のグリッド点の ODF が出力される. 各体積分率を足し合わせると 1 となる.

本節では, Toth と Van Houtte によって開発された STAT と呼ばれる手法を示す<sup>2)</sup>. 体積分率を累積した関数  $F$  を次のように作成する.

$$F(j) = \sum_{i=1}^j v_i \quad \text{for } j=1, \dots, N_{\text{grid}}$$

次に, コンピュータの疑似乱数列を使用して  $x \in [0, 1]$  を創製し, 次式を満たす  $j$  を探索する.

$$F(j-1) < x \leq F(j)$$

これによって  $j$  に対する結晶方位  $g_j$  が選択される. 例えば, 1000 個の結晶方位を創製する場合は, この過程を 1000 回繰り返す.

このように分かりやすい方法ではあるものの, 使用される乱数列に依存して, 創製される離散的な結晶方位が異なることが知られている.

##### 4.2 提案の方法

Euler 角は  $0 \leq \phi_1, \phi_2 \leq 2\pi$ ,  $0 \leq \phi \leq \pi$  の範囲で定義されている. しかしながら, 立方晶の対称性および直交異方性の対称性を仮定すると, 独立な領域は大幅に減少する. そのような基本領域 (Fundamental Zone) を図 2 に示す.  $0 \leq \phi \leq \pi/2$  であり, その他の Euler 角の領域は図のように 3 領域に分割される. この内の一つのみが独立である. この様な領域を FZ I, II, III と呼ぶこととする.

本提案手法では, まず, FZ I, II の領域のグリッド点をそれと等価な FZ III の方位に変換する.

等価な結晶方位への回転は, 四元数を使用する.

$$q_0 = \cos\left(\frac{\phi}{2}\right) \cos\left(\frac{\phi_1 + \phi_2}{2}\right)$$

$$q_1 = \sin\left(\frac{\phi}{2}\right) \cos\left(\frac{\phi_1 - \phi_2}{2}\right)$$

$$q_2 = \sin\left(\frac{\phi}{2}\right) \sin\left(\frac{\phi_1 - \phi_2}{2}\right)$$

$$q_3 = \cos\left(\frac{\phi}{2}\right) \sin\left(\frac{\phi_1 + \phi_2}{2}\right)$$

$$q' = q \cdot q^{(i)}$$

ここで,  $q$  は Euler 角によって与えられ,  $q^{(i)}$  は立方晶の回転対称性を表す回転作用素であり,  $q'$  は回転後の等価な結晶方位である.

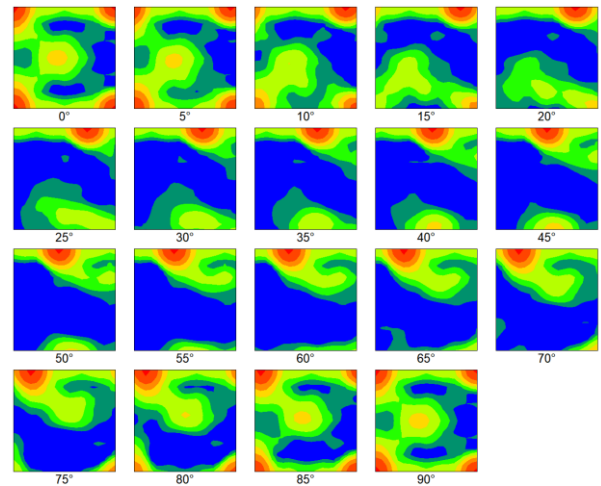


図 1 ODF のカラーマップ

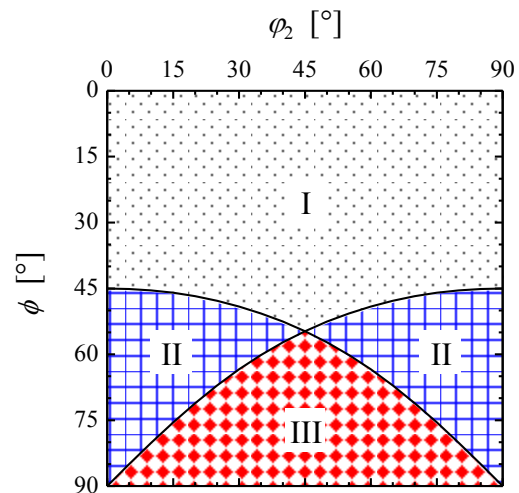


図 2 ODF の基本領域

立方晶の対称性に加えて、直交異方性の仮定より、次の等価な方位変換を考慮する。

$$(\phi_1, \phi, \phi_2)$$

$$\rightarrow (\pi - \phi_1, \phi, -\phi_2), (\pi + \phi_1, \phi, \phi_2), (-\phi_1, \phi, -\phi_2)$$

以上の対称性は合計 96 通りある。これを考慮して、FZ I, II に含まれるグリッド点の等価な方位を算出し、そのうち図 2 の FZ III に含まれる方位を選択し、FZ III 内部における等価な方位を見つけ出す。

次に、FZ I, II から FZ III へ変換された等価な方位と元々 FZ III に含まれるグリッド点との方位差を計算し、最小の方位差を与えるグリッド点を見つけ出し、等価な方位をそのグリッド点にグルーピングする。そして、それぞれのグリッド点とそれにグルーピングされた等価な方位の平均方位を求める。

$$q_j^{\text{mean}} = \frac{\bar{q}}{\|\bar{q}\|}, \quad \bar{q} = \sum_{i=1}^m v_i q_i$$

それと同時に、各グループにおいて体積分率を合計する。

この工程によって、ODF のデータ点数は FZ III に含まれる 1482 方位に圧縮される。

次に、平均方位に対する体積分率を累積した関数を作成する。この際、体積分率の累積は、体積分率が小さい方位から実施する。

$$F(j) = \sum_{j=1}^{1482} v_j^{\text{mean}}$$

$n_L$  の結晶方位を創製する場合、次のように一定間隔で変数  $x_i$  を作成し、結晶方位の選択を行う。

$$F(j-1) < x_i \leq F(j), \quad x_i = \frac{i}{n_L}$$

$n_L$  は本来作成したい結晶粒数よりも大きな値とすることで、元々の ODF をよりよく再現する多数の離散方位を作成できる。

最後に、多数の離散方位が作成されたので、それらの方位差を計算し、方位差が最小の組み合わせの結晶方位を平均化し、体積分率を

足し合わせることで、所望の結晶粒数まで、結晶方位の数を減らすことを実施する。

### 4.3 塑性異方性 ( $r$ 値) の予測

4.1 で述べた STAT および 4.2 に記した提案方法を用いて ODF から離散的な結晶方位を創製する。その後、均質化法を用いた結晶塑性有限要素法によって多結晶体の塑性変形挙動を解析する。

入力データとなる ODF から、512 結晶粒を創製し、その結晶粒をもとに ODF を再計算した結果を図 3 に示す。入力データと STAT には明確な差が確認できる。一方、提案手法を用いた ODF はより入力データに近い。つまり、入力データが有する特性を維持したまま離散的な結晶方位を得ることができた。

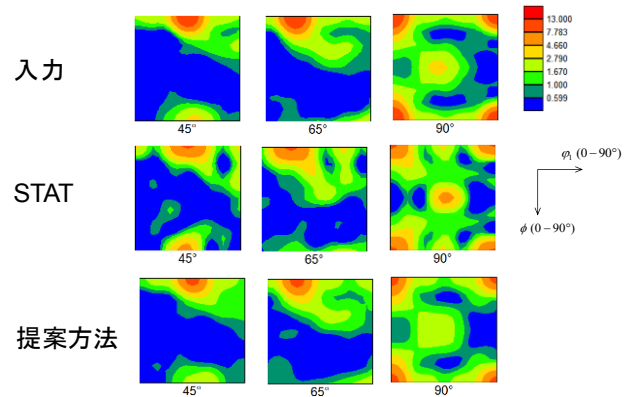


図 3 512 結晶粒に離散化した時の ODF

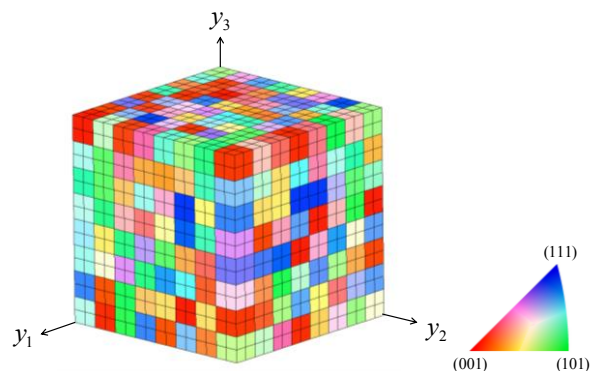


図 4 多結晶体のモデルと結晶方位

次に、512 結晶粒を用いて、多結晶塑性解析を実施した。代表体積要素は図 4 に示すように、8 要素で 1 結晶粒を表現している。なお、6 面体 1 次要素を使用し、数値積分には選択低減積分を用いた。

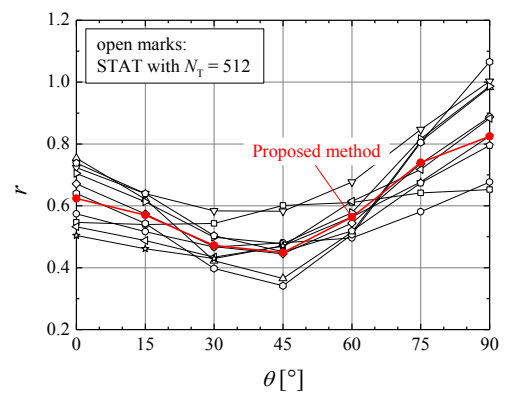
$r$  値の解析結果を図 4(a) に示す。ここで、 $\theta$  は圧延方向からの角度を表している。STAT は使用する乱数列によって離散化の結果が変わるため、10 通りの解析を実施した。図 4(a) に示す通り、STAT による結果は離散化過程に用いた乱数列の影響を強く受けていることがわかる。一方、提案手法は、STAT を用いた解析結果のばらつきの中央値に位置していることが分かる。

使用する結晶粒数の影響を確認するために、1728 結晶粒、4096 結晶粒とした解析も実施した。その結果は図 4(b), (c) に示す。解析結果より、使用する結晶粒数が増えるにしたがって、STAT によるばらつきは小さくなっていることが確認できる。また、提案手法による解析結果はおおよそ STAT のばらつきの中央に位置しており、使用する結晶粒数に依存することなく安定した結果が得られることが確認できた。

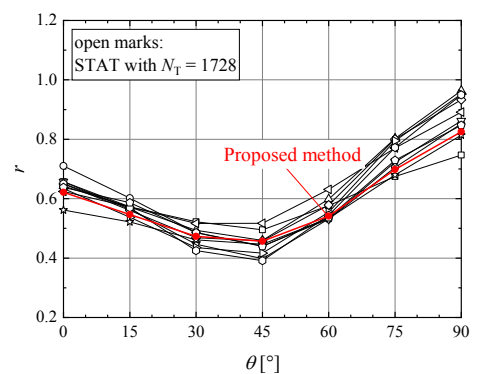
## 5. まとめ (結言)

本研究では、金属板の統計的な集合組織データ (ODF) から離散的な結晶方位を創製する方法を提案した。提案方法は、使用する結晶粒数によらず常に同様な  $r$  値分布を解析できることが明らかとなった。本成果は、確度の高い結晶塑性解析の実現に貢献できるものである。

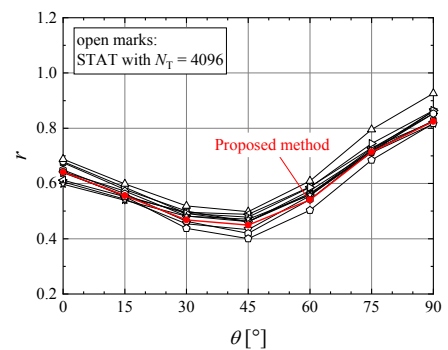
今後の課題として、結晶塑性構成式を精密化することが挙げられる。



(a)



(b)



(c)

図 5  $r$  値の解析結果

## 6. 参考文献等

- 1) Melchior, M. A., Delannay, L., 2006. Computational Material Science, 37, 557-564.
- 2) Toth, L. S, Van Houtte, P., 1992. Texture and Microstructures, 19, 229-244.