

招待講演

2F01

三大材料の変形機構とミルフィーユ構造による高強度化

(東大院・工) 阿部英司

2018 年度より、新学術領域研究「ミルフィーユ構造の材料科学 - 新強化原理に基づく次世代構造材料の創製 -」がスタートした。本新学術「MFS 材料科学」では、前新学術研究「シンクロ LPSO」で明らかとなった LPSO 構造の特徴である「微視的な硬質層・軟質層の相互積層による層状構造」に着目し、これをより積極利用した「ミルフィーユ構造材料」へと発展させ、新しい領域構築を目指す。LPSO 型マグネシウム合金で見いだされた「キンク強化現象」のメカニズム解明から理論構築までを、材料、力学、物理、化学、数学という異分野融合による知の結集により実現し、硬質・軟質層状構造のキンク強化という新たな学問体系の構築へとつなげる。新しい「キンク強化理論」に基づき、Ti 系、Al 系を含む新規金属系、セラミックス系および高分子系材料 - 三大材料 - への展開を図る。



Fig. 1 ミルフィーユ構造キンク強化法の確立へ

Mg 合金における特異な層状構造とキンク強化

Mg は、原子最密面が 2 層周期 (AB...) で積層した六方最密充填構造 (*hcp*) 構造をとる。最密面が 3 層周期 (ABC...) で積層した面心立方構造 (*fcc*) では、(111) 最密面が 4 つのバリエーションを持つのに対し、*hcp* 構造の (0001) 最密面は単一バリエーションになってしまう。この構造異方性ゆえ、*hcp*-Mg 合金では「多結晶体の連続変形には独立なすべり系が 5 つ以上必要」とするフォン・ミーゼス条件が満たされず、一般に塑性変形能が乏しい。また、すべり面が単一である *hcp*-Mg 合金では、転位同士の交切による加工硬化や、析出相分散による転位ピンニング等の強化機構が *fcc* 系合金ほど顕著に発現しにくい。これらの理由により、高強度 Mg 合金の開発はなかなか大きな進展がみられなかった。

近年、世界的な注目を集めるに至った高強度 LPSO 型 Mg 合金には、Mg 本来の *hcp* 構造とは異なる新奇な長周期構造 (シンクロ型 LPSO 構造: Fig. 2) が形成されている。それゆえ、発見当初は LPSO 構造特有の原子配列に起因して高強度が実現していると考えられたが、実際には LPSO 構造を形成しただけでは合金は強化されない。LPSO 構造相を含む Mg 合金に高温加工を施し、合金中に高密度のキンク領域を導入することによって初めて高強度が発現する [1, 2]。常識的には、異方性が強い LPSO 結晶の格子回転を伴うキンク形成は、強度劣化の原因とされる

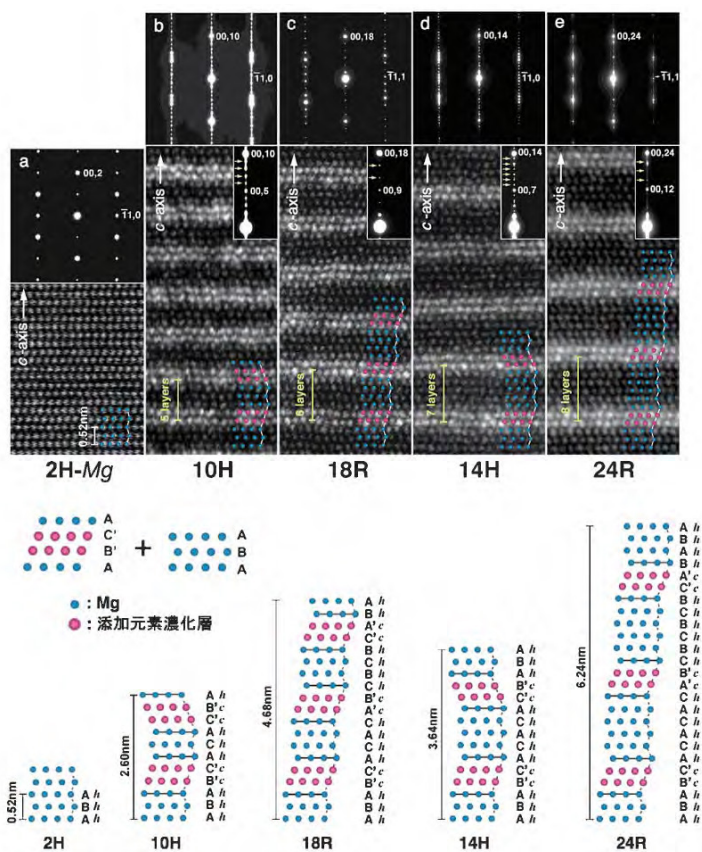


Fig. 2 Mg-1at.%Zn-2at.%Y 合金中に形成された長周期構造多形の電子顕微鏡原子像 (上段) と、それらの構造モデル (下段)。長周期の積層秩序 (Stacking-order) と同期した化学的秩序 (Chemical-order) を持ち、シンクロ型 LPSO 構造と名付けられた。

ことはあっても、材料強化に寄与しているとは考えにくいであろう。LPSO 型 Mg 合金がキンク形成によって強化されることは、予想外の発見であった。最近の研究によれば、キンク形成が LPSO 型構造に限ったことではないことも明らかとなってきた。LPSO 型 Mg 合金系で添加元素量を抑えた希薄系では、LPSO 構造の構成ブロックである添加元素が濃化した積層欠陥 (SESF) が *hcp*-Mg マトリクス中にまばらに、かつ無秩序に配列する層状構造が形成される。このように無秩序かつ疎な層状構造においてもキンク形成が生じ、高強度が発現するという興味深い現象が判明しつつある。

その詳細な原子配列が解明されたシンクロ型 LPSO 構造は、添加元素がクラスター形成した硬質層 (強結合層) と、*hcp*-Mg 構造である軟質層 (弱結合層) がナノメートルスケールで積層した層状構造とみなせる (Fig. 3)。この観点から、上述の「無秩序かつ疎」な層状構造は、硬質層である SESF が軟質 Mg マトリクス中に無秩序分散された状態であると言える。これを受けて、硬質層/軟質層からなる層状構造を、シンクロ型 LPSO 構造を内包する上位概念である「ミルフィーユ構造」と呼称し、キンク形成により強度発現するミルフィーユ構造の臨界条件・普遍性を追求することで、構造材料設計の新しい指針が打ち出せる。例えば、キンク変形を起こす硬質層分散条件を見極め、その数密度減少が図れば添加元素量の減少、すなわちより軽量の合金設計へと直結する (Fig. 4 上段)。さらに、「ミルフィーユ構造」「キンク強化」の積極的利用は他の金属系材料、セラミックス材料および高分子系材料への展開も可能であると期待できる。実際、キンク現象・形態そのものはすでに多数の高分子系物質で確認されている (Fig. 4 下段) のだが、これを利用した強化の試みは未だ報告例がない。金属材料で見いだされた強化法のアプローチが、高分子系材料の強化にまでつながれば、真に分野横断的な興味深い展開が図れる。

従来、金属系における構造材料設計においては、多結晶材料の連続かつ安定な塑性変形には「結晶構造には独立な5つのすべり系が必要」とするフォン・ミーゼス条件は金科玉条であった。ミルフィーユ構造では容易すべり系が層面内に限定されているにもかかわらず、キンク形成の積極利用によって空間充填を満たしながら高強度化を達成する。高分子材料では、マイクロせん断変形 (すべり面) が分子鎖方向に限定されている[3]ことを考えると、元来キンク変形を生じやすい物質であると言えよう。キンク強化原理の普遍化は、構造材料創製の可能性を飛躍的に拡大しうる。

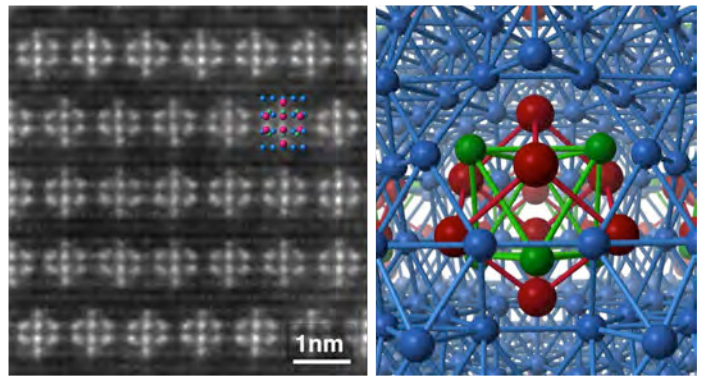


Fig. 3 シンクロ型LPSO構造中に形成されたZn-Y原子クラスターの電子顕微鏡原子像(左)と、その構造モデル(右)。このクラスター形成により元素濃化層が熱力学的に顕著に安定化される。

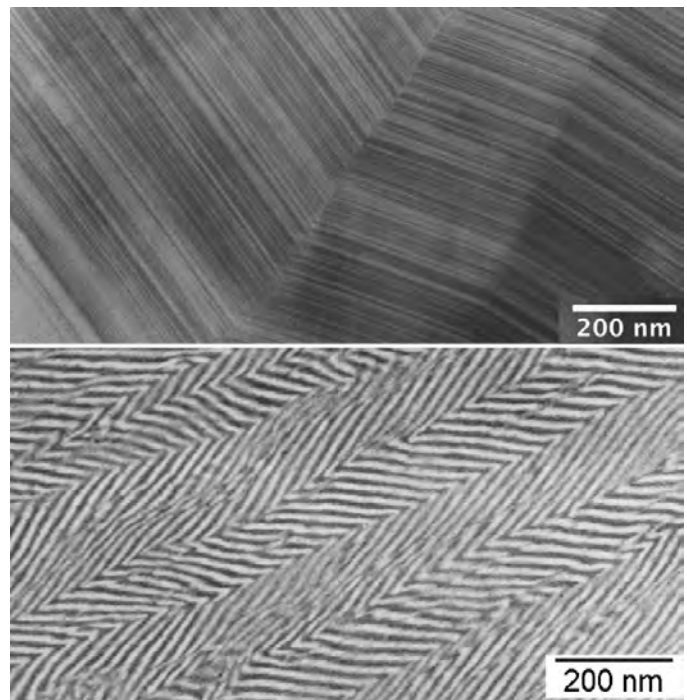


Fig. 4 ミルフィーユ構造キンク変形組織の電子顕微鏡像。上段は希薄Mg合金、下段はスチレン-ブタジエンスチレン(SBS)共重合体。

- [1]河村能人：構造材料イノベーションー日本で開発された長周期積層構造 (LPSO) 型マグネシウム合金ー, 学術の動向, 19, pp. 36-43, (2014).
- [2]阿部英司, 相澤一也：シンクロ型マグネシウム合金の結晶構造と変形格子ダイナミクス, 金属, 86, pp. 464-471, (2016).
- [3]成沢郁夫：高分子材料の強度と破壊靱性, 日本金属学会会報, 27, pp. 650-656, (1988).