



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）

キンク研究を「加速」するJ-PARC

中性子により最先端の材料に迫る



CONTENTS

p2 Special Issue / MFSを支える研究施設訪問

相澤 一也(日本原子力研究開発機構・J-PARCセンター)
ステファヌス ハルヨ(J-PARCセンター)、川崎 卓郎(J-PARCセンター)

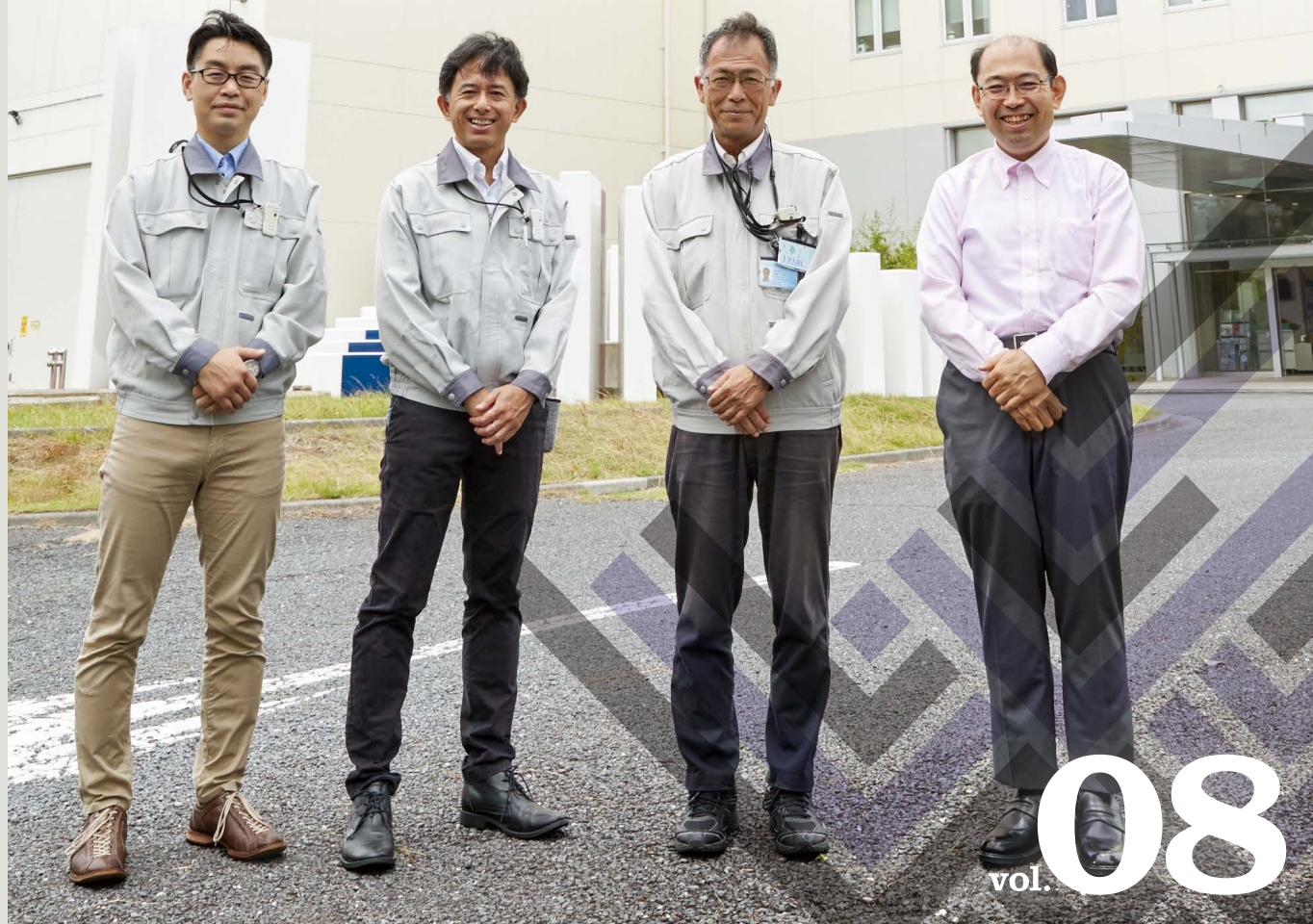
p5 Close Up Research / クローズアップ研究

カレル シュワドレンカ(京都大学)

p6 Latest News / 最新研究ニュース

染川 英俊(物質・材料研究機構)、湯浅 元仁(同志社大学)、
萩原 幸司(名古屋工業大学)、榎 学(東京大学)
藤居 俊之(東京工業大学)、長谷部忠司(神戸大学)、
斎藤 拓(東京農工大学)、森田孝治(物質・材料研究機構)

p8 Activity / MFS 活動報告、Topics、編集後記



vol.

08

Special Issue / MFS を支える研究施設訪問

キンク研究を「加速」するJ-PARC

中性子により最先端の材料に迫る

本新学術領域研究の推進には大型放射光施設Spring-8や大強度陽子加速器施設J-PARCなどの大型実験施設が大きな役割を果たしています。今回はJ-PARCを訪問し、本領域に参画されている3名の研究者に施設や研究の紹介、領域での役割などを語っていただきました。



A02-2 研究分担者
ステファヌス ハルヨ
日本原子力研究開発機構 研究主幹



A02-2 研究協力者
川崎 卓郎
日本原子力研究開発機構
研究副主幹



A02 班長
相澤 一也
日本原子力研究開発機構 副ディビジョン長



TAKUMI、TAIKANで何ができるのか

江村:まずは、本領域の研究で使用されているBL19(TAKUMI)と、BL15 (TAIKAN) で何ができるのか、また同じ大型実験施設であるSPring-8との違い、J-PARCではこういうことができるんだよ、といったことをお話し頂ければと思います。

ハルヨ:TAKUMIは基本的に粉末回折装置です。回折ピークを詳細に解析することによって、格子ひずみ・内部応力、集合組織、相変態などを見ることができる装置です。測定用試料設置空間が非常に大きくて、例えば引張試験機を乗せることによってその場で原子配列スケールの変形の機構を調べることができます。中性子は透過能力が大きいので、試験片全体を測定することでバルクそのものの平均の状態の格子ひずみを測定し、マクロの応力、マクロの冷却の状態、結晶構造の変化を見ることができます。さらに、パルスで入射する中性子を単色化することなしにそのままの広範囲の波長を使うことによって、検出器を固定した状態でも複数の回折ピークを同時に測定することができます。いちいち中性子線の入射角度を変える必要がないので、引っ張りながら集合組織や応力の測定が同時にできます。

相澤:TAIKANは、中性子小角・広角散乱装置と称して、小角散乱の他に、広角の測定ができる装置です。広角までとること、クラスターや析出物などの形状と内部構造を同時に調べることができます。SPring-8との違いですが、これはTAKUMIとも共通しますが、中性子は透過能が高いので、試料環境装置と

呼ぶ機器の中に試料を入れて測定することで、試料に外場を与えながらの測定ができます。一方、中性子の場合には電荷がないので、X線に比べるとビーム制御のやり方が少なく、しかも、輝度も弱いので、どうしても使うビームが大きいものになってしまいます。ですので、試料の平均構造を見るのに向いています。

江村:TAKUMIとTAIKANで、注目するスケールや得意とする材料に違いはありますか？

川崎:対象とするものの大きさが違って、回折だったら直接見えるのはÅオーダーで、原子のスケールです。小角散乱だと、より大きなnmオーダー以上になります。

江村:マグネシウム合金では、LPSO構造があって、さらに大きなスケールでのミルフィーユ構造があって、そういったマルチスケール構造が効いているみたいなお話があったので、そういうものがこれで見られるといいかなと思ったんですが。

相澤:そうですね。これらの装置を両方使うコンセプトは、非常にワイドな空間スケール、階層を測りましょうということになります。

川崎:回折を測定して、小角で測定して、SEMで組織を観察して、そういうことを積み重ねていきますみたいなことをすればいいんでしょうね。

相澤:材料でいえば、TAIKANではまだ明確な結果が出ていませんが、ポテンシャル的には高分子系も扱えると思っています。

江村:領域で扱っている材料に関して言えば、TAKUMIは主に金属系、例えばマグネシウムとか鉄などで威力を発揮して、TAIKANはまだ途中ですが高分子系の取り扱いが可能という



今回のファシリテーター

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ーユ構造）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。



パルス中性子源用水銀ターゲット容器

大強度陽子加速器施設J-PARCとは

J-PARC (Japan Proton Accelerator Research Complex) は日本原子力開発機構 (JAEA) と高エネルギー加速器研究機構 (KEK) が共同で運営する大強度陽子加速器施設であり、3台の大型加速器によって世界最高強度の陽子ビームを作り出し、素粒子・原子核研究や物質・生命科学研究などの最先端研究に貢献している。今回訪問した物質・生命科学実験施設 (MLF) (表紙写真および写真左) の工率材料回折装置BL19 (TAKUMI) および中性子小角・広角散乱装置BL15 (TAKAN) では、水銀ターゲット (写真上) に加速した陽子ビームを衝突させることで生じるパルス中性子を利用して材料の組織や構造、変形状態などを詳細に観察・解析することができる。

ことですね。セラミックスはどちらでしょうか。
川崎：セラミックスは何を見たいかによりますね。

領域との関わりについて

江村：つづいて先生方のご略歴とMFSとの関わり、領域でのミッションなどについてお話を聞きます。
相澤：私は本領域の前身のLPSOの新学術領域研究時代から参画させていただいています。バルクレベルの単相LPSO合金の中性子回折を行って、東大で行われている構造解析と比較することで、LPSO相が明確な相であることや、LPSO相が硬質相で、マグネシウム層が軟質層である、といったことを見出しています。また、変形下の中性子回折実験と、アコースティックエミッションを同時測定するハイブリッド中性子回折にも取り組んでおり、今後まとめていきたいと考えています。
ハルヨ：私は学生の頃は材料強度が専門で、その後、高エネ研 (KEK) で装置を勉強し、J-PARCに来て、装置の設計からはじまってTAKUMIの建設をやりました。その後材料強度の研究に戻りまして、ミルフィーユのプロジェクトから参画しました。バックグラウンドが材料強度なので、材料が変わっても基本的に強度を見ようと考えました。中性子は放射光のようにビームを絞れないので、できるとすればバルクだなと。キンクによって本当に強化しているのかどうかは、やはり応力ひずみ曲線を見ないと分かりませんが、特に二相状態になった時には、それぞれの程度寄与するのは中性子でしか観察できませんから、そこを定量

的にやることにしました。
川崎：私は学生の頃からずっと、回折の研究をやってきていて、対象の物質は結晶ならなんでもOKというスタンスで、層状硫化物、糖類、ペロブスカイト化合物、金属間化合物など、結晶で回折ピークが出る物質であれば特にこだわりはないです。私自身この領域の中で特定の研究テーマがあるわけではなく、相澤さんとハルヨさんの研究に対して、回折の専門家としてお手伝いしています。中性子の回折でできそうであればいろいろやってみたいと思っていますので、何かあれば、ぜひやらせていただきたいと思っています。

領域におけるJ-PARCの役割

江村：次に領域内でのJ-PARCの役割についてお聞かせください。
相澤：今日はTAKUMIによる回折測定についてご紹介します。ひとつは積層欠陥の回折、例えばMg系MFS合金中の積層欠陥などの構造解析を行っています。
川崎：試料の中にガドリニウムが一層入っている構造で、その層が入ったことによってどうなっていますかみたいなのを、最初は中性子回折で測定したのですが、ガドリニウムは中性子の吸収がすごく大きくて測れなかったの、ではX線でやるかということで、これはラボの分解能の高いX線で測定した回折ピークの

BL19 (TAKUMI) 内部での測定試料をセットしている様子。中央の大きな空間に各種装置を取り付けることで高温や極低温などの環境下で引張試験や疲労試験を行いながら中性子によってひずみ分布や構造変化を捉えることが可能である。



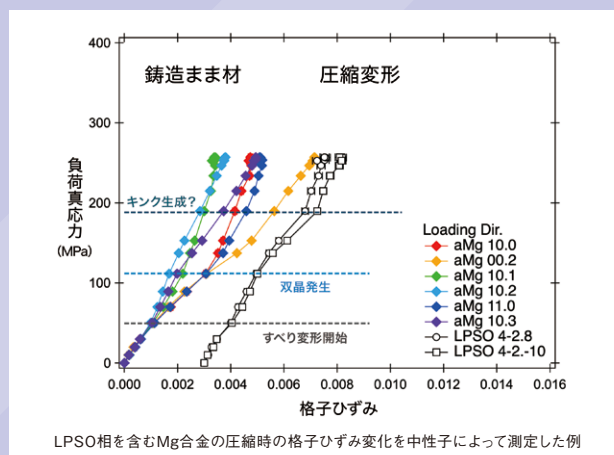
形を解析しました。中性子はあまり役に立たなかったことになってますが。

江村: 構造解析の話ですと、相澤先生はCALについても研究されていますよね。中性子は平均的な情報をとるものと考えていたのですが、CALのようなまばらな構造も測定可能なのでしょうか？

相澤: まばらな構造についても、平均的な考え方を入れれば出てくるはずなのですが、難しいのはL12クラスターみたいなものが並んでいるというところの影響というか、効果を取り込むのがなかなか難しいかなというところですね。単純に積層欠陥だけであれば、もうちょっとうまく解析できると思うのですが。

川崎: 中性子もX線も基本的に平均的な情報が得られますが、平均的な構造の中に局所的な構造がどれくらいあるかというような話になるので、試料の中の平均ではありますが、局所情報が全く得られないということではないです。この箇所、この箇所と決め打ちはできないけれども、3割くらいは入っていますね、みたいな話はできるといことです。

ハルヨ: 私の方からは応力測定のお話をします。キンクの形成と、キンクによる強化の両方に注目しています。例えば、LPSO単相材を変形させながら回折測定を行い、キンクの形成と格子ひずみや回折ピークの積分強度の変化などの関係を見ています。圧縮することでキンクが形成されていること、逆に、キンク強化を見るためには引っ張りを加える方が良いことがわかっています。また各相の相応力の測定を行い、変形中に起こる再結晶や集合組織形成といった組織変化やキンク変形挙動と関連付けて議論しています。次の展開として、ひとつの試料で引っ張り、圧縮を繰り返すと、キンク変形、キンク強化がより見えるのではない



LPSO相を含むMg合金の圧縮時の格子ひずみ変化を中性子によって測定した例

かと考えています。また、キンク強化は温度依存があるのかどうかについて、低温にするとLPSOの寄与がさらに大きくなるのかを解析すれば見えるのではないかと思います。

江村: 今低温の話が出てきたのでお伺いするのですが、例えば極低温とか高温とかでの測定は可能なのでしょうか。

ハルヨ: 得意です。MLFでは先導研究と称して、こういう試料環境装置を使うことによってこういう研究ができますよということを実証し、さらにアピールして、他のユーザーの方にも使ってもらっています。特にTAKUMIの低温実験は良い先導研究例です。

相澤: 引張試験中だと、1000℃くらいまでの高温から -258℃くらいまでの低温も可能です。高温、低温下で、応力荷重実験ができるということです。また、DIC、アコースティックエミッション、サーモグラフィなどと組み合わせた実験もできます。

江村: 最後になりますが、今後についてお話しください。

相澤: 領域の深化と展開という意味では、深化の方、Mg基合金についてはある程度行っているのですが、展開の方、非マグネシウム系の材料やいろいろな強加工の材料などについても行っていければと考えています。また、J-PARCやSPRING-8のような大型実験施設は本領域のような大型の外部資金研究の枠組に参画することが期待されている立場なので、いろいろな声がけを頂きます。その際に、参画する研究者の先生方と、やれるものとやれないものとを十分議論し、明確化して、自分たちの役割をはっきりさせることが重要と考えています。

TAKUMIに取り付ける高温引張試験装置

◆用語解説

*1 粉末回折

多結晶の試料を用いた物質の同定や結晶状態を調べる目的的回折手法。

*2 単色化

原子炉からの中性子にはさまざまな波長（多色）を含んでおり、角度分散型回折実験に用いる前にモノクロメータ等を用いて特定の波長のみを選んで抽出する。

*3 小角散乱

量子ビームを物質に照射した時の、散乱角が小さい（5°以下）散乱のことで、微粒子や合金の析出物、内部構造といった数ナノメートルレベルの構造・組織の分析に用いる。

*4 アコースティックエミッション

材料が変形あるいは破壊する際に、内部に蓄えていた弾性エネルギーを音波（弾性波、AE波）として放出する現象。

*5 CAL (Cluster Arranged Layer)

まばらに、積層欠陥を伴ったクラスターが同一面内に配列した層のこと。

*6 L12クラスター

面心立方格子において、A3Bの組成で規則化した構造で、A原子は面心立方格子の面中心を、B原子は隅点を占める。

層状構造の均質化から垣間見えるミルフィーユ条件

層状構造を持つ材料をどのように設計すれば強化する？
経験で得られた強化のためのミルフィーユ条件を数学の
道具を用いて検証し、精密化する試みを紹介します。

A03 研究分担者
Karel Svadlenka
カレル シュワドレンカ
京都大学 准教授

2015年から現職。専門は応用数学、とくに変分解析・偏微分方程式論・数値解析。領域内ではA03班に所属し、キンク形成と強化におけるミルフィーユ条件の役割の解明に数理の立場から取り組んでいる。



経験に基づくキンク強化のための条件の正しさを示す

層状構造を持つマグネシウム合金を圧縮するとキンクと呼ばれるギザギザの構造が発生し、材料が著しく強化されることが発見されてから、数多くの実験や考察を基に、この強化メカニズムを可能とする「経験的ミルフィーユ条件」が提唱されました。すなわち、材料が次の4つの条件を満たせば、キンクによる強化が期待できるというものです：①硬い層と軟らかい層からなる層状構造であること、②層の幅は約 1μ を超えないこと、③結晶のすべり系が層面に限定されること、④層は互いに剥離しないこと。しかし、この基準は本当に必要条件（つまり、この条件なしではキンクによる強化が決して起こらない）、かつ十分条件（つまり、材料がこの条件さえ満たせば、必ずキンク強化される）であるのか、現在でも謎です。一方、優れた新材料を設計する上で、条件が少ないほどつくりやすいため、この疑問を解決することが重要な課題です。私の研究では、層状構造の数理モデルを立て、数学的・数値的に解析することによって、この課題への答えを見つけることを目指しています。さらに、それぞれの層の相対幅や弾性係数といった性質に依存して強靱化の度合いがどう変わるかを洗い出し、材料設計の指針を定めるプロセスに貢献したいと考えています。

均質化モデルで層状構造の本質を探る

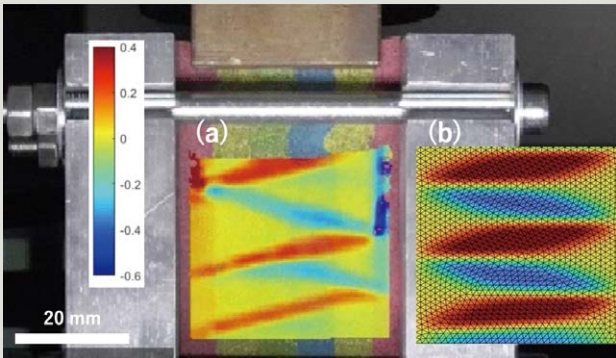
ミルフィーユ構造をどのようにモデル化すれば良いのか？ キンク帯の大きさと比べると層の幅は非常に小さいため、一つひとつの層を数理モデルで解像しようとする、膨大な数の層を扱うことになり、数学解析どころか、数値計算もままならない難題となります。そこで、変分解析という数学分野でこの頃、精力的に研究されている均質化の手法を用いて、層の幅がゼロに収束

する極限で得られるモデルを考えます。このように構成される均質化材料は実在しませんが、細かい層からなる実際の材料がよく近似していることが確認されています。しかも、層を解像するモデルより遥かにシンプルな問題のため、キンクに関するメカニズムを数学的に読み取るチャンスが大きくなります。例えば、層状構造の熱弾性の属性をうまく設定し層が剥離しないようにしておけば、熱すると縮むような不可思議な材料がつくれることを均質化理論から予想した研究があります。層が十分に細くないとこの効果が現れないことから、②と④のミルフィーユ条件は同様の「強化の魔法」をつくり出すためには数学的にも非常に合理的です。逆に、この条件があるからこそ、均質化による解析へのアプローチが正しいと言えます。

研究の最初の成果と進行中の課題

ところで、金属などの弾塑性変形における均質化は数学でもまさに最先端の問題です。現時点で判っているのは、僅かに弾性変形しかしない硬い層とひとつのすべり系に沿っての剪断しかしない軟らかい層からなる単純な層状構造モデルの静的均質化です。軟らかい層のすべり方向に依らず、均質化した材料において許される変形は、層面方向での剪断のみであるという結論に達しています。この結果が示唆しているのは、②と④があれば、③の条件が自動的に満たされ不要であるという可能性です。この仮説を明確にすることを目標に、複数のすべり系などへの拡張に取り組んでいるところです。

次に、均質化で得られた（層がない）材料の弾塑性変形の変分モデルを構築し、数値シミュレーションを行いました。数値実験の結果を検証するため、紙の束を紙面の方向に圧縮する実験をブラハのカレル大学のK. Mathis博士グループの協力で実施したところ、定量的とも言える見事な一致が得られました（下図）。層の幅などのパラメータがキンク強化にどれほど寄与しているかをこのモデルより推定する解析を現在進めています。



側面を拘束した紙束の圧縮：(a) カレル大学 Mathis 研究室の実験で得られた剪断ひずみの DIC 可視化。(b) 弾塑性変形モデルの有限要素法による対応する数値計算結果

Latest News / 最新研究ニュース



多様な塑性加工法による Mg-Y-Zn合金のキンク強化

Kink bands strengthening of Mg-Y-Zn alloy via various wrought-processing,
Materials Letters, 304, 130653 (2022).
DOI: 10.1016/j.matlet.2021.130653

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

塑性加工法に関係なくLPSO単相のMg-9Y-6Zn(at.%)合金にキンク導入できることを確認した。また、キンク導入した各塑性加工材の硬さは、相当塑性ひずみの増大と共に一様に大きくなる。一方、硬さと相当塑性ひずみの関係は加工法に依存し、例えば、相当塑性ひずみが2の場合、押出材、溝口材、HPT材の順に硬度特性が上昇する。これは、塑性加工時に複合化した応力・ひずみ成分を導入することがキンク導入および強化に効果的であることを示唆している。押出加工後、ねじり加工を付与することにより、圧縮降伏強度が1.5倍以上も向上することは、よい実証例である。

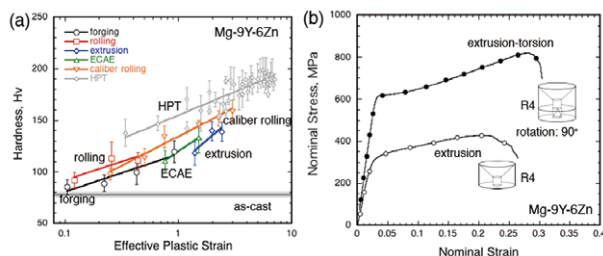


図 (a) 各種 Mg-9Y-6Zn(at.%) 合金塑性加工材の硬さと相当塑性ひずみの関係 (b) 押出材および押出+ねじり材の室温圧縮公称応力・ひずみ曲線



Mg-Y-Zn合金の 局所領域におけるキンク強化と キンク界面の関係

Quantitative kink boundaries strengthening effect of Mg-Y-Zn alloy containing LPSO phase,
Materials Letters, 292, 129625 (2021).
DOI: 10.1016/j.matlet.2021.129625

A01-2 研究協力者
湯浅 元仁
同志社大学 准教授

さまざまな温度・速度での高温単軸圧縮によりキンクを導入したLPSO単相合金に対し、そのキンク形成とキンク強化の関係をビッカース硬度試験を用いて評価した。加工によりキンクが導入された試験片は、加工時に変化するさまざまな組織因子に影響を受け、キンクによる強化量のみ抽出することが難しい。そこで、レーザー顕微鏡を用いた観察により、キンクが観察された領域と観察されなかった領域を10 gfでのビッカース硬度試験で打ち分け、キンクによる硬度増分を算出することでキンク以外の組織因子の影響を低減することを試みた。その結果、キンクによる硬度増分は、加工条件に依らず、圧痕を含む局所領域を通過するキンク界面の数(図(a),(b))とよい相関を示した(図(c))。すなわち、 μm 領域での観察結果に基づくと、キンク強化はキンク間隔と密接な関係にあることを示唆している。

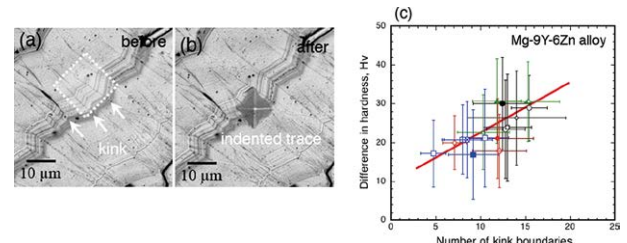


図 硬さ試験前 (a) 後 (b) の組織、(c) キンク間隔と局所的なビッカース硬度増分の関係



ミルフィーユ構造を有する Al/Al₂Cu共晶合金における キンク帯形成、その制御

Control of kink-band formation in millefeuille structured Al/Al₂Cu eutectic alloys,
Materials Science and Engineering A, 825, 141849 (2021).
DOI: 10.1016/j.msea.2021.141849

A02-1 研究代表者
萩原 幸司
名古屋工業大学 教授

Mg合金において近年、キンク帯を利用した力学特性制御が実現され注目を集めている。本研究では同様の制御がAl合金でも可能となることを初めて明らかにした。Al/Al₂Cu共晶合金に一方方向凝固処理を施すことで、ラメラ組織が結晶成長方向に整列したミルフィーユ構造を作りこむことができ、これによりキンク帯の形成誘導が実現された。しかしこの材料においては、完全なラメラ構造のみからなる場合は低強度を示し、むしろ初晶として軟質相であるAlを含む合金の方が高強度を示すという不思議な特性が見出された。この特異な挙動の起源はキンク帯の形態変化にあり、ラメラ組織のみからなる合金中では座屈を引き起こす巨大なキンク帯が導入されるのに対し、初晶を導入することでキンク帯のサイズが大きく低減し、この結果として延性付与と同時に高強度化が達成されることが明らかとなった。すなわち本結果はキンク帯の形態制御によりキンク帯形成を「破壊モード」から「変形モード」へと変化させることが優れた力学特性を引き出すために重要であり、この実現がミルフィーユ構造制御により達成され得ることを示している。

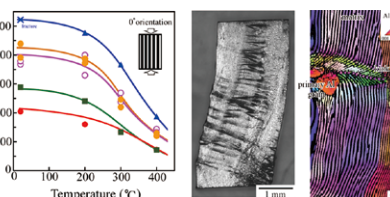


図 ミルフィーユ型Al合金の創製、キンク帯形成誘導による力学特性高機能化



ミルフィーユ構造材料の圧縮試験 中のアコースティックエミッション 信号のクラスタリング解析

Clustering Analysis of Acoustic Emission Signals during Compression Tests in Mille-Feuille Structure Materials,
Materials Transactions, 63 (2022) 319-328
DOI: 10.2320/matertrans.MT-M2021105

A02-1 研究分担者
榎 学
東京大学 教授

教師ありおよび教師なし機械学習を利用したアコースティックエミッション(AE)法を適用することにより、ミルフィーユ構造を持つMg-Y-Zn合金およびTi-12Mo合金の変形挙動を調査した。教師あり学習プロセスを用いて、純粋なマグネシウムとLPSO構造の一方方向凝固Mg₈₅Zn₁₅合金の圧縮試験において発生したAE信号を学習データとして使用することにより、 α -Mg相とLPSO相からAE源を同定するための分類モデルを構築した。一方、教師なし学習プロセスを用いて、Ti-12Mo合金の圧縮試験におけるAE信号の周波数スペクトル特性から2つのクラスターに分割し、さらにデジタル画像相関(DIC)を実行してこれらのクラスターと変形挙動の関係を調査した。ミルフィーユ構造を持つ材料の変形挙動の解析において、教師ありおよび教師なし機械学習を使用したAE手法が有効であることがわかった。

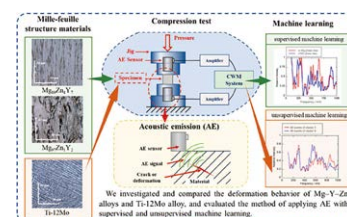


図 機械学習を利用したアコースティックエミッション (AE) 解析手法の概要



共面二重すべり方位の銅単結晶の変形により形成されたキンク帯の結晶学的特徴

Crystallographic features of deformation-kink bands in coplanar-double-slip-oriented copper single crystals,
Materials Characterization, 177, 111151 (2021).
DOI: 10.1016/j.matchar.2021.111151

A03-1 研究代表者
藤居 俊之
東京工業大学 教授

面心立方晶金属単結晶の塑性変形で生じる変形帯には、すべり面に平行なものと垂直なものの二種類が存在し、後者がキンク帯である。キンク帯は、変形の不均一であるすべり面の"よじれ"によって形成されると理解されてきた。しかし、複数のすべり系が同時に活動する場合の形成方位は、未だ明らかにされていなかった。本研究では、銅単結晶を共面二重すべり方位で室温圧縮変形させ、走査電子顕微鏡による二面観察からキンク帯形成方位を特定し、すべりの幾何学から説明した。塑性変形開始後、ひずみ1%未満で二次硬化に遷移し、主すべり面に垂直なキンク帯が形成された。その形成面は、主すべり系および共面すべり系転位のバーガースベクトルの和によって求まる方向を法線とする(211)面に平行となることがわかった。本結果は、各すべり系の活動度に応じてキンク帯形成面は変化することを示唆している。

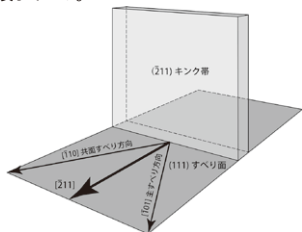


図 共面二重すべりにより形成されたキンク帯



FTMP場の理論に基づくミルフィーユ構造におけるKink変形と強化機構

FTMP-based Kink Deformation and Strengthening Mechanism for Mille-feuille Structures,
International Journal of Multiphysics, 15, 325-348 (2021).
DOI: 10.21152/1750-9548.15.3.325

A03-1 研究協力者
長谷部 忠司
神戸大学 准教授

FTMP(マルチスケール塑性場の理論)に基づく不適合度テンソルに伴う新たな自由度を結晶塑性理論による有限要素法シミュレーションに導入することで、従来法では再現ができなかった変形双晶やRank-1接続を満足するキンク形成が簡便かつ自然に再現できる。本報告では、キンク形成・強化機構解明に向けた、研究初期に行った予備的検討において、"キンクの"形態から"キンク"形態への改善に伴い、エネルギー解放特性がよりAE計測に基づく実験的傾向へと近づく様子を議論している。変形双晶を援用したモデルでは、スケールフリー性は再現されるものの、大小キンクが交互に形成されることを示す特異なターン・マップは得られず、モデル中で一様にせん断量に依存して変化する簡易Rank-1接続モデルを採用した場合は、後者についても実験における特徴を再現し得ることを明らかにしている。

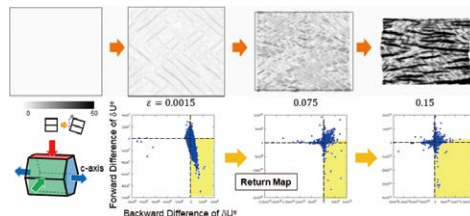


図 キンク形成過程とエネルギーターン・マップ変化



ミルフィーユ構造を形成した高密度ポリエチレンの熱延伸による高強度化

Strengthening of mille-feuille structured high-density polyethylene by heat elongation,
Polymer 236, 124343 (2021).
DOI:10.1016/j.polymer.2021.124343

A04 班長
齋藤 拓
東京農工大学 教授

配向させた高密度ポリエチレン(HDPE)を熱延伸すると、熱延伸倍率 λ の増加に伴い降伏強度が増加して $\lambda>300\%$ で降伏点が現れなくなり、 $\lambda=400\%$ で破断強度が170MPaとなり配向HDPEの約5倍に増加することが見出された。小角X線散乱測定の結果から、配向HDPEでは長い結晶ラメラ(硬質層)と非晶層(軟質層)が積層されたミルフィーユ構造(MFS)が形成されており、それを熱延伸すると短い結晶ラメラから成るMFSへと変換することがわかった。また、配向HDPEを室温で伸長すると降伏時にラメラが破壊されてボイドが形成されるのに対して、熱延伸HDPEでは伸長してもMFSが保持されることがわかった。高 λ の熱延伸HDPEでは硬質層が軟質層中の伸ばされたタイ分子により結ばれて規則正しく配列したMFSが形成され、伸長しても結晶中の分子鎖間での滑りが生じず、硬質層が破壊されないためにラメラの破壊による降伏が抑制され、高強度化したと考えられる。

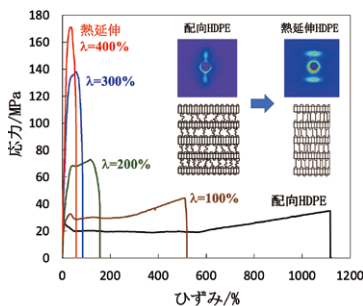


図 配向HDPEの熱延伸による力学特性と構造の変化



Ti₃SiC₂-MAX相におけるキンク境界近傍の力学特性評価

Kink Formation through Creep Deformation and Possibility of Kink Strengthening in Ti₃SiC₂ MAX Phase Materials Transactions, 63, 1055-1064 (2022).
DOI:10.2320/matertrans.MT-M2021255

A04 公募研究代表者
森田 孝治
物質・材料研究機構 主席研究員

多結晶Ti₃SiC₂-MAX相の高温圧縮変形におけるキンク帯の形成機構を調査した後、ナノインデンテーション法を用いてキンク境界近傍の局所領域の力学特性の評価を実施した。キンク境界(KB)①および②近傍の測定点#0-#9において試験を実施した結果、ナノ硬さH_nはKB近傍で高い値を示し、KBからの距離Lが大きくなるにつれ直線的に低下した。硬さ試験後、圧痕からはすべり変形によると思われるトレース線がTi₃SiC₂相の底面に沿って形成されることが確認される。KB近傍の高H_n値の圧痕から形成されるトレース線はKBで止められ、短くなる傾向が確認できた。このことは、KBが圧痕下に形成される転位の運動の障害となっているためと考えられ、MAX相においてもKBが材料強化への寄与を示唆している。

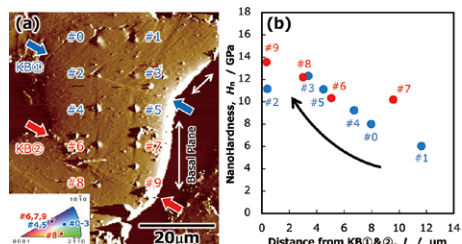


図 Ti₃SiC₂中のキンク帯(KB)の(a)SPM像と(b)ナノ硬さH_nのキンク境界からの距離Lとの相関

Activity / MFS 活動報告

2022.03.03-05

令和3年度年次報告会

東京 品川プリンスホテルにおいて年次報告会がハイブリッド形式で開催された。現地参加29名を含む総勢78名が参加し、最新研究成果に関する発表（口頭51件・ポスター19件）を実施した。本領域では2019年9月の夏季合宿研究会以来の対面形式を含む報告会となり、発表の合間には各所で活発な議論が巻き起こるといった盛況であった。最終日には経験的ミルフィーユ条件に関する総合討論、優秀ポスター賞の表彰、評価委員の先生方からの講評を頂き、最終年度に向けて本領域で推進すべき課題を明確にする良い機会となった。ご参加頂いた諸氏に深く感謝を申し上げます。



2022.08.19-20

MFS若手研究会

東京・品川の会議室において若手研究会が開催された。17名の学生を含む27名が現地参加し、学生の方々の研究紹介と、大阪大学の垂水竜一先生による特別講演が行われた。また、参加者が5つのグループに分かれて、ミルフィーユ材料・キンク強化に関するグループディスカッションとその成果発表を実施した。対面でのイベントならではの活発な議論と人材交流がなされ、成果発表に対して優秀賞の表彰も行われた。



Topics 2022

【これまでの活動】

- ◆ 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年度年次報告会 (品川プリンスホテル: ハイブリッド開催)
- ◆ 3/15-17: 日本金属学会春期講演大会 (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)
- ◆ 8/19-20: MFS若手研究会 (品川)
- ◆ 9/20-23: 日本金属学会秋期講演大会 (福岡工業大学)

【今後の活動】

- ◆ 11/11-13: 軽金属学会秋期大会 (東京工業大学)
- ◆ 12/11-14: LPSO/MFS2022 (品川プリンスホテル)

編集後記

本号では、本ニュースレター初の施設取材を行いました。中々拝見できない大型施設の様子を少しでも感じていただければ幸いです。クローズアップ研究では数学の視点からのご研究について寄稿いただきました。これまでとはまた違った観点からの内容に興味を強く引かれることと存じます。

コロナ禍も3年が経過し、研究会等もwebとの

ハイブリッドや現地に開催されるようになりました。世の中の状況に合わせ、研究活動の仕方は変容しながらも、最新研究として掲載する論文の選定に苦労するほど多くの成果が出されています。次号はいよいよ最終号です。本領域研究の集大成を余さずお見せできるよう、ページを増量してお届け予定ですので、ぜひご期待ください。



A01-1 研究協力者
小川由希子

物質・材料研究機構 研究員



編集長 / 情報発信・知財部長
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 / 伊藤 秀司
取材・制作 / STUDIO F

発行 / 2022年10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

