

平成 28 年 6 月 14 日現在

機関番号：17401

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：23109007

研究課題名(和文) 極限環境下物質合成によるシンクロナ型LPSO構造物質群の拡大

研究課題名(英文) Development of synchronized long-period stacking order structure through non-equilibrium processing

研究代表者

河村 能人(Kawamura, Yoshihito)

熊本大学・先進マグネシウム国際研究センター・教授

研究者番号：30250814

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 81,400,000円

研究成果の概要(和文)：シンクロナ型LPSO構造物質群の拡大を目指して、常圧場、超高压場、超急冷場を駆使した物質探査を行うことで、三つの大きな発見に至った。(1)Mg-Al-RE系において新奇なOrder-Disorder(OD)型LPSO構造を、(2) Mg-Co-Sm系において新奇な底面内クラスター配置を持つLPSO構造を、(3)Mg-Zn-Yb系において新規長周期積層構造高压相を見出した。Mg-Al-Gd系OD型LPSO構造は溶質元素の原子配列決定に重要な役割を果たした。Mg-Zn-Yb系新奇高压相は、今後のシンクロナ型LPSO構造物質の体系的分類とクライテリアの精密化に重要な知見を与えるものである。

研究成果の概要(英文)：Synchronized long-period stacking order (LPSO) structure in Mg alloys has attracted our attention because of their unique synchronized stacking/chemical ordered structure. In this study, we have developed several new synchronized LPSO structure alloys through conventional casting processes, rapid solidification processes, and high pressure synthesis methods. obtained results are as follows: (1) Order-disorder typed LPSO structures were discovered in Mg-Al-Gd alloy system. (2) New synchronized LPSO structures were observed in a rapidly solidified Mg-Co-Sm alloy, (3) New long-period stacking superlattice structure was discovered in a Mg-Zn-Yb alloy processed by high-pressure and high-temperature treatment.

研究分野：材料工学

キーワード：長周期積層構造 マグネシウム 急速凝固 高压合成

1. 研究開始当初の背景

21 世紀の軽量化構造材料として世界が開発競争を繰り広げている Mg 合金の分野で、常識を覆すような高強度を示す長周期積層構造型 Mg-Zn-Y 合金が急速凝固粉末冶金法により開発され、世界的に注目されている。この合金は、急速凝固法に限定されることなく、一般的な重力鑄造法と塑性加工法によっても極めて優れた機械的特性を示すことから、産業界からも新たな軽量高強度合金として期待されている。この合金の強化相は、濃度変調と構造変調が同期した新奇な長周期積層型規則構造 (シンクロ型 LPSO 構造 “Synchronized Long-Period Stacking Ordered Structure”) を有していることがわかっているが、この新奇な構造については、形成メカニズムや力学特性・強化原理といった根本的なことが未解明のままであった。

2. 研究の目的

本計画研究「極限環境下物質合成によるシンクロ型 LPSO 構造物質群の拡大」の目的は、Mg 基合金や Ti 基合金といった HCP 構造金属の合金系を対象に極限環境場等を活用してシンクロ型 LPSO 構造物質の探索を行ない、シンクロ型 LPSO 構造の「物質群の拡大」、「合金元素のクライテリアの精密化」、「生成プロセス条件の確立」を図り、シンクロ型 LPSO 構造の形成メカニズムの解明に貢献することである。

具体的な目標として、シンクロ型 LPSO 構造の新物質 (合金成分と構造) の発見、シンクロ型 LPSO 構造物質の体系的分類、シンクロ型 LPSO 構造を形成する合金元素の精密なクライテリアの提案、シンクロ型 LPSO 構造形成のプロセス条件の確立の 4 つを掲げ、「通常環境場」のみならず愛媛大学地球深部ダイナミクス研究センターの「超高压場」、熊本大学の「超急冷場」を用いた合金成分の探索と構造変化の調査を展開する。得られた新 LPSO 構造物質の情報は、A01 班の構造精密解析と第一原理計算、A02 班の熱力学計算による形成メカニズム解明と共有することでシンクロ型 LPSO 構造の学理構築に貢献する。

3. 研究の方法

シンクロ LPSO 構造は、凝固による晶出、熱処理による析出および相変態を経て形成されることが過去の研究より明らかとなっていることから、学術的な観点からは、

液相 固相変化 (晶出)

固相 固相変化 (析出・相変態)

に着目して、プロセス別に下記の 3 項目の研究を実施した。

通常環境場でのシンクロ型 LPSO 構造物質の探索 (熊本大・河村, 千葉大・糸井)

Mg 基, Ti 基合金を対象に、凝固による液相からの晶出と熱処理による固相からの析出現象を利用し、通常的环境場 (常圧・徐冷)

で合金成分探索を行う。

超高压場でのシンクロ型 LPSO 構造物質の探索 (愛媛大・松下, 大阪府大・山田)

Mg 基, Ti 基合金を対象に、超高压場での原子間距離制御による物質探索を晶出および析出・相変態に着目して行なう。

③超急冷場でのシンクロ型 LPSO 構造物質の探索 (熊本大・山崎)

Mg 基, Ti 基合金を対象に、液相からの晶出と過飽和固溶体からの析出に着目し、超急冷場 (拡大された固溶限) を利用した合金成分探索を行う。

4. 研究成果

シンクロ型 LPSO 構造物質群の拡大を目指して、常圧場, 超高压場, 超急冷場を駆使した物質探索を行うことで、四つの大きな発見に至った。Mg-Al-RE 系において新奇な Order-Disorder (OD) 型 LPSO 構造を、Mg-Co-Y 系および Mg-Ni-Y 系においてそれぞれ新奇な 15R-, 12R-LPSO 構造を、③ Mg-Co-Sm 系において新奇な底面内クラスター配置を持つ LPSO 構造を、④ Mg-Zn-Yb 系において新規長周期積層構造高压相 (図 1) を見出した。

Mg-Al-Gd 系 OD 型 LPSO 構造は A01 班における溶質元素の原子配列決定に重要な役割を果たした。また、Mg-Co-Y 系 15R-LPSO 構造, Mg-Ni-Y 系 12R-LPSO 構造, Mg-Co-Sm 系新奇 LPSO 構造, Mg-Zn-Yb 系新奇高压相は、従来の LPSO 構造に見られる $L1_2$ クラスターとは異なるクラスターから構成されていることから、今後のシンクロ型 LPSO 構造物質の体系的分類とクライテリアの精密化に重要な知見を与えるものである。

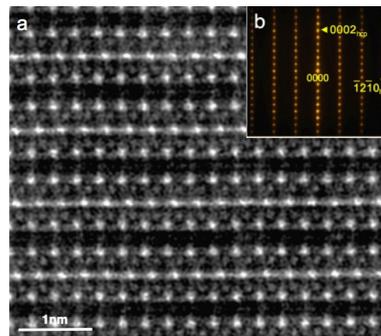


図 1 Mg-Zn-Y 合金で見出された新規 LPSO 構造高压相の HAADF-STEM 像

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 75 件)

1. M. Okayasu, S. Takeuchi, M. Matsushita, N. Tada, M. Yamasaki, Y. Kawamura, Mechanical properties and failure characteristics of cast and extruded

- Mg97Y2Zn1 alloys with LPSO phase ,
Materials Science & Engineering A ,
査読有 , 652 , pp.14-29 , DOI:
10.1016/j.msea.2015.11.069 , 2016 .
2. 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 , pp.174-191 , DOI:
10.1016/j.ijplas.2015.10.005 , 2016 .
 3. M. Matsushita, Y. Sakata, T. Senzaki,
M. Yamasaki, I. Yamada, H. Saitoh, T.
Shinmei, T. Irifune, N. Nishiyama, Y.
Kawamura , Phase relations among D03,
-Mg, and long-period stacking
orders in Mg85Zn6Y9 alloy under 3 GPa ,
Materials Transactions ,査読有 ,56(7) ,
pp.910-913 ,
DOI:10.2320/matertrans.MH201413 ,
2015 .
 4. K. Hagihara, M. Honnami, R. Matsumoto,
Y. Fukusumi, H. Izuno, M. Yamasaki, T.
Okamoto, T. Nakano, Y. Kawamura ,
In-situ observation on the formation
behavior of the deformation kink bands
in Zn single crystal and LPSO phase ,
Materials Transactions , 査読有 ,
56(7) , pp.943-951 , DOI:
10.2320/matertrans.MH201412 , 2015 .
 5. S. Hosokawa, M. Yamasaki, Y. Kawamura,
M. Inui, Y. Kajihara, S. Tsutsui,
A.Q.R. Baron , Microscopic elastic
properties of polycrystalline
Mg85Zn6Y9 alloy with long-period
stacking ordered 18R phase
investigated by inelastic X-ray
scattering , Materials Transactions ,
査読有 , 56(7) , pp.914-916 , DOI:
10.2320/matertrans.MH201409 , 2015 .
 6. M. Matsushita, S. Yamamoto, N.
Nishiyama, Y. Sakata, M. Yamasaki, J.
Bednarcik, T. Irifune, Y. Kawamura ,
D03+hcp mixed phase with
nanostructures in Mg85Zn6Y9 alloy
obtained by high-pressure and
high-temperature treatments ,
Materials Letters , 査読有 , 155 ,
pp.11-14 , DOI:
10.1016/j.matlet.2015.04.086 , 2015 .
 7. Y. Higashi, C. Iwamoto, Y. Kawamura ,
Microstructure characteristic of
extruded Mg96Zn2Y2 alloy joints
joined by ultrasonic welding , Nippon
Kinzoku Gakkaishi/Journal of the
Japan Institute of Metals ,査読有 , 79 ,
pp.176-182 , DOI:
10.2320/jinstmet.JBW201403 , 2015 .
 8. M. Matsushita, H. Wada, Y. Matsushima ,
Effects of fluence and fluence rate of
proton irradiation upon magnetism in
Fe65Ni35 Invar alloy , Journal of
Magnetism and Magnetic Materials , 査
読有 , Vol. 394 , pp.491-495 , DOI:
10.1016/j.jmmm.2015.06.050 , 2015 .
 9. I. Yamada, S. Marukawa, N. Hayashi, M.
Matsushita T. Irifune ,
Room-temperature zero thermal
expansion in a cubic perovskite oxide
SrCu3Fe4-xMnxO12 , Applied Physics
Letters , 査読有 , Vol. 106 , Article
no.151901 , DOI: 10.1063/1.4918293 ,
2015 .
 10. 河村能人 , 航空機実装化を目指した
KUMADAI マグネシウム合金の研究開発 ,
軽金属 (軽金属学会) , 査読有 , 2015
年 9 月号 , pp.466-471 , DOI:
10.2464/jilm.65.466 , 2015 .
 11. K. Hagihara, M. Yamasaki, M. Honnami,
H. Izuno, M. Tane, T. Nakano, Y.
Kawamura , Crystallographic nature of
deformation bands shown in Zn and
Mg-based long-period stacking ordered
(LPSO) phase , Philosophical Magazine ,
査読有 , 95(2) , pp.132-157 , DOI:
10.1080/14786435.2014.987843 , 2015 .
 12. M. Matsushita, J. Bednarcik, Y. Sakata,
S. Akamatsu, N. Nishiyama, J.
Michalikova, M. Yamasaki, Y. Kawamura ,
Synchronized collapse and formation
of long period stacking and chemical
orders in Mg 85 Zn6 Y9 , Physica B ,
査読有 , 461 , pp.147-153 , DOI:
10.1016/j.physb.2014.12.021 , 2015 .
 13. 河村能人 , シンクロ型 LPSO 構造の材料
科学「LPSO 型マグネシウム合金の特徴
と今後の展望」, 日本金属学会報 までり
あ , 査読有 , 54 , pp.44-49 , DOI:
10.2320/materia.54.44 , 2015 .
 14. M. Yamasaki, M. Matsushita, K.
Hagihara, H. Izuno, E. Abe, Y.
Kawamura , Highly ordered 10H-type
long-period stacking order phase in a
Mg-Zn-Y ternary alloy , Scripta
Materialia ,査読有 , 78-79 , pp.13-16 ,
DOI:
10.1016/j.scriptamat.2014.01.013 ,
2014 .
 15. H. Okuda, T. Horiuchi, S. Hifumi, M.
Yamasaki, Y. Kawamura, S. Kimura ,
Microstructural Evolution of
Long-Period Stacking Ordered
Structures in Mg97Y2Zn1 Alloys
Examined by In-Situ Small-Angle X-ray
Scattering , Metallurgical and
Materials Transactions A , 査読有 ,
45(11) , pp.4780-4785 , DOI:
10.1007/s11661-014-2410-2 , 2014 .

16. H. Okuda, T. Horiuchi, T. Maruyama, M. Yamasaki, Y. Kawamura, K. Hagihara, S. Kohara, Development of Microstructures of Long-Period Stacking Ordered Structures in Mg85Y9Zn6 Alloys Annealed at 673 K (400 °C) Examined by Small-Angle X-Ray Scattering, Metallurgical and Materials Transactions A, 査読有, 45(1), pp.147-151, DOI: 10.1007/s11661-013-1766-z, 2014.
 17. Y. Jono, M. Yamasaki, Y. Kawamura, Effect of LPSO Phase-Stimulated Texture Evolution on Creep Resistance of Extruded Mg-Zn-Gd Alloys, Materials Transactions, 査読有, 54(5), pp.703-712, DOI: 10.2320/matertrans.MI201218, 2013.
 18. K. Hagihara, Y. Fukusumi, M. Yamasaki, T. Nakano, Y. Kawamura, Non-basal slip systems operative in Mg12ZnY long-period stacking ordered (LPSO) phase with 18R and 14H structures, Materials Transactions, 査読有, 54(5), pp.693-697, DOI: 10.2320/matertrans.MI201208, 2013.
 19. M. Yamasaki, K. Hagihara, S. Inoue, J. P. Hadorn, Y. Kawamura, Crystallographic classification of kink bands in an extruded Mg-Zn-Y alloy using intragranular misorientation axis analysis, Acta Materialia, 査読有, 61(6), pp.2065-2076, DOI: 10.1016/j.actamat.2012.12.026, 2013.
 20. M. Matsushita, Y. Matsushima, T. Uruga, R. Ishigami, A. Iwase, Effect of 50-keV proton irradiation on the magnetism of a Fe66Ni34 Invar alloys, Journal of Magnetism and Magnetic Materials, 査読有, 333, pp.13-17, DOI: 10.1016/j.jmmm.2012.12.043, 2013.
 21. M. Noda, R. Matsumoto, Y. Kawamura, Forging induces changes in the formability and microstructure of extruded Mg96Zn2Y2 alloy with a long-period stacking order phase, Materials Science and Engineering: A, 査読有, 563, pp.21-27, DOI: 10.1016/j.msea.2012.11.072, 2013.
 22. J. P. Hadorn, M. Yamasaki, J. Kim, Y. Kawamura, Characterization of an Al-Y-Zn Intermetallic Particle Phase in Extruded Mg96-x Al x Zn2Y1.9La0.1 Alloys, Metallurgical and Materials Transactions A, 査読有, 44, pp.2839-2848, DOI: 10.1007/s11661-013-1621-2, 2013.
 23. T. Itoi, T. Inazawa, M. Yamasaki, Y. Kawamura, M. Hirohashi, Microstructure and mechanical properties of Mg-Zn-Y alloy sheet prepared by hot-rolling, Materials Science and Engineering: A, 査読有, 560, pp.216-223, DOI: 10.1016/j.msea.2012.09.059, 2013.
 24. M. Yamasaki, K. Hashimoto, K. Hagihara, Y. Kawamura, Effect of multimodal microstructure evolution on mechanical properties of Mg-Zn-Y extruded alloy, Acta Materialia, 査読有, 59, pp.3646-3658, DOI: 10.1016/j.actamat.2011.02.038, 2011.
 25. 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, 59, pp.7287-7299, DOI: 10.1016/j.actamat.2011.08.011, 2011.
- [学会発表](計 343 件)
1. Y. Kawamura, LPSO Structure and LPSO-type High Strength Magnesium Alloys Mg2015, 2015.10.13, Jeju, Korea.
 2. M. Yamasaki, Kink boundary formation in an 18R-LPSO structure of Mg-Zn-Y alloy, Advanced Materials Week 2015, 2015.6.15-19, Togliatti, Russia.
 3. M. Yamasaki, Ongoing research for the high strength Mg-Zn-rare earth alloys with LPSO phase, AMPAM Seminar, 2015.11.3, Queensland, Australia.
 4. Y. Kawamura, High-Strength and Flame-Resistant LPSO Magnesium Alloys Produced by Rapidly Solidified Powder Metallurgy Processing, AeroMat 2015, 2015.5.11-14, California, USA.
 5. M. Matsushita, Formation and decomposition of long period stacking order synchronized with chemical concentration in ternary Mg alloy system under high pressure, AIRAPT-25th & EHPRG-53rd, 2015.8.30-9.4, Madrid, Spain.
 6. M. Matsushita, Formation and Collapse of LPSO Phase in Mg Ternary Alloys under High Pressure, Mg2015, 2015.10.11-16, Jeju, Korea.
 7. Y. Kawamura, Material Science and Technology on Synchronized LPSO Structure, International Symposium on Long-Period Stacking Ordered Structure and Its Related Materials, 2014.10.05-08, Hotel Nikko Kumamoto, Kumamoto, Japan.
 8. M. Yamasaki, Ongoing Research for the LPSO-typed Mg-Zn-Rare Earth Alloys in

- Japan , The 6th Asian Symposium on Magnesium Alloys, ASMA6 , 2014.12.20-22 , Chengdu, China .
9. Y. Kawamura , High-Strength Magnesium Alloys Strengthened by Synchronized LPSO Phase , Magnesium Workshop Madrid 2013 , 2013.5.21-24 , Madrid, Spain .
 10. M. Yamasaki , Influence of Volta potential distribution on the corrosion behavior of Mg-Zn-Gd-Al alloy with LPSO phase , Workshop: Canada-Japan workshop on Mg alloys , 2013.11.01 , Montreal, Canada .

〔図書〕(計3件)

1. 河村能人 , 他 , シーエムシー出版 , 「マグネシウム合金の先端的基盤技術とその応用展開」(第2章 希土類金属添加合金) , pp.13-21 , 2012 .
2. 山崎倫昭 , 他 , シーエムシー出版 , 「マグネシウム合金の先端的基盤技術とその応用展開」(第8章 マグネシウムの腐食) , pp.131-140 , 2012 .
3. 河村能人 , 他 , エヌ・ティー・エス , 「自動車の軽量化テクノロジー ~材料・成形・接合・強度・燃費・電費性能の向上を目指して~」 , pp.41-51 , 2014 .

〔産業財産権〕

出願状況(計19件)

1. 名称: 難燃マグネシウム合金及びその製造方法
発明者: 河村能人 , 金鍾鉉
権利者: 同上
種類: 特許
番号: PCT/JP2014/061108
出願年月日: 2014.04.14
国内外の別: 外国
2. 名称: マグネシウム合金ワイヤ及びその製造方法
発明者: 河村能人 , 林洋平 , 黒木英雄
権利者: 同上
種類: 特許
番号: 特願 2014-114670
出願年月日: 2014.06.03
国内外の別: 国内
3. 名称: マグネシウム合金及びその製造方法
発明者: 河村能人 , 山崎倫昭
権利者: 同上
種類: 特許
番号: PCT/JP2013/061700
出願年月日: 2013.04.16
国内外の別: 外国
4. 名称: マグネシウム合金材
発明者: 河村能人 , 野田雅史 , 桜井寛
権利者: 同上
種類: 特許
番号: 特願 2013-0142689

- 出願年月日: 2013.04.12
国内外の別: 外国
5. 名称: マグネシウム合金材の製造方法
発明者: 河村能人
権利者: 熊本大学
種類: 特許
番号: 特願 2012-034450
出願年月日: 2012.02.20
国内外の別: 国内

取得状況(計1件)

1. 名称: 高耐食性を有する高強度マグネシウム合金
発明者: 河村能人 , 山崎倫昭 , 大河内均 , 西田元紀 , 松本誠一
権利者: 同上
種類: 特許
番号: 特許 5618276
取得年月日: 2014.09.26
国内外の別: 国内

〔その他〕

ホームページ

<http://www.mrc.kumamoto-u.ac.jp/>
熊本大学先進マグネシウム国際研究センター
<http://www.mg-lpso.org/index.html>
シンク口型 LPSO 構造の材料科学

6. 研究組織

(1) 研究代表者
河村能人 (KAWAMURA Yoshihito)
熊本大学・先進マグネシウム国際研究センター・教授
研究者番号: 30250814

(2) 研究分担者

山崎倫昭 (YAMASAKI Michiaki)
熊本大学・先進マグネシウム国際研究センター・准教授
研究者番号: 50343885

松下正史 (MATSUSHITA Masafumi)

愛媛大学・理工学研究科・講師
研究者番号: 90432799

(3) 連携研究者

山田幾也 (YAMADA Ikuya)
大阪府立大学・ナノ科学材料研究センター・講師
研究者番号: 30378880

糸井貴臣 (ITOI Takaomi)

千葉大学, 工学(系)研究科(研究院), 准教授
研究者番号: 50333670