

結晶塑性理論によるせん断帯解析

広島大学
日本総合研究所

正員 岡澤重信†
廣居真也

1. 緒言

金属材料に大きな変形を与えると降伏が発生して、応力 ひずみ関係は弾性域から塑性域へと遷移する。よって鋼材などの金属材料の大変形挙動をシミュレートするためには、塑性の取り扱いが必要不可欠である。

通常の塑性理論においては関連流れ則による巨視的な理論が用いられることが多く、汎用有限要素解析コードにも取り入れられている。この従来の巨視的塑性理論は、降伏曲面の存在を前提に塑性ポテンシャル理論として体系化されている。そのため降伏曲面を求めるために膨大な実験的研究が実施され、その成果を元に様々なモデルが数多く提案されてきた。しかしながら、この実験的研究から定義されたパラメータには不確実性が多いなどの問題点もある。また、ひずみが極めて狭い領域に局所化した後に生じるせん断帯は、巨視的な塑性理論では一般的には再現することができない。

本研究では、上記で述べた巨視的な結晶塑性理論の問題点を解決するために、最近注目が集まっている微視的な観点に基づく結晶塑性理論を有限要素法に適用して、せん断帯解析を行うことによりその有用性を確認する。

2. 結晶塑性理論¹⁾²⁾

一般的な弾塑性理論と同様に速度勾配 L が次のように弾性部分と塑性部分に分解できると仮定する。

$$L = L^e + L^p \quad (1)$$

図-1 は FCC 金属のすべり系を示したものである。すべり面の法線を表す単位ベクトルを m 、それと直行するすべり方向を表す単位ベクトルを s とおく。単一のすべりのみを仮定すると L^p は次のように表される。

$$L^p = L_{ij}^p (e_i \otimes e_j) = \dot{\gamma} (s \otimes m) \quad (2)$$

ここで、 $\dot{\gamma}$ はせん断ひずみ(すべり)速度である。また表-1 は FCC 金属の 12 通りのすべり系である。

以上は単結晶を対象にしてきたが、多結晶についての説明を加える。単結晶とは図-2 のように全ての結晶

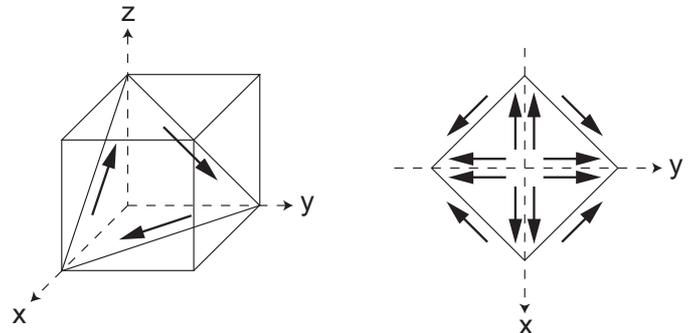


図-1 FCC 金属のすべり系

表-1 FCC 金属の 12 通りのすべり系

m	s
$(1/\sqrt{3}, 1/\sqrt{3}, 1/\sqrt{3})$	$(0, 1/\sqrt{2}, -1/\sqrt{2})$
$(1/\sqrt{3}, 1/\sqrt{3}, 1/\sqrt{3})$	$(-1/\sqrt{2}, 0, 1/\sqrt{2})$
$(1/\sqrt{3}, 1/\sqrt{3}, 1/\sqrt{3})$	$(1/\sqrt{2}, -1/\sqrt{2}, 0)$
$(-1/\sqrt{3}, -1/\sqrt{3}, 1/\sqrt{3})$	$(0, -1/\sqrt{2}, -1/\sqrt{2})$
$(-1/\sqrt{3}, -1/\sqrt{3}, 1/\sqrt{3})$	$(1/\sqrt{2}, 0, 1/\sqrt{2})$
$(-1/\sqrt{3}, -1/\sqrt{3}, 1/\sqrt{3})$	$(-1/\sqrt{2}, 1/\sqrt{2}, 0)$
$(-1/\sqrt{3}, 1/\sqrt{3}, 1/\sqrt{3})$	$(0, 1/\sqrt{2}, -1/\sqrt{2})$
$(-1/\sqrt{3}, 1/\sqrt{3}, 1/\sqrt{3})$	$(1/\sqrt{2}, 0, 1/\sqrt{2})$
$(-1/\sqrt{3}, 1/\sqrt{3}, 1/\sqrt{3})$	$(-1/\sqrt{2}, -1/\sqrt{2}, 0)$
$(1/\sqrt{3}, -1/\sqrt{3}, 1/\sqrt{3})$	$(0, -1/\sqrt{2}, -1/\sqrt{2})$
$(1/\sqrt{3}, -1/\sqrt{3}, 1/\sqrt{3})$	$(-1/\sqrt{2}, 0, 1/\sqrt{2})$
$(1/\sqrt{3}, -1/\sqrt{3}, 1/\sqrt{3})$	$(1/\sqrt{2}, 1/\sqrt{2}, 0)$

粒が同一の初期方位を持っているものであり、多結晶とは図-3 のように結晶粒の初期方位が同一とは限らないものである。

有限要素法で多結晶を取り扱うために、1 積分点を多結晶とみなして多数の結晶粒を割り当てる方法が一般的である。ここではテイラーモデルを用いる。テイラーモデルでは各結晶粒の変形がすべて巨視的な変形と等しいと仮定する。それに対して、応力は結晶粒ごとに異なる。

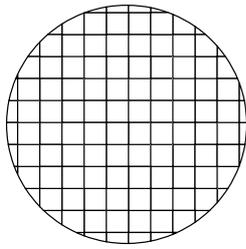


図-2 単結晶

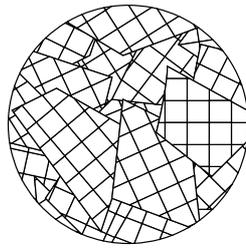


図-3 多結晶

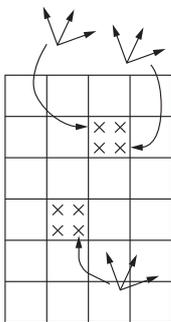
巨視的な速度勾配を L ，結晶粒毎の速度勾配を $L^{(k)}$ とする．ここで， (k) は結晶粒の番号を表すインデックスである．すると L と $L^{(k)}$ の関係は次のようになる．

$$L = L^{(k)} \quad (3)$$

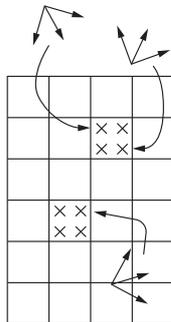
さらに，すべての結晶粒の体積が等しいと仮定すると巨視的応力は単純に結晶粒数についての平均値で与えられる．

$$\bar{\sigma} = \frac{1}{N_g} \sum_{k=1}^{N_g} \sigma^{(k)} \quad (4)$$

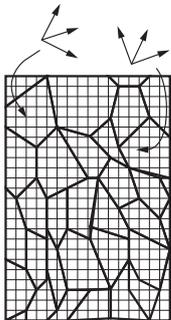
ここで， N_g は結晶粒数である．



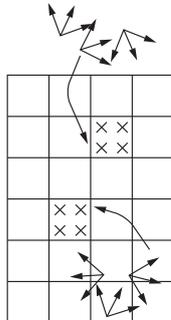
(a) 全積分点に同一初期方位を与える単結晶のモデル



(b) 1 積分点を 1 結晶粒とみなすモデル



(c) 複数積分点を含む領域を 1 結晶粒とみなすモデル



(d) 1 積分点を多結晶とみなすモデル

図-4 有限要素多結晶モデルの考え方

3. せん断帯解析

結晶塑性理論の有用性を確認するため，平面ひずみ状態の FCC 金属の局所化解析を行った．対象とするモデルは図-5 のような長方形の引張試験片 4 分の 1 モデルである．結晶粒数は 40 個とした．なお中央部でくびれを発生させるために，微小な幾何学的初期不整を導入した．

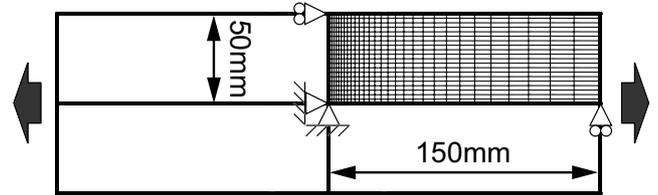


図-5 解析モデルと境界条件

図-6 は得られたせん断帯であり，コンターは相当塑性ひずみを示している．このような X 状のせん断帯が明らかに観察できる．

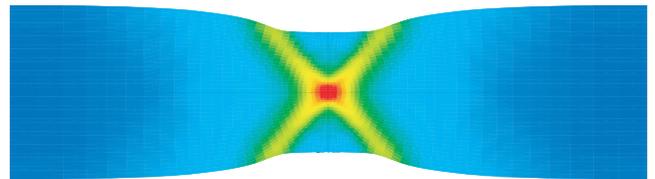


図-6 せん断帯

4. 結言

本研究では，有限要素法に結晶塑性理論を適用してせん断帯解析を実施した．既存の巨視的な塑性理論では不可能なせん断帯の再現を可能にしたことで，結晶塑性理論の有用性を確認することができた．

参考文献

- 1) 黒田充紀, 志澤一之: 結晶塑性の理論と応用 結晶の大変形から転移蓄積まで, 塑性と加工, 第 43 巻, 第 495 号, pp.299-309, 2002.
- 2) K. Inal, P.D. Wu and K.W. Neale: Finite element analysis of localization in FCC polycrystalline sheets under plane stress tension, *Int. J. Sol. Str.*, 39, pp.3469-3486, 2002.