COPYRIGHT 2023 MFS MATERIALS ALL RIGHTS RESERVED.

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）

ミルフィーユ材料・キンク強化の来し方行く末

Keep challenging ー真の分野融合へ向けてー

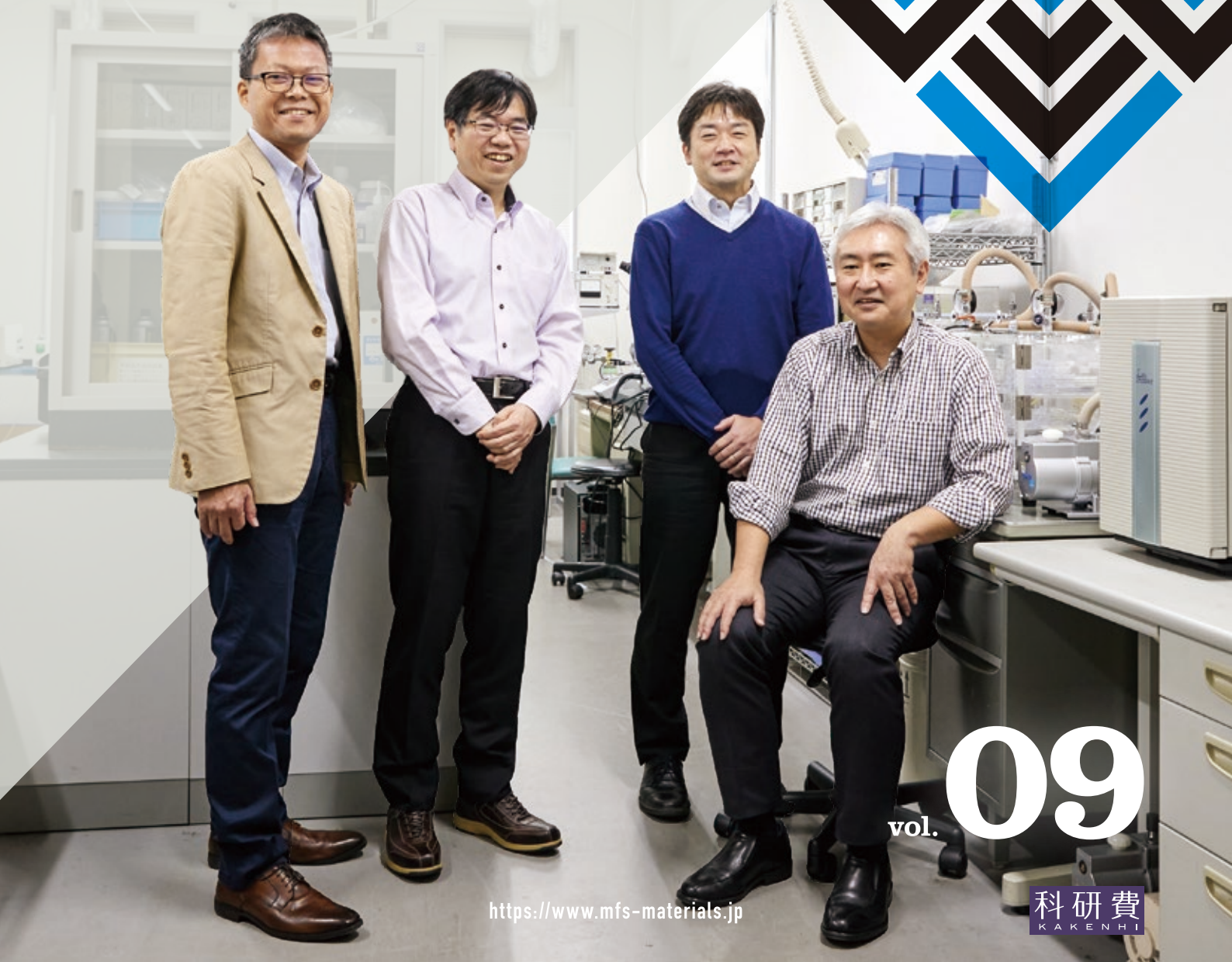
CONTENTS

p2 Message ／ 代表者総括
領域代表:阿部 英司（東京大学）

p4 Report ／ 計画研究代表者の報告
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）、阿部 英司（東京大学）、君塚 肇（名古屋大学）
藤居 俊之（東京工業大学）、三浦 誠司（北海道大学）、伊藤 浩志（山形大学）

p12 Interview ／ スペシャル座談会
染川 英俊（物質・材料研究機構）、池田 賢一（北海道大学）、戸木田 雅利（東京工業大学）

p16 Activity ／ MFS 活動報告、Topics、編集後記



vol. 09

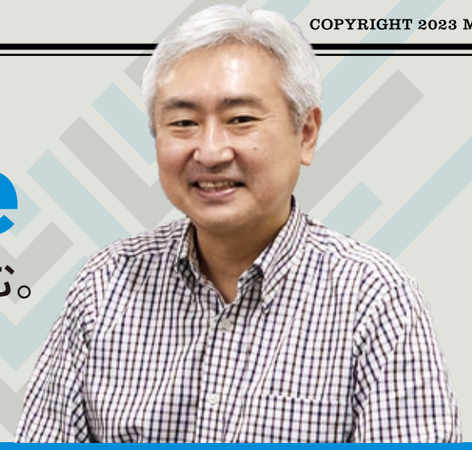
科研費 KAKENHI

COPYRIGHT 2023 MFS MATERIALS　ALL RIGHTS RESERVED.

Message ／代表者総括

All for one

集った精鋭が共通の目標へ挑む。



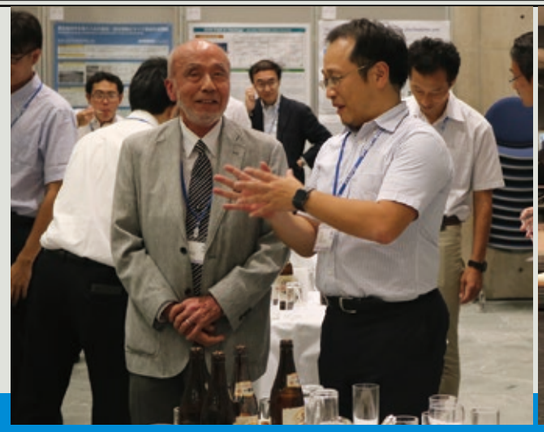
領域代表 阿部英司

2022年も終わりへと近付く時期、カタールで開催されたFIFAワールドカップにおける、日本代表は見事でした。世界で活躍する若手プレーヤーらが集結し、日の丸のもと全員が勝利へ向けて躍動する姿は、まさにAll for oneでした。彼らと同じく、共通のゴールを目指してオールジャパン体制で臨んで来た我々のMFS新学術領域研究も、いよいよ総括となります。我々が掲げた目標である「キンク強化の解明」と「三大材料への展開」は全うできたでしょうか？　MFSニュースレター最終号では、報告書からは読み取れない研究者の「本音」を、忖度抜きで語っていただきました。パネリストは、金属・高分子・セラミックスぞれぞれの材料分野を代表して、染川さん、戸木田さん、池田さんにご参集頂きました。お三方は、このMFS新学術で初めてキンクに触れた方々でもあります。

巨視的な力学特性から、ミクロな原子結合様式まで異なる三大材料にまたがる普遍則を見い出そうとする試みは、ともすると荒唐無稽な課題に立ち向かうドン・キホーテと嘲笑されかねません。私は折に触れて、さまざまな分野からの精鋭である皆様方が初めてキンクに触れた際、各々の「課題設定」こそが鍵になると申して参りました。MFS新学術期間中は、コロナ禍に見舞われましたが、そのような状況下であっても計画班間・異分野間での活発な交流を通して、それぞれが明確な課題設定のもと領域研究に取り組んで頂いたこと、改めて心より感謝申し上げます。領域運営では、浅学かつリーダー力量不足の私を、常に側で支えて頂いた斉藤拓先生、藤居俊之先生に厚く、熱く御礼申し上げます。

著名な結晶解析の教科書※の冒頭には、夏目漱石の「夢十夜、第六夜」が引用されています。運慶が仁王を掘り創り上げていく様を見た若者が、「なに、あれは眉や鼻を鑿で作るんじゃない。あの通りの眉や鼻が木の中に埋っているのを、鑿と槌の力で掘り出すまでだ。まるで土の中から石を掘り出すようなものだからけっして間違うはずはない」と語ります。さて、MFS新学術を通して皆様方各々が手にした薪の中に仁王は蔵されていたでしょうか？　まずはその検証が必要です。一方、普遍原理を目指して漸近する科学的営みに明確なゴールは無く、次から次へと真の課題に出会う深化の過程は続きます。我々の脳内・体内へしっかりと刻み込まれたキンク強化の課題が、その姿を変えながらも次世代へと受け継がれていくことを願ってやみません。ドーハの悲劇から30年の後に現在の結果を残し、なお次の目標へ向けて前進を続けるサッカー日本代表のように。

※「X 線結晶解析の手引き」桜井敏雄 著 裳華房



2019 MFS 夏季合宿

年次報告会

2019 長瀞巡検

2018 交流見学会（@ 山形）

LPSO2018

2022 年次報告会

若手研究会（@ 品川）

COPYRIGHT 2023 MFS MATERIALS　ALL RIGHTS RESERVED.

A01 多様なミルフィーユ構造を有する新規Mg合金の創製
多様なMg系ミルフィーユ構造の構造制御と物質創製

A01-1　研究代表者
山崎 倫昭
熊本大学 教授

2019年から現職。専門は金属工学、特に腐食防食学・マグネシウムを中心とした合金設計学。領域内ではA01班に所属し、構造制御による新規Mg系ミルフィーユ構造物質の創製に取り組んでいる。

Members

研究代表者	山崎 倫昭（熊本大学 教授／統括、通常場材料創製）
研究分担者	河村 能人（熊本大学 教授／超急冷場材料創製） 奥田 浩司（京都大学 教授／大型量子線その場回折）
研究協力者	竹田 修（東北大学 准教授／溶融塩プロセス材料創製） 小川 由希子（物質・材料研究機構 研究員／相変態材料創製）

A01-1計画研究では、多様なMg系ミルフィーユ構造（MFS）の構造制御と物質創製を目指し、(1) 通常場を用いたMFS物質創製、(2) 非平衡場を用いたMFS物質創製、(3) 大型量子線その場回折・散乱を用いた最適プロセス経路の選択原理の実験的探索を行ってきました。

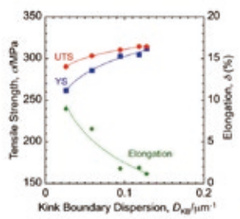
通常場における材料創製とは、非平衡場を用いずに一般的な加工熱処理による新規材料の創製を目指したものです。$Mg_{99.2}Zn_{0.2}Y_{0.6}$ (at%)希釈合金に超低速凝固プロセスを適用することで、$L1_2$クラスタ配列層（CAL［Cluster Arranged Layer］）が高密度に析出したMFS領域をα-Mg母相中に形成させることに成功し、さらに押出加工を施すことで、MFS領域に効果的なキンク導入を達成し、高強度希釈$Mg_{99.2}Zn_{0.2}Y_{0.6}$合金材の開発に至りました。

非平衡場における材料創製では、1秒間に1万℃以上の冷却速度で溶融金属を凝固させる超急冷技術によりMFS組織形成技術を確立しました。$Mg_{98.62}Zn_{0.38}Y_1$合金の過飽和固溶体急冷薄帯を作製したのち、熱処理によりMFS組織をつくり込み、押出固化成形によって急冷薄帯のバルク化とキンク導入を行うものです。熱処理条件と押出加工率の最適化により、動的再結晶粒のないCAL分散組織形成に成功しました。

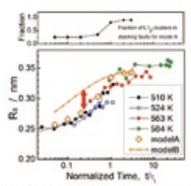
最適プロセス経路の選択原理の実験的探索では、CAL形成／消滅とキンク組織形成の関係を解明してきました。Mg-Zn-Y合金急冷材への小中角散乱（SWAXS）測定などにより、過飽和固溶体からの積層欠陥導入とクラスタ成長の関係を明らかにすると共に、低温での熱処理により短距離積層構造または過渡的な非平衡微細構造である平均周期積層構造が形成することを明らかにしました。LPSO構造の形成制御のみならず、非周期性を持つMFS領域の形成につながる成果です。

研究項目A01では、LPSO型Mg合金をベースに多様なミルフィーユ構造を有する新規Mg合金を創製することが期待されていました。そこで、「経験的ミルフィーユ条件」を満たす新規Mg合金の創製を目指しつつ、この条件の精密化・一般化を目指してきました。具体的には、CALの層間距離制御を行い、キンク形成が発現する特性長を明らかにすることで経験的ミルフィーユ条件の精密化を図ると共に、ミルフィーユ構造の形成・変形支配因子の抽出を行うことでミルフィーユ材料科学の「深化」に貢献しようと研究を進めてきました。CALが底面積層方向に周期的に積み重なることでLPSO構造が形成されますが、この積層数、積層間隔が自由気ままに現れるため、キンクを形成させるために必要なミルフィーユ構造条件を定量的に説明することが難しく、悩み続けた5年間でありました。領域としての研究期間は終了いたしますが、領域皆様との連携を通じて「キンク変形するミルフィーユ構造の条件」の探索を引き続き行っていく予定です。今後ともご指導を頂ければ幸いです。

α-Mg粒中へのMFS組織形成による効果的にキンク変形が導入された例
$Mg_{99.2}Zn_{0.2}Y_{0.6}$希釈合金押出材



$Mg_{99.2}Zn_{0.2}Y_{0.6}$合金低速凝固押出材の機械的特性とキンク界面分散度の関係　キンク界面導入量の増大に伴い強度が上昇



$Mg_{95}Y_4Zn_1$合金急冷材中のクラスタサイズの時間展開　低温での熱処理により、LPSO構造ではなく短距離積層構造または過渡的な非平衡微細構造である平均周期積層構造が形成することを示唆

A01 多様なミルフィーユ構造を有する新規Mg合金の創製
多様なMg系ミルフィーユ構造のキンク制御と材料創製

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

2016年から現職。主な研究テーマは、非鉄金属材料の組織制御と力学特性。領域内ではA01班に所属し、多様な塑性加工法を駆使し、①Mg系LPSO材へのキンク導入と、②キンク形態と構造制御を担当し、キンク強化発現に効果的な組織様相の提案を目指す。

Members

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／汎用・特殊塑性加工法による材料創製と特性評価）
研究分担者	戸高 義一（豊橋技術科学大学 教授／巨大ひずみ加工法による極限化材料創製と特性評価）
研究協力者	湯浅 元仁（同志社大学 准教授／有限要素解析による導入ひずみ予測・定量化） 安藤 大輔（東北大学 准教授／組織観察による高次塑性加工材のキンク形態・構造解析）

「バルクスケールでMg系ミルフィーユ構造（MFS）材にキンクを導入すること」、「キンク強化と微細組織因子が識別できるバルク材を創製すること」という研究課題を設定してから早4年半が、過ぎようとしています。長年、Mgの研究に携わり、材料プロセスに従事する自身にとって、これらの課題は非常に興味深いものであり、新規材料との出会いは高揚感を味わえる有難いものでもありました。一方、LPSO/Mg合金は室温だけでなく高温域においても強度特性に優れることから、従来のプロセス装置で健全なバルク材が創製できるのか？そもそも、キンク強化とキンク関連組織をどのように定量化するのか？　などの不安や葛藤もありました。試行錯誤が日々必要ということは、研究者冥利に尽きるものであり、それが功を奏して、以下に示すような成果を得ました。

データベース化と加工条件の予測（1）：LPSO/Mg合金は、世界的に非常に注目されている金属材料であるため、高温変形に関する論文が数多く報告されている。当該班内で取得した結果とこれら既報をデータベース化、規格化することで、健全バルク化に適切な加工条件を短時間で決定することに成功した。

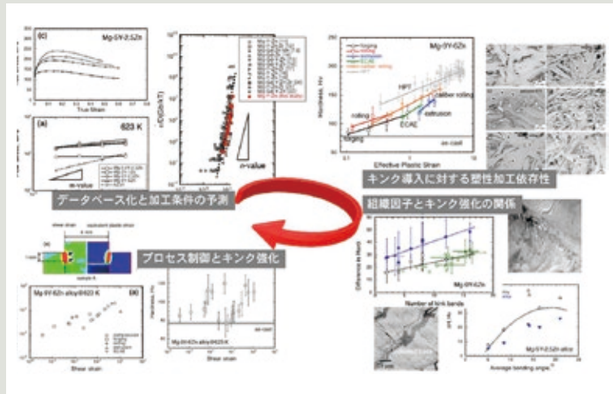
キンク導入に対する塑性加工法依存性（2）：さまざまな塑性加工法を典型的なLPSO/Mg合金に適応し、加工法に関係なくキンク導入できることを確認した。バルク材の硬度は、ひずみ付与の増大と共に向上するものの、硬度増加は加工法に依存し、「キンク強化」と「キンクに関連する組織因子」に相関があることを示唆した。

組織因子とキンク強化の関係（3,4,5）：簡便かつ定量的なキンク強化の評価法とキンク関連組織の識別法に関して思案を重ね、局所的な硬度計測と光学顕微鏡観察像に対する点算法が有効であることに至った。これらの手法により、キンク間隔、キンク数密度、キンク屈曲角度、キンク界面をはじめとする多様なキンク組織因子がキンク強化に影響を及ぼすことを究明した。

プロセス制御とキンク強化（6）：材料プロセスの観点から影響因子を検討し、緻密かつ微細なキンク導入には、せん断ひずみ成分の制御が有効であることを実証した。プロセス制御の観点より、効果的にキンク強化を得るためには必須の知見である。

これら成果は、本計画班に参画頂いている研究者（先生方）、学生諸氏との共同研究によって得られたものです。領域内で平均年齢が最も若く、行動力と活力を合言葉に取り組めた結果でもあり、重ねて謝意を表します。

冶金学において、材料特性をプロセスから予測する/できることは、古来からの課題でもあり、永遠の夢でもあります。そのためには、特性とプロセスに内包し、いずれにも密接に関与する微細組織を理解することも必須です。本課題を通じて、金属材料の「特性（強化）」－「プロセス」－「組織（キンク）」を少しでも普遍化できるように尽力したいと思っています。



[1] Mater Sci Eng A792 (2020) 139777, [2] Mater Let 304 (2021) 130653, [3] Mater Sci Eng A780 (2020) 139144, [4] Mater Charact 179 (2021) 111348, [5] Mater Let 292 (2021)129625, [6] Mater Sci Eng A858 (2022) 144168.

COPYRIGHT 2023 MFS MATERIALS　ALL RIGHTS RESERVED.

A02 キンク形成＆キンク強化メカニズム解明による領域の深化・展開

力学解析によるキンク形成・強化のメカニズム解明

A02-1　研究代表者
萩原 幸司
名古屋工業大学 教授

2019年 大阪大学准教授。2021年より現職。専門は結晶塑性学、材料組織学、マグネシウム、チタン合金といった軽金属材料の開発。領域内ではA02班に所属し、種々の新規組織型ミルフィーユ材料の創製、力学特性評価に取り組んでいる。

Members

研究代表者　萩原 幸司（名古屋工業大学 教授／研究総括，変形・強化機構解明）

研究分担者　岸田 恭輔（京都大学 准教授／マイクロピラー試験，力学特性解析）
榎 学（東京大学 教授／その場観察，キンクによる強靭化機構の検討）

研究協力者　鈴木 真由美（富山県立大学 教授／クリープ変形機構解析）
白岩 隆行（東京大学 助教／キンク形成挙動解析）

“キンク形成により材料を強化するためにはどうすればいいのか？”この疑問解明に真正面からぶつかるべく、A02-1班ではキンク形成・強化のための「ミルフィーユ条件」に着目し、この妥当性について「実験的観点」から検証を進めました。ミルフィーユ条件とは、このプロジェクトを立ち上げるにあたり、LPSO相での知見（経験）をもとに、キンク強化発現の条件を「仮説として推測」したものであり、具体的には以下となります。①硬質層と軟質層からなる層状構造であること。②層間距離はサブミクロン程度以下であること。③結晶の容易すべり系が層面に限定されていること。④キンク形成時において層間剥離を起こさないこと。この検証には「LPSO相以外」のできるだけ多くのミルフィーユ材料の力学特性を理解することが重要ですが、研究開始当時、その対象はMAX相など数例に限られていました。そこで、我々はA04班の北海道大学・三浦誠司先生の提案に基付き、LPSO相のような結晶構造としてのナノスケールミルフィーユ材料だけでなく、マクロ組織としてミルフィーユ構造を示す「組織型ミクロンスケール」材料へと探索の幅を広げました。実際にそのような材料にてキンク形成が本当に生じるのか、正直懐疑的な面もありましたが、意を決して実験を行ってみると、以下の図に示すように、非常に多種多様な合金系でキンク形成、さらにはこれに伴う材料強化、すなわちキンク強化が実証されました。

不思議なことにこの組織的ミルフィーユ材料において、軟質層は結晶対称性の低いマグネシウム（Mg）のみならず、アルミニウム（Al）、さらにはチタン（Ti）にも拡張でき、また硬質層も、それ単体では塑性変形できないような脆い金属間化合物であってもキンク形成が誘導されるなど、極めて多種多様な組み合わせでミルフィーユ材料の創製が可能であることが見出されました。現在これら結果をもとに「ミルフィーユ条件」の再考を進めていますが、当初の予測は、「当たらずとも遠からず」だったのではないかと考えています。①の硬質層と軟質層からなる層状構造であること、はミクロ破壊を抑えるために重要な条件であり、③結晶の容易すべり系が層面に限定されていること、が軟質層、硬質層の種類によらずキンク形成を誘導するキーポイントとなると考えています。さらに追加条件として⑤キンク形成を均一微細に誘導する方策の付与も、重要であることが明らかとなりました。ただし、②のサイズ効果、さらには軟質層と硬質層の厚さ比、体積比の影響の解明については未だ道半ばであり、さらなる実験的検討が必要です。また上記以外にも、高分解能電子顕微鏡観察、マイクロ力学試験、高速度カメラによるその場観察の実施による、キンク形成機構の解明、キンク形成が疲労変形、破壊挙動に与える寄与など、多くの興味深い知見が明らかとなりました。

5年間の連携研究により、当初は思いもよらなかった多くの知見を得ることができ、大変刺激的な多くの経験ができました。改めまして、5年間、本当にありがとうございました。

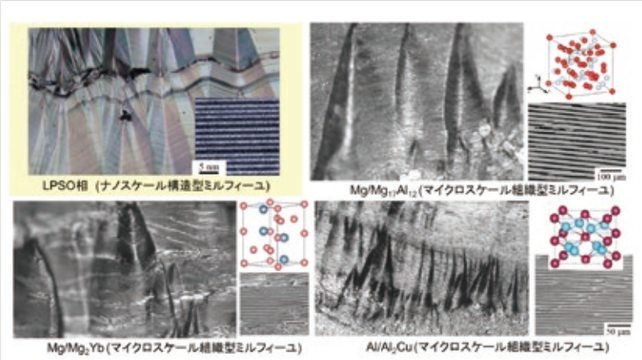


図　種々の「構造型」・「組織型」ミルフィーユ材料におけるキンク形成の実証

A02 キンク形成＆キンク強化メカニズム解明による領域の深化・展開

精密構造解析によるキンク形成・強化のメカニズム解明

A02-2　研究代表者
阿部 英司
東京大学 教授

2017年から現職。物質・材料研究機構のチームリーダーを兼任。専門は材料工学・結晶学、研究は主に、電子顕微鏡や計算機シミュレーションによるさまざまな材料の局所的な原子構造・電子状態の解明である。A02班に所属し，ミルフィーユ・キンクに構造科学の視点から切り込む。本領域代表者としてプロジェクトを牽引。

Members

研究代表者　阿部 英司（東京大学 教授・統括／STEMによる局所精密解析）

研究分担者　波多 聰（九州大学 教授／電子顕微鏡3次元トモグラフィー）
Stefanus Harjo（日本原子力研究開発機構 研究主幹／大型量子線その場回折）
相澤 一也（日本原子力研究開発機構 研究主幹／大型量子線ハイブリッド回折）
上椙 真之（高輝度光科学研究センター 研究員／放射光3次元トモグラフィー）

研究協力者　木村 滋（高輝度光科学研究センター 主席研究員／放射光精密解析）
津田 健治（東北大学 教授／収束電子回折による精密局所解析）
江草 大佑（東京大学 助教／電子顕微鏡によるマルチスケール解析）
川崎 卓郎（日本原子力研究開発機構 研究員／大型量子線構造解析）

「MAXセラミックスのキンクは剥がれてしまうのに、どうしてLPSO-Mg合金では剥離しないの？」「キンク帯が入るとなんであんなに強くなるの？あの異常とも言える加工硬化は、一体どういうこと？」「高分子でよく知られるchevron、あれキンクだよね。これも強化に効くの？」

MFS新学術発足当時の班内・班間での勉強会にて、前LPSO新学術からの継続メンバーは新規参画メンバーからの質問攻めにあいましたが、当時は何一つ明確に答えることはできませんでした。まずは、取り組むべき課題の設定・共有からスタートしたことをよく覚えております。A02班に属する本研究グループは、電子顕微鏡，大型量子線施設を含めた最先端計測法を駆使した構造科学の観点から、キンクの形成や強化を支配する「キンク素子」に相当するミクロ因子を見いだすことを第一に掲げて取り組んできました。無論、ただ計測解析を実施することのみが目標ではなく、本研究班で得た新知見を、A03理論班を始めとする各計画班と横断的に共有し、領域研究の深化軸と展開軸を効果的にブリッジングする役目を強く意識してきたつもりです。MFS新学術も終了となりますが、班内・班間での様々な方々との共同研究を通して、まさに1+1>>2となる、ワクワクする新展開があったと心底実感しております。以下、あくまで一部ですが代表的な結果を記します。

MFS型希薄Mg-Zn-Y合金中の特異な溶質co-clusterの原子構造・電子状態の解明：様々な最先端計測法が一同に会する（実に贅沢な）大型共同研究から、極めて興味深い結果を得ることが出来た。同結果から、LPSO型構造の安定性にも電子状態が大きく寄与していることが判明し、高強度合金設計の普遍的指針に対して大きな糸口を得る成果となった。

MFS型Mg合金中のキンク界面における（結晶性）回位の発見：格子が扇形形状をとる回位が形成されていることを見い出した。バルク結晶内において見い出された初めての回位であり、キンク形成初期に界面剥離を防ぐ緩和構造としての役割を果たしていると考えられる。

MFS-キンク界面の動的生成・自己組織化：MFS型Mg合金の熱間押出し加工中、MFS成長とキンク界面形成が相互依存しながら発展する自己組織化によって、微細なキンク界面が階層的に分散されることが判明した。これら階層化されたキンク界面が、強化に寄与していると考えられる。

室温変形におけるキンク界面-溶質相互作用（PLC）効果：Mg合金において、Portevin-Le Chatelier（PLC）効果が室温にても明瞭に発現することがA03班によって見い出された。STEM観察、MDシミュレーションを通して、溶質原子との相互作用を含めたキンクダイナミクスが初めて明らかとなった。

高分子材料の新しい強化機構 - ナノモザイク化：HDPEが熱延伸によって飛躍的に高強度化されることがA04班にて見い出された。SAX・電子顕微鏡による実験、およびMDシミュレーションにより、ラメラ結晶のナノモザイク化に起因する新しい強靭化モデルの提案に至った。

Mg合金のキンク解析に関しては、やれば何とかなるだろうと考えていた節はあります（予想外の室温PLCには驚きましたが）、一方の三大材料展開、言うは易しですが、実際はどうなるものかと…「わからなくても歩いて行け、行けばわかるよ」の精神で、えいやと突き進んできました。金属屋の拙い質問にも、常に快く議論してくださった高分子の皆様方には、平身低頭、心から感謝申し上げます。

最後に、A02-2の代表者として、本計画研究にご参画いただいた皆様に厚く御礼申し上げます。

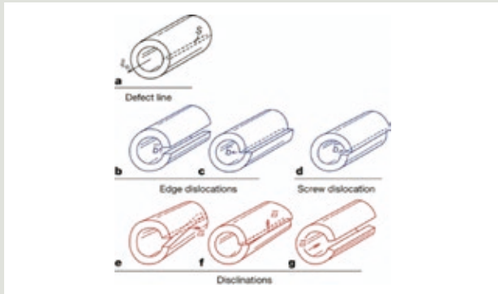


図　MFS 型 Mg 合金中のキンク界面における回位の発見

COPYRIGHT 2023 MFS MATERIALS　ALL RIGHTS RESERVED.

A02 キンク形成＆キンク強化メカニズム解明による領域の深化・展開
モデリングによるキンク形成・強化のメカニズム解明

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。

Members

研究代表者　君塚 肇（名古屋大学 教授／研究総括、キンク形成原子論解析）

研究分担者　板倉 充洋（日本原子力研究開発機構 研究主幹／キンク構造電子論解析）
只野 裕一（佐賀大学 教授／キンク強化マルチスケール解析）

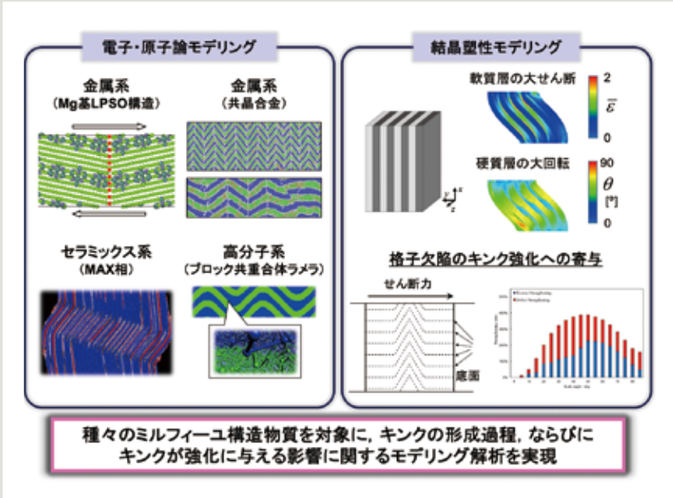
研究協力者　眞山 剛（熊本大学 准教授／キンク形成結晶塑性解析）
山口 正剛（日本原子力研究開発機構 研究主幹／キンク構造電子論解析）
椎原 良典（豊田工業大学 准教授／局所応力電子論解析）

本計画研究は、先端の計算力学モデリングに基付き、ミルフィーユ構造（MFS）特有の硬質・軟質層状構造の変形過程ならびにキンク形成・強化のメカニズムを明らかにすることを目的としています。これまで、実験班から供与された知見を適宜活用しながら金属系、セラミックス系、高分子系のMFSにおけるキンク形成の過程を微視的・巨視的にモデル化することで、キンク形成の様態ならびにキンク形成から強化に至る因子の解明を進めてきました。

微視的スケールを扱う電子・原子論モデリングでは、種々の材料系におけるキンク形成のメカニズムを原子レベルの塑性変形素過程に注目しながら解明しました。MFSの基軸であるMg基LPSO構造については、大規模第一原理計算により硬質クラスタ配列層の形成過程を解明すると共に、キンク界面（刃状転位列）のせん断応力下における移動抵抗の描像を獲得することを通じて微視的なキンク強化機構を検証しました。組織型（共晶合金等）の金属系MFSにおいては、分子動力学計算の活用によって材料内部の微視的な弾性座屈に起因するキンクと複数の塑性変形プロセスの重畳によるキンクが形成し得ることを見出しました。加えて、MAX相セラミックスや高分子系（ブロック共重合体ラメラ）に対しても、微視的な塑性変形挙動がキンク形成を引き起こす過程の詳細を明らかにしています。

巨視的スケールを扱う結晶塑性モデリングでは、結晶塑性有限要素法を活用することで金属系MFSの弾塑性変形挙動をモデル化し、キンク形成のメカニズムを明らかにしました。これにより、軟質層と硬質層がせん断変形と結晶回転をそれぞれ主に担うことでキンク帯が形成する描像を突き止めました。さらに、高次勾配結晶塑性モデルを活用することでメゾスケールにおけるキンク強化の発現機構を検証しました。その結果、キンク強化の主機構には、結晶方位による強化、ひずみ勾配に起因する格子欠陥による強化、キンクが近接することで発現する強化が関わっていることを見出しました。特にキンクの近接効果による強化は、従来の多結晶体における粒界強化とは異なるキンク特有の強化機構であると考えられます。

新学術領域研究の醍醐味は、多面的なアプローチを持つ領域メンバーが共通の目的意識のもとで真剣に連携することによって、未解明の現象の真の姿に迫れることだと考えます。コロナ禍の影響のため、対面でのコミュニケーションが妨げられた時期もありましたが、新たな交流と共同研究の立ち上げに恵まれ、このプロジェクトに参画できたことを深く感謝しています。皆様、ありがとうございました。



A03 ミルフィーユ構造のキンク理論構築
異分野融合によるキンク形成・強化の理論構築

A03-1　研究代表者
藤居 俊之
東京工業大学 教授

2013年から現職。主な研究テーマは、金属および合金の繰り返し変形挙動と転位組織の発達。領域内ではキンク理論構築の統括を担当。また、さまざまな分野から集まる研究者交流の推進役として、オールジャパン体制を支える。

Members

研究代表者　藤居 俊之（東京工業大学 教授／キンク形成・強化理論の構築と研究統括）

研究分担者　中島 英治（九州大学 教授／キンク形成に係わる格子欠陥の実験的解析）
Svadlenka Karel（京都大学 准教授／数学によるキンク形成のモデリングと基本原理抽出）
稲邑 朋也（東京工業大学 教授／結晶物理学に基づくキンク形成・強化の運動学的モデル構築）
垂水 竜一（大阪大学 教授／微分幾何学に基づくキンク変形モデルの高精度化）

研究協力者　長谷部 忠司（神戸大学 准教授／場の理論によるキンク形成・強化の結晶塑性解析）
光原 昌寿（九州大学 准教授／キンク変形に伴う格子欠陥分布の定量評価）
山崎 重人（九州大学 准教授／キンク形成過程の精密ひずみ解析）

LPSO型マグネシウム合金をはじめ、硬質層と軟質層からなるミルフィーユ構造物質で、変形によってなぜキンクが形成されるか、また、キンク形成によってなぜ高強度化するかを理論的に解明することが本計画研究の目的でした。研究がはじまって早い段階で、稲邑によるRank-1 接続の考えにより、Ridge型キンクが形成される際には、キンク界面で割れや重なりが生じない条件として、回位の生成が必須となることが示され、領域全体での共通認識として、見通しの良い方向性を与えることができました。また、研究開始当初から、キンク形成と回位との関係性、特に回位と転位との間を繋げる厳密な理論の体系化が要求されていました。その答えとして、垂水による微分幾何学を用いた解析から、回位と転位の等価性が数学的に証明されました。この成果は、これまで材料学の立場で現象論的に用いていた回位の転位による表記が数学的にも正しいことを示すものです。これにより、回位のフランクベクトルを微分幾何学から定量評価することが可能となり、キンク形成およびキンク強化を理論解析する上で極めて重要な成果となりました。

本計画研究は、異分野融合を標榜しており、理論解析のみならず、計画研究班内で独自の力学試験や組織観察等の実験にも取り組んできました。中島と光原は、LPSO型マグネシウム合金において、キンクの前駆組織の形成やRidge型キンクの三次元形態を精緻な電子線後方散乱回折法によって明らかにするとともに、稲邑の理論解析から予測されたRidge型キンク形成に伴う回位の存在を実験により立証し、フランクベクトルの大きさを実測することに成功しています。また、藤居はLPSO型マグネシウム合金の室温変形時にポルトヴァンルシャトリエ効果が発現することを見出し、キンク形成後の加工硬化を伴った変形では、溶質原子の影響が強く表れる特異な変形が生じることを明らかにしました。この研究は、A02-2計画研究との連携研究に発展し、LPSO型マグネシウム合金のキンク形成後の塑性変形、すなわちキンク強化の本質を解明する上で、極めて重要な成果として位置づけられます。

新学術領域研究が個人研究と大きく異なる点は、ひとつの研究課題に対し、多様な専門性を持った研究者が多角的見地から議論できるところにあります。長時間に亘って深い議論を重ねた上で大きな発見に至る瞬間は、まさに歓喜です。

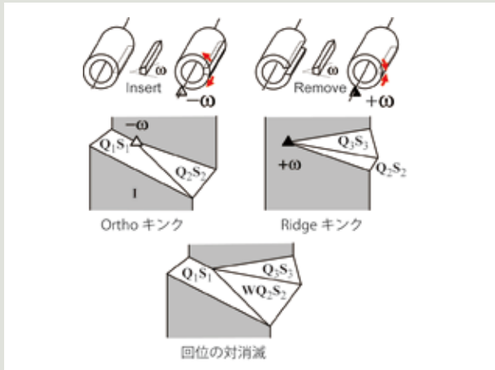


図 1 Rank-1 接続条件から導かれるさまざまなキンク形態とそれに対応する回位

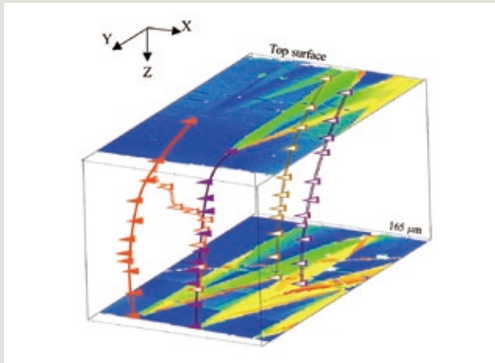


図 2 試料をスライスさせながら電子線後方散乱回折法を適用した結果得られたキンクの三次元形態

COPYRIGHT 2023 MFS MATERIALS　ALL RIGHTS RESERVED.

A04 構造制御＆キンク制御による領域の展開

新規金属・高分子系ミルフィーユ構造の構造制御と物質創製

A04-1　研究代表者
三浦 誠司
北海道大学 教授

2013年から現職。専門は金属状態図、固溶体合金や金属間化合物の力学物性。特にさまざまな組織制御による構造・物性制御を行っている。A04班では組織型ミルフィーユ構造の導入とキンク形成を通じて力学特性への影響を解析した。

Members

研究代表者　三浦 誠司（北海道大学 教授／組織型金属基ミルフィーユ探索）
研究分担者　江村 聡（物質・材料研究機構 主幹研究員／組織型チタン合金ミルフィーユ探索）
斎藤 拓（東京農工大学 教授／高分子系ミルフィーユ探索）
藪 浩（東北大学 ジュニア主任研究者［准教授］／高分子系ミルフィーユ組織制御法確立）
研究協力者　徳永 辰也（九州工業大学 准教授／金属基ミルフィーユ組織制御法確立）
池田 賢一（北海道大学 准教授／セラミックス系ミルフィーユ組織制御）
早川 晃鏡（東京工業大学 教授／高分子系ミルフィーユ組織制御法確立）
堀内 寿晃（北海道科学大学 教授／結晶型金属基ミルフィーユ探索）

金属・セラミックス・高分子のいわゆる三大材料に対してミルフィーユ構造を導入した新たな物質群を創成し、キンク強化の本質に迫る実験的研究に展開することを目的としてさまざまな取り組みを行いました。Mg基LPSO相やMAX相セラミックスのような、結晶構造がミルフィーユ構造である「結晶型」と、二相合金のラメラ構造による「組織型」の双方の探索と実現に関する、精力的な研究を行いました。

Al-AgやAl-REにおける析出や共晶を用いた組織制御に基付く「組織型」ミルフィーユは三浦グループが実施しました。界面形成条件の熱力学的理解には研究協力者・徳永の研究が大きく寄与しました。また、結晶型であるMAX相をV固溶体と組み合わせた「ハイブリッド型」ミルフィーユ組織を作製し、MAX単相では破壊に至る低温でもキンク変形が導入されることを実証しました。本研究結果は研究協力者・池田によるMAXの組織制御（ポア導入）に基づくキンク導入とも密接な関係を持って実施されました。江村グループ（物質・材料研究機構）では、二相チタン合金に加工・熱処理を施して組織型ミルフィーユを作製し、キンク導入傾向を明らかにしました。

斎藤グループ（東京農工大）は高分子結晶（高密度ポリエチレン）を熱延伸することによって硬質層（結晶層）が強固につながったミルフィーユ構造を実現し、伸長しても硬質層が崩れず、高強度化に繋がることを明らかにしました。藪グループ（東北大）はブロックコポリマーを基礎とした高分子系ミルフィーユ作製に取り組み、SBSトリブロック共重合体によるミルフィーユ構造など、多彩な構造に結実させました。

金属・セラミックス系ではキンク変形実現のために、すべり変形を強く意識した、特定の結晶学的対応を有するラメラ構造を実現する、という強いルールに従った組織制御を模索しました。このような観点は過去にはおそらく例がないものと思われます。Al合金などで実現される当該組織の形成過程の中にはすでに1950年代に提案されたもののrevivalであることが事後に判るなど、金属学の蓄積が大変厚いことを実感もしました。

LPSOやMAXのような、軟質層間の距離が短い結晶型物質と比べ、組織型物質は軟質層間が離れており、キンク様構造の発生の基本である転位間相互作用に基付くキンク界面形成＝刃状転位配列が一様に形成されるかについては疑問もありましたが、実際にキンク様構造が出現しており、一般化に向けての蓄積がなされてきたと確信しています。また、研究協力者・堀内のCo-Nb金属間化合物でのキンク形成の実証は、新たなミルフィーユ構造を有する相の探索に光明を与えるものと思われます。

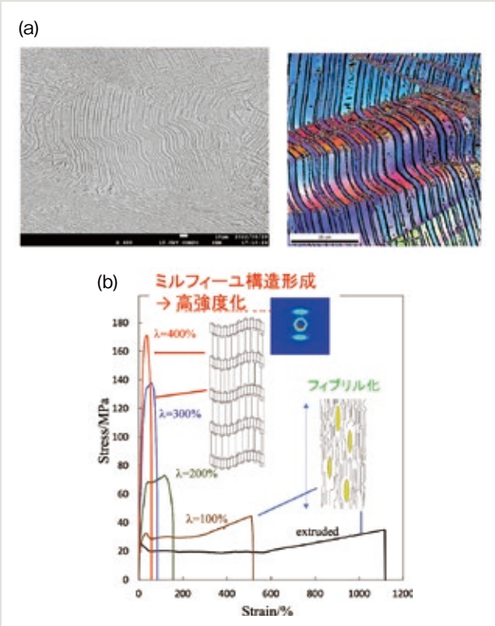


図1(a) 上下方向に圧縮変形を与えた Ti-12Mo 合金､50% 圧縮 @300℃の SEM 組織（縦断面）と EBSD 逆極点図 (b) 熱延伸した高密度ポリエチレンの応力 - ひずみ曲線。

A04 構造制御＆キンク制御による領域の展開

新規金属・高分子系ミルフィーユ構造のキンク制御と材料創製

A04-2　研究代表者
伊藤 浩志
山形大学 教授

2010年から現職。専門は高分子成形加工、高分子構造・物性。特にさまざまな成形加工による構造・物性制御を行っている。A04班では高分子系ミルフィーユ構造の導入とキンク形成を通じて力学特性への影響を解析した。

Members

研究代表者　伊藤 浩志（山形大学 教授／研究総括・高分子系物質の特殊成形加工と形態制御）
研究分担者　寺田 大将（千葉工業大学 准教授／塑性加工法による新規金属物質の形態制御）
研究協力者　瀧 健太郎（金沢大学 教授／高分子系物質の加工と形態制御）
兼子 佳久（大阪公立大学 教授／新規金属物質の形態制御）

ミルフィーユ構造のキンク強化発現機構を新規金属・セラミックス・高分子系ミルフィーユ構造「物質」に対して、さまざまな塑性加工法によりキンク形成と強化を実現した新規ミルフィーユ構造（MFS）「材料」を創製することを目的として多様な取り組みを行いました。

これまで実績のあったMg系合金以外の新規金属系ミルフィーユ物質として、寺田グループは、Al合金に着目し研究を行いました。これら積層材料では、8サイクル以上の繰り返し重ね接合圧延（ARB）加工でキンク導入が確認され、層間がキンク帯の導入に影響することを明らかとしました。さらに、研究協力者の兼子グループでは、Al-Agに対して析出時効処理と冷間圧延によりMFSが形成され、圧縮試験によってキンク帯形成が確認できました。Al-Ag時効析出材では、その硬さはキンク導入量に対して変化していませんでした。

高分子系において、伊藤グループにおいて、1）ブロックコポリマーによるMFS作製とキンク形成、2）多層フィルムを用いたMFSの形成とキンク形成、3）結晶性高分子の高圧プレスによるキンク形成に関して取り組みました。1）では、ラメラ構造を有するスチレン・ブタジエン・スチレン（SBS）ブロックコポリマーに対して一軸延伸によるキンク形成加工を行った結果、MFSが折れ曲がるキンク構造が確認されました。また、研究協力者の瀧グループではSBSブロックコポリマーにおいてせん断変形を負荷し、キンク形成とその形成によって力学特性が変化することを明らかにしました。2）では、ポリスチレン（PS）/スチレン・エチレン/ブチレン・スチレン（SEBS）系やPS/ポリブチレンテレフタレート（PBT）系の多層フィルムでは３２０層を有するMFSを作製しました。この多層フィルムに圧延加工を施すことで、キンク形成が確認され、さらに結晶転移が生じることが分かりました。

3）では、結晶性ポリマーであるポリプロピレン（PP）についてプレス圧延を行いました。その結果、圧延回数を増やすことにより最大強度が大きくなることが分かりました。図1には、PPの小角X線散乱（SAXS）画像と引張試験における応力・ひずみ曲線を示します。その結果、4点パターンが現れ、これは圧延によりキンク構造が現れたということを示唆しています。この圧延サンプルは未圧延サンプルと比較し、2倍程度の高強度を示しました。しかしながら、これまで検討してきた材料でのキンク帯とキンクサイズによる強化率の相関解析については未だ不明な点も多く、今後は、この相関関係と結晶化や分子配向とキンクの関係も明確にする必要があり、MFSのキンク強化理論を確立するために実験的アプローチを加速します。

高分子分野においてキンク（折れ曲がり）は層界面、結晶と結晶の界面、微結晶間のタイ分子鎖変形による形態学的な観察が行われてきましたが、キンク構造と力学物性の関係に関する報告は皆無でした。A04班班長（東京農工大・斎藤拓教授）から、この研究課題の話をお聞きし、高分子系ミルフィーユ構造の作製とキンク導入による力学挙動がどのように変化するかという大きな課題に出会えました。本研究に取り組んだ5年間は、高分子研究者として有意義な時間でした。筆者の能力と実力では、この課題解決は不十分であり小さな一歩でした。しかし、この学理の追及は、高分子材料科学の新たな大きな一歩であると感じています。これらの関係を解明することで、新たな高分子材料強化原理を展開することが可能であると確信をしています。

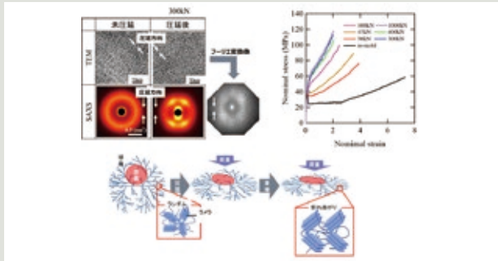


図1　ポリプロピレン（PP）フィルムの圧延によるキンク形成と力学特性変化
a）PP 圧延サンプルの TEM および SAXS 像　b）一軸引張による応力―ひずみ曲線（異なる圧延荷重での変化）c）結晶構造の変化のイメージ（ラメラの折れ曲がり）

COPYRIGHT 2023 MFS MATERIALS　ALL RIGHTS RESERVED.

ミルフィーユ・キンク、来し方行く末

新学術領域研究「ミルフィーユ構造の材料科学」の研究期間終了にあたり、三大材料（金属、高分子、セラミックス）それぞれの研究者にお集まり頂き、領域代表の阿部先生と共に、何が分かったのか、苦労した点、今後の展望などについてざっくばらんに語り合って頂きました。

三大材料とミルフィーユ・キンク

阿部：まず戸木田先生に高分子についてお伺いします。高分子を変形させた時のキンク構造は知られていたけど、キンク構造を持つ材料の力学物性を測ろうということはなかったのですね。

戸木田：ポリエチレンやブロック共重合体についてキンク構造※1を持つ材料の力学物性をみようということは、私が知る限りなかったですね。高分子材料では力学物性を強化するのであれば、分子鎖を伸ばせば良いと考えます。ラメラ構造（高次構造）の変形によって材料強化ができることを見出せたのは、高分子科学では画期的なことではないかと思っています。

阿部：（拍手）

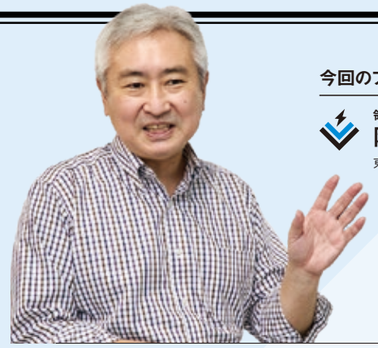
戸木田：ミルフィーユのお話を伺って、私の研究室では液晶高分子を使って高分子材料のモノドメイン試料をつくっていますから、これを使えばいいんじゃないかと考えて公募研究に応募しました。キンクについて2019年のMRSで報告をしたところ、阿部先生がこれを引っ張れとおっしゃったんです。実験したところ、キンクでは強くならないという結果が出てきた。学生にも「キンクじゃ強くならないんだよ。」と言って実験を進めていました。そんな時期に、斎藤先生（A04班班長）と阿部先生のご研究で、ポリエチレンで熱延伸させて、ラメラが途切れた状態だと強くなるという結果が出てきた。我々も同じような結果が出てきたので、キンクでは強くならないと確信することができました。ブロック共重合体のラメラ構造の次に液晶高分子のスメクチック層構造※2でも実験しました。こちらの方はより明確で、キンクを形成すると、破断応力は小さいけど，粘り強いのですよ。ものすごく伸びる。

阿部：金属の研究者も当初はキンクを強化因子として注目したのですが、今になってくると破壊を抑えて変形をもたらす塑性子でもあるんですよね。金属材料に移りますが、マグネシウム研究の第一人者である染川先生に、まだ分かっていないキンクで遊んでみてください、ということで計画研究の代表をお願いしました。いろいろ試して頂いたのですが、実感はどうですか。

染川：一言で言うと本当に扱いにくいです。マグネシウムは加工しづらいと言われていますが、200℃～300℃程度まで温度を上げれば十分加工できます。ですが、キンクが入る材料は硬くなりますので、塑性加工をしようとするとすごく温度を上げる必要があります。だから従来のマグネシウム合金と比べると扱いにくいですが、逆に言うと、それだけ高温でも高強度な材料ですから、今まで実現できていないところを補完できる材料だという見方はできますね。

阿部：不均一変形みたいなのが大変だというのが、根っこのどこかにありますかね。

染川：ありますね。そこは良いところでもあり、悪いところでもあります。マグネシウムの不均一変形や強度を図面上にプロットした時に、従来のマグネシウムにない領域を示すことができていると思います。本当に特異ですので、マグネシウムが持っているポテンシャルを引き上げてくれるし、固定概念を覆してくれるということからも、非常に大事なことだと思います。



今回のファシリテーター

領域代表、A02-2 研究代表者
阿部 英司
東京大学 教授

阿部：ありがとうございます。次にセラミックスですが、そもそもキンクは1990年代の後半にMAX相※3と呼ばれる一連のセラミックスでキンク変形が起こることがわかり、当時は強度を上げるというよりは、室温塑性に影響を与えることが注目されていました。一方で、キンクが強度特性にどのような影響を与えているのかを示したのは多分池田先生が初めてだと思います。

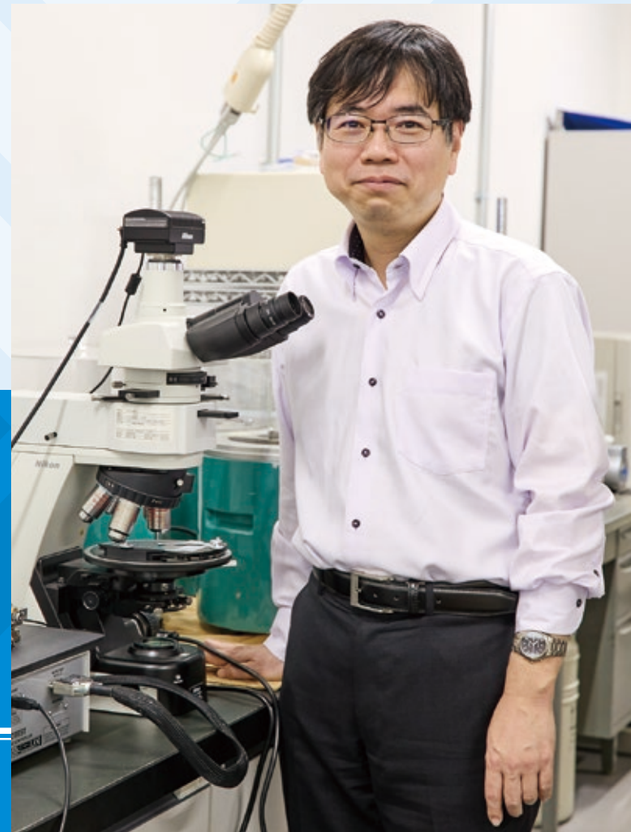
池田：キンク強化がセラミックス、MAX相でも生じるのかを検証するためにはキンクが入るような試料をつくらなくてはいけなかったのですが、NIMSグループの協力も得て、強磁場を用いることで配向試料を作製することができたのは大きかったと思います。それで、そこにキンクが入るかどうかを確認したところ、うまく入りましたので、今度は強化に寄与するのかというのを検証したのがここ1～2年くらいでした。MAX相のキンクでも降伏応力が上がるのではないかと思っていたのですが、キンクと共に層間はく離が発生するので上がりませんでした。ただ、よく解析してみると、降伏後の加工硬化挙動が異なるということが確認できました。層間はく離の量を変えた試料では、降伏応力はその量に依存しますが、加工硬化指数はキンクが導入されると増加する、ということを今回のプロジェクトで明らかにできてよかったと思っています。

異分野融合は達成されたのか？

阿部：以前の新学術領域研究「シンクロ型LPSO構造※4の材料科学」ではマグネシウム合金に特化したテーマでプロジェクトを立ち上げて、その成果としてキンクが割れないでちゃんと入ることが確認されました。それで今回はマグネシウムを成功例として深化軸に捉えて、高分子、セラミックスなどに展開してきました。私も今回のプロジェクトで初めて高分子やセラミックスの研究者と深く関わったのですが、そういった意味での異分野融合みたいなところで、ご発言頂けますか。

池田：私も戸木田先生もA04班に所属していて、そこは高分子、金属、セラミックスといろんな材料を扱っている人が集まっているので、初期の勉強会などではまず言葉が通じるようにするところからはじまりました。金属の先生方の言葉と、高分子の先生方の言葉をいかに通じさせるかというところが重要だと思いましたし、そこが勉強できて良かったと思っています。

戸木田：ミルフィーユ材料科学の話を学部一年生にしたんですよ。そうしたら、金属材料の成果を受けて高分子科学研究に展開することにかなりの学生が興味を示しました。私の所属する物質理工学院の1年生は、金属材料分野に進む学生もいれば、高分子科学に進む学生もいます。ミルフィーユ材料科学の話に興味を持った学生を見ていると、材料教育の基礎課程を考え直さなくちゃいけないのかなと思います。我々大学に携わる人間と



A04 公募研究代表者
戸木田 雅利
東京工業大学 准教授

2021年から現職。主な研究テーマは、高分子液晶、高分子構造制御、単一ドメイン試料を用いた高分子物性解析。領域内ではA04班に所属し、伸長変形した試料の放射光X線散乱/応力同時測定で、高分子ラメラ構造へのキンク導入、力学物性と構造変形の相関の解明を目指す。

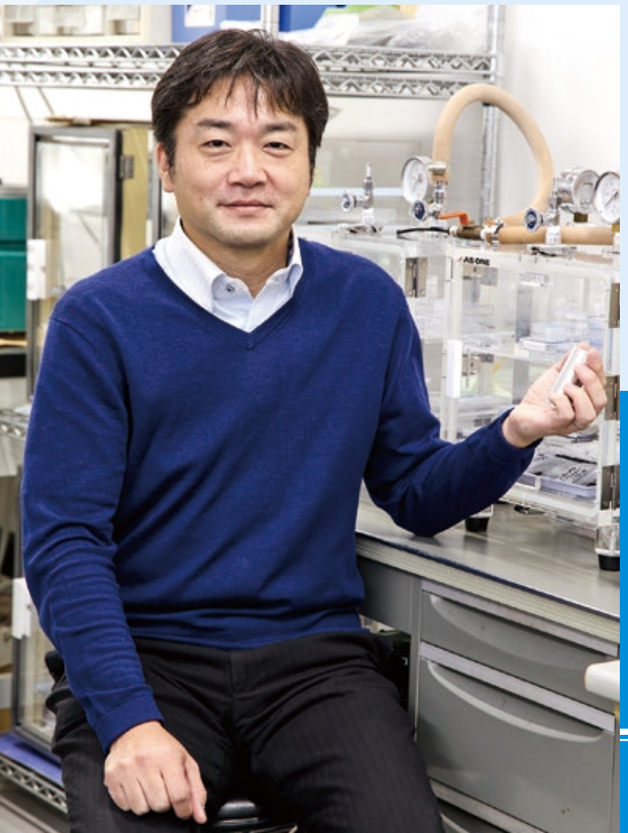
COPYRIGHT 2023 MFS MATERIALS　ALL RIGHTS RESERVED.

しては、研究を教育に結び付けていけたらいいのかなと思っています。

阿部：新学術領域は基本的には学理構築なんですよ。学問を思い切りやって良いところが新学術領域の良いところです。今回金属とセラミックスと高分子の三大材料に展開するぞということを大々的に言えたのは、他でやっていなかったからなんですよね。この新学術から三大材料をキーワードと捉える方々が多くなってきていると思います。金属と高分子で、どこか共通点が必ず出てくるという雰囲気が高まってきているので、次のプロジェクトでは当たり前のように各研究計画班に、それぞれの材料の専門家がいて良いと思うんですよ。

染川：戸木田先生のお話と被りますが、ネーミングって凄く大事で、研究業務員さんに仕事をお願いする際に、「これは、ミルフィーユ案件です」と言うと、何をしなければいけないのかすぐに理解してくれます。硬い相と軟らかい相からなる複合材の圧縮試験を依頼したとします。複合材料の話をしてもまったく理解してもらえないのに、「ミルフィーユの試験をお願いします。」と言うと、ケーキをイメージしてやるべき内容を理解してくれるし、結果にも興味を持ってくれる。それで、業務員さんにミルフィーユを差し入れしてあげると喜ぶっていう（笑）。

阿部：オチが付くわけですね（笑）。戸木田先生のお話と根っこは同じですね。大学1年生とか、専門はこれからっていう方々に説明する時に役立つ。三大材料という点ではどうですか。



染川：まず、セラミックスに関してですが、セラミックス＝脆いというイメージがありましたが、キンクによって塑性変形能が付与されることは勉強になりました。また、高分子のプロセスがマグネシウムとほとんど一緒であることも驚きました。伊藤先生の研究室を見学させて頂き、使っているプロセス装置が全部一緒でした。違うところは加工温度だけ。

阿部：私が実感したのは、キンクの話に回位※5論を入れようとすると、古い教科書などでは必ず回位が入るとデラミネーション※6が起こります、デラミネーションこそが回位なんですよ、という書き方をしていて、それを地でいっているのがセラミックスなんですね。MAX相とLPSOを比べていくと、挙動が明らかに対をなしていて、MAX相は予測通りミクロな空隙ができてしまって、LPSOではそれが生じない。比べるとよりはっきりしますよね。

池田：三大材料としたおかげで、新しい知見が出てきたなという気がします。

コロナ禍にも負けず

阿部：さて、プロジェクトがはじまって、淡路島での研究会（令和元年度夏季研究会［淡路夢舞台国際会議場］）がすごく盛り上がったその年度末ですよ、コロナが来たのが。結局、2年たって今年3月ようやく報告会が再開できました。ハイブリッド会議としましたが、皆さんオンラインに慣れているから、会場とオンラインがほぼストレスなく、質疑応答などもスムーズにできていましたね。それから、ずっと先送りしていた国際会議がようやく12月に再開となります（LPSO/MFS2022［品川プリンスホテル］）。そのあたりいかがでしたか、コロナという時期について。

池田：第二期の公募の辺りにモロに被ってしまい、学生さんの活動などにも制限がかかってしまって、なかなか研究が進みづらいと言いながらも、かえって集中して考える時間が多く取れたのかなと思います。ディスカッションの時間は逆に増えたのかなと思いますし、当時の学生さんにもしっかり頑張ってやってもらったので、今となってはよかったかなと思っています。ただ、思うように手が動かせないというもどかしさはどうしてもありましたね。

染川：総括班の予算で全員にZoomのアカウントを配布して頂きましたよね、あれはすごく助かりました。画面に結果を映し出しながら、すぐにみんなで話し合うことができる。会えないけど、ちょっとした情報交換がすぐにできる。情報共有の速さに関しては非常に助かりました。一方で、淡路島の次の対面研究会がなかったというのは残念でした。

池田：対面だと隙間の時間で話が進みますよね。

阿部：オンラインの弱点は、ではこのセッション終了します、で本当に終わっちゃうところですよね。対面だと、セッション終了後に自発的にあちこちで議論のクラスタができて、そこで話ができる。これは対面ならではですよね。でも確かにオンラインのおかげで情報共有は速くなりました。こんな面白い結果が出たのでとりあえず皆さん、みたいに。

染川：場所を選ばないし、学生さんも自由に会議に参加できる。

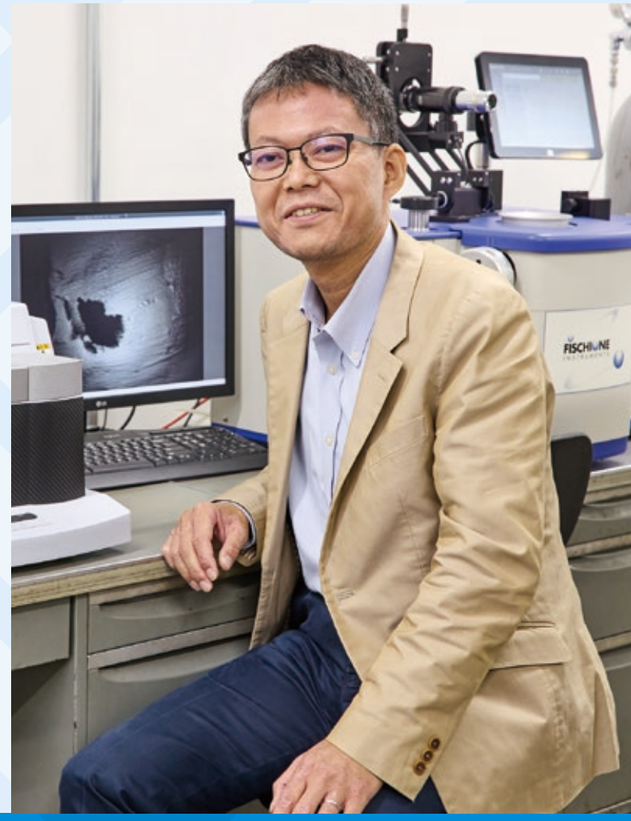
次は何を目指すのか

阿部：最後に、次はこういうことをやったら面白いんじゃないかということがありますか。以前のプロジェクトではLPSOに特化して、その成果としてキンクの面白さが浮かび上がってきて、今回のプロジェクトでは高分子、セラミックスまで発展しました。じゃあ次となった時に、ただ三大材料を集めただけだと何も面白くなくて、ここで見つかった物理か何か、新しい現象を発展させるということにしていかないとダメなんですよね。

戸木田：難しいですよね。高分子ですと、コンポジット材料に展開するというのはありかなと思っています。ミルフィーユ構造をコンポジット材料でつくる。板状のフィラーを使ったポリマーコンポジット材料はどうだろうかと考えて、今つくりつつあります。

池田：第一期の公募研究の最後に少し行っていたのですが、セラミックスの粉体の中にPMMA※7の球状粒子を入れて、焼結する時に焼き飛ばしてできたポアにキンクがぐっと入って、最終的に緻密体の中にキンクが入るということを考えたのですが、結局達成できませんでした。ですが、そこは球状粒子だったからかなと考えています。板状の高分子を使うことでポアの形状を制御して、そうするといろんな特性が上がりますよ、という研究をNIMSのグループがされているので、こちらでも使えるといいなと考えています。

阿部：このプロジェクトでいちばん大事なのは、やはりモノなんですよね。シミュレーションだけで全部やろうというのではなくて、必ずモノありきで、そこからコトを深めるという。だから材料創製は必須ですが、三大材料に跨る普遍的な力学則へのチャレンジは続けていきたいですね。。本日はどうもありがとうございました。



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

2016年から現職。主な研究テーマは、非鉄金属材料の組織制御と力学特性。領域内ではA01班に所属し、多様な塑性加工法を駆使し、①Mg系LPSO材へのキンク導入と、②キンク形態と構造制御を担当し、キンク強化発現に効果的な組織様相の提案を目指す。

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目指す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。

◆用語解説

＊1 ブロック共重合体
2種類以上の高分子鎖から成る重合体で，同種の高分子鎖が並列して並ぶ反応を通じて、同種の高分子から板状のラメラ組織が形成され、これをミルフィーユ構造の新たな発現形式と捉えている。それぞれの高分子の物性を大きく変え、また長さを調節することで、ミルフィーユ構造の硬軟二層の物性および層厚さをコントロールすることが可能となる。

＊2 スメクチック層構造
液晶材料が形成する層状構造のひとつであり、液晶を構成する棒状分子の長軸が並行に配列した層を形成する。層に対して並行方向には流動性を持つが、垂直方向には流動性を持たないため粘性が大きく、光学的異方性を示す。

＊3 MAX相
$M_{n+1}AX_n$の化学式を持つ三元化合物（n=1～3）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。

＊4 シンクロ型LPSO構造
Mg-Zn-Y合金などで発見された長周期積層規則構造(Long Period Stacking/Order)の総称。Mgの2H積層に対して溶質元素濃化を伴う積層欠陥が周期的に導入された構造であり、積層秩序と化学秩序が同期していることからシンクロ型と命名された。

＊5 回位
一般には、連続体中の局部的な回転によってもたらされる欠陥構造を意味する。ここでは転位などと比肩する、結晶性固体中に存在しうる欠陥構造として考えており、ミルフィーユ構造に導入されるキンクの特徴的構造として、キンクの力学的安定性の根幹であると共に、強化機構の鍵として取り扱っている。

＊6 デラミネーション（層間はく離）
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。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。

＊7 PMMA
ポリメチルメタクリレート。メタクリル酸メチルを重合してできるアクリル樹脂のひとつであり、透明性が高いために有機ガラスとして用いられている。

COPYRIGHT 2023 MFS MATERIALS ALL RIGHTS RESERVED.

Activity／MFS 活動報告

2022.12.11-14
国際会議 “LPSO/MFS2022”

2022年12月11日から12月14日の4日間にわたって、東京 品川プリンスホテルにおいてThe 5th International Symposium on Long Period Stacking/Order Structure and Mille-feuille Structure（LPSO/MFS2022）が開催された。本国際会議は2012年の札幌開催より通算5回目の開催（2014年：熊本、2016年：京都、2018年：熊本、2020年：中止）であり、LPSO型マグネシウム合金を中心とするミルフィーユ構造（MFS）材料に関する国際的な交流の場として発展している。本開催では海外の著名な研究者9名の招聘を含む口頭発表44件（Keynote 6件、Invite 16件）、ポスター発表 37件を通じて、金属・セラミックス・高分子材料といった多岐に渡るMFS材料に関する議論が展開された。紙面の制約から抜粋での紹介となるが、近年のLPSO/MFS型Mg合金の深化（Abe, Kawamura）、MFS材料に特徴的な変形機構の解明（Barsoum, Romanov）、変形機構に基付く組織形成過程の解明（Li, Agnew）など、MFS材料の幅広い展開を裏付ける講演が注目を集めていた。参加諸氏および円滑な開催・運営に尽力頂いた事務局各位に深く感謝を申し上げます。

Topics 2022-2023

【これまでの活動】

2022

- ◆ 11/11-13：軽金属学会秋期大会（東京工業大学、ハイブリッド開催）
- ◆ 11/13：令和4年度第一回軽金属学会「LPSO/MFS構造材料研究部会」（東京工業大学）
- ◆ 12/11-14：LPSO/MFS2022（品川プリンスホテル）

2023

- ◆ 1/13：令和4年度第二回軽金属学会「LPSO/MFS構造材料研究部会」（Web開催）
- ◆ 2/18：日本金属学会シンポジウム「ミルフィーユ構造の創製とキンク強化：新強化原理として見えてきたこと」（東京工業大学）

【今後の活動】

2023

- ◆ 3/2-4：令和4年度年次報告会（東京大学本郷キャンパス）
- ◆ 3/7-10：日本金属学会春期講演大会（東京都立産業貿易センター、東京大学駒場キャンパス）
- ◆ 5/12-14：軽金属学会春期大会（かがわ国際会議場、香川大学幸町キャンパス）
- ◆ 7/2-7：Thermec'2023（ウイーン（オーストリア））

編集後記

スリリングな知的冒険がひとつの区切りを迎えようとしています。ここで切磋琢磨し、また異なる研究分野を横断し繋いでいく特色ある協同作業を通じて、研究者・教育者として大きく発展したことを実感されている参加者も多いことでしょう。9回のニュースレター、および時々刻々改訂してきたホームページは、ミルフィーユ研究の動向を共有し、またその魅力を広くお伝えすることに寄与できたと思う次第です。編集長という肩書きを頂きながら、種々の理由で後半はほぼ離脱状態となり、江村先生をはじめとする編集委員の皆様、およびスタジオエフの方々に御迷惑御負担をおかけしたことをお詫びするところですが、本新学術で得られたそれら研究を貫く「理」をさらに深く追求頂く上で、本ニュースレターを重要な情報ソースのひとつとして今後もご活用頂ければと願うところです。

A04-1 研究代表者
情報発信・知財部会長
三浦 誠司
北海道大学 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／ 礒部 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／ 2023年2月
編集発行／ MFS事務局

MFS MATERIALS

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