

機関番号：17401

研究種目：若手研究 (B)

研究期間：2009～2010

課題番号：21760082

研究課題名 (和文) 長周期積層型マグネシウム合金の変形機構解明

研究課題名 (英文) Deformation Mechanism of Magnesium Alloy with Long Period Stacking Ordered Structure Phase

研究代表者

眞山 剛 (MAYAMA TSUYOSHI)

熊本大学・大学院先導機構・特任助教

研究者番号：40333629

研究成果の概要 (和文)：

長周期積層構造 (LPSO) 型マグネシウム合金は優れた力学特性を示すことから、輸送機器をはじめとする機械構造物の軽量化材料として注目されている。しかしながらその力学特性発現機構は十分に明らかにされておらず、信頼性向上のためにも早急な解明が望まれている。そこで本研究ではLPSO型マグネシウム合金の中でも実用化を目指して盛んに研究されているMg-Zn-Y系合金を対象としてその変形機構を実験観察と数値解析の両面から定量的に評価した。

研究成果の概要 (英文)：

Magnesium alloys with long period stacking ordered structure (LPSO) phase have attracted much attention because the alloys show excellent mechanical properties. However, the microscopic mechanism of the mechanical properties has not been clarified so far. To establish a reliability of the alloys, the clarification of the mechanism has been expected. In this study, the deformation mechanism of Mg-Zn-Y alloy has been evaluated quantitatively by experimental observation and numerical analysis.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2009年度	2,500,000	750,000	3,250,000
2010年度	900,000	270,000	1,170,000
総計	3,400,000	1,020,000	4,420,000

研究分野：材料力学

科研費の分科・細目：機械工学、機械材料・材料力学

キーワード：連続体力学、マグネシウム合金、長周期積層構造、結晶塑性、HCP

## 1. 研究開始当初の背景

マグネシウムは実用金属中で最も軽いことから、優れた力学特性を持つ合金を開発し機械構造物へ適用することで大幅な軽量化が可能である。そのため、マグネシウム合金の広範囲な適用が、深刻化し続けるエネルギー問題や環境問題への現実的な対応策として期待されている。特に近年開発された

Mg-Zn-Y 系合金は塑性加工を施すことにより、従来のマグネシウム合金と比較して飛躍的に優れた機械的特性を発現するため、輸送機器への適用を目指した研究開発が活発に行われている。

Mg-Zn-Y 系合金はマグネシウムの結晶構造である最密六方(HCP)構造の2H-Mg母相と長周期積層(LPSO)構造という新規な原子

配列構造を含む LPSO 相とからなる二相合金である。さらにこの材料の LPSO 構造は Zn と Y が濃化した二原子層が HCP 構造中に周期的に積層欠陥として導入されたものであり、2H-Mg 母相と比較して著しく高い強度を示す。したがって、Mg-Zn-Y 系合金は 2H-Mg 母相に LPSO 相が強化相として導入されることにより強度を発現していると考えられているが、その変形機構は未だに十分解明されていない。

## 2. 研究の目的

本研究は、LPSO 型マグネシウム合金の中でも特に注目を集めている Mg-Zn-Y 系合金を対象として、実験観察と数値解析の両面からその変形機構を明らかにすることにより、強度発現機構を明らかにするとともに、合金開発および加工技術開発の指針を示すことが目的である。

## 3. 研究の方法

本研究で対象とする Mg-Zn-Y 系合金は 2H-Mg 相と LPSO 相からなる二相合金であり、不均質性が大きい。したがって、本研究では変形に寄与する微視的機構を分離して評価するために、下記の研究を実施することにより各相の変形挙動を抽出した。

### (1) HCP 金属および LPSO 型マグネシウム合金のための解析手法構築

マグネシウムはその結晶構造が HCP 構造であることに起因して、結晶スケールの力学的異方性が著しい。したがって、多結晶体としての挙動を合理的に理解・評価するためには結晶スケールの現象を導入した解析手法である結晶塑性解析が大変有用であると考えられる。そこで本研究では、まず HCP 金属のための結晶塑性解析手法を構築し、さらにそれを二相合金のための手法へと拡張した。構築した解析手法は、単相マグネシウム合金 AZ31 の集合組織形成と異方性変形挙動の実験観察結果と比較することによりその妥当性を検証している(例えば発表論文 1)。

### (2) LPSO 相の体積分率の異なる Mg-Zn-Y 系合金を用いた材料試験と結晶塑性解析

LPSO 相の体積分率が 1~86%となるように秤量した合金成分 ( $Mg_{99.2}Zn_{0.2}Y_{0.6}$ ,  $Mg_{97}Zn_1Y_2$ ,  $Mg_{94}Zn_2Y_4$ ,  $Mg_{92}Zn_3Y_5$ ,  $Mg_{89}Zn_4Y_7$ ) をアルゴンガス雰囲気中で高周波溶解により铸造し、450°Cで押出加工を施すことにより LPSO 相の体積分率の異なる Mg-Zn-Y 系合金を作成した。それらの押出材に対して組織観察および室温下での材料試験を行い、組織と力学特性の関係を評価した。さらに、二相合金を模擬した解析モデルを作成し、結晶塑性解析を実施することにより、

各相における変形機構を定量的に評価した。

## 4. 研究成果

押出材の微視組織観察結果より、2H-Mg 相は集合組織を持つ未再結晶粒領域と押出加工により微細化された再結晶粒領域とに分類できることがわかった。そこで、結晶塑性解析では、図 1 に示す二相三領域モデルを用いることにした。すなわち、押出加工を受けることで強く配行した結晶方位を持つ 2H-Mg 相と LPSO 相、および再結晶によりランダムに配行した 2H-Mg 相の三領域を区別したモデルを作成した。また、各結晶粒の初期方位は XRD 測定および SEM/EBSD 観察で得られたデータに基づき設定した。さらに、実験結果の応力-ひずみ挙動に対するパラメータフィッティングを実施し、LPSO 相の体積分率が異なる各押出材の挙動を定量的に再現できる材料定数を同定した。

図 2 は結晶塑性解析により得られた LPSO 相中における各変形機構の活動度を示している。LPSO 相の体積分率増加に伴い底面すべり系の活動度は低下し、非底面すべり系の活動度が上昇していることがわかる。過去の研究では、LPSO 相では、2H-Mg 相よりもさらに非底面すべり系の活動が困難であるとの報告があることから、ここで得られた非底面すべり系の活動度変化は、二相合金における LPSO 相の体積分率増加に伴う延性低下の一因を間接的に示唆しているものと考えられる。

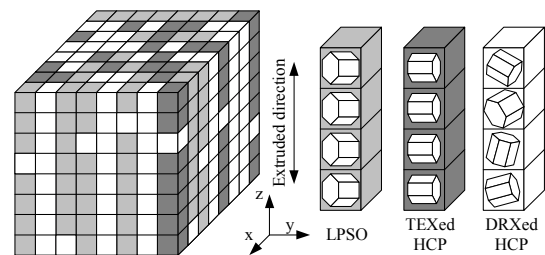


図 1 解析モデルの模式図

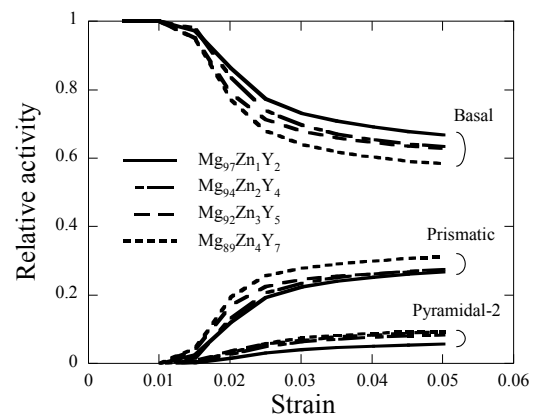


図2 LPSO相における各変形機構の活動度

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計7件)

- 1) T. Mayama, M. Noda, R. Chiba, M. Kuroda. "Crystal plasticity analysis of texture development in magnesium alloy during extrusion." International Journal of Plasticity, (査読有), doi:10.1016/j.ijplas.2011.02.007.
- 2) T. Mayama, T. Ohashi, K. Higashida, Y. Kawamura. "Crystal plasticity analysis on compressive loading of magnesium with suppression of twinning." Magnesium Technology 2011, (査読有) (2011) pp. 273-277.
- 3) T. Mayama, T. Ohashi, K. Higashida. "Influence of grain boundary on activation of slip systems in magnesium: crystal plasticity analysis." Materials Science Forum, (査読有) Vols. 654-656 (2010) pp. 695-698.
- 4) M. Noda, T. Mayama, Y. Kawamura. "Influence of the heat treatment on mechanical properties and microstructure in LPSO Mg-Zn-Y alloys." Magnesium Technology 2010 (査読有) (2010) pp. 501-504.
- 5) 大橋鉄也, 深尾亮太, 伊藤陽介, 眞山 剛. "HCP 双結晶の塑性すべりによって生ずる回位型変形場と応力集中." 日本機械学会論文集中集(A編)(査読有)第76巻第764号(2010) pp. 367-369.
- 6) T. Mayama, K. Aizawa, Y. Tadano, M. Kuroda. "Influence of twinning deformation and lattice rotation on strength differential effect in polycrystalline pure magnesium with rolling texture." Computational Materials Science, (査読有) Vol. 47 (2009) pp. 448-455.
- 7) M. Noda, T. Mayama, Y. Kawamura. "Evolution of mechanical properties and microstructure in extruded Mg96Zn2Y2 alloys by annealing." Materials Transactions, (査読有) Vol. 50 (2009) pp. 2526-2531.

〔学会発表〕(計40件)

- 1) T. Mayama, T. Ohashi, K. Higashida, Y. Kawamura. "Crystal plasticity analysis on compressive loading of magnesium with suppression of twinning." TMS2011, (2011年3月2日), San Diego convention center (San Diego, USA).
- 2) 眞山 剛, "マグネシウム合金における押出集合組織形成機構の数値解析." 第39回高性能Mg合金創成加工研究会講演会(共

催:第84回軽金属学会九州支部例会), (2011年2月7日), 熊本大学(熊本市).

- 3) T. Mayama, M. Noda, Y. Kawamura, M. Kuroda. "Effect of lattice rotation by twinning on texture development during extrusion of magnesium alloy: Crystal plasticity finite element analysis." The 5th pan-yellow sea rim international symposium on magnesium alloys (YSR-5), (2010年11月16日), gis MOTC convention center (台北, 台湾).
- 4) Y. Fukunaga, T. Mayama, Y. Kawamura. "Relationship between volume fraction of LPSO phase and mechanical properties at elevated temperature in Mg-Zn-Y alloys." The 5th pan-yellow sea rim international symposium on magnesium alloys (YSR-5), (2010年11月16日), gis MOTC convention center (台北, 台湾).
- 5) H. Kitahara, K. Okumura, T. Mayama, S. Ando. "Crystal orientation dependence on deformation behavior under ball indentation in single crystalline magnesium." The 5th pan-yellow sea rim international symposium on magnesium alloys (YSR-5), (2010年11月16日), gis MOTC convention center (台北, 台湾).
- 6) 眞山 剛, 野田雅史, 黒田充紀, "結晶塑性モデルによるマグネシウム合金押出材の異方性変形挙動解析." 第61回塑性加工連合講演会, (2010年10月17日), 山形大学(米沢市).
- 7) 松本 良, 大津雅亮, 山崎倫昭, 眞山 剛, 河村能人, "Mg-Zn-Y 二相合金の変形抵抗と各相の特性を考慮した鍛造加工の有限要素シミュレーション." 日本金属学会2010年秋期(第147回)大会, (2010年9月27日), 北海道大学(札幌市).
- 8) 眞山 剛, 大橋鉄也, 東田賢二, "変形双晶を抑制したマグネシウムの圧縮変形挙動解析." 日本金属学会2010年秋期(第147回)大会, (2010年9月27日), 北海道大学(札幌市).
- 9) 福永康文, 眞山 剛, 山崎倫昭, 河村能人, "Mg-Zn-Y系合金の高温引張特性に及ぼすLPSO相体積分率と押出比の関係." 日本金属学会2010年秋期(第147回)大会, (2010年9月27日), 北海道大学(札幌市).
- 10) 眞山 剛, 大橋鉄也, 東田賢二, "マグネシウム単結晶の単軸変形挙動に及ぼす初期不整の影響." 日本機械学会第23回計算力学講演会, (2010年9月24日), 北見工業大学(北見市).
- 11) T. Mayama, T. Ohashi, K. Higashida. "Heterogeneous deformation induced by nonequivalent critical resolved shear stresses in magnesium bicrystal." The 6th

KITECH-KU symposium, (2010年9月15日), 熊本大学(熊本市).

12) 眞山 剛, “結晶塑性モデルによるマグネシウム合金の強度発現因子の検討.” 日本機械学会 2010 年度年次大会ワークショップ, (2010年9月7日), 名古屋工業大学(名古屋市).

13) T. Mayama, T. Ohashi, K. Higashida. “Influence of grain boundary on activation of slip systems in magnesium: crystal plasticity analysis.” PRICM-7, (2010年8月3日), Cairns convention center (Cairns, Australia).

14) 眞山 剛, 野田雅史, 只野裕一, 千葉良一, 黒田充紀. “双晶回転を考慮した結晶塑性モデルによるマグネシウム合金の押出解析.” 日本計算工学会第 15 回計算工学講演会, (2010年5月27日), 九州大学(福岡市).

15) 眞山 剛, 大橋鉄也, 東田賢二. “マグネシウム単結晶および双結晶の非対称変形に関する結晶塑性解析.” 日本材料学会第 59 期学術講演会, (2010年5月22日), 北海道大学(札幌市).

16) 眞山 剛. “結晶塑性解析によるマグネシウムの異方性変形挙動および集合組織発展の検討.” 日本塑性加工学会プロセッシング計算力学分科会第 28 回セミナー, (2010年4月2日), 産業技術総合研究所 臨海副都心センター(東京都).

17) Y. Tadano, T. Mayama, M. Kuroda. “Polycrystalline behavior of pure magnesium based on crystal plasticity approach.” 2nd International Workshop on Advances in Computational Mechanics (IWACOM-II), (2010年3月30日), Conference center of PACIFICO Yokohama (横浜市).

18) 眞山 剛, 大橋鉄也, 東田賢二. “マグネシウム双結晶の不均質変形と活動すべり系に関する結晶塑性解析.” 日本金属学会, 2010年春期(第146回)大会, (2010年3月29日), 筑波大学(筑波市).

19) 北原弘基, 奥村敬太, 永野洋祐, 眞山 剛, 津志田雅之, 安藤新二. “Mg 単結晶の低指数面における球圧子による変形挙動.” 日本金属学会, 2010年春期(第146回)大会, (2010年3月29日), 筑波大学(筑波市).

20) 松本 良, 大津雅亮, 山崎倫昭, 眞山 剛, 河村能人. “Mg-Zn-Y 合金の各相の変形抵抗と複合則に基づく鍛造加工の有限要素シミュレーション.” 日本金属学会, 2010年春期(第146回)大会, (2010年3月28日), 筑波大学(筑波市).

21) 眞山 剛. “実験観察と数値解析による熊大マグネシウム合金の強度発現機構の解明.” 国際ナノテクノロジー総合展・技術会議, (2010年2月17日), 東京ビックサイト

(東京都).

22) M. Noda, T. Mayama, M. Kawamura. “Influence of the heat treatment on mechanical properties and microstructure in LPSO Mg-Zn-Y alloys.” TMS2010, (2010年2月17日), Washington State Convention Center (Seattle, USA).

23) T. Mayama, M. Noda, Y. Kawamura, M. Kuroda. “Experimental observation and crystal plasticity analysis of anisotropic behavior of extruded magnesium alloy.” Plasticity 2010 (Key-note lecture), (2010年1月6日), St. Kitts Marriott Resort & the Royal Beach Casino (St. Kitts).

24) Y. Tadano, T. Mayama, M. Kuroda. “Strain localization analysis of pure magnesium based on crystal plasticity model.” Plasticity 2010, (2010年1月6日), St. Kitts Marriott Resort & the Royal Beach Casino (St. Kitts).

25) 野田雅史, 眞山 剛, 河村能人. “LPSO 型 Mg96Zn2Y2 合金押出材の機械的特性に及ぼす加工熱処理の影響.” 軽金属学会第 117 回秋期大会, (2009年11月14日), 電気通信大学(東京都).

26) T. Mayama, T. Ohashi, K. Higashida. “Crystal plasticity analysis for anisotropic loading behavior in magnesium single crystal.” The 4th Pan-Yellow Sea Rim International Symposium on Magnesium Alloys (YSR-4), (2009年11月13日), 熊本大学(熊本市).

27) 眞山 剛, 大橋鉄也, 東田賢二. “単軸負荷下におけるマグネシウムの活動すべり系に及ぼす結晶粒界の影響.” 日本機械学会第 22 回計算力学部門講演会, (2009年10月12日), 金沢大学(金沢市).

28) 大橋鉄也, 深尾亮太, 伊藤陽介, 眞山 剛. “HCP 型双結晶に生ずる応力集中とその双晶変形及び非底面すべりによる緩和.” 日本機械学会第 22 回計算力学部門講演会, (2009年10月12日), 金沢大学(金沢市).

29) T. Mayama, M. Noda, Y. Kawamura, M. Kuroda. “Deformation anisotropy of extruded magnesium alloy: Experimental observation and crystal plasticity analysis.” ASMA 3, (2009年9月23日), Institute of Metal Research CAS (瀋陽, 中国).

30) 眞山 剛, 野田雅史, 河村能人, 東田賢二. “等二軸圧縮を受けるマグネシウム合金の集合組織発展解析.” 日本金属学会, 2009年秋期(第145回)大会, (2009年9月15日), 京都大学(京都市).

31) 野田雅史, 眞山 剛, 河村能人. “LPSO 相を有する Mg-Zn-Y 合金の機械的特性に及ぼ

す熱処理の影響。” 日本金属学会, 2009年秋期(第145回)大会, (2009年9月15日), 京都大学(京都市).

32) 河村能人, 川崎辰朗, 山崎倫昭, 眞山 剛, 萩原幸司, 東田賢二. “LPSO型Mg97Zn1Y2合金における降伏強さへの複合化モデルの適用.” 日本金属学会, 2009年秋期(第145回)大会, (2009年9月15日), 京都大学(京都市).

33) T. Mayama, M. Noda, Y. Kawamura, K. Higashida. “Anisotropic compressive behavior of extruded magnesium alloy Mg96Zn2Y2: Experimental observation and crystal plasticity analysis.” Thermec 2009, (2009年8月28日), MARITIM Hotel (Berlin, Germany).

34) 眞山 剛, 野田雅史, 河村能人, 黒田充紀. “マグネシウム合金押出材の異方性変形挙動に関する実験および結晶塑性解析.” 日本機械学会 M&M2009 材料力学カンファレンス, (2009年7月26日), 札幌コンベンションセンター(札幌市).

35) 森川龍哉, 東田賢二, 眞山 剛, 山崎倫昭, 河村能人. “電子線リソグラフィ法で作製した微細マーカーによるマグネシウム合金の不均一変形挙動解析.” 日本機械学会 M&M2009 材料力学カンファレンス, (2009年7月26日), 札幌コンベンションセンター(札幌市).

36) 大橋鉄也, 深尾亮太, 伊藤陽介, 眞山 剛. “HCP 双結晶の塑性すべりによって生ずる回位型変形場と応力集中.” 日本機械学会 M&M2009 材料力学カンファレンス, (2009年7月26日), 札幌コンベンションセンター(札幌市).

37) 只野裕一, 眞山 剛, 黒田充紀, 萩原世也. “結晶塑性モデルによる純マグネシウムの局所くびれ挙動解析.” 日本機械学会 M&M2009 材料力学カンファレンス, (2009年7月26日), 札幌コンベンションセンター(札幌市).

38) 河村能人, 川崎辰朗, 山崎倫昭, 萩原幸司, 眞山 剛, 東田賢二. “LPSO型マグネシウム合金における機械的強度への複合化モデルの適用.” 日本機械学会 M&M2009 材料力学カンファレンス, (2009年7月26日), 札幌コンベンションセンター(札幌市).

39) T. Mayama, M. Noda, Y. Kawamura. “Crystal plasticity analysis of texture development of magnesium alloy subjected to bi-axial compression.” KITECH-KU symposium, (2009年7月16日), Ramada Songdo Hotel (Incheon, 韓国).

40) 眞山 剛. “結晶塑性モデルによるマグネシウムの変形解析.” 日本塑性加工学会九州支部第83回技術懇談会, (2009年6月12日), 西日本総合展示場(北九州市).

## 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・特任助教

研究者番号: 40333629