純マグネシウム単結晶の低指数面における 球圧子押し込み挙動解析

眞山 剛^{*1}, 只野裕一^{*2}, 北原弘基^{*3}, 安藤新二^{*3}

Crystal Plasticity Analysis of Indentation with a Spherical Indenter in Magnesium Single Crystal

Tsuyoshi MAYAMA^{*4}, Yuichi TADANO
Hiromoto KITAHARA, Shinji ANDO

^{*4} Kumamoto University, Kurokami 2-39-1
Chuo-ku, Kumamoto, 860-8555, Japan

The mechanism of twin region development during spherical indentation in pure magnesium single crystal is investigated using a crystal plasticity finite element analysis method. For deformation modes, basal slip, prismatic slip $\langle a \rangle$, pyramidal-1 $\langle a \rangle$ slip, pyramidal-1 $\langle a+c \rangle$ slip, pyramidal-2 $\langle a+c \rangle$ and tensile twinning systems are considered in the calculation. The indentation analysis on (0001), {10-10} or {11-20} surface are performed. The results of calculations show the significant anisotropy in surface displacement and twin region which qualitatively agree with the experimental results in the past report.

Key Words : Magnesium, Twinning, Finite element method, Crystal plasticity

1. 結 言

軽量金属材料であるマグネシウムへの関心の高まりに伴い、その基礎研究の重要性が再認識されつつある。特に最近では、SEM/EBSD 等の新しい実験観察装置を利用して、マグネシウムの主要な変形機構である双晶の形成過程に関する詳細な研究も活発に行われており、多結晶体における双晶領域発展が定量的に把握されつつある。しかしながら、多結晶材料では双晶形成に様々な要因が影響するため、個々の結晶粒内における双晶発生・伝播機構を特定することは難しく、双晶形成に関する詳細は十分に解明されていない。そこで本研究では、結晶塑性有限要素法を用いた単結晶の押し込み負荷解析を実施し、過去の実験観察結果と比較することにより、押し込み負荷時の形状変化と各変形機構の活動状態の点から、双晶領域発展の異方性発現機構を検討する。

2. 解析手法

2.1 構成式 本研究ではPierceら⁽¹⁾が提案した速度依存型結晶塑性モデルを構成式として用い、各有限要素

の積分点に導入した。変形機構としては底面すべり、柱面すべり $\langle a \rangle$ 、1次錐面すべり $\langle a \rangle$ 、1次錐面すべり $\langle a+c \rangle$ 、2次錐面すべり $\langle a+c \rangle$ および引張双晶系を考慮した。また、各変形機構の臨界分解せん断応力に対応する初期変形抵抗は純マグネシウム単結晶を用いた実験値⁽²⁾を参考にし、底面すべり系、非底面すべり系、双晶系に対してそれぞれ、0.5, 40 および 3MPa とした。

2.2 解析モデル 図1に本研究で使用した解析モデルを示す。HCP 結晶と球状圧子の対称性を考慮して、半径 1mm、高さ 1mm の円柱の 1/4 対称モデルを用いた。境界条件としては、モデル底面が全方向に完全固定とし、 $z=0$ における xy 平面および $x=0$ における yz 平面をそれぞれ、 z 方向および x 方向に変位拘束した。半径 0.5mm の球状圧子の押し込みは、モデル上面の節点に強制変位を与えることにより模擬し、摩擦の影響は無視した。また、20 節点次数低減要素を用いた予備解析において見られた

(a) Overview

(b) Enlarged view of (a)

Fig.1 Finite element mesh of analysis model

^{*1} 正員, 熊本大学 (〒860-8555 熊本市中央区黒髪 2 丁目 39-1)

^{*2} 正員, 佐賀大学 理工学部

^{*3} 非会員, 熊本大学大学院 自然科学研究科

E-mail: mayama@kumamoto-u.ac.jp

負荷表面におけるゼロエネルギーモードの発生を回避するため、27 積分点による完全積分を施した 20 節点ソリッド要素を有限要素として用いた。以上の解析モデルに対して、上面と(0001)、 $\{10\bar{1}0\}$ 又は $\{11\bar{2}0\}$ 面がそれぞれ平行となるように全要素に同一初期結晶方位を与えて作成した三種の単結晶モデルに対して押し込み解析を実施した。以下ではそれぞれ、(0001)押し込み、 $\{10\bar{1}0\}$ 押し込みおよび $\{11\bar{2}0\}$ 押し込みと呼ぶことにする。また、最大押し込み深さは5 μm とした。

3. 解析結果

3・1 形状変化 図2は5 μm の押し込み負荷後の変位分布を示しており、(0001)押し込み後の変位分布が y 軸周りにほぼ軸対称的であるのに対して $\{10\bar{1}0\}$ 押し込みおよび $\{11\bar{2}0\}$ 押し込み後の変位分布は z-x 面内で異方的であることがわかる。この結果は、以前に北原ら⁹⁾が純マグネシウム単結晶に対して行った実験結果と定性的によく一致している。

3・2 活動変形機構 図3～6は5 μm の押し込み負荷後に双晶系、底面すべり系、柱面すべり系および2次錐面すべり系の活動により生じた累積せん断ひずみ分布をそれぞれ示している。ここで、累積せん断ひずみは等価な変形機構により生じたひずみの合計値を示している。なお、1次錐面 $\langle a \rangle$ すべり系および1次錐面 $\langle a+c \rangle$ すべり系の活動量は他の変形機構に比べて少なかったためここには示さない。

図3(a)～(c)より、(0001)押し込みでは双晶の活動がほとんど確認されないのに対して、 $\{10\bar{1}0\}$ 押し込みおよび $\{11\bar{2}0\}$ 押し込みでは同様の双晶領域分布が確認される。また図4からは、いずれの押し込みにおいても底面すべり系の活動が確認できるが、(0001)押し込みでは底面すべりが y 軸周りに対称的に生じているのに対して $\{10\bar{1}0\}$ 押し込みおよび $\{11\bar{2}0\}$ 押し込みでは底面すべりが z-x 面内で異方的に活動していることがわかる。これらの結果も、以前に北原ら⁹⁾が純マグネシウム単結晶に対して行った実験結果と定性的に一致している。

図5および図6より、(0001)押し込みでは2次錐面すべり系の活動が顕著であるのに対して、 $\{10\bar{1}0\}$ 押し込みおよび $\{11\bar{2}0\}$ 押し込みでは柱面すべり系の活動の方が著しく、活動変形機構の押し込み面依存性が確認された。

4. 結論

- (1) マグネシウム単結晶の押し込み負荷解析手法を構築し、実験結果と定性的に一致する計算結果が得られた。
- (2) 各変形機構の活動度を比較したところ、(0001)押し込みでは $\{10\bar{1}0\}$ 押し込みおよび $\{11\bar{2}0\}$ 押し込みとは大きく異なる変形機構により変形していることがわかった。

(a) On (0001) (b) On $\{10\bar{1}0\}$ (c) On $\{11\bar{2}0\}$

Fig.2 Distribution of displacement in y-direction after 5 μm of indentation

(a) On (0001) (b) On $\{10\bar{1}0\}$ (c) On $\{11\bar{2}0\}$

Fig.3 Distribution of accumulated shear strain by twin after 5 μm of indentation

(a) On (0001) (b) On $\{10\bar{1}0\}$ (c) On $\{11\bar{2}0\}$

Fig.4 Distribution of accumulated shear strain by basal slip after 5 μm of indentation

(a) On (0001) (b) On $\{10\bar{1}0\}$ (c) On $\{11\bar{2}0\}$

Fig.5 Distribution of accumulated shear strain by prismatic slip after 5 μm of indentation

(a) On (0001) (b) On $\{10\bar{1}0\}$ (c) On $\{11\bar{2}0\}$

Fig.6 Distribution of accumulated shear strain by pyramidal-2 $\langle a+c \rangle$ slip after 5 μm of indentation

文 献

- (1) Pierce, D., Asaro, R.J., Needleman, A., Material Rate Dependence and Localized Deformation in Crystalline Solids, *Acta Metallurgica*, Vol. 31, (1983), pp. 1951-1976.
- (2) Yoshinaga, H., Horiuchi, R., Deformation Mechanisms in Magnesium Single Crystals Compressed in the Direction Parallel to Hexagonal Axis, *Transactions of JIM*, Vol. 4 (1963), pp. 1-8.
- (3) Kitahara, T., Ando, S., Deformation Behavior of Low Index Planes of Mg Single Crystal by Ball Indenter, Proceeding of M&M2011 Conference (CD-ROM), (2011-7) OS2010.