

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 26 年 6 月 13 日現在

機関番号：14301

研究種目：基盤研究(B)

研究期間：2011～2013

課題番号：23360306

研究課題名(和文) OD構造を有する新奇金属間化合物の構造安定性と力学特性

研究課題名(英文) Structural stability and mechanical properties of intermetallic compounds with the order-disorder (OD) structure

研究代表者

岸田 恭輔 (KISHIDA, Kyosuke)

京都大学・工学(系)研究科(研究院)・准教授

研究者番号：20354178

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 14,500,000円、(間接経費) 4,350,000円

研究成果の概要(和文)：次世代の軽量構造用材料として期待されているMg-遷移金属(TM)-希土類(RE)系合金の優れた力学特性発現機構の解明のため、合金中の析出物相としてMg-TM-RE合金中で新しく発見したOD(Order-disorder)構造という特異な積層構造をもつ析出物、OD金属間化合物相について、その結晶構造を記述するためのモデルの構築を確立するとともに、構造安定性、形成過程、塑性変形挙動について調査を行った。

研究成果の概要(英文)：Ternary Mg-TM (Transition-metal)-RE (Rare-earth) phases with long-period stacking-ordered (LPSO) structures have received a considerable amount of attention as new types of strengthening phases in high-strength Mg alloys. These LPSO phases are reported to be beneficial to endowing Mg alloys with high strength and high ductility simultaneously. However, mechanisms behind this have largely remained unsolved. In the present study, the crystal structure models for the LPSO phases were established based on the crystallographic concept of the order-disorder (OD) theory. Structural stability, formation mechanism and deformation behavior of the LPSO/OD phases were investigated.

研究分野：工学

科研費の分科・細目：材料工学，構造・機能材料

キーワード：Order-disorder (OD)構造 結晶構造解析 透過電子顕微鏡法 相安定性 力学特性 変形機構

## 1. 研究開始当初の背景

最近の研究により Mg-Y-Zn 三元系合金において、Mg マトリクス中に長周期積層構造(LPSO)構造を有する第二相(Mg-LPSO 相)を微細分散させた合金が強度と延性に優れることが明らかにされたことから、次世代の超軽量構造材料の候補として Mg-遷移金属元素(TM)-希土類元素(RE)三元系を基礎とする合金系が注目され、特に国内を中心に非常に精力的な研究が行われてきた(Kawamura et al., Mater. Trans., 48, 2986 (2007)). これら新規 Mg-TM-RE 系合金が優れた力学特性を示す要因として、Mg-LPSO 相の存在が関与していることは疑う余地はないが、研究開発当初にはその詳細な役割については解明されていなかった。これは Mg-LPSO 相の力学特性、相安定性や相形成機構といった様々な本質的特性を理解するための基礎である Mg-LPSO 相の結晶構造について、未だ十分に理解されていなかったことにすべての原因があるといっても過言ではなく、その解明が熱望されていた。

申請者の研究グループでは、Mg-Al-Gd 三元系合金中の Mg-LPSO 相について、高角散乱環状暗視野走査電子顕微鏡法(HAADF-STEM)により多方向から原子尺度での構造解析を行い、Mg-Al-Gd 系 LPSO 相が 6 層の最密充填面を 1 ブロックとするブロック積層構造を有する金属間化合物相として記述すべき相であることを示す実験結果、すなわち、Mg-Al-Gd 系 LPSO 相では(1)従来報告とは異なり希土類元素(Gd)が濃縮されるのが積層欠陥部の 2 層ではなく 4 層であり、(2)濃縮 4 重層内において、希土類元素(Gd)と Al が  $L_{12}$  型構造と同様の原子配列をもつクラスター(以下では  $L_{12}$  クラスターと呼ぶ)を形成し、それがブロック内で長周期にわたって規則配列している、ということ明らかにし、従来から研究されている Mg-Zn-Y 系 18R 型 LPSO 相においても、同様の  $L_{12}$  クラスターが点在していることを確認した。このことは、これまで報告されてきた Mg-TM-RE 系 LPSO 相においても、濃縮 4 重層内部における  $L_{12}$  クラスターという構造単位は共通であり、その構造単位(クラスター)の配列様式の違いにより、すべての Mg-RE-TM 系 LPSO 相の結晶構造を整理できる可能性を示唆している。

また Mg-Gd-Al 系 Mg-LPSO 相では、ブロック間の積層に長範囲にわたる積層規則が存在しないことが明らかとなった。つまり、ブロック内の原子配列だけ見れば規則構造としてとらえられるが、結晶全体として見た場合には 3 次元の空間群をあてはめることは妥当ではないということを示唆する。このような結晶構造の特徴は OD(Order-disorder)構造という結晶学的概念で記述されるべきものであること、つまり、Mg-LPSO 相はいわゆる LPSO 相ではなく、正しくは OD 構造を有する金属間化合物相、OD 金属間化合物相として取り扱うべきであることを明らかにした。

## 2. 研究の目的

上述のように Mg-RE-TM 系 OD 金属間化合物相の結晶構造を理解するには、まず OD 理論に基づいた結晶構造記述法を確立し、次に OD 理論を基礎として、ブロック内部における  $L_{12}$  クラスターの安定性、 $L_{12}$  クラスター間の相互作用、さらにはブロック間の相互作用の観点で結晶相を整理する必要がある。そこで本研究では各種 Mg-RE-TM 系 OD 金属間化合物相(Mg-LPSO 相)について、特に  $L_{12}$  クラスターの存在とその分布様式に着目して結晶構造解析を行うとともに、第一原理計算により安定構造についての理論的検討を行い、理論、実験の両面に基づいて OD 金属間化合物相の結晶構造記述のための新しいモデルの構築を行うことを目的とした。さらに結晶構造が明らかとなった Mg-TM-RE 系 OD 金属間化合物相の塑性変形機構を明らかにし、当該化合物相の Mg 合金中での強化相としての利用のための基礎データを提供することを目的とした。

## 3. 研究の方法

(1) Mg-Al-Gd 系 LPSO/OD 金属間化合物相の結晶構造記述法の確立

先に述べたように、Mg-Al-Gd 系 LPSO/OD 相は規則構造を有する構造ブロックが積層した構造で、その積層に長範囲にわたる積層規則が存在しないという特徴を有している。このような結晶構造をまず OD 理論に基づいて解析を行うことで、結晶構造記述法の確立を試みた。つぎに Mg-Al-Gd 系 LPSO/OD 相の結晶構造の特徴を捉え、また第一原理計算での安定性評価や、XRD や TEM-SAED 図形の計算を行いモデルの妥当性を検討するため、そこで OD 理論に基づき、比較的単純な結晶構造を有する多形について、通常的空間群を用いた結晶構造モデルの構築を行った。

(2) Mg-Al-Gd 系 LPSO/OD 金属間化合物相の形成過程と安定構造評価

通常の熱処理状態では一次元不規則構造を有する 18R 型 Mg-Al-Gd 系 LPSO/OD 相について、その特徴的な結晶構造の形成過程ならびに安定構造を調査するため、Mg-Al-Gd 系合金を高周波誘導溶融炉にて溶製したのち、525°Cにおいてさまざまな時間熱処理を施すことで解析用試料を得た。得られた試料について、詳細な組織解析を行った。また項目(1)により決定した各種多形について、VASP コードによる第一原理計算を用いて構造最適化を行い、安定構造の評価を行った。

(3) Mg-Zn-Y 系 LPSO/OD 金属間化合物相の結晶構造解析

項目(1)で得た知見から、これまで解析が行われてきた低 Zn,Y 濃度組成の Mg-Zn-Y 系 LPSO 相では、 $L_{12}$  型原子クラスターの面内密度が低く、その面内規則配列構造が十分に発達しないことが示唆された。そこで面内規則構造と Zn,Y 濃度の相関を明らかにすること

を目的として、より高 Zn,Y 濃度組成を有する Mg-Zn-Y 系 LPSO 相を含む合金の作製を試み、得られた LPSO 相について、SEM, TEM, STEM を用いた詳細な結晶構造解析を行った。

#### (4) Mg-Al-Gd 系 LPSO/OD 金属間化合物相の塑性変形機構解析

結晶構造が明らかとなった Mg-Al-Gd 系 LPSO/OD 相を含む Mg-Al-Gd 三元系合金について、室温大気中において、拘束圧縮試験を行い、その変形組織の解析を行った。変形組織の解析には SEM-EBSD 法, TEM, STEM を用いた。

#### 4. 研究成果

##### (1) 各種 Mg-Al-Gd 系 LPSO/OD 金属間化合物相の結晶構造記述法の確立

Mg-Al-Gd 系 LPSO/OD 相の HAADF-STEM 像を図 1(a), (b) に示す。入射方向はそれぞれ  $[2110]$ ,  $[1100]$  である (ここでは, LPSO/OD 相のミラー指数は Mg マトリクスに準じて付すこととする)。Mg と Al は周期律表で互いに隣り合うためその区別は難しいが、Gd はこれらに比して原子番号が非常に大きいので、HAADF-STEM 像の輝点の強度は Gd 濃度を表していると考えてよい。この構造は、いわゆる 18R 構造に対応し、6 層からなる構造ブロックで構成されている。個々の構造ブロックの原子配列は構造ブロックに依らず、すべて同じであり、構造ブロックの中で希土類元素(Gd)が積層欠陥部の 2 層ではなく 4 層に濃縮されていることが明らかである。濃縮 4 重層のうち内部の 2 層で希土類元素の濃度はより高い。図 1 の HAADF-STEM 像をもとに 6 層からなる構造ブロックの原子配列を構築すると図 2 のように記述できる。濃縮 4 重層内で希土類元素(Gd), Al 原子は完全な規則配列を取る。この希土類元素(Gd)と Al 原子の規則配列は,  $L1_2$  型原子配列を持つ  $Al_6Gd_8$  原子クラスターが、一辺  $2\sqrt{3}a_{Mg}$  ( $a_{Mg}$ : Mg の格子定数)の二次元単純六方格子の格子点に規則配列した構造ということができる。このような  $L1_2$  型原子配列を持つ  $Al_6Gd_8$  原子クラスターの規則配列を伴った構造ブロック内の構成原子の長周期規則配列にもかかわらず、十分な焼鈍を行わなければ、構造ブロック間の積層には長周期の規則性がない。このことは、図 1(b)で  $Al_6Gd_8$  原子クラスターの double-dagger 配列の  $[1120]$  方向へのずれが構造ブロック間でランダムに起こっているこ

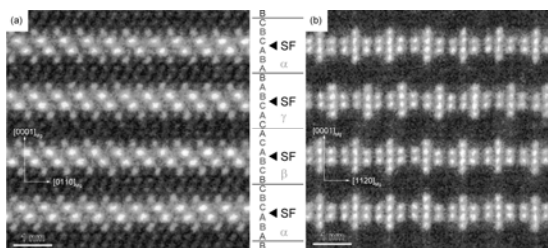


図 1. 18R 型 Mg-Al-Gd LPSO/OD 相の HAADF-STEM 像。

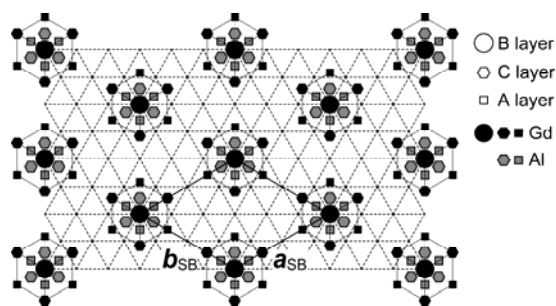


図 2. 構造ブロック内の原子配列 ( $[0001]$  投影)。

とからも明らかである。

一般に OD 理論に基づき結晶構造を記述するためには, (a) 完全規則配列を持つ構造ブロック (OD layer) の対称性の記述, (b) 隣接する OD layer 間の相対関係の記述が必要である。(a) については二次元格子 (単純六方格子) の対称性と, その格子点上に配列させた三次元構造単位 (Motif, 点群:  $3m$ ) の対称性から, レイヤー群:  $P(-3)1m$  として結晶学的に表されることがわかった。また (a) をもとに (b) を検討すると, 12 種類の積層位置は 3 種類, 図 3 に示す  $C_1, C_2, C_3$  に大別でき, それぞれについて, 等価な積層位置が 3 か所, 3 か所, 6 か所あることがわかる。HAADF-STEM 像の詳細な解析の結果, これらの積層位置のうち,  $C_1$  位置が優先的に選択されていることが分かった。このような観察結果をもとに, 18R 型積層を有する Mg-Al-Gd 系 LPSO/OD 相の結晶構造を表す OD-groupoid symbol を以下のように決定した。

$$P \quad 1 \quad 1 \quad 1 \quad \left( \bar{3} \right) \quad \begin{matrix} 2 & 2 & 2 \\ m & m & m \end{matrix}$$

$$\left\{ \begin{matrix} 1 & 1 & 1 \\ 3_3 \end{matrix} \begin{pmatrix} \bar{3} \\ 3_3 \end{pmatrix} \begin{matrix} 2_{1/3} & 2_{-1/3} & 2 \\ n_{1/3,2} & n_{1/3,2} & n_{-2/3,2} \end{matrix} \right\} \quad (1)$$

(1) 式の上段は上述の (a) OD layer の対称性を表すレイヤー群:  $P(-3)1m$  を拡張表記したものであり, 下段は (b) の隣接 OD layer 間の相対関係を示している。これにより 18R 型積層を有する Mg-Al-Gd 系 LPSO/OD 相について, 積層方向に対しても長範囲規則を持つものも持たないものも含んだすべての可能な多形が一つの表式で表されたことになり, 本研究の目的の一つであった Mg-Al-Gd 系 LPSO/OD 相の結晶構造の完全な記述に成功した。

(1) 式により無数の多形が記述されるが, その中で OD 理論では (1) 式に基づき, 比較的単純かつ対称性の良い多形 (polytypes with the maximum degree of order, MDO 多形) を結晶学的に導出することができる。MDO 多形として  $1M$  (空間群:  $C2/m$ ),  $2M$  (空間群:  $C2/c$ ), 多形  $3T$  (空間群:  $P3_112, P3_212$ ) が導き出された。

同様にして 14H 型の Mg-Al-Gd 系 LPSO/OD 相の場合も構造ブロックの対称性は 18R 型のもと同じであることを確認した。積層位置は図 4 に示す  $A_1, A_2, A_3, A_4$  の 4 種類となり, このうちの  $A_2$  位置が優先的に選択されるこ

とが分かった．これにより OD-groupoid symbol を以下のように決定した．

$$P \quad 1 \quad 1 \quad 1 \quad \left( \begin{matrix} 3 \\ \bar{6} \end{matrix} \right) \quad \frac{2}{m} \quad \frac{2}{m} \quad \frac{2}{m}$$

$$\left\{ \begin{matrix} 2_1 & 2 & 2_{-1} \\ n_{1/3,2} & n_{-2/3,2} & n_{1/3,2} \\ \bar{6} \\ 2_2 \\ 6_6 \\ 1 & 1 & 1 \\ n_{1,1/3} \end{matrix} \right\} \quad (2)$$

また 14H 型 Mg-Al-Gd 系 LPSO/OD 相の MDO 多形として，2 つの構造ブロックからなる多形 2H(空間群：P6<sub>3</sub>22)と 6 つの構造ブロックからなる多形 6R(空間群：R3c)を導出した．

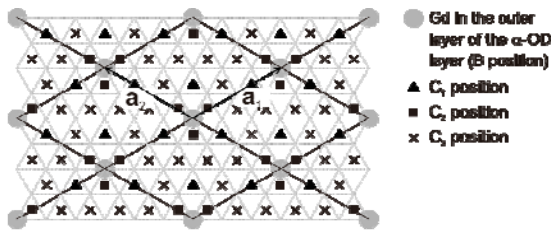


図 3. 18R 型 Mg-Al-Gd LPSO/OD 相の構造ブロックの積層位置．

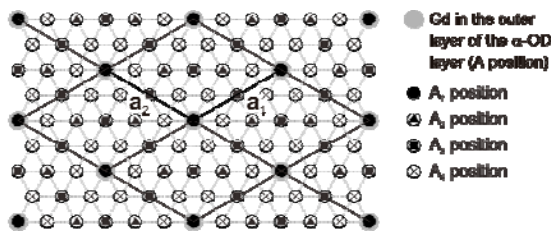


図 4. 14H 型 Mg-Al-Gd LPSO/OD 相の構造ブロックの積層位置．

## (2) Mg-Al-Gd 系 LPSO/OD 金属間化合物相の形成過程と安定構造評価

525°Cにおいてさまざまな時間熱処理を施した Mg-Al-Gd 三元系合金中に存在する Mg-Al-Gd 系 LPSO/OD 相の微細構造変化を調べた結果，18R 型 Mg-Al-Gd 系 LPSO(OD)相の形成・成長過程は以下の順に起こることが明らかとなった．

- ① Gd および Al 原子の 4 重層濃縮(hcp 積層維持) (図 5 中プロファイルの矢印部分)
- ② Al<sub>6</sub>Gd<sub>8</sub> 原子クラスターの形成 ( hcp 積層中への fcc 積層の導入，4 重濃縮原子層中央部への積層欠陥の導入に対応)
- ③ OD 構造の形成 (Al<sub>6</sub>Gd<sub>8</sub> 原子クラスターの面内長周期配列，優先積層関係でのブロック積層，異なる構造ブロックの消失(図 6(a))
- ④ 構造ブロック積層の長周期化(図 6(b))

また 525°Cにおける安定構造は 6 原子層からなる構造ブロック一つを単位格子とする単斜晶系の 1M 型 MDO 多形 (空間群：C2/m)であることが明らかとなった(図 6(b))．VASP コードを用いた第一原理計算により，3 種類の

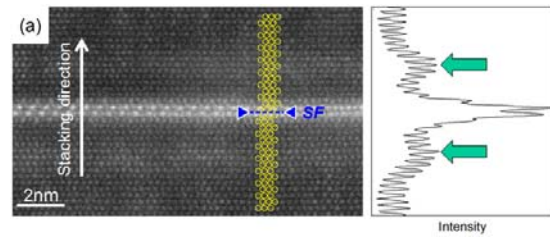
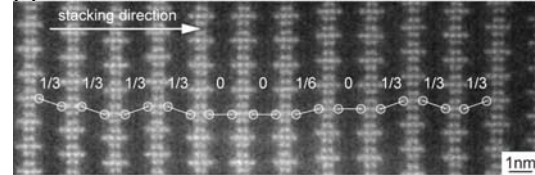


図 5. Mg-Al-Gd 系合金凝固材中に見られる 1 構造ブロックからなる LPSO/OD 相を含む領域の高分解能 HAADF-STEM 像と強度プロファイル．プロファイル中の矢印の位置に Gd, Al の濃化を示す強度の増大が見られる．

## (a) 525°C 4 h 熱処理材



## (b) 525°C 64 h 熱処理材

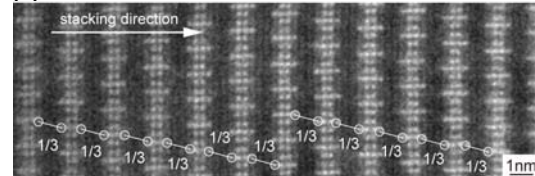


図 6. Mg-Al-Gd 系合金熱処理材中に見られる LPSO/OD 相の構造ブロック積層の熱処理時間による変化．

MDO 多形のエネルギーを比較したところ，1M 型が最も低いエネルギーを有することが確認できたが，多形間のエネルギー差は非常にわずかであることが分かった．

## (3) Mg-Zn-Y 系 LPSO/OD 金属間化合物相の結晶構造解析

これまでに解析を行った Zn,Y 希薄組成の合金(Mg-1at.%Zn-2at.%Y 合金)と比べて高 Zn, Y 組成を有する種々の Mg-Zn-Y 三元系合金を溶製，熱処理を施すことで，合金(1): 14H 型 LPSO 相，18R 型 LPSO 相，W 相の三相共存，合金(2): 18R 型 LPSO 相，10H 型 LPSO 相，W 相の三相共存，の 2 合金を含む様々な合金を得た．これらの合金中に形成される 18R 型 LPSO 相から得た SAED 図形の解析の結果(図 7)，合金(1)中に見られる 18R 型 LPSO 相には Incommensurate な変調構造の存在が示唆されたのに対し，合金(2)中に形成される 18R 型 LPSO 相は Mg-Al-Gd 系 LPSO 相で見られたものと同様の Zn<sub>6</sub>Y<sub>8</sub> 原子クラスターの面内長周期配列構造を有すること，すなわち OD 構造の発達が確認できた．さらに長時間の熱処理により 14H, 18R, 10H 型の 3 種類の異なる Mg-Zn-Y 系 LPSO/OD 相の OD groupoid symbol 並びに長時間熱処理により収斂する完全規則構造を明らかにした．また 18R 型 LPSO 相には組成幅があり，Zn,Y 濃度が完全規則状態よりわずかに低い場合には，Zn<sub>6</sub>Y<sub>8</sub>

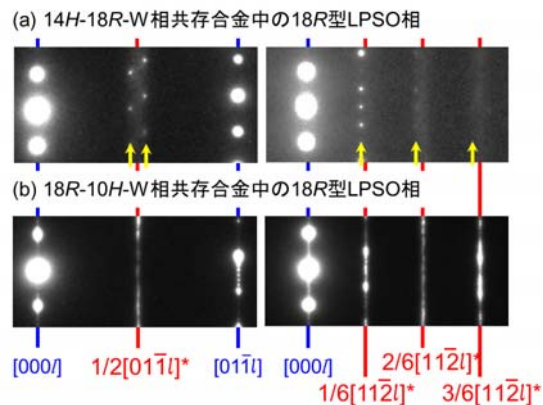


図7. 高 Zn,Y 組成 Mg-Zn-Y 三元系合金中に形成される 18R 型 LPSO 相からの SAED 図形。(a)では矢印で示す Incommensurate な位置に回折斑点列が存在しており、変調構造が形成されていることがわかる。

原子クラスターが規則配列したドメインが形成され、それが Incommensurate な変調構造を生じさせている原因であることを明らかにした。

#### (4) Mg-Al-Gd 系 LPSO/OD 金属間化合物相の塑性変形機構解析

Mg 相と Mg-Al-Gd 系 LPSO/OD 相が共存する合金の拘束圧縮変形を行ったところ、荷重軸方位が Mg 相の底面にほぼ平行で非拘束方向が c 軸とほぼ平行である結晶方位を有する結晶粒において、{1121}変形双晶が活動することを確認した。このタイプの変形双晶は c 軸引張双晶に対応し、これまでに Mg 合金では活動が観察されていなかったタイプのものである。またその変形双晶は Mg-Al-Gd 系 LPSO/OD 相を貫通して伝播しており、Mg-Al-Gd 系 LPSO/OD 相においても、Mg における {1121}変形双晶に対応する変形双晶が活動することが明らかとなった(図8)。

#### 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 8 件)

- ① K. Kishida, H. Yokobayashi, H. Inui, The most stable crystal structure and the formation processes of an order-disorder (OD) intermetallic phase in the Mg-Al-Gd ternary system, Philosophical Magazine, 査読有, Vol. 93, Issue 21 (2013), pp. 2826-2846.  
DOI: 10.1080/14786435.2013.790566
- ② K. Kishida, H. Yokobayashi, A. Inoue, H. Inui, Crystal Structures of Long-Period Stacking-Ordered Phases in the Mg-TM-RE Ternary Systems, MRS Symposium Proceedings, 査読有, Vol.1516 (2013), pp. 291-302.

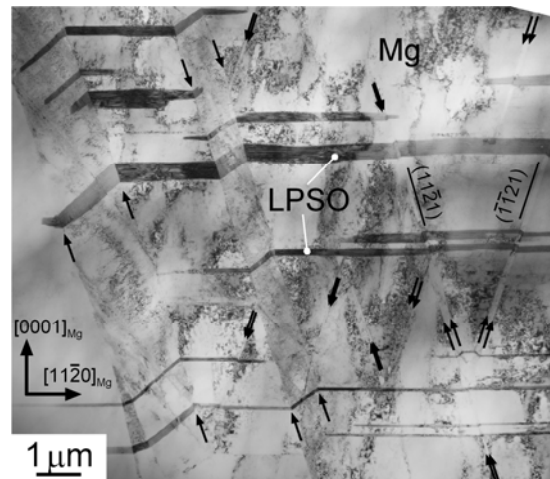


図8. Mg 母相中に Mg-Al-Gd 系 LPSO/OD 相を含む多結晶合金の平面歪圧縮変形後の変形組織。図中の矢印は変形双晶の境界を示す。Mg 相の{1121}双晶が LPSO/OD 相を屈曲させており、その部分では LPSO/OD 相も変形双晶により変形していることが確認できた。

DOI: 10.1557/opl.2013.17

- ③ A. Inoue, K. Kishida, H. Inui, K. Hagihara, Compression of Micro-pillars of a Long Period Stacking Ordered Phases in the Mg-Zn-Y Systems, MRS Symposium Proceedings, 査読有, Vol.1516 (2013), pp. 151-156.  
DOI: 10.1557/opl.2012.1749
- ④ 乾 晴行, 岸田恭輔, 2. LPSO 相の結晶構造—原子配列と積層構造の記述—, 日本金属学会分科会シンポジウム予稿 シンクロ型 LPSO 構造の材料科学—次世代軽量構造材料へのイノベーション—, 査読無, (2013), pp.7-10.
- ⑤ K. Kishida, H. Yokobayashi, H. Inui, M. Yamasaki, Y. Kawamura, The crystal structure of the LPSO phase of the 14H-type in the Mg-Al-Gd alloy system, Intermetallics, 査読有, Vol.31 (2012), pp.55-64.  
DOI: 10.1016/j.intermet.2012.06.010
- ⑥ K. Kishida, H. Yokobayashi, H. Inui, M. Yamasaki, Y. Kawamura, Crystal Structure Evolution of an OD Intermetallic Phase in the Mg-Al-Gd System, Proc. of the 9th International Conference on Magnesium Alloys and their Applications (Mg2012), 査読有, (2012), pp. 429-434.
- ⑦ H. Yokobayashi, K. Kishida, H. Inui, M. Yamasaki, Y. Kawamura, Enrichment of Gd and Al atoms in the quadruple close packed planes and their in-plane long-range ordering in the long period stacking-ordered phase in the Mg-Al-Gd system, Acta Materialia, 査読有, Vol.59, Issue 19 (2011), pp.7287-7299.  
DOI: 10.1016/j.actamat.2011.08.011
- ⑧ H. Yokobayashi, K. Kishida, H. Inui, M. Yamasaki, Y. Kawamura, Structure Analysis of a Long Period Stacking Ordered Phase in

Mg-Al-Gd Alloys, MRS Symposium Proceedings, 査読有, Vol.1295 (2011), pp. 267-272.  
DOI: 10.1557/opl.2011.36

[学会発表] (計 31 件)

- ① K. KISHIDA, Crystal Structure and Plastic Deformation of Long-Period Stacking-Ordered Phases in the Mg-TM-RE Ternary Systems, 2014 China-Japan Workshop on Intermetallic and Inorganic Compounds, 2014.3.17-19, Vision Hotel (Beijing, China)
- ② 岸田恭輔, TEM/STEM による結晶構造・欠陥構造の解析, 日本材料学会第 62 期第 2 回分子動力学部門委員会, 2014.3.12, 日本材料学会.
- ③ 岸田恭輔, 複雑な結晶構造を有する金属間化合物の変形双晶, 第 2 回プラストンに基づく変形現象研究会~特異な変形挙動を示す Mg 合金および金属間化合物~, 2013.12.13, 京都大学 吉田キャンパス.
- ④ 岸田恭輔, 乾 晴行, Mg-TM-RE 系 LPSO 金属間化合物の結晶構造と変形, 第 57 回日本学術会議材料工学連合講演会, 2013.11.25-26, 京都テルサ.
- ⑤ 岸田恭輔, Mg 基 LPSO/OD 金属間化合物の構造と変形, 2013 年度東北大学金属材料研究所ワークショップ「格子欠陥が挑戦する新エネルギー・環境材料開発」, 2013.11.18-19, 東北大学金属材料研究所.
- ⑥ 岸田恭輔, 透過電子顕微鏡法による金属間化合物材料の結晶構造・欠陥構造解析, 日本顕微鏡学会第 57 回シンポジウム, 2013.11.15-16, ウィンクあいち.
- ⑦ 岸田恭輔, 横林秀幸, 乾 晴行, Mg 基 OD(LPSO)金属間化合物相の形成過程と安定構造, 日本金属学会秋期(第 153 回)大会, 2013.9.17-19, 金沢大学 角間キャンパス.
- ⑧ K. Kishida, H. Yokobayashi, A. Inoue, H. Inui, Crystal Structure and Plastic Deformation of Long-Period Stacking-Ordered Phases in the Mg-TM-RE Ternary Systems, 2012 MRS Fall Meeting, 2012.11.25-30, Hynes Convention Center (Boston, USA).
- ⑨ K. Kishida, H. Inui, Crystal Structure of Mg-TM-RE LPSO Phases - LPSO Structure and Order-disorder (OD) Structure -, LPSO2012, 2012.10.1-3, Sapporo Convention Center (Sapporo, Japan).
- ⑩ 岸田恭輔, Mg 基 OD(LPSO)金属間化合物の構造と変形, 日本金属学会秋期(第 151 回)大会, 2012.9.17-19, 愛媛大学 城北キャンパス.
- ⑪ K. Kishida, H. Yokobayashi, H. Inui, M. Yamasaki, Y. Kawamura, Crystal Structure Evolution of an OD Intermetallic Phase in the Mg-Al-Gd System, 9th International Conference on Magnesium Alloys and their

Applications (Mg2012), 2012.7.8-12, Sheraton Wall Centre Hotel (Vancouver, Canada).

- ⑫ 岸田恭輔, 横林秀幸, 乾 晴行, Mg-Al-Gd 三元系 OD 金属間化合物相の構造多形, 日本金属学会春期(第 150 回)大会, 2012.3.28-30, 横浜国立大学常盤台キャンパス.
- ⑬ 岸田恭輔, 横林秀幸, 乾 晴行, 山崎倫明, 河村能人, Mg-Al-Gd 三元系金属間化合物の OD 理論による結晶構造の記述, 日本金属学会秋期(第 149 回)大会, 2011.11.7-9, 沖縄コンベンションセンターおよびカルチャーリゾートフェストーネ.
- ⑭ K. Kishida, H. Yokobayashi, H. Inui, M. Yamasaki, Y. Kawamura, Crystal Structure of Long Period Stacking Ordered Phases in the Mg-Al-Gd System, THERMEC' 2011, 2011.8.1-5, Quebec city Convention centre, (Quebec, Canada).

[その他]

ホームページ等

<http://imc.mtl.kyoto-u.ac.jp/Mg-OD.html>

<http://imc.mtl.kyoto-u.ac.jp/kishida/index.html>

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

岸田 恭輔 (KISHIDA, Kyosuke)

京都大学・工学研究科・准教授

研究者番号：20354178

研究者番号：

### (2) 研究分担者

なし

### (3) 連携研究者

なし