

平成 30 年 5 月 28 日現在

機関番号：13801

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2015～2017

課題番号：15K05718

研究課題名(和文) すべりと双晶を考慮した結晶塑性モデルによるマグネシウム合金の成形性予測技術の構築

研究課題名(英文) Development of a crystal plasticity model incorporating slip and twin and the prediction of formability of magnesium alloy sheet

研究代表者

吉田 健吾 (Yoshida, Kengo)

静岡大学・工学部・准教授

研究者番号：70436236

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,800,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、マグネシウム合金板が張出変形において極端に成形性が低い原因を明らかにすることを目的としている。圧縮双晶、二重双晶を予測し、損傷を考慮することのできる結晶塑性モデルを構築した。本モデルを有限要素法に導入し、平面ひずみや等2軸の方が、圧縮双晶と二重双晶が早期に多く発生し、それが早期の破断を引き起こしていることを突き止めた。単軸引張、平面ひずみ引張、等2軸引張を荷重した試験片をEBSDで観察した。引張双晶が最も活発に活動し、圧縮双晶と二重双晶の発生量は明らかに少ないことが分かった。本実験結果内において、双晶は極微量であり破断との明瞭な相関は確認されなかった。

研究成果の概要(英文)：The present study is aimed to make clear the reason for the extremely low formability of magnesium alloy sheets when they are subjected to the biaxial-stretching mode. We developed a crystal plasticity model which takes into account the contraction and double twins and also account damage evolution. The model was implemented into FE code and specimens subjected to the plane-strain and equi-biaxial stretching were analyzed. Contraction and double twins were generated in earlier stages for these modes than the uniaxial tension, and it makes the formability lower. Crystallographic orientation of specimens was observed via EBSD. The tension twin activated the most, and the contraction and double twins were generated a few. Within the present experimental data, it is not clear whether the contraction twin is the source of the extremely lower formability or not.

研究分野：塑性力学

キーワード：マグネシウム合金

1. 研究開始当初の背景

軽量化材料としてマグネシウム合金板は有望であるが、室温において著しく延性が低いことが利用拡大を阻んでいる。申請者の実験によれば、単軸引張において限界ひずみは25%程度あり延性は良好であるが、平面ひずみ引張や等2軸引張を受けると5%程度しか伸びず、極端に延性が低下する。これが塑性加工性を悪化させる主要因である。国内外を問わず、マグネシウム合金が低延性となる原因は、最密六方晶構造であること、強い底面集合組織を呈することとされている。しかし、Neil と Agnew (Int. J. Plast. 2009) および Wang ら (Int. J. Solids Struct., 2011) が、結晶塑性モデルを用いて最密六方晶構造をモデル化し、強い底面集合組織を取り入れて AZ31 板のくびれ解析を行ったが、実験で観察されるような平面ひずみ・等2軸引張領域の著しい延性の低下は予測されなかった。すなわち、マグネシウム合金の延性を悪化させる力学的・材料学的要因の全貌は未だ解明されていないと言える。

2. 研究の目的

本研究においては、マグネシウム合金板が張出変形下において極端に成形性が低くなる原因を解明することを目指す。そのために、破壊の起点と言われている圧縮双晶および引張双晶の発生を予測できるような双晶モデルを構築する。さらに、双晶内部へのひずみの集中によってポイドが発達するようなモデルを構築して結晶塑性有限要素法に導入する。この数値モデルを用いて、張り出し成形における成形性を悪化させる要因を検討する。

次に、単軸引張、張り出し成形を行って、その後、結晶組織を観察する。光学顕微鏡、SEM、X線回折、EBSDを適用する。実験によって圧縮双晶の発現を確認する。

3. 研究の方法

3.1. 結晶塑性モデル

Fig. 1 に示すように双晶を薄い層とモデル化して、母相に埋め込まれていると仮定する。双晶界面におけるひずみ適合条件および力のつり合い条件は以下のように書ける。

$$\mathbf{L}_{[\beta]} = \mathbf{L}_{[0]} + \dot{\mathbf{c}}_{[\beta]} \otimes \mathbf{m}_{[\beta]}, \quad \mathbf{m}_{[\beta]} \cdot \boldsymbol{\sigma}_{[\beta]} = \mathbf{m}_{[\beta]} \cdot \boldsymbol{\sigma}_{[0]} \quad (1)$$

ここで、下付添え字は β 番目の双晶相であることを、0 は母相を意味する。 $\mathbf{L}_{[\beta]}$ は速度勾配、 \mathbf{m} は双晶界面単位法線ベクトル、 $\dot{\mathbf{c}}$ は未知数、 $\boldsymbol{\sigma}$ は Cauchy 応力である。 $\beta = 1 \sim N_T$ に対して上式を立てる (N_T は双晶相の数)。

物質点の速度勾配は体積平均として与える。

$$\mathbf{L} = \sum_{\beta=0}^{N_T} f_{[\beta]} \mathbf{L}_{[\beta]} \quad (2)$$

ここで、 $f_{[\beta]}$ は体積分率である。母相、双晶相の構成則は次の速度形の弾・粘塑性構成則で与える。

$$\dot{\boldsymbol{\sigma}}_{[\beta]} = \mathbf{C}_{[\beta]} : \mathbf{D}_{[\beta]} - \dot{\mathbf{P}}_{[\beta]} \quad (3)$$

式(1)~(3)をもとに得られる次式を解くことで、 $\dot{\mathbf{c}}$ を求める。

$$\sum_{\alpha=1}^{N_T} \mathbf{A}^{\beta\alpha} \cdot \dot{\mathbf{c}}_{[\alpha]} = \mathbf{b}_{[\beta]} \quad \beta = 1, \dots, N_T \quad (4)$$

ここで、 $\mathbf{A}^{\beta\alpha}$ 、 $\mathbf{b}_{[\beta]}$ は既知の値によって構成されている。

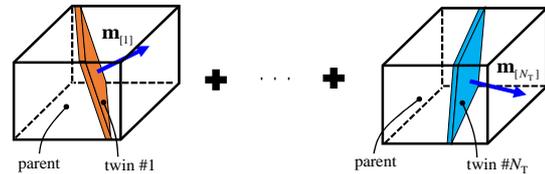


Fig. 1 A twin region is modeled as a thin plate embedded in a parent.

母相、双晶相共に底面、柱面、2次錐面のすべり系を考える。すべり速度 $\dot{\gamma}^{(\alpha)}$ を次式で与える。

$$\dot{\gamma}^{(\alpha)} = \dot{\gamma}_0 \operatorname{sgn}(\tau^{(\alpha)}) \left| \tau^{(\alpha)} / \kappa^{(\alpha)} \right|^{1/m} \quad (5)$$

ここで、 $\dot{\gamma}_0$ 、 m は基準すべり速度、ひずみ速度感受性指数である。母相、双晶相を表す添え字 $[\beta]$ は省略している。 $\kappa^{(\alpha)}$ 、 $\tau^{(\alpha)}$ ($= \mathbf{s}^{(\alpha)} \cdot \boldsymbol{\sigma} \cdot \mathbf{m}^{(\alpha)}$) はすべり抵抗、分解せん断応力、 $\mathbf{s}^{(\alpha)}$ 、 $\mathbf{m}^{(\alpha)}$ はすべり方向およびすべり面の法線方向を表す単位ベクトルである。すべり抵抗は、すべりの累積に関連する項 $g^{(\alpha)}$ と Hall-Petch 則に関連する項 $\xi^{(\alpha)}$ に分解する ($\kappa^{(\alpha)} = g^{(\alpha)} + \xi^{(\alpha)}$)。 $g^{(\alpha)}$ の発展を次式で与える。

$$\dot{g}^{(\alpha)} = h^{(\alpha)} \sum_{\beta=1}^{N_S} \left| \dot{\gamma}^{(\beta)} \right|,$$

$$h^{(\alpha)} = h_0^{(\alpha)} \exp\left(-\frac{h_0^{(\alpha)} \bar{\gamma}}{\tau_\infty^{(\alpha)} - \tau_0^{(\alpha)}}\right). \quad (6)$$

ここで、 $\bar{\gamma}$ は累積すべりである。一方、 $\xi^{(\alpha)}$ は次式で与える。

$$\xi^{(\alpha_{\beta 1})} = \left(\frac{1}{\sqrt{f_{[\beta 1]}}} - 1\right) \sqrt{\frac{\sin \theta}{rd}} \left(\frac{k}{\sigma}\right) \tau_0^{(\alpha_{\beta 1})} \quad (7)$$

ここで、 r は 0~1 の係数、 d は初期結晶粒径、 θ は双晶界面とすべり面の角度であり、 σ, k は Hall-Petch 則 $\sigma = k / \sqrt{d} + \sigma'$ の係数である。母相において {10 $\bar{1}$ 1} 双晶系を考慮する。双晶によるすべり速度と体積分率を関連させる。

$$\sum_{\beta=1}^{N_T} f_{[\beta]} < f_{\max} \text{ の場合,}$$

$$\dot{\gamma}^{(\alpha(\beta))} = \dot{f}_{[\beta]} \gamma_{\text{CNT}}, \quad \dot{f}_{[\beta]} = (\dot{\gamma}_0 / \gamma_{\text{CNT}}) \left| \tau^{(\alpha)} / \kappa^{(\alpha)} \right|^{1/m} \quad (8)$$

γ_{CNT} は圧縮双晶にともなうせん断ひずみで、0.137 である。

双晶内部の累積すべり $\bar{\gamma}_{[\beta]}$ が

$$\bar{\gamma}_{[\beta]} = \gamma_{\text{crit}} \quad (9)$$

を満たすとき、破断が起こると見做す。損傷力学の手法を使用して、材料の剛性を低下させる。

$$\bar{\sigma} = \sigma / (1 - D), \quad \dot{D} = 10 \cdot \dot{\bar{\epsilon}}_{\text{eq}}. \quad (10)$$

ここで、 $\bar{\sigma}$ は有効応力であり、ひずみ等価性の仮定より、積分点の応力を σ としつつ、構成則の応力を $\bar{\sigma}$ に置き換える。

3. 2. 双晶の観察方法

供試材は厚さ 0.8 mm の AZ31 圧延板である。単軸引張試験によって単軸負荷を与えた。一方、板材の成形性評価に使用される張出し試験を用いて、平面ひずみ引張および等二軸引張を負荷した。直径 100 mm の平頭パンチを用いて、平面ひずみ引張は長さ 220 mm、平行部幅 140 mm のドッグボーン形の試験片を用いた。圧延方向が最大主ひずみ方向となるように切り出した。等二軸引張試験には 220 mm の正方形の試験片を用いた。

試料は面出しを行った後、2 種類のダイヤモンド砥粒 (9, 3 μ m) で研磨を行った。最後にエタノールで 5 倍希釈したコロイダルシリカ懸濁液 (粒径 1 μ m) で研磨を行い、腐食液 (硝酸 5 ml, 酢酸 15 ml, 水 20 ml, エタノール 60 ml) で 5 秒間腐食を行った。

EBSD 測定は SEM 倍率を 2000 倍とし、照

射電圧は 20 keV とした。測定範囲は 150 \times 50 μ m とし、単軸引張では 4 箇所、平面ひずみ引張と等二軸引張では 8 箇所について測定した。つまり、測定対象範囲の合計は後者が前者の 2 倍である。

4. 研究成果

4. 1 有限要素法解析

材料特性値は、 $m = 0.01$, $r = 0.25$, $d = 9 \mu\text{m}$, $k/\sigma = 0.07$, $f_{\max} = 0.3$ とした。材料特性値を同定した結果を Table 1 に示す。成形性解析において、破断条件は $\gamma_{\text{crit}} = 0.25, 0.5, 1.0$ の 3 通り、ひずみ比は $\rho = -0.67, 0, 1$ の 3 通りとした。 $\rho = -0.67$ はおおよそ単軸引張を与えるひずみ比である。RD 方向の変位、荷重を U, F とし、初期長さ、板厚を L_0, T_0 とした。解析結果より得られた荷重 - 変位関係を Fig. 2 に示す。 \times は最大荷重点を示す。 $\rho = 0, 1$ では $U/L_0 = 0.07 \sim 0.12$ で荷重低下が起きているのに対して、 $\rho = -0.67$ では 0.17~0.25 あたりで荷重低下が起こっている。すなわち、2 軸張出し領域において明らかに成形性が低下する結果となった。この傾向は実験事実と整合している。Fig. 3 に解析終了時の対数ひずみの最大主値と双晶体積分率の分布を示す。解析条件は $\rho = 0, \gamma_{\text{crit}} = 0.5$ である。細い帯状にひずみが集中しており、その帯状の位置には圧縮双晶が密集して発生している。この帯部にすべり変形が累積した結果、破断条件が満足されて荷重低下を引き起こした。このように、圧縮双晶の発生に起因して破断が発生する過程を再現することができている。他のひずみ比においても同様に圧縮双晶の発生ならびに細い帯状のひずみ集中域が予測された。

Table 1 Material parameters for slip and twin systems (MPa)

	$\tau_0^{(\alpha)}$	$\tau_\infty^{(\alpha)}$	$h_0^{(\alpha)}$
Basal	20	40	20
Prismatic	85	198	240
Pyramidal-2	150	253	350
Contraction	250	-	0

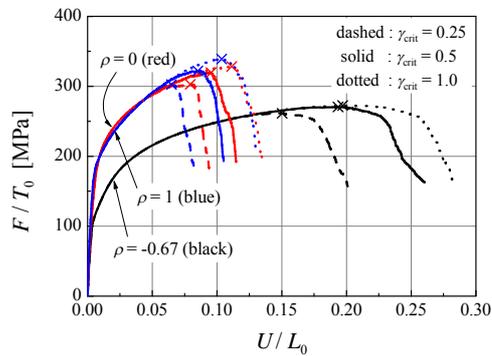


Fig. 2 Load-displacement curve for $\gamma_{crit} = 0.25, 0.5, 1.0$

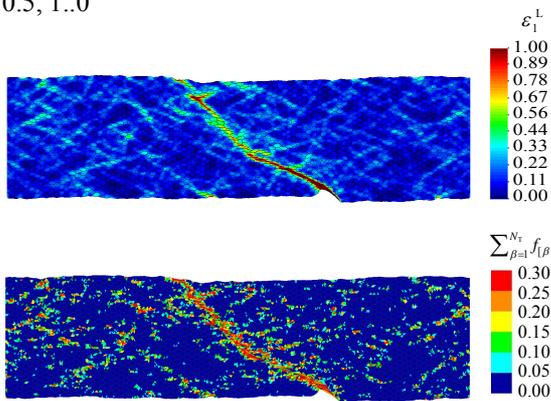


Fig. 3 Distributions of maximum value of principal logarithmic strain and volume fraction of twin.

4. 2. 双晶の観察

試験片の破断部直近から EBSD 用の試料を切り出した。EBSD によって結晶方位マップを取得し、目視によって双晶と思われる箇所を特定し、母相 (Matrix) と双晶相 (Twin) とと思われる位置の結晶方位を全て抜き出した。平面ひずみ引張りによって破断した試験片の EBSD 測定結果を Fig. 4 に示す。わずかではあるが細い線状に結晶方位が変化している箇所を確認できる。線状の部分を実験として、その外部を母相と見做した。双晶の種類を特定するために、母相の結晶方位をもとに、引張双晶、圧縮双晶、二重双晶の発生に伴う結晶回転を全パターン計算し、双晶相の結晶方位と比較した。計算値と双晶相の結晶方位の差が最小となる双晶が発生したと判断した。

各変形モードにおいて観察された双晶の数を Table 2 に示す。なお、平面ひずみ引張と等二軸引張の測定範囲は単軸引張のその 2 倍であった。そこで、これらの変形モードで観察された双晶の量は 1/2 倍して表記してい

る。引張双晶について、単軸引張ではひずみの増加とともに双晶発生量は増えていることが分かる。平面ひずみ引張、等二軸引張では、単軸引張で破壊した試料に対してそれぞれ 1/3 と 1/7 程度であり、引張双晶の発生は明らかに少ない。また、全ての変形モードにおいて、圧縮双晶と二重双晶の発生量は引張双晶よりも少なかった。

このように結晶塑性 FEM で予測されたこととは大きく異なり、圧縮双晶、二重双晶はごくわずかのみの発生にとどまっていることが分かった。

このように極わずかの圧縮・引張双晶が確認できるだけであり、これが本当に破壊を誘発しているかどうかは、本実験検証のみでは明確にできなかった。

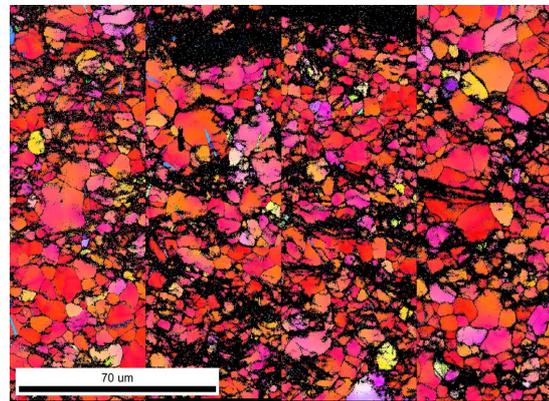


Fig. 4 Inverse pole figure map of a specimen fractured under the plane-strain tension

Table 2 Number of observed twins

	Tension twin	Contract ion twin	Double twin
Equi-biaxial	8.5	2	7
Plane-strain	21	0.5	4.5
Uniaxial	64	1	14

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計 1 件)

Kengo Yoshida, 2016. Prediction of ductile fracture induced by contraction twinning in AZ31 sheet subjected to uniaxial and biaxial stretching modes, International Journal of Plasticity, 84, 102-137. 査読有

〔学会発表〕(計 3 件)

Kengo Yoshida, Prediction of failure in AZ31 sheet under biaxial loadings, Plasticity 2016, 2016.

吉田健吾: 圧縮双晶の発生に起因した AZ31 板の破断の数値解析, M&M 材力カンファレンス 2015, 2015.

田口誠・吉田健吾: マグネシウム合金板の常温における双晶発生量にひずみ状態が与える影響, 日本機械学会東海支部 第 67 期総会・講演会, 2018.

6 . 研究組織

(1)研究代表者

吉田 健吾 (YOSHIDA, Kengo)

静岡大学・工学部・准教授

研究者番号 : 7 0 4 3 6 2 3 6