

【領域番号】 2308

【領域略称名】 シンクロ LPSO

【領域代表者（所属）】 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）

研究領域名: 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 —

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）:

年度	H23 年度	H24 年度	H25 年度	H26 年度	H27 年度
交付額	254,700,000 円	210,110,000 円	207,025,000 円	223,000,000 円	221,600,000 円
備考	追加配分含む	公募研究含む	公募研究含む	予定額	予定額

(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組織的な異分野融合研究を推進する。
- ② J-PARC や SPring-8 等の大型量子線施設を活用した高精度構造解析の「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はしばしば観察され、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)）。一般的には、濃度変調や構造変調は独

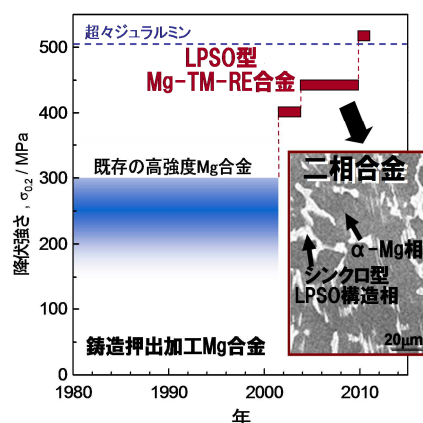


図1 我が国で開発された革新的LPSO型Mg合金

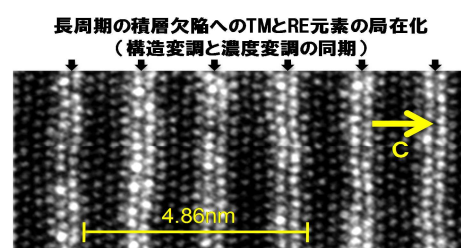


図2 シンクロ型LPSO構造（HAADF-STEM像）

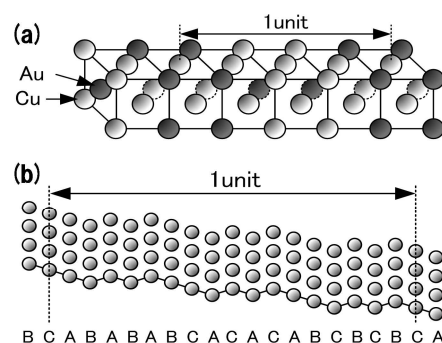


図3 (a)長周期規則構造（Cu₃Au）
(b)長周期積層構造（18R）

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。

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。

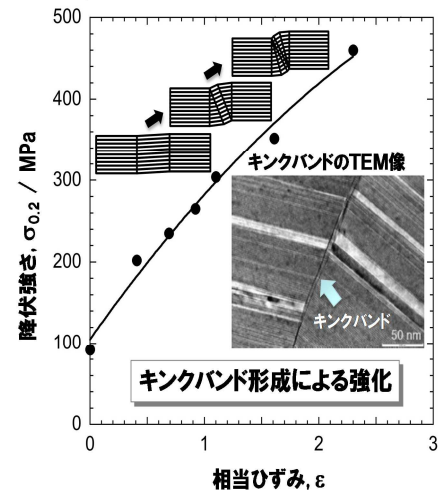


図4 シンクロ型LPSO構造の降伏強さの加工率依存性

(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って熾烈な競争を繰り広げ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、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、H24年度から新たに加わった公募研究の研究代表者8名であり、総勢49名の研究者が24研究機関から結集したオールジャパンの体制となっている。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、正しく異分野が融合した研究組織となっている。また、平均年齢が45.4歳(H25年6月現在)と新進気鋭の研究者が中心であることから、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レスの高強度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)の解明をもたらし、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。