

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 29 年 5 月 31 日現在

機関番号：17401

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2014～2016

課題番号：26420020

研究課題名(和文) 複相マグネシウム合金のヘテロ構造形成過程と力学特性発現機構の解明

研究課題名(英文) Microstructural development and strengthening mechanism in dual phase magnesium alloys

研究代表者

眞山 剛 (Mayama, Tsuyoshi)

熊本大学・大学院先導機構・准教授

研究者番号：40333629

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,800,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では複相マグネシウム(Mg)合金における不均質構造形成過程と不均質構造の各種因子が力学特性に及ぼす影響について、長周期積層構造相(LPSO相)の体積分率の異なるLPSO型Mg-Zn-Y系合金をモデル材料として実験観察と数値解析の両面から調査した。本研究で得られた主な成果は、(i) 鋳造材の変形挙動に及ぼす組織の影響、(ii) 鋳造材の繰返し負荷挙動と特異な微視構造発展、(iii) 鋳造材および押出材の非線形除荷挙動、(iv) 格子ひずみ評価手法の開発、(v) 押出材の単結晶パラメータ同定、(vi) 他の複相材への展開、である。

研究成果の概要(英文)：In this study, microstructure development process and influences of microstructure on mechanical properties in dual phase magnesium alloys were investigated. As model materials for dual phase magnesium alloys, long-period stacking ordered (LPSO) type Mg-Zn-Y alloys with different volume fraction of LPSO phase are used. Several important insights have been gained including (i) effect of microstructure on mechanical properties in as-cast alloys, (ii) distinctive microstructure development during cyclic loading in as-cast alloys, (iii) nonlinear unloading behavior in as-cast and extruded alloys, (iv) development of analysis method for lattice strain evaluation, (v) parameter identification for extruded alloys, and (vi) application of developed analysis method to dual phase materials other than LPSO type Mg-Zn-Y alloys.

研究分野：材料力学

キーワード：材料力学 連続体力学 計算力学 構造材料 マグネシウム合金

1. 研究開始当初の背景

不均質構造を持つ複相材料は、均質材では得られない優れた力学特性を持ち得ることから注目されている。特に塑性加工で著しい不均質構造が形成される金属基二相材料では、微視構造を制御することにより、強度と延性の両方に優れた材料にもなり得ることが知られている。金属基二相材料の中でも構造用金属材料で最も軽いマグネシウム基の複相合金は、塑性加工により優れた力学特性を付与できることに加えて軽量であることから、輸送機器等への適用を通してエネルギー消費量や温室効果ガスの低減に寄与する材料として期待が寄せられている。

近年開発された長周期積層型マグネシウム合金(LPSO型Mg合金)は塑性加工による強度上昇が著しく、過酷な力学環境下においても適用可能な材料として特に実用化への期待が大きい。LPSO型Mg合金の鑄造材は、LPSO相と α -Mg相からなる明確な二相構造を持つが、塑性加工後の微視構造はより複雑である。すなわち、 α -Mg相が部分的に動的再結晶を起こすことにより微細粒と粗大粒が混在するバイモーダル組織を有するため、加工時に伸長したLPSO相と併せて全体としては二相三領域からなる複雑な構造を持つ。本研究開始当初には、既にLPSO型Mg合金の力学特性に関する多数の報告があり、その不均質構造が力学特性に著しい影響を及ぼすことに関しては明らかにされていた。しかしながら不均質構造の形成過程と特性発現機構に関する詳細、さらに各相の寄与を定量的に説明する試みはほとんどされていなかった。

2. 研究の目的

本研究は不均質構造を持つ複相マグネシウム合金のプロセス設計や構造設計に資する基礎研究として、不均質構造形成過程と不均質構造の各種因子が力学特性に及ぼす影響を明らかにすることを目的とした。複相マグネシウム合金のモデル材料としてLPSO型Mg-Zn-Y系合金を用い、系統的な実験観察を実施すると共に変形挙動を表現する理論を構築し、さらに数値解析を用いた理論の妥当性検証も実施した。

3. 研究の方法

(1) 対象材料

塑性加工により発達する不均質構造の形成過程と不均質構造が形成された材料の力学特性を統一的に理解するためには、塑性加工前の鑄造材と塑性加工材を受けた加工材の両方を対象として特性を評価する必要がある。また、複相材中の各構成相の特性を理解するためには、構成相の体積分率を変化させた複数の材料を用いた比較が有効である。そこで本研究ではLPSO型Mg合金の中でも力学特性のバランスが優れたMg-Zn-Y系合金を対象とし、LPSO相の体積分率の異なる

鑄造材と押出材を用いた。

(2) 実験観察方法

材料挙動の調査項目としては、引張り試験、圧縮試験、引張-圧縮繰返負荷試験、圧縮-除荷繰返試験を実施し、特にLPSO相体積分率が強度、延性、加工硬化挙動および除荷時の非線形挙動に及ぼす影響について詳細に調査した。一部の試料については熱処理に伴う特性変化評価のため硬さ試験も実施した。

組織評価としては光学顕微鏡観察、SEM/EBSD観察、XRD測定は全ての材料に対して実施し、特に詳細な変形メカニズムの調査が必要と判断された材料についてはTEM観察も実施した。

(3) 数値解析方法

本研究で実施する数値解析手法は結晶塑性有限要素法であり、鑄造材の圧縮挙動、除荷時の非線形挙動および押出材の圧縮挙動について変形解析を実施した。変形機構としては α -Mg相には従来のマグネシウムと同様に、底面すべり系、柱面すべり系、錐面すべり系および{1012}双晶形を考慮した。一方でLPSO相の変形機構としては、過去の一方向凝固材を用いた研究報告等に基づき、底面すべり系と柱面すべり系のみを考慮した。また、本研究では双晶回転モデルとして、最も活動の著しい双晶バリエーションに全体が回転するタイプのモデル(PTR)、および全双晶バリエーションの方位を体積分率で重み付けして表現するモデル(MTS)を導入した手法をそれぞれ構築した。さらに、放射光や中性子を利用した格子ひずみ測定結果を、直接数値的に評価する手法を結晶塑性有限要素解析手法に導入した。

4. 研究成果

(1) 鑄造材の変形挙動に及ぼす組織の影響

LPSO相の体積分率が異なる鑄造材の単軸負荷挙動を系統的に調査し、二相合金において高い変形抵抗を示すことを明らかにした。さらに組織観察結果との対応を調査することにより、LPSO相の体積分率と各相境界間隔が力学特性に著しい影響を及ぼすことを明らかにした。さらに実験結果を定量的に記述できる理論を構築し、結晶塑性解析手法に導入した。

(2) 鑄造材の繰返し負荷挙動

ひずみ振幅一定の引張-圧縮繰返し負荷試験を実施したところ、LPSO相の体積分率増加に伴い応力振幅の増加が著しくなる挙動が得られた。この挙動の発現機構をTEM観察により詳細に調査したところ、繰返し負荷を受けたLPSO単相材の一部に特異な変形帯が形成されていることがわかった。

(3) 鑄造材および押出材の非線形除荷挙動

鑄造材と押出材を対象として、段階的に圧縮応力を増加させる圧縮-除荷試験を実施し、除荷時の非線形挙動を調査した。その結果、鑄造材ではLPSO単相材においても顕著な非線形除荷挙動を示すことがわかった。ま

た、ここで得られた結果を結晶塑性有限要素法による数値解析で定量的に再現すると共に、その発現には内部応力の発達に伴う底面すべり系の活動が大きく寄与していることを数値的に示した。

(4) 格子ひずみ評価手法の開発

放射光や中性子を利用したその場観察で得られる格子ひずみ変化を結晶塑性解析の結果と直接比較する評価手法を構築した。具体的には変形解析中に得られる各種分点の応力テンソルと結晶方位の情報から、検出器方向に観察面が配向した結晶粒の平均格子ひずみを計算するものである。本解析手法を用いることにより、従来は巨視的な応力-ひずみ挙動や集合組織の発達から同定していた構成則中の各変形機構のパラメータを、各

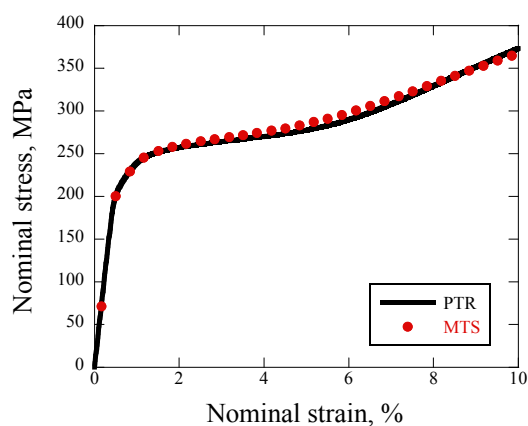


図1 押出材モデルの圧縮負荷解析結果

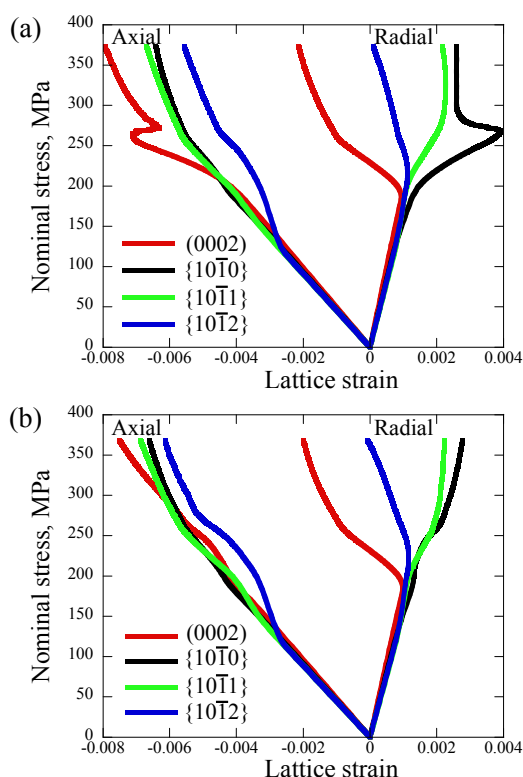


図2 異なる双晶モデルによる圧縮負荷中に発達する格子ひずみの比較
(a) PTR型モデル, (b) MTS型モデル

変形機構の活動度に関するより直接的なデータを考慮して決定することを可能とするものである。図1, 2はその解析例であり、Mgの典型的な押出集合組織を仮定した解析モデルに対して押出軸方向から圧縮負荷を与えた際の応力-ひずみ挙動(図1)と格子ひずみ発展(図2)を示している。異なる双晶モデルを用いた場合、応力-ひずみ挙動がほぼ同一であっても格子ひずみの発達は異なり得ることがわかる。これはPTR型とMTS型の双晶モデルでは双晶格子回転の取り扱いが異なることに起因している。図2(a)に示したPTR型モデルによる軸方向(0002)や半径方向{10T0}法線方向の急激な格子ひずみ変化はPTR型モデル中で設定できる双晶回転の閾値により変化するが、その値の決め方や物理的な妥当性については、さらに詳細な検討が必要である。

(5) 押出材の単結晶パラメータ同定

単軸負荷および圧縮-除荷試験で得られた応力-ひずみ挙動、集合組織変化および格子ひずみ変化の結果に対して結晶塑性解析中の材料パラメータをフィッティングすることで単結晶パラメータを同定する系統的なプロセスについて検討した。

(6) 他の材料への展開

本研究は研究計画立案当初は対象材料としてLPSO型Mg合金のみを想定していたが、構築した解析手法を他の複相材料にも適用し、実験結果を定量的に表現する解析結果も得ることができた。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文](計18件)

1. S. Ogata, T. Mayama, Y. Mine, K. Takashima, Effect of microstructural evolution on deformation behaviour of pre-strained dual-phase steel, *Materials Science and Engineering A*, 査読有, 672 (2017) 353-365.
DOI: 10.1016/j.msea.2017.02.079
2. K. Fukuda, Y. Koyanagi, M. Tsushida, H. Kitahara, T. Mayama, S. Ando, Activation stress for slip systems of pure magnesium single crystals in pure shear test, *Material Transactions*, 査読有, 58 (2017) 587-591.
DOI: 10.2320/matertrans.M2016402
3. K. Shiraishi, T. Mayama, M. Yamasaki, Y. Kawamura, Strain-hardening behavior and microstructure development in polycrystalline as-cast Mg-Zn-Y alloys with LPSO phase subjected to cyclic loading, *Materials Science and Engineering A*, 査読有, 672 (2016) 49-58.
DOI: 10.1016/j.msea.2016.06.069
4. K. Kwak, T. Mayama, Y. Mine, K. Takashima, Anisotropy of strength and plasticity in lath martensite steel, *Materials*

- Science and Engineering A 674 (2016) 104-116.
DOI: 10.1016/j.msea.2016.07.047
5. K. Hagihara, T. Mayama, M. Honnami, M. Yamasaki, H. Izuno, T. Okamoto, T. Ohashi, T. Nakano, Y. Kawamura, Orientation dependence of the deformation kink band formation behavior in Zn single crystal, International Journal of Plasticity, 査読有, 77 (2016) 174-191.
10.1016/j.ijplas.2015.10.005
 6. S. Morita, S. Fujiwara, T. Hori, N. Hattori, H. Somekawa, T. Mayama, Microstructure dependence of fatigue crack propagation behavior in wrought magnesium alloy, Frattura ed Integrità Strutturale, 査読有, 35 (2016) 210-215.
DOI: 10.3221/IGF-ESIS.35.26
 7. T. Mayama, T. Ohashi, Y. Tadano, K. Hagihara, Crystal Plasticity Analysis of Development of Intragranular Misorientations due to Kinking in HCP Single Crystals Subjected to Uniaxial Compressive Loading, Materials Transactions, 査読有, 56 (2015) 963-972.
DOI: 10.2320/matertrans.MH201403
 8. M. Tane, T. Mayama, A. Oda, H. Nakajima, Effect of Crystallographic Texture on Mechanical Properties in Porous Magnesium with Oriented Cylindrical Pores, Acta Materialia, 査読有, 84 (2015) 80-94.
DOI: 10.1016/j.actamat.2014.10.024
 9. K. Shiraiishi, T. Mayama, M. Yamasaki, Y. Kawamura, Influence of Long Period Stacking Ordered Phase on Non-uniform Deformation in Cast Mg-Zn-Y Alloys, Materials Science Forum, 査読有, 816 (2015) 481-485.
DOI: 10.4028/www.scientific.net/MSF.816.481
 10. H. Kitahara, T. Mayama, K. Okumura, Y. Tadano, M. Tsushida, S. Ando, Anisotropic Deformation Induced by Spherical Indentation of Pure Mg Single Crystals, Acta Materialia, 査読有, 78 (2014) 290-300.
DOI: 10.1016/j.actamat.2014.06.039

〔学会発表〕(計 67 件)

1. T. Mayama, Kink deformation behavior in long-period stacking ordered structure during uniaxial loading with stress-reversal, LPSO2014, 2014/10/6, ホテル日航熊本 (熊本県熊本市)
2. T. Mayama, Crystal plasticity analysis of development of intragranular misorientation in hcp metals, IUMRS-ICYRAM2014, 2014/11/26, Haikou (China)
3. T. Mayama, Crystal plasticity analysis of kink bands development in LPSO structure, ASMA6, 2014/12/22, Chengdo (China)

4. 眞山 剛, 結晶配向が制御された純マグネシウム casting 材の異方性変形挙動解析, 日本塑性加工学会平成 27 年度塑性加工春季講演会, 2015/5/30, 慶應義塾大学 (神奈川県横浜市)
5. 眞山 剛, マグネシウム合金における変形組織形成の結晶塑性解析, 日本マグネシウム協会 第 23 回マグネシウム技術研究発表会, 2015/6/2, 機械振興会館 (東京都港区)
6. T. Mayama, Crystal plasticity analysis of kinking in HCP metals subjected to uniaxial compression, AMW2015 (The International Conference: Advanced Materials Week-2015), 2015/6/18, St.Petersburg (Russia)
7. T. Mayama, Crystal plasticity modelling of deformation behavior of cast Mg-Zn-Y polycrystals with LPSO phase, Mg2015, 2015/10/13, Jeju (Korea)
8. 眞山 剛, 二軸圧縮負荷を受ける LPSO 型 Mg 合金の結晶塑性解析, 日本機械学会 M&M2015 材料力学カンファレンス, 2015/11/23, 慶應義塾大学 (神奈川県横浜市)
9. 眞山 剛, LPSO 型 Mg-Zn-Y 合金の繰返し塑性変形挙動, 第 60 回高性能 Mg 合金創成加工研究会講演会, 2016/1/18, 熊本大学 (熊本県熊本市)
10. 眞山 剛, 長周期積層型 Mg-Zn-Y 合金 casting 多結晶材の変形挙動に及ぼす相境界間隔の影響, 日本金属学会 2016 年春季大会, 2016/3/25, 東京理科大学 (東京都葛飾区)

〔図書〕(計 0 件)

〔産業財産権〕
出願状況 (計 0 件)
取得状況 (計 0 件)

〔その他〕

ホームページ

<http://www.msre.kumamoto-u.ac.jp/~koriki/>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

眞山 剛 (MAYAMA, Tsuyoshi)
熊本大学・大学院先導機構・准教授
研究者番号: 40333629