

領域略称名：シンクロ LPSO
領域番号：2308

平成28年度科学研究費補助金「新学術領域研究
(研究領域提案型)」に係る事後評価報告書

「シンクロ型 LPSO 構造の材料科学」
—次世代軽量構造材料への革新的展開—

(領域設定期間)

平成23年度～平成27年度

平成28年6月

領域代表者

熊本大学・先進マグネシウム国際研究センター・教授・河村能人

目 次

1. 研究領域の目的及び概要	5
2. 研究領域の設定目的の達成度	7
3. 研究領域の研究推進時の問題点と当時の対応状況	10
4. 審査結果の所見及び中間評価の所見等で指摘を受けた事項への対応状況	11
5. 主な研究成果（発明及び特許を含む）	13
6. 研究成果の取りまとめ及び公表の状況（主な論文等一覧，ホームページ，公開発表等）	16
7. 研究組織（公募研究を含む.）と各研究項目の連携状況	21
8. 研究経費の使用状況（設備の有効活用，研究費の効果的使用を含む）	23
9. 当該学問分野及び関連学問分野への貢献度	27
10. 研究計画に参画した若手研究者の成長の状況	28
11. 総括班評価者による評価	29

研究組織 (総括：総括班，計画：総括班以外の計画研究，公募：公募研究)

研究項目	課題番号 研究課題名	研究期間	代表者氏名	所属機関 部局 職	構成員数
X00 総括	23109001 シンクロ型 LPSO 構造の材料科学一次世代軽量構造材料への革新的展開	平成 23 年度 ～ 平成 27 年度	河村 能人	熊本大学・先進マグネシウム国際研究センター・教授	12
A01-1 計画	23109002 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	平成 23 年度 ～ 平成 27 年度	乾 晴行	京都大学・工学研究科・教授	3
A01-2 計画	23109003 量子線を用いた精密構造解析による LPSO 構造の材料特性発現機構の解明	平成 23 年度 ～ 平成 27 年度	相澤 一也	日本原子力研究開発機構・J-PARC センター・研究主幹	5
A01-3 計画	23109004 第一原理に基づく計算科学による LPSO 構造の電子論と構造科学の構築	平成 23 年度 ～ 平成 27 年度	君塚 肇	大阪大学・基礎工学研究科・准教授	7
A02-1 計画	23109005 原子間結合エネルギー解析によるシンクロ型 LPSO 構造形成メカニズム解明	平成 23 年度 ～ 平成 27 年度	奥田 浩司	京都大学・工学研究科・准教授	6
A02-2 計画	23109006 格子歪エネルギー解析によるシンクロ型 LPSO 構造形成メカニズムの解明	平成 23 年度 ～ 平成 27 年度	古原 忠	東北大学・金属材料研究所・教授	4
A02-3 計画	23109007 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	平成 23 年度 ～ 平成 27 年度	河村 能人	熊本大学・先進マグネシウム国際研究センター・教授	5
A03-1 計画	23109008 観察・計測によるシンクロ/非シンクロ型 LPSO 構造の変形機構と強化原理の比較解明	平成 23 年度 ～ 平成 27 年度	東田 賢二	九州大学・工学研究院・教授	5
A03-2 計画	23109009 マルチスケール計算力学による LPSO 構造の変形と力学特性の解明	平成 23 年度 ～ 平成 27 年度	大橋 鉄也	北見工業大学・工学部・教授	3
A03-3 計画	231090010 数理形態学と階層構造科学の融合による積層構造体の力学特性発現機構の解明	平成 23 年度 ～ 平成 27 年度	中谷 彰宏	大阪大学・大学院工学研究科・教授	3
計画研究 計 10 件					

A01 公募 第一期	24109508 放射光マイクロビーム 微小単結晶構造解析に よるシンクロ型 LPSO 構造の原子配列解明	平成 24 年度 ～ 平成 25 年度	安田 伸広	公益財団法人高輝度光科学研究セン ター・研究員	1
A02 公募 第一期	24109502 シンクロ型 LPSO マグ ネシウム合金の水素化 と水素貯蔵・透過材料へ の展開	平成 24 年度 ～ 平成 25 年度	石川 和宏	金沢大学・自然科学研究科・准教授	1
A02 公募 第一期	24109503 走査トンネル顕微鏡に よる LPSO 合金の破断 面の超高分解能観察	平成 24 年度 ～ 平成 25 年度	黒川 修	京都大学・工学研究科・准教授	1
A02 公募 第一期	24109507 超高強度マグネシウム 合金の相変態挙動に基 づく LPSO 構造形成メ カニズムの解明	平成 24 年度 ～ 平成 25 年度	徳永 辰也	鹿児島大学・理工学研究科・准教授	1
A03 公募 第一期	24109504 フェーズフィールド法 による LPSO 型マグネ シウム合金の強化機構 の解明	平成 24 年度 ～ 平成 25 年度	高木 知弘	京都工芸繊維大学・大学院工芸科学 研究科・准教授	1
A03 公募 第一期	24109501 長周期積層型規則構造 を有する高強度マグネ シウム合金における四 次元応力解析	平成 24 年度 ～ 平成 25 年度	諸岡 聡	首都大学東京・システムデザイン学 部・助教	1
A03 公募 第一期	24109505 力学系および組織形成 シミュレーションに不 可欠な LPSO 相単相の 単結晶弾性率の解明	平成 24 年度 ～ 平成 25 年度	多根 正和	大阪大学・産業科学研究所・准教授	2
A03 公募 第一期	24109506 マイクロ材料試験によ る Mg-Zn-Y 合金中に形 成される LPSO 相の強 化機構の解明	平成 24 年度 ～ 平成 25 年度	高島 和希	熊本大学・自然科学研究科・教授	1
A01 公募 第二期	26109701 アトムプローブ法によ る LPSO 濃化元素の Mg 中における拡散係 数測定	平成 26 年度 ～ 平成 27 年度	井上 耕治	東北大学・金属材料研究所・准教授	1
A01 公募 第二期	26109705 第一原理局所解析によ るシンクロ型 LPSO 構 造における欠陥間相互 作用の解明	平成 26 年度 ～ 平成 27 年度	椎原 良典	東京大学・生産技術研究所・助教	2
A01 公募 第二期	26109710 第一原理統計熱力学に 基づく Mg 基合金 LPSO 構造の熱力学的 安定性の理論計算	平成 26 年度 ～ 平成 27 年度	弓削 是貴	京都大学・大学院工学研究科・助教	1
A01 公募 第二期	26109714 LPSO 構造生成過程で のその場 XAFS と第一 原理 XANES による重 元素の挙動解析	平成 26 年度 ～ 平成 27 年度	吉岡 聡	九州大学・工学研究院・助教	1

A01 公募 第二期	26109716 X線非弾性散乱実験によるLPSO相のダイナミクス	平成26年度 ～ 平成27年度	細川 伸也	熊本大学・大学院自然科学研究科・教授	1
A02 公募 第二期	26109702 マルチスケール3次元解析によるLPSO構造形成メカニズムの解明	平成26年度 ～ 平成27年度	佐藤 和久	大阪大学・超高压電子顕微鏡センター・准教授	1
A02 公募 第二期	26109709 LPSO構造形成に対するフェーズフィールド解析	平成26年度 ～ 平成27年度	小山 敏幸	名古屋大学・大学院工学研究科・教授	2
A02 公募 第二期	26109711 走査トンネル顕微鏡による遷移金属-希土類クラスターの局所配列および物性測定	平成26年度 ～ 平成27年度	黒川 修	京都大学・工学研究科・准教授	1
A03 公募 第二期	26109704 シンクロ型LPSO構造の疲労機構の解明	平成26年度 ～ 平成27年度	小泉 雄一郎	東北大学・金属材料研究所・准教授	1
A03 公募 第二期	26109707 高精度AE計測によるキンク変形機構の動的解析	平成26年度 ～ 平成27年度	榎 学	東京大学・大学院工学系研究科・教授	3
A03 公募 第二期	26109712 マイクロピラー圧縮試験によるLPSO相の変形機構解析	平成26年度 ～ 平成27年度	岸田 恭輔	京都大学・大学院工学研究科・准教授	1
A03 公募 第二期	26109713 濃化層におけるクラスター構造を反映したLPSO相の弾性率および熱膨張の解明	平成26年度 ～ 平成27年度	多根 正和	大阪大学・産業科学研究所・准教授	1
A03 公募 第二期	26109715 薄片4点曲げ試験によるキンクバンド成長のその場観察と3次元形態・結晶方位解析	平成26年度 ～ 平成27年度	池田 賢一	北海道大学・大学院工学研究院・准教授	1
A03 公募 第二期	26109717 LPSO構造におけるキンク帯の不可逆性と加工硬化挙動への影響の解明	平成26年度 ～ 平成27年度	眞山 剛	熊本大学・大学院先端機構・准教授	1
A03 公募 第二期	26109718 マイクロ材料試験によるMg-Zn-Y合金LPSO相の破壊・疲労機構の解明	平成26年度 ～ 平成27年度	高島 和希	熊本大学・自然科学研究科・教授	2
A03 公募 第二期	26109721 異常分散を利用した高エネルギー放射光応力測定法による階層的キンク変形評価	平成26年度 ～ 平成27年度	城 鮎美	独立行政法人日本原子力研究開発機構・研究員	1
A04 (A02) 公募 第二期	26109708 水素化-脱水素化によるLPSO構造の安定性評価と形成過程の解明	平成26年度 ～ 平成27年度	石川 和宏	金沢大学・自然科学研究科・准教授	1
公募研究 計 25 件					

1. 研究領域の目的及び概要（2 ページ以内）

研究領域の研究目的及び全体構想について、応募時に記述した内容を簡潔に記述してください。どのような点が「我が国の学術水準の向上・強化につながる研究領域」であるか、研究の学術的背景（応募領域の着想に至った経緯、応募時までの研究成果を進展させる場合にはその内容等）を中心に記述してください。

研究領域名： シンクロ型 LPSO 構造の材料科学 一次世代軽量構造材料への革新的展開

研究期間： H23 年度～H27 年度

領域代表者所属・職・氏名： 熊本大学 先進マグネシウム国際研究センター・センター長／教授・河村能人

補助金交付額（各年度の研究領域全体の直接経費）： 総額 1,115,945,000 円

年度	H23 年度	H24 年度	H25 年度	H26 年度	H27 年度
交付額	245,700,000 円	210,110,000 円	207,025,000 円	223,520,000 円	229,590,000 円
備考		公募研究含む	公募研究含む	公募研究含む	公募研究含む

(1) 領域の目的

本領域の目的は、日本で開発された超高強度マグネシウム合金の中に初めて見出された、濃度変調と構造変調が同期したシンクロ型 LPSO 構造を対象に、①そのユニークな構造、②形成メカニズム、③常識を覆す力学特性と新しい材料強化原理を、最先端の研究手法や世界トップクラスの大型量子線施設を駆使してオールジャパンの異分野融合体制で世界に先駆けて明らかにし、我が国が主導して、この構造に潜む新たな材料科学の学術領域を打ち立てることである。

(2) 領域の特徴

本領域の大きな特徴は、下記の 2 点である。

- ①物理・化学・材料・機械を専門とするナノ計測分野、理論計算分野、材料プロセス分野等の知的・技術的資源を結集し、最先端の実験手法と計算科学を用いた異分野融合研究を推進する。
- ②J-PARC や SPring-8 等の大型量子線施設を活用した高精密構造解析の「その場実験」をコアにした連携研究を推進する。

(3) 我が国の学術水準の向上・強化における本領域の意義

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マグネシウム合金（以下 Mg 合金という）の分野で、常識を覆すような高強度を示す合金が我が国で開発され、世界的に注目されている（図 1）。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（図 2）。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る。

そこで本領域では、可能性を秘めたシンクロ型 LPSO 構造そのものを材料科学における飛躍的な発展のエンブリオと位置付け、最先端の知的・技術的資源を結集して組織的に研究することを立案した。異分野の多様な研究者が連携して取り組むことにより、シンクロ型 LPSO 構造の本質的解明が初めて可能になり、我が国が高い国際競争力を有する材料科学分野の飛躍的な発展をもたらすことができる。

(4) 研究の学術的背景

合金中に見られる規則構造には、特定の面内における周期的な溶質濃度の変化が生ずる長周期規則構造や最密面の規則的な積層変化が生ずる長周期積層構造などがある。前者は金属組織中でしばしば観察され、殆どが Cu₃Au 型 fcc 構造を基本とした 1 次元的規則性を示す（図 3 (a)）。このような周期的な溶質濃度の変化は濃度変調と定義される。一方、後者は原子配列の規則性ではなく、最密面の規則的な積層変化が生じており、このような積層変化は構造変調と定義される（図 3 (b)）。従来の合金系において、濃度変調や構造変調は独立して生ずる現象であり、両方が同時に観察されることは無かった。しかし、これらが同期して生ずる新奇な長周期構造が、本領域代表者らによって Mg-TM-RE 系 Mg 合金 (TM: 遷移金属元素, RE: 希土類元素) において発見された。

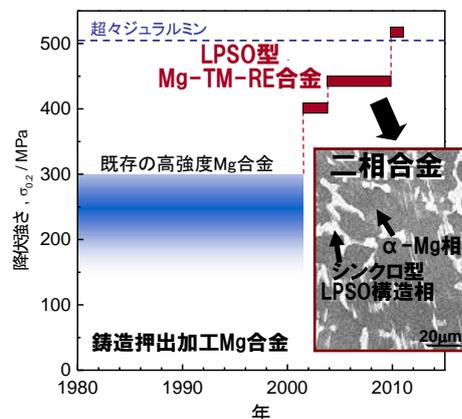


図1 我が国で開発された革新的LPSO型Mg合金

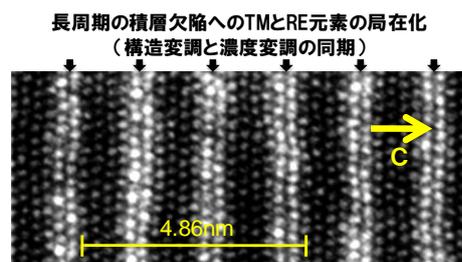


図2 シンクロ型LPSO構造 (HAADF-STEM像)

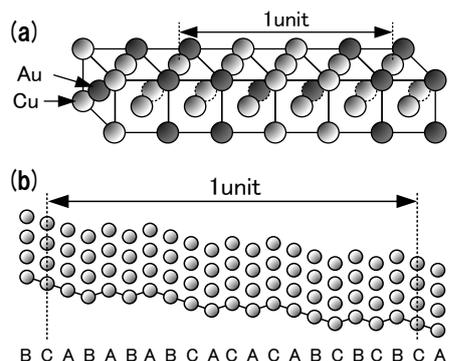


図3 (a)長周期規則構造 (Cu₃Au) (b)長周期積層構造 (18R)

この構造の特徴は、**図 2** の高分解能電子顕微鏡像で示したように、TM と RE が濃化した 2 原子層が hcp 構造底面に一定の間隔で存在し、c 軸方向に周期的な積層構造を持つ点である。このような異種原子の積層が、凝固時あるいは熱処理によって自然に形成される自己組織化過程を示すことがこの構造の大変興味深い点であり、シンクロ型 LPSO 構造と名付けられた所以でもある。これに対して従来の長周期規則構造や長周期積層構造は、濃度変調と構造変調が同期していないという意味で非シンクロ型 LPSO 構造と言える。また、このシンクロ型 LPSO 構造が注目されるもう一つの理由は、**図 4** に示すように、加工によりキンクバンド（以降キンク帯）が導入されて機械的性質が従来材に比べて著しく改善することである。キンク帯とは異方性の強い層状物質にみられる挫屈形態であり、岩石の褶曲においてもしばしば観察される。特にシンクロ型 LPSO 構造では、その原子配列に起因して非底面すべりや双晶変形が抑制されるため、キンク帯の形成による塑性変形（以後キンク変形）は重要な塑性変形機構となる。さらにその一方で、一旦形成されたキンク帯は hcp 金属など層状物質に特有の底面すべりに対する大きな抵抗となるため、機械的性質の劇的な向上がもたらされると考えられている。

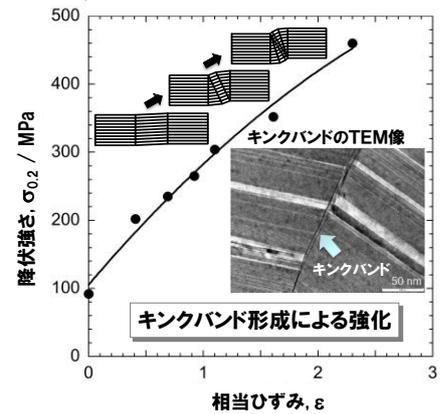


図4 シンクロ型LPSO構造の降伏強さの加工率依存性

(5) 応募領域の着想に至った経緯

シンクロ型 LPSO 構造相を強化相にした合金は、革新的な構造用材料としての可能性を無限に秘めているものの、その形成や強化メカニズムの本質は未解明である。Al 合金の室温時効の発見によって、ジュラルミンをはじめとする高強度 Al 合金が開発されたが、当時の観察技術の未熟さゆえにその原因は永い間特定できず、新合金は試行錯誤的に開発されてきた経緯がある。資源やエネルギーをめぐる熾烈な競争を繰り返している現代においては、このような新現象の本質解明のわずかな遅れは、我が国の国際競争力の著しい低下をもたらす恐れがある。そこで物理・化学・材料・機械を専門とするナノ計測分野、理論計算分野、材料プロセス分野等の研究者が一体となった研究チームを組織し、最先端の実験手法と計算科学を用いた組織的な異分野融合研究を推進することによって、希土類元素を添加しない高強度 Mg 合金、hcp 基チタン合金をはじめとする他の材料でも、シンクロ型 LPSO 構造を強化相として応用した新材料の創成が可能になると考えた。

(6) 該当する公募領域の「対象」と、領域の発展方法と取組み方法

本領域は、「異なる学問分野の研究者が連携して行う共同研究等の推進により、当該研究領域の発展を目指すもの」に該当する。本領域の参画研究者は、H23～H25 年度は計画研究の研究代表者 9 名、分担研究者 16 名、連携研究者 16 名に加えて第一期公募研究の研究代表者 8 名であり、H26～H27 年度は計画研究の研究代表者 9 名、分担研究者 16 名、連携研究者 16 名に加えて第二期公募研究の研究代表者 17 名であった。重複を外した実数は総勢 59 名であり、25 研究機関から結集したオールジャパン体制であった。目的を達成するために必要な研究分野の研究者を集めた結果、LPSO 構造や Mg 合金の研究に初めて携わる研究者が約 70% で、しかも領域代表者と面識のなかった研究者が 50%にのぼり、正しく異分野融合の研究組織となっている。また、採択時の平均年齢が 42.8 歳 (H23 年 9 月時点) と新進気鋭の研究者が中心であるので、次世代の材料科学分野を担うことができる若手人材育成を通して本領域の持続的な発展と幅広い分野への展開を図ることが期待できる。

(7) 領域の発展が学術水準の向上・強化に及ぼす効果

- ①本領域の発展は、我が国で開発された超高強度軽量 LPSO 型 Mg 合金の実用化に資することが期待できる。この材料が実用化された暁には、環境・エネルギー問題の解決に大きく寄与し、高度に持続可能な社会の実現をもたらすものと期待される。
- ②形成メカニズムの解明は、シンクロ型 LPSO 構造を強化相にした希土類フリーの高強度 Mg 合金や高強度 Ti 合金等の開発に展開できる可能性が高い。また、有益な工学的特性を有しながら形成機構が未解明のまま残されている Ti-Si-C 系セラミックの MAX Phase、鉄鋼材料の Z Phase、高温超伝導材料のペロブスカイト化合物に代表される長周期物質の形成機構の解明にも大きく寄与できる。
- ③シンクロ型 LPSO 構造で見出された「キンク強化」の体系化は、固溶強化、析出強化、加工強化、結晶粒微細化強化、複合強化に次ぐ第 6 番目の新しい材料強化法として歴史に刻まれ、我が国の材料科学分野の高い評価に繋がるものと期待される。また、キンク変形に関して得られる新規な知見は、MAX Phase 等で稀に観察される延性発現機構（強化しない）の解明をもたらす、高延性セラミック材料の開発等に資することが期待される。
- ④このように、シンクロ型 LPSO 構造の新学術領域の確立は、産業につながる工学分野の発展をもたらすのみならず、周辺の基礎学問分野にも大きな影響を与え、多岐かつ長期にわたって我が国の科学技術や学術水準の向上・強化に資するものである。

2. 研究領域の設定目的の達成度（3 ページ以内）

研究期間内に何をどこまで明らかにしようとし、どの程度達成できたか、また、応募時に研究領域として設定した研究の対象に照らしての達成度合いについて、具体的に記述してください。必要に応じ、公募研究を含めた研究項目ごとの状況も記述してください。

【応募時に研究領域として設定した研究の対象】

「異なる学問分野の研究者が連携して行う共同研究等の推進により当該研究領域の新たな展開を目指すもの」

(1) 領域全体としての設定目的の達成度

本領域により、シンクロ型 LPSO 構造の解明を設定目的以上に達成することができ、「シンクロ型 LPSO 構造の材料科学」という新たな学術領域を打ち立てることができた。得られた主な研究成果は以下の通りである。

- ①シンクロ型 LPSO 構造の濃化層は、当初想定していた隣接 2 原子層ではなく隣接 4 原子層であり、 $L1_2$ 型原子クラスターが面内に規則配列していることを明らかにした。さらに、シンクロ型 LPSO 構造が金属結合を基本とする構造中に共有結合の要素を持つ新しい概念の層状構造（「ミルフィーユ構造」と命名）であることを明らかにし、新たな異分野融合研究領域を創成できた。
- ②シンクロ型 LPSO 構造の形成が格子せん断と元素拡散が重畳した混合型変態であることを明示した。また高溶質濃度アモルファス相からの相転移過程において α -Mg 相の晶出と規則クラスターの生成後に LPSO 構造が形成されること、希薄合金の低 RE 組成でのスピノーダルの濃化層の存在や高 RE 組成での積層欠陥型濃化層の直接形成を確認し、LPSO 構造形成のシナリオが母相の過飽和度に依存することを明らかにした。
- ③シンクロ型 LPSO 構造で見出された「キンク強化」が、これまでの金属材料における強化機構とは異なる強化機構であり、層状構造を持つ多くの材料の強化機構の理解に有効であることを示した。
- ④物理、化学、材料、機械分野の実験・計算科学・理論が融合した材料研究の有効性を実証するとともに、次世代の材料科学を担う若手研究者を育成することができ、材料研究の新しいモデルを提示することができた。
- ⑤新奇シンクロ型 LPSO 構造の発見やシンクロ型 LPSO 構造の本質的解明により、実用化を目指した LPSO 型マグネシウム合金の応用研究に材料設計指針を与えることができた。

(2) 領域運営の設定目的の達成度

1) 領域内運営

【中間評価・事後評価】 領域研究目的の達成を目指して領域運営と研究支援活動を実施しており、具体的には「中間評価」と「事後評価」で「A+」の評価を得ることを目的にしている。「中間評価」では「A+」を獲得して目的を達成した。「事後評価」も「A+」を目指して領域運営を図ってきた。

【領域企画・運営と領域内交流推進】 ①「領域企画・運営部会」と「領域内交流推進部会」による各種委員会（11 回）、各種会議（35 回）、各種研究会（34 回）の開催と「ガイドブック」の作成・配布を通して、領域の企画・運営と連携研究の推進を早い段階で効果的かつ円滑に推進できた。②「新展開 WG」を設置して、本領域の次への展開を議論（11 回）し、後継新学術領域研究として「ミルフィーユ構造のキンク強化」の申請を行った（残念ながら不採択）。

【研究支援】 「研究支援活動部会」による①大型量子線施設の活用支援を通じた連携研究の推進、②実験結果の整合性を確保するための品質が安定した共通試料（計 363 個）やオーダーメイド試料（162 個）の提供、③参画研究者のベクトル合わせと最新情報の共有化を図るための研究成果 DB の構築・運用によって、組織的かつ戦略的に連携研究を推進することができた。

【若手人材育成】 「若手人材育成部会」による①「若手研究会」（9 回）、「学生勉強会」（計 1 回）、「熊大 MRC サマースクール」（4 回）の企画・開催、②「若手海外・国内異分野武者修行」のプログラム（10 件）によって、次世代を担う研究者の育成、交流の活性化、異分野融合連携研究の活性化を図ることができた。

2) 対外的活動

【学協会活動】 ①日本金属学会、軽金属学会、日本機械学会、日本物理学会、日本放射光学会等でシンポジウム等（27 件）を企画・開催することによって、異分野学術交流の推進を図った。②日本金属学会に「キンク勉強会」を立上げ、キンク研究の裾野の拡大を図った。

【国際活動】 ①領域主催の国際会議 LPSO2012（札幌）と LPSO2014（熊本）を開催し、LPSO2016（京都）の開催準備を進めた。②回位理論に強みを持つロシアの研究グループとの国際共同セミナーを Togliatti と St. Petersburg で開催（H27 年 6 月 15 日～21 日）するとともに、次回開催（京都、H28 年 12 月）の準備を進め、国際交流の推進を図った。③多くの基調講演（23 件）や招待講演（121 件）を引き受けることによって、世界に向けた情報発信や国際交流を推進できた。その結果、Mg2015 や THERMEC'2016 において、LPSO 構造に関するセッションが立ちあげられるまでに世界的認知が得られた。

【産業界との連携】 産学官交流会「高性能 Mg 合金創成加工研究会」を共催（20 回）し、LPSO 型 Mg 合金の応用研究を実施している研究機関や企業の研究者・技術者との交流を図ることができた。

【広報】 ①領域ホームページの運営やニュースレター（No.1~4）の発行・配布によって、全国に向けた発信を実施することができた。②一般公開の研究成果報告会を H28 年 9 月 6 日に東京で開催する準備を進めた。

【特集号・図書出版】①Materials Transactions に”Long-Period Stacking Ordered Structure and Its Related Materials (I)”を H25 年の特集号として、”Long-Period Stacking Ordered Structure and Its Related Materials (II)”を H27 年の特集号として発刊した。②日本金属学会会報誌「まてりあ」(H27 年)やアグネ出版「金属」(H28 年)で LPSO 構造の特集号を発行した。③一般図書「シンクロ型 LPSO 構造」(日経 BP)の H29 年度発刊の準備を進めた。④Materials Science & Engineering: R (Impact Factor: 19.75)として、編集委員の推薦で特集号”Innovation of Magnesium Alloys by Synchronized LPSO Structure”の原稿準備を進めた。

【知財確保】「図書出版・知財活動部会」により、「知財に関する講演会」(1 回)と「知財相談会」(7 回)、毎年開催の「合宿研究会」と「研究成果報告会」を活用した、国際特許事務所の弁理士による「知財掘り起こし」(7 回)を実施し、特許申請(42 件)に繋げることができた。

(3) 研究項目ごとの設定目的の達成度

1) A01 班「構造科学」の設定目的の達成度

A01 班は、実験系及び計算系が連携して原子レベル構造解析(実験系)、量子線精密構造解析(実験系)、第 1 原理解析(計算系)によりシンクロ型 LPSO 相の結晶構造、変形組織構造、構造安定性の解明を進めた。

【原子レベル構造解析】シンクロ型 LPSO 相の構造を、その特徴である積層変調と濃度変調のシンクロ性に着目して、積層の周期・及びその完全性、濃化層面内の溶質原子の配列性について、原子直接観察により原子レベルで定量評価し、以下を明らかにした。①Mg-Zn-RE 合金中に形成される LPSO 構造は、積層周期の異なる種々の構造多形が存在することを明らかにした。さらに、これらの積層周期の異なる LPSO 構造は、全て化学的秩序の相関長が、常に対応する積層秩序に同期したシンクロ型 LPSO 構造であることが解明された。②濃化層は、領域開始時想定していた隣接 2 原子層では無く隣接 4 原子層であり、L1₂型原子クラスターを形成していることを明らかにした。また L1₂型原子クラスターは、面内に規則配列しており、Mg-Al-Gd 系の場合は、規則度が高いが、Mg-Zn-Y 系の場合は、規則度が、Zn、Y 濃度により変化すること、この規則度に自由度があるということが、Mg-Zn-Y 系シンクロ型 LPSO 相の優れた機械的特性に密接に関係していることが初めて解明された。

【量子線精密構造解析】シンクロ型 LPSO 構造を、マイクロ、マクロスケールでの均質性に着目して、平均構造、外場負荷による動的構造変化について、量子線構造解析により精密評価し、以下を明らかにした。①シンクロ型 LPSO 相は、マイクロ、マクロスケールで均一であり、その平均結晶構造は、原子レベル構造解析で得られた結果と一致していることを明らかにした。従って、シンクロ型 LPSO 構造を持つ相である。また L1₂型原子クラスターは、共有結合性を持ち、シンクロ型 LPSO 相は、金属層と共有結合性層からなる層状物質と捉えることが出来ることを明らかにした。②シンクロ型 LPSO 相の格子レベルの弾性特性は、結晶構造を反映して、異方性があり、c 軸方向が硬いことを明らかにした。③キンク変形は、底面すべりの前駆現象を伴う協同現象であり、発生時間間隔は周期的であると共に格子回転により底面の引張ひずみ、柱面の圧縮ひずみが緩和する変形過程であることを明らかにした。また高温変形特性として、高温では室温では活動しない柱面すべりも活動し、キンク変形の割合が抑制されることを明らかにした。④シンクロ型 LPSO 相の熱膨張係数は、異方性があると共に純 Mg よりも小さいこと、さらに、熱膨張係数が小さいということが、シンクロ型 LPSO 相の優れた高温変形特性と密接に関係していることを明らかにした。

【第 1 原理解析】シンクロ型 LPSO 構造を、発現因子に着目して、安定性・変形特性について、第一原理解析により、原子・電子レベルから特定し、以下を明らかにした。①LPSO 相中の溶質規則化をもたらず支配因子をエネルギー論的に解明した。②溶質クラスターの規則配列化・ドメイン化の特徴を解明した。特に溶質濃化層の維持・安定化において積層欠陥をプラットフォームとして自己組織化するナノサイズの溶質クラスターの役割を明らかにした。③Mg-LPSO 相の基礎変形特性としての一般化積層欠陥エネルギー、転位芯構造、弾性率等を明らかにした。特に、LPSO 相の Mg 層と関係する Mg 中の錐面上の拡張らせん転位芯に関する新奇の交差すべり機構を発見した。④LPSO 単相における弾性率と形成エネルギーの関係を明確化した。

2) A02 班「形成メカニズム解明」の設定目的の達成度

A02 班では、シンクロ型 LPSO 構造形成メカニズムを原子間結合エネルギーと格子歪エネルギーの両面から解明するとともに、極限環境物質合成によるシンクロ型 LPSO 構造物質群の拡大にも取り組んだ。

【原子間結合エネルギー解析】計算および実験状態図の両面からの安定構造・安定性の評価を行うとともに、量子線による溶質偏析と積層欠陥のシンクロ性、相形成過程の評価、自由エネルギーをベースにした液相からの相・組織の出現シーケンスの解明を目的に、以下の点を明らかにした。

①放射光その場測定法により、Mg-Zn-Y 合金を中心に LPSO の安定性(時間/温度)と形成過程の検討を行い、特に強非平衡状態(アモルファス)からの相転移過程では Mg 晶出とともに規則クラスターが形成し LPSO 構造の形成に至ることを解明した。②第一原理計算と Calphad 法を用いた計算状態図の評価から Mg-TM-RE 系での LPSO 構造の安定温度、各種構造相変態に対する相安定性を明らかにした。③実験的な状態図解析より LPSO 構造間の共存関係を初めて明確にするとともに、熱力学モデリングへの導入を進め、凝固過程のフェーズフィールドモデリング手法も確立した。④新規手法の応用として、STM を用いた積層欠陥内の L1₂クラスター分布の直接検証およびクラスターの 2 次元構造解析に成功した。

【格子歪エネルギー解析】 格子歪の観点からの構造生成過程の実験・理論的解明を目的に、構造相変態の歪エネルギー評価と歪緩和解析、濃度・構造変調に起因するエネルギー変化の電子論的評価、変調がシンクロする相変態モデリング構築の観点から、以下を明らかにした。①LPSO 構造内での構造ユニット間の弾性相互作用を理論的に評価し、各種 LPSO 構造で最小歪エネルギー配列を導出するとともに、14H 構造で予測した配列を実験的に確認した。前加工で導入された母相転位が構造ユニットの核生成サイトとなり、LPSO 構造が微細分散化されることを実験的に解明した。②HAADF-STEM 解析より、Mg-Zn-Y 合金の共存する LPSO 構造多形間での相変態過程を解明するとともに、Mg-Zn-Gd 合金での低 Gd 組成スピノーダルの濃化層の存在、高 Gd 合金での積層欠陥型濃化層の直接形成をそれぞれ確認し、LPSO 構造形成のシナリオが母相の過飽和度に依存することを明確に示した。③Mg-Zn-Y 合金の LPSO 構造形成について、第一原理計算を用いた素過程の検討により、積層欠陥への溶質偏析とクラスター形成→積層欠陥周囲の溶質原子の排斥と集合→新たな積層欠陥の導入、というシナリオが理論的に妥当であることを導いた。④濃度変調と構造変調が重畳(シンクロ)する場合の相変態フェーズフィールドモデリング法を初めて確立するとともに、蛍光X線ホログラフィーを用いて LPSO 構造中の Zn 原子の局所的変位の検出に成功した。

【極限環境での物質合成】 通常環境場、超高压環境場、急冷場での新物質探索の研究を通して、シンクロ型 LPSO 構造の新物質の発見と同定、発見されたシンクロ型 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、およびシンクロ型 LPSO 構造形成のプロセス条件の確立を目的に、以下の点を明らかにした。①通常場において Mg-Ni-Y 系 12R 型 LPSO 構造相を、超急冷場を用いることで Mg-Co-Sm 系合金における新規 LPSO 構造相の生成を発見した。②超高压場を用いて Mg-Zn-Yb 系新規高压 LPSO 構造相を合成することに成功した。③チタン合金や RE フリー Mg 合金で調査した範囲ではシンクロ型 LPSO 構造が形成しないことがわかった。④種々の環境下で物質群拡大と新機能探索を幅広い系で行い、クライテリアの精密化を着実に進めた。

3) A03 班「力学特性解明と新強化原理の構築」の設定目的の達成度

A03 班では、シンクロ型 LPSO 構造で見出された特異な変形機構の解明と、それを基にした新たな強化原理の確立を目指した。特に、「キンク帯」と呼ばれる LPSO 構造の塑性変形過程で顕在化する組織に着目し、①キンク帯形成による高強度化への寄与の定量的実証、②キンク帯の構造、形成機構の解明、③キンク帯のモデル化・理論化、に注力し大きな成果を得た。

【キンク帯による高強度化の実証】 キンク帯を用いた高強度材料設計に不可欠なキンク帯強化の定量的実証を行い、以下の成果を得た。①Mg 系シンクロ形 LPSO 合金の常温から 300°C の温度域で、キンク帯導入により強度が 2 倍以上増加することを明らかにした。②キンク帯の間隔の $1/2$ 乗に比例して強度が増加することを明らかにした。これは常温強度だけでなく高温強度に及ぼすキンク帯強化の寄与を定量的に示す成果である。③結晶塑性 FEM によりキンク帯をモデル化し、降伏強度増加に関する実験結果を再現することに成功した。

【特異な変形機構の解明】 キンク変形の特異性を明確化するため、連続体から原子レベルに至るマルチスケール解析を行うとともに、非シンクロ形構造との対比により、濃度変調と積層変調同期の意義を解明した。①結晶塑性 FEM によるキンク変形の再現に成功した。その際、(a)キンク帯のエンブリオとして初期結晶方位の揺らぎ等の初期不整合が重要であること、(b)構造全体の弾性ひずみエネルギーが最小化される部位であること等、固体力学上の特徴を明確化した。また、シミュレーションによりキンク帯が形成された LPSO 構造では塑性異方性が改善され加工硬化率が增大することが明らかになった。これはキンク帯形成が単なる強化機構に留まらず加工性向上にも貢献し得ることを認識させる重要な成果である。②分子動力学シミュレーションにより、2H 構造に比べ LPSO 構造では双晶変形が抑制されること、非底面すべりにより大量に供給された底面転位群の配列でキンク界面の形成が再現されることが明らかになった。さらにキンク変形の発生に及ぼす濃度変調の重要性も明らかにされた。これらの結果はキンク帯形成の原子論的メカニズムを詳らかにする共に積層変調と濃度変調が同期することの強化への意義を示すものである。③非シンクロ型の濃度変調を有しない Ni 基 LPSO 相や 2H 構造を有する純 Zn 結晶と比較した実験研究によって、Mg 基 LPSO では 18R、14H、10H 構造の違いによらず、底面すべり、キンク変形が主変形機構を担うのに対し、非シンクロ型ではすべり面の選択性により高い自由度が見いだされた。これは上記、構造上の同期が、LPSO の力学特性の特異性の源泉となっていることを示唆する。④キンク変形に際して、その近傍のひずみ分布の条件式を提案し、微細マーカ法による定量的計測により検証された。この結果はキンク変形の様式の特異性を定義付ける上で本質的な知見となる。

【新強化原理の確立】 キンク帯の構造解析と併行して、その理論化が推進された。特に金属系材料では殆ど顧みられること無かった回位論、そしてそれを基盤とした新たな理論体系が、結晶塑性、強化機構の理解に重要な役割を果たすことを明示し、新強化原理確立に大きく近づく意義ある成果が得られた。①超高压電顕法や EBSD 解析を用い、キンク帯の回転軸や角度、界面形態のメゾ構造解析が大きく進んだ。②離散転位塑性論の枠組みを拡張した回位モデルによる高次の離散欠陥塑性論の定式化に成功し、キンク変形の回位を基盤とした理解を大きく進展させることができた。さらに、回位を拡張した高次不整合の概念や数理形態学を基にしたエネルギー論を展開し、キンク変形の素過程やキンク帯のもたらす応力場の定式化に成功した。

3. 研究領域の研究推進時の問題点と当時の対応状況（1 ページ以内）

研究推進時に問題が生じた場合には、その問題点とそれを解決するために講じた対応策等について具体的に記述してください。また、組織変更を行った場合は、変更による効果についても記述してください。

(1) 各班における研究推進時の問題点と当時の対応状況

【A01 班】 A01-1 グループでは研究推進時に特に大きな問題点はなく、研究機関の初期段階から着実に研究成果を上げている。A01-2 グループでは J-PARC に関して、東日本大震災 (H23 年 3 月 11 日) による約 10 ヶ月及びハドロン事故 (H25 年 5 月 23 日) による約 9 ヶ月の施設停止があったが、ビームタイム配分を工夫して影響を最小限に留めた。A01-3 グループでは中間評価を迎える時点で LPSO 構造における溶質濃化層の積層秩序の起源に関する取り組みが不足していたため、H25 年度より松中を分担研究者として迎え、電子状態に起因する相互作用とフォノン効果の観点から安定な LPSO 周期に関する理論的考察を進展させた。その結果、当該研究対象に関する知見の蓄積と共有を図るとともに領域内の議論を促すことが出来た。

【A02 班】 A02 班でも実験研究に携わる研究者の半数以上が Mg 合金および LPSO 構造を扱った経験がなく、また量子線を用いたその場実験や HAADF-STEM, 3DAP, STM などを用いたクラスタリング観察など先端解析手法を追求する必要性から、研究における助走期間をある程度必要とした。特に A02-1 グループと A02-2 グループは、観点は異なるが類似の合金あるいは事象を扱うことが多いので、グループ内での連携は元よりグループ間でも Mg 合金および LPSO 構造研究の経験者との情報および意見交換を非公式かつ頻繁に行った。また、合金試料などは A02-3 グループが深く関わる総括班での共通試料作製を有効に利用した。

【A03 班】 A03 班では、LPSO 構造に特異な変形挙動の解明を大きな目的の 1 つとしていたが、研究領域内ではこの分野にある程度知見を持つ研究者と初めて取り扱う研究者がそれぞれ参集され、研究開始時点での足並みは必ずしも同調しているとは言い難かった。この点に関して、各グループにおけるミーティングによる頻繁な意見交換やグループの垣根を取り払った班全体での研究会の適宜開催によって直面している問題を明確化し、実験グループと計算および理論グループの研究進捗状況を揃えることに成功した。特に、実験グループと他のグループとでは研究に対する方法論に大きな相違があるため、研究開始当初は互いの接点を見出すのに多くの対話を必要としたが、研究期間の後半では多くの研究項目について共通認識を持つことができた。

(2) 総括班の研究支援活動における研究推進時の問題点と当時の対応状況

【大型量子線施設利用支援】 ①J-PARC 利用支援に関しては、専門の技術支援員を雇用し効率化を図ると共に、本領域開始後の早い時期に施設見学会 (H24 年 3 月 15 日) を開催し、装置群の性能・測定例を紹介して、利用者拡大に繋げた (利用日数 39 日)。また領域内研究者と個別にコンタクトを取り、施設側のビームタイム枠である JAEA プロジェクト研究課題、KEK S 型研究課題での実験も進めた。②SPring-8 利用支援に関しては、領域内の研究者の多くが利用経験に乏しかったこともあり、施設見学会 (H24 年 11 月 5 日) を開催し、使用できる装置や利用方法の説明を行った。また、利用希望のあった研究者については、個別に訪問し、課題申請に関する打合せを実施した。更に、領域内研究で利用できる実験装置の拡充を行い、利用者の拡大に繋げた (利用日数 114 日)。③九州大学超高压電子顕微鏡室 (H26 年度から超顕微解析研究センターに改組) の所有の高性能電子顕微鏡装置群の利用支援を研究開始当初から実施し、施設見学会 (H26 年 5 月 20 日) を開催して、使用できる装置や利用方法の説明を行った。H26 年度より、領域内の施設利用活発化のため、九州大学筑紫地区の大学院総合理工学研究院所有の設備の拡張および、専門の技術支援員を雇用することで、利用率の拡大に繋げることができた (利用日数 239 日)。

【共通試料作製・配布】 一方向性凝固 (DS) 試料に関し、新学術開始直後は $Mg_{85}Zn_6Y_9$ (at.%) 組成を有する一種類の試料 (A1) のみを供給していた。しかしながら当初予定とは異なり、研究の進展に伴い様々な現象が見出されたことから、複数の研究者よりさらなる研究推進のため、他組成を有する DS 結晶供給への要望が高まった。このため、領域内での円滑かつ加速的な研究推進を実現すべく、オーダーメイドを含め、多種多様な合金供給を実現すべく最大限に努めた。この際 A02 班との密接な連携により、共通試料としての組織、組成最適化を、従来の共通試料供給と同時並行的に進めた。この結果、5 年間にて DS 材合計 153 本、鑄造試料 327 本、計 525 本の共通試料供給を、参画研究者の要望に最大限に応じる形で円滑に実現した。

【データベース構築・運用】 参画研究者の大半が Mg 合金の LPSO 構造研究が未経験であるので、早急に関連研究の情報データ集約とその共有化を必要としたため、領域独自のホームページを立ち上げて関連研究の論文データベースを作成し、領域メンバー用ページでの情報展開を行った。年度毎の研究成果リスト (ホームページでの完全公開) の更新によりデータベースを拡充し、大規模かつオールジャパン体制での直接会合の困難な中、効率良い情報共有化と連携研究の進展を図った。

4. 審査結果の所見及び中間評価の所見等で指摘を受けた事項への対応状況（2 ページ以内）

審査結果の所見及び中間評価において指摘を受けた事項があった場合には、当該コメント及びそれへの対応策等を記述してください。

(1) 審査結果の所見において指摘を受けた事項への対応状況

1) 審査結果の総合所見

本研究領域は、濃度変調と構造変調が同期するという、我が国で見出されたシンクロ型 LPSO 構造の形成機構の解明、力学特性の評価、新たな材料強化原理に基づく材料科学の確立などを目指しており、新材料の学理を拓くための重要な研究提案である。主たる対象はマグネシウム合金であるが、新たな材料強化原理をチタン合金やセラミックス等に拡張して一般化する試みも評価できる。研究組織では中性子や放射光を用いた精密構造解析や第一原理計算に基づく電子論の展開などに特徴があり、各研究組織が相互に連携しながら研究を進めていくことの重要性も認識されている。合金の実用化まで視野に入れているが、高強度軽量材料は移動体の低消費燃料化などに直結しており、産業の面で極めて有用な基礎研究である。若手研究者の育成についても、国内・海外武者修行制度を考案するなど、総括班の中でユニークな施策が示されている点も評価できる。実用化のためには耐熱性、耐食性、疲労特性など、より積極的に推進すべきあるとの指摘があった。材料強化原理の解明により、さらなる高機能材料開発につながることを期待されるが、その展開手法が明確でないとの意見もあった。現状のシンクロ型 LPSO 構造を持つマグネシウム合金はレアアース(RE)を含む組成になっているが、今後 RE を含まない合金の開発が重要であるとの指摘があった。

2) 指摘事項への対応状況

①【指摘事項】主たる対象はマグネシウム合金であるが、新たな材料強化原理をチタン合金やセラミックス等に拡張して一般化する試みも評価できる。

【対応状況】セラミックスの Max Phase のキンク変形で世界的権威である Barsoum 教授 (Drexel University, 米) やキンク変形を理解する上で重要な概念である Disclination (回位) モデルの世界的権威である Romanov 教授 (ITMO University, 露) との交流を開始し、議論を深めるとともに国際連携を進めた。

②【指摘事項】研究組織では中性子や放射光を用いた精密構造解析や第一原理計算に基づく電子論の展開等に特徴があり、各研究組織が相互に連携しながら研究を進めていくことの重要性も認識されている。

【対応状況】総括班に「領域内交流推進部会」を設け、「連携会議・連携研究会」等の開催により連携を図った。また、総括班に「研究支援活動部会」を設け、大型量子線施設の「施設利用」の支援や「施設見学会」の開催により連携を図った。特に、「ガイドブック」を作成・配布して、研究ベクトルを合わせるとともに、本領域研究がプロジェクト研究であり連携研究が重要であることを周知徹底することに努めた。

③【指摘事項】合金の実用化まで視野に入れているが、高強度軽量材料は移動体の低消費燃料化などに直結しており、産業の面で極めて有用な基礎研究である。

【対応状況】本領域研究が産業の面でも有用な基礎研究であるという認識の下、総括班に設置した「広報・交流推進部会」に「産学官交流」担当を設置して、産学官交流会「高性能 Mg 合金創製加工研究会」の共催等によって産業界との交流を進めるとともに、総括班の「研究推進委員会」に産業界から3名の外部委員を入れて、産業界の意見も取り入れながら基礎研究の推進を図った。

④【指摘事項】若手研究者の育成についても、国内・海外武者修行制度を考案するなど、総括班の中でユニークな施策が示されている点も評価できる。

【対応状況】総括班に「若手人材育成部会」を設置して、「国内・海外武者修行制度」の運営、「若手研究会」・「学生勉強会」・「サマースクール」等の開催、研究表彰などによって、若手人材育成を図った。

⑤【指摘事項】実用化のためには耐熱性、耐食性、疲労特性など、より積極的に推進すべきあるとの指摘があった。

【対応状況】当初の計画通り、本領域研究ではメカニズムの本質を対象とした基礎的研究に絞って実施した。指摘事項の実用化のための研究は、経済産業省等の他の事業や企業と個別に実施する共同研究で進めることにした。この方針は、中間評価において、「実用を見据えた応用研究との切り分けがよくできており、メカニズムの本質を対象とした基礎的研究に絞った本領域の目的は明確である。」と高評価を得たので、この方針を最後まで踏襲した。

⑥【指摘事項】材料強化原理の解明により、さらなる高機能材料開発につながることを期待されるが、その展開手法が明確でないとの意見もあった。

【対応状況】キンク帯形成による強化原理について、キンク帯密度、ひずみ分布状態の定量的観測を踏まえ、個別的材料に依らない普遍的なキンク帯形成の定式化を行うと共に、250-300°Cの温度範囲に至るまでのキンク強化の有効性を証明することで、中高温での使用を想定した材料高機能化の可能性を示した。

⑦【指摘事項】現状のシンクロ型 LPSO 構造を持つマグネシウム合金はレアアース(RE)を含む組成になっているが、今後 RE を含まない合金の開発が重要であるとの指摘があった。

【対応状況】A02-3グループを中心に、REフリーのマグネシウム合金の探査を精力的に進めた。残念ながら、シンクロ型 LPSO 構造を持つ RE フリーのマグネシウム合金の発見には至らなかった。

(2)中間評価の所見等で指摘を受けた事項への対応状況

1) 総合所見

マグネシウムは資源が豊富で比強度比剛性の高い材料であり、今後の低炭素社会においても期待される。この分野で従来の常識を覆すシンクロ型 LPSO 構造を有する合金が、我が国で発見された。現実の応用に向けて極めて有望であるがメカニズムの本質が解明されていないこの革新的な構造について、計測、計算及び材料プロセスの研究者が融合し、新しい材料の創製原理を検討する研究領域である。実用を見据えた応用研究との切り分けがよくできており、メカニズムの本質を対象とした基礎的研究に絞った本領域の目的は明確である。領域運営については、領域代表者の強力なリーダーシップのもと、6つの部会と事務局を設置して研究支援活動を組織的に進めるなど、工夫されている。異なる学問分野の研究者の連携のもと、多数の成果が出ており、特に、Mg-Al-RE 系 LPSO 相については、STEM の直接観察により RE の濃縮が積層欠陥部の2層のみでなく4層にわたって起きていることを見出すなど当初予想していなかった成果もあげており、期待以上の進展が認められる。量子線や放射光を用いた精密構造解析も、まだ初期的なデータが出た段階であるが、既に本研究課題に対する有用性が見出されており、今後の成果が期待できる。我が国発の新素材として発展が期待されるものであり、引き続き集中的に LPSO 構造の解明を目指してほしい。将来の実用化に向けて、異なる分野間でより踏み込んだ融合が加速されることを期待する。

2) 指摘事項への対応状況

①【指摘事項】 実用を見据えた応用研究との切り分けがよくできており、メカニズムの本質を対象とした基礎的研究に絞った本領域の目的は明確である。

【対応状況】 当初の計画通り、本領域研究ではメカニズムの本質を対象とした基礎的研究に絞って実施した。審査結果の所見で指摘された実用化のための研究は、経済産業省等の他の事業や企業と個別に実施する共同研究で進めた。また、総括班に設置した「広報・交流推進部会」に「産学官交流」担当を設置して、産学官交流会「高性能 Mg 合金創製加工研究会」の共催等によって産業界との交流を進めるとともに、総括班の「研究推進委員会」に産業界から3名の外部委員を入れて、産業界の意見も取り入れながら基礎研究の推進を図った。

②【指摘事項】 領域運営については、領域代表者の強力なリーダーシップのもと、6つの部会と事務局を設置して研究支援活動を組織的に進めるなど、工夫されている。

【対応状況】 6つの部会と4つの事務局を設置して領域運営を組織的に進めた結果、領域運営、研究支援活動、領域内連携推進、広報・交流推進、若手人材育成等を効果的かつ効率的に進めることができた。

③【指摘事項】 異なる学問分野の研究者の連携のもと、多数の成果が出ており、特に、Mg-Al-RE 系 LPSO 相については、STEM の直接観察により RE の濃縮が積層欠陥部の2層のみでなく4層にわたって起きていることを見出すなど当初予想していなかった成果もあげており、期待以上の進展が認められる。

【対応状況】 総括班に設置した「研究支援活動部会」と「領域内交流推進部会」ならびに「若手人材育成部会」の活動によって、領域内の学問分野の異なる研究者間の交流・連携の推進を図ることができ、連携研究ならではの研究成果を出すことができた。

④【指摘事項】 量子線や放射光を用いた精密構造解析も、まだ初期的なデータが出た段階であるが、既に本研究課題に対する有用性が見出されており、今後の成果が期待できる。

【対応状況】 総括班に設置した「研究支援活動部会」での「大型量子線施設利用支援」や「共通試料作製・配布」によって、精密構造解析を効果的に進めることができた。特に、Spring-8、J-PARC、九大超高压電顕室の施設管理者をメンバーに加えているので、精密構造解析の研究を効果的かつ効率的に進めることができた。

⑤【指摘事項】 我が国発の新素材として発展が期待されるものであり、引き続き集中的に LPSO 構造の解明を目指してほしい。

【対応状況】 当初の計画通り、本領域研究ではメカニズムの本質を対象とした基礎的研究に絞って実施した。実用化のための研究は、経済産業省等の他の事業や企業と個別に実施する共同研究で進め、また総括班に設置した「広報・交流推進部会」に「産学官交流」担当を設置して、産業界との交流を進めるとともに、総括班の「研究推進委員会」に産業界から3名の外部委員を入れて、産業界の意見も取り入れながら基礎研究の推進を図った。

⑥【指摘事項】 将来の実用化に向けて、異なる分野間でより踏み込んだ融合が加速されることを期待する。

【対応状況】 総括班に設置した「研究支援活動部会」と「領域内交流推進部会」ならびに「若手人材育成部会」の活動によって、領域内の学問分野の異なる研究者間の交流・連携の推進を図ることができ、連携研究ならではの研究成果を出すことができた。実用化については、本領域では行わず、経済産業省等の他の事業や企業と個別に実施する共同研究で進めたが、総括班に設置した「広報・交流推進部会」に「産学官交流」担当を設置して、産業界との交流を進めるとともに、総括班の「研究推進委員会」に産業界から3名の外部委員を入れて、産業界の意見も取り入れながら基礎研究の推進を図った。

5. 主な研究成果（発明及び特許を含む）[研究項目ごとに計画研究・公募研究の順に整理する]

(3 ページ以内)

本研究課題（公募研究を含む）により得られた研究成果（発明及び特許を含む）について、新しいものから順に発表年次をさかのぼり、図表などを用いて研究項目ごとに計画研究・公募研究の順に整理し、具体的に記述してください。なお、領域内の共同研究等による研究成果についてはその旨を記述してください。記述に当たっては、本研究課題により得られたものに厳に限ることとします。

(1) A01 班「構造科学」の主な研究成果

【A01-1】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

Mg-Al-Gd および Mg-Zn-Y 系 LPSO 相の結晶構造を原子レベル構造解析により決定した。Gd, Al あるいは Y, Zn 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(図 5)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。シンクロ型 LPSO 相の結晶構造は濃縮 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、Order-disorder 構造という結晶学概念に基づき記述できることを明らかにした。これによりシンクロ型 LPSO 構造の原子配列が完全に解明された。得られた成果はシンクロ型 LPSO 構造の材料科学の学理構築において最も基礎的かつ重要な知見であり、本領域全体の研究の進展に大いに貢献した。

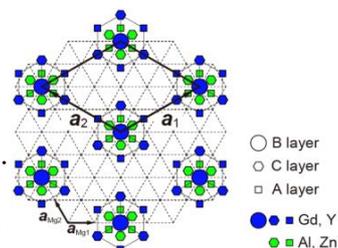


図 5 L1₂型クラスターの面内配列

【A01-2】量子線を用いた精密構造解析による LPSO 構造の材料特性発現機構の解明

構造科学の観点から、シンクロ型 LPSO 合金の強化原理機構として提案されているキック変形に関して、代表物質である一方向凝固 18R LPSO 単相 Mg₈₈Zn₆Y₉ 合金について、その基本的特徴を、圧縮応力下 AE 同時測定その場中性子回折により解明した。その場中性子回折解析から、キック変形は、降伏前に底面 a 転位が活動する前駆現象を伴う、降伏点を起点とする格子回転による底面の引張りひずみ、柱面の圧縮ひずみの緩和過程であることを見出した(図 6)。また AE(アコースティックエミッション)解析から、キック変形は、そのサイズ分布は対数正規的な分布を示し、その発生間隔は周期的である協同現象であることを見出した。以上の成果は、本合金の材料特性(特異な変形機構)を定量化したものと言える。

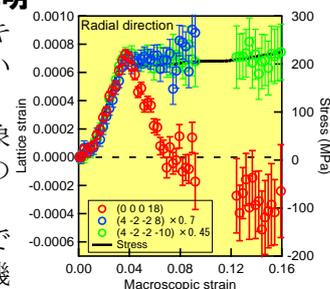


図 6 キック変形格子回転

【A01-3】第一原理に基づく計算科学による LPSO 構造の電子論と構造科学の構築

LPSO 構造の特異な構造・変形特性の発現機構を原子・電子レベルから特定することを目的に、第一原理解析により LPSO 相中の溶質規則化をもたらす支配因子を解明するとともに、Mg-LPSO 相の基礎変形特性を明らかにした。主な成果として、①LPSO 構造中の L1₂ 型クラスターの形成は、積層欠陥への溶質偏析効果に加えて、希土類元素に特有の短範囲多体相互作用によって駆動されること、②溶質濃化層におけるクラスターの面内規則配列の様態は、合金種に依存するクラスター間相互作用の性質(引力・斥力)に支配されること(領域内連携)、③Mg 相の錐面上の拡張らせん転位芯は、局所的な原子のシャッフルにより、異なる錐面間を収縮せずに低エネルギーで移動するという新奇な交差すべり機構を持つこと(図 7)を初めて見出した。

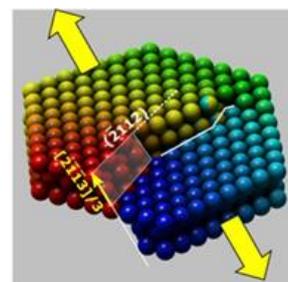


図 7 錐面らせん転位の交差すべり機構

【A01-公募・井上】アトムプローブ法による LPSO 濃化元素の Mg 中における拡散係数測定

【A01-公募・吉岡】LPSO 構造生成過程でのその場 XAFS と第一原理 XANES による重元素の挙動解析

【A01-公募・細川】X 線非弾性散乱実験による LPSO 相のダイナミクス

【A01-公募・椎原】第一原理局所解析によるシンクロ型 LPSO 構造における欠陥間相互作用の解明

【A01-公募・弓削】第一原理統計熱力学に基づく Mg 基合金 LPSO 構造の熱力学的安定性の理論計算

高空間分解能レーザーパルス局所電極型アトムプローブ (APT) 法により、低温での拡散係数を評価するための Mg 中の Zn や Y の拡散濃度プロファイルの取得に成功した(井上)。マイクロビーム X 線吸収分光法により Mg-Zn-Gd 系合金の局所構造解析を行い理論計算スペクトルとの比較から L1₂ クラスターの中心部に原子が存在することを示した(吉岡)。第一原理原子応力計算法を開発し、LPSO 相の内部応力分布を評価し、濃化層と Mg 層の間に応力ミスマッチが存在しないこと及び濃化層が高剛性の起源となることを計算から明らかとした(椎原)。LPSO 相の熱力学的安定性を第一原理計算に基づいて考察し、格子振動効果が短距離相関において無視できること及び LPSO 構造形成の可否と不規則相の原子配置の短距離秩序の異方性の間に密接な関連があり、積層欠陥導入に伴う短距離秩序の変化が L1₂ クラスター形成に対して本質的に重要であること、を一連の Mg-RE-Zn 合金に対して明らかにした(図 8)(弓削)。

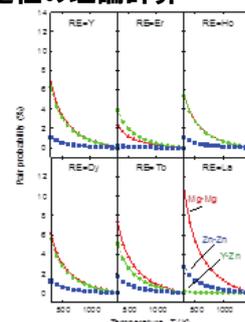


図 8 積層欠陥導入不規則相の短範囲規則化の温度・構成元素依存性

(2) A02班「形成メカニズム解明」の主な研究成果

【A02-1】原子間結合エネルギー解析によるシンクロ型 LPSO 構造形成メカニズム解明

高温の液相を含む温度領域での LPSO 相の相安定性と形成機構を計算・実験からの総合的アプローチにより調べ、①Mg-Y-Zn, Mg-Gd-Zn を中心とする LPSO と周辺相の相関係を実験状態図として確定し、計算手法による状態図および相安定計算との相互検証を行った(図 9)。②LPSO 形成機構と安定性に関する実験として、液相と LPSO の共存関係、強非平衡状態であるアモルファス固溶体からの LPSO 形成機構を放射光実験により示した。さらに①で得られた状態図の知見に基づき、原子間結合エネルギーによる構造安定性の観点から LPSO 形成過程を検討した結果、典型例である MgYZn 合金ではクラスター単体自体の構造安定性が相対的に高く、あたかもクラスターが構造単位として振舞うような階層的構造形成過程をとることが明らかとなった。

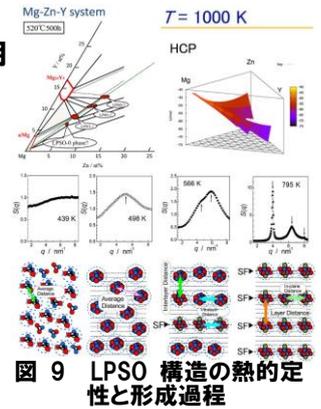


図 9 LPSO 構造の熱的安定性と形成過程

【A02-2】格子歪エネルギー解析によるシンクロ型 LPSO 構造形成メカニズム解明

濃度・構造変調による局所歪場のエネルギー評価／歪緩和解析、系のエネルギー変化の電子論的評価、変調シンクロを扱う相変態モデリング、の観点から LPSO 構造形成を検討し、hcp 中の積層欠陥形成と相分離が重畳して LPSO 構造中の fcc 構造ユニットが生成することを明らかにした。Mg-Gd-Zn 系における LPSO 構造形成の前駆現象が、低 Gd 組成では GP ゾーン型濃縮層の生成、高 Gd 組成では積層欠陥への溶質濃縮、と異なることを見出している。また、温間加工後低温時効を施した Mg-Zn-Gd 合金において、転位に Gd が濃縮した後、転位が拡張して板状の形態を持つ構造ユニットが発達すること(図 10)、温間加工後時効により LPSO 生成がより高密度かつ微細に起こることから、母相転位が LPSO 構造の優先核生成サイトであることが示された。第一原理計算における変調のシンクロ過程の検討より、既存の積層欠陥への溶質濃縮→母相中濃度場の形成と次の積層欠陥形成の誘起、という LPSO 構造形成の妥当なシナリオを導出するとともに、蛍光 X 線ホログラフィーという新規手法による LPSO 構造の規則クラスター中での Zn の局所変位の存在の検出に成功した。

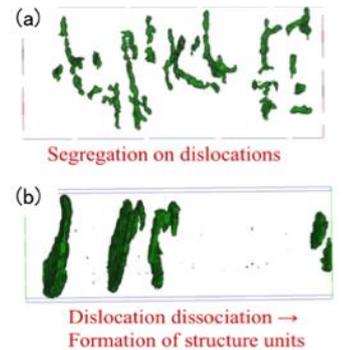


図 10 Mg-Zn-Gd 合金での転位への元素偏析と構造ユニット発達(3DAP Gd map)

【A02-3】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

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。①Mg-Al-RE 系において新奇な Order-Disorder(OD)型 LPSO 構造を、② 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、④Mg-Zn-Yb 系において新規長周期積層構造高压相(図 11)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。Mg-(Co, Ni)-Y 系 15R-/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 L1₂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。

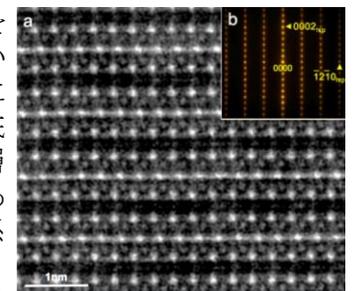


図 11 Mg-Zn-Y 合金で見出された新規 LPSO 構造高压相

【A02-公募・黒川】走査トンネル顕微鏡による遷移金属－希土類クラスターの局所配列および物性測定

【A02-公募・小山】LPSO 構造形成に対するフェーズフィールド解析

【A02-公募・佐藤】マルチスケール 3 次元解析による LPSO 構造形成メカニズムの解明

【A04-公募・石川】水素化－脱水素化による LPSO 構造の安定性評価と形成過程の解明

走査トンネル顕微鏡 (STM) を用いた Mg-Zn-Y 合金の破断面の原子構造観察では、LPSO 相内の L1₂ クラスター分布を直接検証するとともに(図 12)、クラスターの 2 次元構造の詳細な解析に成功している。また、LPSO 相において積層変化と濃度変調のシンクロ過程を記述するフェーズフィールドモデリング (PFM) 法を確立し、積層欠陥への溶質元素の濃縮過程(図 13)および板状の GP ゾーンの出現における c 軸方向に収縮歪の必要性、積層欠陥内の規則化クラスターの 2 次元配列の形成などを再現している。

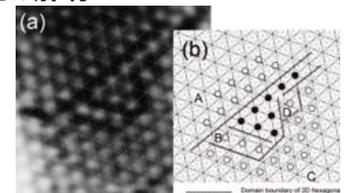


図 12 Y-Zn クラスター配列の STM 像と解析結果

3D 電子線トモグラフィーによる LPSO 構造の 3 次元形態観察では、板状の LPSO 構造のエッジ構造を解明している。LPSO 相が持つ新機能の探索として水素貯蔵機能に注目し、LPSO 単相 Mg₈₅Zn₆Y₉ 合金の水素化による構造変化の検討を行い、LPSO 相の構造変化は下記のように進行することを解明した。

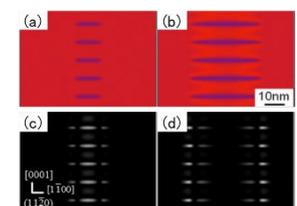
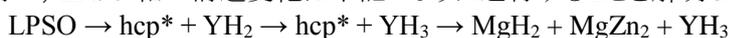


図 13 積層欠陥への偏析と弾性ひずみ場の発達 (PFM)

(3) A03班「力学特性解明と新強化原理の構築」の主な研究成果

【A03-1】観察・計測によるシンクロ/非シンクロ型 LPSO 構造の変形機構と強化原理の比較解明

導入されたキंक帯は底面を屈曲させ、これにより底面すべりが抑制され LPSO 強化の要となることが示された(図 14)。キंक帯導入によりその強度は最大 2 倍以上もの上昇を示した。またキंक帯密度と強度との関係は常温から 573K に渡る広い温度域で実験的に定量化され、キंक帯強化の定量的指針の導出につながる大きな成果を得た。キंक帯の方位や形態といったメゾスケール構造解析が進み、その幾何学的特徴と共に、その場観察によるレンズ状のキंक境界対の高速進展の様相が捉えられた。ナノスケールマーカでキंक近傍のせん断ひずみを定量化し、底面すべりの大きな寄与が示された。これらはキंकの回位モデルによる解釈を強く示唆する。加えて、LPSO 構造の高温変形機構の同定も進展し大きな変形抵抗の起源が明らかにされた。

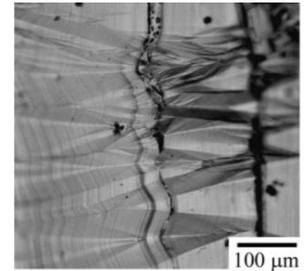


図 14 キंकによる底面の屈曲

【A03-2】マルチスケール計算力学による LPSO 構造の変形と力学特性の解明

押出加工によって LPSO 構造相にキंक帯が形成する過程と、それが巨視的な力学応答特性におよぼす影響を明らかにすることを目的に数値的な検討を進めた。その結果、LPSO 相中にある様々な初期不整合を起点として多数の転位が LPSO 相中に放出され、それが進行すると Hess/Barret 型のキंक帯に相当する転位の蓄積構造が形成される現象を、原子シミュレーションおよび、結晶塑性有限要素解析を用いて多面的に明らかにした。結果の一例を(図 15)に示す。押出加工時にはキंक帯とともにせん断帯も同時に形成され、これらの変形帯が導入されると LPSO 相に不可避であった大きな強度異方性が緩和されることを明らかにした。また、キंकの連続分布転位および回位描像がマイクロメカニクス理論から得られ、その結果は原子シミュレーションおよび結晶塑性解析の結果と基本的に一致していた。

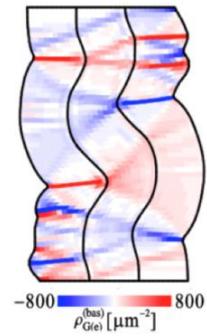


図 15 圧縮変形解析による GN 転位密度分布

【A03-3】数理形態学と階層構造科学の融合による積層構造体の力学特性発現機構の解明

回位(disclination)の概念を拡張した高次不整合理論を展開し、積層構造体のキंक変形が回位双極子で記述できることを理論的に示し、シミュレーションによってその形成メカニズムを解明した(図 16)。さらに Mg-Zn-Y 系の LPSO-Mg 合金の圧縮試験片の TEM/STEM 観察により、キंक境界近傍の格子欠陥のキャラクタリゼーションを行った結果、転位分布の支配成分は回位に対応することが明らかとなり、理論的なモデルによる予測が裏付けられた。結果を踏まえて、階層科学による力学と数理形態学による幾何学を結び付けるエネルギー論を基礎とする不安定性理論の基礎を導いた。

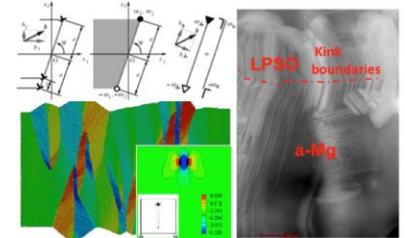


図 16 キंक変形論の確立とシミュレーションと実験による検証

【A03-公募・榎】高精度 AE 計測によるキंक変形機構の動的解析

【A03-公募・岸田】マイクロピラー圧縮試験による LPSO 相の変形機構解析

【A03-公募・多根】濃化層におけるクラスター構造を反映した LPSO 相の弾性率および熱膨張の解明

【A03-公募・高島】マイクロ材料試験による Mg-Zn-Y 合金 LPSO 相の破壊・疲労機構の解明

【A03-公募・眞山】LPSO 構造におけるキंक帯の不可逆性と加工硬化挙動への影響の解明

【A03-公募・池田】薄片 4 点曲げ試験によるキंकバンド成長のその場観察と 3 次元形態・結晶方位解析

【A03-公募・小泉】シンクロ型 LPSO 構造の疲労機構の解明

高速度カメラ撮影および AE 法によりキंक生成の瞬間を観察すると共にキंक変形に対応する AE イベントを捉えることに成功した(榎)。底面すべりを抑制する結晶方位のマイクロピラー圧縮試験により特異な変形帯の発生初期状況を捉え、その組織が変形双晶と発生したひずみを緩和するキंकおよび双晶、底面すべりにより記述できることを示した(岸田)。異方性を持つ多結晶について超音波共鳴法等により実測したデータより単結晶の弾性率を見積もり、これを第一原理計算と比較して、LPSO 構造の弾性特性が短範囲規則クラスターの安定性に支配されることを明らかにした(図 17)(多根)。方位の異なる LPSO 構造単結晶の疲労き裂伝播試験により LPSO 構造の疲労き裂伝播挙動は大きな結晶方位依存性を持つことを示した(高島)。LPSO 構造を含む合金について押出加工に対応する負荷条件下での結晶塑性有限要素法による数値解析を行い、キंकの形成へ及ぼす初期組織の影響を明らかにした(眞山)。薄片 4 点曲げ試験とその場観察によりキंकの発生と成長を捉え、キंकの成長に対して粒界方位差が影響を及ぼすことを示した(池田)。キंकが形成する条件下と底面すべりのみで塑性変形が進む条件下それぞれで繰り返し変形を行ったところ、き裂の起点はいずれも底面すべりにより形成された転位組織である可能性を示した(図 18)(小泉)。

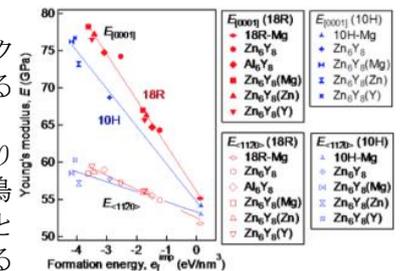


図 17 ヤング率とクラスターの相関

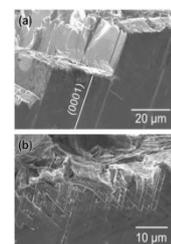


図 18 底面すべりによる亀裂

6. 研究成果の取りまとめ及び公表の状況（主な論文等一覧、ホームページ、公開発表等）（5ページ以内）

本研究課題（公募研究を含む）により得られた研究成果の公表の状況（主な論文、書籍、ホームページ、主催シンポジウム等の状況）について具体的に記述してください。記述に当たっては、本研究課題により得られたものに厳に限ることとします。

- 論文の場合、新しいものから順に発表年次をさかのぼり、研究項目ごとに計画研究・公募研究の順に記載し、研究代表者には二重下線、研究分担者には一重下線、連携研究者には点線の下線を付し、corresponding author には左に*印を付してください。
- 別添の「(2) 発表論文」の融合研究論文として整理した論文については、冒頭に◎を付してください。
- 補助条件に定められたとおり、本研究課題に係り交付を受けて行った研究の成果であることを表示したもの（論文等の場合は謝辞に課題番号を含め記載したもの）について記載したもののについては、冒頭に▲を付してください（前項と重複する場合は、「◎▲・・・」と記載してください。）。
- 一般向けのアウトリーチ活動を行った場合はその内容についても記述してください。

(1) 学術的研究成果の公表の状況

1) 学術的成果公表状況の概要

領域研究開始からこれまでの4.5年間に得た学術的成果の数を表1に示す。

【学術論文】学術論文総数は273報（内、プロシーディングス論文93報）であった。シンクロ型LPSO構造物質に直接関連する論文は227報（79報）であり、本領域研究を進めるにあたり重要な知見を提供した間接関連論文は46報（14報）であった。領域内の複数の研究室間の連携研究によって生まれた融合研究論文は106報（実験と計算の連携24報、構造解析と力学特性発現機構解明の連携38報、構造解析と形成機構解明の連携41報、構造解析と新規機能探索の連携3報）と全体の約40%に達しており、積極的な研究交流がなされたことが伺える。

【学会発表・受賞等】学会発表は総計1097件に達しており、その内367件が基調・招待講演となっている。受賞も158件を数え、内126件が若手研究者および指導学生に授与されたものであった。

【知的財産】特許の出願件数は42件に達しており、成分特許、構造特許といった基本特許に加え、プロセス特許についても積極的な出願を行うことで、シンクロ型LPSO構造物質群の戦略的な知的財産確保を行なっている。

表1 これまでの学術的成果

業績種別		件数
学術論文	直接関連論文	227
	間接関連論文	46
解説・総説		53
著書		15
学会発表	国際	293
	国内	804
基調・招待講演	国際	143
	国内	224
受賞		158
特許		42

2) 学術論文（シンクロ型LPSO構造に直接的に関連する論文227報、間接的に関連する論文46報：以下、主要40報を抜粋する。）

【A01-1】

- ◎▲*Crystal structures of highly-ordered long-period stacking-ordered phases with 18R, 14H and 10H-type stacking sequences in the Mg-Zn-Y system”, *Kvosuke Kishida, Kaito Nagai, Akihide Matsumoto, Akira Yasuhara, Haruyuki Inui, Acta Materialia, Vol.99, (2015), pp. 228-239.
- ▲*The most stable crystal structure and the formation processes of an order-disorder (OD) intermetallic phase in the Mg-Al-Gd ternary system”, *K. Kishida, H. Yokobayashi, H. Inui, Philosophical Magazine, Vol.93, No. 21 (2013), pp. 2826-2846.
- ▲*The structure of long period stacking/order Mg-Zn-RE phases with extended non-stoichiometry ranges”, D. Egusa and *E. Abe, Acta Materialia, Vol.60, Issue 1 (2012), pp.166-178.
- ◎▲*Polytypes of long-period stacking structures synchronized with chemical order in a dilute Mg-Zn-Y alloy”, *E. Abe, A. Ono, T. Itoi, M. Yamasaki, Y. Kawamura, Philosophical Magazine Letters, Vol.91, No. 10 (2011), pp.690-696.
- ◎▲*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”, H.Yokobayashi, *K. Kishida, H. Inui, M.Yamasaki, Y.Kawamura, Acta Materialia, Vol. 59, Issue 19 (2011), pp. 7287-7299.

【A01-2】

- ▲*Development of a compact compression test stage for synchrotron radiation micro-Laue diffraction measurements of long-period stacking-ordered phases in Mg-Zn-Y alloys”, *S. Kimura, K. Kajiwar, T. Shimura, Jpn. J. Appl. Phys., Vol.55, No. 3, (2016), 038002.
- ◎▲*In-Situ Neutron Diffraction Study on Tensile Behavior of LPSO Mg-Zn-Y Alloys”, *K. Aizawa, W. Gong, S. Harjo, J. Abe, T. Iwahashi, T. Kamiyama, Materials Transactions, Vol.54, No.7 (2013), pp. 1083-1086.
- ◎▲*Neutron Diffraction on LPSO Structure in Mg-Zn-Y Alloys”, W. Gong, *K. Aizawa, S. Harjo, J. Abe, T. Iwahashi, T. Kamiyama, Materials Transactions, Vol.54, No.6 (2013), pp.974-976.

【A01-3】

- ▲*Long-range intercluster interactions of solute nanoprecipitates in Mg-Y alloys: A first-principles study”, K. Matsubara, *H. Kimizuka, S. Ogata, Journal of Alloys and Compounds, Vol.657, (2016), pp. 662-670.
- ▲*Atomistic study on the cross-slip process of a screw dislocation in magnesium”, *M. Itakura, H. Kaburaki, M. Yamaguchi, T. Tsuru, Modelling and Simulation in Materials Science and Engineering, Vol.23, (2015), pp.065002-1-19.
- ◎▲*Nanoclusters first: a hierarchical phase transformation in a novel Mg alloy”, *H. Okuda, M. Yamasaki, Y. Kawamura, M. Tabuchi, H. Kimizuka, Scientific Reports, Vol.5, (2015), pp.14186-1-6.
- ◎▲*Effects of stacking sequence and short-range ordering of solute atoms on elastic properties of Mg-Zn-Y alloys with long-period stacking ordered structures”, *M. Tane, H. Kimizuka, K. Hagihara, S. Suzuki, T. Mayama, T. Sekino, Y. Nagai, Acta Materialia, Vol.96, (2015), pp.170-188.

【A02-1】

- ◎▲*In-situ measurement on stability of long-period stacking ordered structures in Mg85Y9Zn6 alloys during heating examined by multicolor synchrotron”, *H. Okuda, T. Horiuchi, H. Tanaka, M. Yamasaki, Y. Kawamura, S. Kimura, Scripta Materialia, Vol.75, (2014), pp.66-69.
- ◎▲Evolution of long-period stacking order structures on annealing as-cast Mg85Y9Zn6 alloy ingot observed by synchrotron radiation small-angle scattering”, *H. Okuda, T. Horiuchi, T. Tsukamoto, S. Ochiai, M. Yamasaki and Y. Kawamura, Scr. Mater. 68(2013) 575.
- ▲*Experimental Study on Phase Equilibria in the Vicinity of X, W and H Phases in the Mg-Zn-Y Ternary System”, A. Hamaya, T. Horiuchi, Y. Oohira, S.Minamoto, *S. Miura, N. Sakaguchi, Materials Transactions, Vol.54, (2013), pp.641-646..
- “Phase stability of long-period stacking structures in Mg-Y-Zn: A first-principles study”, *S. Iikubo, K. Matsuda, and H. Ohnishi, Phys. Rev. B 86 (2012) 054105.

【A02-2】

- [17] ©“First principles calculations of solute sweeping and stacking fault in Mg-Zn-Y alloy”, Y. Sakamoto, C. Shirayama, Y. Yamamoto, R. Kubo, M. Kiyohara, *S. R. Nishitani, Mater. Trans., Vol.56, No.7, (2015), pp. 933-936.
- [18] ©▲“Local Strain Fields of LPSO in Mg-based Ternary Alloys”, S. Matsunaga, *T. Kiguchi, K. Sato, T.J. Konno, Mater. Trans., Vol.56, (2015), pp. 923-927.
- [19] ▲“On the Elastic Accommodation between the Structural Units in the LPSO Structures”, X. Gu, *T. Furuhashi, Materials Transactions, 55, (2014), pp.1662-1667.
- [20] ▲“Phase-Field Simulation of Spinodal Decomposition on Metastable Hexagonal Close-Packed Phase in Magnesium-Yttrium-Zinc Alloy”, K. Narita, *T. Koyama, Y. Tsukada, Materials Transactions, Vol.54, No. 5 (2013), pp. 661-667.
- [21] ©▲ “First Principles Calculations of Solute Ordering in Mg-Zn-Y Alloys” , Yosuke Yamamoto, Yuichi Sakamoto, Yoshihiro Masaki and *Shigeto R. Nishitani, Mater. Trans., 54 (2013), pp. 656-660.

【A02-3】

- [22] ▲“Quantitative evaluation of creep strain distribution in an extruded Mg-Zn-Gd alloy of multimodal microstructure”, Y. Jono, *M. Yamasaki, Y. Kawamura, Acta Materialia, 82, (1), (2015), pp.198-211.
- [23] ▲“Crystallographic classification of kink bands in an extruded Mg-Zn-Y alloy using intragranular misorientation axis analysis”, *M.Yamasaki, K. Hagihara, S. Inoue, J. P. Hadorn, Y. Kawamura, Acta Materialia Vol.61(2013), pp.2065-2076.
- [24] ©“Effect of Multimodal Microstructure Evolution on Mechanical Properties of Mg-Zn-Y Extruded Alloy”, *M. Yamasaki, K. Hashimoto, K. Hagihara, Y. Kawamura, Acta Materialia Vol.59, No.9 (2011) pp. 3646-3658.
- [25] “Corrosion and Passivation Behavior of Mg-Zn-Y-Al Alloys Prepared by Cooling Rate-controlled Solidification”, *M. Yamasaki, S. Izumi, Y. Kawamura, H. Habazaki, Applied Surface Science, Vol.257, No.19 (2011) pp.8258-8267.

【A03-1】

- [26] ▲“Orientation dependence of the deformation kink band formation behavior in Zn single crystal”, *K. Hagihara, T. Mayama, M. Honnami, M. Yamasaki, H. Izuno, T. Okamoto, T. Ohashi, T. Nakano, Y. Kawamura, International Journal of Plasticity, Vol.77, (2016), pp.174-191.
- [27] “Crystallographic nature of deformation bands shown in Zn and Mg-based long-period stacking ordered (LPSO) phase”, K. Hagihara, M. Yamasaki, M. Honnami, H. Izuno, M. Tane, T. Nakano, Y. Kawamura, Philosophical Magazine, 95(2) (2015) 132-157.
- [28] “Crystal plasticity analysis of development of intragranular misorientations due to kinking in HCP single crystals subjected to uniaxial compressive loading”, *T. Mayama, T. Ohashi, Y. Tadano, K. Hagihara, Materials Transactions, Vol.56 (2015), pp.963-972.
- [29] ▲“High-temperature compressive deformation behavior of Mg97Zn1Y2 extruded alloy containing a long-period stacking ordered (LPSO) phase”, *K. Hagihara, A. Kinoshita, Y. Fukusumi, M. Yamasaki, Y. Kawamura, Materials science and Engineering A, vol.560(2013), pp.71-79.
- [30] ©“Microstructural factors affecting the deformation behavior of Mg12ZnY LPSO-phase alloys”, *K. Hagihara, A. Kinoshita, Y. Fukusumi, M. Yamasaki, Y. Kawamura, Materials Science Forum Vols. 706-709, (2012), pp.1158-1163.

【A03-2】

- [31] “Three-dimensional FE Analysis Using Homogenization Method for Ductile Polymers Based on Molecular Chain Plasticity Model Considering Craze Evolution”, H. Hara, *K. Shizawa, Advanced Structured Materials, Vol.64 (2015), pp.97-119.
- [32] “Microscopic mechanism of plastic deformation in a polycrystalline Co-Cr-Mo alloy with a single hcp phase”, H. Matsumoto, *Y. Koizumi, T. Ohashi, B.S. Lee, Y. Li, A. Chiba, Acta Materialia, Vol.64, (2014), pp.1-11.
- [33] ▲“Modeling and Simulation on Ultrafine-graining Based on Multiscale Crystal Plasticity Considering Dislocation Patterning”, Y. Aoyagi, R. Kobayashi, Y. Kaji, *K. Shizawa, International Journal of Plasticity, 47 (2013) 13-28.
- [34] ©“Crystal plasticity analysis of texture development in magnesium alloy during extrusion”, *T. Mayama, M.Noda, R.Chiba, M.Kuroda, International Journal of Plasticity Vol.27, (2011), pp.1916-1935.

【A03-3】

- [35] ▲“Analysis of kink deformation and delamination behavior in layered ceramics”, X.-W. Lei, *A. Nakatani, Journal of the European Ceramic Society, Volume36.Issue9 2016
- [36] ▲“A deformation mechanism for ridge-shaped kink structure in layered solids”, X.-W. Lei, *A. Nakatani, Transaction of the American Society of Mechanical Engineers (ASME) Journal of Applied Mechanics, Vol.82, (2015), pp.071016(1-6).
- [37] ©▲“Analysis of Kink Boundaries in Deformed Synchronized Long-Period Stacking Ordered Magnesium Alloys”, H. Gao, *K. Ikeda, T. Morikawa, K. Higashida, H. Nakashima, Materials Letters, Vol.149, (2015), pp.30-33.

【公募班】

- [38] ▲“Thermodynamic stability of Mg-Y-Zn ternary alloys through first-principles”, R. Tanaka, *K. Yuge, Intermetallics, Vol.72, (2016), pp.25-29.
- [39] ©▲“Microfracture Behaviour of Extruded Mg-Zn-Y Alloys Containing Long-Period Stacking Ordered Structure at Room and Elevated Temperatures”, *Y. Mine, H. Yoshimura, M. Matsuda, K. Takashima, Y. Kawamura, Mater. Sci. Eng. A, 570 (2013), pp. 63-69.
- [40] ▲“Elastic properties of an Mg-Zn-Y alloy single crystal with a long-period stacking-ordered structure”, *M. Tane, Y. Nagai, H. Kimizuka, K. Hagihara, Y. Kawamura, Acta Materialia, Vol.61, (2013), pp.6338-6351.

3) 解説・総説 (総数 53 件: 以下主要 10 件を示す)

- [1] 航空機分野にマグネシウム新時代の到来 -KUMADAIマグネシウム合金-, 河村能人, アルトピア, (2013年8月), pp.18-25.
- [2] マルチスケールおよびマルチフィジックス結晶塑性解析, 志澤一之, ふえらむ, vol.119, No.11, (2014), pp.835-840.
- [3] 次世代の高強度・高耐熱性マグネシウム合金, 河村能人, 自動車の軽量化テクノロジー, (2014年5月), pp.41-51.
- [4] 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, 岸田恭輔, 乾晴行, 顕微鏡 Vol.49, (2015), pp.181-189.
- [5] シンク型 LPSO 構造相の塑性変形挙動, 萩原幸司, 東田賢二, まてりあ Vol.54, (2015), pp.60-64.
- [6] マグネシウム合金の航空機への適用, 河村能人, 平成 27 年度航空機等関連動向, (2016)
- [7] 金属材料における変形組織の不均質性 -シンクバンドを中心にして-, 東田賢二, 森川龍哉, Hongye Gao, 塑性と加工, vol.54, no.633, (2013), pp.877-880.
- [8] ミクロスケールの塑性力学, 大橋鉄也, 黒田充紀, 日本塑性加工学会誌, vol.54, pp.901-905.
- [9] 固相材料分野における分子動力学法の基礎と応用, 君塚肇, 金属 Vol.85, (2015), pp.943-948.
- [10] 最先端電子顕微鏡法-どこまで見えるようになったのか?, 阿部英司, 化学工学 Vol.79, No. 8(2015), pp.623-626.

4) 著書 (総数 15 件: 以下主要 10 件を示す)

- [1] 機械実用便覧 改訂第7版, 中谷彰宏 (日本機械学会編, 分担), 丸善, 総 1109 ページ, (2011), pp.13-25.
- [2] 材料設計計算工学 計算組織学編—フェーズフィールド法による組織形成解析”, 小山敏幸, 内田老鶴園, (2011).
- [3] 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, 山崎倫昭, 株式会社シーエムシー出版, (2012), pp.131-140.
- [4] 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, 河村能人, 株式会社シーエムシー出版, (2012), pp.13-21.
- [5] 材料組織弾性学と組織形成”, 小山敏幸, 塚田祐貴, 内田老鶴園, (2012).
- [6] (放射光を用いた) X線反射率法”, 木村滋, 坂田修身, 「薄膜の評価技術ハンドブック」第4章第3節第1項, 150-152, テクノシステム, 東京, (2013).
- [7] フェーズフィールド法入門, 丸善, 小山敏幸, 高木知弘(2013).
- [8] XAFS/EELS による局所構造解析テクニック, 第3章 EELS による局所構造解析のポイント第 1-2 節, 情報機構, 木口賢紀(2014).
- [9] 鉄鋼便覧第5版 第3巻材料の組織と特性 第2編 10・5「析出」, 日本鉄鋼協会, 古原 忠, (2014), pp.122-124.
- [10] 3D 材料組織・特性解析の基礎と応用, 内田老鶴園, 新家光雄(編), 足立吉隆, 小山敏幸(著)(2014).

5) 国内・国際学会発表 (総数 1097 件, 基調講演・招待講演含まず: 詳細省略)

6) 基調講演・招待講演 (総数 367 件, うち若手研究者によるもの 99 件: 以下主要 30 件を示す)

- [1] 【招待講演】“我が国で開発された LPSO 型マグネシウム合金”, 河村能人, 軽金属学会 60 周年記念大会, 2011.9.12-13.
- [2] 【基調講演】“Nanocrystalline Mg-Zn-Y-Al Alloys with Long Period Stacking Ordered Structure”, Y. Kawamura, THERMEC', 2011, 2011.8.1-5.
- [3] 【招待講演】“Relation between the microstructure and mechanical properties of the Mg12ZnY LPSO-phase alloy”, K. Hagihara, A. Kinoshita, Y. Fukusumi, M. Yamasaki, Y. Kawamura, 4th Asian symposium on Magnesium alloys (ASMA4), 2011.8.2-4.
- [4] 【招待講演】“Crystal Structure and Plastic Deformation of Long-Period Stacking-Ordered Phases in the Mg-TM-RE Ternary Systems”, K. Kishida, H.

- Yokobayashi, A. Inoue, H. Inui, 2012 MRS Fall Meeting, 2012.11.25-30.
- [5] 【基調講演】"Crystal Structure and Deformation of Long Period Stacking Ordered Intermetallic Phases in the Mg-Al-Gd System", H. Inui, K. Kishida, H. Yokobayashi, A. Takahashi, Materials Science Engineering (MSE) 2012), 2012.9.25-27.
- [6] 【基調講演】"Imaging light-to heavy-atoms in complex compounds by advanced STEM", Eiji Abe, The XXXIII Annual Meeting of the Electron Microscopy Society of India, 2012.7.1-4.
- [7] 【基調講演】"Atomistic Study on Controlling Factors of Local Chemical Order in Mg-Based LPSO Structures", H. Kimizuka, M. Fronzi, K. Matsubara, S. Ogata, The 5th International Symposium on Designing, Processing and Properties of Advanced Engineering Materials (ISAEM-2012), 2012.11.5-8.
- [8] 【招待講演】"Phase-Field Simulation of Metastable Spinodal Decomposition in Mg-Y-Zn Alloy", T. Koyama, K. Narita, Y. Tsukada, The 5th International Symposium on Designing, Processing and Properties of Advanced Engineering Materials (ISAEM-2012), 2012.11.5-8.
- [9] 【基調講演】"Non-Flammable Magnesium Alloys with High Strength", Y. Kawamura, TMS Annual Meeting & Exhibition Magnesium Technology 2013, 2013.3.3-7.
- [10] 【基調講演】"High Strength Magnesium Alloys Strengthened by LPSO Phase", Y. Kawamura, ISAEM-2012, 2012.11.5-8.
- [11] 【基調講演】"Crystallographic features of kink bands in Mg-Zn-Y alloys", M. Yamasaki, K. Hagihara, Y. Kawamura, The 7th Pan-Yellow Sea Rim International Symposium on Magnesium Alloys (YSR7), 2012.10.13-15.
- [12] 【基調講演】"Materials Science on Synchronized LPSO Structure", Y. Kawamura, International Symposium on Long-Period Stacking Ordered Structure and Its Related Materials 2012 (LPSO2012), 2012.10.1-3.
- [13] 【基調講演】"Atomistic Study of Kinking Deformation and Dislocation Activities in Long-Period Stacking Ordered Phases", R. Matsumoto, S. Kamigaki, M. Uranagase, N. Miyazaki, The 5th International Symposium on Designing, Processing and Properties of Advanced Engineering Materials (ISAEM-2012) and The 3rd International Symposium on Advanced Materials Development and Integration of Novel Structural Metallic and Inorganic Materials (AMDI-3), 2012.11.3-8.
- [14] 【招待講演】"長周期積層構造型マグネシウム合金の開発", 河村能人, 第54回本多記念賞, 第10回本多フロンティア賞及び, 第34回本多記念研究会奨励賞記念講演, 2013.5.31.
- [15] 【基調講演】"Structure and mechanical properties of long period stacking ordered intermetallic phases in the Mg-Al-Gd systems", H. Inui, K. Kishida, European Congress and Exhibition on Advanced Materials and Processes (EUROMAT 2013), 2013.9.8-13.
- [16] 【基調講演】"High Strength Magnesium Alloys Strengthened by Synchronized LPSO Phase", Y. Kawamura, Magnesium Workshop Madrid 2013, 2013.5.21-24.
- [17] 【基調講演】"Flammability of LPSO Magnesium Alloys", Y. Kawamura, 5th Asian Symposium on Magnesium Alloys, 2013.10.6-8.
- [18] 【基調講演】"Finite deformation modeling of crystalline defects in hyper-elastic material", A. Nakatani, M. Akita, 13th International Conference of Fracture (ICF13), 2013.6.16-21.
- [19] 【基調講演】"Disclination plasticity modeling for microscopic structure", A. Nakatani, University of Puerto Rico Mayaguez Campus, Faculty of Arts and Sciences, Department of Mathematical Sciences, 2014.1.10.
- [20] 【招待講演】"Thermodynamic Properties of HCP Phase in Mg-based Ternary Systems", S. Iikubo, H. Ohtani, 6th Asian Symposium on Magnesium Alloys, 2014.12.20-23.
- [21] 【招待講演】"Early stage of structure change in synchronized long-range stacking ordered structures in Mg-Y-Zn and related alloy systems", H. Okuda, H. Tanaka, M. Yamasaki, Y. Kawamura, S. Kimura, TMS2015, 2014.3.15-20.
- [22] 【基調講演】"Ongoing Research for the LPSO-typed Mg-Zn-Rare Earth Alloys in Japan", M. Yamasaki, K. Hagihara, Y. Kawamura, The 6th Asian Symposium on Magnesium Alloys (ASMA6), 2014.12.20-22.
- [23] 【招待講演】"世界が注目！ 軽い・強い・燃え難い KUMADAI マグネシウム合金", 河村能人, メカトロテックジャパン, 2015, 2015.10.23.
- [24] 【基調講演】"Structure and stability of the LPSO-Mg alloys – Are they stable enough?", E. Abe, The 10th International Conference on Magnesium Alloys and Their Applications (Mg2015), 2015.10.11-16.
- [25] 【基調講演】"A New Era of Electron Microscopy for Materials Science", E. Abe, 6th ISAJ (Indian Scientists Association in Japan) Symposium, 2015.12.4.
- [26] 【招待講演】"Hierarchical Phase Transformation of Long Period Stacking Ordered Structures in MgYZn alloys", H. Okuda, H. Tanaka, M. Yamasaki, Y. Kawamura, H. Kimizuka, M. Tabuchi, International Workshop on Multiscale Computation on Mechanical, 2014.11.10-11.
- [27] 【基調講演】"Importance of Phase Transformations in Development of Modern High Strength Steels", Tadashi Furuhashi, Goro Miyamoto, Nagoya Kamikawa, PTM2015, 2016.10.13-14.
- [28] 【基調講演】"LPSO Structure and LPSO-type High Strength Magnesium Alloys", Y. Kawamura, The 10th International Conference on Magnesium Alloys and Their Applications (Mg2015), 2015.10.13.
- [29] 【基調講演】"Atomistic study of kink deformation mechanisms of the long-period stacking-ordered phase", R. Matsumoto, M. Uranagase, Advanced Materials Week-2015, 2015.6.17-21.
- [30] 【基調講演】"Stability analysis of discrete breathers in carbon nanotube", Y. Doi, A. Nakatani, International Workshop "Discrete Breathers in Crystals", 2015.9.

7) 受賞（総数 158 件, うち若手研究者の受賞 41 件, 学生の受賞 85 件: 以下主要 15 件を示す）

- [1] IMS 2011 International Metallographic Contest, First Place, Class 3 Electron Microscopy - Transmission and Analytical "Ordering of Gd Atoms in the Quadruple Gd-enriched Layers in the Ternary Mg-Al-Gd LPSO Phase", K. Kishida, H. Yokobayashi, H. Inui, M. Yamasaki, Y. Kawamura.
- [2] 日本顕微鏡学会 第 57 回 学会賞(顕微鏡賞), 阿部英司
- [3] 科学技術への顕著な貢献 2012 【研究部門】(ナイスステップな研究者), "温室効果ガス低減に寄与する不燃性 Mg 合金開発に貢献", 河村能人
- [4] 第 60 回 日本金属学会 論文賞 (力学物性部門), K. Hagihara, Y. Sugino, Y. Fukusumi, Y. Umakoshi and T. Nakano
- [5] 日本機械学会 材料力学部門業績賞, 大橋鉄也
- [6] 本多記念会 第 10 回本多フロンティア賞, "長周期積層構造型マグネシウム合金の開発", 河村能人
- [7] 日本金属学会 第 10 回 村上奨励賞, 萩原幸司
- [8] 第 54 回 日本金属学会 谷川・ホリス賞, 古原 忠
- [9] 日本クリエイション大賞 2014 日本クリエイション賞, "常識を覆す不燃マグネシウムの開発", 河村能人
- [10] 第 16 回 学術功労賞, 河村能人
- [11] 日本マグネシウム協会 奨励賞, 萩原幸司
- [12] 日本金属学会 第 73 回功績賞 力学特性部門, 岸田恭輔
- [13] 第 14 回 軽金属学会 躍進賞, 糸井貴臣
- [14] 日本金属学会 第 74 回 功績賞 (力学特性部門), 萩原幸司
- [15] 日本マグネシウム協会 奨励賞, "マグネシウムの力学特性に係わる数値解析的研究", 眞山 剛

8) 特許（総数 42 件: 以下主要 5 件を示す）

- [1] 特願 2011-221330, マグネシウム合金及びその製造方法, 山崎倫昭, 河村能人
- [2] 特願 2012-034450, マグネシウム合金材の製造方法, 河村能人, 野田雅史
- [3] 特願 2013-084866, 難燃マグネシウム合金及びその製造法, 河村能人, 金鍾鉉
- [4] 特願 2014-114670, マグネシウム合金ワイヤ及びその製造方法, 河村能人, 林 洋平, 黒木英雄
- [5] US 2015/0090374, マグネシウム合金及びその製造方法, 河村能人, 山崎倫昭

9) 報道など（総数 113 件, うち新聞発表 82 件, TV 番組 10 件, WEB3 件, 機関誌 9 件, 一般雑誌 7 件, 書籍 1 件, 専門誌 1 件: 以下主要 10 件を示す）

- [1] 【新聞】マグネシウム研究推進 熊本大が国際拠点開設, 日本経済新聞, 2011.11.23.
- [2] 【雑誌】東海道新幹線月刊誌「WEDGE」P82-84, 人にやさしい技術 強くても燃えないマグネシウム, ウェッジ編集部, 2013.2.26.
- [3] 【新聞】米航空局燃焼試験クリア 熊本大開発マグネシウム合金 航空機材実用化へ期待大, 毎日新聞, 2013.4.19.
- [4] 【新聞】熊本 Mg 実用化第 1 号 大阪のメーカー ねじ用素材に採用 不ニライトメタル 来春から供給へ, 熊本日日新聞, 2013.9.25.
- [5] 【新聞】拓く研究者「金属材料の強度・弾性 追及」多根正和, 日刊工業新聞, 2013.10.9.
- [6] 【新聞】高硬度・耐熱性のマグネシウム合金 熊本大発, 実用化に一步 まがネジ製品化 基本構造解明も進む, 日経産業新聞, 2013.10.16.
- [7] 【新聞】マグネシウム合金 航空機利用へ 熊本大とボーイング共同研究, 毎日新聞, 2014.10.24.
- [8] 【新聞】直径 0.05mm のワイヤ作製 熊本大と東邦金属 マグネシウム合金加工, 日刊工業新聞, 2015.8.21.
- [9] 【新聞】原子配列の形成過程解明 京都大と熊本大, 熊本日日新聞, 2015.10.7.
- [10] 【新聞】マグネシウム合金 医療器具を開発へ 県と熊本大 2 社が協定, 読売新聞, 2015.10.20.

(2) 領域の公開・広報活動

1) 領域のホームページとニュースレター

・領域ホームページ

日本語版: <http://www.mg-lpso.org/>, 英語版: <http://www.mg-lpso.org/eng/index.html>

・ニュースレター

第1号(2012年12月発行), 第2号(2014年2月発行), 第3号(2015年1月発行), 第4号(2016年3月発行)

2) 論文特集号

- [1] Materials Transactions, Vol.54, No.5 (2013), Special issue "Long-Period Stacking Ordered Structure and Its Related Materials I". (13 報収録)
- [2] Materials Transactions, Vol.56, No.7 (2015), Special issue "Long-Period Stacking Ordered Structure and Its Related Materials II". (12 報収録)
- [3] Materials Science and Engineering R: Report (IF 19.75), Innovation of Magnesium Alloys by Synchronized Structure. Y. Kawamura, E. Abe, H. Okuda and K. Higashida. (依頼受諾済・執筆中)
- [4] 日本金属学会会報 までりあ, 第54巻, 第2号(2015), ミニ特集「シンクロ型 LPSO 構造の材料科学」
- [5] 金属, 第86巻, 第6号(2016), 特集「LPSO 型マグネシウム合金の研究開発動向」

3) 異分野学術交流を目指した国内学会・シンポジウムなど (開催予定も含めて総数 31 件)

表 2 シンクロ型 LPSO 構造を主なテーマとするシンポジウム等

年度	開催日	実施内容	開催場所	備考
H23	H24. 1. 19-20	第3回 MLF シンポジウム	いばらき量子ビームセンター・茨城	実行委員
	H24. 3. 19	日本学術振興会 第176委員会加工プロセスによる材料新機能発現 第20回研究会「高強度 Mg 合金の力学特性と変形機構」	東京理科大学・東京	企画
H24	H24. 9. 11	日本機械学会 年次大会ワークショップ「シンクロ型 LPSO 構造の力学特性と高強度 Mg 合金の変形機構」	金沢大学・金沢	企画
	H24. 9. 22-24	日本機械学会 M&M2012 材料力学カンファレンスオーガナイズドセッション「HCP 金属の実験力学と変形機構」	愛媛大学・松山	企画
	H24. 11. 10	軽金属学会 秋季大会テーマセッション「シンクロ型 LPSO 構造の材料科学」	千葉工業大学・千葉	企画
	H25. 1. 12	日本放射光学会 年会放射光科学合同シンポジウム JSR13 企画講演「新しい軽量 Mg 合金研究の放射光による展開—構造・特性・機能」	名古屋大学・名古屋	企画
	H25. 1. 28	日本金属学会 分科会シンポジウム「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」	京都大学東京オフィス・京都	企画
	H24. 3. 26	日本物理学会 領域10シンポジウム「Mg 基 LPSO 構造における面欠陥と溶質原子の相互作用」	広島大学・広島	企画
	H25. 3. 26	GISAS2012 (第15回小角散乱国際会議サテライト会議) 微小角入射小角散乱法 (GISAS), 国際ワークショップ	京都工繊大・京都	企画
H25. 3. 27-29	日本金属学会 公募シンポジウム「シンクロ型 LPSO 構造の科学と工学」	東京理科大学・東京	企画	
H25	H25. 4. 22	熊本大学 MRC シンポジウム「次世代の航空宇宙産業と新材料」	メルパルク熊本・熊本	共催
	H25. 7. 9	構造材料元素戦略研究拠点シンポジウム「構造材料研究プロジェクトの新展開」	京都大学・京都	共催
	H25. 9. 8-11	日本機械学会 年次大会ワークショップ「シンクロ型 LPSO 構造の力学特性と高強度 Mg 合金の変形機構(その2)」	岡山大学・岡山	企画
	H25. 9. 13	電子顕微鏡による材料科学研究の最先端	熊本大学 MRC・熊本	共催
	H25. 10. 11-14	日本機械学会 M&M2013 材料力学カンファレンスオーガナイズドセッション「HCP 金属の実験力学と変形機構」	岐阜大学・岐阜	企画
	H25. 11. 2-4	日本機化学会 第26回計算力学講演会	佐賀大学・佐賀	企画
	H25. 11. 18-19	東北大学金属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」	東北大学金属研究所・仙台	企画
H25. 11. 25-26	日本学術会議 材料工学連合講演会 OS「常識を覆す新しい構造用金属材料の科学」	京都テラス・京都	企画	
H26. 3. 18-19	日本機化学会 関西支部第89期定時総会講演会 OS「マグネシウム合金の変形とメカニズム」	大阪府立大学・大阪	企画	
H26. 3. 21-23	日本金属学会 公募シンポジウム「塑性異方性の強い結晶性材料のキンク変形ダイナミクスと強化機構」	東京工業大学・東京	企画	
H26	H26. 7. 25	応用物理学会 第42回薄膜・表面物理セミナー「構造物性解明に向けたマイクロ〜マクロ計測の最前線」	東京大学・東京	共催
	H26. 9. 24-26	日本金属学会 公募シンポジウム「シンクロ型 LPSO 構造の形成メカニズム」	名古屋大学・名古屋	企画
	H26. 10. 27-28	日本学術会議 材料工学連合講演会 OS「我が国で開発された LPSO 型マグネシウム合金の基礎と応用」	京都テラス・京都	企画
	H26. 11. 15-16	軽金属学会 秋季大会テーマセッション「シンクロ型 LPSO 構造の材料科学 II」	東京工業大学・東京	企画
	H27. 3. 18-20	日本金属学会 公募シンポジウム「シンクロ型 LPSO 構造の構造科学」	東京大学・東京	企画
H27	H27. 9. 8	日本金属学会 キンク研究会	福岡市赤煉瓦文化館・福岡	共催
	H27. 9. 16-18	日本金属学会 公募シンポジウム「キンク変形ダイナミクス」	九州大学・伊都キャンパス	企画
	H28. 2. 19-20	日本金属学会 キンク研究会	九州大学・筑紫キャンパス	共催
	H28. 3. 11	日本機化学会「高強度・高延性・軽量を目指して〜バルクナノ・LPSO 合同成果報告〜」	東北大学東京分室・東京	企画
H28	H28. 5. 28-29	軽金属学会 秋季大会テーマセッション「シンクロ型 LPSO 構造の材料科学 III」	大阪大学・吹田キャンパス	企画
	H28. 9. 21-23	日本金属学会 公募シンポジウム「シンクロ型 LPSO 構造に関する材料科学の新展開」 予定	大阪大学・豊中キャンパス	企画

4) 国際交流を目指した国際会議など (開催予定も含めて総数 18 件, うち主催 4 件, 共催 4 件)

表 3 国際交流

年度	開催日	実施内容	開催場所	備考
H23	H23.8.8	MagNET Workshop on Deformation Mechanisms in Magnesium Alloys	University of Waterloo, Waterloo, Canada	実行委員
	H23.11.2-4	4th Asian Symposium on Magnesium Alloys (ASMA4)	Paradise Hotel, Busan, Korea	実行委員
	H23.11.22-24	YSR6&7th KITECH-KU Symposium On BMG and Advanced Materials	Sejong Hotel, Seoul, Korea	実行委員
	H23.11.28-30	International Symposium on Materials Science and Innovation for Sustainable Society (ECO-Mates 2011)	Osaka University, Osaka, Japan	実行委員
	H24.3.1	International Symposium for Kick-off ofMRC in Kumamoto University	Kumamoto University, Kumamoto, Japan	共催
	H24.3.11-15	TMS Symposium in Memory of Patrick Veysiere: Understanding the Mechanisms Controlling Plastic Flow	Walt Disney World, Orland, USA	実行委員
H24	H24.5.27-31	12th International Conference on Creep and Fracture of Engineering Materials and Structures (Creep 2012)	Kyoto TERRSA, Kyoto, Japan	実行委員
	H24.10.1-3	International Symposium on Long-Period Stacking Ordered Structure and Its Related Materials (LPSO2012)	Sapporo Convention Center, Sapporo, Japan	主催
	H24.10.14-17	The 7th Pan-Yellow Sea Rim (YSR7) International Symposium on Magnesium Alloys	IMR CAS, Shenyang, China	実行委員
H25	H25.8.4-9	The 8th Pacific Rim International Congress on Advanced Materials and Processing (PRICM-8)	Hilton Waikoloa, Waikoloa, Hawaii	実行委員
	H25.10.6-8	5th Asian Symposium on Magnesium Alloys (ASMA5)	Toki Messe, Nagata, Japan	実行委員
	H25.11.10-14	Electron Microscopy & Multiscale Modeling (EMMM2013)	Kyoto University, Kyoto, Japan	共催
H26	H26.10.5-8	2nd International Symposium on Long-Period Stacking Ordered Structure and Its Related Materials (LPSO2014)	Hotel Nikko Kumamoto, Kumamoto, Japan	主催
H27	H27.6.15-19	The International Conference "Advanced Materials Week-2015" (AMW2015)	Togliatti State University, ITMO University, Russia	共催
	H27.9.14-15	Boeing-KU Workshop on Advanced Mg Alloys	Kumamoto University, Kumamoto, Jpan	共催
	H27.10.11-16	Mg2015 OS "LPSO Structure & Its Related Alloys"	Pamada Plaza Jeju Hotel, Jeju, Korea	実行委員

H28	H28.12.4-7	3rd International Symposium on Long-Period Stacking Ordered Structure and Its Related Materials (LPSO2016) 予定	Mielparque Kyoto, Kyoto, Japan	主催
	H28.12.8	2nd Japanese-Russian International Symposium on Advanced Materials 予定	Mielparque Kyoto, Kyoto, Japan	主催

5) 産学官交流を目指した研究会など（開催予定も含めて総数 22 件）

表 4 高性能マグネシウム(Mg)合金創成加工研究会講演会の開催

年度	開催日	実施内容	開催場所
H23	H23.10.22	第 42 回高性能 Mg 合金創成加工研究会講演会「軽金属学会 60 周年記念シンポジウム」	熊本大学
	H23.11.16	第 43 回高性能 Mg 合金創成加工研究会講演会「次世代耐熱マグネシウム合金の基盤技術開発」	ホテル熊本テルサ
	H24.1.20	第 44 回高性能 Mg 合金創成加工研究会講演会「マグネシウム合金の双晶変形」	熊本大学
H24	H24.6.21	第 45 回高性能 Mg 合金創成加工研究会講演会「不燃性・難燃性マグネシウム合金の研究開発動向」	熊本大学
	H24.8.9	第 46 回高性能 Mg 合金創成加工研究会講演会「マグネシウム合金の力学特性 -従来 Mg 合金と LPSO 型 Mg 合金-」	熊本大学
	H24.12.3	第 47 回高性能 Mg 合金創成加工研究会講演会「マグネシウム合金の塑性緩和機構」	熊本大学
	H25.3.14	第 48 回高性能 Mg 合金創成加工研究会講演会「生体材料としてのマグネシウム合金」	熊本大学
H25	H25.4.22	第 49 回高性能 Mg 合金創成加工研究会講演会「次世代の航空宇宙産業と新材料」	メルパルク熊本
	H25.7.25	第 50 回高性能 Mg 合金創成加工研究会講演会「マグネシウムの新展開 -実用化に向けた取り組み-」	熊本大学
	H25.11.28	第 51 回高性能 Mg 合金創成加工研究会講演会「マグネシウム合金の塑性加工」	熊本大学
	H26.3.14	第 52 回高性能 Mg 合金創成加工研究会講演会「マグネシウム合金の腐食挙動と表面処理」	熊本大学
H26	H26.5.26	第 53 回高性能 Mg 合金創成加工研究会講演会「マグネシウムの新展開 -実用化に向けた取り組み-」	熊本大学
	H26.8.25	第 54 回高性能 Mg 合金創成加工研究会講演会「マグネシウム合金の変形機構」	熊本大学
	H26.12.4	第 55 回高性能 Mg 合金創成加工研究会講演会「マグネシウムの弾性変形と塑性変形」	熊本大学
	H27.1.30	第 56 回高性能 Mg 合金創成加工研究会講演会「超軽量 Mg-Li 合金の研究開発動向とその周辺技術」	熊本大学
	H27.3.3	第 57 回高性能 Mg 合金創成加工研究会講演会「MRC International Symposium, MRC 2015」	熊本大学
	H27.6.29	第 58 回高性能 Mg 合金創成加工研究会講演会「マグネシウム合金の新展開」	熊本大学
H27	H27.8.24	第 59 回高性能 Mg 合金創成加工研究会講演会「マグネシウム合金の破壊じん性」	熊本大学
	H28.1.18	第 60 回高性能 Mg 合金創成加工研究会講演会「マグネシウムの疲労と繰返し塑性変形」	熊本大学
	H28.2.22	第 61 回高性能 Mg 合金創成加工研究会講演会「マグネシウム合金の塑性加工」	熊本大学
	H28.6.20	第 62 回高性能 Mg 合金創成加工研究会講演会「科研費・新学術領域「シンクロ型 LPSO 構造の材料科学」からの成果報告 その1」	熊本大学
H28	H28.8.20	第 63 回高性能 Mg 合金創成加工研究会講演会「科研費・新学術領域「シンクロ型 LPSO 構造の材料科学」からの成果報告 その2」	熊本大学
		予定	

(3) 一般向けアウトリーチ活動

1) 一般向けシンポジウムの開催など（開催予定も含めて総計 6 件）

- [1] 熊本県地域結集型研究開発プログラム「次世代耐熱マグネシウム合金の基盤技術開発」最終成果報告会, ホテル熊本テルサ, 2011.11.16.
- [2] International Kick-off Symposium for Magnesium Research Center in Kumamoto University, 熊本大学, 2012.3.1.
- [3] 先進マグネシウム国際研究センターシンポジウム (MRC I)「次世代の航空宇宙産業と新材料」, メルパルク熊本, 2013.4.22.
- [4] 先進マグネシウム国際研究センターシンポジウム (MRC II)「電子顕微鏡による材料科学研究の最先端」, 熊本大学, 2013.9.13.
- [5] 先進マグネシウム国際研究センターシンポジウム (MRC III)「頭脳循環による材料科学のグローバル化」, 熊本大学, 2015.3.3
- [6] 一般公開・研究成果報告会「シンクロ型 LPSO 構造の材料科学」ソラシティカンファレンスセンター品川, 2016.9.6 (予定)

2) 展示会などへの出展（総計 18 件：以下主要 5 件を示す）

- [1] 「次世代耐熱マグネシウム合金の基盤技術開発」, イノベーション・ジャパン 2011, 東京国際フォーラム, 2011.9.21-9.22
- [2] 「熊本大学先進マグネシウム国際研究センターと KUMADAI マグネシウム合金の紹介」, 第4回国際マグネシウム展(スマートグリッド展 2012/次世代自動車産業展 2012), 東京ビッグサイト, 2012.5.30-6.1
- [3] 「KUMADAI 耐熱マグネシウム合金と, KUMADAI 不燃マグネシウム合金の紹介」, スマートコミュニティーJapan 2013「次世代自動車展」, 東京ビッグサイト, 2013.5.29-31
- [4] 「世界が注目！ 高強度・高耐熱性・難燃性を併せ持つ KUMADAI マグネシウム合金」, イノベーション・ジャパン 2015, 東京ビッグサイト, 2015.8.27-28
- [5] 「世界が注目！ 軽い・強い・燃えにくい KUMADAI マグネシウム合金」, メカトロテックジャパン 2015, 名古屋国際会議場(ポートメッセなごや), 2015.10.21-24.

3) 学術分野以外での依頼講演（総計 58 件：以下主要 10 件を示す）

- [1] “新規な塑性加工強化メカニズムによる超高強度マグネシウム合金の開発”, 天田財団「第9回助成研究成果発表会」, 早稲田大学西早稲田キャンパス(東京), 2011.5.28.
- [2] “長周期積層構造型マグネシウム合金”, 日本マグネシウム協会技術講演会「国家プロジェクトにおける研究目標と研究動向について」, 江戸東京博物館(東京), 2012.1.17
- [3] “軽量構造材料としての KUMADAI 不燃マグネシウム合金”, 野村證券株式会社グリーンフロンティア構想研究会「第5回状況報告会」, 野村證券アーバンネット(東京), 2012.5.30.
- [4] “KUMADAI マグネシウム合金の開発 —軽量化材料の革新に向けて—”, 科学技術政策研究所シンポジウム「近未来への招待状～ナイスステップな研究者 2012 からのメッセージ～」, 文部科学省第2講堂(東京), 2013.5.31.
- [5] “長周期積層構造型マグネシウム合金の開発”, 公益財団法人本多記念会「第10回本多フロンティア賞記念講演」, 学会会館(東京), 2013.5.31.
- [6] “LPSO 相で強化したマグネシウム合金の基礎と応用」, 京都大学 構造材料元素戦略研究拠点「平成 25 年度 第 2 回シンポジウム ～ 構造材料研究プロジェクトの新展開 ～」, 京都大学 楽友会館(京都市), 2013.7.9.
- [7] “マグネシウム新時代の到来！ —KUMADAI マグネシウム合金—”, 浜松地域イノベーション推進機構「マグネシウムイノベーション From はままつ」, オークラウトシティホテル浜松(浜松市), 2014.3.13.
- [8] “マグネシウム新時代の到来”, 東京大学生産技術研究所レアメタル研究会「第 63 回 レアメタル研究会」, 東京大学生産技術研究所(東京), 2014.11.28.
- [9] “世界が注目！ 軽い・強い・燃えにくい —KUMADAI マグネシウム合金—”, (株)ニュースダイジェスト社「メカトロテックジャパン 2015」, ポートメッセなごや(名古屋国際展示場)(名古屋市), 2015.10.23.
- [10] “マグネシウム新時代に向けた高性能化”, リードエグジビションジャパン(株)第 8 回オートモーティブワールド 専門技術セミナー「車の軽量化技術展」, 東京ビッグサイト(東京), 2016.1.15.

4) 一般向け施設見学の受け入れ（総計 12 件）

- [1] 熊本大学オープンキャンパス(2011.8.10, 2012.8.10, 2013.8.10, 2014.8.7, 2015.8.8.)
- [2] 熊本大学ホームカミングデー(2011.11.5, 2012.11.3, 2013.11.3, 2014.11.11, 2015.10.31)
- [3] 高大連携「嘉徳高校理科数科チャレンジセミナー」(2014.8.4, 2015.8.4)

7. 研究組織（公募研究を含む）と各研究項目の連携状況（2 ページ以内）

領域内の計画研究及び公募研究を含んだ研究組織と領域において設定している各研究項目との関係を記述し、総括班研究課題の活動状況も含め、どのように研究組織間の連携や計画研究と公募研究の調和を図ってきたか、組織図や図表などを用いて具体的かつ明確に記述してください。

(1) 本領域の研究組織

本領域研究の目的は、シンクロ型LPSO構造の①ユニークな構造、②形成メカニズム、③常識を覆す力学特性と新しい材料強化原理を明らかにすることであり、これらの3つの目的に合わせて3つの研究項目を設定した。これらの研究項目に対応した3つの班からなる計画研究班（それぞれ3つの計画研究で構成）を中心に、公募研究からなる公募班、領域運営と研究支援を行う総括班で組織化した(図19)。特に、構造科学のA01班を中心にしたA01-A02班とA01-A03班の連携体制を強化した。

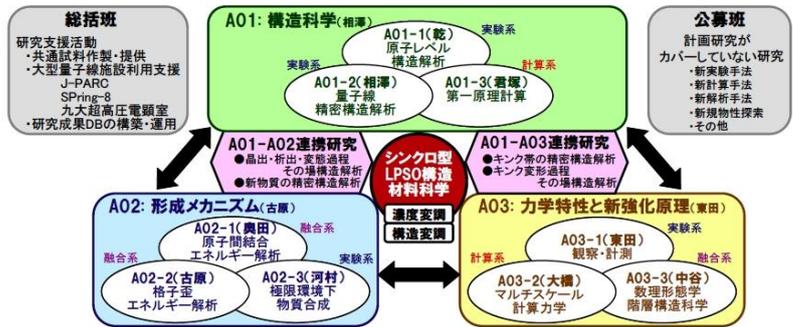


図 19 本領域の研究体制

(2) 研究項目の組織と研究内容

①A01班: 最先端の構造解析と計算科学の融合によるLPSO構造科学の構築 [相澤・JAEA]

計画研究	A01-1 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 A01-2 量子線を用いた精密構造解析によるLPSO構造の材料特性発現機構の解明 A01-2 第一原理に基づく計算科学によるLPSO構造の電子論と構造科学の構築
公募研究	第一期 放射光マイクロビーム微小単結晶構造解析によるシンクロ型LPSO構造の原子配列解明 アトムプローブ法によるLPSO濃化元素のMg中における拡散係数測定 LPSO構造生成過程でのその場XAFSと第一原理XANESによる重元素の挙動解析 X線非弾性散乱実験によるLPSO相のダイナミクス 第二期 第一原理局所解析によるシンクロ型LPSO構造における欠陥間相互作用の解明 第一原理統計熱力学に基づくMg合金LPSO構造の熱力学的安定性の理論計算

②A02班: 形成メカニズム解明によるLPSO構造の濃度・構造変調設計原理の確立 [古原・東北大]

計画研究	A02-1 原子間結合エネルギー解析によるシンクロ型LPSO構造形成メカニズム解明 A02-2 格子歪エネルギー解析によるシンクロ型LPSO構造形成メカニズムの解明 A02-3 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
公募研究	第一期 超高強度マグネシウム合金の相変態挙動に基づくLPSO構造形成メカニズムの解明 走査トンネル顕微鏡によるLPSO合金の破断面の超高分解能観察 シンクロ型LPSOマグネシウム合金の水素化と水素貯蔵・透過材料への展開 第二期 走査トンネル顕微鏡による遷移金属-希土類クラスターの局所配列および物性測定 LPSO構造形成に対するフェーズフィールド解析 マルチスケール3次元解析によるLPSO構造形成メカニズムの解明 水素化-脱水素化によるLPSO構造の安定性評価と形成過程の解明

③A03班: 観察・計測と計算力学によるLPSO構造の変形ダイナミクス解明と新強化原理確立 [東田・九大]

計画研究	A03-1 観察・計測によるシンクロ/非シンクロ型LPSO構造の変形機構と強化原理の比較解明 A03-2 マルチスケール計算力学によるLPSO構造の変形と力学特性の解明 A03-3 数理形態学と階層構造科学の融合による積層構造体の力学特性発現機構の解明
公募研究	第一期 長周期積層型規則構造を有する高強度マグネシウム合金における四次元応力解析 フェーズフィールド法によるLPSO型マグネシウム合金の強化機構の解明 力学系および組織形成シミュレーションに不可欠なLPSO相単相の単結晶塑性率の解明 マイクロ材料試験によるMg-Zn-Y合金中に形成されるLPSO相の強化機構の解明 第二期 高精度AE計測によるキック変形機構の動的解析 マイクロビアー圧縮試験によるLPSO相の変形機構解析 濃化層におけるクラスター構造を反映したLPSO相の弾性率および熱膨張の解明 マイクロ材料試験によるMg-Zn-Y合金LPSO相の破壊・疲労機構の解明 LPSO構造におけるキック帯の不可逆性と加工硬化挙動への影響の解明 薄片4点曲げ試験によるキックバンド成長のその場観察と3次元形態・結晶方位解析 シンクロ型LPSO構造の疲労機構の解明 異常分散を利用した高エネルギー放射光応力測定法による階層的キック変形評価

(2) 各研究項目の連携状況

1) 総括班の組織 (参照 図 20)

【研究企画委員】 6名の幹事(領域研究代表者の河村能人 A01 班長の相澤一也, A02 班長の古原忠, A3 班長の東田賢二, 大谷博司, 神山崇)

【外部評価委員】 増本健(東北大学名誉教授, 金属工学), 藤井保彦(総合科学研究機構副理事長, 構造科学), 富田佳宏(神戸大学名誉教授, 材料力学), 佐久間 健人(東京大学名誉教授, 材料工学, H25 年度から), 馬越 佑吉(大阪大学名誉教授, 材料強度学, H25 年度から)

【外部研究推進委員】 小紫正樹(JRCM 専務理事), 小原久(日本マグネシウム協会専務理事), 細谷佳弘(特殊金属エクスセル執行役員), 塚本修(石炭エネルギーセンター理事長, 元経済産業省審議官), 5名の外部評価委員(兼任)

【6部会+4事務局体制】 「新学術 LPSO 本部事務局」, 「共通試料サテライト事務局」, 「大型量子線施設利用サテライト事務局」, 「広報・DB サテライト事務局」の4つの事務局と, 「領域企画・運営部会」, 「研究支援活動部会」, 「領域内交流推進部会」, 「広報・交流推進部会」, 「若手人材育成部会」, 「図書出版・知財部会」の6つの部会を設置して組織的に領域の運営を図った。

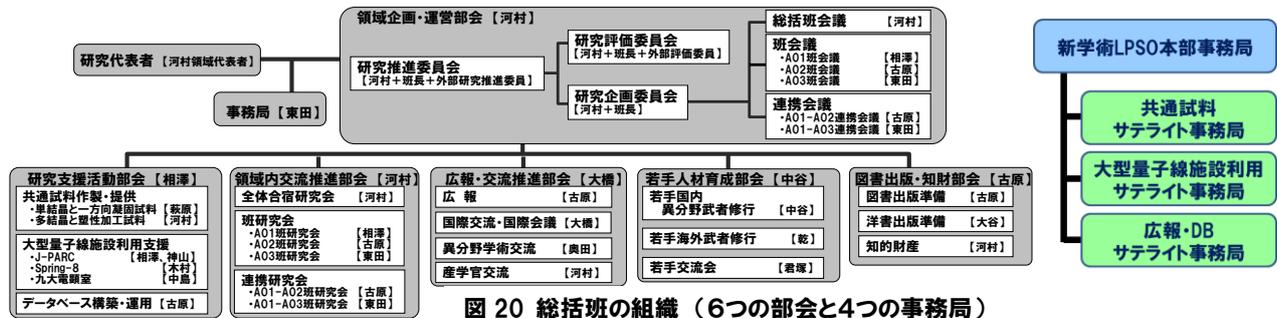


図 20 総括班の組織 (6つの部会と4つの事務局)

2) 総括班による連携推進活動(参照 図 21)

① 領域企画・運営部会と領域内交流促進部会による連携研究の推進

- ・「領域企画・運営部会」による「ガイドブック」の作成・配布, 連携会議等の各種会議の開催, 「研究企画委員会」による連携研究の企画・促進を通して, 領域内のベクトル合わせと連携の推進を図った。
- ・「領域内交流推進部会」による合宿研究会・研究成果報告会・班研究会・連携研究会の開催を通して, 領域内の情報の共有化と連携の推進を図った。
- ・「若手人材育成部会」による若手研究会・学生勉強会の開催を通して, 若手研究者の連携を図った。

② 研究支援活動部会による連携研究の推進

- ・共通試料を提供することで, 領域全体で統制のとれた連携研究を効率的に推進できた。特に, オーダーメイド試料については, 総括班と A02 班が連携して良質なモデル合金を選定しており, 統制のとれた連携研究が実施できた。
- ・大型量子線施設利用支援によって, A01-A02 班と A01-A03 班の連携研究を促進した。特に, J-PARC と Spring-8 に導入した共通設備は, 加熱中あるいは応力下での LPSO 構造形成および変形その場観察実験による連携研究に効果を発揮した。
- ・データベース(DB)の構築・運用を通じた最新情報の共有化により, 連携研究を効率よく進めた。

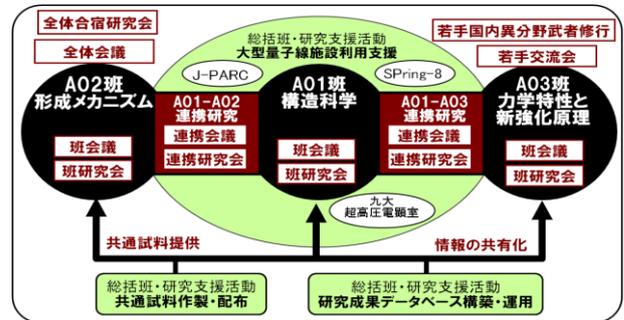


図 21 領域内の有機的連携体制

(3) 班同士の連携状況(参照 図 22)

1) A01-A02班連携研究

【晶出・析出・変態過程その場構造解析】①原子間結合エネルギー(A02-1)の観点から, 量子線を用いた精密構造解析(A01-2)の協力で放射光その場散乱実験の高度化を行い, 凝固時のシンクロ型LPSO構造の晶出過程の解明が順調に進捗している。②格子歪エネルギー(A02-2)の観点から, A01-1の実験およびA01-3の理論に基づく原子構造および濃度変調解析の情報をLPSO構造形成メカニズムのシナリオ構築に反映させた。

【新物質の精密構造解析】①シンクロ型LPSO構造物質群の探索(A02-3)により得られた新奇物質の原子レベル構造解析(A01-1)が順次行なわれ, Mg-Al-Gd系の精密構造解析やMg-Co-Y系15R型新規シンクロLPSO構造の構造解析で大きな進展を得た。②新たに発見された物質の組成情報に基づいた熱力学計算および第一原理計算によってシンクロ型LPSO構造物質の最安定構造を解明する研究が連携して行なわれた。



図 22 班間の有機的連携

2) A01-A03 班連携研究

【キンク帯の精密構造解析】極微小単結晶マイクロピラー圧縮試験で導入した変形帯の原子レベル構造解析が A03-1 と A01-1 の連携により実施され, Mg-Al-RE 系 LPSO 相の変形モードが明らかになった。

【キンク変形その場構造解析】中性子による変形その場観察が A03-1 と A01-2 の連携により実施され, Mg-Zn-Y 系 LPSO 相の特異な変形ダイナミクスが明らかになった。

【物性値精密測定】第一原理計算により Mg-Zn-Y 系 LPSO 単結晶モデルの弾性定数の全成分を明らかにすることで弾性定数の実測(A03 班公募研究)結果に対する理論的支持を与えるとともに, この結果を基に弾性特性の結晶方位依存性に関する直接的な考察を実施した。

3) A02-A03 班連携研究

【高温高圧下における積層構造形成過程その場観察】応力付加時の積層構造形成過程のその場観察実験のための連携研究を進めた。

【高温高圧下におけるキンク変形過程の観察】①Mg-Ni-Y系シンクロ型LPSO構造物質(A02-3)の高温クリープと高温下での活動すべり系の検討(A03班公募研究)が進んだ。②高温高圧下で変形させたMg-Zn-Y系シンクロ型LPSO構造物質(A02-3)のキンク帯形成に関する結晶幾何学考察(A03-1)が進み, キンク帯を格子回転軸で整理する幾何学的分類法が新たに提案された。

8. 研究経費の使用状況（設備の有効活用，研究費の効果的使用を含む。）（1 ページ以内）

領域研究を行う上で設備等（研究領域内で共有する設備・装置の購入・開発・運用・実験資料・資材の提供など）の活用状況や研究費の効果的使用について記述してください（総括班における設備共用等への取組の状況を含む。）。

（1）設備等の有効活用

1）総括班における研究支援用の設備導入と効果的な活用

【共通試料作製設備の導入と効果的な運用】 一方向凝固試料作製装置を阪大に，多結晶試料の加工装置を熊大に初年度に導入し，H24 年度より本格的な共通試料配布を開始した。一方向凝固材と多結晶材を合わせて 525 本滞りなく供給し，計画研究と公募研究を効果的に支援した。

【大型量子線施設の整備と効果的な活用】 「その場観察」をコアにした連携研究に不可欠である「中性子構造解析用変形ステージ」と「放射光構造解析用変形ステージ」を独自に設計して J-PARC と SPring-8 に導入した。H23 年度に仕様の策定を行い，H24 年度からリースにより導入した。現在までに J-PARC と SPring-8 を延べ 153 日間利用した連携研究を実施することにより，シンクロ型 LPSO 構造の精密構造を解明することができた。

2）各計画研究実施のための設備導入と効果的な活用

各計画研究においても当初計画に従い，必要な設備を速やかに導入し，直ちに運用を開始した。リースによる設備導入経費を除き，設備は初年度にほぼ導入を完了し，H24 年度からは導入した設備を活用して研究を効果的に実施した。

（2）人件費の有効活用

本領域では，下記のように，事務補佐員を各 1 名配置した 4 つの本部・サテライト事務局を設置して，領域運営全般と研究支援活動を組織的に行った。特に，共通試料作製を担当している阪大と熊大，大型量子線施設利用支援を担当している J-PARC，SPring-8 ならびに九大超高压電子顕微鏡室，DB 構築・運用を担当している東北大金研に技術補佐員を各 1 名配置して，研究支援活動を組織的に進めた。この結果，領域運営全般と研究支援活動を効果的かつ円滑に行うことができた。

- ① 新学術 LPSO 本部事務局(九州大学)
- ② 共通試料サテライト事務局(熊本大学)
- ③ 大型量子線施設利用サテライト事務局(J-PARC)
- ④ 広報・DB サテライト事務局(東北大学)

（3）若手人材育成経費の有効活用

本領域では，下記のように，「若手国内異分野武者修行」による領域内の異分野研究室への若手研究者の派遣や「若手海外武者修行」による海外の先端研究機関への若手研究者の派遣，ならびに「若手研究会」や「熊大 MRC サマースクール」や「学生勉強会」の開催によって，若手人材の育成を効果的に図ることができた。

- ① 「若手国内異分野武者修行」
- ② 「若手海外武者修行」
- ③ 「若手研究会」・「熊大 MRC サマースクール」・「学生勉強会」

（4）その他，研究費の効果的な使用

【領域の企画・運営の推進】 「研究企画委員会」，「研究評価委員会」，「研究推進委員会」，「全体会議」，「総括班会議」，「班会議」，「連携会議」を開催するとともに，ガイドブックや各種報告書・評価書などを印刷・配布することにより，領域の効果的かつ円滑な企画・運営を行うことができた。

【国際会議の開催】 シンクロ型 LPSO 構造に関する国際会議(LPSO2012 と LPSO2014)を開催し，研究成果の世界発信と国際交流の推進を図ることができた。

【広報活動の推進】 ホームページを運用することにより本領域研究活動とその成果を公表するとともに，ニューズレターを発行し，本領域の取組み内容を広く発信できた。

【領域内交流の推進】 合宿研究会，研究成果報告会，班研究会，連携研究会，若手研究会，学生勉強会，施設見学会，熊大 MRC サマースクールを開催することによって，領域内の交流を活性化できた。

【異分野学術交流の推進】 日本金属学会，軽金属学会，日本機械学会，日本物理学会，日本放射光学会等で本領域に係わるシンポジウム等を企画・開催することによって，異分野交流を推進できた。

【研究支援活動の推進】

- ・**共通試料の作製・配布** 原料費や消耗品の予算配分によって，共通試料作製・配布を円滑に推進できた。
- ・**大型量子線施設利用の支援** 上述の研究支援員と事務補佐員の配置，観察・計測に必要な消耗品の予算の配分，「施設見学会」の開催によって，「その場観察」をコアにした連携研究を効果的に推進できた。
- ・**DB の構築と運用** DB を構築・運用による最新の研究成果に関する情報の共有化によって領域研究を効果的に推進できた。

・研究費の使用状況

(1) 主要な物品明細 (計画研究において購入した主要な物品 (設備・備品等. 実績報告書の「主要な物品明細書」欄に記載したもの.) について, 金額の大きい順に, 枠内に収まる範囲で記載してください.)

年度	品名	仕様・性能等	数量	単価 (円)	金額 (円)	設置(使用)研究機関
23	小型真空溶解装置	日新技研(株)製 NEV-M04C 型	1	8,875,440	8,875,440	九州工業大学
	原子配列・電子構造 解析用並列計算機	リアルコンピューティン グ(株) RC GDFu90-2046G	1	8,848,455	8,848,455	大阪大学
	マイクロインデンテー ションテスター	本体ユニット(アルバツ ク理工・μIT-2)	1	8,492,000	8,492,000	日本大学
24	EBS D 観察用試料引 張ステージ一式	TS-2000	1	6,272,437	6,272,437	東北大学
	EDS/EBS D 取り込み ユニット	日本電子(株)製 EX-36080	1	3,150,000	3,150,000	京都大学
	180TON ガイドブロッ ク	株式会社シーティーフ ァクトリー製	1	2,989,875	2,989,875	愛媛大学
25	特性 X 線エネルギー 分散型分光装置	日本電子(株)製	1	9,499,980	9,499,980	東京大学
	SEM-AsB 観察用試 料引張りステージお よび治具	(株)TSL ソリューション ズ製	1	7,060,000	7,060,000	九州大学
	EBS D 観察用引張・ 圧縮ステージおよび 治具 1 セット	(株)TSL ソリューション ズ製	1	6,272,437	6,272,437	熊本大学
26	ソフトウェア JUMP2	MaterialsDesign 社 AC	1	3,240,000	3,240,000	九州工業大学
	LPSO 構造安定性評 価解析用並列計算 機	HCP システムズ(株) HCP5000-X1216R2S-SI	1	3,196,800	3,196,800	大阪大学
	データ解析ソフトウェ ア IVAS ライセンス	LEAP 三次元アトムプロ ープ ver.3.6x	1	2,592,000	2,592,000	京都大学
	原子配列・電子構造 解析用並列計算機 増設モジュール	リアルコンピューティン グ(株) FUYUKI 型 WS	1	1,870,560	1,870,560	大阪大学
27	Picoindenter システム (合算)	日本電子(株)製 EM-Z15143TPI95	1	27,000,000	27,000,000 (3,000,000)	京都大学
	第一原理計算システ ムソフトウェア	Advance / Phase	1	2,540,160	2,540,160	東北大学
	第一原理 LPSO 構造 解析システム	HPC システムズ(株) HPC5000	1	1,499,040	1,499,040	信州大学
	デュアルビーム装置 一式	FEI 製 LONGLIFE 仕 様	1	1,276,236	1,276,236	九州大学

(2) 計画研究における支出のうち、旅費、人件費・謝金、その他の主要なものについて、年度ごと、費目別に、金額の大きい順に使途、金額、研究上必要な理由等を具体的に記述してください。

【平成23年度】

・旅費

- A01-1 阿部英司 カナダ出張, 352,920 円 (Themec'2011 に参加, 招待講演)
- A02-1 奥田浩司 アメリカ, つくば市出張 323,220 円 (TMS2012 に参加, 成果発表)
- A02-3 河村能人 アメリカ出張, 308,220 円 (TMS2012 に参加, 招待講演)
- A03-3 中谷彰宏 韓国出張, 180,000 円 (韓国 ASEM11 に参加, ミニシンポジウム企画・成果発表)
- A02-1 奥田浩司 韓国, 165,530 円 (韓国 ASEM11 に参加, 成果発表)
- A03-1 森川龍哉 中国出張, 121,685 円 (YSR6 国際会議に参加, 招待講演)

・人件費・謝金

- A01-2 日本原子力研究開発機構 テクニカルスタッフ雇用, 895,467 円 (実験データ整理)
- A03-2 慶應義塾大学 アルバイト謝金, 612,000 円 (実験データ整理)

・その他

- A03-3 顕微鏡用冷却加熱ステージ 1 台リース 695,625 円 (研究に必要な顕微鏡観察のため)
- A02-2 Web サイト更新システム導入作業 472,290 円
- A02-1 試料調製及び Y₂O₃ の定量 206,769 円 (研究のため)
- A03-3 ソフトウェア購入 164,640 円 (データ解析をスムーズに行うため)
- A01-1 JEM-2010 顕微鏡修理 136,206 円 (研究に必要な顕微鏡観察のため)

【平成24年度】

・旅費

- A03-2 大橋鉄也 ドイツ出張 712,510 円 (国際会議に参加, 招待講演)
- A01-1 乾 晴行 カナダ出張, 382,680 円 (9th International Conference on Magnesium Alloys and their Applications に参加, 成果発表)
- A01-3 君塚 肇 カナダ出張, 326,070 円 (Mg2012 に参加, 成果発表)
- A01-1 岸田恭輔 カナダ出張, 382,680 円 (9th International Conference on Magnesium Alloys and their Applications に参加, 成果発表)
- A01-1 阿部英司 オーストラリア, 259,120 円 (Cairns APERIODIC 2012 に参加, 成果発表)

・人件費・謝金

- A03-2 京都大学 学術研究員雇用, 4,823,010 円 (シンクロ型 LPSO 構造形成メカニズム解明のため)
- A01-3 大阪大学 学術研究員雇用, 4,061,676 円 (LPSO 構造の電子論と構造科学の研究のため)
- A02-2 東北大学金属研究所 学術研究員雇用, 3,051,893 円 (シンクロ型 LPSO 構造形成メカニズム解明)
- A01-2 日本原子力研究開発機構 学術研究員雇用, 2,270,500 円 (量子線を用いた精密構造解析のため)
- A02-1 北海道大学 派遣雇用, 1,879,431 円 (実験データ整理)

・その他

- A03-1 九州大学中央分析センター使用料, 621,900 円 (研究に必要な顕微鏡観察のため)
- A01-1 ターボ分子ポンプ PT-150 修理, 561,960 円 (研究のため)
- A02-3 X 線回折装置 PC 引取修理, 522,900 円 (研究のため)
- A02-1 Mg 合金の組成分析, 437,850 円 (Mg 合金の組成分析)
- A01-1 Ge 半導体検出器修理, 367,500 円 (研究のため)

【平成25年度】

・旅費

- A02-3 河村能人 スペイン出張, 551,050 円 (Magnesium Workshop Madrid 2013 に参加, 基調講演)
- A03-1 鈴木真由美 ハワイ出張, 530,980 円 (PRICM-8 に参加, 成果発表)
- A01-1 阿部英司 アメリカ出張, 423,580 円 (Workshop on Advances in Transmission Electron Microscopy に参加, 招待講演)
- A01-1 永井康介 ハワイ出張, 403,372 円 (PRICM-8 に参加, 情報収集)
- A03-1 東田賢二 ハワイ出張, 371,210 円 (PRICM-8 に参加, 成果発表)
- A02-3 河村能人 カナダ出張 361,630 円 (Materials Science & Technology 2013 に参加, 招待講演)

・人件費・謝金

- A01-2 日本原子力研究開発機構 学術研究員雇用, 6,061,284 円 (量子線を用いた精密構造解析のため)
- A01-3 大阪大学 学術研究員雇用, 5,444,991 円 (LPSO 構造の電子論と構造科学の研究のため)
- A03-2 京都大学 学術研究員雇用, 5,119,813 円 (シンクロ型 LPSO 構造形成メカニズム解明のため)
- A02-2 東北大学金属研究所 学術研究員雇用, 3,954,819 円 (シンクロ型 LPSO 構造形成メカニズム解明)

・その他

- A01-2 高温変形ステージのリース 6,652,800 円 ((研究解析のため)
- A01-1 JEM-2100F 型透過電子顕微鏡 FE-GUN 交換 2,743,650 円 (研究に必要な顕微鏡観察のため)
- A01-1 電子エネルギー損失分光機修理 2,000,000 円 (研究のため)
- A01-1 高温変形ステージ調整用機械特性評価用標準試料加工 892,500 円 (研究のため)

【平成26年度】**・旅費**

- A03-2 大橋鉄也 アメリカ出張, 830,260 円 (USNCTAM2014 に参加, 研究発表)
- A03-2 大橋鉄也 イギリス出張 795,500 円 (ICCM2014 に参加, 基調講演)
- A03-3 中谷彰宏 スペイン, フランス, イギリス出張 678,352 円 (WCCM2014 に参加, 成果発表. ICCM2014 に参加, 招待講演. Alan Needleman Symposium に招待, 研究情報収集)
- A01-1 阿部英司 チェコ共和国出張 435,970 円 (IMC2014 に参加, 招待講演)

・人件費・謝金

- A01-2 日本原子力研究開発機構 学術研究員雇用, 6,445,727 円 (量子線を用いた精密構造解析のため)
- A03-2 京都大学 学術研究員雇用, 4,825,417 円 (シンクロ型 LPSO 構造形成メカニズム解明のため)
- A02-2 東北大学金属研究所 テクニカルスタッフ雇用, 1,213,152 円 (実験データ整理)
- A02-1 北海道大学 派遣雇用, 1,173,096 円 (実験データ整理)
- A03-2 慶應義塾大学 アルバイト謝金, 950,400 円 (実験データ整理)

・その他

- A01-2 高温変形ステージのリース 6,652,800 円 (研究解析のため)
- A03-3 自動電解薄化装置テヌポール-5 リース, 1,349,136 円 (研究解析のため)
- A03-3 Abaqus 更新 618,079 円 (シミュレーションによる解析のため)
- A01-3 研究用計算機利用 563,200 円 (研究解析のため)

【平成27年度】**・旅費**

- A03-3 中島英治 ロシア出張 771,676 円 (AMW2015 に参加, 研究発表)
- A01-3 君塚 肇 ドイツ出張 652,485 円 (ICM12 に参加, 研究発表)
- A01-3 君塚 肇 アメリカ出張 553,286 円 (2015MRS に参加, 研究発表)
- A01-1 乾 晴行 ドイツ出張 493,580 円 (ICM12 に参加, 基調講演)
- A03-3 中島英治 フランス出張 468,750 円 (CREEP2015 に参加, 研究発表)

・人件費・謝金

- A01-2 日本原子力研究開発機構 学術研究員雇用, 6,456,934 円 (量子線を用いた精密構造解析のため)
- A03-2 京都大学 学術研究員雇用, 4,818,502 円 (シンクロ型 LPSO 構造形成メカニズム解明のため)
- A03-3 大阪大学 学術研究員雇用, 3,089,481 円 (計算機シミュレーションによる解析研究)
- A02-2 東北大学金属研究所 テクニカルスタッフ雇用, 2,171,512 円 (実験データ整理)

・その他

- A01-2 高温変形ステージのリース 6,652,800 円 (研究解析のため)
- A03-1 豊和製立てスライス盤修理 462,240 円 (研究解析のため)
- A03-3 超高压電子顕微鏡使用料 309,600 円 (研究に必要な顕微鏡観察のため)
- A01-1 共用設備使用料 303,700 円 (研究に必要な顕微鏡観察のため)

(3) 最終年度 (平成 27 年度) の研究費の繰越しを行った計画研究がある場合は, その内容を記述してください。

該当しない。

9. 当該学問分野及び関連学問分野への貢献度（1 ページ以内）

研究領域の研究成果が、当該学問分野や関連分野に与えたインパクトや波及効果などについて記述してください。

(1) 領域全体としての当該学問分野及び関連学問分野への貢献度

構造科学の観点からは、LPSO 構造のクラスター形成と原子配置を原子レベル構造解析により決定し、金属結合を基本とする構造中に共有結合の要素をもつ構造が含まれることを見出した。これは従来の金属材料で観察された例がほとんどなく、新規な機能性材料への応用、例えば人工格子と構造的に深い共通点がある長周期積層構造による巨大磁気抵抗材料の発見につながる可能性を示唆している。一方、構造相変態の立場からは、濃度変調と構造変調が同期した LPSO 構造形成を過飽和固溶体からの析出として捉えると、LPSO 構造の形成は従来の拡散律速型変態理論で説明可能な、例えばジュラルミンにおける GP ゾーンを想起させる。しかしながら LPSO 合金の特異性はジュラルミンにおける時効硬化性だけでなく、LPSO 構造から形成されたキンク帯がこの合金の高強度・延性に寄与している点にある。このようなキンク帯強化は従来の金属材料で見られる主要な強化機構とは異なる新しい強化法であり、材料強度学の裾野を大きく広げることにも貢献した。このように、一つの材料が多くの学問分野に対して多大な波及効果を及ぼしたことは、材料科学が単なる一工学分野にとどまらず、基礎科学を基盤とする総合科学であることを明瞭に実証しえた稀有な例と言える。さらに今後の材料開発が、複数の学問領域を包含しつつ展開すべきであることを示した点で、工学の意義にパラダイムシフトを迫る強いインパクトを与えた。

(2) 各研究項目が当該学問分野及び関連学問分野への貢献度

1) A01 班「構造科学」

原子レベル構造解析、量子線精密構造解析及び第 1 原理解析により、シンクロ型 LPSO 相の結晶構造・安定化条件を決定し、その特徴が共有結合性原子クラスター形成とその規則配列及び金属層と共有結合性層からなる”自然界において自然に形成されるヘテロ構造”であることを明らかにした。本成果は、本領域の目的である「形成メカニズム」、「強化メカニズム」解明に、基礎的且つ不可欠な情報を提供し、領域推進に貢献すると共に、合金設計の他、異種材料接合、薄膜合成等の表面・界面科学にも波及するものである。また第 1 原理解析及び量子線その場構造解析により、シンクロ型 LPSO 相の変形機構に関して、Mg 相の錐面上の拡張らせん転位芯に関する新奇な交差すべり機構の発見及びキンク変形は、格子回転による格子ひずみ解放が周期的に発生する過程が主割合を占める協同現象であると共に、周期からずれた発生も特殊な相関の元に許容する特異なダイナミクスを持つことを明らかにし、「強化メカニズム」解明の基礎的知見を提供した。これらの成果は、本領域の他、計算科学、金属・機械材料科学、固体物理学等にも、強いインパクトを与える。

2) A02 班「形成メカニズム解明」

Mg 合金の LPSO 構造の形成過程における不可思議な点は、濃度変調を伴った構造変調が合金系や組成に依存した特定周期で起こるところにあった。従来の相変態の研究分野では、マルテンサイト変態のようなせん断型構造相変態が組成分配を伴う拡散型相変態と同様に拡散律速で起こる混合型変態が存在すること、拡散律速の組織変化としてスピノーダル分解による濃度変調と規則化の重畳現象（スピノーダルオーダーリング）が存在することが、それぞれ知られていたが、Mg 合金の LPSO 構造に関してはこのような相変態現象との関わりはほとんど明らかになっていなかった。A02 班では、濃度変調に関係する原子間結合エネルギーと構造変調（構造変化）による歪みエネルギーという混合型変態の両側面に注目し、通常場および各種極限環境場の下での、両変調のシンクロ過程を理論および実験から多面的に解明することが試みられ、構造形成のシナリオに関する理解が大きく進展した。本研究の成果により、新たな Mg 合金における LPSO 構造の設計原理の構築に更に前進するとともに、構造相変態分野の新しい研究領域を文字通り開拓したと言える。

3) A03 班「力学特性解明と新強化原理の構築」

A03 班では、実験グループと計算グループ、そして理論・実験融合グループが互いに協力し合い LPSO 構造の力学特性解明と新強化原理の構築を目指した。実験グループの得た LPSO 構造の特異な変形挙動の観察結果は計算グループおよび理論グループの研究を推進させ、キンク帯形成のモデリングを通してその形成機構やキンク増殖メカニズムの解明に大きな示唆を与えた。その中で大きな成果は、その素過程が転位によるすべり変形と考えられるキンク変形を回位という概念で捉え、これを離散転位塑性論に基づいてモデル化できたことである。従来金属材料で顧みられなかった回位が LPSO 構造の中で有効であることが示されたことは、当該分野にインパクトある成果である。一方で、結晶塑性 FEM や分子動力学シミュレーションといった手法によるキンク変形の再現も進められ、材料の力学物性研究における計算科学の威力を十分に発揮させることができた。このことは、LPSO 構造のみならず同様の変形異方性を持つ材料へこの手法が適用できる可能性を示唆すると共に、一般に不均一である塑性変形に関する今後の研究において、実験系と計算系、理論系による相互協力の重要性を示すことができたものと考えられる。その成果は材料科学、固体力学、さらにその融合分野に大きな影響を及ぼすことが期待される。

10. 研究計画に参画した若手研究者の成長の状況（1 ページ以内）

研究領域内での若手研究者育成の取組及び参画した若手研究者（※）の研究終了後の動向等を記述してください。

※研究代表者・研究分担者・連携研究者・研究協力者として参画した若手研究者を指します。

【本領域における若手研究者】

本領域の研究者（計画研究の研究代表者、研究分担者、連携研究者と公募研究の研究代表者）は総勢 59 名であり、本研究計画が終了した H28 年 6 月時点での平均年齢は 47.5 歳、その内訳は 30 代 13 名、40 代 23 名、50 代 16 名、60 代 6 名であった。本領域では研究着手時の年齢が 39 歳以下だった研究者を若手研究者とした。若手研究者数は延べ 22 名（計画研究の 39 歳以下 13 名、第一期公募研究の 4 名、第二期公募研究の 5 名）であり、領域研究者の約 40%に相当する。なお、若手研究者のうち 2 名が女性研究者であった。

（1）総括班：若手人材育成部会の設置とその活動

総括班の中に「若手人材育成部会」を設置し、若手研究者の啓発および連携促進を行うとともに、人材育成を通じて若手研究者からのボトムアップによる領域研究全体の活性化にも結びつけることを目指して、下記のような取組みを行った。

具体的には「若手国内異分野武者修行」、「若手海外武者修行」、「若手交流会」、「学生勉強会」の4つの活動を、報告会・滞在記などの共有と情報交換などの面で相互に部会内で連携をとりながら実施した。若手国内異分野武者修行・若手海外武者修行プログラムでは、研究活動に対する幅広い視野と見識の獲得による啓発、研究内容のさらなる高度化・醸成を目的とした研究課題を募集し、本領域総括班審査委員会による厳格な評価を経て旅費等を援助した。また若手交流会では特別講演・見学会・チュートリアルに加えて、異分野を横断するテーマ討論により専門性と学問領域の広がりや両立できる人材の育成を図った。若手交流会の一環として、新規にマグネシウム分野に進出する若手研究者・学生を対象として、合金製造技術、加工技術の実習を行なう熊大 MRC サマースクールを開催し、実験技術の底上げを図った。また、合宿研究会と研究成果報告会において、評価委員による採点結果を基に、学生を含めた若手研究者を表彰することにより、若手研究者のモチベーション向上に努めた。なお、領域研究開始からの活動実績は表 5 の通りである。

表 5 若手人材育成の活動状況

若手人材育成活動	実施回数
若手交流会・特別講演会・WG	9 回
若手国内異分野武者修行プログラム	5 件
若手海外武者修行プログラム	5 件
熊大 MRC サマースクール	4 回
学生勉強会	1 回

（2）若手人材育成の成果

【若手研究者・学生の受賞】 領域研究開始から 4.5 年間で若手研究者（38 件）と学生（89 件）が多数の賞を受賞しており、国内外の専門分野で客観的に高い評価を得た。

【若手研究者・学生の国内・国際学会発表ならびに基調・招待講演】 若手研究者や学生の研究成果公表もまた活発に行われた。若手研究者の国内学会の発表件数は 130 件（一人平均 5.9 件）であり、国際学会の発表件数は 75 件（平均 3.4 件）である。そのうち基調・招待講演の件数は、国内学会で 86 件（平均 3.9 件）、国際学会で 60 件（平均 2.7 件）にのぼり、国内外の専門分野で高く評価されているものと判断できる。一方、学生の国内学会の発表件数は 473 件、国際学会の発表件数は 104 件であり、研究者の卵も着実に育っている。

【研究終了後の動向】 本領域研究実施中に任期付研究員・博士研究員から研究員への昇格が 2 件、講師への昇格が 2 件、准教授への昇格が 7 件あり、若手研究者の半数がそれぞれ新たな職位においてシンクロ型 LPSO 構造物質の材料科学に関する研究を継続している。また、本領域で築かれた連携研究が個別の共同研究として発展しており、分野の垣根を超えた融合研究が定着している。

【若手研究者へのアンケート結果（H28 年 5 月実施）】 本領域に参加して成長した点を問うアンケートを若手研究者を対象に行なったところ、次の回答例に示すように、プロジェクト研究における役割を意識した若手間の学際融合が効果的に展開されていたことがわかった。

①「実験、理論の研究者が双方から新しい知見をまとめ上げるという大型プロジェクトならではの活動は今後の研究の進め方について深く考えさせられた」、②「プロジェクトの目的を理解した上で自分が貢献できることを考えて研究計画の立案と実行ができるようになった」、③「新しい研究分野に挑戦して、決められた期間内に、当初の研究計画書に沿って、一定の結果を出すことができた。特に、研究プロジェクトの方針を常に念頭に置き、共通の目標に向かって研究を進めるという研究室や個人レベルの研究では得難い経験ができた」、④「普段学会で交流の無い、異分野の研究者と活発に議論でき、多くの若手研究者との交流により刺激を受けた」、⑤「連携研究を通して、様々な分野の研究者との連携の大切さを実感した」、⑥「異分野の研究テーマに取組め、自身の研究者としての幅が広がった」、⑦「同世代の若手研究者と積極的に共同研究を行うこととなり、これまで殆ど無かった他研究室との共同研究論文が半数以上を占めるようになった」、⑧「他分野との連携構築は、本領域以前には正直想像もしていなかったものである」、⑨「同年代の若手の研究に対する姿勢に刺激を受けた」、⑩「海外武者修行のおかげで海外での研究生活を体験することができ、日本との違いを感じつつ、日本の良さを再確認することができた」など。

11. 総括班評価者による評価（2 ページ以内）

総括班評価者による評価体制や研究領域に対する評価コメントを記述してください。

(1) 総括班の評価体制

1) 「研究評価委員会」による評価

総括班の「領域企画・運営部会」に、「内部評価委員」と「外部評価委員」で構成される「研究評価委員会」を設置して、領域の研究の評価を行った。「内部評価委員」は、5名の幹事(領域代表者と3名の班長と大谷博司・神山崇)で構成されており、リーダーの立場から各計画研究や公募研究を評価した。一方、「外部評価委員」には、本領域で中心となる3つの分野(金属工学, 構造科学, 材料力学)で指導的な立場にある, 材料科学分野の増本健先生, 構造科学分野の藤井保彦先生, 材料力学分野の富田佳宏先生, 材料工学分野の佐久間健人先生(H25年度から)と材料強度学分野の馬越佑吉先生(H25年度から)の5名に就任いただいて、各専門分野における研究指導者としての豊富な経験に基づいた客観的な評価をお願いした。

なお、「研究評価委員会」とは別に「研究推進委員会」を設置して、領域の企画・運営内容の審議・承認を行った。「研究推進委員会」は「内部研究推進委員(5名の幹事で構成)」と「外部研究推進委員」で構成されており、「外部研究推進委員」は、上記5名の外部評価委員の他に、金属系材料研究開発センターの小紫正樹・専務理事, 日本マグネシウム協会の小原久・専務理事, 経済産業省の非鉄金属課長・審議官を務められた塚本修・石炭エネルギーセンター理事長, JFE スチールの主幹であった細谷佳弘・特殊金属エクセル執行役員に就任いただいて、産業界からの助言を仰いだ。

2) 評価方法

評価委員は合宿研究会・研究成果報告会ならびに総括班会議・全体会議に出席して、個々の計画研究や公募研究のみならず、班単位と領域全体としての研究内容や総括班の活動内容を採点・評価した。H24年度から、評価委員による評点ならびに評価コメントを冊子にして配布することによって、評価結果を領域研究者にフィードバックした。また、合宿研究会・研究成果報告会において、高い評価を得た研究者を表彰することによって、領域研究者のモチベーション向上に努めた。外部評価委員には、これまでの合宿研究会・研究成果報告会での評価結果を基にして、事後評価報告書用として下記の評価コメントを頂いた。

(2) 外部評価委員による事後評価用の評価コメント

1) 増本 健・外部評価委員のコメント

(公益財団法人 電磁材料研究所・相談役) [専門分野: 金属工学・材料科学]

- ・東北大学名誉教授, 文化功労者, Acta Materialia Gold Medal
- ・文科省国際局科学官・国際局理工系審査会委員長, 日本金属学会会長, 日本 MRS 会長等を歴任

【評価コメント】 本新学術領域研究は、研究代表者によって発見された新規な強力マグネシウム系軽合金の基礎研究に関するプロジェクトであり、わが国発の次世代金属材料として今後大いに期待される材料である。とくに、主題である濃度変調と構造変調が同時に発現する「シンクロ型 LPSO 構造」の発見は、材料強化の新たな機構として注目されており、その根本的解明が待たれている。本研究プロジェクトは、このシンクロ型 LPSO 構造と形成メカニズムおよびその強化機構の解明を主目的として実施された。事後評価として指摘する点は、本研究プロジェクトでは、1) 物理・化学・工学の広い分野からなる研究者間が連携して、幾つかの先駆的研究成果を挙げていること、2) それらの研究成果を著名なジャーナル誌に数多く発表し、また主題の国際会議を独自に開催して世界に発信する努力をしていること、3) 頻繁に国内会議を開催して、研究グループ内の有機的連携を図ると共に、積極的に若い研究者の育成に努力していること、である。また、研究期間を通じて全体の組織運営が上手に行われ、極めて順調にプロジェクト研究が実施されたことを高く評価したい。本研究プロジェクトの学術的面で大きな成果は、構造解析・理論計算と材料開発プロセスとを融合して材料設計指針を構築して、今後の材料開発に対して基盤的知見を与え、「シンクロ型 LPSO 構造」という新たな材料科学の領域として定着させたことである。今後も引き続きこの研究分野の発展に努力して、日本発の新しいマグネシウム系軽金属を実用材料として実現させることを期待したい。

2) 藤井 保彦・外部評価委員のコメント

(一般財団法人 総合科学研究機構 東海事業センター・参与) [専門分野: 構造科学]

- ・元東京大学物性研究所中性子散乱研究施設長
- ・日本中性子科学会会長, 日本物理学会会長等を歴任

【評価コメント】 本プロジェクトは、スタート時点で事前によく吟味した組織的・戦略的計画を持ち、一貫した方針を持つプロジェクトリーダーの強力な指導力の下で満足すべき成果を創出した。具体的には、この種のプロジェクトでありがちな実験試料の不完全性によるデータの不確定性を避けるため、最初から信頼できる共通試料製作・提供拠点を設置したことである。そして放射光・中性子・電子顕微鏡等の最先端量子ビームを駆使し、理論・シミュレーションとともに、この特異な LPSO 構造のクラスター形成とミクロな原子配置を決定し、マクロな力学特性・機械的強度の強化機構との関係を明らかにした。また人材育成や国際協力プログラムもよく機能し、院生や若手研究者の活発な研究活動を促進し、次世代へのさらなる発展の礎を築いた。この我が国が

リジナルの LPSO Mg 合金が革新的な物質・材料として、ネオジウム磁石(ネオマックス)に続いて世界を席卷することを期待できる。

3) 富田 佳宏・外部評価委員のコメント

(神戸大学 名誉教授) [専門分野:材料力学・計算力学]

- ・神戸大学名誉教授, 日本機械学会フェロー, アメリカ合衆国機械学会フェロー
- ・学術審議会専門委員, 日本材料学会会長, 理化学研究所客員主管研究員等を歴任

【評価コメント】 代表者の強力なリーダーシップのもと, 物理, 化学, 材料, 機械分野の実験と理論・計算科学に関連する我が国最強の研究者を結集した組織的な連携研究により, 世界初のシンクロ型 LPSO 構造材料の学理の探求と実用化に向けて鋭意研究が推進されてきた. 異なる分野間での研究者の密な連携ならびに共通試料の提供が研究を加速させている. その結果, 新材料の開発の基礎知識の体系化や実用化に不可欠な様々なスケールの力学特性評価も推進され, 夥しい数の研究成果が学術会議や学術雑誌において公表され, その高い評価は, 多くの受賞や国際会議の開催, 関連シンポジウムの開催等によっても窺える. 加えて, 更なる発展に不可欠な次世代を担う若手研究者の育成に対するユニークなプログラムの推進ならびに公募班の募集による関連研究のすそ野の一層の拡大もはかられている. このように, 本研究の成果は卓越しており, 我が国発の新材料として今後の展開が大いに期待できる.

4) 佐久間 健人・外部評価委員のコメント

(高知工科大学 東京サテライト 教授) [専門分野:材料工学]

- ・東京大学名誉教授, 高知工科大学元学長
- ・日本工学会副会長, 日本金属学会会長, 超塑性研究会会長, 日本 MRS 理事等を歴任

【評価コメント】 本研究領域は, 領域代表者が開発した高強度マグネシウム合金を素材として, 国内の有力な研究者と協同して研究の展開を行ったものである. その結果, 金属材料学の発展につながる多くの成果が得られたことは高く評価できる. その第 1 は, 高強度マグネシウム合金に現れる特異な構造を有する強化相, 長周期積層型規則構造(シンクロ型 LPSO 構造)の研究である. この LPSO 構造は, 濃度変調と構造変調が同期したものであり, 従来の合金材料の構造には見られなかったものである. 本領域の研究者グループの精力的な取り組みによって, この構造の成因に関する理解が大きく進展したと言える. この構造の成因に関しては, 合金の時効過程において, 金属結合を基本とする構造の中に共有結合の要素をもつ構造がどのようにして形成されるのかという視点に着目すると, 更なる飛躍が計られることになるかもしれない. 第 2 に, 本合金の強化機構解明の過程で, キンクバンド強化の重要性が見出されたことが挙げられる. これは従来, 金属材料の強化機構として広く採用されてきた転位論による強化機構とは異なる巨視的な機構である, LPSO 構造を有する Mg 合金のみならず, 層状構造を有する多くの材料の強化機構を理解する上で有力な考え方になるものと今後の発展が期待される. 第 3 に開発された Mg 合金は, 降伏強度 400 MPa 以上で, 延性にも富むという特性を有しており, 次世代軽量高強度 Mg 合金として実用化を見すえた合金である. 当初の目標通り, この合金が各種構造用材料として実用化されれば, 日本発の新規合金として産業界に大きなインパクトを投げることになるであろう. 最後に本領域の研究活動の成果として特筆すべきことは, 若手の育成である. 多くの大学の優秀な研究者が参画して共同研究が行われたことにより, 各大学や研究機関等の若手研究者に刺激を与え, 次世代を担う有能な若手研究者が育ってきている. 金属材料分野が, 新合金の発見などの話題が少なく, 隆盛期を過ぎたと言われる中で, 本研究領域の若手研究者の成長が, 次世代の金属材料学をはじめとする材料科学の発展を支えることにつながるであろう.

5) 馬越 佑吉・外部評価委員のコメント

(大阪大学名誉教授) [専門分野:材料強度学・結晶塑性学・生体組織工学]

- ・大阪大学名誉教授, 大阪大学元副学長
- ・日本鉄鋼協会副会長, 日本金属学会理事, 日本学術会議材料デバイス専門委員会委員長等を歴任

【評価コメント】 領域代表者の河村教授が開発した熊大合金と呼ばれる Mg-遷移金属-希土類元素系合金は, Mg 合金の常識を覆す驚異的な力学特性を示し, 軽量構造材料に世界的なイノベーションをもたらした. その主役はユニークなシンクロ型 LPSO 構造相の形成にある. 本領域では, この新奇なシンクロ型 LPSO 構造に注目し, 構造科学, 形成メカニズム, 力学特性と新強化原理を主題とした 3 班を設置し, 計画研究と公募研究により本課題の学理の構築を行った. 物理, 化学, 工学の異分野の融合, 先端計測・解析技術と計算科学の連携, 共通試料の提供等々の特徴とともに総括班主導により各班間, 班内の研究連携, 討論が極めて活発に実施された. 各学協会でのシンポジウム開催, 特集号編集等々による正にオールジャパンにより本研究課題目標が達成された. 例えば, LPSO 相がキンク帯形成による高強度・延性に寄与するのみならず, 本 Mg 系合金の結晶粒微細化とランダム方位分布をもたらし, LPSO 相が単繊維強化的に働くとした新強化機構も提唱された. 本領域の成功は, 領域代表者が新奇な Mg 系合金による革新的軽量材料開発を幹に, それを絶えず意識して総括班会議を中心に各班研究者によるシンクロ型 LPSO 構造科学の深化を主導した点にある.