



# MFS MATERIALS NEWS

MFS  
MATERIALS

ミルフィーユ構造の材料科学



2018~2022年度 文部科学省科学研究費助成事業 新学術領域研究 (研究領域提案型)

## Kink、造って、見る

### CONTENTS

- p2 Online Interview 01  
セラミックスのキंकを極める  
池田賢一(北海道大学) × 江村 聡 (NIMS)
- p4 Online Interview 02  
白色 X 線でキंकを探る  
宮澤知孝(東京工業大学) × 安藤大輔(東北大学)
- p6 Latest News / 最新研究ニュース  
櫻井伸一(京都工芸繊維大学)、山崎重人(九州大学)、  
山崎和仁(神戸大学)、萩原幸司(大坂大学)、  
山崎倫昭(熊本大学)、藤森厚裕(埼玉大学)、  
増田紘士(東京大学)、池田賢一(北海道大学)
- p8 Activity / MFS 活動報告、Topics、編集後記



vol. **05**

## ONLINE Interview 01 / オンライン インタビュー 01

# セラミックスのキンク変形を極める — 強磁場を利用した配向制御 —

硬質層と軟質層を有するMAX相セラミックスのキンク変形挙動やキンク強化について研究されている北海道大学池田賢一先生に、磁場中スリップキャスト法という製造手法やMAX相中のキンクについてお話を伺いました



A04-1 研究協力者  
A04 公募研究代表者  
**池田 賢一**  
北海道大学 准教授

2014年から現職。主な研究テーマは、結晶性材料の力学特性と微細組織の関係ならびに金属材料の組織形成過程の解明。領域内ではA04班に所属し、MAX相セラミックスTi<sub>3</sub>SiC<sub>2</sub>配向焼結体を用いた力学特性の方位依存性とキンク変形の寄与を明らかにすることを旨とするとともにキンク強化(強靱化)したセラミックスの創製にチャレンジしている。

## 聞き手

A04-1 研究分担者  
**江村 聡**  
物質・材料研究機構  
主幹研究員

2016年から現職。専門は金属組織学。主な研究テーマは塑性加工や熱処理を利用したチタン合金などの金属材料の組織制御やそれによる機械的特性の向上。領域内ではA04-1班に所属し、Ti-Mo合金等のβ型チタン合金に塑性加工や熱処理によって層状二相組織(組織制御型ミルフィユ構造)を導入し、チタン合金におけるキンク変形やキンク強化の可能性について検討を進めている。



## ONLINE Interview 01

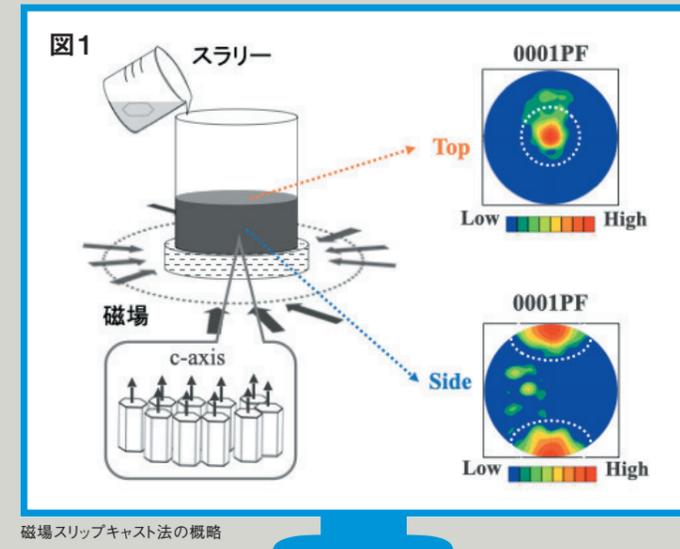
江村: MAX相セラミックスについて教えてください。

池田: MAX相セラミックスというのは、 $M_{n+1}AX_n$ という化学式を持つような三元化合物のことです。Mがチタン(Ti)などの遷移金属元素、Aは周期律表で第13-18族に属する元素の中から、アルミニウムやシリコン(Si)などの金属・半金属元素、Xは炭素(C)か窒素です。私が行っている研究ではTi<sub>3</sub>SiC<sub>2</sub>を対象としています。金属結合と、TiとSi、TiとCの共有結合の強度が違うことからユニークな特徴を持ちますが、さらにTi-SiとTi-Cの結合強度の違いからいわれる、軟質層と硬質層が単位格子中に存在することになります。

江村: 今回の研究に至った経緯を、教えてください。

池田: MAX相でキンク変形が起こることは分かっていたので、最初は結晶の向きがランダムな焼結体を使って調べていました。そのころ参加した学会で、研究室の直属の先輩であるNIMSの森田先生にMAX相を扱いはじめたこととお話したところ、NIMSの目先生のグループで磁場中スリップキャストと放電プラズマ焼結(SPS)<sup>1</sup>を使って配向、つまり、結晶の向きをそろえたMAX相を作っていることを教えてくださいました。そこでサンプルをつくらせてもらいました。図1は磁場中スリップキャスト法の説明です。セラミックスの原料となる粉末と、エタノールなどの溶媒を混合して、スラリーと言われるどろどろの液体をつくります。それを、アルミナなどの多孔質のモールドに流し込むと、溶媒が流出して固体になります。これをNIMSの強磁場装置の中で、12テスラの磁場をかけて行います。Ti<sub>3</sub>SiC<sub>2</sub>には結晶のc軸方向と磁場をかける方向が垂直になるという性質がありますので、c軸が上に向くように回転磁場をかけました。図1では磁場が回転しているように見えますが、実際は一方向に磁場をかけて、モールド自身を回転させながら12時間以上かけて行っています。その後SPSを用いて焼結体を得ます。得られた焼結体の結晶方位解析を行い、図1の0001正極点図に示すようなc軸配向を確認しております。

江村: これまでに、得られている成果についてご紹介ください。



磁場スリップキャスト法の概略



変形後の組織

池田: 最初に、作製した配向焼結体を用いて室温でビッカース硬さ試験を行い、配向による強度の違いや圧痕付近の組織を調べました。そこで圧痕付近にすべり、キンク、デラミネーション<sup>2</sup>などが起こっていること、高荷重をかけてクラックを発生させると、配向方位によってクラックの発生挙動が変わることが、分かりました。配向に対して90°方向(図1の水平方向)から荷重を加えるとクラックは発生しませんでした。圧痕下で発生するキンクが、クラックの発生を抑えているのではないかと考えており、これもキンク強化のひとつではないかと思えます。次に配向したセラミックスに高温でも、キンク変形が起こるのかどうかについて調べました。配向の異なる材料を1200°Cで高温圧縮したところ、予想通り、90°の方向で圧縮後多くのキンクが存在していることが分かりました。それで、キンクを定量評価するために大学院生が頑張って、キンクの密度の測定や、キンクと共に生じるデラミネーションの量を測定しました。すると、デラミネーションの量は圧縮の最後の方で急激に上昇するのに、キンクは降伏応力付近で、すでに入っているのが分かりました。つまり、降伏応力付近まで圧縮すれば、デラミネーションはあまり起こらないが、キンクがある程度入った材料ができるのではないかと、ということが示唆されます。図2が変形後の組織ですが、図中に横向き矢印で示しているように、線に見えているのがキンク界面で、同じような色で示されているのが元の結晶粒です。結晶方位の解析によって、これらのキンクがマグネシウム合金のLPSO相と同じようにc軸に垂直な回転軸と様々な回転角を持っていることが分かりました。

江村: LPSO相の場合ですと、電子顕微鏡レベルの微細なキンクが入る一方で、大きなバルク体として見た場合にもキンクが入っている、ハイブリッドな変形を示しますが、MAX相についてもそのように変形しているのですか?

池田: 界面では多くの転位の集積が見えていますので、拡大していくと、LPSO相のような原子レベルの構造があると思います。界面以外ではかなり大きな変形も起こっていますから、いろいろなキンクの形、それに近いような形になっているのではないかと思います。

江村: 金属や高分子だとキンク強化ですが、セラミックスの場合はどちらかというとキンク強化ではないとも言われています。

池田: 配向したセラミックスは靱性値が上がると言われていますので、そこにキンクの効果を取り入れたらいいのではないかと考えています。キンクを導入したのに対して破壊靱性の評価を行って、実際に靱性値が上がるという結果が得られればハッピーだと思っています。

江村: 最後に、今後どのように研究を進めるかについてお話しください。

池田: ここ1年半くらいポーラス材の研究も行っています。NIMSの鈴木先生にいろいろ教えていただきながら、磁場中スリップキャストを行う際にスラリーに球状高分子のPMMA(ポリメタクリル酸メチル)をスパーサーとして入れることで、焼結後にPMMAに起因した気孔が導入されます。焼結体を圧縮しますと、ポーラス材でもキンクが発生します。配向ポーラス材を作製することができたことにより、キンクを導入した配向緻密材との力学特性の比較によってキンク強化(強靱化)を明らかにできるのではないかと考えております。その他には、キンク自体を精密に見ることですね。マグネシウム合金で行われているように、MAX相でも高分解能電子顕微鏡法によるキンク界面の原子レベルの構造などを、明らかにしたいと思っています。また、Ti<sub>2</sub>AlCなどの他のMAX相についても検討したいと考えています。

## ◆用語解説

\*1 放電プラズマ焼結 (Spark Plasma Sintering: SPS)  
機械的な加圧とパルス通電の加熱により、焼結を行う手法のことである。一般的な焼結に用いられる機械的および熱的エネルギーに加えて、パルス通電による電磁的エネルギーや、放電プラズマエネルギーなどを複合的に焼結の駆動力とする特徴を有していることから、焼結時間の短時間化が達成できる。セラミックスだけではなく、金属系材料、ポリマー材料など幅広い材料に用いられている。

\*2 デラミネーション (Delamination)  
MAX相セラミックスやグラファイト、雲母などの層状物質の場合、層間の結合力が弱いことから、層の法線方向に垂直に力が加わると、層間での割れ(剥離)が生じることになる。MAX相セラミックスのキンク変形では、デラミネーションが伴うことが報告されており、その抑制や利用によりキンク強化へ繋げることを目指した研究が行われている。

## ONLINE Interview 02 / オンライン インタビュー 02

# 白色X線で探る キンクの三次元的な配置と局所ひずみ分布

放射光<sup>\*1</sup>による局所応力評価法を用いて、ミルフィーユ構造材料のキンク形成機構の解明に挑んでいる  
東京工業大学宮澤知孝先生に、これまでに明らかになったことおよび今後の展望についてお話を伺いました



A02 公募研究代表者  
**宮澤 知孝**  
東京工業大学 助教

2014年から現職。主な研究テーマは放射光による金属材料の機械特性評価および組織解析。領域内ではA02班に公募研究にて参加し、LPSO型Mg合金におけるキンク近傍での局所ひずみを放射光X線にて実測することでキンク形成機構の解明を進めている。

## 聞き手

A01-2 研究協力者  
A01 公募研究代表者  
**安藤 大輔**  
東北大学 准教授

2021年より現職。専門は金属組織学・材料強度学。領域内ではA01班に所属し、様々な塑性加工法で導入したキンクの形態および分布、数密度を分析し、キンク強化との関係について研究し、特に領域内ではTEM観察を用いたキンクの微視的な観察を担当している。



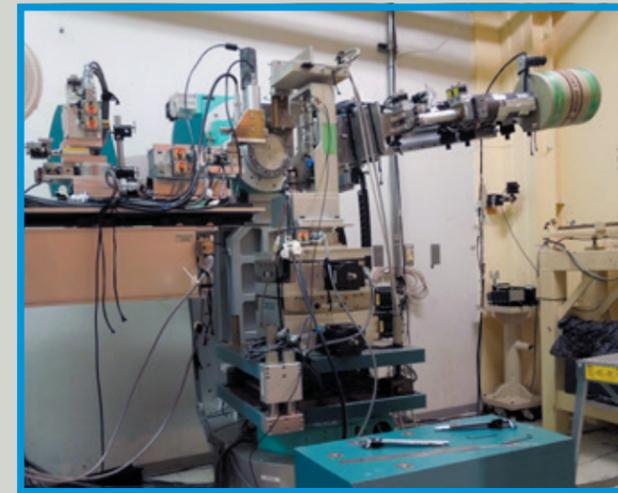
## ONLINE Interview 02

**安藤:**まず、宮澤先生の経歴を教えてください。

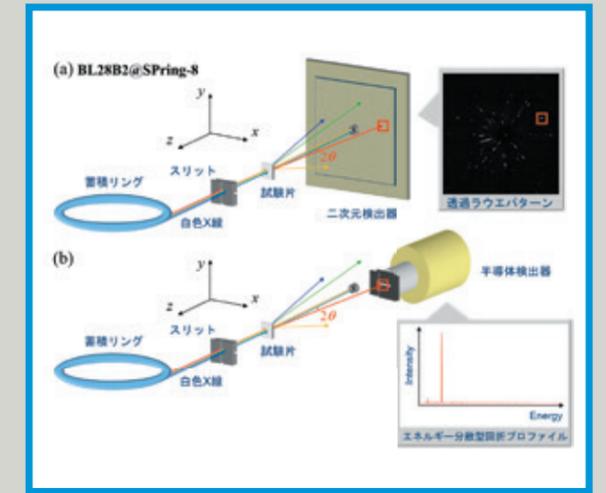
**宮澤:**私は学部時には日本大学物理学科で物性物理を学び、東京工業大学に進学して修士・博士で、銅合金に自己析出する粒子の平衡形状を電子顕微鏡により明らかにする研究に取り組みました。その後学部時代に、高エネルギー加速器研究機構(KEK)の光子ファクトリーで放射光を用いた実験を行ったという経験を買われ、高輝度光科学研究センター(JASRI)でポストドクを2年経験して、6年前に現職の東京工業大学の藤居研究室の助教に就任させていただきました。

**安藤:**次に、どうしてこの研究をはじめようと思ったのかについて教えてください。

**宮澤:**このミルフィーユ構造材料の研究をはじめたきっかけは、所属研究室の藤居教授が新学術領域研究のA03班の班長を務められたことで、その時に初めてLPSO型マグネシウム合金について知ったという状況でした。実際に材料中にキンクが形成する過程を見ていく中で、私が開発を進めている白色X線<sup>\*2</sup>を用いた局所ひずみ測定によって、キンク形成後のひずみ分布を測ることができれば、キンク形成のメカニズム解明に資することができるのではないかと考えるようになりました。そこで、この新学術領域研究の目玉のひとつでもある「若手国内異分野武者修行」を利用して、九州大学の中島・光原研究室に伺いました。同研究室にてSEM内で圧縮試験をしながらキンク形成過程の観察と結晶方位解析(in-situ SEM/EBSD)を行うことで、キンクの形成を適度なところで止めたサンプルを作製し、サンプル内に生じたキンクの局所ひずみ分布を白色X線で分析するという実験を進めることとなりました。その際に、白色X線が透過するような薄い圧縮試験片(W3×t0.4×L4mm)の図面を先生方に見せると、「非常に薄いサンプルだから失敗するかもしれませんが、とりあえずやってみましょう!」ということで実際に圧縮してみたところ、材料がマクロな座屈をすることもなく、材料内部にキンクが順々に形成しながら塑性ひずみを担い変形していくことが分か



実験装置写真



実験装置概略図

りました。あとから聞いた話ですが、本心ではこの薄い試験片形状での圧縮は無理だろうと思っていたそうです。

**安藤:**白色X線で絶対に測定してやるぞ!という気持ちが必要ならば、誰も挑戦しなかったサンプル形状ですよね。挑戦するって大事です。この形状にしたから得られたという結果はありますか?

**宮澤:**このような薄いサンプルでの実験のもうひとつの利点は、サンプル内で結晶粒が表裏を貫いていることで、厚さ方向に結晶粒の重なりがなく、白色X線でのひずみ分布解析の精度がよくなる点にあります。しかし、ここで、また思いがけない結果を得ることが出来ました。これまでに提唱されているくさび型キンクの形成模式図は、二次元で考えているので、1つの結晶粒内の同じ面上に左右で対にくさびが向くように描かれますが、今回の実験ではそれが表裏にペアでできていることが分かりました。このように配置されるのは、キンク形成による残留ひずみを三次元的に緩和するように形成されているのではないかと考え、まだ対になっていない単独のキンクと比べた内部残留ひずみの違いを白色X線で調査することにしました。ここで、白色X線のビームプローブ径<sup>\*3</sup>は10μm角であり、今回実験に用いた一方凝固材を薄くした試料に形成されるキンクにはちょうどいいサイズ感であったことも幸いし、いいデータが取れています。単独のくさび型キンクでは、くさび先端では引張、根本では圧縮のひずみが残留していること分かり、かつ中央ラインを挟んでそのひずみ分布が非対称であり、表裏でペアのくさび型キンクの場合でも各々が同様のひずみ分布を持っていることが分かりました。

今後は、このペアがどのような相互作用をもって形成されるのかを調べていくつもりですが、キンクの周りにはひずみが残留しているというエビデンスは示すことができたと思っています。

**安藤:**この新学術領域研究の魅力について、教えてください。

**宮澤:**キンク強化という現象は、まだわからないことが多いのが現状ですが、もしかしたら今やっている実験で教科書が変革されるような何か大きなことにつながるのではないかとワクワク感が

あることが魅力です。また、金属・セラミックス・ポリマーと材料の垣根を超えた理論を構築しようという挑戦の一端に自分に関われるというのは研究者として嬉しく思っています。

**安藤:**最後に、今後宮澤先生が挑戦していきたいことはなんですか?

**宮澤:**今後、実験的な側面から挑戦したいことは、キンクが形成する前から、形成が終わるまでの内部でのひずみのその場観察をすることです。すでに、SPring-8で圧縮試験をしながら白色X線を用いて材料内部でどのようなひずみ分布が起きて、その分布に対してどのように形成されるのかを調べる実験をJASRIの木村先生と、それらキンクの三次元形状をX線CT法で捉える実験の準備をJASRIの上相先生と進めています。

また、放射光X線が金属材料研究にとって有用なツールであることを、もっとアピールしていきたいです。金属はX線が透過しづらい材料なので、現状では実像が見える電子顕微鏡観察を用いるのが主流です。特に最近ではSEMの性能が非常に良くなっていますので、放射光X線での研究はなおさら高等だと思われがちですが、私たちがコツコツと放射光X線を使った色んな実験結果を出し、さまざまな現象の解明をしていくことで、材料研究をするときに電子顕微鏡だけでなく放射光を使ってみようかなと思っていただける土台をつくっていきたいです。

## ◆用語解説

- \*1 放射光  
ほぼ光速で直進する電子が、その進行方向を磁場で変えられた際に発生する電磁波のことで、この電子のエネルギーが高いほど指向性の良い明るい光となり、また、電子のエネルギーが高く、進む方向の変化が大きいほど、X線などの短い波長の光を含むようになる。
- \*2 白色X線  
太陽光が可視光の波長領域で連続的なスペクトルを持つことから白い色として認識されるため白色光と呼ばれる。これにない、X線の波長領域で連続的なスペクトルを持つX線を白色X線と呼び、高速で運動する電子の制動放射によって生じる。
- \*3 ビームプローブ径  
試料に入射するX線の断面サイズ。

# Latest News / 最新研究ニュース



## 硬軟2成分からなるラメラ状ミクロ相分離構造の一軸延伸によるキンク構造の発現とネッキングとの関係

Relationship Between Formation of Kink Structure and Necking of a Specimen Comprising Hard and Soft Lamellar Microdomains Under Uniaxial Stretching  
Journal of the Society of Materials Science, Japan, 70, 17-24 (2021). DOI:10.2472/jmsm.70.17

A04 公募研究代表者  
櫻井 伸一  
京都工芸繊維大学 教授

我々は硬軟2成分からなるラメラ状ミクロ相分離構造を形成するブロック共重合体に注目してキンク形成に関する研究を行っている。室温で軟質なゴム状ラメラと硬質なガラス状ラメラが交互に積層した構造を持つブロック共重合体フィルムを一方に延伸するとキンク構造を発現できるため、キンク導入による高分子材料の強化の可能性が期待されている。本研究では、このようなブロック共重合体フィルムを一軸延伸しながら、2次元小角X線散乱パターン(2d-SAXS)の測定と応力の計測とを同時に行い、延伸によるキンクの形成と応力の変化の対応関係を考察した。また、キンクの形成とネッキング(左図)の関係を示すことを目的に、マイクロビームを用いた2d-SAXSパターンの測定を行った(右図)。その結果、ネッキング終端部の極近傍では、ラメラ構造はほとんど変形を受けておらず、その先の狭い領域でナノ構造が急激に変化しキンクが形成されていることがわかった。

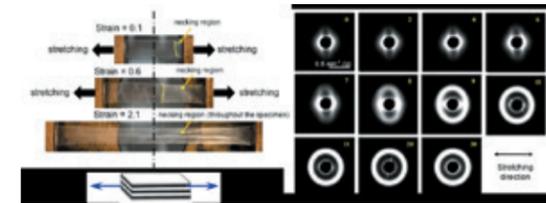


図 ブロック共重合体フィルムの一軸延伸とμビームSAXSパターン



## Mg-Y-Zn系LPSO構造形成過程における構造相変態と拡散相変態の関係

Kink Formation Process in Long-Period Stacking Ordered Mg-Zn-Y Alloy  
Acta Materialia, 195, 25-34 (2020). DOI:10.1016/j.actamat.2020.04.051

A03-1 研究協力者  
山崎 重人  
九州大学 准教授

長周期積層構造を有する $Mg_{95}Zn_5Y_0$ 合金多結晶一方凝固材における圧縮変形中のキンクバンド形成過程を調査した。走査型電子顕微鏡(SEM)および電子後方散乱回折分析によるその場圧縮観察から、表面凹凸を伴うキンク形成前に、局所的な結晶配向回転を伴う領域の出現が見出され、これをpre-kink(プレキンク)と命名した。図は試料表面のSEM像、および白枠領域内に対応する結晶回転マップで、変形前から変形中期までは表面凹凸が目立った変化は見られないが、結晶回転量は変形初期から変形とともに大きくなっていることが確認できる。観測されたプレキンクは3つの境界によって区切られ、透過型電子顕微鏡観察から、プレキンク境界は通常のリッジキンク境界と同様の刃状転位列からなる亜粒界であり、その両端は母相内でターミネートしていること、さらに、完全に可逆的ではないもののプレキンク境界は弾性的に移動することが確認された。

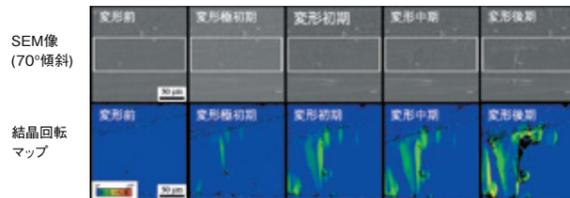


図 Mg-Zn-Y LPSO合金におけるキンク形成過程



## Hill型関数による1次元カタストロフィックシフト過程中的KCC解析非平衡状態におけるダグラステンソル

KCC analysis of a one-dimensional system during catastrophic shifts of the Hill function: Douglas tensor in the non-equilibrium region  
International Journal of Bifurcation and Chaos, 30, 2030032-1 - 2030032-13 (2020). DOI:10.1142/S0218127420300323

A03 公募研究代表者  
山崎 和仁  
神戸大学 講師

非線形力学系の平衡状態が、下図の様な屈曲形で分岐図表現されることは、様々な自然現象で知られている。例えば、環境変化に伴う生物個体数の急激な変化といった生物現象から、応力変化に伴う屈曲現象といった物理現象まで様々である。屈曲形では、支配パラメタ(例えば応力値)などが増加から減少に転じた場合、同じパラメタ値でも系の状態が質的に異なる(座屈など)ヒステリシス現象が観察される。この時、系はある平衡状態から別の平衡状態へと遷移するので(A1→A2など)、その遷移中は非平衡状態にある。実際の自然現象は遷移中の非平衡状態にあることが多いので、その安定性解析は重要である。下図において、平衡状態が「線」で表現されるとすれば、非平衡状態はその周りの「面」として表現される。下図の「面」の白黒パターンの違いは安定性の種類の違いを反映する。現象が異っても平衡状態の「線」は同形であることが多いが、非平衡状態の「面」のパターンは現象に応じて異なることがわかった。さらに、この違いはダグラステンソルによって解析的に示すことができることがわかった。

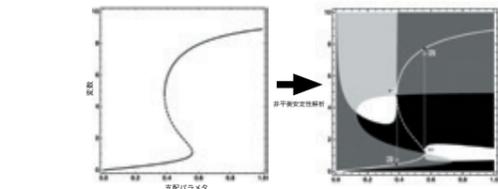


図 Hill型関数で記述される座屈現象などの非平衡安定性解析



## 荷重軸方位により変化するMg基LPSO相中のキンク帯の形成挙動

Loading orientation dependence of the formation behavior of deformation kink bands in the Mg-based long-period stacking ordered (LPSO) phase  
Materials Transactions, 61, 821-827 (2020). DOI:10.2320/matertrans.MT-MM2019001

A02-1 研究代表者  
萩原 幸司  
名古屋工業大学 教授

新規軽量高強度材料として実用化が進んでいるMg/LPSO複相合金にて高強度と延性が共存する理由として、LPSO相に形成する特異な「キンク変形帯」の寄与が注目されているが詳細は未だ不明である。本論文は一方方向性凝固によりLPSO相単相材の組織制御を行うことで、LPSO相の塑性挙動の結晶方位依存性を世界に先駆けて明らかにしたものである。降伏応力のみならず、加工硬化挙動までも極めて強い方位依存性を示し、その起源がキンク帯形成頻度の違いに由来することを明らかにした。本結果より、組織制御によりキンク帯の形成挙動、すなわち「キンク強化」を通じたLPSO相の強化挙動を制御できる可能性が示唆された。

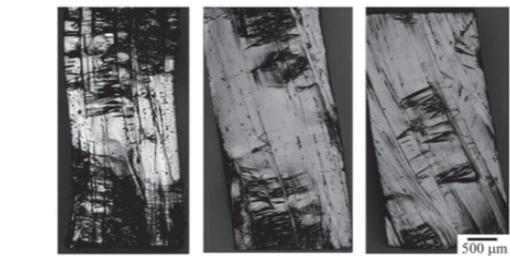


図 一方方向性凝固LPSO相結晶における変形組織の荷重軸方位依存性



## Mg合金の高温酸化挙動の調査および不燃性発現機構の解明

Classification of high-temperature oxidation behavior of Mg-1 at% X binary alloys and application of proposed taxonomy to nonflammable multicomponent Mg alloys,  
Corrosion Science, 174 (2020) Article 108858. DOI:10.1016/j.corsci.2020.108858

A01-1 研究代表者  
山崎 倫昭  
熊本大学 教授

本領域研究ではキンク強化原理が働く「ミルフィーユ構造を有するMg合金の創製」を担当しているが、開発したMg合金をユーザーの方に使って頂くために重要となる防食技術や不燃化技術といった周辺技術の開発も並行して進めている。本稿では、熊本大学MRC助教の井上晋一先生が中心となって進めているLPSO型Mg合金への不燃性付与技術開発に関する論文を紹介したい。Mg-1at% X二元系合金の大気中における発火温度と形成される高温酸化皮膜の形状を系統的に調査することで、Mg合金の融点を超える温度での高温酸化皮膜形成は下図に示す六つの挙動に分類されることを明らかにした。この分類方法を開発合金に当てはめると、LPSO型Mg-Zn-Y合金ではThermally Grown型のMgO皮膜ではなくThermal Barrier型のY<sub>2</sub>O<sub>3</sub>皮膜が形成されることで外部からの酸素供給が遮断され、高い不燃性を発現することがわかってきた。今後も開発合金の応用を意識した基礎研究を継続していきたい。

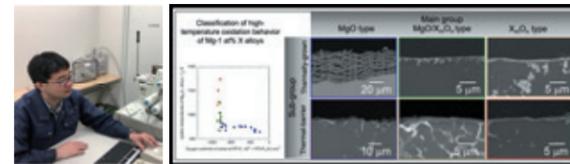


図 筆頭著者の井上晋一助教(左)と六種類の高酸化皮膜(右) 図



## ジアセチレン含有鎖による粒子間架橋を備えた高秩序性「ナノ・ミルフィーユ」硬軟粒子交互積層体の創出

Creation of Highly Ordered "Nano-Mille-Feuille" Hard/Soft Nanoparticle Multilayers with Inter-Particle Cross-Linking by Diacetylene-Containing Chains  
Langmuir, 36, 5596-5607 (2020). DOI: 10.1021/acs.langmuir.0c00782

A04 公募研究代表者  
藤森 厚裕  
埼玉大学 准教授

粒子径5nmの高分子ナノ粒子と酸化物無機ナノ粒子の「単粒子膜」を其々調整し、これらを基板上に交互に積層することで、シングルナノ厚みの繰り返し周期を有する、硬軟の層状組織を生み出すに至った。高分子層を軟質層、無機ナノ粒子層を硬質層とみなした。この「ナノ・ミルフィーユ構造体」は、其々の単独成分の粒子積層構造よりも高秩序性を有することが示された。更に、この構造体に2.5nmのキンク位相差を導入し、その後で延伸変形を施すと、キンクの存在が構造維持機能を誘起することが判明した。これは高分子と、表面を有機分子鎖で修飾した無機粒子間の界面摩擦の影響であると推察された。

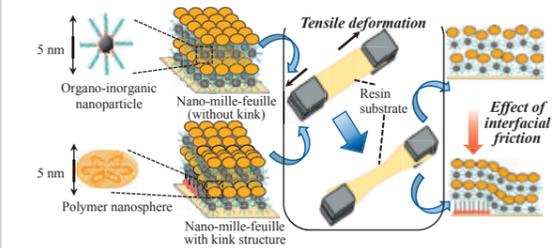


図 キンク導入ナノミルフィーユの変形に伴う秩序維持特性の評価

新規軽量高強度材料として実用化が進んでいるMg/LPSO複相合金にて高強度と延性が共存する理由として、LPSO相に形成する特異な「キンク変形帯」の寄与が注目されているが詳細は未だ不明である。本論文は一方方向性凝固によりLPSO相単相材の組織制御を行うことで、LPSO相の塑性挙動の結晶方位依存性を世界に先駆けて明らかにしたものである。降伏応力のみならず、加工硬化挙動までも極めて強い方位依存性を示し、その起源がキンク帯形成頻度の違いに由来することを明らかにした。本結果より、組織制御によりキンク帯の形成挙動、すなわち「キンク強化」を通じたLPSO相の強化挙動を制御できる可能性が示唆された。

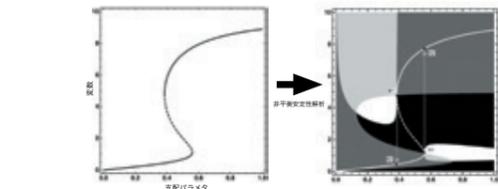


図 一方方向性凝固LPSO相結晶における変形組織の荷重軸方位依存性



## ジルコニアセラミックス単結晶マイクロピラーの変形機構

Ferroelastic and plastic behaviors in pseudo-single crystal micropillars of nontransformable tetragonal zirconia,  
Acta Materialia, 203, 116471 (2021). DOI: 10.1016/j.actamat.2020.11.013

A02 公募研究代表者  
増田 紘士  
東京大学 助教

タービンブレード用の熱遮断コーティングとして利用される代表的な酸化セラミックスである、4.5mol%イットリア安定化ジルコニア (ZrO<sub>2</sub>-4.5 mol% Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) の変形挙動を、室温における単結晶マイクロピラー圧縮試験によって評価した。本研究では、軟質モードの{001}<110>すべり (CRSS:2.4 GPa) および硬質モードの{101}<101>すべり (CRSS:4.2 GPa) による塑性変形と、ナノ双晶ドメインのスイッチングによる強弾性変形が確認された。特に、圧縮軸が<111>方向に近い方位範囲では、Schmid因子が0.5に近い最大3種類の{001}<110>軟質モードによる多重すべりが発生し、連続的な結晶方位回転を伴う「回転型キンク」が形成した。これは、LPSO型マグネシウム合金などで見られる、Schmid因子が0に近いすべり系の活動によって生じる「くさび型キンク」とは異なるキンク形成機構である。

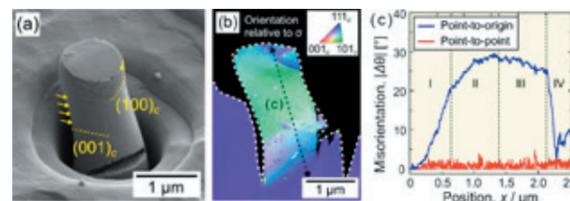


図 キンク変形を生じた単結晶マイクロピラーの電子顕微鏡観察



## 配向性Ti<sub>3</sub>SiC<sub>2</sub>焼結体のビッカース圧痕周辺における塑性変形挙動と破壊エネルギー吸収機構の配向方位依存性

Orientation Dependence of Plastic Deformation Behavior and Fracture Energy Absorption Mechanism around Vickers Indentation of Textured Ti<sub>3</sub>SiC<sub>2</sub> Sintered Body  
Journal of the Japan Society of Powder and Powder Metallurgy, 67, 607-614 (2020). DOI:10.2497/jjpspm.67.607

A04-1 研究協力者  
A04 公募研究代表者  
池田 賢一  
北海道大学 准教授

磁場中スリップキャストと放電プラズマ焼結により配向させたMAX相セラミックスに属するTi<sub>3</sub>SiC<sub>2</sub>焼結体を用いて、ビッカース硬さ試験による配向方位依存性ならびに圧痕周辺の塑性変形挙動・亀裂進展挙動を評価した。荷重方向とc軸方向のなす角度を0°(0TSC)、45°(45TSC)および90°(90TSC)として種々の荷重によるビッカース硬さを評価した結果、いずれの荷重においても0TSC > 45TSC > 90TSCの関係が有していた。また、圧痕周辺の組織観察の結果、配向方位によって底面すべりやキンク変形の生じやすさが異なることによって、圧痕形状の非等方性に寄与することがわかった。さらに図に示すように高荷重を負荷すると0TSCと45TSCでは亀裂の進展が確認され、配向方位によって亀裂進展挙動が異なることが明らかになった。これは、キンク変形等が関与するpile-upに起因するものと考えられる。

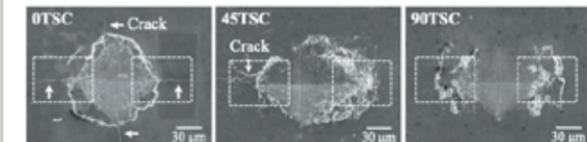


図 配向Ti<sub>3</sub>SiC<sub>2</sub>焼結体のビッカース圧痕(荷重49 N)の配向方位依存性

## Activity / MFS 活動報告

2020.09.16-18

### 2020年日本金属学会秋期講演大会公募シンポジウム S1ミルフィーユ構造の材料科学III

2020年9月16日～18日、日本金属学会秋期講演大会公募シンポジウムとして、「ミルフィーユ構造の材料科学III」がWEB形式で実施された。今回は繊維学会を協賛学会として企画され、全講演件数41件、そのうちMg系LPSO合金に始まり、他の合金系、高分子やセラミックスに至る幅広い物質群におけるミルフィーユ構造の詳細やその機械的性質、キンク形成過程など多岐にわたる基調講演8件により、その研究の広がりが概括された。すなわち、電子・放射光・中性子による最先端計測法を駆使したマルチスケール精密構造解析からのキンクメカニズム解明や、キンク形成に伴う塑性変形

の素過程の原子・分子シミュレーション、不適合条件からの回位存在下における応力関数の拡張、高分子ミルフィーユ構造を有する成形品の作製と内部のキンクの形態変化に関する解析など、本研究分野の深化・展開が着実に進んでいること、さらにはマテリアルサイエンスの壁を取り払って行く研究活動の広がりがさらに加速していることを実感させるものであった。WEBという不慣れた形式でありながら常時50名以上が聴講し、また活発な議論がなされた。ご参加いただきました皆様に心から感謝申し上げます。

## Topics 2020~2021

【これまでの活動】

2020

- ◆ 9/30、10/3: 科研費公募(第二期)説明会 (WEB開催)
- ◆ 11/6-8: 軽金属学会秋期大会 (WEB開催)
- ◆ 11/20: 令和2年度 第一回軽金属学会「LPSO/MFS構造材料研究部会」(WEB開催)
- ◆ 12/17-19: 新学術MFS令和2年度研究会 (WEB開催)

2021

- ◆ 1/19: 令和2年度 第二回軽金属学会「LPSO/MFS構造材料研究部会」(WEB開催)
- ◆ 3/12: 日本物理学会 共催シンポジウム (WEB開催)
- ◆ 3/13: 令和2年度 年次報告会 (WEB開催)
- ◆ 3/29: 令和2年度 第三回軽金属学会「LPSO/MFS構造材料研究部会」(WEB開催)

【今後の活動】

2021

- ◆ 4/24: 第二期公募キックオフ会議 (WEB開催)
- ◆ 5/15-16: 軽金属学会春期大会
- ◆ 6/1-5: Thermec'2021 (WEB開催)
- ◆ 6/15-18: Mg2021 (WEB開催)
- ◆ 9/14-17: 日本金属学会講演大会 (WEB開催)

## 編集後記

本号は、世界的なコロナ禍の中でも目的を見失わずに、ひたむきに研究を続けてきた領域研究者の研究成果をまとめたものです。数多くの学会や研究会、国際会議への出席が取りやめになり、対面でのコミュニケーションが難しい中でも、WEB会議等で情報交換しながら、研究者間や班間での連携により共同研究が成し遂げられてきたと思います。本領域の研究期間は残すところ2年です。全員でチカラを合わせて、それぞれの専門分野で分担しながら、より高みを目指した研究が成し遂げられたらいいと思います。最後になりましたが、本号の編集に携わりました多くの方々に感謝申し上げます。



A04-2 研究協力者  
A04 公募研究代表者  
**瀧 健太郎**  
金沢大学 教授



編集長 / 情報発信・知財部会長  
三浦 誠司 (北海道大学)

編集委員 / 江村 聡 (NIMS)  
小川 由希子 (NIMS)  
藪 浩 (東北大学)  
安藤 大輔 (東北大学)  
瀧 健太郎 (金沢大学)  
光原 昌寿 (九州大学)  
江草 大佑 (東京大学)

プロデューサー / 磯部 志保 (Studio F)  
クリエイティブ・ディレクター / 森 葉子 (Studio F)  
デザイナー / 赤池 有花

発行 / 2021年5月  
編集発行 / MFS事務局

<http://www.mfs-materials.jp>

MFS事務局: 九州大学大学院総合理工学府内 中島・光原研究室  
MFS@mms.kyushu-u.ac.jp 092-583-7619

