

平成 28 年 6 月 10 日現在

機関番号：14301

研究種目：新学術領域研究（研究領域提案型）

研究期間：2011～2015

課題番号：23109002

研究課題名（和文）原子レベル構造解析によるLPSO構造の構造物性発現機構の解明

研究課題名（英文）Atomic-resolution structure analysis of LPSO structures to explore the structure-property relationships

研究代表者

乾 晴行（INUJI, HARUYUKI）

京都大学・工学（系）研究科（研究院）・教授

研究者番号：30213135

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 88,600,000円

研究成果の概要（和文）：Mg-Al-GdおよびMg-Zn-Y系LPSOの結晶構造を原子レベルで決定した。Gd, Al あるいはZn, Yは隣接4原子層に濃縮し、L12型原子クラスターを形成する。L12型原子クラスターの面内配列はMg-Al-Gd系の場合は規則的であるが、Mg-Zn-Y系の場合はZn, Y濃度の増加により不規則から規則的に変化する。濃縮4原子層を含む原子層を構造ブロックとした積層構造として規則 - 不規則（OD: Order-Disorder）構造として結晶構造が記述できる。構造ブロックの原子層数（5～8）により、多種の構造多形が形成され、それぞれに最も単純な積層構造およびその空間群を決定した。

研究成果の概要（英文）：Crystal structures of LPSO phases in the Mg-Al-Gd and Mg-Zn-Y systems have been determined by atomic-level structural analysis. The enrichment of Gd and Al (Zn and Y) atoms in LPSO phases in the Mg-Al-Gd (Mg-Zn-Y) system occurs in the four consecutive close-packed atomic layers by forming atomic clusters with the atomic arrangement of the L12-type. The in-plane arrangement of these L12 clusters is ordered for LPSO phases in the Mg-Al-Gd system, while for LPSO phases in the Mg-Zn-Y system, it changes from disordered to ordered as the Zn, Y concentration increases. These crystal structures based on the stacking of structural blocks containing the four-consecutive atomic layers enriched with Gd and Al (Zn and Y) atoms can be described crystallographically as order-disorder structures. Many polytypes can be formed depending on the number of atomic layers of structural blocks, and simplest stacking structures and their space groups can be assigned for each of them.

研究分野：材料物性

キーワード：原子配列解析 透過電子顕微鏡法 3次元アトムプローブ法 陽電子消滅実験 規則 - 不規則構造 規則化 積層 シンクロ型LPSO構造

1. 研究開始当初の背景

近年、Al 合金を遙かに凌駕する力学特性を示す新規な Mg 合金が日本で開発され (Kawamura et al., Mater. Trans., 42 (2001) 1172), Mg 合金の実用化の進展への期待が高まっている。この新規な Mg 合金では高強度と高延性が両立しており、引抜などの加工により更にそれら特性が飛躍的に向上することが知られている。このような特徴的な力学特性は、新規な Mg 合金が長周期積層構造 (Long-period Stacking Ordered Structure; 以下 LPSO) と呼ばれる特異な原子配列構造を含むためと考えられているが、優れた力学特性の発現との相関には不明な点が多い。この最大の理由は、LPSO 構造の原子配列が未だ十分には解明されていないことにある。本研究の目的は、最新の電子顕微鏡法による原子の直接観察と 3 次元アトムプローブ法、陽電子消滅ドップラー広がり法を組み合わせた新たな解析法により、この未解明の LPSO 構造の原子配列を世界に先駆けて解明することにある。高強度と高延性が両立した新規な Mg 合金 Mg-TM-RE (TM=遷移金属, RE=希土類金属) 系合金で見られる LPSO 構造は、濃度変調と構造変調が同期した新奇な構造であり、特定元素の特定面内濃縮とその周辺での積層欠陥の形成が同期する。いわば、シンクロ型 LPSO 構造と呼ぶことができ、新規な物性の発現が大いに期待できる。特定元素の特定面内濃縮と積層欠陥の導入が、例えば格子歪の緩和とどのように関連するのか、また、それがどのように合金強化や双晶変形を伴わない新規な変形メカニズムと関連するのか、解明が大いに待たれている。このようなシンクロ型 LPSO 構造に関わる新しい学術領域を築くには、その結晶構造、原子配列の解明が必須であり、特定元素の挙動の追跡が可能な最新の電子顕微鏡法、3 次元アトムプローブ法、陽電子消滅ドップラー広がり法を組み合わせた新たな解析法により LPSO 構造の原子配列解析を発想するに至った。

2. 研究の目的

本計画研究では、濃度変調と構造変調が同期した新奇な長周期積層 (LPSO) 構造 (シンクロ型 LPSO 構造) を示す合金の代表例として高強度と高延性が両立した新規な Mg 合金 Mg-TM-RE (TM=遷移金属, RE=希土類金属) 系合金を主として取り上げ、最新の電子顕微鏡法による原子の直接観察と 3 次元アトムプローブ法、陽電子消滅ドップラー広がり法を組み合わせた新たな解析法により LPSO 構造の原子配列解析を行い、いまだ未解明の LPSO 構造の形成メカニズム、優れた力学特性発現との相関の解明に必要な基礎的知見を得ることを目的とする。LPSO 構造の原子配列解析では、これまでに同定されている数種のシンクロ型 LPSO 構造はいずれも母相 Mg の HCP 構造の AB 積層に周期的に積層欠陥を導入したものであり、この積層の変化は TM, RE 原子が濃縮した隣接原子層間で起こるため、(1) TM, RE 原子が濃縮した原子層の積層周期 (その規則性と乱れ) と (2) TM, RE

原子が濃縮した原子層内での TM および RE 原子 (クラスター) 配列およびクラスターの面内配列の規則性を決定することを最重要課題としている。また、近年、個々のクラスターはその中心に侵入型原子を挿入してエネルギー的にさらに安定化されるとされており、この個々のクラスターの原子構造の決定やキック変形帯形成をはじめとした変形機構の原子レベルでの解明も最重要課題とした。

3. 研究の方法

本計画研究「原子レベル構造解析による LPSO 構造の構造物性発現機構の解明」では、Zn, RE の濃縮原子層の積層周期および面内原子配列の解析を原子直視レベルで最新の電子顕微鏡法と 3 次元アトムプローブ法、陽電子消滅ドップラー広がり法を組み合わせた新たな方法によって行うことで LPSO 構造物質群の構造記述方法の精密化を目指し、次の研究項目を実施した。

(1) STEM による RE 原子の濃縮原子層の積層周期評価および面内原子配列解析

STEM モードで高角散乱電子を用いて結像する環状検出暗視野 (HAADF-STEM) 法では、像コントラストは弾性散乱電子の強度に支配され、原子番号の自乗に比例するため、Zn, RE 原子の濃縮 2 重原子層を比較的容易に捕えることができる。HAADF-STEM コントラストを利用して、積層周期及びその規則性の乱れの解析を行った。

(2) アトムプローブ法および陽電子消滅ドップラー広がり法による原子配列解析

積層面を 1 原子面毎に電解蒸発させ、3 次元アトムプローブ法で濃縮層の組成分析を行いつつ、陽電子消滅ドップラー広がり法により原子空孔の周りの原子配列を解析し、LPSO 構造の形成に対する原子空孔や原子の短距離拡散の役割を原子レベルで解明する。エネルギー的安定性に関する情報の取得を行った。

(3) STEM による変形機構の原子レベル解析

構造解析により結晶構造が明らかとなった LPSO 相につき、変形で導入された転位のすべり面およびバーガース・ベクトルを原子レベルで解析した。

4. 研究成果

(1) STEM による RE 原子の濃縮原子層の積層周期評価および面内原子配列解析

Mg-Al-RE 系 LPSO 相の STEM 直接観察では、RE は Al とともに隣接 4 原子層に濃縮し、面内で長範囲の規則配列構造を取るが、L1₂ 型 Al₆RE₈ 原子クラスターの規則配列構造として記述できることが明らかとなった (図 1, 2)。濃縮 4 原子層を含む原子層を構造ブロックとした積層構造として結晶構造が記述でき、積層方向に一次元の積層不整を伴う規則-不規則 (OD: Order-Disorder) 構造として記述できる。構造ブロックの原子層数 (5~8) により、10H, 18R, 14H, 24R などの構造多形が形成され、それぞれに最も単純な積層構造およびその空間群を決めることができた。

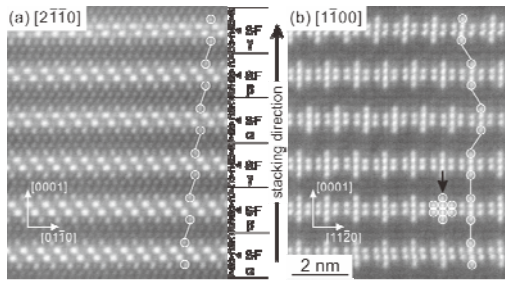


図 1. Mg-Al-Gd 系 LPSO(OD)相の高分解能 STEM 像.

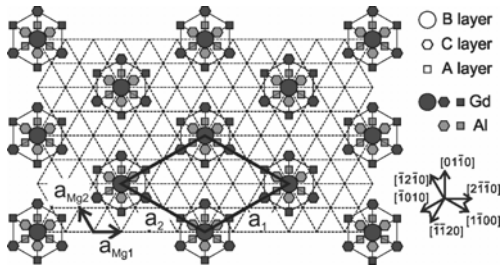


図 2. Mg-Al-Gd 系 LPSO(OD)相の構造ブロック内の面内規則配列構造.

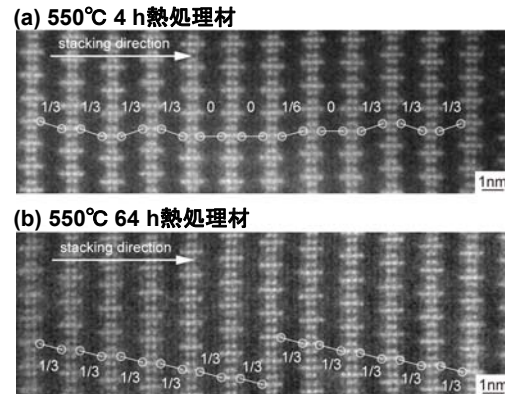


図 3. Mg-Al-Gd 系 LPSO(OD)相の熱処理に伴うブロック積層構造変化. 長時間の熱処理により, ブロック積層に長周期性が現れ, 単斜晶系の 1M 型 MDO 多形へと収斂する(b).

Mg-Al-Gd 三元系合金中に存在する Mg-Al-Gd 系 LPSO(OD)相の熱処理による微細構造変化を STEM 直接観察から調べた結果, 熱処理により構造ブロックの積層に長周期の規則性が現れ, 最終的には, 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: $C2/m$) を最安定構造として収斂することを STEM 直接観察により明らかにした(図 3).

Mg-Zn-RE 系 LPSO 相の STEM 直接観察では, 積層方向への化学的秩序の相関長が対応する積層秩序に常に同期したシンクロ型 LPSO 構造であることが確認された. 一連の LPSO 構造は, Mg-Al-RE 系と同様の構造ユニットを用いて記述できるが $L1_2$ 型原子クラスターの面内配列の秩序が低く, クラスタ中心の侵入型位置に構成元素のいずれかが存在する可能性が, 原子の直接観察および第一

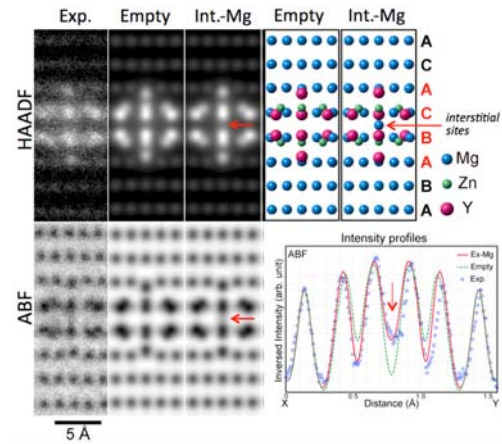


図 4. Mg-Zn-Y 系 LPSO 相中の $L1_2$ 型原子クラスターの緩和構造とクラスター中心における侵入型元素の検討.

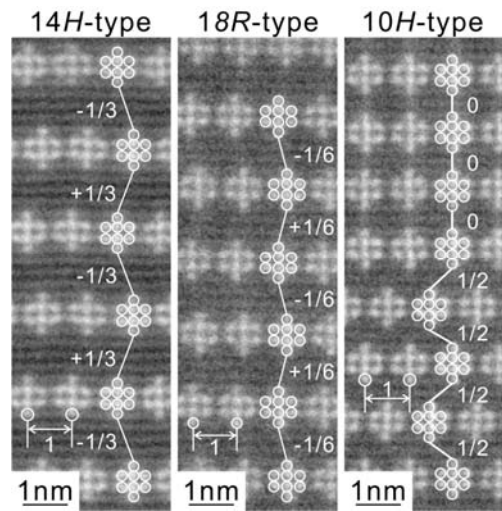


図 5. 高 Zn,Y 組成 Mg-Zn-Y 系合金にみられる 14H, 18R, 10H 型 LPSO(OD)相.

原理計算から明らかにされた(図 4). Mg-Zn-Y 三元系合金中に存在する LPSO 相は, Zn/Y 濃度に応じて結晶構造が変化し, Zn/Y 濃度が小さい場合には, Zn/Y 原子の面内規則化を伴わない所謂 LPSO 相が 18R と 14H の 2 つの異なる多形として形成されるが, Zn/Y 濃度が大きくなると, Zn/Y 原子は $L1_2(Zn_6Y_8)$ 型原子クラスターの形成を伴う面内規則化を有する LPSO(OD)相となり, $L1_2$ 型原子クラスターの配列秩序をほぼ一定に保ちつつ, Zn/Y 濃度増加とともに構造ブロックの構成層数を 7, 6, 5 と順次減少させつつ, 14H, 18R, 10H 型の多形を取ることを明らかにした(図 5). この Mg-Zn-Y 三元系 LPSO(OD)相の 3 つの多形では構造ブロックの優先積層位置はすべて異なり, OD 理論から導き出されるもつとも単純な結晶構造を持つ多形 (MDO) の空間群も多形によって異なる. 14H, 18R, 10H 型の多形の MDO 多形の空間群はそれぞれ $P6_322$, $C2/c$, $Cmce$ であった. Mg-Al-Gd 三元系合金中に存

在する LPSO(OD)相は 18R 型一種のみであるが、Mg-Zn-Y 系の 18R 型 LPSO(OD)相とは構造ブロックの優先積層位置は異なる。構造ブロックの優先積層位置は L1₂型原子クラスター間の相互作用を最小にするよう決定される傾向にあるが、その支配因子はなお不明である。

収差補正 STEM 機による超高分解能 HAADF/ABF 原子像観察を行うと、平均化されたクラスター ABF 像には、格子間サイトの存在を強く示唆するコントラストが明瞭に表れており、このサイトは格子間原子が占めていることをあきらかにした。これは、第一原理計算の結果ともよく一致する。格子間原子は、Mg と初期には考えられたが、計算像との対比からかなりの割合で Y が占めており、Y, Zn, Mg が不規則に格子間位置を占めていると考えられる。

(2) アトムプローブ法および陽電子消滅ドップラー広がり法による原子配列解析

3次元アトムプローブ法では濃化層内における Zn と Y 原子の比が 14H と 18R 構造で異なり、Y の濃度はほぼ同じものの、Zn の濃度は 14H よりも 18R で低いことが明らかになった。また、Mg-Zn-Y 系 LPSO 相の相変態 (18R-14H) 過程における濃縮層の Zn/Y 濃度比の変化の解析も 3次元アトムプローブ法により行った。573K, 120h 熱処理試料では離散的に見える濃化層が、673K, 48h 熱処理試料では濃化層が何層かに集団化し、熱処理により Mg 相に固溶していた Zn と Y 原子が濃化層に集まり、濃化層での Zn と Y 濃度が高くなり、14H と 18R の LPSO 構造の濃化層における Y の濃度は 18R と 14H でほぼ同じであるが、Zn の濃度は 18R で 14H よりも低いことを明らかにした。また Mg-3.5 at.% Al-5 at.% Gd 試料における 18R 型 LPSO(OD)相 と α-Mg の境界領域の TEM, 3D-AP 解析では LPSO(OD)相の最も α-Mg 境界側の濃化層には Gd のみではなく Al も存在することを確認した (図 6)。

(3) STEM による変形機構の原子レベル解析
Mg-Al-Gd 系 LPSO(OD)相の変形組織の

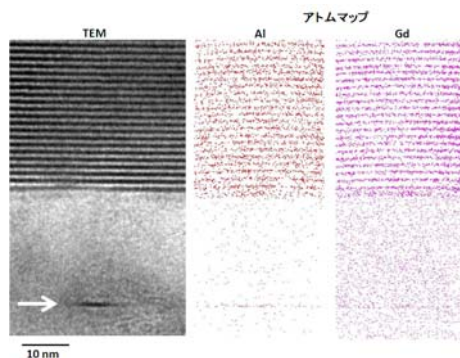


図 6. Mg-3.5 at.% Al-5 at.% Gd 試料における 18R 型 LPSO(OD)相 と α-Mg の境界領域の TEM, 3D-AP 解析。

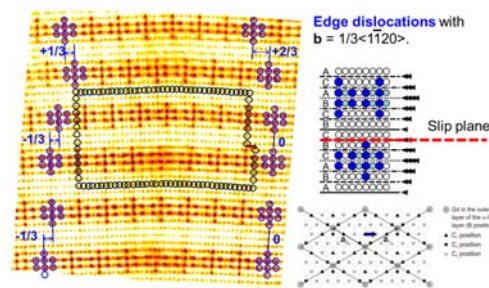


図 7. 18R 型 Mg-Al-Gd LPSO(OD)相中の底面 a 転位の ABF-STEM 像。

STEM 直接観察では、底面すべりの a 転位(パーガース・ベクトルが hcp Mg の 1/3<1120>に相当)が Al₆Gd₈ 原子クラスターを切断しない原子層間のうち、純 Mg 原子層と Gd 濃化 4 重原子層の外側の原子層(Outer 層)の間を運動していることを明らかにした(図 7)。この転位は数原子間隔という極めて短距離で部分転位に分解している。底面すべりの a 転位のすべり面は原子レベルで決定されており、キック変形で活動する転位はこのすべり面を活動する必要がある。

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 28 件)

- ① K. Kishida, K. Nagai, A. Matsumoto, A. Yasuhara, H. Inui, Crystal structures of highly-ordered long-period stacking-ordered phases with 18R, 14H and 10H-type stacking sequences in the Mg-Zn-Y system, Acta Materialia, 査読有, Vol.99, 2015, 228-239
DOI:10.1016/j.actamat.2015.08.004
- ② K. Kishida, K. Nagai, A. Matsumoto, H. Inui, Data in support of crystal structures of highly-ordered long-period stacking-ordered phases with 18R, 14H and 10H-type stacking sequences in the Mg-Zn-Y system, Data in Brief, 査読有, Vol.5, 2015, 314-320
DOI:10.1016/j.dib.2015.09.005
- ③ 岸田恭輔, 乾 晴行, 解説 長周期積層構造を持つマグネシウム基金属間化合物の結晶構造, 顕微鏡, 査読有, Vol.49, 2015, 181-189
http://www.microscopy.or.jp/magazine/49_3/49_3j07kk.html
- ④ 阿部 英司, シンクロ型 LPSO-Mg 合金の原子構造と結晶学, まてりあ, 査読有, 第 54 巻, 2015, 50-54
DOI:10.2320/materia.54.50
- ⑤ M. Yamasaki, M. Matsushita, K. Hagihara, H. Izuno, E. Abe and Y. Kawamura, Highly ordered 10H-type long-period stacking order phase in a Mg-Zn-Y ternary alloy, Scripta Mater., 査読有, Vol.78-79, 2014, 13-16
DOI:10.1016/j.scriptamat.2014.01.013
- ⑥ M. Egami, E. Abe, Structure of a novel Mg-rich complex compound in Mg-Co-Y ternary

alloys, Scripta Materialia, 査読有, Vol.98, 2015, 64-67

DOI:10.1016/j.scriptamat.2014.11.013

⑦ K. Kishida, A. Inoue, H. Yokobayashi, H. Inui, Deformation twinning in a Mg-Al-Gd ternary alloy containing precipitates with a long-period stacking-ordered (LPSO) structure, Scripta Mater., 査読有, Vol.89, 2014, 25-28

DOI: 10.1016/j.scriptamat.2014.06.019

⑧ D. Egusa, M. Yamasaki, Y. Kawamura, E. Abe, Micro-kinking of the long-period stacking/order (LPSO) phase in a hot-extruded Mg₉₇Zn₁Y₂ alloy, Materials Transactions, 査読有, Vol. 54, 2013, 698-702

DOI:10.2320/matertrans.MI201216

⑨ H. X. Xu, K. Inoue, Y. Nagai, T. Toyama, Y. Matsukawa, A. Kuramoto, D. Egusa, E. Abe, B. J. Ye, Positron annihilation study of the Mg-Zn-Y alloys with long period stacking ordered (LPSO) structures, J. Phys. Conf. Ser., 査読有, Vol. 443, 2013, 012029-1-4

DOI: 10.1088/1742-6596/443/1/012029

⑩ 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, 2013, 2826-2846

DOI: 10.1080/14786435.2013.790566

⑪ D. Egusa, E. Abe, The structure of long period stacking/order Mg-Zn-RE phases with extended non-stoichiometry ranges, Acta Materialia, 査読有, Vol.60, 2012, 166-178

DOI: 10.1016/j.actamat.2011.09.030

⑫ 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, 55-64

DOI: 10.1016/j.intermet.2012.06.010

⑬ E. Abe, A. Ono, T. Itoi, M. Yamasaki, Y. Kawamura, Polytypes of long-period stacking structures synchronized with chemical order in a dilute Mg-Zn-Y alloy, Philosophical Magazine Letters, 査読有, vol.91, 2011, 690-696

DOI: 10.1080/09500839.2011.609149

⑭ 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, 2011, 7287-7299

DOI:10.1016/j.actamat.2011.08.011

[学会発表] (計 176 件)

① K. Kishida, H. Inui, Crystal Structures of LPSO/OD Phases in the Mg-Zn-Y System, The 10th International Conference on Magnesium Alloys and Their Applications (Mg2015),

2015.10.11 -16, Ramada Plaza Jeju Hotel, Jeju, Korea

② K. Inoue, N. Ebisawa, K. Tomura, K. Yoshida, Y. Nagai, H. X. Xu, D. Egusa, E. Abe, K. Kishida, H. Inui, M. Yamasaki, Y. Kawamura, Analysis of local chemical composition in Mg-TM-RE alloys with LPSO/OD structure by atom probe tomography, The 10th International Conference on Magnesium Alloys and Their Applications (Mg2015), 2015.10.11 -16, Ramada Plaza Jeju Hotel, Jeju, Korea

③ E. Abe, Structure and stability of the LPSO-Mg alloys – Are they stable enough?, The 10th International Conference on Magnesium Alloys and Their Applications (Mg2015), 2015.10.11 -16, Ramada Plaza Jeju Hotel, Jeju, Korea

④ 岸田恭輔, 乾 晴行, 塑性異方性結晶における変形帯-キンク帯と変形双晶, 日本金属学会 2015 年秋期(第 157 回)講演大会, 2015.9.16-18, 九州大学伊都キャンパス

⑤ H. Inui, Crystal structure and deformation of long period stacking ordered (LPSO) intermetallic phases in the Mg-TM-RE systems, Symp. on Recent Progress in Plasticity and Phase Transformations, 2015.8.19-21, Institute for Materials, Ruhr-Universität Bochum, Germany

⑥ 岸田恭輔, 乾 晴行, TEM/STEM による Mg-TM-RE 系 LPSO/OD 相の結晶構造解析, 日本金属学会 2015 年春期(第 156 回)講演大会, 2015.3.18-20, 東京大学駒場 I 地区キャンパス

⑦ 井上耕治, 海老澤直樹, 戸村恵子, 永井康介, 3次元アトムプローブによる Mg-TM-RE 系 LPSO/OD 構造の局所組成分析, 日本金属学会 2015 年春期(第 156 回)講演大会, 2015.3.18-20, 東京大学駒場 I 地区キャンパス

⑧ 阿部 英司, シンクロ型 LPSO 構造の特徴と相安定性, 日本金属学会 2015 年春期(第 156 回)講演大会, 2015.3.18-20, 東京大学駒場 I 地区キャンパス

⑨ H. Inui, Crystal structure and deformation of LPSO (long-period stacking-ordered) intermetallic phases in the Mg-TM-RE systems, 3rd ESISM International Workshop in Kyoto “Fundamental Issues of Structural Materials, 2015.1.29-30, Kyoto University, Kyoto, Japan

⑩ H. Inui, K. Kishida, Crystal structures of Mg-Zn-Y LPSO phases - compositional dependence and formation process -, The 2nd International Symposium on Long-Period Stacking Ordered Structure and Its Related Materials (LPSO2014), 2014.10.5-8, Hotel Nikko Kumamoto, Kumamoto, Japan

⑪ K. Inoue, N. Ebisawa, K. Tomura, Y. Nagai, H. X. Xu, D. Egusa, and E. Abe, Atom-Probe-Tomographic Studies on Mg-Zn-Y alloys with LPSO phases, The 2nd International Symposium on Long-Period Stacking Ordered Structure and Its Related Materials (LPSO2014), 2014.10.5-8, Hotel Nikko Kumamoto, Kumamoto, Japan

⑫ E. Abe, Structure and stability of the LPSO

phases in several ternary Mg alloy, The 2nd International Symposium on Long-Period Stacking Ordered Structure and Its Related Materials (LPSO2014), 2014.10.5-8, Hotel Nikko Kumamoto, Kumamoto, Japan

⑬ H. Inui, Crystal structure and deformation of long-period stacking-ordered intermetallic phases in the Mg-TM-RE systems, 18th International Microscopy Congress 2014 (IMC2014), 2014.9.7-12, The Prague Congress Centre, Prague, Czech Republic

⑭ 井上耕治, 海老澤直樹, 野沢康子, 外山健, 永井康介, 許紅霞, 江草大祐, 阿部英司, 3次元アトムプローブによるLPSO型Mg-Zn-Y合金におけるキック変形境界近傍の元素分析, 日本金属学会春期(第154回)大会, 2014.3.21-23, 東京工業大学 大岡山キャンパス

⑮ H. Inui, Crystal structure and deformation of long period stacking ordered intermetallic phases in the Mg-Al-Gd systems, Electron Microscopy and Multiscale Modeling 2013 (EMMM 2013), 2013.11.10-13, Kyoto University, Kyoto

⑯ 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

⑰ 乾 晴行, 岸田 恭輔, 井上 敦司, 横林 秀幸, Mg-TM-RE系合金に見られるLPSO金属間化合物の結晶構造と変形, 日本金属学会春期(第152回)大会, 2013.3.27-29, 東京理科大学 神楽坂キャンパス

⑱ 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, MA, USA

⑲ H. Inui, K. Kishida, H. Yokobayashi, A. Takahashi, Crystal Structure and Deformation of Long Period Stacking Ordered Intermetallic Phases in the Mg-Al-Gd System, Materials Science Engineering (MSE 2012), 2012.9.25-27, TU Darmstadt, Darmstadt, Germany

⑳ 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.

〔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〕

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

6. 研究組織

(1) 研究代表者

乾 晴行 (INUI, Haruyuki)

京都大学・大学院工学研究科・教授

研究者番号：30213135

(2) 研究分担者

永井 康介 (NAGAI, Yasuyoshi)

東北大学・金属材料研究所・教授

研究者番号：10302209

阿部 英司 (ABE, Eiji)

東京大学・大学院工学系研究科・准教授

研究者番号：70354222

(3) 連携研究者

岸田 恭輔 (KISHIDA, Kyosuke)

京都大学・大学院工学研究科・准教授

研究者番号：20354178

井上 耕治 (INOUE, Koji)

東北大学・金属材料研究所・准教授

研究者番号：50344718