



MFS
MATERIALS

MFS MATERIALS NEWS

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）

セラミックス材料における キンク変形・キンク強化

vol. **07**

3大材料への展開のためのキーストーン

CONTENTS

p2 Interview / スペシャル鼎談

吉田 英弘(東京大学)、森田 孝治(物質・材料研究機構)
池田 賢一(北海道大学)

p5 Close Up Research / クローズアップ研究

増田 紘士(東京大学)

p6 Latest News / 最新研究ニュース

山崎 倫昭(熊本大学)、染川 英俊(物質・材料研究機構)
萩原 幸司(名古屋工業大学)、江草 大佑(東京大学)
多根 正和(大阪市立大学)、垂水 竜一(大阪大学)
藪 浩(東北大学)、伊藤 浩志(山形大学)

p8 WEB サイト一部リニューアル

Topics、編集後記



Interview / スペシャル鼎談

セラミックス材料におけるキンクとは？

本新学術領域研究「ミルフィーユ構造の材料科学」では「キンク強化理論の構築」と共に「3大材料への展開」を大きなテーマとして掲げております。この目的を果たすためには3大材料のひとつであるセラミックス材料におけるミルフィーユ構造やキンク形成・キンク強化の追求がかかせません。今回はセラミックス材料をターゲットにキンク強化に向けた研究を推進されている3名の方にオンライン上で対談頂き、セラミックスにおけるミルフィーユ構造、キンク変形の位置づけやそれによる特性向上への道筋について議論して頂きました。

今回のファシリテーター



A02-3 研究代表者

君塚 肇

名古屋大学 教授



2020年から現職。主な研究テーマは材料物性の予測・設計のための数理モデリング。領域内ではA02-3班に所属し、原子・分子レベルの微視的因子に着目しながらキンク形成の素過程とその力学的要件の解明を進める。

セラミックスにおけるミルフィーユ構造、キンク変形とは？

君塚：まずはセラミックスの研究の中で、ミルフィーユ構造やキンクをどのように位置づけていらっしゃるかを伺いたいと思います。

吉田：セラミックスでは信頼性という部分が常にネックになっていました。キンクについては、マグネシウムで強化に成功しているわけですし、セラミックスに導入することによって、信頼性を獲得することができるのではないかとという点に学問的な興味がありますね。もうひとつのキーワードとしてミルフィーユ構造がありますが、セラミックスではMAX相*1が本質的にミルフィーユ構造ですから、材料選択として素晴らしいと思いました。

君塚：MAX相は結晶構造そのものがミルフィーユ構造を持っているわけですが、それ以外のセラミックスで、異なるレイヤーを複層化するという発想はあったのでしょうか。

吉田：例えば、コンデンサなどでは以前からやられてきました。ですが、それを構造材としてつくるとなると、多分、相当大変なことになると思います。

森田：やられていたとしても、結局それで靱性が画期的に上がることは少なく、皆さん、苦勞されていると思います。

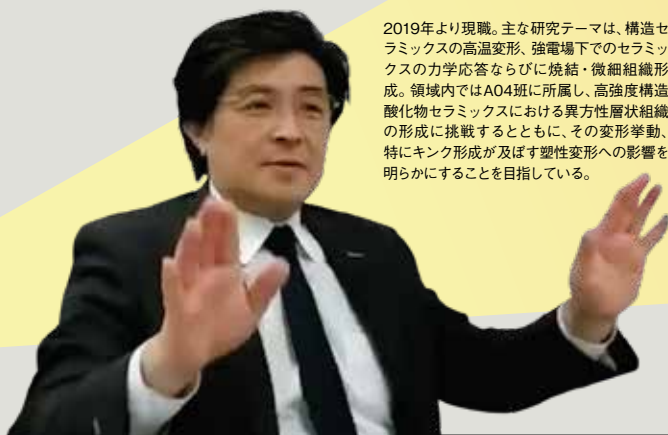


A04 公募研究代表者

吉田 英弘

東京大学 教授

2019年より現職。主な研究テーマは、構造セラミックスの高温変形、強電場下でのセラミックスの力学応答ならびに焼結・微細組織形成。領域内ではA04班に所属し、高強度構造酸化物セラミックスにおける異方性層状組織の形成に挑戦するとともに、その変形挙動、特にキンク形成が及ぼす塑性変形への影響を明らかにすることを目指している。



君塚：そういう中で、MAX相は特別な存在ですか？

森田：吉田先生も言われていたように、セラミックスには脆さという課題がつきまわってしまいます。そういう意味で機械加工ができるという特性を持っているMAX相が注目を集めたんじゃないかなと思います。

池田：私は金属の集合組織などの観点からMAX相を見ていますが、もともとセラミックスを扱った研究をずっとやっていたわけではありません。MAX相にキンクが入ることについては、以前の学術のときから知っていましたが、どう使うかということまでは中々、難しかったですね。物質・材料研究機構（以下NIMS）の目先生、鈴木先生のグループがセラミックス材料の配向研究を精力的に行っていることを知り、「配向とキンクを上手く使えたらいいな」と考えたのが私の研究のきっかけになりました。

君塚：MAX相を実用化する上で、配向制御の重要性を教えてください。いただいてもよろしいでしょうか。

森田：我々は、機械特性を評価することをメインにしていたのですが、セラミックスは粉末プロセスの段階から材料をつくり込んでいくところが重要で、そこでできた組織が特性をほぼ支配します。セラミックスの成形体を作製する際、強磁場中でスリップキャスト*2することで、粉末ひとつひとつの方位をそろえることが可能となります。この方法は、結晶構造の異方性が大きいMAX相では特に効果的で、異方性結晶の配向性をそろえることで、引き出したい特性を最大限に引き出すことができます。我々もNIMSの粉末プロセスグループと一緒にこの手法をはじめることになったんですが、当初は強度が上がるような方位に対して配向組織化させるというような研究をやっており、キンクについては、どちらかというとネガティブな印象しかありませんでした。そうした中で池田先生からミルフィーユの研究に使えないかとお声がけいただきました。

君塚：プロセス自体をケアしてあげると、機械的な特性にかなりダイレクトに効いてくるということですね。

吉田: また、セラミックスには未だに規格がありません。ステンレスだとSUS304という規格がありますが、セラミックスでは、すごくポピュラーなアルミナでも、未だに標準サンプルと言えるようなものが、事実上ありません。少し不純物が入るとか、少し粉末が凝集するだけで、全く特性が異なってしまうところが、セラミックスのプロセシングの面白さでもあり、恐さでもあるんです。ですから、機械特性を根本から見直そうと思った場合、プロセスからスタートしないといけない。

君塚: キンク形成の前のプロセスからつくり込むというところで、相当の準備と検討が必要なんですね。

池田: MAX相で私どもが最初に扱っていた Ti_3SiC_2 に関しては、ある程度の条件をプロセスの先生方が確立されていて、そのご苦労を感じながら利用させていただいています。我々はその後の、どうして靱性値が上がるのかということも含めて、キンクの重要性を伝えていければいいなと思っています。

「キンク強靱化」という考え方

君塚: 池田先生は、キンク強靱化という言葉が使われていますね。

池田: き裂をいかに迂回させるか、というのがセラミックスの靱性値を上げると認識していますので、キンクが入ることで、破壊エネルギーを吸収する、き裂の進展を抑えるといったところに効いてくれば、それをキンク強靱化と言えればいいなと思っています。実際に、ビッカース試験では、室温でもかなり塑性変形しているところでき裂が止められている観察結果が得られています。

君塚: 高分子で靱性を上げるために犠牲結合^{*3}という形でエネルギーを散逸する仕組みを導入したり、金属だったらき裂先端で多量の転位が出てエネルギーが消費されたりなど、き裂を成長させないなんらかの仕組みという点で、セラミックスにも当てはまる部分があるのかなと想像します。MAX相でキンクが靱性向上にポジティブに使えるとしたら、どんな観点があるでしょうか。

森田: NIMSでMAX相の配向をやり始めた時に参考にしたのが貝殻の積層構造です。貝殻は炭酸カルシウムの積層で形

成されていますが、その間がソフトマテリアルで埋められています。炭酸カルシウム自体が、それほど強い材料ではないのに、貝殻を押しても中々割れない要因に、積層構造が影響しているということをヒントにMAX相の配向組織化がはじまりました。き裂を偏向させてジグザグに進展させることで強度が改善されるんですが、そういう材料とキンクを上手く組み合わせる方法が見つかれば、さらに強靱化ができるのではないかと考えています。あと、キンクを上手く使うということでは、キンクができるどうしてもデラミネーション(層間剥離)も形成されることが問題になります。ただ、最近高温で変形させると、結晶粒中にキンクは形成されるけれどもデラミネーションは必ずしも起こらないようなことも見えてきてはいます。とはいえ、結晶粒の間に隙間が形成されてしまうという点が課題です。そういう部分をソフトマテリアルで埋めて、そこを補ってくれるような組織制御ができれば解決できるかもしれません。一方で、デラミネーションが起きていないキンクの部分で靱性を図れば、キンク自体が靱性の向上につながっているということが今後確認できるかもしれません。

積層構造の重要性

君塚: 貝殻は自然界で長い年月をかけて最適化された構造ですよ。つまり、非常に硬いが脆い物質と、ソフトな物質を層状に合わせ込むということを自然が選択したということですよ。自然界が複層化を選んだということを工学的な観点から見た時に、確かにこういう点で理にかなっているというようなことを思われたから採用されたのだと思うんですが、その工学的な利点についてもう少し補足していただいてよろしいですか。

森田: MAX相の場合は、結晶構造自体が原子レベルでうまくハードとソフトの層になっています。さらに、MAX相の間を例えば金属のような材料で補ってあげる構造ができれば、もしかすると貝殻の積層構造を模倣したような材料につながっていくかもしれないということですね。

君塚: LPSO型マグネシウム合金でも原子レベルで硬質な溶質が濃化したようなレイヤーと、軟らかいマグネシウムの結晶が結晶構造レベルで積層しています。さらには、全体として硬質フェーズとして使われるLPSO構造を、もっと軟らかいマグネシウムの粒が覆ってあげるような、階層的な層状構造になっています。セラミックスの中でもハード、ソフトというものをうまく組み合わせることで、ハードの部分を生かしつつも、変形を補って緩和するような役割をソフトな相が担うことで、うまく両方を両立させるような戦略なのかなというところでですね。

森田: セラミックスでは温度を上げて固めていくという過程がどうしても入りますから、ソフトの部分が例えば高分子などですとなかなかつくり込みづらいんですね。そこを補ってくれるのは今のところ金属しかないのかなと思っています。

池田: 私どもは、MAX相を硬質層として使って、バナジウムとい



A-04 公募研究代表者
森田 孝治
物質・材料研究機構
主席研究員

1997年に物材機構の前身である金材技研に入所、2016年から現職。主な研究テーマは、高機能セラミックスの創製とその機能発現機構の解明。領域内では、A04公募班としてMAX相セラミックスを対象にキンク組織形成とキンク強化の解明に取り組んでいる。



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_2SiC_2 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。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。



うBCC金属の中にバナジウム・アルミニウム系のMAX相を入れてみました。力学試験をやると、キンクは発生するんですが、金属が補ってくれてデラミネーションがなかなか発生しないような状態も見えてきています。これはどちらかという金属のほうが主相なので、それを逆の状況にしてみると、もしかしたらまた面白いことが起こるかもしれないと思っています。また、緻密なサンプルの他にポーラス材もつくりました。ポーラス材と緻密材を用いて、キンクが入ることによって力学特性に影響を与えているかということと比較できるような実験データをとることができましたので、そこをもう少し突き詰めて、MAX相単体でのキンク強化をなんとか明らかにしていきたいと思っています。

森田: キンク形成の条件を最適化していくことも、重要なことだと思います。MAX相を高温変形させると、ある限られた条件で、ひとつの結晶粒に限定してですが、デラミネーションが発生せずに、うまくキンクができることが確認できました。ただ、結晶粒と結晶粒の間にどうしても気孔(キャビティ)が形成されてきます。キンク変形すると結晶粒の形状変化が起こりますから、そうすると形状変化したところにキャビティが発生します。そのあたりをバルクの中でうまく緩和するような組織をつくり込んでいく必要があります。結晶を配向させた材料でキンクが機械特性に及ぼす影響を評価しようとした時にも、発生したキャビティが特性を下げる方向にいつてしまうので、キンクがバルクにどう寄与しているのかを評価する段階で、キャビティの発生が課題として上がってきています。

君塚: 吉田先生のご研究である微細組織によるミルフィーユ構造について、こういったお話と、共通点や相違点はありますでしょうか。

吉田: 残念ながらキンク形成の確認までいっていませんが、積層構造をつくと、材料の組み合わせによっては室温でも塑性変形することが見えてきました。実は、それ自体がかなりの驚きなんです。似たような取り組みは以前にも行われていたましたが、結局塑性変形、ましてや室温でというのは実現しませんでした。ですが、ナノスケールでミルフィーユ構造のつくり込みをしてみると、ちゃんと塑性変形をしてくれるということが分かって、まずそこが我々にとってはすごく驚きでした。そういう意味では、

キンクライクな変形が入っていても不思議ではないと思っています。今、透過型電子顕微鏡観察を行っているところです。また、組み合わせを選ぶとデラミネーションが起きないんですね。アルミナとすべり系がかなり多いペロプスカイト*4 構造の酸化物をペアにすることによって、アルミナ側の塑性変形にペロプスカイト側が合わせてくれているのかなと思います。デラミネーションが起きないことが、材料全体の局所変形ですとか、せん断での破壊を防いでいるとしか見えないんです。軟質結晶・硬質結晶のペアからミルフィーユ構造をつくり込む、ということは、変形を助ける、塑性変形できないものをできるようにするというところで、意味のあることなんだとようやく分かってきたところです。

森田: 吉田先生がおっしゃったように、セラミックスでは転位で塑性変形が起こりづらいので、そのあたりが安定したキンク形成に重要になってくるのかなと、感じています。セラミックスでもいろんなすべり系を持った材料があるので、ミルフィーユ組織を持った材料でも、そのあたりをうまく組み合わせていくというのがひとつのアイデアかなと思います。

君塚: 最後になりますが、若い方へのメッセージをお願いいたします。

池田: 私のところは、つくるのはNIMSの先生方に助けていただかないといけないので、学生が森田先生のところでお世話になっています。すると、すごく刺激を受けて帰ってきますね。また森田先生のところの学生さんもうちにきていただいて、1週間ほど滞在しました。学生同士の交流がありますので、やはりそこが大きかったかなと思います。

吉田: コロナのために学生さんを自由に行き来させることが難しかったのですが、ようやく機会を見つけては、学生を学外に派遣して実験させていただいています。学生にとってはそういう機会が大事ですから、武者修行制度はぜひ使わせていただきたいと思っています。

◆用語解説

*1 MAX相

$\text{M}_{n+1}\text{AX}_n$ の化学式を持つ三元化合物($n=1\sim3$)の総称で、Mは遷移金属元素、AはAグループ元素、XはCまたはNとなる。電気伝導性等の金属的性質と耐酸化性等のセラミックス的性質を併せ持つユニークな物質として注目されている。

*2 スリップキャスト

セラミックスの成形プロセスの一種で、鋳込み成形法とも呼ばれる。溶媒中に原料粉末を分散させたスラリーを石膏などの細孔構造を持つ鋳型に流し込むことで、溶媒が鋳型に吸収される過程で分散した原料粉末のみが堆積し、鋳型と同じ形状の成形体を得る方法。

*3 犠牲結合

高分子ゲルを主な対象とした材料の靱性(ねばさ)を高めるための一手法。変形時に選択的に破断する壊れやすい結合を材料内部に導入することで、わずくみエネルギーを効果的に散逸させ、材料全体でのマクロな破壊を抑制する。

*4 ペロプスカイト

結晶構造の一種であり、ここでは例えば BaTiO_3 や GdAlO_3 のように、 ABX_3 の組成式を持つ化合物(酸化物)を指している。理想的には立方晶系の単位格子を持ち、立方晶の各頂点にA、体心にB、X(酸素)は立方晶の各面心に配置している。

セラミックスにおけるキンク強靱化を目指して

硬くて脆いセラミックスがキンク変形できればどうなる？
セラミックスにおけるキンク研究の一端をご紹介します。

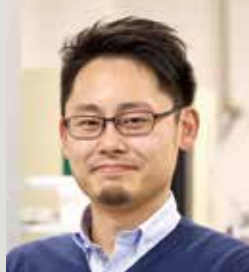


A02 公募研究代表者

増田 紘士

東京大学 助教

2019年から現職。専門は構造材料の結晶欠陥と力学特性。現在、MFS第2期公募研究として「高対称性セラミックスにおけるキンク形成機構の深化と展開」の研究課題に取り組んでいる。



セラミックス材料は どのようにキンクと向き合うべきか？

セラミックスとは金属を除く無機材料の総称で、陶磁器やガラスのような身の回りの道具から、半導体などの電子部品、切削工具・耐火物のような産業部品などさまざまな用途で活躍しています。構造材料としては、硬度・耐熱性・耐食性に優れることから金属材料の使用限界を超えた極限環境（航空宇宙・深海・発電プラントなど）での用途が広がっています。一方、セラミックスの脆い性質は構造材料として致命的な弱点です。金属や高分子材料とは異なり、セラミックスは塑性変形をほとんど起こすことができません。そのため、外力を加えた際に亀裂の周囲に発生する応力集中を緩和できず壊れてしまいます。

話は変わりますが、本誌でも度々取り上げられてきたように岩石からできた地層は塑性変形によって褶曲部（キンク帯）を作り出すことが知られています。実は、岩石もイオン結合性の物質でありセラミックスの仲間と言えます。MFSプロジェクトの公募説明会で阿部先生から褶曲した岩石地層の写真を見せて頂いたとき、「岩石がキンクによって塑性変形できるなら、セラミックスでも同じことができるのではないか？」「キンクを塑性変形機構として利用することでセラミックスの脆い性質を克服できるのではないか？」という考えが浮かびました。つまり、金属や高分子材料における「キンク強化」とは別に、セラミックスでは「キンク強靱化」こそを追求すべきではないかということです。

第1期公募研究を経て

この構想をもとに、第1期公募研究では「耐熱セラミックスコーティングの強靱化を目指したキンク変形原理の解明」という課題を提案しました。航空機エンジンや火力発電に用いられる最先端ガスタービンの燃焼温度はタービン翼基材である超合金の融点を遥かに超えています。そこでタービン翼には空力設

計を駆使した冷却システムと合わせて、3000℃に近い高融点と優れた断熱性を兼ね備えた酸化ジルコニウム(ZrO_2)系セラミックスからなるコーティングを施すことで超合金の融解を防いでいます。一方、タービン翼はバードストライクや火山噴出物などの衝突に曝される危険性があるため、こうした事故からセラミックスコーティングをいかに保護するかはガスタービン全体の信頼性に関わる課題です。そこで、もし ZrO_2 セラミックスをキンクによって強靱化することができれば、異物衝突に強い新しいコーティングが実現できるかもしれません。

第1期公募研究では、セラミックスの塑性変形能を評価することができる「マイクロビラー試験法」を利用して、そもそも ZrO_2 セラミックスがキンク変形できるのかを調査しました。数マイクロメートル寸法の微小な試験片を作製してその強度を評価するこの試験手法は、脆いセラミックスにも塑性変形を与えることができる特徴があります。その結果、今回用いた ZrO_2 セラミックスは、荷重を加える結晶方位に応じて転位や双晶が活動する多彩な変形機構を示し、特に $\langle 111 \rangle$ 方向に近い結晶方位から荷重を加えた際にキンク変形（座屈変形）を起こすことが分かりました（図1a）。透過型電子顕微鏡でのナノスケール解析を通じて、材料中には連続的な結晶方位変化を伴う「回転型キンク帯」が形成したことも明らかとなりました（図1b）。特筆すべきは、キンクが形成する条件では材料の靱性が向上する点です。セラミックスコーティングの成膜時に結晶成長方位を制御することで、異物衝突への耐久性を高められるのではないかと期待しています。

このように、第1期公募研究を通じてセラミックスにおける「キンク強靱化」の糸口を掴むことができたと思います。現在は、セラミックスにおけるキンク発生と靱性向上との関係を明らかにするため、第2期公募研究において新たな課題に取り組んでいます。再び本誌において成果を紹介できる機会を心待ちにしております。

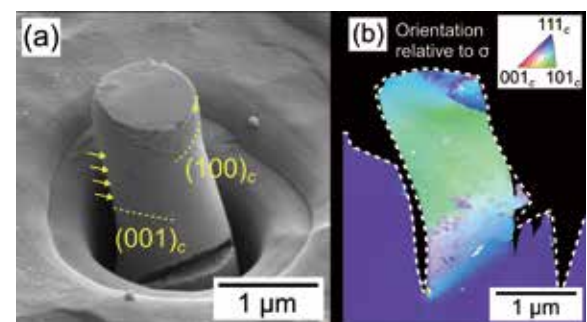


図1 (a)キンク変形を生じたマイクロビラーの電子顕微鏡像。(b)断面の結晶方位マッピング (H. Masuda et al. Acta Mater. 203 (2021) 116471 より © Elsevier Inc.)

Latest News / 最新研究ニュース



A01-1 研究代表者
山崎 倫昭
熊本大学 教授

Mg-Zn-Y系LPSO相に形成される<0001>軸回転型キンクの幾何学的特徴とその形成機構の考察

Formation of <0001>-rotation-type kink boundary in Mg-Zn-Y alloy with long-period stacking ordered structure, *Materials Science and Engineering A*, 819, 141466 (2021).
DOI: 10.1016/j.msea.2021.141466

Mg/LPSO 二相 Mg-Zn-Y 合金押出材中に形成される<0001> 軸回転型キンクの幾何学的特徴を SEM-EBSD 測定および TEM 観察により調査するとともに、眞山准教授(熊本大学)による結晶塑性 FEM 解析結果をもとにその形成機構を考察した。これまで、底面<a> 向きに起因する<uvf0> 軸回転型キンクの研究が盛んに進められてきたが、本報では LPSO 相中において、柱面<a> 向きが活動する高温で加工することにより、<0001> 軸回転型キンクが形成されることを突き止めた。底面と異なり柱面は c 軸を中心に 60° 回転毎に等価な面が存在するが、<0001> 軸回転型キンクはシュミット因子の最も高い単一の柱面<a> 向きのみにて形成し得ることが結晶塑性 FEM により推測された。向き系の異なるキンク変形の存在は、異種キンク同士の相互作用といった新たな現象を想像させる。

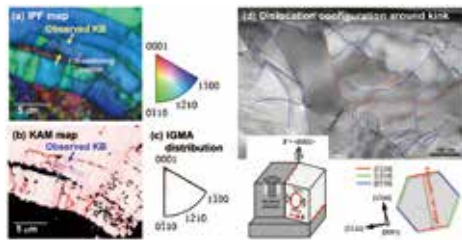


図 <0001>軸回転型キンクの幾何学的特徴



A02-1 研究代表者
萩原 幸司
名古屋工業大学 教授

LPSOナノプレートによるMg単結晶の異常な強度上昇

Surprising increase in yield stress of Mg single crystal using long-period stacking ordered nanoplates, *Acta Materialia*, 209, 116797 (2021).
DOI: 10.1016/j.actamat.2021.116797

LPSO 相を含む Mg-Zn-Y 三元合金が優れた機械的特性を示すことがこれまでに報告されている。これは LPSO 相が強化相として有効に機能するため、これまで考えられてきた。しかし本研究にて、二相合金の母相と同じ組成の $Mg_{99.2}Zn_{0.2}Y_{0.6}$ 単結晶の力学特性を評価したところ、その降伏応力は LPSO 単相合金の降伏応力とほぼ同等の値を示すことが明らかとなった。この異常な強度上昇は、「LPSO ナノプレート」と呼ぶ Y、Zn 元素が偏析した面欠陥の存在に由来する。 $Mg_{99.2}Zn_{0.2}Y_{0.6}$ 単結晶では、変形中の LPSO 相と同様にキンクバンド形成が生じ、結果として延性を伴う高強度化が実現した。この結果は LPSO ナノプレート組織の精密制御によっては、Zn および Y の含有量をはるかに減少させたうえで、機械的特性が現在の Mg/LPSO 二相合金と同等、さらにはより優れた新しい超高強度 Mg 合金が開発できる可能性を示唆している。

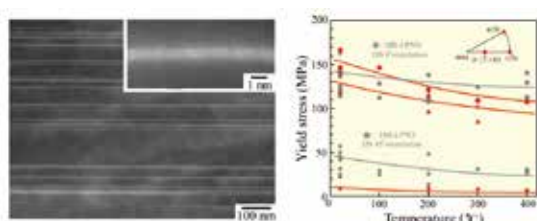


図 LPSOナノプレートによる、LPSO相に匹敵するMg単結晶の高強度化



A01-2 研究代表者
染川 英俊
物質・材料研究機構
グループリーダー

展伸加工Mg-Y-Zn材の巨視的なイントリンシックキンク強化

Intrinsic kink bands strengthening induced by several wrought-processes in Mg-Y-Zn alloys containing LPSO phase, *Materials Characterization*, 179, 111348 (2021).
DOI: 10.1016/j.matchar.2021.111348

一方向凝固材および鋳造材に対し、溝ロール圧延法と押出法によって LPSO 相内にキンクを導入し、巨視的なキンク強化に及ぼす加工法(ひずみ導入法)と加工温度の影響について調査した。局所的なマイクロピッカース硬度は、キンクの有無およびキンク間隔と密接な関係があり、展伸加工法や温度に関係なく、キンク間隔の緻密化にともない高い値を示すことを確認した。他方、キンク界面近傍の残留ひずみに起因し、加工温度が低温であるほど、高硬度化に対するキンク間隔の寄与が大きくなることを確認した。本結果は、(低温で)緻密なキンクを導入することが高強度・高硬度バルク材創製に有効であることを示唆している。また、キンク組織を活用し、巨視的なイントリンシックキンク強化を表現した一例といえる。

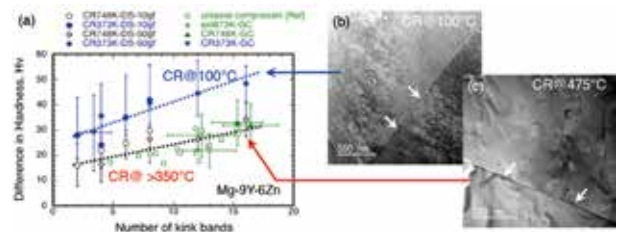


図 (a) 各種 Mg-Y-Zn 展伸加工材のキンク間隔とキンク強化分 (= キンク含有相 - LPSO 相) の関係とキンク界面近傍の微細組織観察例 (b)(c) (b)溝ロール材・加工温度100°C, (c)同・加工温度475°C 図内白矢印はキンク界面を示す)



A02-2 研究協力者
A02 公募研究代表者
江草 大佑
東京大学 助教

高温押出後に熱処理を施した Mg-Zn-Y合金におけるキンク界面緩和挙動

Recovery features of kink boundaries upon post-annealing of a hot-extruded Mg-Zn-Y alloy, *Materials Characterization*, 177, 111153 (2021).
DOI: 10.1016/j.matchar.2021.111153

LPSO 型 Mg 合金における平衡状態でのキンク界面構造を明らかにするために、高温押出加工によりキンク界面を導入した $Mg_{97}Zn_{1.5}Y_1.5$ 合金に熱処理を施した試料を対象に透過型電子顕微鏡・走査透過型電子顕微鏡法(TEM・STEM)および 3 次元アトムプローブ法(3DAP)を用いて微細組織を調査した。TEM・STEM 観察より、キンク界面はサブミクロンスケールに分割されたセグメント状の形態を取り、回転角度に対応する底面刃状転位列により構成されていることが示された。また、STEM および 3DAP 観察より、界面に配列した刃状転位部では局所的な積層変化に対応したナノスケール領域での溶質濃度低下が確認され、キンク界面の高い熱的安定性を担保すると考えられた。観察されたキンク組織の特徴的な構造は、キンク導入によりもたらされる回位の弾性エネルギー低減化を駆動力として形成されたと理解出来る。

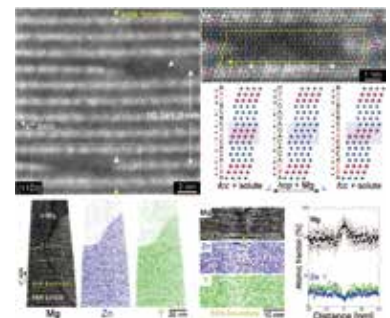


図 キンク界面近傍 STEM像(上段)および 3DAP再構成結果(下段)



A02 公募研究代表者
多根 正和
大阪市立大学 教授

層状の結晶構造を有するTi₃SiC₂ MAX相の弾性特性および層間の弾性不均質性の解明

Elastic isotropy originating from heterogeneous inter-layer elastic deformation in a Ti₃SiC₂ MAX phase with a nano-layered crystal structure, *Journal of the European Ceramic Society*, 41, 2278 (2021).
DOI: 10.1016/j.jeurceramsoc.2020.11.026

MAX相セラミックスは特徴的な層状結晶構造のために、塑性変形において非常に強い異方性を示すことが明らかにされている。しかし、最も基本的な力学特性である弾性特性においては、その影響は十分に明らかにされていない。本研究では、Ti₃SiC₂ MAX相に着目し、Ti₃SiC₂単結晶の弾性特性をinverse Voigt-Reuss-Hill (iVRH) 近似を用いて実験的に明らかにした。その結果、Ti₃SiC₂ MAX相は異方的な結晶構造を有するにもかかわらず、ヤング率およびせん断弾性率はほぼ等方的な挙動を示すことが明らかとなった。また、第一原理計算を用いた解析の結果、Ti₃SiC₂ MAX相は、層状の結晶構造を反映した層間の弾性不均質性を示し、その等方的な弾性特性は層間の弾性不均質性によってもたらされていることが明らかとなった。

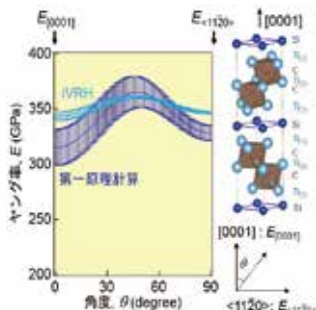


図 inverse Voigt-Reuss-Hill (iVRH) 近似によって決定したTi₃SiC₂単結晶のヤング率と第一原理計算複数の文献値の平均値±標準偏差)との比較(論文よりElsevier社の許諾を得て転載)。



A03-1 研究分担者
垂水 竜一
大阪大学 教授

Weitzenbock多様体によるらせん転位のモデル化と数値解析

Geometrical modeling and numerical analysis of screw dislocation, *日本機械学会論文集*, 87, 20-00409 (2021).
DOI: 10.1299/transjsme.20-00409

微分幾何学に基づく連続分布転位論と数値解析(アインゾメトリック解析)を組み合わせることで、らせん転位芯近傍における応力場の解析に成功した。この理論では、らせん転位の塑性変形をWeitzenbock多様体を用いて表現し、これをEuclid空間へ埋め込むことで力学状態を決定している。解析の結果、らせん転位芯においても応力は発散せず、転位芯遠方では従来のVolterra転位論との定量的な一致が確認された。この理論では、塑性変形状態の決定に数値解析を用いていることから、任意の転位配置および転位種類に対する力学場の解析が可能である。ミルフィーユ構造中のキンク変形およびキンク強化機構を転位論の立場から理解するためには、複雑な転位配置に対する非線形力学解析が必須である。本研究で構築した新しい転位論は、これらの議論に不可欠な理論的枠組みを提供するものと考えられる。

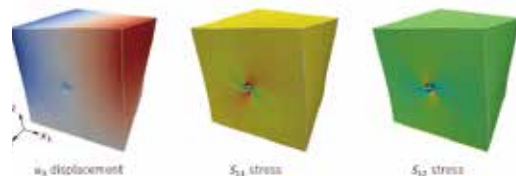


図 らせん転位の変位場と第2ピオラ・キルヒホッフ応力場



A04-1 研究分担者
藪 浩
東北大学
ジュニア主任研究者
(准教授)

水に浮くほど軽いMg₂Si・カーボン複合多孔体の低温合成

Highly Porous Magnesium Silicide Honeycombs Prepared by Magnesium Vapor Annealing of Silica-Coated Polymer Honeycomb Films toward Ultralight Thermoelectric Materials, *Chemistry of Materials*, 32, 10176 (2020).
DOI: 10.1021/acs.chemmater.0c03696

Mg₂Siは熱電変換能を持つ金属間化合物として知られており、多孔質化により熱伝導率を低下させることで熱電変換効率の向上が期待されている。通常Mg₂Siは溶解法や粉末冶金法等により合成されるが、通常1000℃を超えるプロセス温度が必要であったり、形状の制御が困難である等の課題があった。今回我々は有機高分子多孔質膜の表面をゾルゲル法とUV-O₃処理によりシリカ被膜で覆い、その後600~900℃でMg蒸気により還元することで、Mg₂Siとカーボンからなる多孔体の形成に成功した。得られたMg₂Si多孔体は水に浮くほど軽く、高い電気伝導率と低い熱伝導率の両立に成功した。本手法はMg₂Siとカーボンからなるミルフィーユ構造の形成手法としても期待できる。

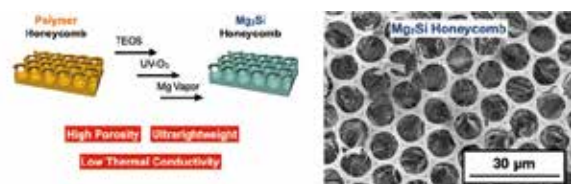


図 有機高分子多孔体からのMg₂Si多孔体形成プロセス



A04-2 研究代表者
伊藤 浩志
山形大学 教授

ポリロタキサンで修飾された強靱で透明なPMMAベースのポリマーブレンドの物理的および形態学的特性

Physical and Morphological Properties of Tough and Transparent PMMA-Based Blends Modified with Polyrotaxane, *Polymers*, 12, 1790 (2020).
DOI: 10.3390/polym12081790

本研究では、ポリロタキサン(PR)で修飾された新規の強靱で透明なポリメタクリル酸メチル(PMMA)ブレンドをいくつか作製し、これらの物理的特性とモルフォロジーを評価した。ここでは、マトリックス樹脂とPRとの界面接着性を高めるために、PMMAと混和性のあるスチレン/メチルメタクリレート/無水マレイン酸(SMM)共重合体を反応性相容化剤として使用した。二軸溶融混練押出機を用いてポリマーブレンドを調製し、構造解析と物性評価を行った。相容化剤SMMの添加により、PMMA/PRは部分的に混ざり合い、PRドメインはナノ分散された。PMMA/SMM/PRブレンドの表面硬度は、PMMAのそれよりも15%だけ低下したが、破断強度は2.5倍に増加した。ノッチ付きシャルピー衝撃試験では、PMMA/SMM/PRブレンドの衝撃強度はPMMAよりも60%向上し、剛性と延性のバランスが優れていることが示唆された。PRは、PMMA/SMM/PRブレンドの塑性変形の起点となり、ナノスケールで微分散したPRが起点となり、ボイドやクレースの形成を引き起こすことが解析された。

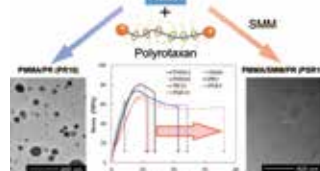


図 SMMの添加によるPMMA/PRブレンドの応力-ひずみ曲線と内部TEM像

Webサイトを一部リニューアルしました



2021年11月より、MFS 新学術領域のWEBサイトを一部リニューアルしました。「トップページ」のデザインを一新し、また、「最新研究」ページを新たに準備して、新学術領域研究において得られた成果をご紹介します。さらに、「活動報告」ページから、本ニュースレターのバックナンバーも閲覧できるようにいたしました。

皆様のアクセスをお待ちしております。

<https://www.mfs-materials.jp/index.html>



Topics 2021~2022

【これまでの活動】

2021

- ◆ 9/14-17: 日本金属学会秋季講演大会 (Web開催)
- ◆ 11/10: 第1回軽金属学会「LPSO/MFS 構造材料研究部会」 (Web開催)
- ◆ 11/13-14: 軽金属学会秋期大会 (Web開催)
- ◆ 12/16-18: 令和3年度研究会 (Web開催)

2022

- ◆ 1/21: 第2回軽金属学会「LPSO/MFS 構造材料研究部会」 (Web開催)

【今後の活動】

2022

- ◆ 3/2: ミニ国際ワークショップ (品川プリンスホテル: ハイブリッド開催)
- ◆ 3/3-5: 令和3年度年度末報告会 (品川プリンスホテル: ハイブリッド開催)
- ◆ 3/15-17: 日本金属学会春季講演大会 (Web開催)
- ◆ 3/29: 第3回軽金属学会「LPSO/MFS 構造材料研究部会」 (Web開催)
- ◆ 5/28-29: 軽金属学会春期大会 (Web開催)

編集後記

本号では「セラミックス材料×キंक」を題材とした領域メンバーの鼎談および研究トピックをご紹介します。異分野の研究者が交わって研究をすすめることで、プロセス・信頼性といったセラミックス材料に特徴的な課題を乗り越えていくと共に、「キंक強靱化」といった新しいアイデアも提案されており、新学術領域ならではの内容かと存じます。また、編集委員のご協力によりWebサイトリニューアルを行い、研究成果やNews letterバックナンバーなどが非常に読みやすくなっております。この機会にぜひアクセスください。

当新学術領域も最終年度を迎えますが、引き続き、最先端の領域研究成果をご紹介しますように、次号も鋭意制作進行中です。どうぞご期待ください。



A02-2 研究協力者
A02 公募研究代表者
江草 大佑
東京大学 助教



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／ 藤岡 陽子
取材・制作／ STUDIO F

発行／ 2022年3月
編集発行／ MFS事務局

<https://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

