

## 16. 軸力およびねじりの反転負荷を受ける AZ31 押出し円管の塑性変形挙動

### Plastic deformation behavior of AZ31 extruded tube under reversed axial- and torsional-loading

**Abstract** Reversed axial- and torsional-loading tests were carried out for an AZ31 extruded tube, and twinning behavior and its influence on stress-strain curve were investigated. Twined region was identified using SEM-EBSD. The stress-strain curves for tension followed by compression- and compression followed by tension-loading test were asymmetric. Twin did not activate under tensile loading, however it clearly activate under compression loading. Therefore, asymmetric stress-strain curve was caused by the polarity of the twin. On the other hand, the stress-strain curve under reversed torsional loading test has nearly symmetrical shape. The twin activated under both forward torsion- and reversal torsion-loadings. Furthermore, the non-linear behavior was observed just after reverse loading for compression and torsion. This non-linear behavior was not determined by deformation.

**Keywords:** Magnesium alloy, Reversed loading test, Deformation behavior, Twin, Texture.

#### 1. 緒言

マグネシウムは、実用金属中で最も低密度であり比強度、比剛性に優れる。そのため、軽量化を主目的として、電子機器の筐体に用いられ、輸送機器の構造材などへの適用が期待されている<sup>1)</sup>。一方、製造コスト面から、特に冷間塑性加工による生産体制の構築が重要となる。マグネシウムは最密六方晶構造で、室温では非底面すべり系に対して底面すべり系が非常に活動しやすい<sup>2)</sup>。また、活動できるすべり系の不足により、双晶変形も重要な変形機構となる。一般的な圧延や押し出しによって製造されたマグネシウム合金は底面が圧延、押し出し方向に平行に配列された強い底面集合組織を呈する<sup>3)</sup>。このような材料に単軸引張および単軸圧縮を負荷すると、全く異なる応力-ひずみ曲線が得られる<sup>2)-6)</sup>。また、引張→圧縮、圧縮→引張の反転負荷を行うと、双晶の活動および回復が起こり、立方晶とは大きく異なる反転負荷挙動を示す。一方、ねじり→ねじり戻し反転負荷では、負荷反転の前後で軸方向反転負荷のような応力-ひずみ曲線を示さない<sup>6)</sup>。

本研究では、軸力-内圧-ねじり型多軸応力試験機を用いて、AZ31 押出し円管に単軸の引張→圧縮、圧縮→引張、およびねじり→ねじり戻し反転負荷を行い、異なる反転負荷経路における反転負荷挙動を測定する。また、SEM-EBSD を用いて結晶方位情報を取得、双晶の活動量を算定し、変形挙動と双晶の活動との関係を実験的に明らかにする。

#### 2. 実験方法

供試材は公称外形 25 mm、公称肉厚 1 mm のマグネシウム合金押し出し円管(AZ31-F)である。試験片は、Fig. 1 に示すように長さ 100 mm (チャック間距離 50 mm)とした。実験前に 350°C で 1.5 時間保持して焼鈍を施す。供試材は、円周方向の肉厚が不均一である。肉厚の最大と最小の差を平均で除して偏肉率を求めたところ、最大で約 13% であった。

押し出し方向(ED)直交断面において、SEM-EBSD を用いて結晶方位分布を測定した。測定範囲は板厚方向(ND)×円周方向(TD)が 900×300 μm である。4 カ所で測定を行い、それらを統合して得た(0001)極点図を Fig. 2 に示す。極点図より本供試材は底面が ND から TD に分散し、ED への傾きは小さい。押し出し丸棒・円管に見られる底面集合組織を有していた。また、このときには双晶は確認されなかった。

試験中の応力速度は von Mises の相当応力速度が 0.5 MPa/s で一定となるように制御する。また、反転負荷条件として全ひずみ理論における相当塑性ひずみの式に全ひずみを代入し、相当全ひずみ  $\bar{\epsilon}^{\text{Total}}$  を定義した。この  $\bar{\epsilon}^{\text{Total}}$  が規定の値に達した時に除荷および負荷反転する。

#### 3. 実験結果

##### 3.1 単軸引張、単軸圧縮、ねじりの単調負荷試験

試験は単軸引張、単軸圧縮、ねじり負荷試験の 3 種類である。Fig. 3 に測定された真応力-対数ひずみ曲線(以下 S-S 曲線)を示す。軸方向応力を  $\sigma_{11}$ 、軸方向のひずみを  $\epsilon_{11}$  とし、せん断応力を  $\sigma_{12}$ 、せん断ひずみ(テンソル)を  $\epsilon_{12}$  とする。0.2% 耐力は引張負荷時の 192 MPa に対し、圧縮負荷時は 83 MPa であり、両者で 2 倍以上異なる値を示した。ねじり負荷試験では、せん断応力  $\sigma_{12} = 27$  MPa 付近で降伏した。von Mises の相当応力に換算すると、約 46 MPa であり、単軸圧縮負荷時の約 1/2 である。また、降伏直後から  $\epsilon_{12} = 0.004$  までは高い硬化率を示し、それ以降では、相当応力、相当全ひずみ  $\bar{\epsilon}^{\text{Total}}$  換算で単軸圧縮の結果とおおむね一致する結果を得た。

各負荷試験後に測定した双晶面積率を Table 1 に示す。単軸引張後では、双晶面積率は 0.1% を示し、ほとんど双晶は活動していない。一方、単軸圧縮後では約 26% を示し、単軸圧縮負荷時において明ら

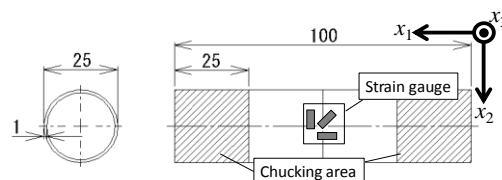


Fig. 1 Geometry of specimen

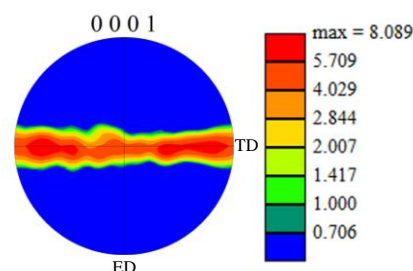


Fig. 2 (0001) pole figure for initial texture

かに双晶が活動している. また, Fig. 4 に単軸圧縮後の(0001)極点図を示す. 双晶の活動により底面がED(負荷方向)へ向いていることが確認できる. ねじり負荷後の双晶面積率は約4%であり, 単軸圧縮負荷時に比べ少ないものの双晶の活動が確認できた.

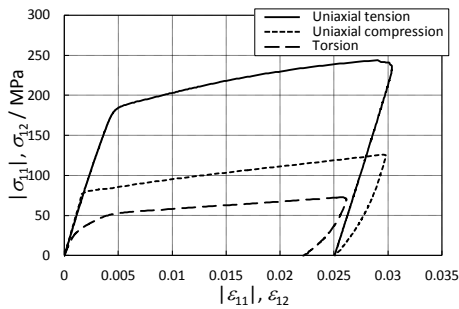


Fig. 3 Stress-strain curves for uniaxial tension, uniaxial compression, and torsion.

Table 1 Area fraction of twin after monotonic loading

Tension	Compression	Torsion
0.1 %	26 %	4.0 %

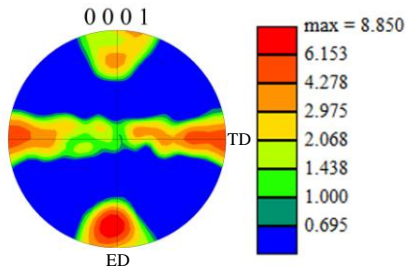


Fig. 4 (0001) pole figure after compression

### 3.2 軸方向およびねじりの反転負荷試験

反転負荷試験は, 相当全ひずみ  $\bar{\epsilon}^{\text{Total}}$  が 0.01, 0.02, 0.03 の 3 水準に達する時に負荷を反転する. 試験は引張→圧縮, 圧縮→引張, およびねじり→ねじり戻しの 3 種類である. まず, Fig. 5 に引張→圧縮における S-S 曲線を示す. 各反転圧縮時の再降伏応力は, 予引張時の最終応力の約 1/2 であり, 大きなバウシinger 効果が現われている. ここで, 図中のパーセント表記は各点における双晶面積率を示す. a 点で 0.1%, b 点で 21%, c 点で 58% と, 圧縮変形が進むにつれて双晶の活動量が増加していることを確認した. Fig. 6 に圧縮→引張の S-S 曲線を示す. 引張→圧縮の試験結果と異なり, 反転直後から S-S 曲線は線形性を失い, 明確な再降伏挙動を示さないまま塑性変形に移行していることが確認できる. また,  $\epsilon_{11} = 0.002$  付近で急激に S-S 曲線の傾きが増加し, その後, 再びその傾きは低下した. 図中に示した各点での双晶面積率は, d 点で 26%, e 点で 23%, f 点で 1.4% を示し, 予圧縮負荷で活動した双晶が反転引張時に回復していることが分かる. また, 双晶回復が十分に行われるとともに, S-S 曲線の傾きが増加していることが分かる. Fig. 7 にねじり→ねじり戻しの結果を示す. 圧縮→引張の試験と同様に反転直後から S-S 曲線は線形性を失い, 明確な再降伏挙動は示さないが, 引張→圧縮, 圧縮→引張時に

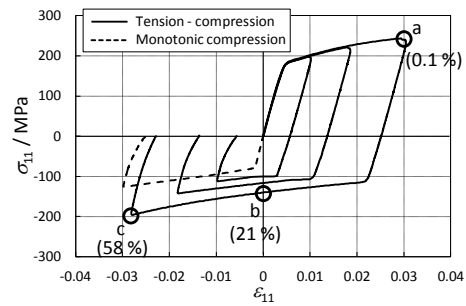


Fig. 5 Stress-Strain curve for uniaxial tension followed by uniaxial compression

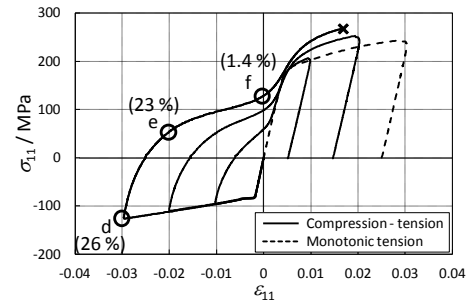


Fig. 6 Stress-Strain curve for uniaxial compression followed by uniaxial tension

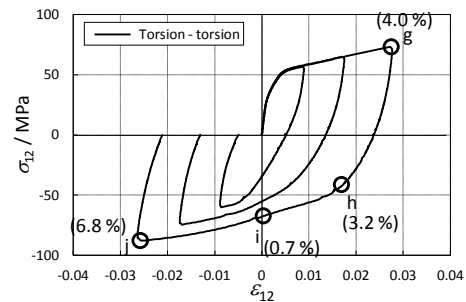


Fig. 7 Stress-Strain curve for torsion followed by reversed torsion

見られたような非対称な挙動は示されない. また, 図中に示す各点における双晶面積率は, g 点で 4.0%, h 点で 3.2%, i 点で 0.7%, j 点で 6.8% となり, ねじり負荷時に活動した双晶は, ねじり戻し負荷時に一時的に回復, その後, 再度活動していることが確認できる.

### 3.3 変形挙動と双晶との関係

本実験結果から, 単軸引張, 単軸圧縮負荷において 0.2% 耐力の値に約 2 倍の差が生じ, 引張→圧縮の結果は, 反転圧縮時の再降伏応力が明らかに小さい結果を示した. また, 単調負荷, 反転負荷試験ともに, 圧縮負荷時に双晶が活動していることが確認された. また, 圧縮→引張の結果では, 予圧縮後の反転引張で双晶の回復が起こり, 特徴的な S-S 曲線が示された. このような引張→圧縮および圧縮→引張での変形挙動は, Lou ら<sup>4)</sup>, Hama ら<sup>5)</sup>などが圧延板を用いた実験で検討している. その結果, 圧縮負荷時に低い応力状態で双晶の活動が起こり, 圧縮後の反転引張時には, 圧縮負荷で活動した双晶が回復することで, 特徴的な S-S 曲線が現われると報告されている. 本実験結果も同様な結果を示した. ま

た, Fig. 4 から, 圧縮負荷方向に対して垂直な底面組織が双晶活動していることが分かる. 同様な結果は, Jiang ら<sup>7)</sup>からも報告されており, 軸方向の負荷条件は圧延板と同様になると考えられる. したがって, 本実験での軸方向単調および反転負荷の結果は, 双晶の活動によるものである.

ねじり→ねじり戻しの結果では, ねじり負荷で活動した双晶は, ねじり戻し負荷において回復し, その後に再度活動した. この結果は, 軸方向反転負荷とは異なる挙動である. ここで, 軸方向負荷試験の結果より, 双晶の活動には極性があることが分かる. そのため, 軸方向負荷試験では, 単一負荷方向でしか双晶の活動および回復は行われぬ. 一方, ねじり戻し反転負荷時においては, 双晶の活動と回復のどちらもが起るため, 軸方向反転負荷試験に見られた特徴的な変形挙動は現われず, S-S 曲線は対称に近い形状となった.

### 3.4 S-S 曲線の非線形性について

本研究に用いた AZ31 押し出し円管は, 単軸圧縮およびねじり負荷, 圧縮→引張およびねじり→ねじり戻し反転負荷において, 除荷および負荷反転直後に S-S 曲線は明確な非線形性を示した. この非線形性は双晶の活動および底面すべりの影響によるものと報告がなされている<sup>8), 9)</sup>. ここで, 本実験の非線形性について考える. まず, 双晶の活動によるひずみを考える. 式(1)に双晶変形で発生するひずみの変化量  $\Delta\varepsilon^{\text{Twin}}$  の算出式を示す.

$$\Delta\varepsilon^{\text{Twin}} = \gamma^{\text{Twin}} \cdot \Delta V_v \quad (1)$$

$\Delta V_v$  は双晶体積率の変化量,  $\gamma^{\text{Twin}}$  は双晶変形によるせん断ひずみであり, ここでは 0.129 とした. 前節の試験結果から, 圧縮→引張において, d から e 点の軸方向塑性ひずみの変化量  $\Delta\varepsilon_p^1 = 0.00975$ , その点間の双晶面積率の変化は約 3 % である. また, ねじり→ねじり戻しにおける g から h 点のせん断塑性ひずみの変化量  $\Delta\varepsilon_p^2 = 0.004$ , その点間の双晶面積率の変化は約 1 % である. ここで, 双晶面積率 = 双晶体積率とし, 双晶変形で発生するひずみがすべて同じ方向だと仮定すると, 双晶変形により得られるひずみはそれぞれ  $\Delta\varepsilon_{11}^{\text{Twin}} = 0.00387$  および  $\Delta\varepsilon_{12}^{\text{Twin}} = 0.00065$  となる. これは, 塑性ひずみ変化量の 40 % および 16 % 程度である. 次に底面すべり系の影響を考える. Fig. 8 に  $\phi_2 = 30^\circ$  時の ODF と Bunge の

Euler 角に対応した底面すべり系の分解せん断応力マップ(RSS マップ)との関係を示す. RSS マップは  $\sigma_{11}$ ,  $\sigma_{12} = 1 \text{ MPa}$  を負荷したときの分解せん断応力の強度分布を表している. 図より単軸引張後の ODF と RSS マップの強度分布は一致せず, 底面すべりは活動しづらいことが分かる. 単軸圧縮後では, 双晶の活動により ODF の強度分布に変化が現われているが, RSS マップとの明らかな一致は得られない. 一方, ねじり負荷後では, ODF と RSS マップの強度分布は一致し, ねじり負荷および除荷は底面すべり系が活動しやすいことが確認できた.

### 4. 結言

本研究より, 以下の知見を得た.

- (1) 単軸圧縮負荷および軸方向反転負荷試験では, 圧縮負荷側で明らかに双晶が活動する.
- (2) 圧縮→引張反転負荷試験では, 予圧縮後の反転引張負荷時に双晶の回復により特徴的な S-S 曲線が示される.
- (3) ねじり→ねじり戻し反転負荷試験では, ねじり, ねじり戻し負荷にかかわらず双晶が活動するため, S-S 曲線は対称に近い形状を示す.
- (4) 単軸圧縮, ねじり負荷および圧縮→引張, ねじり→ねじり戻し反転負荷における除荷, 反転負荷直後の S-S 曲線の非線形性は, 双晶変形によるものだけではない.
- (5) ねじり負荷時において底面すべり系の活動は容易である.

### 参考文献

- 1) Mordike, B.L., et al.: Mater. Sci. Eng. A, **302** (2001), 37-45.
- 2) 金子ら: 軽金属, **54-11** (2004), 484-492.
- 3) Wang, B., et al.: Mater. Sci. Eng. A **534** (2012), 588-593.
- 4) Lou, X.Y., et al.: Int. J. Plasticity, **23** (2007), 44-86.
- 5) Hama, T., et al.: Mater. Sci. Eng. A, **551** (2012), 209-217.
- 6) Zhang, J., et al.: Int. J. Plasticity, **27** (2011), 767-787.
- 7) Jiang, L., et al.: Acta Mater., **55** (2007), 3899-3910.
- 8) Muránsky, O., et al.: Int. J. Plasticity, **23** (2009), 1107-1127.
- 9) Hama, T., et al.: Int. J. Plasticity, **27** (2011), 1072-1092.

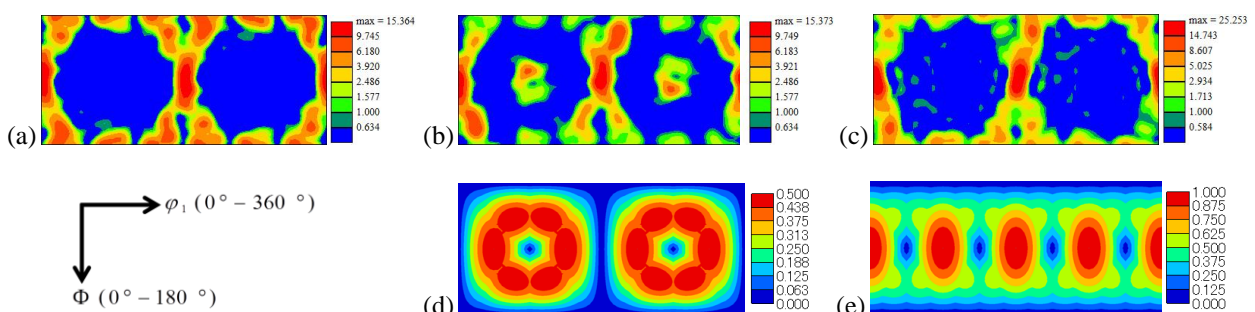


Fig. 8 RSS map and ODF at  $\phi_2 = 30^\circ$

- (a) ODF after tension, (b) ODF after compression, (c) ODF after torsion, (d) RSS map under tension and compression, (e) RSS map under torsion