

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 26 年 6 月 3 日現在

機関番号：17401

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2012～2013

課題番号：24760081

研究課題名(和文) マグネシウム合金における双晶の形成・抑制機構と力学特性に及ぼす影響の解明

研究課題名(英文) Mechanism of twin-detwinning activity and influence on mechanical properties

研究代表者

眞山 剛 (Mayama, Tsuyoshi)

熊本大学・大学院先端機構・准教授

研究者番号：40333629

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,500,000円、(間接経費) 1,050,000円

研究成果の概要(和文)：マグネシウム合金における、双晶挙動に及ぼす第二相の影響を明らかにするため、実験観察と数値解析の両面から研究を実施した。実験的に時効により第二相の体積分率を制御可能なマグネシウム合金AZ91材をモデル合金として、引張と圧縮の予負荷後に反転負荷を与える材料試験を行った。数値解析としては、双晶形成と双晶回復を考慮した結晶塑性解析手法を構築し、実験結果を活動変形機構の点から解釈するために用いた。得られた結果より、予負荷時に導入される双晶量が異なることに起因する反転負荷時の応力-ひずみ挙動の差を指標として、第二相の体積分率が異なる材料の双晶頻度が評価可能であることが示唆された。

研究成果の概要(英文)：Influence of second phase on activity of twinning in magnesium alloys were investigated by experimental observation and numerical calculations. Experimentally, tension after compression and compression after tension were compared for magnesium alloys with different volume fractions of second phase. Numerically, a crystal plasticity finite element method considering twinning and de-twinning were developed and applied to the two different loading histories to interpret the experimental results. The results showed that stress-strain curves were different depending on tensile or compressive preloading because the activity of twinning was different in tension and compression due to frequency of favorably oriented grains for twinning even in cast alloy with random texture. Furthermore, it was suggested that the difference of stress-strain curves was dependent on frequency of twinning for each material with different volume fraction of secondary phase.

研究分野：工学

科研費の分科・細目：機械材料・材料力学

キーワード：双晶 マグネシウム合金 結晶塑性 有限要素法 構成式 塑性変形

1. 研究開始当初の背景

マグネシウム合金は比重が実用金属材料中で最も軽量であることから、輸送機器等の構成材料として適用することにより大幅な軽量化が期待できる。特に最近開発された長周期積層構造(LPSO)相を含む LPSO 型マグネシウム合金は、優れた機械的特性を示すことから研究開始当初より大きな注目を集めていた。

LPSO 型マグネシウム合金は高強度であることに加えて、従来のマグネシウム合金では頻繁に活動する{10-12}双晶系の活動が低減されていることも報告されていた。双晶は変形異方性の強いマグネシウム合金において、c 軸方向の塑性変形を補う変形機構として重要である一方で、引張と圧縮の非対称変形挙動の要因となるため、その挙動に関する詳細の把握が重要である。LPSO 型マグネシウム合金において双晶挙動が低減されている要因としては、LPSO 相の影響が考えられていたが、より一般的に第二相の存在がマグネシウム合金の双晶頻度や巨視的特性にどの程度寄与するのかについての理解は不十分であった。

2. 研究の目的

本研究では、第二相を含むマグネシウム合金に着目し、双晶形成に及ぼす第二相の影響に関する知見を実験観察から取得し、それらの挙動を表現する数値解析手法を構築すると共に、構築した手法を用いて双晶形成機構の理解を深めることにより、双晶の体系的な理解を促進することを目的とした。

3. 研究の方法

研究目的を達成するため、時効により第二相の体積分率を制御可能な商用マグネシウム合金 AZ91 鋳造材をモデル合金として、実験観察と数値解析の両面から研究を実施した。具体的な実施項目は下記のとおりである。

(1) 実験観察による双晶頻度の評価

塑性変形に伴う双晶領域の変化を、変形前後の表面観察により把握した。組織観察は SEM/EBSD を用い、圧縮負荷-除荷を繰返し、除荷時の組織を観察することにより、双晶領域の変化を観察した。また、より定量的に双晶活動度を把握するため、圧縮後の引張り負荷と引張後の圧縮負荷を比較してその応力-ひずみ挙動の差から双晶頻度を推定する手法を構築し、第二相が双晶頻度に及ぼす影響を調査した。

(2) 数値解析による双晶形成機構の検討

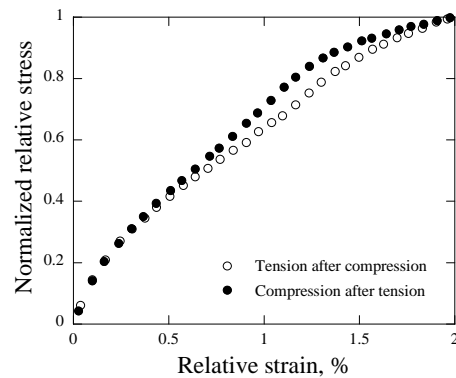
マグネシウムの変形機構を導入した結晶塑性有限要素法を用いて双晶領域発展を定量的に評価することで、双晶形成機構を検討した。また、新たに双晶回復(Detwinning)モデルを導入し、負荷反転時の変形挙動を再現可能とすると共に、その際の活動変形機構を評

価可能とした。さらに構築した手法を本研究で実施した実験観察に対応する負荷挙動へ適用することで、実験単独では把握の難しい双晶の活動度を評価すると共に、双晶と変形挙動の関係を数値的に示した。

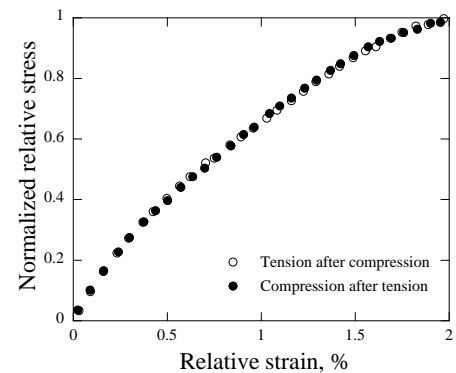
4. 研究成果

(1) 実験観察による双晶頻度の評価

SEM/EBSD を用いた変形前後の表面観察より、時効による第二相の増加に伴い双晶の形態が細かく分断されたものへと変化する傾向が見られた。しかしながら、細かく分散された双晶領域を定量的に評価することが困難であったため、巨視的な応力-ひずみ挙動から双晶の活動度を評価する以下の手法を考案した。



(a) 溶体化材



(b) 170 24 時間時効材

図1 時効に伴う反転負荷時の応力-ひずみ挙動変化

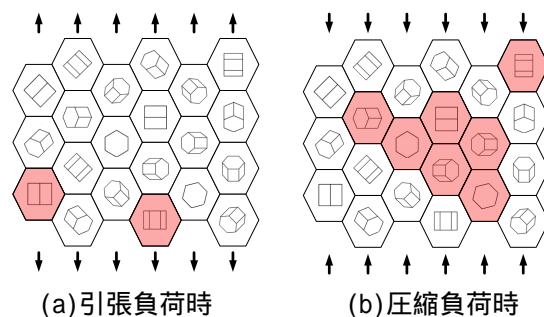


図2 初期ランダム結晶方位を持つ場合における双晶活動度の負荷方位依存性

図1(a),(b)はそれぞれ、溶体化材および170℃で24時間の時効処理を施した時効材の反転負荷における正規化相対応力 - 相対ひずみ曲線を示している。ここで、相対応力と相対ひずみは、負荷反転時を原点としてそこからの応力とひずみの絶対値として定義している。また、応力は定性的な傾向を比較するために正規化している。図1中の○、●印はそれぞれ、圧縮後の引張および引張後の圧縮負荷を示している。図1(a)の溶体化材の結果より、応力 - ひずみ曲線の形状がわずかに下に凸であり、さらに圧縮と引張りの予負荷では応力 - ひずみ挙動が明確に異なることがわかる。しかしながら図1(b)の時効材では、応力 - ひずみ曲線の形状における下に凸の傾向は弱まり、予負荷による応力 - ひずみ曲線の差も小さいことがわかる。

図2にランダム配向した材料における双晶頻度の負荷方位依存性の模式図を示す。図2(a),(b)ではそれぞれ、引張負荷時と圧縮負荷時においてc軸引張双晶の活動が容易な方位を持つ結晶粒を赤色でハイライトしている。すなわち、鑄造材のように初期方位がランダムに配向している場合であっても、双晶頻度が異なると考えられる。図1(a)に示した引張と圧縮の予負荷後の逆負荷時に応力 - ひずみ曲線が異なる挙動は、予負荷時に導入される双晶量が異なるため、逆負荷時の双晶回復量も異なる結果として生じたものと考えられる。また、図1(b)に示した時効による応力 - ひずみ挙動の差の減少は、双晶の活動が減少したと考えることで説明することができる。

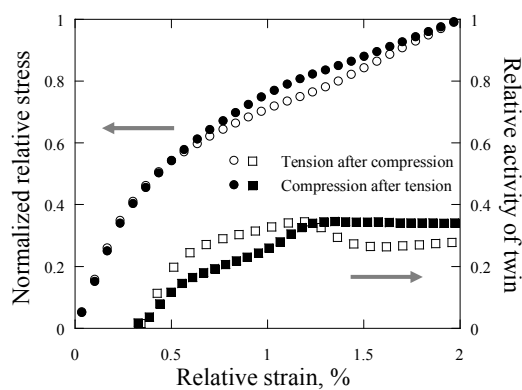
以上のことから、熱処理等により第二相の体積分率を変化させることで、双晶の活動度を制御すると共に、応力 - ひずみ挙動を変化させる可能性を見出すことができた。

(2) 数値解析による双晶形成機構の検討

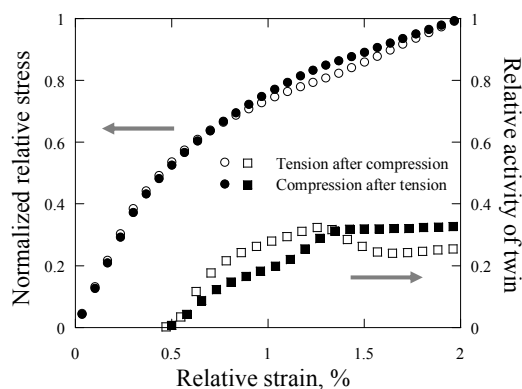
図1に得られた結果をより定量的に活動変形機構の点から解釈するため、双晶形成と双晶回復を考慮した解析手法を構築した。具体的には双晶をすべりと同様に、各双晶系に対する分解せん断応力によりせん断ひずみ速度が生ずるものとしてモデル化し、結晶塑性構成式に導入した。ただし、双晶の極性と幾何学的に定まる双晶により生ずるせん断ひずみ量を考慮し、せん断ひずみ速度に制限を与えるものとした。また、双晶に伴う結晶格子回転は、双晶ひずみを基準として閾値を設定し、その閾値に達した時点で双晶系以外の結晶方位を更新するものとした。さらにその後の変形において、双晶回転に寄与した双晶系のせん断ひずみがゼロとなった時点で双晶回転と逆の回転を与えることで双晶回復に伴う格子回転を表現した。以上の双晶モデルをマグネシウムの変形機構を考慮した大変形結晶塑性モデルに導入し、負荷反転時の双晶回復に起因する挙動を表現可能な数値解析手法を構築した。

図3は構築した解析手法による計算結果の一例であり、図1と同様に逆負荷時における正規化相対応力と相対ひずみの関係および逆負荷中の双晶系の相対活動度を示している。ここで、相対活動度とは、全変形機構の活動量に占める双晶系の活動割合を示している。図3(a)は底面すべり系と双晶系の初期CRSSを20および40MPaとした場合(BSL20TWN40)の結果、図3(b)は第二相の析出により強化された材料を想定して、CRSSを1.5倍した場合(BSL30TWN60)の結果を示している。

図3(a)では、図1(a)と同様に圧縮後の引張と引張後の圧縮で異なる応力 - ひずみ挙動を示しており、実験結果と同様の傾向を再現することができた。また、逆負荷初期において圧縮後の引張では双晶の活動度が引張後の圧縮よりも著しいことがわかる。図3(b)では、図3(a)よりも応力 - ひずみ曲線の差が小さく、双晶の活動も図3(a)の場合より少ない。また、ここには示していないが、双晶の活動を完全に抑制した計算を行うと、予負荷による応力 - ひずみ挙動の差異は生じないことも確認している。以上のことから、予負荷により異なる逆負荷時の応力 - ひずみ挙動は、双晶の活動が原因であり、双晶の活動度が大きいほど逆負荷時の応力 - ひずみ挙動の差も大きくなることを、本研究で構築した数値解析手法を用いることにより示すことが出来た。



(a) BSL20TWN40



(b) BSL30TWN60

図3 結晶塑性解析により得られた応力 - ひずみ挙動と双晶活動度

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計 5 件)

1. T.Hama, T.Mayama and H.Takuda, Deformation behavior of a magnesium alloy sheet with random crystallographic orientations, Key Engineering Materials, 査読有, Vols. 611-612, pp.27-32, 2014, DOI:10.4028/www.scientific.net/KEM.611-612.27
2. R. Matsumoto, M. Otsu, M. Yamasaki, T.Mayama, H. Utsunomiya, Y. Kawamura, Application of Mixture Rule to Finite Element Simulation for Forging of Mg-Zn-Y Alloys with Long Period Stacking Ordered Structure, Materials Science and Engineering A, 査読有, Vol. 548, pp.75-82, 2012, DOI: 10.1016/j.msea.2012.03.088
3. 南秀和, 池田博司, 森川龍哉, 東田賢二, 眞山剛, 田路勇樹, 長谷川浩平, 微細格子マーカー法を用いた複合組織鋼における局所塑性ひずみ分布の可視化, 鉄と鋼, 査読有, Vol. 98, pp.303-310, 2012.
4. T.Mayama, T.Ohashi and Y.Tadano, Lattice rotation in magnesium with LPSO structure subjected to compressive loading, Proceedings of Mg2012, 査読無, pp.1125-1128, 2012.
5. S.Morita, K.Matsushita, T.Mayama, T.Hirai, T.Enjoji and N.Hattori, Fatigue-fractured surfaces and crack paths of textured polycrystalline magnesium alloys, Proceedings of CP2012: 9th international conference on magnesium alloys and their applications, 査読無, pp.571-578, 2012.

〔学会発表〕(計 20 件)

1. 眞山剛, 底面すべりの局所化によるキック帯形成の結晶塑性解析, 日本金属学会 2014 年春季(第 154 回)大会, 2014 年 3 月 22 日, 東京工業大学
2. 眞山剛, マグネシウム合金における塑性変形に伴う組織変化の数値解析, 第 51 回高性能 Mg 合金創成加工研究会, 2013 年 11 月 28 日, 熊本大学
3. 眞山剛, 単一すべり面の支配的な活動に伴う粒内方位差発展に関する結晶塑性解析, 日本機械学会第 25 回計算力学講演会, 2013 年 11 月 2 日, 佐賀大学
4. T.Mayama, Crystal Plasticity Analysis of Basal Slip Localization in Single Crystal Magnesium with LPSO Structure during Compressive Loading, MS&T, October 29, 2013, Montreal Convention Center, Montreal, Canada
5. 眞山剛, 単軸圧縮負荷を受ける HCP 単結晶におけるキック帯形成過程の結晶塑性解析, 日本機械学会 M&M2013 材料力学カンファレンス, 2013 年 10 月 13 日, 金沢大学
6. 眞山剛, 底面すべり系の支配的な活動

に伴う粒内方位差発展に関する結晶塑性解析, 日本金属学会 2013 年秋季(第 153 回)大会, 2013 年 9 月 19 日, 金沢大学

7. 眞山剛, 単軸圧縮負荷を受けるマグネシウム基長周期積層構造単結晶の結晶粒内方位変動解析, 日本金属学会 2013 年春季(第 152 回)大会, 2013 年 3 月 27 日, 東京理科大学
8. T.Mayama, Crystal plasticity analysis of intergranular misorientation development in magnesium alloy with suppression of twinning, The 19th International Symposium on Plasticity and Its Current Applications: Plasticity 2013, January 8, 2013, Sheraton Nassau Beach Resort & Casino, Nassau, Bahama
9. T.Mayama, Crystal plasticity finite element analysis of intergranular misorientation development in LPSO structure, 5th international symposium on designing, processing and properties of advanced engineering materials (ISAEM-2012), November 6, 2012, Loisir Hotel Toyohashi, Toyohashi, Japan
10. T.Mayama, Development of Intragranular Misorientation in Magnesium with LPSO Structure During Compressive Loading, The 7th pan-yellow sea rim international symposium on magnesium alloys (YSR7), October 15, 2012, Institute Metal Research, Shenyang, China
11. T.Mayama, Development of Variation of Crystal Orientation in Magnesium with LPSO Structure During Compressive Loading, International symposium on long-period stacking ordered structure and its related materials 2012 (LPSO2012), October 2, 2012, Sapporo Convention Center, Sapporo, Japan

〔図書〕(計 1 件)

1. M.Noda, Y.Kawamura, T.Mayama, K.Funami, Thermal Stability and Mechanical Properties of Extruded Mg-Zn-Y Alloys with a Long-Period Stacking Order Phase and Plastic Deformation, New Features on Magnesium Alloys (edited by Waldemar Alfredo Monteiro), INTECH, 2012

6. 研究組織

(1)研究代表者

眞山剛 (MAYAMA TSUYOSHI)
熊本大学・大学院先端機構・准教授
研究者番号: 40333629