

領域略称名：MFS 材料科学

領域番号：6004

令和2年度科学研究費助成事業
「新学術領域研究（研究領域提案型）」
に係る中間評価報告書

「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-

領域設定期間

平成30年度～令和4年度

令和2年6月

領域代表者 東京大学・大学院工学系研究科(工学部)・教授・阿部 英司

目 次

研究組織

1	総括班・総括班以外の計画研究	2
2	公募研究	3

研究領域全体に係る事項

3	研究領域の目的及び概要	6
4	審査結果の所見で指摘を受けた事項への対応状況	8
5	研究の進展状況及び主な成果	9
6	研究発表の状況	14
7	研究組織の連携体制	19
8	若手研究者の育成に関する取組状況	20
9	研究費の使用状況・計画	21
10	今後の研究領域の推進方策	22
11	総括班評価者による評価	24

研究組織

(令和2年6月末現在。ただし終了した研究課題は終了時現在、補助事業廃止の研究課題は廃止時現在。)

1 総括班・総括班以外の計画研究

研究項目[1]	課題番号 研究課題名	研究期間	研究代表者 氏名	所属研究機関・部局・職	人数 [2]
X00 総	18H05475 ミルフィーユ構造の材料科学(研究に関する総括)	平成30年度 ～ 令和4年度	阿部 英司	東京大学・大学院工学系研究科(工学部)・教授	12
A01-1 計	18H05476 多様な Mg 系ミルフィーユ構造の構造制御と物質創製	平成30年度 ～ 令和4年度	山崎 倫昭	熊本大学・大学院先端科学研究部・教授	3
A01-2 計	18H05477 多様な Mg 系ミルフィーユ構造のキンク制御と材料創製	平成30年度 ～ 令和4年度	染川 英俊	物質・材料研究機構・構造材料研究拠点・グループリーダー	2
A02-1 計	18H05478 力学解析によるキンク形成・強化のメカニズム解明	平成30年度 ～ 令和4年度	萩原 幸司	大阪大学・工学研究科・准教授	3
A02-2 計	18H05479 精密構造解析によるキンク形成・強化のメカニズム解明	平成30年度 ～ 令和4年度	阿部 英司	東京大学・大学院工学系研究科(工学部)・教授	5
A02-3 計	18H05480 モデリングによるキンク形成・強化のメカニズム解明	平成30年度 ～ 令和4年度	君塚 肇	名古屋大学・工学研究科・教授	3
A03-1 計	18H05481 異分野融合によるキンク形成・強化の理論構築	平成30年度 ～ 令和4年度	藤居 俊之	東京工業大学・物質理工学院・教授	5
A04-1 計	18H05482 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	平成30年度 ～ 令和4年度	三浦 誠司	北海道大学・工学研究院・教授	4
A04-2 計	18H05483 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	平成30年度 ～ 令和4年度	伊藤 浩志	山形大学・大学院有機材料システム研究科・教授	2
総括班・総括班以外の計画研究 計 9 件 (廃止を含む)					

[1] 総：総括班、計：総括班以外の計画研究、公：公募研究

[2] 研究代表者及び研究分担者の人数（辞退又は削除した者を除く。）

2 公募研究

研究項目[1]	課題番号 研究課題名	研究期間	研究代表者 氏名	所属研究機関・部局・職	人数 [2]
A01 公	19H05116 高温ねじり加工法によるMFS物質のキンク強化材料化に不可欠なキンク形成素因子抽出	令和元年度 ～ 令和2年度	安藤 大輔	東北大学・大学院工学研究科・助教	1
A01 公	19H05135 多様な純金属層状構造によるキンク強化に適した材料設計指針の探索	令和元年度 ～ 令和2年度	小川 由希子	物質・材料研究機構・構造材料研究拠点・研究員	1
A02 公	19H05119 放射光による局所応力評価法を用いたミルフィーユ構造材料のキンク形成機構の解明	令和元年度 ～ 令和2年度	宮澤 知孝	東京工業大学・物質理工学院・助教	1
A02 公	19H05125 第一原理計算に基づくミルフィーユ構造のフォノン物性の解明	令和元年度 ～ 令和2年度	松中 大介	信州大学・工学部・准教授	1
A02 公	19H05126 マイクロビーム蛍光X線ホログラフィーによるキンク源原子配列の探索と解明	令和元年度 ～ 令和2年度	木村 耕治	名古屋工業大学・工学系研・助教	1
A02 公	19H05128 ミルフィーユ構造における硬質・軟質層の原子結合状態を反映した弾性不均質性の解明	令和元年度 ～ 令和2年度	多根 正和	大阪大学・産業科学研究所・准教授	1
A02 公	19H05130 X線吸収分光法によるキンク形成過程の局所構造変化その場追跡	令和元年度 ～ 令和2年度	西堀 麻衣子	九州大学・大学院総合理工学研究院・准教授	1
A02 公	19H05133 ミルフィーユ構造における不均一変形に起因する格子ひずみ発達機構の解明	令和元年度 ～ 令和2年度	眞山 剛	熊本大学・大学院先端科学研究部・准教授	1
A02 公	19H05134 GN転位列による強化因子とキンク界面の易動度制御	令和元年度 ～ 令和2年度	鈴木 真由美	富山県立大学・工学部・教授	1
A02 公	19H05136 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	令和元年度 ～ 令和2年度	増田 紘士	東京大学・大学院工学系研究科・助教	1
A02 公	19H05138 層状ケイ酸塩鉱物における原子レベルキンク構造の解明	令和元年度 ～ 令和2年度	奥村 雅彦	日本原子力研究開発機構・システム計算科学センター・研究副主幹	1

A02 公	19H05139 圧縮応力下2方向マイクロ・ラウエマッピングによるMg合金中キンク変形挙動の解明	令和元年度 ～ 令和2年度	木村 滋	高輝度光科学研究センター・回折散乱推進室・室長	1
A03 公	19H05117 微分幾何学を取り入れたキンク褶曲形成理論とキンク強化理論	令和元年度 ～ 令和2年度	長濱 裕幸	東北大学・理学研究科・教授	1
A03 公	19H05129 ミルフィーユ構造のキンク強化理論:砂泥互層褶曲の微分幾何学的考察	令和元年度 ～ 令和2年度	山崎 和仁	神戸大学・理学研究科・講師	1
A03 公	19H05131 Mesoscale modeling for disclinations toward a theory for kink and materials strengthening	令和元年度 ～ 令和2年度	Cesana Pierluigi	九州大学・マスフォアインダストリ研究所・准教授	1
A04 公	19H05115 配向制御法を利用したキンク強化型MAX相セラミックスの創製	令和元年度 ～ 令和2年度	池田 賢一	北海道大学・工学研究院・准教授	1
A04 公	19H05118 硬軟交互粒子積層によるナノ・ミルフィーユ創出とその物性増強起源の解明	令和元年度 ～ 令和2年度	藤森 厚裕	埼玉大学・理工学研究科・准教授	1
A04 公	19H05120 液晶ブロック共重合体が形成するマイクロ相分離ミルフィーユ構造のキンク形成と力学物性	令和元年度 ～ 令和2年度	戸木田 雅利	東京工業大学・物質理工学院・准教授	1
A04 公	19H05121 鉄基層状組織合金のキンク変形とミルフィーユ条件の一般化	令和元年度 ～ 令和2年度	中田 伸生	東京工業大学・物質理工学院・准教授	1
A04 公	19H05122 有機高分子-シリカナノ複合体によるミルフィーユ構造体創製	令和元年度 ～ 令和2年度	斎藤 礼子	東京工業大学・物質理工学院・准教授	1
A04 公	19H05123 ミルフィーユ構造を有するNb-TiNi系共晶合金の機械的性質と水素化	令和元年度 ～ 令和2年度	石川 和宏	金沢大学・機械工学系・教授	1
A04 公	19H05124 高分子ナノリンクルフィルムのシワに応力が集中しキンク強化が起こるといふ仮説の検証	令和元年度 ～ 令和2年度	瀧 健太郎	金沢大学・理工研究域自然システム学系・教授	1
A04 公	19H05127 液晶エラストマーの異方収縮を利用したキンク導入の試みとそれによる高分子材料の強化	令和元年度 ～ 令和2年度	櫻井 伸一	京都工芸繊維大学・大学院工芸科学研究科・教授	1

A04 公	19H05137 セラミックスにおけるミルフィーユ 構造創製と破壊靱性向上	令和元年度 ～ 令和2年度	吉田 英弘	東京大学・大学院工学系研 究科・教授	1
公募研究 計 24 件 (廃止を含む)					

[1] 総：総括班、計：総括班以外の計画研究、公：公募研究

[2] 研究代表者及び研究分担者の人数（辞退又は削除した者を除く。）

研究領域全体に係る事項

3 研究領域の目的及び概要

研究領域全体を通じ、本研究領域の研究目的及び全体構想について、応募時の領域計画書を基に、具体的かつ簡潔に2頁以内で記述すること。なお、記述に当たっては、どのような点が「革新的・創造的な学術研究の発展が期待される研究領域」であるか、研究の学術的背景や領域設定期間終了後に期待される成果等を明確にすること。

【研究の学術的背景】

現代社会が直面するエネルギー問題の解決、持続性社会の実現等を目指すにあたり、材料工学分野が担うべき重要課題として構造材料の高強度化・軽量化がある。本新学術領域研究は、前新学術「シンクロ型 LPSO 構造の材料科学—次世代軽量構造材料への革新的展開—」(領域代表者:河村能人, H23~27 年度)の成果から得た着想をもとに、新しい概念を掲げてさらなる発展を目指した継続研究と位置づけられる。

シンクロ型 LPSO 構造は、添加元素が濃化した硬質層と Mg マトリクスによる軟質層が、ナノメートルスケールで周期的に秩序配列した層状構造(図1下段)であり、結晶回転を伴うキック変形を引き起こす。LPSO 型 Mg 合金は、高密度のキック領域を導入して初めて高強度が発現する。LPSO 型 Mg 合金がキック形成によって強化されていることは予想外であり、およそ半世紀ぶりの新材料強化法の発見となった。

【本研究の目的】

この知見を踏まえて、「層状構造」「キック強化」を積極的に利用し、新しい構造材料創製へと展開を図る本領域を立ち上げた。対象とする層状構造の本質は、原子同士が強く結合した硬質層と、比較的弱く結合した軟質層の積層にある。そこで、この構造をパイ生地層(硬質層)とクリーム層(軟質層)が積層した「ミルフィーユ菓子」に例えて、「ミルフィーユ構造」と名付けた(図3-1)。硬質層の分散制御によって多様なミルフィーユ構造が可能となり、シンクロ型 LPSO 構造を内包する上位概念となる。キック強化原理に基づいて、Mg 系にとどまらず新規金属・セラミックス系・高分子系の3大材料へと拡大展開を図り、我が国が世界を先導して「ミルフィーユ構造の材料科学」とする新たな普遍的学術領域を創りだすことが本研究の目的である。

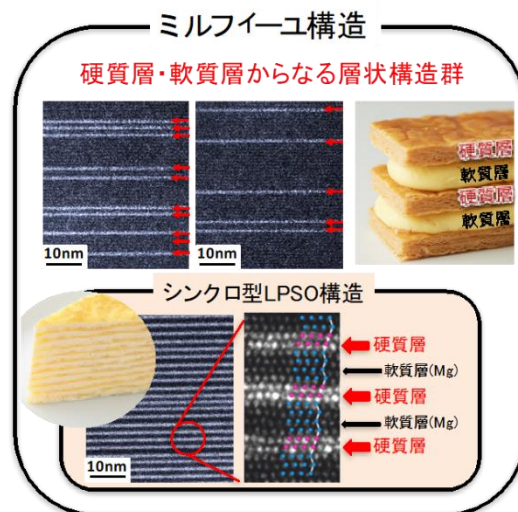


図3-1 LPSO 構造からミルフィーユ構造へ

【本領域に期待される革新的・創造的な学術展開】

日本発で独自に発見された LPSO 型 Mg 合金からの発展課題である本領域は、構造材料設計において従来常識にとらわれない高い独創的視点があり、国際的な研究動向を先導している。

本領域では、キック形成・キック強化のメカニズム解明を明確な目標として掲げ、新しい材料強化原理の構築を目指す。キック変形は既存の固体変形論だけでは十分な理解ができないため、新学術領域構築には従来の枠組みを超えた異分野連携が不可欠となる。本領域では「物質・材料創製(ものづくり)」「メカニズム解明(基礎物性解明)」「理論構築(普遍原理・概念)」を柱として、これら課題達成に不可欠なあらゆる分野の精鋭研究者が一堂に会するオールジャパンの体制で臨み、世界をさらに一步先導する新たな普遍的学術領域を創りだす(図3-2)。新強化原理の確立によって、より軽量な新規 Mg 合金の開発にとどまらず、Ti 合金、Al 合金等の他の金属系物質や、さらにはセラミックス系、高分子系も含めた物質群の高強度化への普遍的指針を与えることが可能となり、ミルフィーユ構造・キック強化を利用した新しい構造材料の創成へとつなげる。

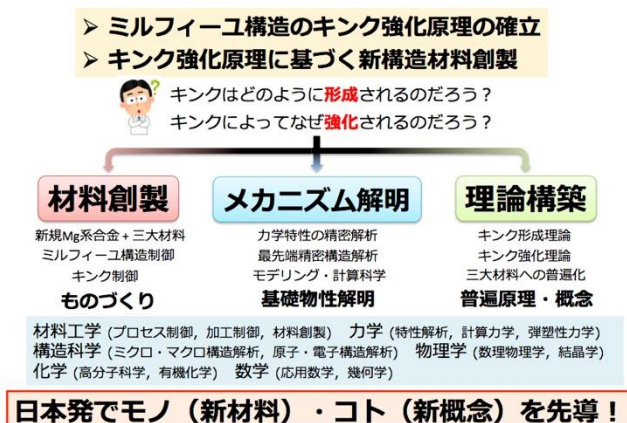


図3-2 本領域で実施する研究内容の3本柱

学問分野への波及効果

[1] 3大材料(金属系・セラミックス系・高分子系)を横断する材料科学の飛躍的展開

ミルフィーユ構造キンク強化の適用範囲を Mg 系物質群だけにとどまらず, Ti 系, Al 系を含む新規金属系物質に加えて, さらにセラミックス系・高分子系物質にまで拡大させ, 材料科学分野での飛躍的な展開を目指す。「ミルフィーユ構造物質群」を材料横断的に展開させ, 層状構造物質群の基礎学理のさらなる深化を図る。

[2] 学問分野の融合による研究領域の創成

現代の材料強度学を支える転位論が, 数学者・物理学者・理論力学者の大きな貢献のもとで成立したという歴史的経緯をみても, キンクの新しい学理構築には物理学者, 数学者らとの共同研究が必要である。本領域では, 材料工学, 力学, 構造科学, 物理学, 化学, 数学の多様な分野の研究者が結集した有機的連携によって課題に取り組んでおり, 新しい融合分野の創出が期待される。

【本領域の全体構想 : 「深化」と「展開」のストラテジー】

本新学術領域研究は, 前新学術からの知見をベースに Mg 合金キンク強理解のさらなる深化を図る「**深化軸**」と, 精密測定・解析・モデリングによるメカニズム解明, 理論構築を通して 3 大材料への展開を図る「**展開軸**」の 2 軸を意識して 4 つの研究項目を配置した。

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。研究項目 A02 では, 力学実験, 最先端計測実験, モデリング(計算)を実施し, キンクメカニズムの解明を目指す。研究項目 A03 では, 材料・機械・物理・数学の異分野融合のもと, キンク理論を構築する。研究項目 A04 では, キンク理論に基づいた新規金属・セラミックス系・高分子系ミルフィーユ材料の創製を図る。

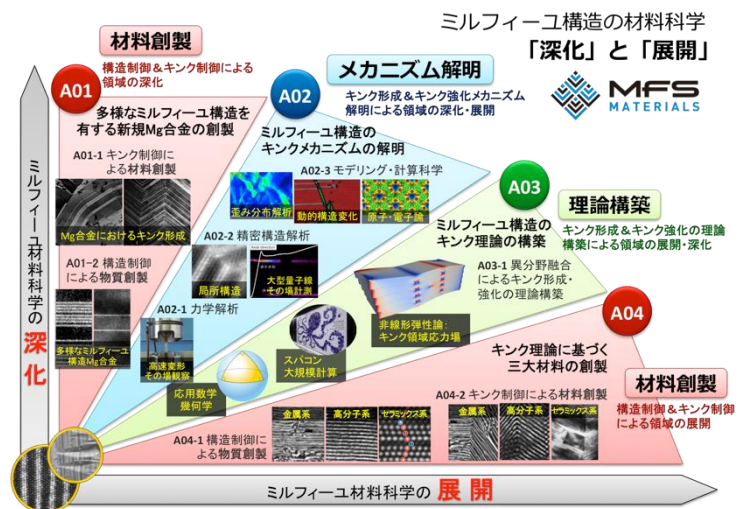


図3-3 ミルフィーユ構造の材料科学の「深化」と「展開」

【研究期間終了後に期待される成果】

新学術領域「ミルフィーユ構造の材料科学」を通して, ①新強化原理の確立, ②新強化原理による構造材料創製, ③若手人材育成, ④国内・国際ネットワークの拡大, ⑤日本発の研究領域の形成, の効果が期待できる。具体的には, 異分野結集による学理構築, それを基にした新材料創製, 本領域の推進による次世代若手研究者の育成, 創出領域の国内外での発展・拡大が期待される。

学術的波及効果と社会的意義

- ① ミルフィーユ構造の強化原理の確立は, 典型的なミルフィーユ構造物質である新規 Mg 合金の創製へと直結するとともに, Ti 系, Al 系を含む他の金属系材料やセラミックス系・高分子系材料のさらなる高強度化を可能とする。これらを通して, 構造材料の飛躍的な高強度化・軽量化を実現し, エネルギー問題の解決, 持続性社会の実現に大きく寄与すると期待される。
- ② ミルフィーユ構造のキンク強化原理の確立・体系化は, 従来の固溶強化, 析出強化, 加工強化, 結晶粒微細化強化, 複合強化に次ぐ第6番目の新しい材料強化法として歴史に刻まれ, 我が国の材料科学分野の高い評価に繋がるものと期待される。
- ③ キンク形成・強化メカニズムの解明は, 原子レベル構造からメゾ変形組織までの階層構造科学に立脚した幾何学理論に基づいて, 新しい力学理論の展開へとつながる。
- ④ 本新学術領域の確立は, 産業につながる工学分野の発展をもたらすと同時に, 周辺の基礎学問分野にも大きな影響を与え, 長期にわたって我が国の科学技術や学術水準の向上・強化に資する。

4 審査結果の所見で指摘を受けた事項への対応状況

研究領域全体を通じ、審査結果の所見において指摘を受けた事項があった場合には、当該指摘及びその対応状況等について、具体的かつ簡潔に2頁以内で記述すること。

【審査結果の所見における留意事項】

総括班における三つの委員会、六つの部会、四つの事務局という体制はやや分散的に見えることから、これらの統率系統が円滑に機能させること。

上記指摘を受け、本新学術領域研究が開始された直後に総括班体制の見直しを行った。主な変更点は以下の通りである。

- ・事務局を一本化し、領域代表とともに本部を運営する体制とした。
- ・統率系統の上流を運営本部へと一元化し、領域運営を行う体制とした。

【申請時(変更前)の総括班体制】

三つの委員会、六つの部会、四つの事務局、メンバー総数16名

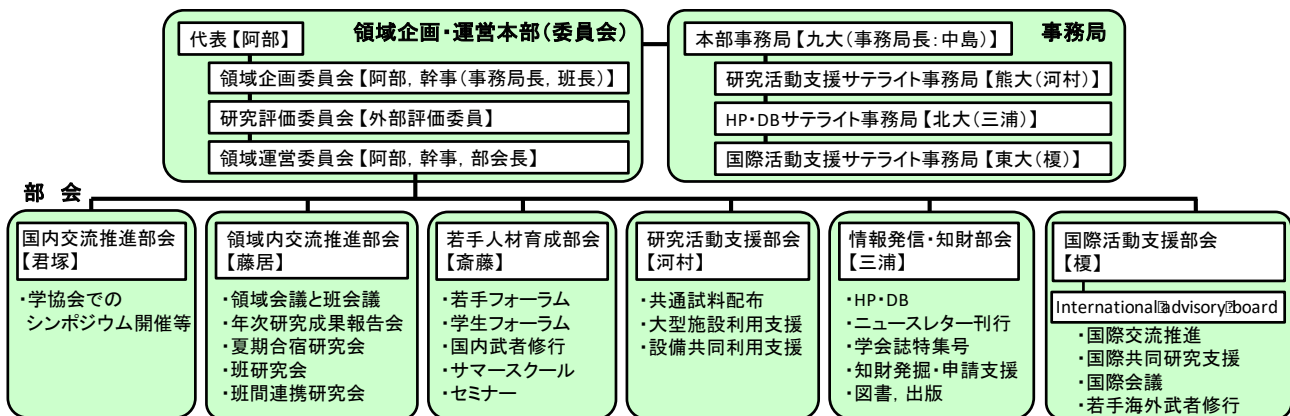


図4-1 申請時の総括班体制

【変更後の総括班体制】

三つの委員会、五つの部会、一つの事務局、メンバー総数12名

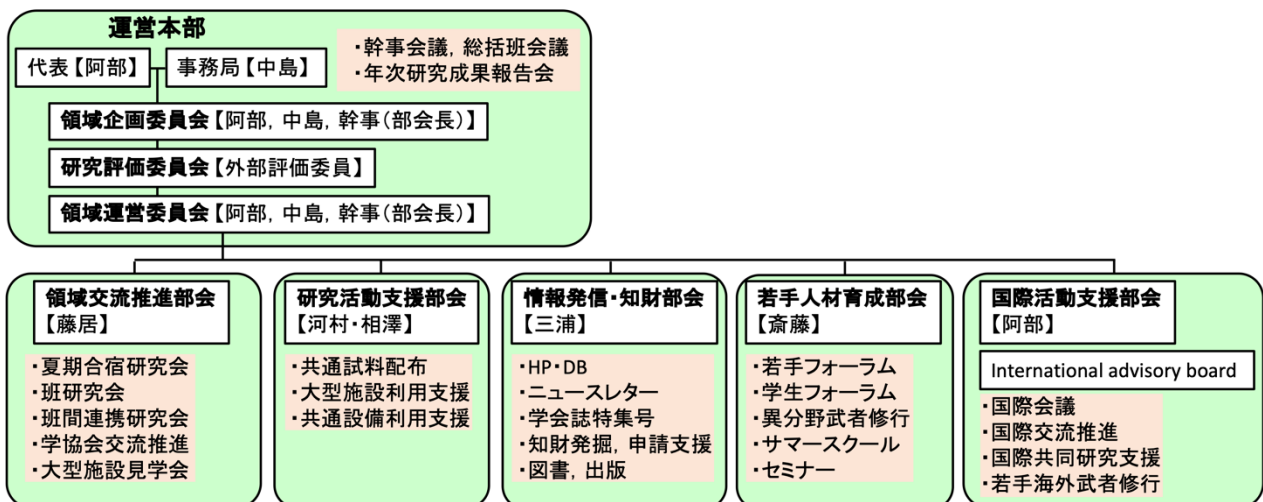


図4-2 変更後の総括班体制

変更の結果、領域代表と事務局長を中心とする運営本部における幹事会議・総括班会議が領域方針の意思決定の場として確立された。各部会は、本部で議論を経た基本方針に沿って企画・運営を進めており、総括班メンバー間での十分なコミュニケーションのもと、一体感を持った領域運営ができている。

5 研究の進展状況及び主な成果

(1) 領域設定期間内及び中間評価実施時までには何をどこまで明らかにしようとし、中間評価実施時までにはどこまで研究が進展しているのか、(2) 本研究領域により得られた成果について、具体的かつ簡潔に5頁以内で記述すること。(1)は研究項目ごと、(2)は研究項目ごとに計画研究・公募研究の順で記載すること。なお、本研究領域内の共同研究等による成果の場合はその旨を明確にすること。

(1) 領域設定期間内及び中間評価実施時までには何をどこまで明らかにしようとし、中間評価実施時までにはどこまで研究が進展しているのか

【A01 班 多様なミルフィーユ構造を有する新規 Mg 合金の創製】

A01-1 多様な Mg 系ミルフィーユ構造の構造制御と物質創製: 順調に進展

急冷等のプロセス制御により、層間制御された新規 Mg 系ミルフィーユ構造物質の創製が目標である。冷却速度を $10^2 \sim 10^5$ K/s の広範囲で制御する高次凝固プロセスの開発を順調に進めており、硬質層分散度などの特性長と呼ばれるミルフィーユ構造パラメーターの制御が可能となった。

A01-2 多様な Mg 系ミルフィーユ構造のキンク制御と材料創製: 順調に進展

多様な Mg 系ミルフィーユ構造物質群に対し、高次塑性加工法による効果的なキンク導入プロセス技術を確立することを目的としている。引張/圧縮/せん断/ねじりの「ひずみの複合化」が効果的であることを見いだすとともに、Mg 系材料群のキンク強化を簡便かつ普遍的に定量評価できる手法を構築した。

【A02 班 ミルフィーユ構造のキンクメカニズム解明】

A02-1 力学解析によるキンク形成・強化のメカニズム解明: 順調に進展

キンク形成・強化のためにミルフィーユ構造・組織が満たすべき条件に着目し、その妥当性を実験的観点から検証することを目的としている。Mg 系試料を用いた調査により、キンクによる強化の実証、およびその定量化に成功した。Al 系合金においても、キンク強化の可能性を見出しつつあり、今後は他の材料へと拡張する。

A02-2 精密構造解析によるキンク形成・強化のメカニズム解明: 順調に進展

種々の最先端計測法を駆使した精密構造解析により、キンク強化を実現するキンク素子の実体を解明し、その定量評価法を確立することを目的としている。高温押出加工によりキンク強化を示す Mg 合金では、ミルフィーユ組織とキンク界面分布とがナノ～マイクロメートルスケールに渡ってフラクタル的な振る舞いを示すことを見出した。キンクのスケールフリー的な振る舞いの普遍性を検証しつつ、3大材料のキンク強化へ指針を与える。

A02-3 モデリングによるキンク形成・強化のメカニズム解明: 順調に進展

電子・原子論と固体力学理論に基づくスケール横断モデリングにより、ミルフィーユ構造のキンク変形・強化のメカニズムの解明を目的としている。高分子系ミルフィーユ構造の粗視化分子動力学解析や、高次の結晶塑性論解析により、キンク形成・強化に関するモデリングが順調に進んでいる。今後は、キンク形成する場合の構造的・力学的要件、およびキンク形成から強化に至る際の因子の解明を進める。

【A03 班 ミルフィーユ構造のキンク理論構築】

A03-1 異分野融合によるキンク形成・強化の理論構築: 順調に進展

ミルフィーユ構造におけるキンク形成・強化の理論構築を目的としている。キンク三次元形態を実験により明らかにするとともに、Rank-1 接続条件に基づく数理解析との比較により、キンク形成に伴って回位が導入されることを見出した。また、非線形弾性論に基づく大規模数値計算からキンク周辺の応力場の定量化に成功した。今後はキンクによる強化量の精確な見積り法を導きだし、理論構築へと結びつける。

【A04 班 キンク理論に基づく新規金属・高分子系ミルフィーユ材料の創製】

A04-1 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: 順調に進展

ミルフィーユ構造物質を、新規金属・セラミックス・高分子系において広く探索・創製することを目的としている。金属系では、マイクロメートルオーダーの組織制御により Al 系、Ti 系合金においてキンク形成するミルフィーユ構造物質の創製に成功した。セラミックス系、高分子系等においても変形によってキンク構造が導入される二層組織物質の創製に成功し、多彩なミルフィーユ構造物質が設計可能であることを明らかにした。

A04-2 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: 順調に進展

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、塑性加工によりキンクを導入し強化を図ることを目的としている。圧延、押出、延伸やせん断変形等の様々な塑性加工を施し、金属系、高分子系でキンク形成を確認した。今後は、各材料が強化されるためのキンク形態因子に着目して加工法の最適化を図る。

(2)本研究領域により得られた成果

A01 班「多様なミルフィーユ構造を有する新規 Mg 合金の創製」の主な研究成果

【A01-1】多様な Mg 系ミルフィーユ構造の構造制御と物質創製

キンク強化機構を発現する合金群の本質が、硬質層・軟質層からなる層状構造制御とキンク形成によるものであるとの考えに基づき、新規 Mg 系ミルフィーユ構造物質の創製を目的とする。キンク強化するミルフィーユ構造が満たすべき「経験的ミルフィーユ条件」を設定し材料探索を行い、新規創製を通して領域の深化と展開に資するとともに、経験的ミルフィーユ条件の精密化を通して一般化ミルフィーユ条件を明確化することで学理構築に貢献する。これまでに冷却速度を $10^{-2} \sim 10^5$ K/s の広範囲で制御する高次凝固プロセスの開発(図5-1)およびプロセス経路選択のための *in-situ* 構造評価手法の開発を進めてきた。これらにより、硬質層分散度などの特性長と呼ばれるミルフィーユ構造パラメータの制御が可能となり、キンク形成条件などの明確化が今後期待される。

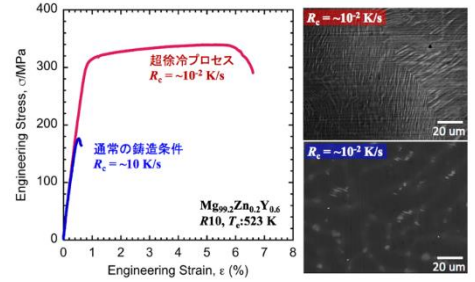


図5-1 超徐冷プロセスによって作製された Mg_{99.2}Zn_{0.2}Y_{0.6} 希薄合金押出材の機械的特性とミルフィーユ構造形成の様子。

【A01-2】多様な Mg 系ミルフィーユ構造のキンク制御と材料創製

多様な Mg 系「物質群」に対し、溝ロール加工や巨大ひずみ加工など諸種塑性加工法を包括した高次塑性加工法により、キンク強化機能が付与された Mg 系「材料群」をバルク化創製し、キンク強化に最適なキンク形態と構造を明確にするとともに、効果的なキンク導入プロセス技術を確認することを目的としている。これまで、塑性加工法に関係なく、キンク導入が可能であることを確認した上で、独自創製した Mg 系材料群のキンク強化を簡便かつ普遍的に定量評価できる手法を構築し、各種材料群の硬度と相当塑性ひずみの関係を取得した(図5-2)。Mg 材料群の硬度はひずみに対して一様に上昇するものの、高次塑性加工法に起因した応力/ひずみ成分の相違により、その増加度が異なる。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明示している。

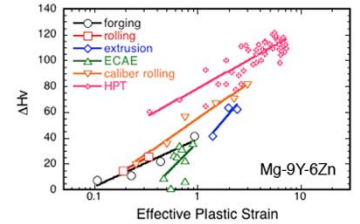


図5-2 高次塑性加工法による Mg 材料群の硬度と相当塑性ひずみ

【A01-公募・安藤】高温ねじり加工法による MFS 物質のキンク強化材料化に不可欠なキンク形成素因子抽出

Mg 系ミルフィーユ物質群の Mg-Zn-Y, Mg-Zn-Gd 合金を対象に、高温ねじり加工によるキンク強化の発現を調査し、キンク強化に不可欠な加工温度、ひずみ量を同定することを目標としている。熱処理により α -Mg 結晶粒内に緻密なミルフィーユ構造を形成した Mg₉₇Zn₁Y₂ 合金に 350°C で相当ひずみ量 0.14 のねじり加工を施すと、降伏強度が 80MPa 強化された。この強化量は押出加工で得られる「相当ひずみあたりの強化量増分」よりも大きく、ねじり加工の有用性が示唆される。現在、より大きなねじり相当ひずみ量を与えた場合の調査を進めている。

【A01-公募・小川】多様な純金属層状構造によるキンク強化に適した材料設計指針の探索

研究代表者が産前産後休暇・育児休業を取得中(令和元年8月~令和2年9月)のため記載なし。

A02 班「ミルフィーユ構造のキンクメカニズム解明」の主な研究成果

【A02-1】力学解析によるキンク形成・強化のメカニズム解明

キンク形成・強化のためのミルフィーユ条件に着目し、その妥当性を実験的観点から検証することを目的としている。LPSO 相および数種の構造的ミルフィーユ材料を対象に、キンク形成過程の3次元超高速その場観察法を確立するとともに、マイクロビラー試験により転位配列を素過程とするキンク変形機構の解明が進んだ。またキンク強化に関しては、LPSO 相押出材を用いた調査によりキンク強化の定量化(図5-3)に成功した。さらに、「組織的ミルフィーユ構造制御」によるキンク形成・誘導制御を新たに実現し、Al 合金においてもキンク形成による力学制御の可能性を見出した。今後他材料への拡張を検討する。

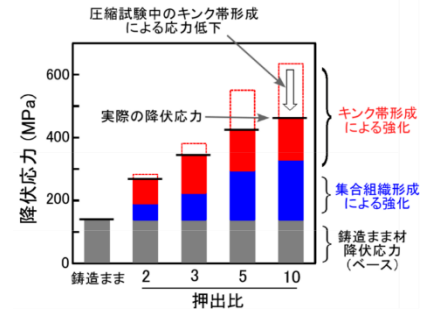


図5-3 LPSO 相押出材におけるキンク強化の定量的評価法の確立

【A02-2】精密構造解析によるキンク形成・強化のメカニズム解明

種々の最先端計測法を駆使した精密構造解析により、キンク強化を実現するキンク素子の実体を解明し、その定量評価法をミクロスケールからマクロスケールに渡って確立することを目的としている。電子顕微鏡による系統的な解析から、高温押出加工によりキンク強化を示す Mg 合金ではミルフィーユ組織とキンク界面分布とがナノ~マイクロメートルスケールに渡ってフラクタル的な振る舞いを示すことを見いだした(図5-4)。今回観察された階層化は、高温加工中にキンク形成とミルフィーユ構造形成が連動して起こったためであると考えられる。ミクロスケールに留まらないキンク界面の総体的パターンニングこそが、キンク強化での Extra Strengthening を担う可能性が示された。今後、キンクのスケールフリー的な振る舞いを踏まえて、3大材料におけるキンク素子の解明に取り組む。

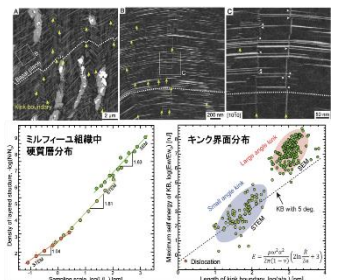


図5-4 動的 MFS 形成・キンク形成による自発的階層化

【A02-3】モデリングによるキンク形成・強化のメカニズム解明

電子・原子論と固体力学理論に基づくスケール横断モデリングにより、多様なミルフィーユ構造においてキンク形成を支配する微視的因子を明確化し、キンク変形・強化のメカニズムを解明することを目的としている。これまで、高分子系ミルフィーユ構造を対象とした粗視化分子動力学解析により、微視的座屈に起因する波打ち不安定の発現からキンク形成に至る描像(図5-5)を明らかにした。また、幾何学的に必要な転位を導入した高次の結晶塑性論解析により、すべり系が限定された金属系ミルフィーユ構造においてはキンク強化に最適なキンク形態が存在し得ることを示した。これらの幅広い物質系を対象としたモデリングにより、キンク形成する場合の構造的・力学的要件およびキンク形成から強化に至る際の因子を明らかにできる。

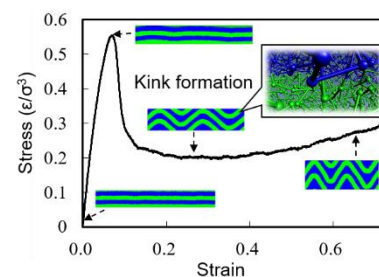


図5-5 高分子系ミルフィーユ構造のキンク形成過程のモデリング

【A02-公募・宮澤】放射光による局所応力評価法を用いたミルフィーユ構造材料のキンク形成機構の解明

18R型LPSO単相Mg-Zn-Y合金に、圧縮試験によってRidge型のキンクを形成させ、キンク近傍の残留ひずみをSPring-8の高輝度白色X線によるエネルギー分散型X線回折顕微法によって解析した。その結果、キンク先端近傍に集中する引張りひずみと、キンクを挟んで非対称に分布する圧縮ひずみを捉えた。非対称なひずみの分布は、Ridge型キンクがpre-kinkの界面移動による非対称的な成長をすることと整合する結果といえる。

【A02-公募・松中】第一原理計算に基づくミルフィーユ構造のフォノン物性の解明

第一原理計算を用いたフォノン解析に基づき、LPSO構造Mg合金のフォノン状態と有限温度での安定性の解明を目標としている。約千原子からなるMg-Al-Gd系10H型LPSO構造に対して、第一原理計算によりフォノン状態密度を得ることに成功した。またLPSO構造の周期的な質量変化のみを考慮した解析から、周期に整合したモードが分裂することを明らかにした。現在、異なるLPSO周期や合金組成でのフォノン解析を進めている。

【A02-公募・木村(耕)】マイクロビーム蛍光X線ホログラフィーによるキンク源原子配列の探索と解明

蛍光X線ホログラフィー(XFH)による、ミルフィーユ構造Mg合金の添加元素配列の解明を目標としている。従来、XFHは単結晶への適用に制限されていたが、新規装置を組み上げ、SPring-8での集光X線を切り出した結晶粒に照射することで、単結晶化が難しいMg₉₇Zn₁Gd₂合金より統計精度としては問題のない水準のデータを得ることに成功した。現在、バックグラウンド処理を行い、原子像再生に向けた干渉パターン抽出を進めている。

【A02-公募・多根】ミルフィーユ構造における硬質・軟質層の原子結合状態を反映した弾性不均質性の解明

層状の結晶構造を有するTi₃SiC₂系MAX相セラミックスを対象に弾性異方性および弾性不均質性の解明を目標とした。配向Ti₃SiC₂焼結・多結晶体に対する弾性率測定とinverse Voigt-Reuss-Hill (iVRH)近似による解析から、大きな単結晶を育成することが極めて困難なTi₃SiC₂単結晶の弾性異方性を明らかにすることに成功した。さらに、領域内での連携研究を行い、第一原理計算を用いて層間の弾性不均質性を解明した。

【A02-公募・西堀】X線吸収分光法によるキンク形成過程の局所構造変化その場追跡

X線吸収分光法によりキンク形成にともなう溶質原子の局所構造および電子状態変化を解明すること目標としている。吸収端近傍X線吸収微細構造計測とスペクトルシミュレーションを併用したクラスタ構造解析法を確立し、Mg₈₅Zn₆Y₉およびMg₉₇Zn₁Gd₂合金LPSO相のL1₂クラスタ中心元素の特定に成功した。現在、熱処理にともなうクラスタ形成過程のその場追跡および、LPSO相キンク近傍の溶質原子の局所構造変化の解析を進めている。

【A02-公募・眞山】ミルフィーユ構造における不均一変形に起因する格子ひずみ発達機構の解明

結晶塑性有限要素法を利用して、不均一変形に起因する格子ひずみ発達機構を解明することを目標としている。回折強度、格子ひずみ発達、および回折条件を満たす領域分布の数値的な評価が可能となり、LPSO-DS材の圧縮変形に適用している。現在は、キンクの形成に起因する格子ひずみ発達を特定し、キンク変形を含めた不均一変形の定量的な評価手法を確立するため、実験的検討との比較検証を含めて系統的な解析を進めている。

【A02-公募・鈴木】GN転位列による強化因子とキンク界面の易動度制御

Mg₈₅Zn₆Y₉合金LPSO相内部のGN転位列・キンク界面の安定化が強度に及ぼす影響と、不安定な界面の可動性の可能性を明らかにすることを目標とする。塑性変形により導入されたキンクが高温下で緩和すると強度が増加する一方、マクロな組織変化が生じない温度域での熱処理では硬さや室温圧縮強度が明らかに低下することを見出した。キンク構造緩和と強度の関連については今後共同研究を進め、一方向凝固材を用いた曲げ試験でキンク界面易動度の調査を行う。

【A02-公募・増田】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

硬質セラミックス相と軟質空気相の繰り返し構造からなる熱遮蔽コーティングにおけるキンク変形メカニズムの解明を目標としている。コーティングの単一コラムにおける損傷を模擬するため、ジルコニアセラミックス擬単結晶マイクロピラーの圧縮試験を行い、 $\langle 111 \rangle_c$ 軸付近からの圧縮時に $\{001\}_c \langle 110 \rangle_c$ 型の多重すべりが活動することで、連続的な方位変化を伴う回転型キンクが発生し、優れたエネルギー吸収能を示すことを明らかとした。

【A02-公募・奥村】層状ケイ酸塩鉱物における原子レベルキंक構造の解明

第一原理計算による、層状ケイ酸塩鉱物におけるキंक構造の原子構造の解明を目標としている。最も単純な層状ケイ酸塩鉱物の一つである葉蠟石(pyrophyllite)を対象に、一つの層に対して外力を加えて少しずつ層を曲げた場合での、曲げ角に最適な原子構造を第一原理計算で求めた。現在、現実の地中に近い計算設定における原子レベルキंक構造の発現について計算を進めている。

【A02-公募・木村(滋)】圧縮応力下2方向マイクロ・ラウエマッピングによるMg合金中キंक変形挙動の解明

SPring-8 の白色 X 線マイクロビームを利用して圧縮応力下で LPSO-Mg 合金中のキंक発生箇所を2方向から観察し、3次的に可視化する手法を開発することを目標としている。現在、2方向からキंक発生を捉えることに成功している。今後、解析法の改善や画像処理により更なるコントラストの改善を図り、キंक変形挙動の解明に役立つ情報を抽出する。また、領域内連携を推進し、キंक変形挙動の解明を目指す。

A03 班「ミルフィーユ構造のキंक理論構築」の主な研究成果

【A03-1】異分野融合によるキंक形成・強化の理論構築

ミルフィーユ構造におけるキंक形成を理論的に説明すること、そして、ミルフィーユ構造を持つ材料がキंक形成に伴って強化される機構を理論的に説明することを目的としている。これまでに LPSO 相に形成された Ridge キंकの三次元形態を実験により明らかにするとともに、Rank-1 接続条件に基づく理論解析との比較により、キंक形成に伴って回位が導入されることを見出した(図5-6)。この結果は、回位の運動がキंकの形成・成長を担うと捉えることにより、キंक形成理論を構築することが可能となることを意味する。また、微分幾何学を取り入れた非線形弾性論に基づく大規模数値計算からキंक形態の再現とキंक周辺の応力場の定量化に成功した。この成果を活かせば、キंकと格子欠陥との相互作用力の定量評価により、キंकの存在による強化量(Extra strengthening)を見積もることができる。

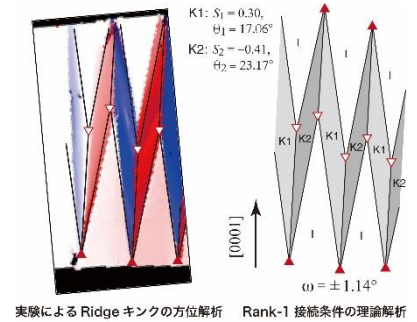


図5-6 LPSO 相の Ridge キंकの形態
観察と理論解析との比較

【A03-公募・長濱】微分幾何学を取り入れたキंक褶曲形成理論とキंक強化理論

これまでに以下の点を明らかにした。Biot の増分理論では、応力増分は Jaumann の応力速度に相当し、二次元異方性非圧縮変形の変位関数の重調和方程式の解の分類によりキंक褶曲の形成条件は導かれる。非 Riemann 塑性論では回位・不適合度は Riemann 曲率(R 曲率)に対応し、回位対は転位列と等価で、積分・微分不可能条件を満たす特異点ではキंक(回位対)が存在する。大域的曲率(Euler-Schouten 曲率:E-S 曲率)から R 曲率は発生し(Gauss-Codazzi 関係式)、変分原理から導かれる座屈方程式中の曲げ剛性は E-S 曲率に抗する硬化係数に相当する。

【A03-公募・山崎和仁】ミルフィーユ構造のキंक強化理論:砂泥互層褶曲の微分幾何学的考察

微分幾何学に基づき互層構造をもつ系のキंक強化現象を理論的に考察することを目標としている。キंक強化現象と密接に関係する回位場の解析を不適合度が存在する場合にまで拡張し、その起源には従来の転位勾配のものだけでなく、バンドツイスト起源のものも存在しうることを包括的に示した。このとき、対応する応力関数は従来の Airy 応力関数を三次元かつ非対角成分にまで拡張したものとなる。実際の強化現象は非平衡現象なので、現在、理論結果を非平衡領域にまで拡張している。

【A03-公募・CESANA】Mesoscale modeling for disclinations toward a theory for kink and materials strengthening

The interplay of structural and material instabilities has been investigated via the analysis of Boundary Value Problems in non-linear elasticity. I have computed numerical solutions to a micro-plasticity model with Finite Elements and shown emergence of ridge or ortho kinks in hexagonal and square lattices during compression. Future work entails energy analysis of multi-kinks and multi-disclinations systems and construction of stress-strain curves.

A04 班「キंक理論に基づく新規金属・高分子系ミルフィーユ材料の創製」の主な研究成果

【A04-1】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

Mg 合金で見出されたキंक強化が発現するミルフィーユ構造物質を、新規金属・セラミックス・高分子系において広く探索・創製することを目的としている。これまでに、新規金属・セラミックス・高分子系物質に関する様々な知見を適用して硬質層/軟質層の二層組織からなる構造を作成した。金属系では経験的ミルフィーユ条件に沿った物質群の組織制御のために、転位導入に基づく高度組織制御手法によって析出過程をコントロールし層状二相組織を得たところ、Al/AlAg₂, Ti 系においてその有効性が明らかとなった。得られた層状二相組織に局所的に大変形を与えたところ、隣接二相が協調的に変形し、キंक構造を呈した(図5-7)ことから、経験的ミルフィーユ条件の有効性が明らかとなった。さらにセラミックス系、高分子系等においても変形によってキंक構造が導入される二層組織物質が見出され、多彩なミルフィーユ構造物質が設計可能であることを明らかにした。



図5-7 Al/AlAg₂ 合金のミルフィーユ構造組織に変形を加えて出現したキंक構造

【A04-2】新規金属・高分子系ミルフィーユ構造のキंक制御と材料創製

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、独自の塑性加工法を施し、キंक形成・強化に適した加工条件やミルフィーユ構造材料の特性を明らかにすることを目的としている。これまでに圧延・押出・延伸やせん断変形等の様々な塑性加工を施し、新規金属系ミルフィーユでは、Al/Ag₂Al, Cu/Nb 系、高分子系では SBS ブロックコポリマー、PS/SEBS 多層フィルム系において、キंक形成を確認している。図5-8は SBS ブロックコポリマーに対し、一軸延伸加工を施した際に発現するキंक構造である。キंक強化の解明に向けて重要となる硬質・軟質層の弾性率比や層間隔の異なる幅広い形態と材料系においてキंक形成を可能とした。

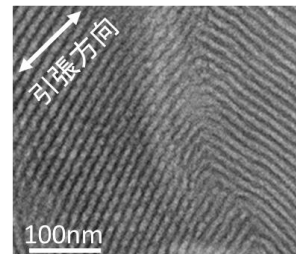


図5-8 SBS ブロックコポリマーの塑性加工後に発現するキंक構造

【A04-公募・池田】配向制御法を利用したキंक強化型MAX相セラミックスの創製

種々の配向制御法により、MAX相セラミックスの力学挙動に及ぼす配向方位依存性を明らかにし、プロセス制御によるキंक強化型MAX相セラミックスの創製を目指している。MAX相セラミックス Ti₃SiC₂ (TSC) の配向制御焼結体の作製に成功し、1200°Cにおける高温圧縮試験を実施した結果、配向方位依存性が明瞭に存在することを見出した。現在、キंकを導入したTSC焼結体の力学特性評価や変形機構の解明に取り組んでいる。

【A04-公募・藤森】硬軟交互粒子積層によるナノ・ミルフィーユ創出とその物性増強起源の解明

ミルフィーユ構造の新規材料における一般化を目指し、共に粒子径5nmの酸化鉄ナノ粒子と高分子ナノ粒子の単層膜を交互に積層した「ナノ・ミルフィーユ構造体」を創出した。この構造体の秩序性は、バラクリスタル解析や結晶子サイズ算出から担保され、キंक導入による位相変化させた粒子積層体の創製にも成功した。今後は力学変形機構の導入により、その物性増強度の評価や、増強起源の解明を進行させる。

【A04-公募・戸木田】液晶ブロック共重合体が形成するマイクロ相分離ミルフィーユ構造のキंक形成と力学物性

液晶ブロック共重合体(BCP)でマイクロ相分離ミルフィーユ構造のモドメイン試料を調製し、X線散乱/応力ひずみ同時測定により、ミルフィーユ構造の変形/キंक形成/キंक構造と力学物性との相関解明を目標としている。モドメインミルフィーユ構造の放射光X線散乱/応力ひずみ曲線の同時測定によりキंक形成と力学挙動との相関解析に成功した。現在、未延伸でキंक構造を形成するBCPで同様の実験を進めている。

【A04-公募・中田】鉄基層状組織合金のキंक変形とミルフィーユ条件の一般化

汎用構造材料である鉄鋼材料において、層状組織を有する材料を創製し、キंक変形が発現する条件の解明を目標としている。Fe-Cr合金に浸炭処理を施すことで、bcc-Feと合金炭化物から成る二相層状組織の形成に成功した。浸炭処理における炭素の拡散経路、流速に依存して、層状配向を一方向に限定した上で、相分率と層間隔をある程度制御することが可能である。現在は、圧縮変形におけるキंक変形挙動を調査している。

【A04-公募・斎藤】有機高分子-シリカナノ複合体によるミルフィーユ構造体創製

有機-シリカナノ複合体のミルフィーユ構造形成および、キंक強化に適したブロック共重合体の探索を目標としている。二置換型エポキシ基に対するシリカ前駆体パーヒドロポリシラザンの選択的導入メカニズムを解明し、ミルフィーユ状シリカナノ複合体の創製に成功した。さらにこれを延伸し、キंक様構造の導入に成功し、力学的強化を見出した。現在、各ドメインの強度、詳細な構造解析と高分子材料の汎用化の検討を進めている。

【A04-公募・石川】ミルフィーユ構造を有するNb-TiNi系共晶合金の機械的性質と水素化

層状組織を形成するNb基合金の加工、水素化によるキंक形成と機械的性質への影響を解明することを目標としている。Nb-TiCo合金への冷間圧延適用によりキंक形成を示唆する層状組織の屈曲が観察された。Nb-TiNi合金でも同様の層状組織の屈曲が現れる。現在、圧延や熱処理前後の合金の機械的性質を比較し、キंक形成が機械的性質に及ぼす効果の定量評価を試みている。

【A04-公募・瀧】高分子ナノリンクルフィルムのシワに応力が集中しキंक強化が起こるといふ仮説の検証

紫外線硬化樹脂への紫外線照射にともなう自己収縮により生じるリンクルによるキंक強化発現を検証した。リンクル形成時には、分子スケールでは架橋ネットワーク構造にひずみが蓄積されると仮定し、リンクルサイズと押し込み弾性率の関係を調査した。サイズが小さく曲率が大きなリンクルほど高い弾性率を示し、仮説は検証された。

【A04-公募・櫻井】液晶エラストマーの異方収縮を利用したキंक導入の試みとそれによる高分子材料の強化

硬軟2成分の高分子から成るラメラ状マイクロ相分離構造への一軸延伸適用によりキंकを導入し、高分子材料を強化することを目標としている。高輝度放射光施設で一軸延伸にともなう応力の測定と2次元小角X線散乱測定を同時に行い、物性とナノ構造変化の相関解明を行なった。また、マイクロビームを用いた2次元小角X線散乱測定を行い、ネッキングとキंक形成の関係解明に成功した。現在、キंक形成メカニズムの解明を進めている。

【A04-公募・吉田】セラミックスにおけるミルフィーユ構造創製と破壊靱性向上

酸化物セラミックスにおいて層状複合組織を創製し、キंक強化の可能性を検証することを目標としている。Al₂O₃-MgAl₂O₄-ZrO₂系複合セラミックス焼結体において、強電場を印加しながら引張塑性変形を施し、微細な異方性複相構造の創製に成功した。同一試料からFIBによりマイクロピラー加工し、ナノインデントによる変形試験手法を確立した。今後、変形挙動の方位依存性を調査すると共に、変形機構と微構造との関連を解析する。

6 研究発表の状況

研究項目ごとに計画研究・公募研究の順で、本研究領域により得られた研究成果の発表の状況（主な雑誌論文、学会発表、書籍、産業財産権、ホームページ、主催シンポジウム、一般向けのアウトリーチ活動等の状況。令和2年6月末までに掲載等が確定しているものに限る。）について、具体的かつ簡潔に5頁以内で記述すること。なお、雑誌論文の記述に当たっては、新しいものから順に発表年次をさかのぼり、研究代表者（発表当時、以下同様。）には二重下線、研究分担者には一重下線、corresponding author には左に*印を付すこと。

(1) 主な論文等の一覧

1) 学術的成果公表状況の概要

- ① 学術論文について：表6-1に示す通り、学術論文の総数は153編であり、その内、ミルフィーユ構造もしくはキンク変形に直接関連する論文（謝辞あり論文）が87編、間接的に関連する論文が66編と順調に成果の報告がなされている。本領域研究では、「深化」と「展開」を意識して研究を進めているが、図6-1に示す通り、初年度はMg合金に関する「深化」を目指した論文の割合が54%であり、「展開」を目指したその他金属、セラミックス、高分子に関する論文の割合は46%であったが、第2年度となる令和元年度では「展開」に資する論文の割合が64%、第3年度（令和2年度）では62%と増加傾向にあり、**着実に3大材料への展開がなされている。**
- ② 領域内連携研究の成果について：領域内の複数の研究グループ間の連携によって生まれた成果は、直接関連する学術論文の33%、国内・国際学会発表の38%・31%このほり、分野融合が着実に進められている。

表6-1 これまでの学術的成果のまとめ

業績種別		件数	連携研究の割合
学術論文	直接関連論文（謝辞記載）	87編	班内連携: 26%, 他班連携 15%, 融合論文 24%
	間接関連論文	66編	班内連携: 26%, 他班連携 17%, 融合論文 20%
解説・総説		20編	班内連携: 5%, 他班連携 10%, 融合論文 10%
著書		7編	-
基調・招待講演	国際	92件	-
	国内	90件	-
学会発表	国際	210件	班内連携: 23%, 他班連携 16%
	国内	446件	班内連携: 28%, 他班連携 14%
受賞		65件	-
特許		5件	-

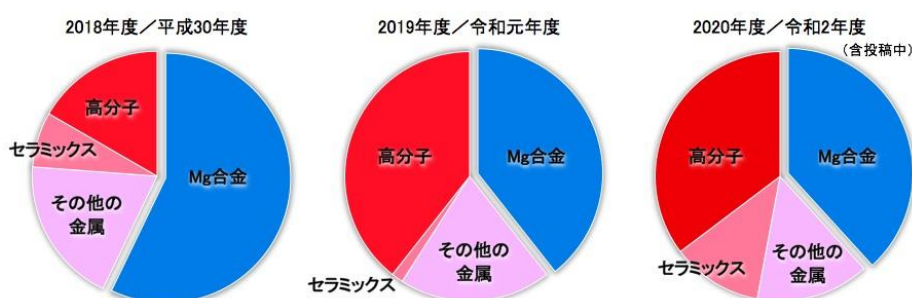


図6-1 公表された学術論文が扱う三大材料(金属, セラミックス, 高分子)の割合

以下業績記載において、新学術主要課題の一つである若手育成に関する情報として、令和2年3月末現在で39歳以下の「新学術から予算配分のある研究者」が含まれる業績には【若手】を、上記以外の「若手」研究協力者、ポスドク、博士後期学生等が含まれる業績には【若手】を付す。

2) 学術論文（全153編、うち謝辞の含まれるもの87編。以下研究グループごとに主要なもののみ示す。） [A01-1]

- [1] 【若手*】“Enhanced non-linearity during unloading by LPSO phase in as-cast Mg-Zn-Y alloys and slip-dominated non-linear unloading mechanism”, K. Shiraiishi, *T. Mayama, M. Yamasaki, Y. Kawamura, *Materials Science and Engineering A*, 790 (2020) Art. No. 139679.
- [2] “Structural and diffusional phase transformations in liquid-quenched Mg₈₅Y₉Zn₆ ribbons below the bifurcation temperature”, *H. Okuda, M. Yamasaki, Y. Kawamura, *Acta Materialia*, 194 (2020) 587-593.
- [3] 【若手*】“Oxidation behavior and incombustibility of molten Mg-Zn-Y alloys with Ca and Be addition”, S. Inoue, *M. Yamasaki, Y. Kawamura, *Corrosion Science*, 149 (2019), 133-143.

- [4] 【若手*】“High-strain-rate superplasticity and tensile behavior of fine-grained Mg₉₇Zn₁Y₂ alloys fabricated by chip/ribbon-consolidation”, K. Suzawa, S. -I. Inoue, S. Nishimoto, S. Fuchigami, *M. Yamasaki, Y. Kawamura, K. Yoshida, N. Kawabe, *Materials Science and Engineering A*, 764 (2019), Art.No.138179.
- [5] 【国際・若手*】“Optimization of mechanical properties of dilute Mg-Zn-Y alloys prepared by rapid solidification”, *D. Drozdenko, M. Yamasaki, K. Máthys, P. Dobroň, P. Lukáč, N. Kizu, S. -I. Inoue, Y. Kawamura, *Materials and Design*, 181 (2019), Art.No.107984.
- [6] 【連携・国際・若手*】“In-situ investigation of the microstructure evolution in long-period-stacking-ordered (LPSO) magnesium alloys as a function of the temperature”, *K. Máthys, D. Drozdenko, G. Németh, S. Harjo, W. Gong, K. Aizawa, M. Yamasaki, Y. Kawamura, *Frontiers in Materials*, 6 (2019), Art.No.270.
- [A01-2]**
- [7] 【連携・若手*】“Hot compression deformation behavior of Mg-Y-Zn alloys containing LPSO phase”, *H. Somekawa, Y. Nakasuji, M. Yuasa, H. Miyamoto, M. Yamasaki, Y. Kawamura, *Materials Science and Engineering A*, in press.
- [8] 【連携・若手*】“Microstructure and mechanical properties of low-temperature wrought-processed Mg-Y-Zn alloy containing LPSO phase”, *H. Somekawa, D. Ando, M. Yamasaki, Y. Kawamura, *Materialia*, 12 (2020), 100786 (8 pages).
- [9] 【連携・若手*】“Grain boundary plasticity in solid solution Mg-Li binary alloy”, *H. Somekawa, D. Egusa, E. Abe, *Materials Science and Engineering A*, 790 (2020), 139705 (6 pages).
- [10] 【若手*】“Microstructure and mechanical properties of caliber rolled Mg-Y-Zn alloys”, *H. Somekawa, D. Ando, *Materials Science and Engineering A*, A780 (2020), 139144 (9 pages).
- [11] 【連携・若手*】“Non-basal dislocation nucleation site of solid solution magnesium alloy”, *H. Somekawa, D. A. Basha, A. Singh, T. Tsuru, M. Yamaguchi, *Materials Transactions*, 61 (2020), 1172-1175.
- [12] 【若手*】“Role of grain boundaries on ductility in Mg-Y alloys”, *H. Somekawa, D. A. Basha, A. Singh, *Materialia*, 8 (2019), 100466 (9 pages).
- [A02-1]**
- [13] 【若手*】“Analysis of kinking and twinning behavior in extruded Mg-Y-Zn alloys by acoustic emission method with supervised machine learning technique”, *T. Shiraiwa, K. Tamura, M. Enoki, *Materials Science and Engineering A*, 768 (2019), 138473.
- [14] 【連携*】“Strengthening of Mg-based long-period stacking ordered (LPSO) phase with deformation kink bands”, *K. Hagihara, M. Yamasaki, Y. Kawamura, T. Nakano, *Materials Science and Engineering A*, 763 (2019), 138163.
- [15] 【連携*】“Strengthening mechanisms acting in extruded Mg-based long-period stacking ordered (LPSO)-phase alloys”, *K. Hagihara, Z. Li, M. Yamasaki, Y. Kawamura, T. Nakano, *Acta Materialia*, 163 (2019), 226-239.
- [16] “Plastic deformation behavior and operative slip systems in Mg₁₇Al₁₂ single crystals”, *K. Hagihara, K. Hayakawa, *Materials Science and Engineering A*, 737(2018), 393-400.
- [17] “Anisotropic plastic deformation of single crystals of the MAX phase compound Ti₃SiC₂ investigated by micropillar compression”, M. Higashi, S. Momono, *K. Kishida, N.L. Okamoto, H. Inui, *Acta Materialia*, 161 (2018), 161-170.
- [18] 【若手*】“Micropillar compression deformation of single crystals of Mo₅SiB₂ with the tetragonal D_{8h} structure”, *K. Kishida, T. Maruyama, H. Matsunoshita, T. Fukuyama, H. Inui, *Acta Materialia*, 159 (2018), 416-428.
- [A02-2]**
- [19] 【連携・若手*】“The LPSO structure with an extra order beyond stacking periodicity”, D. Egusa, H. Somekawa, *E. Abe, *Materials Transactions*, 61 (2020), 833-848.
- [20] 【連携・若手*】“Formation and stability of solute enriched stacking fault in the Mg-Zn-Y, Mg-Co-Y and Mg-Zn-Ca ternary systems”, M. Egami, *I. Ohnuma, M. Enoki, H. Ohtani, E. Abe, *Materials Transactions*, 61 (2020), 839-838.
- [21] 【連携・若手*】“Electron tomography imaging methods with diffraction contrast for materials research”, *S. Hata, H. Furukawa, T. Gondo, D. Hirakami, N. Horii, K. Ikeda, K. Kawamoto, K. Kimura, S. Matsumura, M. Mitsuhashi, H. Miyazaki, S. Miyazaki, M. Murayama, H. Nakashima, H. Saito, M. Sakamoto, S. Yamasaki, *Microscopy*, dfaa002 (2020), 1-15.
- [22] 【連携・若手*】“Thermodynamic origin of solute-enriched stacking-fault in dilute Mg-Zn-Y alloys”, M. Egami, I. Ohnuma, M. Enoki, H. Ohtani, *E. Abe, *Materials and Design*, 188 (2019), 108452.
- [23] 【連携・若手*】“A novel long-period stacking/order structure in Mg-Ni-Y alloys”, K. Yamashita, T. Itoi, M. Yamasaki, Y. Kawamura, *E. Abe, *Journal of Alloys and Compounds*, 788 (2019), 277-282.
- [24] 【連携・若手*】“In-plane positional correlations among dopants in 10H type long period stacking ordered Mg₇₅Zn₁₀Y₁₅ alloy studied by X-ray fluorescence holography”, T. Nishioka, Y. Yamamoto, *K. Kimura, K. Hagihara, H. Izuno, N. Happo, S. Hosokawa, E. Abe, M. Suzuki, *Materialia*, 3 (2018), 256-259.
- [A02-3]**
- [25] 【公募連携*】“Quantitative evaluation of slip activity in polycrystalline α -titanium considering non-local interactions between crystal grains”, *Y. Kawano, M. Sato, T. Mayama, M. Mitsuhashi, S. Yamasaki, *International Journal of Plasticity*, 127 (2020), 102638.
- [26] 【若手*】“Temperature-dependent nucleation kinetics of Guinier-Preston zones in Al-Cu alloys: An atomistic kinetic Monte Carlo and classical nucleation theory approach”, *H. Miyoshi, *H. Kimizuka, A. Ishii, S. Ogata, *Acta Materialia*, 179 (2019), 262-272.
- [27] 【公募連携*】“Superior energy absorption in porous magnesium: Contribution of texture development triggered by intra-granular misorientations”, *T. Mayama, M. Tane, Y. Tadano, *Acta Materialia*, 165 (2019), 62-72.
- [28] 【公募連携*】“Extended ductility due to kink band formation and growth under tensile loading in single crystals of Mg-Zn-Y alloy with 18R-LPSO structure”, K. Takagi, *T. Mayama, Y. Mine, K. Takashima, *Journal of Alloys and Compounds*, 806 (2019), 1384-1393.
- [29] “Meshfree analysis of higher-order gradient crystal plasticity using nodal integration”, T. Niuro, *Y. Tadano, *Key Engineering Materials*, 794 (2019), 214-219.
- [30] “Numerical study on bicrystalline micropillar compression using high-order gradient crystal plasticity”, *Y. Tadano, *Key Engineering Materials*, 794 (2019), 65-70.
- [A03]**
- [31] 【若手*】“Morphological and crystallographic features of kink bands in long-period stacking ordered Mg-Zn-Y alloy analyzed by serial sectioning SEM-EBSD observation method”, *T. Tokuzumi, S. Yamasaki, W. Li, M. Mitsuhashi, H. Nakashima, *Materialia*, (2020), in press.
- [32] 【連携・若手*】“Kink formation process in long-period stacking ordered Mg-Zn-Y alloy”, *S. Yamasaki*, T. Tokuzumi, W. Li, M. Mitsuhashi, K. Hagihara, T. Fujii, H. Nakashima, *Acta Materialia*, 195 (2020), 25-34.
- [33] 【公募連携*】“Duality of the incompatibility tensor”, *K. Yamasaki, T. Hasebe, *Materials Transactions*, 61 (2020), 875-877.
- [34] “Rank-1 connection of kink bands formed by non-parallel shears”, *T. Inamura, Y. Shinohara, *Materials Transactions*, 61 (2020), 870-874.

- [35] 【若手*】“Dislocation-based modeling and numerical analysis of kink deformations on the basis of linear elasticity”, *S. Kobayashi, R. Tarumi, *Materials Transactions*, 61 (2020), 862-869.
- [36] “Geometry of kink microstructure analysed by rank-1 connection”, *T. Inamura, *Acta Materialia*, 173 (2019), 270-280.
- [A04-1]
- [37] 【公募連携】“Influence of uniaxial orientation of fluorinated polymer/phosphonate-modified needle-like nanofiller composite by drawing”, S. Hirayama, T. Hayasaki, A. A. Almarasy, H. Yabu, M. Tokita, *A. Fujimori, *Polymer Composites*, in press.
- [38] “Biomimetic catechol based adhesive polymers for dispersion of polytetrafluoroethylene (PTFE) nanoparticles in an aqueous medium”, M. S. Grewal, *H. Yabu, *RSC Advances*, 10 (2020), 4058-4063.
- [39] “Formation of LPSO Phases in As-cast Mg-Al-Zn-Gd quaternary alloys”, K. Masaoka, T. Yamada, *T. Horiuchi, T. Itoi and S. Miura, *Materials Transactions*, 61 (2020), 849-855.
- [40] “Introduction of mille-feuille-like alpha/beta layered structure into Ti-Mo alloy”, *S. Emura, X. Ji, *Materials Transactions*, 61 (2020), 856-861.
- [41] “N- and Fe-containing carbon films prepared by calcination of polydopamine composites self-assembled at air/water interface for oxygen reduction reaction”, H. Abe, K. Nozaki, A. Kumatani, T. Matsue, *H. Yabu, *Chemistry Letters*, 48 (2019), 102-105.
- [42] “Fabrication of honeycomb films by the breath figure technique and their applications”, *H. Yabu, *Science and Technology of Advanced Materials*, 19 (2018), 802-822.
- [A04-2]
- [43] 【若手*】“Influence of the layer directions on the properties of 316L stainless steel parts fabricated through fused deposition of metals”, T. Kurose, Y. Abe, M. V. A. Santos, Y. Kanaya, A. Ishigami, S. Tanaka, *H. Ito, *Materials*, 13 (2020), 2493.
- [44] 【若手*】“Fabrication and enhanced Vickers hardness of electrodeposited Co-Cu alloy film with high composition gradient”, H. Hagiwara, *Y. Kaneko, M. Uchida, *Materials Transactions*, 61 (2020), 801-804.
- [45] 【若手*】“Sliding-wear properties of electro-deposited films with Cu and pulse-plated Ni multi-layers”, H. Hagiwara, K. Nakamura, *Y. Kaneko, M. Uchida, *Materials Transactions*, 61 (2020), 1102-1108.
- [46] 【若手*】“Morphology, thermal and mechanical properties of Co-continuous porous structure of PLA/PVA blends by phase separation”, N. Chuaponpat, T. Ueda, A. Ishigami, T. Kurose, *H. Ito, *Polymers*, 12 (2020), 1083.
- [47] 【若手*】“Properties of 3D printable poly(lactic acid)/poly(butylene adipate-co-terephthalate) blends and nano talc composites”, W. Prasong, P. Muanchan, A. Ishigami, S. Thumsorn, T. Kurose, *H. Ito, *Journal of Nanomaterials*, 2020 (8040517) (2020), 1-16.
- [48] 【若手*】“Dependence of Vickers hardness on layer thickness in electrodeposited Ni-Co-Cu/Cu multilayered films”, H. Hagiwara, N. Kawakami, *Y. Kaneko, M. Uchida, *Materials Transactions*, 60 (2019), 2569-2575.

2) 国内・国際学会発表 (総数 474 件, 基調・招待講演含まず: 詳細省略)

3) 基調講演・招待講演 (総数 182 件, 以下主要なもののみ示す.)

- [1] 【基調講演】“Evolution of LPSO structure to mille-feuille structure in ultrahighstrength Magnesium alloys”, Y. Kawamura, MRS-J, Materials Research Meeting 2019, MRM2019, Yokohama, Japan, 2019.12.12.
- [2] 【基調講演】“Development of next-generation nonflammable high-strength magnesium alloys”, Y. Kawamura, Sustainable Industrial Processing Summit & Exhibition (SIPS 2019), Coral Beach Resort, Cyprus, 2019.10.24.
- [3] 【基調講演・連携】“Crystallographic classification of deformation kink bands in Mg-Zn-Y alloys with long-period stacking ordered structure”, M. Yamasaki, K. Hagihara, T. Mayama, Y. Kawamura, 9th International Light Metals Technology Conference, LMT2019, Citic Pacific Zhujiajiao Jin Jiang Hotel, Shanghai, China, 2019.10.17.
- [4] 【招待講演・連携】“Configuration of dislocations in low-angle kink boundaries formed in a long-period stacking ordered Mg-Zn-Y alloy”, M. Yamasaki, K. Hagihara, Y. Kawamura, The 5th Japan-Russian Seminar on Advanced Materials, St. Petersburg, Russia, 2019.9.17.
- [5] 【招待講演】“Wrought process and deformation kink bands formation of Mg alloys”, H. Somekawa, The Future of Materials Engineering - Dramatic Innovation to the next 100 years, Sendai, Japan, 2019.6.24.
- [6] 【基調講演・公募連携・若手発表】“Mg-Y-Zn 合金の ECAP 加工による微細組織形成と力学特性”, 安藤大輔, 内山愛文, 藤谷俊孝, 須藤祐司, 軽金属学会第 137 回秋期講演大会, 東京農工大学小金井キャンパス, 2019.11.1.
- [7] 【基調講演・公募連携・若手発表】“Phase transformable Mg-Sc based alloy and its functionality”, D. Ando, Y. Ogawa, K. Yamagishi, Y. Sutou, J. Koike, The Russia-Japan International Seminar on Advanced Materials, Kumamoto, Japan, 2018.12.6.
- [8] 【招待講演・連携】“Strengthening using the deformation kink band in Mg-based LPSO-phase alloys”, K. Hagihara, M. Yamasaki, T. Nakano, Y. Kawamura, Sustainable Industrial Processing Summit and Exhibition in 2019 (SIPS2019), Cyprus, 2019.10.24.
- [9] 【招待講演】“Room temperature deformation of D8₁-type transition-metal silicides investigated by micropillar compression”, K. Kishida, H. Inui, Intermetallics 2019, Bad Staffelstein, Germany, 2019.9.30.
- [10] 【招待講演】“Dynamic in situ observation of twinning and kinking in Mg alloys”, M. Enoki, The 4th Russia-Japan International Seminar on Advanced Materials, Kumamoto, Japan, 2018.12.6.
- [11] 【基調講演】“Development of 3D electron microscopy methods for crystalline materials”, S. Hata, The 3rd International Symposium on Advanced Structural Materials Deformation and Strengthening Mechanisms, Chongqing, China, 2019.11.1.
- [12] 【招待講演・若手・連携】“Deformation behavior of directionally solidified Mg-LPSO alloy studied by in-situ techniques”, D. Drozdenko, K. Mathis, M. Yamasaki, S. Harjo, W. Gong, K. Aizawa, Y. Kawamura, J-PARC Symposium 2019 - Unlocking the Mysteries of Life, Matter and the Universe -, Tsukuba, Japan, 2019.9.23.
- [13] 【基調講演】“ミルフィーユ構造の材料学「深化」と「展開」”, 阿部英司, 日本金属学会 2019 年秋期講演大会, 岡山大学津島キャンパス, 2019.9.11-13.
- [14] 【基調講演】“Kink strengthening of LPSO and mille-feuille structures in Mg alloys”, E. Abe, The 10th Pacific Rim International Conference on Advanced Materials and Processing, PRICM10, Xi'an, China, 2019.8.18.
- [15] 【招待講演・連携・若手】“Kink in mille-feuille structured Mg alloys”, D. Egusa, M. Yamasaki, Y. Kawamura, E. Abe, RJISAM-IV, Kumamoto, Japan, 2018.12.6.
- [16] 【基調講演】“Higher-order gradient crystal plasticity analysis of magnesium including kink band”, Y. Tadano, D. Kamura, 7th Asian Pacific Congress on Computational Mechanics (APCOM2019), Taipei, Taiwan, 2019.12.18.
- [17] 【招待講演】“Undulation instability and kink formation of layered block copolymers: A coarse-grained molecular dynamics study”, H. Kimizuka, The 10th International Conference on Auxetics and Other Materials and Models with “Negative” Characteristics (Auxetics 2019), Poland, 2019.9.2.
- [18] 【招待講演】“Ab-initio based multiscale modeling of formation kinetics of nano-precipitates in Al-Cu alloys”, H. Kimizuka, H. Miyoshi, A. Ishii, S. Ogata, The 6th Korea Multi-scale Mechanics Symposium (KMSM2019), Seol, Korea, 2019.7.4.

- [19] 【招待講演】“Role of intra- and intercluster interactions in stabilization of solute-enriched layers in Mg-based LPSO phases: Towards atomic modeling of mille-feuille structures”, H. Kimizuka, S. Ogata, The 4th International Symposium on Long-Period Stacking Ordered Structure and Mille-Feuille Structure (LPSO2018), Kumamoto, Japan, 2018.12.3.
- [20] 【招待講演】“Numerical analysis of mechanics of layered structures”, K. Svadlenka, EU-Japan Workshop on Mille-feuille Structured Materials, Prague, Czech Republic, 2019.11.28.
- [21] 【基調講演・若手発表】“LPSO 単相多結晶 Mg-Zn-Y 合金におけるキンク形成過程”, 山崎重人, 徳澄翼, 光原昌寿, 中島英治, 萩原幸司, 藤居俊之, 軽金属学会第 137 回秋期講演大会, 東京農工大学小金井キャンパス, 2019.11.1.
- [22] 【招待講演・連携】“Premonitory symptoms of kink deformation in Mg-Zn-Y alloy with LPSO phase”, H. Nakashima, S. Yamasaki, M. Mitsuhashi, K. Hagihara, T. Fujii, The 5th Japan-Russian Seminar on Advanced Materials, St. Petersburg, Russia, 2019.9.17.
- [23] 【基調講演・国際共研】“Estimation of kink nucleation stress by a disclination-propagation model”, T. Fujii, A. E. Romanov, The 5th Japan-Russian Seminar on Advanced Materials, St. Petersburg, Russia, 2019.9.17.
- [24] 【招待講演】“Dislocation-based modeling and isogeometric analysis for kink deformation”, R. Tarumi, The 4th Russia-Japan International Seminar on Advanced Materials (RISAM-IV), Kumamoto, Japan, 2018.12.6.
- [25] 【基調講演】“Al-Ag₃Al 二相合金の組織制御とミルフィーユ条件の検討”, *三浦誠司, 石坂篤史, 池田賢一, 日本金属学会 2019 年秋期講演大会, 岡山大学津島キャンパス, 2019.9.11.
- [26] 【招待講演】“S. Emura, X. Ji, K. Tsuchiya”, *S. Emura, X. Ji, K. Tsuchiya, The 10th Pacific Rim International Conference on Advanced Materials and Processing (PRICM10), Xi'an, China, 2019.8.18.
- [27] 【招待講演】“Introduction of research plan in Tokyo university of agriculture and technology for material science on mille-feuille structure”, T. Murayama, C. Hori, *H. Saito, The Future of Materials Engineering - Dramatic Innovation to the next 100 years, Sendai, Japan, 2019.6.24.
- [28] 【基調講演】“Phase diagram Exploration for Two-phase lamellar microstructure to find the candidates of “mille-feuille structure (MFS)” materials”, *S. Miura, K. Ikeda, The 4th International Symposium on Long-Period Stacking Ordered Structure and Mille-feuille Structure (LPSO2018), Kumamoto, Japan, 2018.12.3.
- [29] 【招待講演】“高分子材料におけるキンク強化の理解に向けた多層構造形成”, *藪 浩, 日本金属学会 2018 年秋期講演大会, 東北大学川内北キャンパス, 2018.9.19.
- [30] 【基調講演】“ミルフィーユ構造を有する高分子材料の作製とその靱性評価”, 伊藤浩志, 石神明, 西辻祥太郎, 黒瀬隆, 軽金属学会第 135 回秋期講演大会, 芝浦工業大学豊洲キャンパス, 2018.11.9.

4) 解説, 総説 (総数 20 件, 以下主要なもののみ示す.)

- [1] “マグネシウム合金における溶質クラスターの規則配列化の支配因子に関する第一原理解析”, *君塚肇, 軽金属, 69 (2019) 471-478.
- [2] “マグネシウム合金の靱性・延性に及ぼす添加元素の影響”, *染川英俊, 日本金属学会誌, 83 (2019) 63-75.
- [3] 【連携】“Mg 基 LPSO 相をはじめとする種々の異方性材料に見られる特異な変形帯形成”, *萩原幸司, 中野貴由, 山崎倫昭, 河村能人, まてりあ, 57 (2018), 607.
- [4] “TEM 内その場変形トモグラフィ観察システムの開発”, *波多聰, 宮崎裕也, 斉藤光, 村山光宏, 佐藤和久, 工藤博幸, 古河弘光, 川本克己, 堀井則孝, 加茂勝己, 宮崎伸介, 権堂貴志, 顕微鏡, 54 (2019), 44-48.

5) 書籍 (総数 7 件, 以下主要なもののみ示す.)

- [1] “マグネシウム合金の最先端技術と応用展開”, 監修: 河村能人, 千野靖正, 分担執筆: 河村能人, 山崎倫昭, 小川由希子, 染川英俊, 萩原幸司, シーエムシー出版, (2020) pp.63-71, pp.200-207, pp. 215-220. (書籍中の 3 項をそれぞれの研究者が執筆)
- [2] “タフポリマーを実現する成形加工による高次構造制御および破壊挙動解析”, 西辻祥太郎, 石神明, 伊藤浩志, ポリマーの強化化技術最前線, 株式会社エヌ・ティー・エス, (2020) pp.169-176.
- [3] “Investigation of the evolution of the microstructure in the directionally solidified long-period stacking-ordered (LPSO) magnesium alloy as a function of the temperature”, D. Drozdenko, K. Máthys, S. Harjo, W. Gong, K. Aizawa, M. Yamasaki, Springer Nature, (2019) pp.33-36.

6) 受賞 (総数 65 件, うち若手研究者の受賞 18 件, 学生の受賞 29 件. 以下主要なもののみ示す.)

- [1] 一般社団法人繊維学会 学会賞, 伊藤浩志, 2020.6.10.
- [2] 繊維学会 Journal of Fiber Science and Technology (JFST) 論文賞, P. T. N. Diep, H. Takagi, N. Shimizu, N. Igarashi, S. Sasaki, S. Sakurai (A04 公募), 2020.6.10.
- [3] 日本金属学会第 78 回功績賞, 多根正和(A02 公募), 2020.3.17.
- [4] 国立大学法人熊本大学研究活動表彰, 山崎倫昭, 2019.11.25.
- [5] 日本金属学会奨励賞, 増田紘士(A02 公募), 2019.9.11.
- [6] 2019 年度塑性加工春季講演会 優秀論文講演奨励賞, 湯浅元仁, 2019.6.7.
- [7] 2019 年日本ゴム協会年次大会, 若手優発表賞, 福嶋大樹, 齋藤拓, 2019.5.23.
- [8] 一般社団法人軽金属学会 功績賞, 鈴木真由美(A02 公募), 2019.5.10.
- [9] 公益財団法人天田財団 奨励論文賞, 山崎倫昭, 2019.4.24.
- [10] 日本金属学会功績賞, 池田賢一(A04 公募), 2019.3.20.
- [11] 日本金属学会 金属組織写真優秀賞, 岸田恭輔, 東雅也, 乾晴行, 2019.3.20.
- [12] The 4th International Symposium on Long-Period Stacking Ordered Structure and Mille-feuille Structure (LPSO2018) Excellent Poster Award, Y. Ogawa, D. Ando, Y. Sutou, J. Koike, M. Yamasaki, H. Somekawa, 2018.12.4.
- [13] The 4th International Symposium on Long-Period Stacking Ordered Structure and Mille-feuille Structure (LPSO2018) Best Student Poster Award, S. Nishimoto, M. Yamasaki, S. Inoue, Y. Kawamura, 2018.12.4.
- [14] 日本金属学会関東支部第 15 回ヤングスタラジスト研究交流会 優秀ポスター賞, 木下亮平, 江草大佑, 村上恭和, 阿部英司, 2018.11.12.
- [15] 物質・材料研究機構理事長賞 研究奨励賞, 染川英俊, 2018.4.2.

7) 特許 (総数 5 件, 以下主要なもののみ示す.)

- [1] 特願 2020-35416, ブロック共重合材料及びその強化方法, 瀧健太郎(A04 公募), 小栗廉.
- [2] 特願 2019-194449, 熱遮蔽コーティング, 及びこれを用いたタービン用ブレード部材, 増田紘士(A02 公募) 他 2 名.
- [3] 特願 2018-095437, 硬質・軟質積層構造材料及びその製造方法, 河村能人, 山崎倫昭, 齋藤拓, 阿部英司.

8) 報道など (総数 14 件, うち新聞発表 8 件, TV 番組 4 件, 機関誌 1 件, 一般雑誌 1 件, 以下主要なもののみ示す.)

- [1] 【新聞】材料進化の最前線 マグネ合金変形能、アルミに匹敵、日刊工業新聞、2019.12.4.
- [2] 【新聞】No.1 を生む科学技術⑥ 極細ワイヤ、医療などに応用、日本経済新聞、2018.10.14.
- [3] 【TV】Science View, The Leading Edge: A New Magnesium Alloy Developed in Japan – Light, Strong, and Flame-Resistant! NHK WORLD, 2018.10.3.
- [4] 【新聞】太さ「髪の毛の 1/3」ワイヤ、読売新聞大阪、2018.5.24.
- [5] 【雑誌】従来の約 60%へ極細化、熊本大などが直径 30 μm の超極細マグネシウム合金ワイヤを製造、fabcross、2018.5.23.
- [6] 【TV】熊本大・東邦金属、マグネ合金の極細ワイヤー開発、NHK (関西地方)、2018.5.23.
- [7] 【新聞】熊本大と東邦金属、福田金属箔粉工業と共同で直径 30 マイクロメートルという超極細のマグネシウム合金ワイヤの製造に成功、日本経済新聞、2018.5.22.

(2) 領域の公開・広報活動

1) 領域のホームページとニュースレター

・領域ホームページ

日本語版: <https://www.mfs-materials.jp/>
 英語版: <https://www.mfs-materials.jp/en/>



・ニュースレター発行

(第 3 号まで発行)

- Vol. 1 2019 年 2 月
 Vol. 2 2019 年 9 月
 Vol. 3 2020 年 2 月



2) 論文特集号の企画 (1 件)

- [1] Materials Transactions, Vol.61, No.5 (2020), Special Issue on Materials Science on Mille-Feuille Structure (9 編収録)

3) 異分野学術交流を目指した国内学会・シンポジウムなど (総数 15 件)

年度	開催日	実施内容	開催場所	備考
H30	H30.5.26-27	軽金属学会 第 134 回春期大会 テーマセッション	熊本大学・熊本	企画
	H30.9.19-20	日本金属学会 第 163 回秋期講演大会 公募シンポジウム	東北大学・仙台	企画
	H30.11.10-11	軽金属学会 第 135 回秋期大会 テーマセッション	芝浦工業大学・東京	企画
	H31.1.16	第 99 回高分子材料セミナー「ミルフィーユ構造とキンク強化現象」	京都工芸繊維大学・京都	協賛
R1	H31.3.20-21	日本金属学会 第 164 回春期講演大会 公募シンポジウム	東京電機大学・東京	企画
	R1.6.5-6	繊維学会年次大会 特別セッション	タワーホール船堀・東京	企画
	R1.9.11-13	日本金属学会 第 163 回秋期講演大会 公募シンポジウム	岡山大学・岡山	企画
	R1.11.2-3	軽金属学会 第 137 回秋期大会 テーマセッション	東京農工大学・東京	企画
	R1.11.2-3	日本機械学会 M&M 材料力学カンファレンス オーガナイズドセッション	九州大学・福岡	企画
	R1.11.16	日本学術振興会 第 133 委員会	東京理科大学・東京	企画
R2	R1.11.20-22	日本機械学会 機械材料・材料加工技術講演会 オーガナイズドセッション	フェニックスプラザ・福井	企画
	R2.3.16-19	日本物理学会 第 75 回年次大会 共催シンポジウム	名古屋大学・名古屋	企画
	R2.5.22-24	軽金属学会 第 138 回春期大会 テーマセッション	香川大学・香川	企画
	R2.9.15-18	日本金属学会 第 167 回秋期講演大会 公募シンポジウム	オンライン開催	予定
	R2.11.18-20	日本機械学会 機械材料・材料加工技術講演会 オーガナイズドセッション	横浜開港記念会館・横浜	予定

4) 国際交流を目指した国際学会・シンポジウムなど (総数 11 件)

年度	開催日	実施内容	講演場所	備考
H30	H30.12.3-5	International Symposium on LPSO and MFS (LPSO2018)	Kumamaoto, Japan	主催
	H30.12.6	Joint Symposium of Russia-Japan Workshop on Advanced Materials & MRC International Symposium (MRC2018)	Kumamoto univ., Japan	主催
R1	R1.6.24-25	Dramatic Innovation to the next 100 years	Tohoku univ., Japan	協賛
	R1.9.21-23	The 5th Japan-Russian Seminar on Advanced Materials	St. Petersburg, Russia	主催
	R1.10.23-27	International Symposium on Next Generation Magnesium Alloys & Their Applications for Sustainable Development	Coral Beach Resort, Paphos, Cyprus	企画
	R1.10.14-18	5th International Symposium on Advances in Sustainable Polymers	Kyoto institute tech., Japan	協賛
	R1.11.28-29	EU-Japan Workshop on Mille-feuille Structured Materials	Prague, Czech Republic	主催
	R1.12.10-14	Materials Research Meeting 2019 (MRM2019)	Yokohama, Japan	企画
R2	R2.5.13-15	Asian Coating Workshop 2020	Ishikawa, Japan	中止
	R2.5.31-6.5	International Conference on Processing & Manufacturing of Advanced Materials (THERMEC'2020)	Austria Center, Vienna, Austria	延期
	R2.10.11-14	The 5th International Symposium on LPSO and MFS (LPSO2020)	University of Tokyo, Japan	延期

5) 産学官交流を目指した研究会など (総数 6 件, 詳細省略)

(3) 一般向けアウトリーチ活動 (総数 23 件, 以下主要なもののみ示す.)

- [1] 高校生向け授業 (X 線を利用した構造解析), 金沢大学角間キャンパス, 2019.11.23, 2020.1.25.
- [2] 若手研究者に対する野外観察 (埼玉県秩父郡長瀬周辺に分布する三波川変成岩中に産するキンク褶曲の観察と埼玉県立自然の博物館訪問), 埼玉県秩父郡長瀬荒川河岸, 2019.11.17.
- [3] 高校生向け相談員 (夢ナビライブイベント まなびステーション「応用化学」), 夢メッセ仙台, 2019.10.5.
- [4] 高校生向け実験実演, 東京工業大学大岡山キャンパス, 2019.8.10.
- [5] 小・中・高生向け講義 (ジュニア向け夏休み集中講座), 埼玉大学, 2019.8.8.
- [6] 一般向け講演会, 大阪市立大学・大阪産業創造館, 2019.1.21.
- [7] 第 6 回パルス中性子イメージング研究会, エッサム神田ホール, 2018.10.10.
- [8] 公募研究説明会, フクラシア八重洲, 2018.10.1, TKP ガーデンシティ新大阪, 2018.9.26, 仙台国際センター, 2018.9.20.
- [9] 平成 30 年度 J-PARC MLF 産業利用報告会, 秋葉原コンベンションホール, 2018.7.23-24.

7 研究組織の連携体制

研究領域全体を通じ、本研究領域内の研究項目間、計画研究及び公募研究間の連携体制について、図表などを用いて具体的かつ簡潔に1頁以内で記述すること。

本領域では、**領域の深化**寄りのテーマとして「多様なミルフィーユ構造を有する新規 Mg 合金の創製(A01 班:2グループ)」と「ミルフィーユ構造のキンクメカニズム解明(A02 班:3グループ)」を、**領域の展開**寄りのテーマとして「ミルフィーユ構造のキンク理論構築(A03 班:1グループ)」と「キンク理論に基づく新規金属・高分子系ミルフィーユ材料の創製(A04 班:2グループ)」を設定している(図7-1)。これに**第一期公募研究24件**が加わり、以下の模式図に示す連携のもと領域研究を推進している。

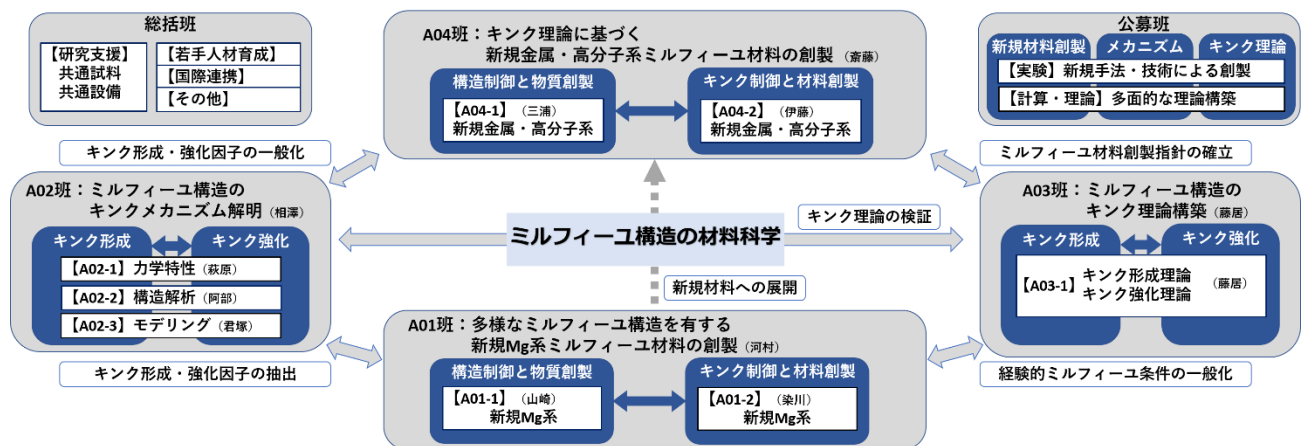


図7-1

【A01 班 多様なミルフィーユ構造を有する新規 Mg 合金の創製】

- A01-1 多様な Mg 系ミルフィーユ構造の構造制御と物質創製 (実験系)
急冷プロセス等により、新規 Mg 系ミルフィーユ構造物質を制御・創製する。
 - A01-2 多様な Mg 系ミルフィーユ構造のキンク制御と材料創製 (融合系)
加工プロセスにより、Mg 系ミルフィーユ物質にキンクを導入し、キンク強化された材料を創製する。
- 公募研究2件(ねじり加工プロセス, 多様な純金属積層構造:10 ページ参照)

【A02 班 ミルフィーユ構造のキンクメカニズム解明】

- A02-1 力学解析によるキンク形成・強化のメカニズム解明 (実験系)
マイクロ力学試験, マクロ力学試験等を用いたマルチスケール力学解析を実施する。
- A02-2 精密構造解析によるキンク形成・強化のメカニズム解明 (実験系)
電子顕微鏡・放射光・中性子による最先端計測により、キンクの構造科学研究を実施する。
- A02-3 モデリングによるキンク形成・強化のメカニズム解明 (計算系)
電子・原子論および固体力学理論に基づくマルチスケールでのキンクモデリングに取り組む。

公募研究9件(力学解析系3件, 精密構造解析系3件, 計算・モデリング系3件:11-12 ページ参照)

【A03 班 ミルフィーユ構造のキンク理論構築】

- A03-1 異分野融合によるキンク形成・強化の理論構築 (融合系)
多様な分野の研究者が結集し、キンク強化理論を構築する。

公募研究3件(地層褶曲, 数理モデリング:12 ページ参照)

【A04 班 キンク理論に基づく新規金属・高分子系ミルフィーユ材料の創製】

- A04-1 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 (融合系)
ミルフィーユ層状構造を形成可能な物質群を、新規金属・高分子系において探索・創製する。
- A04-2 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 (実験系)
加工プロセスにより新規金属・高分子系ミルフィーユ構造物質にキンク導入し、強化を図る。

公募研究9件(新規金属系2件, セラミックス系2件, 高分子系5件:13 ページ参照)

8 若手研究者の育成に係る取組状況

研究領域全体を通じ、本研究領域の研究遂行に携わった若手研究者（令和2年3月末現在で39歳以下。研究協力者やポスドク、途中で追加・削除した者を含む。）の育成に係る取組状況について、具体的かつ簡潔に1頁以内で記述すること。

本領域における若手研究者

令和2年3月末現在の本領域の研究者（計画研究の研究代表者、分担研究者、連携研究者と公募研究の研究代表者）は総勢63名で、その中における若手研究者（令和2年3月末時点で39歳以下）の数は10名である。また、本領域の研究者と共同で本領域研究を行っている若手研究者（若手共同研究者）は32名（博士後期課程学生14名、助教・准教授等13名、ポスドク5名）で、本領域研究が多くの若手研究者に浸透している。

(1) 総括班：若手人材育成部会の設置とその活動

若手研究者を、本領域の研究活動を通じて材料科学・材料工学を基軸とする日本の学術の将来のさらなる発展を担う優秀な研究者・技術者へと育成するために、若手人材育成部会を設置している。若手人材育成部会では、若手がミルフィーユ構造の材料科学を横糸に、領域の学術研究活動の一環として研究分野の枠を越えた開放的な研究の場の提供と交流推進を行う活動を行っている。具体的には、若手に1)異分野における研究の機会を提供する、2)異分野交流の機会を提供する、3)自己啓発を促し研究モチベーションを向上させることを目的に、「若手国内異分野武者修行」、「若手・学生フォーラム」、「スクール・セミナー」の3つの活動を、総括班の承認のもと部会内で連携をとりながら実施している。

(2) 若手人材育成部会の若手研究者育成に係る取組状況

1) 若手国内異分野武者修行・若手海外武者修行

若手研究者が幅広い視野と見識を得られるように武者修行の機会を設けている。平成30年度は1名（国内1名）、令和元年度は10名（国内9名、海外1名）の若手研究者・学生が武者修行を行った。修行者の1名から10名への急増は本領域研究における異分野間の連携研究の活性化を反映している。

2) 若手・学生フォーラム、セミナー

下記の若手・学生セミナーと見学会を行った。若手研究者の育成のため、セミナーでは若手同士が異分野の知見を得て連携研究を行えるように、少人数に分かれてのグループワークの場を設けている。

- ・第1回セミナーと見学会（山形大学工学部）平成30年11月23-24日 24名参加
- ・第2回セミナー（国際会議 The Future of Materials Engineering と共催）と見学会（東北大学）
令和元年6月25-26日 16名参加
- ・第3回セミナーと施設見学会（NIMSとJ-PARC）令和2年3月10-11日（コロナの影響で延期）

(3) 若手人材育成の成果

若手研究者による受賞や昇任を下記に示す。これらの事例から、本領域研究により若手研究者の活躍の場が提供され、人材育成が成果として現れていることが示唆されている。

1) 若手研究者、若手共同研究者の受賞

10名の若手研究者に対して12件の受賞、32名の若手共同研究者に対して3件の受賞があった。
若手研究者の受賞例

小川由希子：日本金属学会奨励賞、茨城県知事奨励賞表彰、Forbes 30 Under 30 Asia など
安藤大輔：インテリジェント・コスモス奨励賞、軽金属学会奨励賞など

2) 若手研究者、若手共同研究者の昇任

10名の若手研究者の内4名が昇任した。32名の若手共同研究者の内6名が昇任またはポストを獲得した。
若手研究者の昇任例

湯浅元仁：同志社大学助教から准教授、白岩隆行：東京大学助教から講師、
増田紘士：NIMSポスドク研究員から東京大学助教、川崎卓郎：J-PARC研究員から副主任研究員

3) 若手研究者の論文・特許

10名の若手研究者により16報の論文が執筆され、1件の特許が出願された。（14-16ページ参照）

9 研究費の使用状況・計画

研究領域全体を通じ、設備等（本研究領域内で共用する設備・装置の購入・開発・運用、実験資料・資材の提供など）の活用状況、研究費の使用状況や今後の使用計画、研究費の効果的使用の工夫について、総括班研究課題の活動状況と併せて具体的かつ簡潔に1頁以内で記述すること。

(1) 設備等の活用状況

1) 大型施設利用支援による効果的研究支援

大型施設について下記に示す利用支援を実施した。

- ①J-PARC(中性子)で2台の装置でMg系5テーマ(A01:1, A02:4), 高分子系1テーマ(A04:1)
- ②Spring-8(放射光)で6台の装置でMg系8テーマ(A01:1, A02:7)
- ③東大ACNP(高分解能電子顕微鏡)で4台の装置でMg系4テーマ(A01:1, A02:3), 高分子系1テーマ(A04:1)
- ④九大URC/総理工(三次元構造解析電子顕微鏡)で4台の装置でMg系5テーマ(A02:3, A03:2)

2) 共通試料の作製・供給による効果的研究支援

Mg合金共通試料の作製・配布を実施した。現在までに、共通試料136本(4種類の基本試料72本とテーラーメイド試料64本)を滞りなく供給し、計画研究と公募研究を支援した。令和2年度の後半からは、Mg合金に加えて新規金属材料(Al-Cu系合金, Al-Ag系合金), 高分子材料(スチレン系ブロック共重合体とポリオレフィン)およびセラミックス材料(MAX相)を共通試料として供給開始する準備を整えた。

3) 各種設備の共同利用による効果的研究支援

【共同利用設備の導入・運用】総括班予算を用いて、高速度ビデオカメラを東京大学に、繰返圧延による強ひずみ加工が可能な圧延機を千葉工業大学に、アーク溶解炉を熊本大学に導入して、共通試料の作製に活用するとともに、領域内メンバーに共用設備として開放して、計画研究と公募研究を支援した。

【設備の共同利用】①本新学術領域研究MFSの総括班と各計画研究で導入した設備(14台), ②前新学術領域研究LPSOで導入した設備(8台), ③大型施設(J-PARC, Spring-8, 東大ACNP, 九大URC/総理工)の共同利用設備(11台), ④領域メンバーの所属研究機関・所属部局の共同利用設備(46台), ⑤領域メンバーが保有する設備(44台)について、共同利用設備リスト(合計123台)を作成して本新学術領域研究のHPに掲載し、領域内メンバーが共同利用設備を有効に活用して研究を推進できるようにした。

(2) 研究費の使用状況と今後の使用計画

【領域全体予算の内訳】令和2年度6月現在、本領域の5ヶ年間の予算内訳は、計画研究が58.1%, 総括班が21.9%, 公募研究が20.0%である。研究活動支援を中心とした総括班の予算が多いのが特徴となっており、プロジェクト研究として領域研究を効果的かつ効率的に進めることが可能となっている。

年度	計画班	総括班	公募班	領域全体
H30	150,500	89,700	0	240,200
R1	136,400	36,200	59,000	231,600
R2	132,700	44,200	59,000	235,900
R3	133,200	43,400	59,000	235,600
R4	132,500	44,200	59,000	235,700
小計	685,300	257,700	236,000	1,179,000
	58.1%	21.9%	20.0%	100%

【総括班予算の内訳】令和2年度6月現在、総括班の5ヶ年間の予算内訳は、研究活動支援経費が44.6%, 若手人材育成が2.6%, 国際活動支援が18.6%, その他の運営経費が34.2%である。共通試料配布, 大型施設利用支援, 共通設備導入により領域研究を推進するため、研究活動支援経費の割合が高くなっている。

(3) 研究費の効果的使用の工夫

【領域の企画・運営】領域企画委員会, 領域評価委員会, 領域運営委員会, 幹事・総括班会議, 年次研究成果報告会を開催するとともに、各種報告書や評価書を印刷・配布することにより、領域研究の企画・調整・立案, 審議, 連絡・周知徹底ならびに研究評価を実施することができ、効果的かつ円滑な企画・運営を行うことが出来た。

【領域交流推進】合宿研究会, 班研究会, 班間連携研究会, 施設見学会の開催により領域内の交流を推進するとともに、所属研究者が参画する学協会等で本領域に関わるシンポジウムや特別セッションを開催により異分野交流を推進し、本領域の内容を広く周知させることが出来た。

【研究活動支援】共通試料作製・配布, 大型施設利用支援, 共通設備利用支援により領域研究を推進した。

【情報発信・知財】ホームページを運用することにより本領域研究活動とその成果を公表するとともに、ニュースレター・学会誌特集号を発行し、本領域の取組内容を広く発信することが出来た。

【若手人材育成】若手学生セミナー・若手国内武者修行等を通じて若手人材育成を推進した。

【国際活動支援】H30年12月2~4日にミルフィュー構造材料に関する国際会議(LPSO2018)を熊本で開催した。最新の研究成果の発表による活発な学術交流により、今後の研究推進方針が得られた。また、研究成果の世界発信と国際交流の推進を図ることが出来た。

10 今後の研究領域の推進方策

研究領域全体を通じ、今後の本研究領域の推進方策について、「革新的・創造的な学術研究の発展」の観点から、具体的かつ簡潔に2頁以内で記述すること。なお、記述に当たっては、今後公募する公募研究の役割を明確にすること。また、研究推進上の問題点がある場合や、国際的なネットワークの構築等の取組を行う場合は、その対応策や計画についても記述すること。

本領域研究は、当初計画に沿って概ね順調に進展している。後半は、A01 班から A04 班までをより有機的に連携させて3大材料への展開を加速するため、やや先行する Mg 合金の深化研究によって得られた知見を、高分子材料・セラミックス材料研究者と迅速に共有する。以下、これまでに得られた成果のうち、後半へ向けた研究方針策定への鍵となった傑出した件を挙げながら、本領域研究の後半にて特に注力する項目の推進方策を述べる。

【ここまでの研究における際だった成果と、本領域後半の課題と指針】

① キンク強化の実験的検証 [深化研究]

Mg 合金は、押出加工中のキンク変形により高密度のキンク界面が導入され強化される。このキンク強化をもたらす具体的なメカニズム解明に向け、結晶方位を制御したミルフィーユ型 Mg 合金の「二重圧縮試験」を実施し、キンクの導入が底面すべり抑制に寄与することを直接的に実証した。このキンク強化の起源として、粒界・界面効果による強化法としてよく知られる Hall-Petch 則のみでは説明できないプラスアルファの効果、すなわちキンクそのものによる強度上昇効果が強く示唆され、力学試験によるキンク定量評価法の提案に至った (Hagihara et al, *Acta Materialia*, 163 (2019), 226-239 : 引用件数上位1%論文)。キンクによる intrinsic な強化分がもたらす Extra Strengthening の解明こそが、本領域の主課題であることが明確に示された。前新学術から継続的に参画する研究者による、本領域の深化軸に沿った重要な成果である。

関連する公募研究テーマ

- ・異種材料ハイブリッドミルフィーユ構造の創製と力学特性、
- ・ひずみ分布予測に基づくキンク制御、
- ・キンク形成を利用した機能特性(擬弾性等)制御

② キンク連続性の数理解析 [展開研究]

キンク形態を理論的に考察すべく、キンク界面が複数導入された系において、変位の連続性を保つための幾何学的適合条件となる Rank-1 接続条件を適用した解析を行った。実験的にしばしば観察されるくさび形キンクの形成時には、界面に不可避免的にわずかな不一致(回転角度1度未満の微小不一致)を生じることが分かり、それが回位型の格子欠陥として解釈できることが判明した (Inamura, *Acta Materialia*, 173 (2019), 270-280)。回位は大きな弾性場を伴うため、実際の材料の加工プロセス中においては、複数のキンクが交わる局所領域にて回位を対消滅させるような動的緩和が生じ、弾性エネルギー最小化を図っているのではないかと、このアイデアが提案された。この緩和過程を経て安定化されたキンク界面群は、その配列を崩すための変形がより困難になることから、キンクのパターンニングによる強化への寄与が示唆される重要な成果である。

Rank-1 接続は、マルテンサイトや双晶等で用いられる結晶不変面・結晶不変方向の概念を一般化した数理モデルである。本新学術に新規参画した研究者によりキンクへと適用され、本領域の展開を促す重要な成果を得た。

国際連携研究の推進

回位論によるキンク解釈をより深めるため、回位論の創設者の一人であるロシア ITMO 大学の Romanov 教授、および Rank-1 接続の提唱者である Sir Ball 教授(オックスフォード大名誉教授、元世界数学会会長)との国際共同研究を進めながら、キンク強化理論の構築を目指す(両教授とも、本新学術の海外アドバイザーである)。

関連する公募研究テーマ

- ・転位論と回位論の体系化、
- ・格子欠陥動力学に基づく回位運動の計算機シミュレーション、
- ・数理科学モデリングによるキンク形成・強化条件の導出、
- ・層状複合材料の強化機構の材料力学的検討

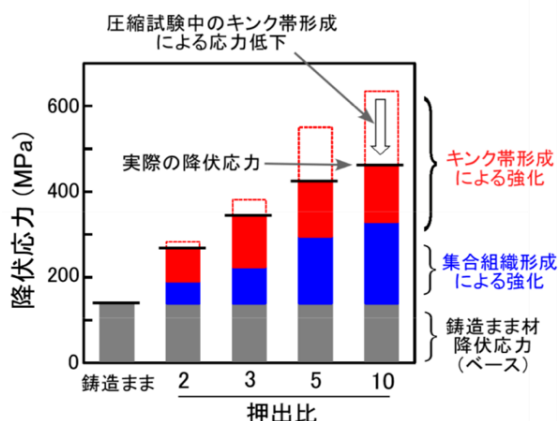


図 10-1 Mg 合金キンク強化の定量

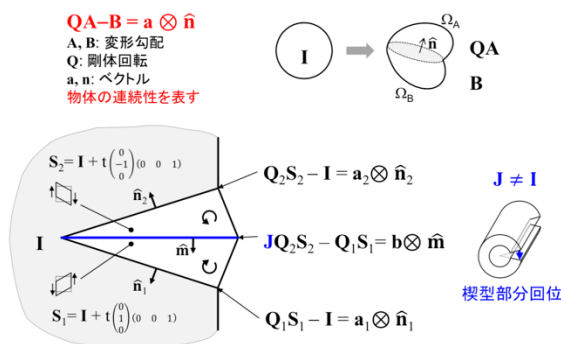


図 10-2 キンク界面の連続性

③, ④は論文未発表内容を含むため非公開.

【今後の研究推進上の留意点】

コロナ対策: 公募を含めた全参画メンバーに対し, 今年度4月直ちにオンライン会議ソフトライセンス (Zoom) を総括班より配布した. コロナ自粛期間中, 領域内での研究会は通常より活発に開催された. 本領域研究は実験系が7割強を占めるが, 6月末現在, 大学や研究機関にて(部分的に)実験再開されつつあり, SPring-8, や J-PARC もテーマ募集も再開しつつある. 今後, コロナ第2波等の襲来に備えて, 可能な装置については実験をリモートで行える環境とすべく, 総括班支援のもと対策を進める (e.g., 自宅からのみならず, 大学内にて居室-実験室をリモート環境することで, 実験環境の密を避けることができる).

11 総括班評価者による評価

研究領域全体を通じ、総括班評価者による評価体制（総括班評価者の氏名や所属等）や本研究領域に対する評価コメントについて、具体的かつ簡潔に2頁以内で記述すること。

【総括班の評価体制】

総括班の運営本部に、外部評価委員で構成される「研究評価委員会」を設置して、領域の研究の評価を行っている。外部評価委員には、本領域で中心となる4つの分野(材料科学, 構造科学, 材料力学, 高分子科学)で指導的な立場にある, 材料科学分野の増本健先生(東北大学名誉教授), 構造科学分野の藤井保彦先生(東京大学名誉教授), 材料力学分野の富田佳宏先生(神戸大学名誉教授), 高分子科学分野の西敏夫先生(東京工業大学名誉教授)の4名に就任いただいて, 各専門分野における研究指導者としての豊富な経験に基づいた客観的な評価をお願いしている。

増本健先生(材料科学分野)からのコメント

総ての班に於いて着実に研究が進んでおり, 研究の進行状態を高く評価する。

A01 班においては際立った成果が挙がっており, 順調に研究が行われている。評価ポイントは, 1) 高温で<0001>回転型キンクの発見とその幾何学的特徴を明らかにしたこと, 2) DSC-SWAXS 装置開発を行い, 有益なデータを得つつあること, 3) HPT 加工による Mg 系ミルフィーユ物質のキンク強化挙動を見出したこと, が挙げられる。今後の課題についての方針は妥当である。

A02 班においては際立った成果が挙がっており, 順調に研究が行われている。評価ポイントは, 1) キンク帯形成による強化, 延性の発現を実証したこと, 2) 中性子回折によるキンク形成・強化の解明の糸口を得て, 今後の進展が期待されること, 3) LPSO 型から MFS 型の組織変換による高強度化を実現したこと, 4) 動的 MFS 生成・キンク形成による自発的階層化を見出したこと, が挙げられる。なお, 国際誌投稿, 招待講演, 国際会議招聘および各班との連携は極めて良い。

A03 班においては, 特に「回位」の役割を明らかにしつつあり, 今後の深化を期待する。評価ポイントは, 1) Ridge キンクが形成される際にくさび形回位の導入が必ず必要になることを示し, 今後の研究展開に重要な指針を示したこと, 2) Ridge キンクが生成し, 成長するには回位の運動を考えることによってモデリングが可能であること, 3) 微分幾何学により, 回位密度テンソル分布を転位密度テンソル分布で再現できることを示したこと, が挙げられる。最も困難な研究分野であったが, 研究の方向が明確になったことは高い評価をしたい。

A04 班においては研究の格段の進歩があり, 今後の更なる進展を期待する。評価ポイントは, 1) 様々な新規金属・高分子系・セラミックス系物質に対して, MFS の制御とさらにキンクの導入が可能になったこと, 2) 今後, 他班との連携によりキンク強化の検証, キンク強化に最適なキンク形態・加工条件の解明などを計画していること, が挙げられる。MFS 現象の普遍性を Mg 合金以外に広く展開したことは大きな成果であるが, 今後はその本質を明らかにする必要がある。

藤井保彦先生(構造科学分野)からのコメント

前プロジェクト(河村代表)においてシンクロ型 LPSO Mg 合金で発見されたキンク強化現象を, 本プロジェクトでは非周期系稀薄 Mg 合金(進化軸方向)や他の金属・セラミックス・高分子系の材料(展開軸方向)を対象として探索し, 広くミルフィーユ構造(MFS)におけるキンク強化機構の実験および理論的解明と新規材料創製を目指している。

非周期系稀薄 Mg 合金においては, 超徐冷と超急冷両方法を用いて系統的な探索を行い, Mg-Zn-Y での MFS 構造形成・キンク形成・キンク強化を確認するとともに, 平均的に 50nm 程度の硬質層(濃化層)間隔の構造制御が可能となった。今後プロジェクト後半での系統的研究のための標準試料としての役割が期待される。MFS 構造形成過程の実験的研究として, 放射光によるその場観測が系統的に進められているが, ミクロ→メゾ→マクロな構造と組織形成の全体像が明らかになることが期待される。

MFS 構造にキンクが導入・強化(Extra Strengthening)されるメカニズム解明は, 本プロジェクトの中心的課題であるが, 稀薄 Mg 合金における系統的な実験的研究は順調に進行しており成果を挙げている。特に電子顕微鏡マルチスケール微細組織観察による詳細なキンク界面分布観察を行い, その分布が階層性を持つフラクタル的様相を示す解析結果は, キンク導入・強化メカニズムに迫るものとして評価できる。今回は稀薄 Mg 合金が対象であるが, 他の MFS 構造の系での同様のキンク界面分布の有無に興味をもたれる。

キンク形成・強化の理論的研究は、組織だった系統的な研究が強力に展開されている。特に Rank-1 接続理論による実測された 3 次元キンク構造の解析は、キンク形成機構解明に迫るものであり、今後さらに発展させたキンク群による Extra Strengthening の新強化機構説明への寄与が期待される。

稀薄 Mg 合金以外の三大材料（金属・セラミックス・高分子系）への展開については、いずれも MFS 形成・キンク導入・キンク強化（一部）が観測されており、展開軸上での成果は出ている。しかしながら、新しい材料候補として耳目を集めるほどの特性は観測されていない。プロジェクト後半で進化軸に沿った研究展開を図るには、プロジェクト全班が興味を持つ絞り込んだ魅力ある標準試料が望ましいが、現在着手済の材料だけでは不十分ではないであろうか？

総じて非周期系稀薄 Mg 合金での実験的・理論的研究の進捗は順調である一方、他の三大材料についてはよりインパクトのある材料開発が望まれる。

富田佳宏先生(材料力学分野)からのコメント

本研究は、阿部領域代表のもと、精密な金属学的実験、新たな理論構築と数理学シミュレーション分野を代表する研究者が参画した研究集団による、新強化原理に基づく次世代構造材料の創製を目指した画期的な研究である。若手研究者並びに大学院生の研究参加も配慮されており、本研究終了後、世界を牽引する新たな材料研究並びに工業化が間断なく推進されることも期待できる。

これまでに達成した成果は、国内外の研究会議あるいはシンポジウム、評価の高い学術誌において公表され、国内外の学会からの多数の受賞に加えて、研究会における基調講演・招待講演、特別シンポジウムの企画も多い。いずれも、研究成果が内外から注目され高く評価されていることの証である。

材料強化に根源的な役割を果たす硬軟質材のミルフィュー構造のキンク形成の実験・理論・数理面からの研究には、新強化原理に基づく次世代構造材料の創生に留まらず、適切なキンク形成プロセスの設計、最適化までを視野に入れていることが特筆される。キンク形成プロセスの選択に必要な物理量の設定や最適化プロセスの選定には、多種多様なキンク現象とそれによる強化機構の実験並びに理論・数理シミュレーション両面からの検討が不可欠であろう。各研究班の成果の共有と協調によって、キンク形成に必要な条件ならびに達成可能な理想強度・加工限界について、定量的な知見を得ることを期待したい。

金属、セラミック、ポリマーなど広範な工業材料に対するキンク形成の実証と強化理論の展開は、本研究の汎用性を示すものとして注目される。理論、実験両面から、各班の成果を共有しつつ、相乗効果によってさらなる深化・展開をもたらすことが期待できる。内外の研究者との活発な研究交流、研究協力、国際会議・シンポジウムの共催などにより研究成果の国際的な公知が一層の発展をもたらすと考える。

以上、いずれも研究計画の妥当性、短期間に達成した成果の外部評価も際立っていることの証と考える。

西敏夫先生(高分子科学分野)からのコメント

全般的に眺めると、ほぼ順調に研究が進んでいると考えられる。個別の研究は、それぞれ興味深い結果が得られつつあるので、この COVID-19 禍での STAY HOME をむしろ好機と捉え、どんどん論文や特許の形に成果をまとめることをお願いしたい。また、本来の目的からずれていても新発見や予期しない結果が得られたら、十分に追求していただくことを期待したい。新しい分野が開拓される可能性が高いからである。また、全体の目的や班毎の目的を時々振り返って、個別の研究の整合性を見直すことも必要である。以下、各班で気付いたことをいくつか挙げる。

A01 班：層状硬化層分散度などの特性長と呼ばれるパラメーターの制御技術を進めることとキンク強化を発揮する最適加工条件の明確化は確かに重要である。また、今までは材料内部の構造を主体に研究されてきたが、実用化も視野に表面構造や他材料との接合性、接着性の検討も進めてはどうか。

A02 班：キンクパターンと力学特性相関の定量評価は重要なポイントである。しかし、MFS、キンクパターン共に異方性が強い構造なので、それを考慮した力学特性評価も必要ではないか。

A03 班：班理論面では大きな発展があったが、実際の LPSO 構造への展開や、キンク強化メカニズムの解明が待たれる。

A04 班：金属・セラミックス・高分子系でのキンク強化は大きな可能性を秘めていていくつか候補が見つかりつつある。体系的ではなくても、有望株を見つけたらどんどん進めて欲しい。高分子系では一軸伸張だけではなく、多軸変形、圧縮・せん断などもっと拡張した加工プロセスの検討が望まれる。