

Ti-6Al-4V 合金の  $\alpha$  相の不均一変形に与える弾性異方性の効果

旭川工業高等専門学校 ○乳井 謙太 河野 義樹, 北見工業大学 大橋鉄也

要旨

Ti-6Al-4V 合金の  $\alpha$  相からなる双結晶モデルと三重結晶モデルを用いて一軸引張の結晶塑性解析を実施した。結晶方位は、双結晶モデルでは、二つの  $c$  軸が荷方向と直交するものと、 $c$  軸が互いに直交するものを用いた。三重結晶モデルでは、双結晶モデルの  $c$  軸が互いに直交するもの上部に、 $c$  軸が荷方向と一致する結晶を配置した。結果は、弾性異方性の効果により、結晶粒間を通じた力学的相互作用が生じ、それが変形の詳細に影響を与える様子を示した。

1.緒言

Ti-6Al-4V 合金 (Ti-64) は、航空機、医療関連分野、自動車用部材等に用いられ、最も使用実績のある Ti 合金であり、その疲労寿命は製品設計に用いられることから、その予測に関する研究は重要である。疲労破壊には、弾性異方性が与える不均一変形が影響すると考えられている。(1) しかし、その詳細は不明である。そこで、本研究では、双結晶と三重結晶の一軸引張の結晶塑性解析を実施し、弾性異方性が不均一変形に与える影響を調査した。

2.解析方法

本研究では、結晶塑性解析コード clp<sup>(2)</sup> を用いて解析を実施した。以下にその解析コードに組み込まれた数値モデル中で、今回用いたものの概要を説明する。

弾塑性構成式は、次式に従うものとする<sup>(3)</sup>。

$$\dot{\epsilon}_{ij} = \left[ S_{ijkl}^e + \sum_n \sum_m \{h^{(nm)}\}^{-1} P_{ij}^{(n)} P_{kl}^{(m)} \right] \dot{\sigma}_{kl} \quad (1)$$

$\dot{\epsilon}_{ij}$  はひずみ増分、 $S_{ijkl}^e$  は弾性コンプライアンス、 $\dot{\sigma}_{kl}$  は Cauchy の応力テンソルの増分、 $P_{ij}^{(n)}$  Schmid テンソル、 $m, n$  は活動すべり系を表している。 $h^{(nm)}$  はひずみ硬化係数であり、各すべり系に堆積した転位密度の関数である。

Schmid 則が成立すると仮定し、各すべり系の活動条件は、各すべり系に働く分解せん断応力が各すべり系の臨界分解せん断応力 (CRSS : Critical Resolved Shear Stress) を超えた時とする。CRSS は、以下に示す修正した

Bailey-Hirsch の式より算出する。

$$\theta^{(n)} = \theta_0(T) + \sum_m a \mu \bar{b} \Omega^{(nm)} \sqrt{\rho_s^{(m)}} \quad (2)$$

$\theta_0(T)$  は運動転位に対する変形履歴に依存しない抵抗値、 $\Omega^{(nm)}$  は各すべり系に存在する転位の相互作用の強さを表す係数行列、 $a$  は 0.1 程度の数値、 $\mu$  はせん断弾性係数、 $\bar{b}$  はバーガースベクトルの大きさ、 $\rho_s^{(m)}$  は統計的に蓄積する転位 (Statistically Stored Dislocations : SS 転位) 密度である。

3.解析条件

本研究で用いた多結晶モデルを図 1 に示し、各結晶粒の結晶方位は、表 1 に示す。図 1 (a) PRI-PRI, (b) PRI-BSL は、双結晶の幾何モデルであり、試料サイズは  $40 \times 40 \times$

$1.6 \mu\text{m}^3$ , 要素数は  $50 \times 50 \times 2$  である。図 1 (c) PRI-BSL-BSL は三重結晶の幾何モデルであり、試料サイズは  $40 \times 60 \times 1.6 \mu\text{m}^3$ , 要素数は  $50 \times 75 \times 2$  である。弾性コンプライアンスは、純 Ti のものを用い、 $S_{11}=0.9581, S_{12}=-0.4623, S_{13}=0.1893, S_{33}=0.6980, S_{44}=2.1413 [ \times 10^{-11} \text{Pa}^{-1} ]$  とした<sup>(4)</sup>。CRSS は、柱面  $\langle a \rangle$  と底面すべり系で共に 370MPa とし、それ以外のすべり系は不活性とした。荷条件は、試料下面を  $y$  軸方向に変形拘束し、試料上面に  $y$  軸方向に一軸引張の強制変位を与えた。

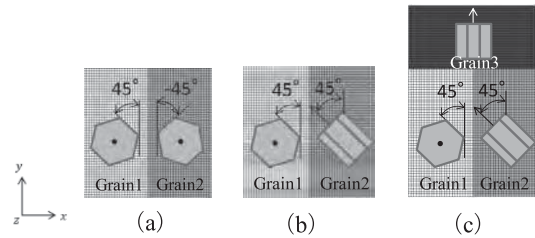


Fig.1 使用した幾何モデルと結晶方位。(a) 双結晶モデル (PRI-PRI), (b) 双結晶モデル (PRI-BSL), (c) 三重結晶モデル (PRI-BSL-BSL)。

Table 1 それぞれのモデルの結晶方位

	PRI-PRI	PRI-BSL	PRI-BSL-BSL
Grain1	柱面 $\langle a \rangle 45^\circ$	柱面 $\langle a \rangle 45^\circ$	柱面 $\langle a \rangle 45^\circ$
Grain2	柱面 $\langle a \rangle 45^\circ$	底面 $45^\circ$	底面 $45^\circ$
Grain3	なし	なし	底面 $90^\circ$

4.結果と考察

得られた結果を図 2~4 に示す。まず、PRI-PRI の解析結果 (図 2) を観察する。 $\bar{\epsilon}_{yy}=0.7\%$  では、活動していなかった柱面  $\langle a \rangle$  すべり系 (図 2 (a)) は、 $\bar{\epsilon}_{yy}=2.0\%$  (図 2 (b)) では活動しており、表示上 Grain1 と Grain2 で符号は異なるが、均一な分布を示す。これは、hcp 構造は結晶底面内で弾性等方であることと、すべり系が荷方向に対して  $45^\circ$  の傾きを持つことに起因する<sup>(5)</sup>。すべり系が荷方向に対して  $45^\circ$  の傾きを有する場合、結晶粒は直角を保ったまま変形する。即ち、本解析条件の場合、その二つの効果により、図 5 (a) のように粒界が一致した状態で変形する。このため、 $y$  方向垂直応力 (図 2 (c)) も、一様な分布であることがわかる。

次に、PRI-BSL の解析結果 (図 3) を観察する。Grain1

(図 3 (a)), Grain2 (図 3 (b)) とともに, 不均一変形が観察された. Grain1 では, 左下でのみすべり系が活動していることが分かる. Grain2 では, すべり系が粒全体で活動していることが分かる. これは, 図 5 (b) のように弾性異方性により互いに異なる形状に変形しようとする Grain1 と Grain2 の粒界を一致させるために, 塑性せん断ひずみの分布が不均一になったためである. また, y 方向垂直応力を観察すると, 図 3 (c) のように Grain2 の応力が高く, Grain2 の主すべり系が活動しやすい. Grain2 で底面すべり系の活動が活発になったのは, このためである.

PRI-BSL では, 弾性異方性の効果が見られたが, 本研究で用いた双結晶モデルでは強制変位によって解析を行った. この影響を調査するため, 双結晶モデルの上部に結晶を配置して解析を行う. ただし, 簡単のためにその上部の結晶方位を塑性変形させないように設定した. この三重結晶モデル (図 1 (c) PRI-BSL-BSL) の解析結果を図 4 に示す. PRI-BSL の場合と同様に図 5 (b) のような現象が起きているが, PRI-BSL に比べ塑性せん断ひずみの分布が大きくなっていることがわかる. この理由を考えるために, y 方向垂直応力 (図 4 (c)) を観察すると, Grain1, Grain2 とともに応力にほとんど差は無く, Grain1, Grain2 とともに主すべり系の活動しやすさにはほとんど差がないことがわかる. このため, Grain1 で柱面<a>すべり系, Grain2 で底面すべり系の活動が活発になった. このことより, 双結晶に比べ, 三重結晶の場合は, Grain1, Grain2 とともにすべり系が活動しやすくなり, 塑性せん断ひずみが大きくなったと考えられる.

以上より, 双結晶の二つの c 軸が負荷方向と直交しており, 結晶が並列に並んでいる場合, 弾性異方性の影響は現れずそれによつては, 不均一変形は観察されない. しかし, c 軸を互いに直交させると, 弾性異方性が現れ, 塑性せん断ひずみの分布が不均一となった. さらに, このモデルの上部に c 軸と負荷方向が一致した結晶を配置した三重結晶の場合は, 双結晶の場合より塑性せん断ひずみが不均一となった.

## 5. 結言

本研究では, Ti-6Al-4V 中の  $\alpha$ -Ti を仮定した多結晶塑性解析を実施し, 弾性異方性が不均一変形に与える影響を調査した. 以下にその結果を示す.

(1) 双結晶において, 二つの c 軸が負荷方向と直交しており, 結晶が並列に並んでいる場合, 弾性異方性は現れないが, c 軸を互いに直交させると, 弾性異方性により不均一変形となる.

(2) c 軸を互いに直交させた双結晶モデルの上部に, c 軸と負荷方向が一致した結晶を配置した場合, c 軸を互いに直交させた双結晶モデルに比べ塑性せん断ひずみが大きくなった.

## 参考文献

- (1) S.Osterstock, et al., Prediction of the scatter of crack initiation under high cycle fatigue, Key Engineering Materials.345-346 (2007), pp. 363-366.
- (2) Ohashi, T. et al., Transaction of the Japan Society of Mechanical Engineers, Series A, Vol. 76, No. 764 (2010), pp.367-369.
- (3) Hill, R., Journal of the Mechanics and Physics of Solids, Vol. 14 (1966), pp. 95-102.
- (4) E.S.Fisher and C.J.Renken, Physical Review, Vol.135, No. 2A (1964), pp.482-494.
- (5) Mayama, T., Ohashi, T., Kondou, R., Geometrically necessary dislocation structure organization in FCC bicrystal subjected to cyclic plasticity, International Journal of Plasticity, Vol.25 (2009), pp.2122-2140

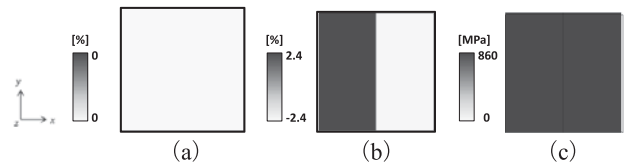


Fig.2 PRI-PRI の解析結果. (a) 塑性せん断ひずみの分布 ( $\bar{\epsilon}_{yy} = 0.7\%$ ), (b) 塑性せん断ひずみの分布 ( $\bar{\epsilon}_{yy} = 2.0\%$ ), (c) y 方向垂直応力 ( $\bar{\epsilon}_{yy} = 2.0\%$ ).

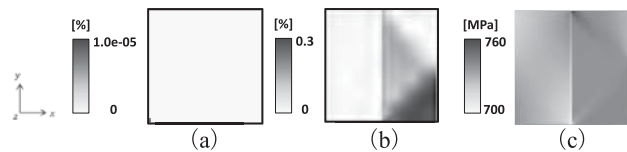


Fig.3 PRI-BSL の解析結果 ( $\bar{\epsilon}_{yy} = 0.7\%$ ): (a) 柱面<a>すべり系の塑性せん断ひずみ, (b) 底面すべり系の塑性せん断ひずみ, (c) y 方向垂直応力.

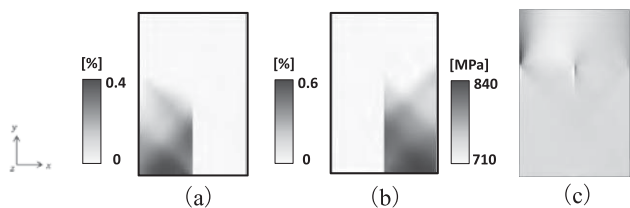


Fig.4 PRI-BSL-BSL の解析結果 ( $\bar{\epsilon}_{yy} = 0.7\%$ ). (a) 柱面<a>すべり系の塑性せん断ひずみ, (b) 底面すべり系の塑性せん断ひずみ, (c) y 方向垂直応力.

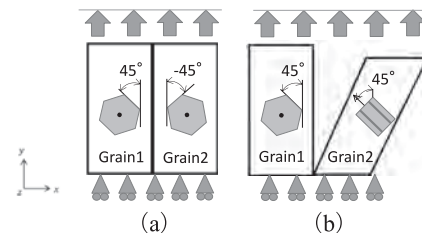


Fig.5 結晶方位による変形挙動の違いの模式図.