

領域略称名：MFS 材料科学
領域番号：6004

令和5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）」
に係る事後評価報告書

「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5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 交付決定額・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・ 8
- 4 研究領域の目的及び概要・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・ 9
- 5 審査結果の所見及び中間評価結果の所見で指摘を受けた事項への対応状況・・・・・・・・ 11
- 6 研究目的の達成度及び主な成果・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・ 13
- 7 研究発表の状況・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・ 18
- 8 研究組織の連携体制・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・ 23
- 9 研究費の使用状況・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・ 24
- 10 当該学問分野及び関連学問分野への貢献の状況・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・ 26
- 11 若手研究者の育成に関する取組実績・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・ 27
- 12 総括班評価者による評価・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・ 28

【以下、非公開部分】

- 13 参考データ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・ 30

研究組織

(令和5年3月末現在。ただし完了した研究課題は完了時現在、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	名古屋工業大学・工学(系) 研究科(研究院)・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、国：国際活動支援班、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 第一期	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 第一期	19H05135(延長中:2度目の産休のため) 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 第一期	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 第一期	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 第一期	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 第一期	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 第一期	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 第一期	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 第一期	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 第一期	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 第一期	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 第一期	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 第一期	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 第一期	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 第一期	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 第一期	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 第一期	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 第一期	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 第一期	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 第一期	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 第一期	19H05123 ミルフィーユ構造を有するNb-Ti-Ni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 第一期	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 第一期	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 第一期	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
A01 公 第二期	21H00088 ねじり押出により導入した三 次元キンクによる超強化	令和3年度 ～ 令和4年度	安藤 大輔	東北大学・工学研究科・准 教授	1
A01 公 第二期	21H00103 高圧スライド加工(HPS) 法よ る Mg-Zn-Y 合金の組織変化と キンク変形挙動	令和3年度 ～ 令和4年度	唐 永鵬	九州工業大学・大学院工 学研究院・研究職員	1
A02 公 第二期	21H00089 ナノ電子プローブ分光法によ るミルフィーユ型 Mg 合金の電 子構造の解明	令和3年度 ～ 令和4年度	佐藤 庸平	東北大学・多元物質科学 研究所・准教授	1
A02 公 第二期	21H00091 高対称性セラミックスにおけ るキンク形成機構の深化と展 開	令和3年度 ～ 令和4年度	増田 紘士	東京大学・大学院工学系 研究科(工学部)・助教	1
A02 公 第二期	21H00092 In-situ SEM 観察による高温変 形下でのキンク形成過程の解 明	令和3年度 ～ 令和4年度	江草 大佑	東京大学・大学院工学系 研究科(工学部)・助教	1
A02 公 第二期	21H00093 Rank-1 接続に基づくキンク変 形ダイナミクスの解明	令和3年度 ～ 令和4年度	白岩 隆行	東京大学・大学院工学系 研究科(工学部)・講師	1
A02 公 第二期	21H00098 化学状態分析による LPSO 型合 金の局所クラスター構造形成 メカニズムの解明	令和3年度 ～ 令和4年度	宮崎 秀俊	名古屋工業大学・工学(系) 研究科(研究院)・准教授	1
A02 公 第二期	21H00099 原子分解能ホログラフィーに 基づくミルフィーユ構造形成 過程の3次元可視化	令和3年度 ～ 令和4年度	木村 耕治	名古屋工業大学・工学(系) 研究科(研究院)・助教	1
A02 公 第二期	21H00101 構造・組織型ミルフィーユ材料 における弾性不均質性とそれ に起因した応力・ひずみ分配	令和3年度 ～ 令和4年度	多根 正和	大阪公立大学・大学院工 学研究科・教授	1
A02 公 第二期	21H00104 層状構造体における塑性異方 性と相配置に起因するキンク 形成機構の統一的理解	令和3年度 ～ 令和4年度	眞山 剛	熊本大学・先進マグネシウ ム国際研究センター・准教 授	1
A02 公 第二期	21H00105 単独ならびに群化したキンク の安定化に伴う強化機構とそ の制御	令和3年度 ～ 令和4年度	鈴木 真由美	富山県立大学・工学部・教 授	1

A02 公 第二期	21H00107 高温強度におけるキンク変形帯の役割とその強化メカニズムの解明	令和3年度 ～ 令和4年度	高木 秀有	日本大学・工学部・准教授	1
A02 公 第二期	21H00108 (令和4年度に廃止： 学術変革 B 代表での採択に伴う) 第一原理原子応力計算による ミルフィーユ合金内部の原子 レベル不均一弾性の解明	令和3年度 ～ 令和4年度	椎原 良典	豊田工業大学・工学(系)研 究科(研究院)・准教授	1
A02 公 第二期	21H00111 キンク強化が期待される結晶 性高分子材料の分子論的解明	令和3年度 ～ 令和4年度	萩田 克美	防衛大学校(総合教育学 群、人文社会科学群、応用 科学群、電気情報学群及 びシステム工学群)・応用科 学群・講師	1
A03 公 第二期	21H00090 微分幾何学的アプローチによ るキンク褶曲形成理論とキン ク強化理論	令和3年度 ～ 令和4年度	長濱 裕幸	東北大学・理学研究科・教 授	1
A03 公 第二期	21H00102 Understanding strengthening in mille-feuille structures via mesoscale modeling of structural and material instabilities	令和3年度 ～ 令和4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 第二期	21H00087 配向制御した MAX 相セラミッ クスのキンク強化機構の解明	令和3年度 ～ 令和4年度	池田 賢一	北海道大学・工学研究院・ 准教授	1
A04 公 第二期	21H00094 ミルフィーユ構造セラミック スにおけるキンク形成機構解 明と力学特性向上	令和3年度 ～ 令和4年度	吉田 英弘	東京大学・大学院工学系 研究科(工学部)・教授	1
A04 公 第二期	21H00095 液晶性高分子が形成する単一 ドメインミルフィーユ構造へ のキンク導入と力学物性	令和3年度 ～ 令和4年度	戸木田 雅利	東京工業大学・物質理工 学院・教授	1
A04 公 第二期	21H00097 BCC 基ミルフィーユ型共晶合 金におけるキンク形成クライ テリア	令和3年度 ～ 令和4年度	石川 和宏	金沢大学・機械工学系・教 授	1
A04 公 第二期	21H00100 ミルフィーユ構造を形成する 種々の高分子材料の多軸伸長 によるキンク形成と材料強化	令和3年度 ～ 令和4年度	櫻井 伸一	京都工芸繊維大学・繊維 学系・教授	1
A04 公 第二期	21H00109 キンク強化を利用したパーラ イト鋼の高温変形抵抗向上	令和3年度 ～ 令和4年度	上路 林太郎	国立研究開発法人物質・ 材料研究機構・構造材料 研究拠点・主幹研究員	1

A04 公 第二期	21H00110 MAX 相セラミックスの力学特 性の原理解明とキンク組織制 御に向けた研究	令和3年度 ～ 令和4年度	森田 孝治	国立研究開発法人物質・ 材料研究機構・機能性材 料研究拠点・主席研究員	1
公募研究 計 47 件 (廃止を含む)					

[1] 総：総括班、国：国際活動支援班、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 交付決定額

年度	合計	直接経費	間接経費
平成 30 年度	312,260,000 円	240,200,000 円	72,060,000 円
令和元年度	301,080,000 円	231,600,000 円	69,480,000 円
令和 2 年度	306,670,000 円	235,900,000 円	70,770,000 円
令和 3 年度	306,280,000 円	235,600,000 円	70,680,000 円
令和 4 年度	306,410,000 円	235,700,000 円	70,710,000 円
合計	1,532,700,000 円	1,179,000,000 円	353,700,000 円

4 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、結晶回転を伴うキンク変形を引き起こす。LPSO 型 Mg 合金は、高密度のキンク領域を導入して初めて高強度が発現する。LPSO 型 Mg 合金がキン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」「キンク強化」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「ミルフィーユ洋菓子」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。キン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出すことが本研究の目的である。

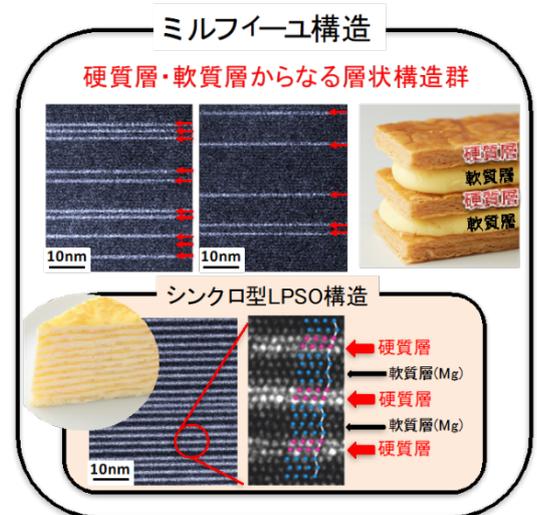


図4-1 LPSO 構造からミルフィーユ構造へ

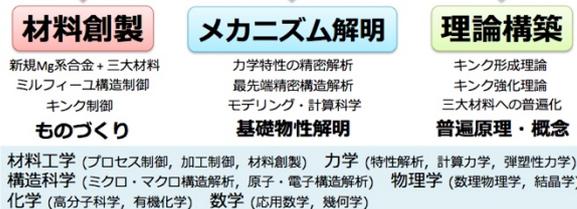
【本領域に期待される革新的・創造的な学術展開】

一般に構造材料設計においては、多結晶材料の連続かつ安定な変形のため「結晶構造には独立な5つ以上のすべり系が必要」とするフォン・ミーゼス条件が金科玉条となる。我が国で独自に見いだされた LPSO 型高強度 Mg 合金からの発展課題である本領域では、従来常識にとらわれない独創的視点に基づき、あえて容易すべり系が限定される「微視的な硬質層・軟質層による層状構造」を創製し、キンク変形を効果的に誘発することでの材料高強度化を目指している。

本領域では、キンク形成・キン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。キン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出す(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・キンク強化を利用した新しい構造材料の創成へとつなげる。

- ▶ ミルフィーユ構造のキンク強化原理の確立
- ▶ キンク強化原理に基づく新構造材料創製

キンクはどのように形成されるのだろうか？
キンクによってなぜ強化されるのだろうか？



日本発でモノ(新材料)・コト(新概念)を先導!

図4-2 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 合金キンク強化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。

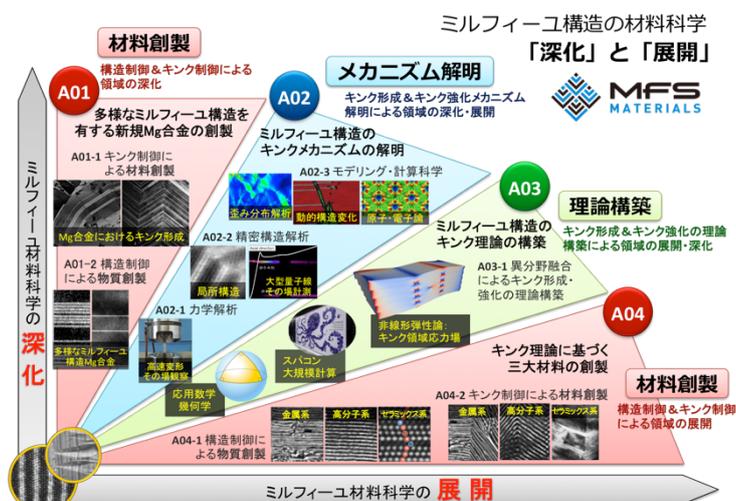


図4-3 ミルフィーユ構造の材料科学の「深化」と「展開」

【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。

5 審査結果の所見及び中間評価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、審査結果の所見及び中間評価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いて指摘を受けた事項への対応状況)

1) 審査結果の所見

所見に加えて、以下の留意事項が指摘された。参考意見は「特になし」であった。

【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。

2) 指摘事項への対応状況

上記の指摘を受け、本新学術領域研究の発足後直ち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

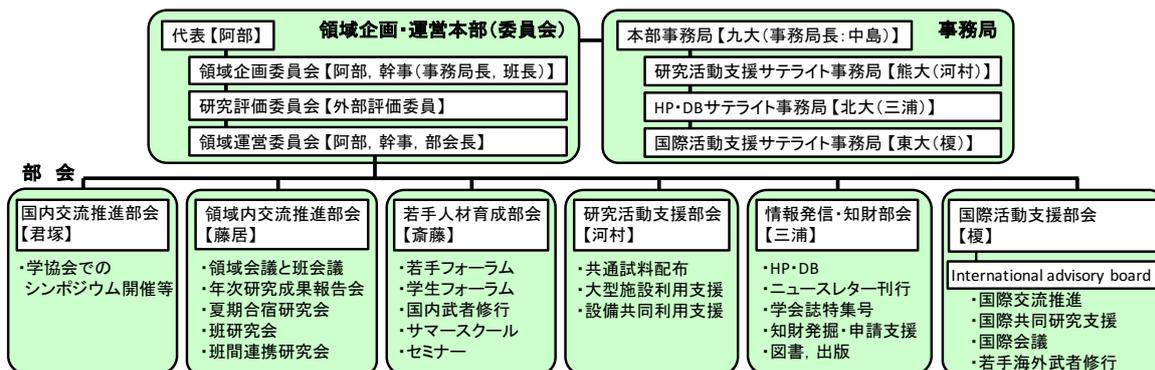


図5-1 申請時の総括班体制

【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

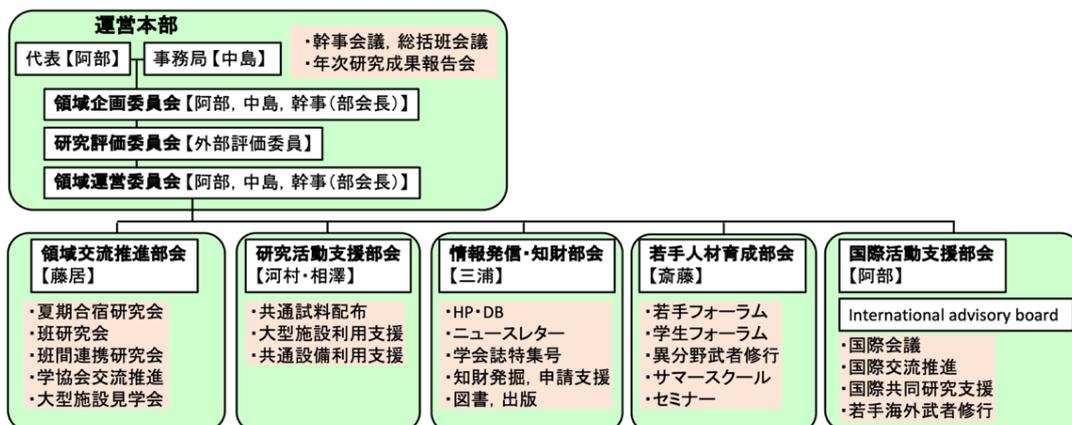


図5-2 変更後の総括班体制

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た。

(中間評価結果の所見において指摘を受けた事項への対応状況)

1) 中間評価結果の所見

留意事項、および参考意見は特になかった。以下に示す所見において、下線部が要望・指摘事項である。

本研究領域は、マグネシウム合金において発見されたミルフィーユ構造のキンク強化現象を他の金属系、高分子系、及びセラミックス系の三大材料へも展開し、その学理構築とともに、更なる軽量高強度材料を探索することを目的としている。マグネシウム合金におけるキンク強化メカニズムの深化とともに、その知見を基にした他の材料系への展開に関して着実な成果が得られている。本研究領域の設定目的に照らして、期待通りの進展が認められ、今後のより一層の進展が期待される。

研究成果のうち、特に、金属材料で見いだされたキンク発現による高強度化現象を、高分子材料へ展開する研究が進展している点は高く評価できる。

一方、理論構築に関しては更なる発展の余地があり、構造材料としてミクロからマクロに至るマルチスケールな視点の下、種々の物質群における強化メカニズムを統合した日本発の統一的学理の創成が望まれる。

2) 指摘事項(所見下線部)への対応状況

(*以下の補完として、本報告書26ページ, 10「当該学問分野及び関連学問分野への貢献の状況」を併せて参照)。

上記指摘を受け、キンク界面における転位・回位に着目し、様々な材料に普遍的に適用し得るキンク形成・強化理論構築に注力した。その状況は、研究期間後半における理論関連論文の着実な増加に見て取れる(本報告書18ページ, 図7-1, および関連記載を参照)。

キンク形成に関しては、幾何学理論に基づく解析から、「ミルフィーユ構造体に内包されるキンクは、本質的に回位の生成を伴う」という重要な結論を得た。研究期間後半では、電子顕微鏡観察に基づく精密計測により、実際の試料に形成されるRidge型キンクの両側でくさび型回位に相当する回転成分(すなわち、**回転角の微小不一致**)が存在することを実証した。実測されたフランクベクトルの大きさは、幾何学理論が予測するところとよく一致することが確認された(図5-3:本報告書20ページ, 主な論文[26]にて発表)。さらに、キンク形成に関して微分幾何学に基づく理論的検討を行い、数学的に**転位場と回位場が可換**であることを初めて示すとともに、転位列で表現されたキンク界面を初期状態として、回位理論に基づく**フランクベクトルの定量化**に成功した。これにより、**転位・回位を体系化した格子欠陥理論**が確立され、転位論だけに留まらずキンク現象を包括的に解析し、理解を深めるための土壌が整った。

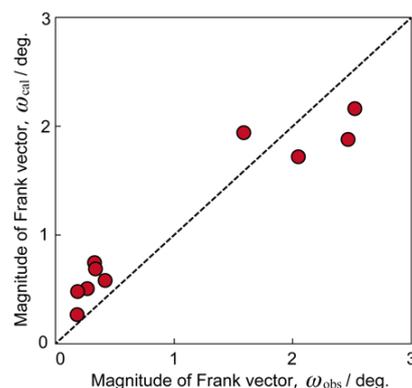


図5-3 回位フランクベクトルの実測値と理論値の比較

キンク強化の理論構築にあたっては、キンク形成後の塑性変形に対するキンク界面および回位の寄与に着目した幾何学に基づく解析を進展させた。キンク界面そのものが後続転位の障害になることに加えて、**キンク界面上での新たな回位生成が強化因子として働く**ことを幾何学理論に基づいて説明づけた。これらは、特定の物質群にのみ適用可能な狭義の理論ではなく、キンク界面を含むミルフィーユ材料に広く適用可能な普遍的理論となっている。微分幾何学および非線形連続体力学に基づく解析においても、Ridge型キンク界面を転位が通過するとして解析を実施し、切断されたキンク界面には回位が発生し、その回位の応力場を定量的に求めることに成功し、ごく最近論文が受理された

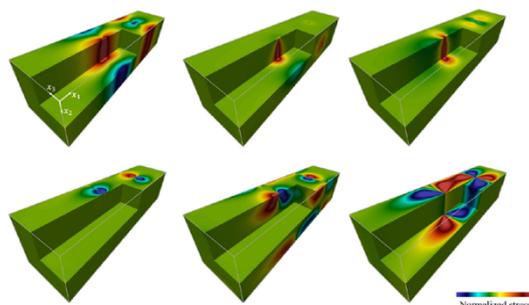


図5-4 切断されたキンク界面に発生した回位周辺の応力場分布解析

(図5-4: "Mechanics and Energetics of Kink Deformation Studied by Nonlinear Continuum Mechanics Based on Differential Geometry" Pranoto, Tarumi et al. *Materials Transactions* (2023) in press). 微分幾何学に基づく回位の応力場解析手法、およびフランクベクトルの定量評価手法は、あらゆるタイプの回位(転位で言えば混合転位)に適用可能であり、先述のように数学基盤に裏打ちされた高精度の定量見積もりが可能であるという利点を持つ。本領域研究の取組みにより得られたこれらの成果は、多様なキンク形態に適用可能な極めて汎用性の高い手法であり、回位によるキンク強化を定量的に扱うための基礎理論を与えた。

6 研究目的の達成度及び主な成果

(1) 領域設定期間内に何をどこまで明らかにしようとし、どの程度達成できたか、(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) 領域設定期間内に何をどこまで明らかにしようとし、どの程度達成できたか

【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】(概ね達成 A)

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(概ね達成 A)

「経験的ミルフィーユ条件」を満たす新たな硬質層分散構造 Mg 合金の創製と、特性発現(キンク強化)条件の精緻化により、ミルフィーユ構造制御技術の高度化・高効率化を目指した。

- ① 通常場を用いたミルフィーユ型 Mg 合金創製による経験的ミルフィーユ条件の精密化を達成.
- ② 非平衡場(超急冷)を用いたミルフィーユ単相組織の希薄 Mg 合金を創製し、キンク導入により優れた機械的特性を得た.
- ③ 放射光小中角散乱(SWAXS)測定を実施し、プロセス最適化のための知見を得た.

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(概ね達成 A)

多様な Mg 系ミルフィーユ物質群に対して、キンク強化機能を付与した材料群を創製し、「効果的なキンク導入プロセスの確立」と「キンク強化に最適な形態と構造の解明」を目指した。

- ① 多様な高次塑性加工法により、ミルフィーユ型 Mg-Y-Zn 系合金に対してキンク導入・強化が可能なことを確認.
- ② キンク形態を階層的に制御し、キンク強化の組織学的定量化に成功した.
- ③ 高次塑性加工制御の効果は「せん断ひずみ-キンク数密度-硬度」によって普遍的に整理できることを示した.

【A02 班 ミルフィーユ構造のキンクメカニズム解明】(期待以上の達成 A+)

A02-1 力学解析によるキンク形成・強化のメカニズム解明(期待以上の達成 A+)

各種ミルフィーユ材料におけるキンク形成・強化について、微視的組織因子が力学特性に与える影響を実験的に明らかにすることを目的とした。

- ① Mg-Zn-Y 極希薄固溶体単結晶を作製し、まばらなミルフィーユ組織におけるキンク強化発現を実証した.
- ② キンク形成が、ミクロな弾性座屈を考慮した Ripplcation モデルにより解釈できる可能性を示した.
- ③ 金属系ミルフィーユ材料では、構造・組織のスケールによらず極めて効果的に層間剥離を抑制しうることが確認できた.

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(期待以上の達成 A+)

キンク形成・強化を支配する主因子であるキンク素子を、電子・放射光・中性子による最先端計測法を駆使したマルチスケール精密構造解析により、構造科学の立場から抽出することを目的とした。

- ① Mg 合金クラスター構造科学:微量添加元素による短範囲規則クラスター形成が相安定性を支配することを解明した.
- ② Mg 合金キンク構造科学:キンク界面の原子分解能解析に基づく格子回位の発見、キンク界面の精密原子構造解明による特異な界面ダイナミクスモデルの構築に成功した.
- ③ 結晶性高分子ナノ構造化の発見:金属材料ではよく知られる微細粒強化に類似して、高分子でもナノ構造化が強化に寄与しうることを見いだした.

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(概ね達成 A)

電子・原子論と結晶塑性論に基づくモデリングにより、多様なミルフィーユ材料におけるキンク形成を支配する因子を明らかにするとともに、キンクの介在による変形・強化のメカニズム解明を目的とした。

- ① 原子レベルモデリング:第一原理計算にて、Mg 合金中の硬質層中の原子クラスター形成過程を解明した.分子動力学計算により、せん断応力下におけるキンク界面移動の特異な挙動を示すことに成功した.
- ② 連続体モデリング:軟質層と硬質層がせん断変形と結晶回転をそれぞれ担うことによるキンク形成機構を見いだした.

【A03 班 ミルフィーユ構造のキンク理論構築】(概ね達成 A)

A03-1 異分野融合によるキンク形成・強化の理論構築(概ね達成 A)

多様な学問分野を融合した実験と理論両面からのアプローチによって、ミルフィーユ構造体におけるキンク形成理論およびキンク導入による材料強化機構を説明する理論構築を目的とした。

- ① キンクと回位:結晶幾何学に基づき、キンクが内在する系では回位生成が不可避となる普遍性を導出した.微分幾何学のホロミー解析新手法を利用し、回位のフランクベクトルの定量化に成功した.
- ② キンク強化理論:結晶幾何学に基づき、既存キンクのせん断変形により界面に新たな回位生成を生じること、界面で接するキンクの連携変形が要請されることなどが明らかとなり、その塑性仕事の見積からキンク強化の定量評価が可能であることを示した.微分幾何学に基づき、格子欠陥理論を非線形弾性論へと拡張することで、種々の回位の応力場の精緻な定量評価を可能とした。「キンク強化」を「回位強化」として捉える理論的土壌を構築した.

【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】（期待以上の達成 A+）

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（期待以上の達成 A+）

新規ミルフィーユ構造物質の非 Mg 系金属・セラミックス・高分子系の三大材料にわたる創製を目指した。

① Ti 系合金におけるミルフィーユ組織の形成，およびキンクの部分的な導入により高強度化することが見出された。② MAX 相 Ti_3SiC_2 セラミックスの高温変形挙動から，界面剥離を伴わないキンク変形により靱性が向上し，加工硬化現象の発現が見いだされた。③ ポリエチレン等の結晶性高分子を熱延伸することで結晶層・非晶層からなる巨視的なミルフィーユ型配向構造が形成され，著しく高強度化することが見出された。

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（概ね達成 A）

非 Mg 系金属・セラミックス・高分子系ミルフィーユ物質に対して，汎用塑性加工法・特殊加工法等のプロセス制御によるキンク形成・強化を目指した。

① Al/Ag₂Al, Cu/Nb, Al/Zn, Ni-Co-Cu/Cu 系，結晶性高分子やブロック共重合体，高分子/金属系等のミルフィーユ構造に対する圧延や押し出しによりキンクが形成され，その一部では強化が確認された。② プレス圧延加工後のポリプロピレンが著しく高強度化されることを見いだされ，試料内部組織にはキンク構造類似の形態が観察された。③ ブロック共重合体・液晶等では，キンク形成が必ずしも高強度に結びつかないことも確認された。

(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

1 万°C/sec 以上の冷却速度で凝固させる超急冷技術によりミルフィーユ組織形成技術を確認した。熱処理条件と押し出し加工率の最適化により，動的再結晶粒の生成を抑制したミルフィーユ単相組織材料の創製，および緻密なキンクの導入に成功した。結果として，従来よりも希薄な Mg 合金で十分な強度を実現するとともに，キンク強化分はおよそ 30%に達することを明らかにした（図 A01-1）。

【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

押し出し，鍛造，圧延加工などの塑性加工法に依存せず，ミルフィーユ型 Mg-Y-Zn 合金にキンク導入・強化が可能であることを確認した。プロセス制御により多様なキンク構造・形態を作製した結果，緻密かつ狭隘なキンク分布が強化に効果的であることを見いだした。また，これらキンク組織の導入にはせん断ひずみ制御が有効であることを実証した。本合金系における「加工-組織-特性」の関係は，「せん断ひずみ-キンク数密度-硬度（図 A01-2）」によって表記できた。

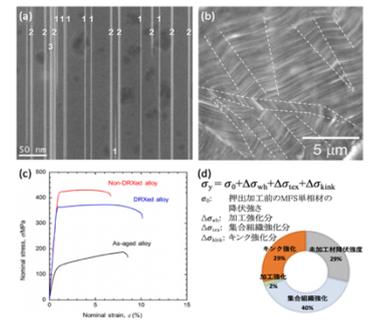


図 A01-1 Mg_{98.8}Zn_{0.4}Y_{1.0} 急冷合金の (a)ミルフィーユ構造, (b)キンク組織, (c)室温引張特性, (d)各強化機構の貢献度の見積。

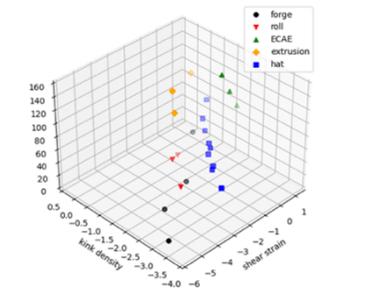


図 A01-2 Mg 合金群のせん断ひずみとキンク数密度と硬度の関係

【A01-公募・安藤】（第一期）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（第二期）ねじり押し出し加工により導入した三次元キンクによる超強化
【A01-公募・唐】 高圧スライド加工によるLPSO型Mg-Y-Zn合金の組織観察とキンク強化

ねじり押し出し加工によりキンク導入を試みたところ，小傾角なキンクが無数に形成され，かつ三次元的にねじれた組織を呈することを確認した。

これらの組織は，圧縮試験において大きな変形能を付与することが分かった（安藤）。高圧スライド加工した Mg-Y-Zn 合金の硬度は，高次塑性加工材と同じく相当塑性ひずみに比例するとともに，せん断ひずみ成分付与に起因し，優れた硬度特性を示すことを解明した（唐）。

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，その妥当性の実験的検証を目的として研究を実施した。Mg 系合金をはじめとする様々なミルフィーユ構造・組織材料を対象に，キンク形成過程の超高速その場観察法を確立するとともに，マイクロピ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。最終的に，新たな強化機構としてのキンク現象の確率，すなわち「一般化ミルフィーユ条件の構築」を実現した。具体的成果として①Mg 合金押し出し材を用いた精緻な力学実験により，キンク強化現象を実証。②極希薄 Mg 合金のミルフィーユ構造単結晶を作製し，キンク界面が従来の転位モデルでは説明できない大きな抵抗を生じていることを実証（図 A02-1 上）。③ミクロ

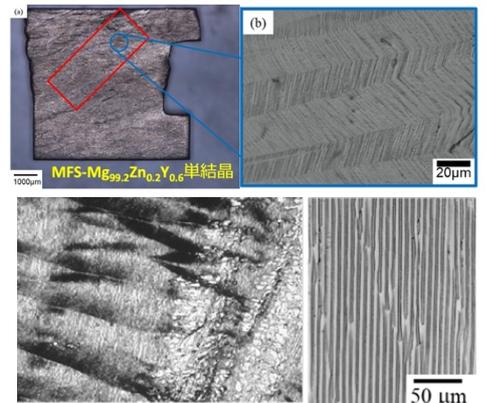


図 A02-1 極希薄ミルフィーユ Mg 単結晶(上部), および Al/Al₂Cu 共晶組織型ミルフィーユ材料に形成されたキンク帯

ンレベルの複相ミルフィーユ組織材料においてもキンク誘導可能なことを, Mg, Al, Ti, Fe 系といった多種多様な合金系で初めて解明(図 A02-1 下). キンク強化のためには, プロジェクト当初に提案した「経験的ミルフィーユ条件」に加えて, 「キンク帯形成を均一微細に誘導する方策の付与」がキンク強化発現に必須であることを明らかにした. 具体的には, キンク帯を形成する結晶粒形状制御, キンク帯形成の起点となるような応力集中部を意図的に材料内に分散することが有効となる.

- 【A02-公募・多根】(第一期) 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
(第二期) 構造・組織型 MFS 材料における弾性不均質性とそれに起因した応力・ひずみ分配
- 【A02-公募・鈴木】(第一期) GN転位列による強化因子とキンク界面の易動度制御
(第二期) 曲げ変形を受けた LPSO 型 Mg 一方向凝固材中のキンク帯の組織的応答
- 【A02-公募・増田】(第一期) 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
(第二期) 高対称性セラミックスにおけるキンク形成機構の深化と展開
- 【A02-公募・白岩】 Rank-1 接続に基づくキンク変形ダイナミクスの解明
- 【A02-公募・高木】 高温強度に対するキンク変形帯の役割とその強化メカニズムの解明

組織型ミルフィーユ構造を有するMg系およびAl系共晶合金における硬質層/軟質層間の弾性率ミスマッチ, 各層における応力・ひずみ分配挙動を明らかにし, 力学特性への影響を考察した(多根). LPSO合金への逆応力負荷によりキンク界面の回転角が低下すること, その際界面が僅かに可逆運動することを明らかにした(鈴木). 立方晶構造をもつセラミックス群の塑性変形挙動をマイクロ力学試験により評価し, 多重すべり方位ではキンク変形を許容しうるほどの優れた塑性変形能を示すことを明らかにした(増田). AEとRank-1接続の融合解析により, LPSO-Mg合金におけるキンク生成は高速に発生し, 相互作用して後続のキンク生成に影響を及ぼすことを明らかにした(白岩). キンク帯を有するLPSO合金において, 低変形速度領域では250°Cでクリープ変形が抑制されることを明らかにした(高木).

【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

室温にて大変形(歪み 10%を超える圧縮変形)した MFS 型 Mg 合金の原子分解能 STEM 観察から, キンク界面近傍に extrinsic 型の積層欠陥を伴う a+c 型転位(Frank 部分転位)がしばしば観察され, さらにキンク界面には溶質原子の顕著な偏析が確認された(図 A02-2). 分子動力学シミュレーションの結果と併せて, キンク界面原子数層におけるわずかな構造乱れ域に沿って, c 成分を含む dipole 転位が逐次生成させて, 層間はく離(微視的破壊)を防ぎながら界面移動が実現されるという, 極めて興味深い原子レベルでのメカニズムが明らかとなった. すなわち, キンク界面は塑性変形に対する抗力としての働きだけではなく, 塑性変形を担う塑性子としての働きも有することが判明した. Mg 合金中のキンク界面は, 変形に対する障壁としての静的界面効果のみならず, 微視的破壊を回避するキンク界面の動的な特性も大きく寄与している. キンク強化現象は, 通常粒界には発現しない特異な界面高機能により, 当初の予測を超えてさらに新しい可能性を感じさせる展開となった.

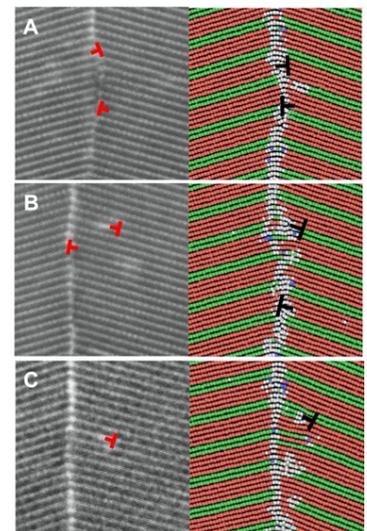


図 A02-2 キンク界面の STEM 原子像(左)と分子動力学シミュレーション(右).

- 【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
- 【A02-公募・木村耕治】(第一期) 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
(第二期) 原子分解能ホログラフィーに基づくミルフィーユ構造形成過程の3次元可視化
- 【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
- 【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合金中キンク変形挙動の解明
- 【A02-公募・佐藤】 ナノ電子プローブ分光法によるミルフィーユ型 Mg 合金の電子構造の解明
- 【A02-公募・江草】 In-situ SEM 観察による高温変形下でのキンク形成過程の解明
- 【A02-公募・宮崎】 化学状態分析による LPSO 型合金の局所クラスター構造形成メカニズムの解明

[MFS 型希薄 Mg 合金中の溶質 co-cluster の原子構造・電子状態の解明]: 放射光(宮澤, 木村耕治, 西堀, 木村滋, 宮崎)と電子ナノプローブ(佐藤, 江草)により, 主に Mg 合金中の原子クラスターに関する解析が実施された. 特に, 極希薄 MFS 型 Mg-Zn-Y 合金における解析では, STEM 直接観察と蛍光 X 線ホログラフィーの相補的利用による高精度構造解析から L1₂ 型の対称性を破る低対称クラスターとなっていることを見いだされ, さらに計算科学と連携した電子状態の総合的な解析からブリルアンゾーン-フェルミ面の共鳴効果がミルフィーユ構造安定性に大きく寄与していることが判明した. 様々な最先端計測法が一同に会する, 新学術領域研究ならではの大型共同研究から, 極めて興味深い結果を得ることが出来た.

【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

ミルフィーユ構造(MFS)特有の硬質・軟質層状構造のキンク形成・強化のメカニズムを明らかにするため、先端の計算力学モデリングにより金属系、セラミックス系、高分子系の MFS におけるキンク形成過程を微視的・巨視的にモデル化し、キンク形成から強化に至る因子の解明を進めた。主な成果は以下である。①キンク形成の起点となる波打ち不安定の発現は多層構造の弾性座屈に起因するものであり、種々の MFS に共通して見られる。②Mg 基 LPSO 合金におけるキンク界面はせん断応力下で移動可能であり、キンク界面に沿った局所すべりがキンク強化機構の鍵となる。③キンク強化は結晶方位強化、欠陥強化、近接強化の 3 要素の複合的な結果として発現し、その寸法効果はキンク幅の 1/2 乗の逆数により定量的に評価できる。④圧縮時におけるキンク形成は、層界面と平行なすべり面を持つ変形機構の活動、または複数の変形機構の足し合わせとして層界面と平行なすべりと等価なせん断変形が生じることで進行する。

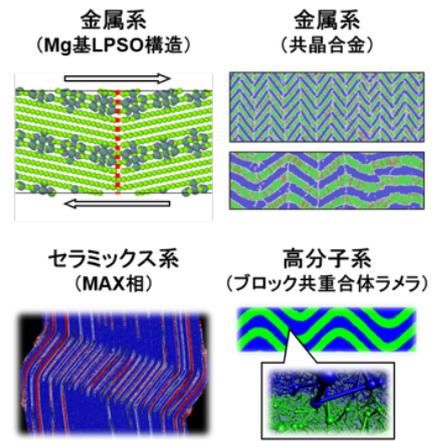


図 A02-3 金属系・セラミックス系・高分子系 MFS におけるキンクの微視的モデル

- [A02-公募・眞山] (第一期) 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
(第二期) 層状構造体における塑性異方性と相配置に起因するキンク形成機構の統一的理解
[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
[A02-公募・奥村] 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
[A02-公募・萩田] キンク強化が期待される結晶性高分子材料の分子論的解明

Mg 合金・新規 MFS 合金系を対象とした結晶塑性解析により、軟質層と硬質層がせん断変形と剛体回転をそれぞれ主に担うことによりキンク形成を生じることを解明した(眞山)。第一原理計算により LPSO 型 Mg 合金のフォノン状態を解析し、クラスターの局所的剛性による変化を明らかにした(松中)。層状粘土鉱物のキンク形成から破壊・剥離に至る過程の原子レベルの機構を明らかにした(奥村)。結晶性高分子材料のナノ組織形成と強化の関係を再現する大規模分子動力学シミュレーションを実現し、熱延伸に伴う強化機構を分子論的に解明した(萩田)。

A03 班「ミルフィーユ構造のキンク理論構築」の主な研究成果

【A03-1】異分野融合によるキンク形成・強化の理論構築

結晶幾何学に基づき、キンク形成時はキンク-母相間の変位連続性担保を条件として、回位の生成が不可避となることを理論的に導いた。回位の存在は、高精度実験によるフランクベクトル定量解析により実証された(図 A03-1a,b)。微分幾何学に基づき、転位論・回位論を統一する結晶欠陥理論の体系化を行い、上述の結果ともよく一致することを示した(図 A03-1c)。キンク強化の観点では、回位の弾性応力場の寄与に加え、後続変形に伴う新たな回位発生によるエネルギー上昇が変形抵抗として働くことを導いた(図 A03-1d)。力学試験によるキンク変形の活性化体積見積もりから、室温におけるキンク変形進行時にポルトヴァンールシャトリエ効果が発現するという特異現象を見出した。

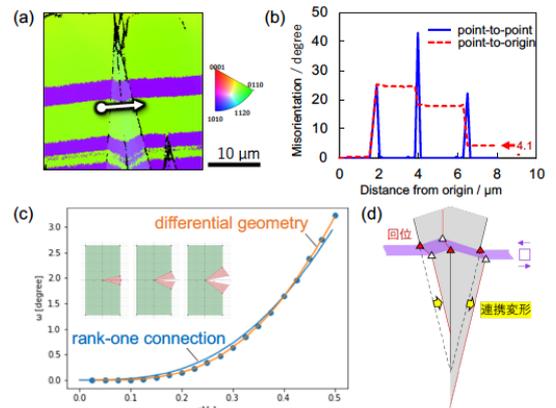


図 A03-1 キンク形成に伴う回位生成とキンク強化への寄与

- [A03-公募・長濱] (第一期) 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
(第二期) 微分幾何学的アプローチによるキンク褶曲形成理論とキンク強化理論
[A03-公募・CESANA] (第一期) Mesoscale modeling for disclinations toward a theory for kink and materials strengthening
(第二期) Understanding strengthening in mille-feuille structures via mesoscale modeling of structural and material instabilities
[A03-公募・山崎和仁] 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

層状鉱物である黒雲母単結晶の変形実験により、キンクが形成され強度上昇することを見いだした。非リーマン幾何学に基づく変形体解析により、キンクは内部回転勾配を支配因子とする変形であり、数学的回転則に適合する拘束変形であることを明らかにした(長濱)。転位と回位をマルチスケールで扱える数学的理論を構築し、ひずみ勾配最小化原理に基づく有限要素法解析により、種々の形態を有するキンク形成を再現するとともに、キンク内に発生する局所ひずみの定量化に成功した(Cesana)。微分幾何学に基づき、回位場の解析を不適合度が存在する場合にまで拡張し、回位として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、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ことを示した(山崎)。

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 班】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

新規ミルフィーユ構造物質が非 Mg 系金属・高分子系・セラミックスにおいて創製され、高強度化する材料が多く見出された。金属では、Ti-Mo 合金に冷間圧延+熱処理によるミルフィーユ組織の形成、さらなる圧延加工でキंक帯が形成され強度が上昇した。特筆すべき成果は、ポリエチレンをはじめとする結晶性高分子材料の多くが熱延伸プロセスによって著しく強化される現象が見いだされたことである(図 A04-1)。連携研究による X 線小角散乱, 電子顕微鏡観察等の構造解析から, キंक構造ではなく, 結晶ラメラのナノ構造化が強化を実現していることを突きとめた。さらに大規模分子動力学計算(他班公募連携)により, ナノ構造化に伴い増加する tie-chain によって強度上昇する分子レベルの機構を見いだすに至った。

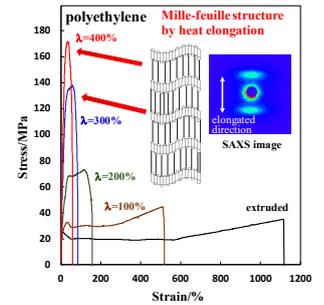


図 A04-1 熱延伸ポリエチレンのミルフィーユ構造による強化

- [A04-公募・石川] (第一期) 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
(第二期) BCC 基ミルフィーユ型共晶合金におけるキंक形成クライテリア
- [A04-公募・池田] (第一期) 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
(第二期) 配向制御した MAX 相セラミックスのキंक強化機構の解明
- [A04-公募・吉田] (第一期) 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
(第二期) ミルフィーユ構造セラミックスにおけるキंक形成機構解明と力学特性向上
- [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
- [A04-公募・上路] キंक強化を利用したパーライト鋼の高温変形抵抗向上
- [A04-公募・森田] MAX 相セラミックスの力学特性の原理解明とキंक組織制御に向けた研究

Nb/TiNi 系 bcc 金属-B2 化合物系共晶ラメラ合金のキंक形成・強化を確認した。キंक以外の強化因子を分離する組織学的手法を提案し, キंक強化量の定量評価を試みた(石川)。配向成形 MAX セラミックス相 Ti_3SiC_2 ミルフィーユ組織の高温伸長中に, 界面剥離が抑制された協調的なキंक変形により加工硬化現象が発現することが見いだされた(池田)。通電支援プロセスにより, 層間隔がサブミクロンの微細な異方性複相構造を持つ $MgAl_2O_4-ZrO_2$, $Al_2O_3-GdAlO_3$ 系セラミックスを製造し, キंक形成により室温延性の改善が見込めるセラミックスを発見した(吉田)。Fe-C 共析パーライト組織の圧縮変形挙動について, キंक変形の特徴を定量的に評価した(中田)。Fe-C パーライトのキंक形成が巨視的な変形挙動へ与える影響を明らかにした(上路)。MAX 相のキंक強化を, キंक近傍のナノインデントによる硬さ計測により調査した(森田)。

【A04-2 班】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

新規金属系では Al/Ag₂Al 系, Cu/Nb 系ミルフィーユ構造体, 高分子系ではブロックコポリマー, 多層フィルム系, PP 等結晶ポリマーにおいて加工プロセスによるキंक構造導入を確認した。ポリプロピレンに対し高圧プレスを行うことで, 引張試験時の応力-ひずみ挙動が系統的に変化し, 高圧印加では高い破断強度を示すことが明らかとなった(図 A04-2)。高強度を示した試料は小角 X 線散乱 (SAXS) が 4 点スポットを呈し, 内部構造を TEM 観察したところ結晶ラメラの折れ曲がり (キंक) 形状が頻繁に観察されることが判明した。高分子材料のキंक強化現象を示唆する初めての結果を得た。

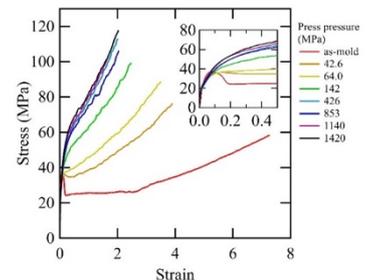


図 A04-2 PP の様々な圧力下での塑性加工後の応力-ひずみ挙動

- [A04-公募・戸木田] (第一期) ミ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
(第二期) 液晶性高分子が形成する単一ドメインミルフィーユ構造へのキंक導入と力学物性
- [A04-公募・櫻井] (第一期) 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
(第二期) ミルフィーユ構造を形成する種々の高分子材料の多軸伸長によるキंक形成と材料強化
- [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
- [A04-公募・斎藤礼子] 有機高分子/シリカノ複合体によるのミルフィーユ構造体創製
- [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

スメクチック層から成る液晶性高分子を延伸することでラメラ層が微細分断されたミルフィーユ構造が形成され, 高強度化されることを明らかにした(戸木田)。ブロック共重合体 SBS を対象に, 引張試験と2次元小角 X 線散乱 (SAXS) の同時測定を行い, ネッキング領域でキंकが形成されることを明らかとした(櫻井)。有機/無機ナノ粒子交互積層構造体でサブミクロン・ミルフィーユ構造を作製し, 繰り返し圧縮・緩和過程によるキंक状構造の形成を確認した(藤森)。ラメラ型ブロック共重合体の一方のドメインを架橋・シリカ化したミルフィーユ構造体を作製し, 延伸によるキंक状構造の形成と強化可能性を示唆した(斎藤礼子)。ブロック共重合体 SBS をひずみ 30%をかけて圧縮させることでキंक状変形領域が形成され, せん断応力が増加するキंक強化現象を見いだした(瀧)。

7 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、一般向けアウトリーチ活動等の状況。令和5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7-1に示す通り、学術論文の総数は448編であり、その内、ミルフィーユ構造・キンクに直接関連する謝辞あり論文が292編、間接論文が156編の成果論文報告がなされた。本領域研究では、「深化」と「展開」を意識して研究を進めてきた。材料別に見ると(図7-1)、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%、「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年度以降「展開」に資する論文の割合が着実に増加しており(第2年度以降平均57%、各年は60%、61%、55%、53%)、着実に3大材料への展開がなされた。また、キンク強化理論構築に資する論文も後半に向けて増加した(第2年度以降平均9%、各年は5%、6%、10%、14%)。
- ② 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46%、国内・国際学会発表の46%・43%にのぼり、分野融合が着実に進められた。

表7-1 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)	292 編	班内連携: 33%, 他班連携 28%, 融合論文 41%
	間接関連論文	156 編	班内連携: 24%, 他班連携 10%, 融合論文 28%
解説・総説		45 編	班内連携:18%, 他班連携 18%, 融合論文 27%
著書		16 編	-
基調・招待講演	国際	152 件	-
	国内	201 件	-
学会発表	国際	398 件	班内連携: 35%, 他班連携 18%
	国内	1034 件	班内連携: 37%, 他班連携 17%
受賞		139 件	-
特許		5 件	-

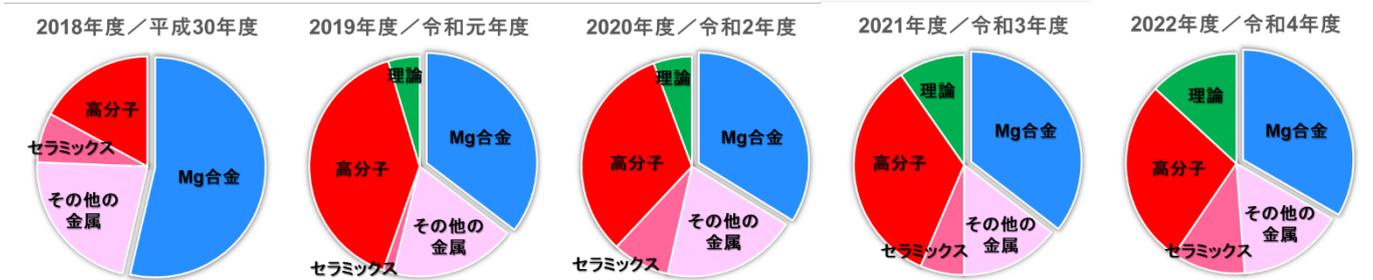


図7-1 公表された学術論文が扱う三大材料(金属, セラミックス, 高分子)および理論の割合

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5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 448 編, うち謝辞の含まれるもの 292 編. 以下研究グループごとに主要なもののみ示す)

【A01-1】

- [1] 【連携】“Nanoclusters in stacking faults in Mg-Y-Zn alloys examined by small-angle X-ray scattering and extended X-ray absorption fine structure analysis”, *H. Okuda, K. Kintsu, S. Kurokawa, M. Tabuchi, H. Nitani, H. Kimizuka, S. Inoue, M. Yamasaki, Y. Kawamura, *Acta Materialia*, 253, (2023), 118963.
- [2] 【連携・若手】“Strengthening of α Mg and long-period stacking ordered phases in a Mg-Zn-Y alloy by hot-extrusion with low extrusion ratio”, *S. Harjo, W. Gong, K. Aizawa, T. Kawasaki, M. Yamasaki, *Acta Materialia*, 255, (2023), 119029.
- [3] 【若手*】“Kink bands and strengthening of millefeuille-structured magnesium alloys by cluster-arranged nanoplates (CANaPs): The case of Mg-0.4Zn-1.0Y alloy”, *Y. Kawamura, H. Yamagata, S. Inoue, T. Kiguchi, K. Chattopadhyay, *Journal of Alloys and Compounds*, 939, (2023), 168607.
- [4] 【若手*】“Effect of hierarchical multimodal microstructure evolution on tensile properties and fracture toughness of rapidly solidified Mg-Zn-Y-Al alloys with LPSO phase”, S. Nishimoto, Y. Koguchi, *M. Yamasaki, Y. Kawamura, *Materials Science and Engineering A*, 832, (2022), 142348.
- [5] 【連携・国際・若手*】“Formation of $\langle 0001 \rangle$ -rotation-type kink boundary in Mg-Zn-Y alloy with long-period stacking ordered structure”, *M. Yamasaki, T. Mayama, T. Masumoto, K. Hagihara, D. Drozdenko, Y. Kawamura, *Materials Science and Engineering A*, 819, (2021), 141466.

【A01-2】

- [6] 【若手】“Microstructure evolution and local hardness of Mg-Y-Zn alloys processed by ECAE”, *M. Yuasa, R. Sato, T. Hoshino, D. Ando, Y. Todaka, H. Miyamoto, H. Somekawa, *Materials Transactions*, 64, (2023), 730-734.
- [7] 【若手】“Predominant factor for effectively forming kink boundaries in Mg-Y-Zn alloy through wrought-process”, *H. Somekawa, M. Yuasa, D. Ando, Y. Todaka, *Materials Science and Engineering A*, 858, (2022), 144168.
- [8] “Compression Temperature to Activate Kinking in Pearlitic Steel”, *R. Ueji, H. Somekawa, T. Inoue, T. Hara, *Materials Science and Engineering A*, 857, (2022), 144018.
- [9] 【連携・若手】“Intrinsic kink bands strengthening induced by several wrought-processes in Mg-Y-Zn alloys containing LPSO phase”, *H. Somekawa, D. Ando, K. Hagihara, M. Yamasaki, Y. Kawamura, *Materials Characterization*, 179, (2021), 111348.
- [10] 【連携・若手】“Grain boundary plasticity in solid solution Mg-Li alloy”, *H. Somekawa, D. Egusa, E. Abe, *Materials Science and Engineering A*, 790, (2020), 139705.

【A02-1】

- [11] 【若手】“Mechanical properties and failure mechanisms of Mg-Zn-Y alloys with different extrusion ratio and LPSO volume fraction”, *W. Yin, F. Briffod, T. Shiraiwa, M. Enoki, *Journal of Magnesium and Alloys*, 10, (2022), 2158-2172.
- [12] 【連携・若手】“Microstructural factors governing the significant strengthening of Al/Al₂Cu mille-feuille structured alloys. accompanied by kink-band formation”, *K. Hagihara, T. Tokunaga, S. Ohsawa, S. Uemichi, K. Guan, D. Egusa, E. Abe, *International Journal of Plasticity*, 158, (2022), 103419.
- [13] 【連携】“Quantitative estimation of kink-band strengthening in an Mg-Zn-Y single crystal with LPSO nanoplates”, *K. Hagihara, R. Ueyama, T. Tokunaga, M. Yamasaki, Y. Kawamura, T. Nakano, *Materials Research Letters*, 9, (2021), 467 - 474.
- [14] 【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.
- [15] “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.

【A02-2】

- [16] 【連携・若手】“Short-range order clusters in the long-period stacking/order phases with an intrinsic-I type stacking fault in Mg-Co- Y alloys”, K. Guan, M. Egami, *D. Egusa, H. Kimizuka, M. Yamasaki, Y. Kawamura, *E. Abe, *Scripta Materialia*, 207, (2022), 114282.
- [17] 【若手*】“Electron tomography: An imaging method for materials deformation dynamics”, *S. Hata, T. Honda, H. Saito, M. Mitsuhashi, M. Murayama, *Current Opinion in Solid State & Materials Science*, 24, 4, (2020), 100850.
- [18] 【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. Máthis, D. Drozdenko, G. Németh, S. Harjo, W. Gong, K. Aizawa, M. Yamasaki, Y. Kawamura, *Materials Transactions*, 61, 5, (2019), 828-832.
- [19] 【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.
- [20] 【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, T. Matsushita, K. Hayashi, *Materialia*, 3, (2018), 256-259.

【A02-3】

- [21] 【若手*】“Asymmetry in core structure and mobility of basal dislocations in a Ti₃SiC₂ MAX phase: An atomistic study with machine-learned force fields”, *R. Hossain, *H. Kimizuka, S. Ogata, *Physical Review Materials*, 7, (2023), 053608.
- [22] “Numerical investigation of kink strengthening mechanism due to kink band in long-period stacking ordered magnesium alloy”, *Y. Tadano, *Materials Transactions*, 64, (2023), 1002-1010.
- [23] 【連携・国際】“ α -Mg/LPSO (Long-Period Stacking Ordered) phase interfaces as obstacles against dislocation slip in as-cast Mg-Zn-Y alloys”, *T. Mayama, S. R. Agnew, K. Hagihara, K. Kamura, K. Shiraiishi, M. Yamasaki, Y. Kawamura, *International Journal of Plasticity*, 154, (2022), 103294.

- [24] 【若手*】“Core structure and Peierls barrier of basal edge dislocations in Ti_3AlC_2 MAX phase”, *R. Hossain, *H. Kimizuka, Y. Shihara, S. Ogata, *Computational Materials Science*, 209, (2022), 111366.
- [25] 【連携・若手】“Density functional theory study of solute cluster growth processes in Mg-Y-Zn LPSO alloys”, *M. Itakura, M. Yamaguchi, D. Egusa, E. Abe, *Acta Materialia*, 203, (2021), 116491.

【A03-1】

- [26] 【若手*】“Role of disclinations around kink bands on deformation behavior in Mg-Zn-Y alloys with a long period stacking ordered phase”, *T. Tokuzumi, M. Mitsuhashi, S. Yamasaki, T. Inamura, T. Fujii, H. Nakashima, *Acta Materialia*, 248, (2023), 118785.
- [27] 【国際・若手*】“Elastoplastic Deformations of Layered Structures”, D. Drozdenko, M. Knappek, M. Kruzik, *K. Mathis, K. Svadlenka, J. Valdman, *Milan Journal of Mathematics*, 90, (2022), 691-706.
- [28] 【若手*】“Weitzenböck 多様体によるらせん転位のモデル化と数値解析”, *小林舜典 垂水竜一, *日本機械学会論文集*, 87, (2021), 20-00409.
- [29] “Duality of the incompatibility tensor”, *K. Yamasaki, T. Hasebe, *Materials Transactions*, 61 (2020), 875-877.
- [30] “Geometry of kink microstructure by rank-1 connection”, *T. Inamura, *Acta Materialia*, 173, (2019), 270-280.

【A04-1】

- [31] 【若手*】“Fabrication of Textured Porous Ti_3SiC_2 by Slip Casting under High Magnetic Field and Microstructural Evolution through High Temperature Deformation”, N. Hashimoto, *K. Ikeda, S. Miura, K. Morita, T. S. Suzuki, Y. Sakka, *Materials Transactions*, 63, 2, (2022), 133-140.
- [32] 【連携】“Elastic isotropy originating from heterogeneous interlayer elastic deformation in a Ti_3SiC_2 MAX phase with a nanolayered crystal structure”, R. Liu, *M. Tane, H. Kimizuka, Y. Shirakami, K. Ikeda, S. Miura, K. Morita, T. S. Suzuki, Y. Sakka, L. Zhang, T. Sekino, *Journal of the European Ceramic Society*, 41, 4, 8, (2021), 2278-2289.
- [33] 【連携・若手*】“Strengthening of mille-feuille structured high-density polyethylene by heat elongation”, T. Murayama, E. Abe, *H. Saito, *Polymer*, 236, (2021), 124343.
- [34] “Introduction of mille-feuille-like α/β layered structure into Ti-Mo alloy”, *S. Emura, X. Ji, *Materials Transactions*, 61, 5, (2020), 856-861.
- [35] “Fabrication of honeycomb films by the breath figure technique and their applications”, *H. Yabu, *Science and Technology of Advanced Materials*, 19, 1, (2018), 802-822.

【A04-2】

- [36] 【若手*】“Effects of High-Pressure Press on the Tensile Properties and Morphology of Polypropylene”, *S. Nishitsuji, Y. Ito, M. Ishikawa, H. Sano, T. Inoue, H. Ito, *Materials Transactions*, 64, 4, (2022).
- [37] 【国際】“Rheological Behavior and Dynamic Mechanical Properties for Interpretation of Layer Adhesion in FDM 3D Printing”, *S. Thumsorn, W. Prasong, T. Kurose, A. Ishigami, Y. Kobayashi, *H. Ito, *Polymers*, 14, 13, (2022), 2721.
- [38] 【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, 4, (2020), 801-804.
- [39] 【若手*】“Correlation between thermal diffusivity and long period in thermotropic liquid crystalline polyesters”, S. Yamazaki, *M. Tokita, *Macromolecules*, 52, 24, (2019), 9781-9785.
- [40] 【若手*】“Hybrid UV LED device for simulating spectrum of high-pressure mercury lamp: Evaluation in UV curing process”, *K. Taki, K. Sawa, *Journal of Photopolymer Science and Technology*, 31, (2018), 753-757.

3) 国内・国際学会発表 (総数 1085 件, 基調・招待講演含まず: 詳細省略)

4) 基調講演・招待講演 (総数 353 件, 以下主要なもののみ示す)

- [1] 【招待講演・若手*発表・連携】“Controlling factor of the strengthening of mille-feuille structured alloys accompanied by kink-band formation”, *T. Tokunaga, K. Hagihara, S. Ohsawa, S. Uemichi, D. Egusa, E. Abe, International Conference on Plasticity, Damage, and Fracture 2023, Dominican republic, 2023.1.3.
- [2] 【基調講演】“Mille-Feuille Structured Alloys/Ceramics/Polymers”, E. Abe, The 5th International Symposium on Long-Period Stacking/Order and Mille-feuille Structures (LPSO/MFS 2022), Shinagawa, Japan, 2022.12.12.
- [3] 【基調講演】“New Concept for Mechanical Strengthening for Polymers Prepared and Controlled by Millefeuille Structure and Kink Deformation”, *H. Ito, Y. Watanabe, K. Kano, A. Ishigami, S. Nishitsuji The 16th Asian Textile Conference (ATC-16), On-line, 2022.7.27
- [4] 【招待講演】“Mille-Feuille-like layered alpha/beta Structure in Ti-Mo alloy”, *S. Emura, X. Ji, International Conference on Processing & Manufacturing of Advanced Materials, Processing, Fabrication, Properties, Applications, THERMEC'2021, On-line, 2021.6.1.
- [5] 【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.
- [6] 【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.
- [7] 【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.
- [8] 【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.
- [9] 【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.
- [10] 【招待講演】“Dislocation-based modeling and isogeometric analysis for kink deformation”, R. Tarumi, The 4th Russia-Japan International Seminar on Advanced Materials (RJISAM-IV), Kumamoto, Japan, 2018.12.6.

5) 解説, 総説 (総数 45 件, 以下主要なもののみ示す)

- [1] “ミルフィーユ構造を有する高密度ポリエチレンの高強度化メカニズム”, 斎藤拓, まてりあ, 61 (2022) 569-571.
- [2] “材料多様体のマルチスケールメカニクス”, 垂水竜一, 材料, 71 (2022) 654-659.
- [3] “高分子系ミルフィーユ構造のキंक制御と材料創製”, 石神明, 伊藤浩志, 高分子, 71 (2022) 69-70.
- [4] “パルス中性子回折による金属組織観察”, ステファヌス ハルヨ, 金属, 91 (2021) 221-227.
- [5] “電子線が拓く結晶学の未来”, *阿部英司, 日本結晶学会誌, 62, 4, (2020), 248-252.
- [6] “マグネシウム合金における溶質ガラス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.
- [7] “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.

6) 書籍 (総数 16 件, 以下主要なもののみ示す.)

- [1] “Variational Approach to Hyperbolic Free Boundary Problems”, S. Omata, K. Svadlenka, E. Ginder, Springer, 2022 Total pages: 94.
- [2] “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.
- [3] “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, ポリマーの強靱化技術最前線, 株式会社エヌ・ティー・エス, (2020) pp.169-176.

7) 受賞(総数 139 件, うち若手研究者の受賞 20 件, 学生の受賞 74 件. 以下主要なもののみ示す)

- [1] 一般社団法人日本機械学会 計算力学部門業績賞, 只野裕一, 2022.11.16.
- [2] 一般社団法人日本マグネシウム協会 奨励賞, 江草大佑(A02 公募), 2022.6.13.
- [3] 一般社団法人日本機械学会 論文賞, “Weitzenböck 多様体によるらせん転位のモデル化と数値解析”, 小林舜典, 垂水竜一(指導学生の受賞), 2022.3.4.
- [4] 文部科学大臣表彰 若手科学者賞, 安藤大輔(A02 公募), 2021.4.19.
- [5] 一般社団法人繊維学会 学会賞, 伊藤浩志, 2020.6.10.
- [6] 一般社団法人軽金属学会 功績賞, 河村能人, 2020.5.22.
- [7] 公益社団法人日本顕微鏡学会 瀬藤賞(学会賞), 波多總, 2020.5.
- [8] 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.
- [9] 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.
- [10] 日本金属学会功績賞, 池田賢一(A04 公募), 2019.3.20.

8) 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)
- [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, 斎藤拓, 阿部英司.

9) 報道など (総数 16 件, うち新聞発表 9 件, TV 番組 4 件, 以下主要なもののみ示す)

- [1] 【新聞】熊本大と阪大、亜鉛添加でマグネシウム合金の強度向上に成功, 日刊工業新聞, 2021.4.1.
- [2] 【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.
- [3] 【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.
- [4] 【TV】Science View, The Leading Edge: A New Magnesium Alloy Developed in Japan – Light, Strong, and Flame-Resistant! NHK WORLD, 2018.10.3.

(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/>

・ニュースレターの刊行(冊子&電子版)

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

2019年2月より年2回刊行(全9刊)



2) 論文特集号の刊行・学術書出版

- [1] Materials Transactions, Vol.64, (2023) “Kink-Strengthening of Mille-Feuille Structured Materials” (16 編収録)
- [2] まてりあ, Vol. 61, No.9 (2022), 「ミルフィーユ材料における多様なキंक現象」(7 編収録)
- [3] Materials Transactions, Vol.61, (2020), “Materials Science on Mille-Feuille Structure” (9 編収録)

学術書: “LPOS/MFS Structured Mg Alloys -unique structure and kink deformation” Ed. E. Abe and Y. Kawamura, Springer より, 本領域研究の成果報告課題 (23H05415)として冊子+Open Access にて出版予定 (2023 年 12 月).

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 21 件、7 分野にて開催)

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
	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	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
	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	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	企画
	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	オンライン開催	企画
	R3.3.21	日本物理学会 第 76 回年次大会 共催シンポジウム	オンライン開催	企画
R3	R3.5.15-16	軽金属学会 第 130 回春期大会 テーマセッション	オンライン開催	企画
	R3.9.14-17	日本金属学会 第 169 回秋期講演大会 公募シンポジウム	オンライン開催	企画
R4	R4.5.27-29	軽金属学会 第 142 回春期大会 テーマセッション	大阪大学・大阪	企画
	R4.9.20-23	日本金属学会 第 171 回秋期講演大会 公募シンポジウム	福岡工業大学・福岡	企画
R5	R5.6.27	高分子学会 高分子ナノテクノロジー研究会	オンライン開催	企画

4) 国際交流を目指した国際会議など (総数 12 件、うち主催 6 件、協賛 2 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	R2.5.31-6.5	International Conference on Processing & Manufacturing of Advanced Materials (THERMEC2020)	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
R3	R3.6.1-6.5	International Conference on Processing & Manufacturing of Advanced Materials (THERMEC2021)	Online	企画
	R3.6.15-6.18	12th International Conference on Magnesium Alloys and their Applications (Mg 2021)	Online	企画
	R4.3.2	MFS mini-workshop	Shinagawa, Japan (Hybrid)	主催
R4	R4.12.11-12.14	5th International Symposium on Long Stacking/Order and Millefeuille Structures (LPSO/MFS 2022)	Shinagawa, Japan	主催

5) 産学官交流を目指した研究会など (総数 11 件、詳細省略)

(3) 一般向けアウトリーチ活動 (総数 36 件、以下主要なもののみ示す)

- [1] 一般向け公開講座(化学物質評価研究機構寄付講座), 東京工業大学蔵前会館, 2023.1.28.
- [2] 高校生向け授業と引張試験の実演, 滋賀県立虎姫高等学校, 2022.12.8.
- [3] 九州大学未来創生科学者育成プロジェクトにおける講義と実験実習, 九州大学伊都キャンパス, 2021 年度
- [4] 広報パンフレット(NIMS Now 2021-No.6), 物質・材料研究機構, 2021.12
- [5] スーパーサイエンスハイスクール授業, 九州大学, 2020.10.6 ~ 2020.11.20
- [6] 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.
- [7] 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.
- [8] 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.
- [9] 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.
- [10] 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.
- [11] 一般向け講演会, 大阪市立大学・大阪産業創造館, 2019.1.21.
- [12] 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.
- [13] 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.
- [14] 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.

8 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 8-1)。これに公募研究47件(第一期24件, 第二期23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。

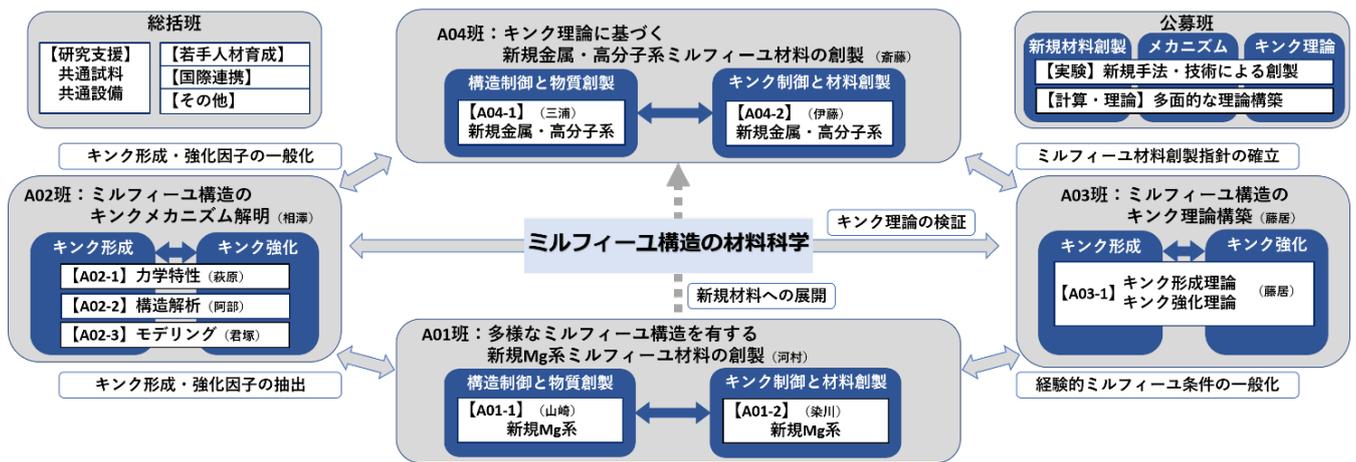


図 8-1

【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4件(多様な純金属積層構造制御, ねじり・スライド加工プロセス:連携は 14 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22件(力学解析系8件, 精密構造解析系8件, 計算・モデリング系6件:連携は 14-16 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5件(地層褶曲, 数値モデリング:連携は 16 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16件(新規金属系4件, セラミックス系5件, 高分子系7件:連携は 17 ページ参照)

9 研究費の使用状況

研究領域全体を通じ、研究費の使用状況や効果的使用の工夫、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2頁以内で記述すること。また、領域設定期間最終年度の繰越しが承認された計画研究（総括班・国際活動支援班を含む。）がある場合は、その内容を記述すること。

(1) 研究費の使用状況や効果的使用の工夫

【領域全体予算・総括班予算の内訳】 本領域5年間の領域全体予算内訳は、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であり、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を可能とした。

総括班の予算内訳は、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。

表 領域の予算使用状況および使用計画 (千円)

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・各部会の予算使用状況・工夫点】

① 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し、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した。

・領域内報告書出版経費(700千円/年)

各年の合宿研究会（秋）・年度末報告会（春）では、計画研究・公募研究のメンバー全員が提出する進捗報告書を冊子として配布した。論文になる前の段階の、最新データの領域内共有に大きく役だった。評価員先生方への同冊子の事前配布は、内容の事前把握に役立つと大変好評であった。

・総括班事務補佐員雇用(2,000千円/年・1人)

事務業務の効率的な運営のため、本部事務局（九大）、東京事務局（東大）にて事務補佐員を雇用。

・公募説明会会場使用料(300千円/2018年度)

公募研究への応募促進へ向けて、主要都市駅（東京、大阪、仙台、等）近くの会議室を借りて説明会を実施した。効果は大きく、公募研究は多数の応募を得た。

・Zoomライセンス配布(1,300千円:2020年度-2022年度(3年度分))

コロナ禍の兆しが見え始めた2019年度末、直ちに領域メンバー全員に対して所属機関におけるZoomライセンス有無を問うアンケートを実施し、ライセンスを持たないメンバーには総括班経費にてライセンス配布した。コロナ禍における研究活動推進に大きく役だった。

・クラウドライセンス(500千円:2020年度-2022年度(3年度分))

総括班会議や各種部会の打ち合わせ等、全ての会議がオンラインになった時期、資料の準備・共有を効率的に行うためクラウド（Dropbox）を使用した。ペーパーレスが促進されるとともに、領域内共同研究の際のデータ共有にも有効に活用された。

② 領域交流推進部会

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交流を促した。また、各種学協会等で本領域主催のシンポジウムや特別セッションを開催、異分野交流を促進した。

・ハイブリッド会議用オンライン機器(1,800千円:2020年度-2021年度)

本領域が主催する学会セミナー等、完全対面開催が難しい時期はオンライン・対面ハイブリッド形式にて実施するための機材を購入した。本機器群は、領域成果報告会、国際ワークショップ、国際会議などのハイブリッド開催にも用いられ、十分なパフォーマンスを発揮した。

③ 研究活動支援部会

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。

・共通試料の作製・配布(3,500千円/年)

本領域研究の大きな特徴の1つである「共通試料の配布による各種データ確度の担保」に伴う経費であり、総括班・当該部会の活動として共通試料の作製・配布を行った。領域研究開始当初は主に

Mg合金の作製配布であったが、中盤からポリエチレン系高分子試料、MAX系セラミックス試料の作製・配布も行われ、力学計測、構造解析などの連携研究を大きく後押し・加速することができた。

・技術補佐員の雇用(7,400 千円/年)

共通試料の1つに「LPSO型/MFS型Mg合金の単結晶」がある。本試料は、一方向凝固装置を用いて数日をかけて成長させる必要があり、作製者には一定の技能が求められる。効率的な試料作製を行うため、技術専門員を配置(大阪大・萩原研)した。単結晶試料により、高精度の力学計測、構造解析等の連携研究で大きな成果へと結びつけることができた。

④ 情報発信・知財部会

ホームページ運用により本領域研究活動成果の公表・周知を図るとともに、ニュースレター・学会誌特集号の発行を通して、本領域の学術的取り組みを広く発信した。

・ニュースレターの冊子・オンライン刊行(3,000 千円/年)

コロナ禍期間中、各学会等がオンライン開催となり、ニュースレター冊子体を配布する機会が著しく減少した。関係各所への冊子体の郵送と併せて、ホームページ上でのオンライン配信を実施した。

HP「ミルフィューク構造の材料科学」活動報告: <https://www.mfs-materials.jp/activity-report/index.html>

⑤ 若手人材育成部会

若手学生セミナー・若手国内外武者修行等を通じて若手人材育成を推進した。

・成果報告会・国際会議での若手発表奨励とポスター賞の設置(2,000 千円/全期間)

年2回の領域研究会(年度末報告会(春期)、合宿研究会(秋期))、および本領域主催の国際会議において大学院生・若手研究者にポスター発表の機会を設けた。総括班メンバーを中心とする評価委員の採点に基づき、優秀発表賞(全発表に対して15%程度)を授賞した。本受賞が刺激となり、大学院後期(博士課程)への進学を決意したものが少なからずあったことは喜ばしい。

⑥ 国際活動支援部会

国際会議・ワークショップの企画、海外研究者招聘等の活動を通して、本領域研究の世界展開を図った。

・LPSO/MFS2022の会場費(4,500 千円/2022年度)

2022年末頃のコロナ規制の一部緩和に伴い、LPSO/MFS2022を対面で開催すること決断した。当初会場と予定していた東京大学内施設では消毒等のコロナ対応が不可とのことで、最終的に十分な感染対策のもと会議が実施できる品川プリンスホテルを会場とした。会場費としてやや高額となったが、会議参加者のみに限定される隔離された会議室(メイン・ポスター会場)が用意でき、領域メンバー(9割以上が対面参加)、海外招聘研究者を含めて誰1人コロナ感染することなく、安全な国際会議企画・運営ができた。最終年度の国際会議対面実施は、感慨深かった。

(2) 設備等の有効活用

【総括班予算にて購入した領域共用装置】

以下の表に示すように、総括班予算にて購入した共用装置は、共通試料作製、力学試験、電子顕微鏡試料作製の支援に用いられ、連携研究の促進に大きく貢献した。また、サーバーは情報発信・知財部会にてホームページ管理や、領域内の論文等をまとめるデータベースとしての役割を果たした。

・計画研究購入装置の有効活用

各計画研究においても、当初計画に従い必要な設備を速やかに導入し、直ちに運用を開始した。特に、放射光やJ-PARCにて購入されたその場観察用の試料ステージ等は、計画研究内のみならず班間連携研究や国際共同研究にても効果的に使用され、共用装置としても極めて有効に活用された。

表:総括班予算にて購入した共用装置

平成 30	ARB 対応小型圧延機 一式	CBR250 型二段圧延機	21,534,552 円	千葉工業大学
	小型真空アーク溶解装置 一式(共用)	NEV-ADR05 型 KSP 型(株)日新技研製	5,598,720 円	熊本大学
	材料変形高速観察カメラ 一式(共用)	(株)松見科学計測製	27,999,000 円	東京大学
	領域 HP 用 静音 Web サーバー 一式	(株)システムブレイン HTi0594	2,970,000 円	北海道大学
令和 2	TEM 用イオンミリング装置	Fischione 製 TEM mill model1051	7,238,000 円	東京大学

10 当該学問分野及び関連学問分野への貢献の状況

研究領域全体を通じ、本研究領域の成果が当該学問分野や関連学問分野に与えたインパクトや波及効果などについて、「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1頁以内で記述すること。なお、記述に当たっては、応募時に「①既存の学問分野の枠に収まらない新興・融合領域の創成を目指すもの」、「②当該領域の各分野発展・飛躍的な展開を目指すもの」のどちらを選択したか、また、どの程度達成できたかを明確にすること。

本研究領域「ミルフィーユ構造の材料科学」は、「①既存の学問分野の枠に収まらない新興・融合領域の創成を目指すもの」に属する研究課題である。本研究領域が掲げた「キンク現象の解明」と「3大材料分野への展開」に関して、以下、我々が成し遂げた革新的・創造的な学術研究の発展を述べる。

キンク現象の普遍性の発見 - 既存転位論によらない新たな視点からの力学材料設計 -

一般に構造材料設計においては、多結晶材料の連続かつ安定な塑性変形のため「結晶構造には、転位運動が可能な独立な5つのすべり系が必要」とするフォン・ミーゼス条件が金科玉条となる。本研究領域では、あえて容易すべり系が限定される「微視的な硬質層・軟質層による層状構造(ミルフィーユ構造:MFS)」を創製し、キンク変形を効果的に誘発することで、従来の転位論によらない新しい概念での材料高強度化を目指した。1942年に報告された六方晶系金属のキンク変形は、巨視的には座屈の様相を呈し、微視的には双晶に類似の結晶回転を生じていた。これらの特徴は、一般に強度劣化の原因とされることはあっても、材料強化に寄与し得るとは考え難かったのである。本研究領域にて明確に示されたように、多数のMFS型金属・高分子・セラミックス材料においてキンク変形を生じ、キンク導入による強化現象がMg合金に限らず、様々な材料に普遍的に起こりうることは大きな発見となった。特に、構造・組織学的に比較的大きなマイクロメートル($\sim 10^{-6}$ m)スケールのMFS複相金属においても、キンク変形が連続的な塑性変形をもたらし、かつ強化現象を示したことは今後の材料設計に新しい視点を与える。

キンクがミクロな破壊起点を与えず、なぜ連続的な塑性変形を可能とし、キンク界面導入による強化を達成するのであろうか。この視点からの理論的検討も非常に進んだ。結晶回転をベースとするキンク変形は、双晶変形でよく知られる幾何学的不変条件を一般化した形(rank-I 接続)で与えられることを本研究領域にて明示した。キンク界面の部分的な不変条件からの逸脱は、局所領域における不連続を生じ(図10-1)、その不一致度(incompatibility)は回位フランクベクトルにより定量化できる。このミクロ破壊起点生成の有無が分岐点となり、セラミックスでは層間はく離を生じる一方、Mg合金ではキンク界面を介した特異な緩和機構でクラック生成を回避し、連続的な塑性変形(および界面移動)を実現しているのである(本報告書15ページ)。キンク現象は、界面(粒界)効果としてよく知られるHall-Petch型の強化機構にとどまらず、キンク界面の特異な塑性変形能と併せてその強化機構(タフ化)考えるべき状況となってきた。キンク現象は、当初の予測を超えてさらに新しい可能性を感じさせる展開をもたらしている。

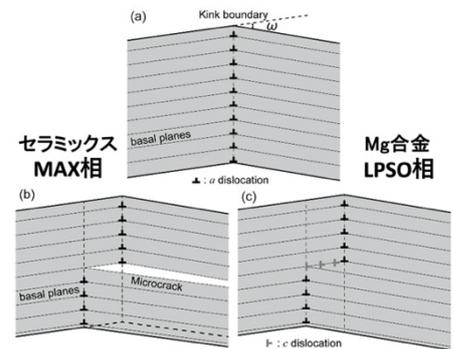


図 10-1 キンク界面の局所構造変化。(a)理想界面 (b)界面にずれが生じた状態 (c)転位による緩和状態。

真の学融合 - 金属・高分子・セラミックス3大材料分野を横断する展開 -

本研究領域は、異分野融合に基づき、キンク現象を3大材料へと展開することが目標であった。キンクを全く聞いたこともない新規参画メンバーが半数を超えており、まずは取り組むべき課題の設定・共有からスタートしたが、領域内各所で異分野間の研究融合が非常に効率よく進行し、まさに1+1>>2となる新展開があった。特に、以前よりキンク形態がよく知られていた高分子分野と金属分野の連携・学融合は極めて有効に機能した。特に、当初予想もしなかった「結晶性高分子材料のナノ構造化による強化・タフ化」を見いだすことができた(本報告書17ページ)。



図 10-2 本研究領域における学融合。

金属材料で微細結晶効果(Hall-Petch効果)としてよく知られる強化現象が、まさに「瓢箪から駒」的な経緯で結晶性高分子材料にも普遍的に適用できる可能性が判明した。金属屋-高分子屋の真の学融合により、高分子材料のナノ効果の微視的メカニズムを提唱するに至り、企業研究者を含めた高分子学会分科会での研究会開催等の展開に至っている。

11 若手研究者の育成に関する取組実績

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5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。）の育成に係る取組の実績について、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

本領域研究の研究者（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）65名のうち、若手研究者（令和5年3月末現在で39歳以下）は9名、本領域の研究者と共同で本領域研究を行った若手研究者（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、本領域研究が多くくの若手研究者に波及した。

(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、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, を目的として「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つ活動を実施した。

(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た。平成30年度は1名（国内1名）、令和元年度は異分野間の連携研究の活性化を反映して10名（国内9名、海外1名）に急増した。令和2年度以降、コロナ禍の影響を最も受けたのが本企画であり、国内外への武者修行は殆ど実施できなかった。令和4年度と5年度はともに若手共同研究者による2件ずつの国内武者修行が実施された。

2) 若手・学生フォーラム, セミナー

領域推進交流部会と連携して下記の若手・学生セミナーと見学会が実施された。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、セミナーは少人数に分かれてのグループワーク形式で行われた。各グループで討論された内容を発表し、若手間での自由闊達な議論が行われた。

- ・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回セミナーとフォーラム 令和4年8月19-20日（AP品川）：27名参加
- ・MFS国際セミナー 令和4年12月15日（東京大学）：院生・若手40名参加

(3) 若手人材育成の成果

本領域研究の期間中の若手研究者による受賞・昇任・論文の数を下記に示す。本領域研究により若手研究者の活躍の場が提供され、人材育成の取り組みが成果として現れている。

1) 若手研究者, 若手共同研究者の受賞

9名の若手研究者に対して18件の受賞, 32名の若手共同研究者に対して20件の受賞があった。

2) 若手研究者, 若手共同研究者の昇任

9名の若手研究者の内5名が昇任した。32名の若手共同研究者の内6名が昇任・栄転した。

3) 若手研究者の論文・特許

9名の若手研究者により筆頭著者として17編の論文が執筆され, 1件の特許が出願された。

【以下、非公開部分】

12 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。

(1) 総括班の評価体制

総括班の「領域企画・運営部会」に「研究評価委員会」を設置し、領域研究の評価を実施した。「外部評価委員(国内)」には、本領域で中心となる分野(金属工学, 材料力学, 構造科学, 高分子科学)で指導的な立場にある先生方に就任いただき、各専門分野における豊富な経験に基づいた客観的な評価を依頼した。これら国内評価委員は、合宿研究会・研究成果報告会に出席いただき、その都度個々の計画研究や公募研究の研究内容を採点・評価いただいた。海外からは、キンク変形, 回位理論それぞれの世界的先駆者である先生方を招聘し、オンラインを含めた国際会議に参加いただきながら、研究の評価を依頼した(評価員氏名は、以下(2)を参照)。

(2) 本領域研究に対する事後評価コメント

増本 健 先生 (東北大学 名誉教授:金属工学・材料科学)

本新学術領域研究「ミルフィーユ構造の材料科学」は、河村能人教授(熊本大)による高強度 LPSO 構造 Mg 合金の発見に端を発した「キンク強化」という新規な材料強化法をさらに発展させ、微視的な硬質層と軟質層の相互積層による「ミルフィーユ構造」という新たな視点からの学理構築を目指して結成された。本研究領域を通して、従来 Mg 合金に限定されていたキンク形成・強化の研究を、他の合金系や高分子, セラミックスを含めた三大材料を横断する総合的な研究が展開され、材料創製から実験・理論の両面で飛躍的な成果を挙げた。材料科学分野において、日本発の新しい領域を創出した研究として高く評価するとともに、今後のさらなる展開を大いに期待する。

富田 佳宏 先生(神戸大学 名誉教授:材料力学・計算力学)

本研究領域は、阿部英司代表のもと、様々な分野を先導する気鋭の研究者から構成される計画研究に加えて、公募研究により関連分野の研究者が網羅された、我が国における精鋭の研究グループであった。代表並びに各班長のもと、班間の意思疎通と密な研究交流を通して、各班成果の共有を促しながら深化と展開を図り、想定以上の成果をもたらした。コロナ禍の厳しい環境のもとではあったが、国内外の研究者との交流・協力、国際会議の共同開催、シンポジウムの共催など極めて広範多岐に及び、活発な活動を展開した。本研究の一大特徴として、若手研究者による貢献が大きく、大学院生の研究活動も活発であった。次世代を担う研究者の育成も順調であり、将来的な発展が大いに期待できる。国内外学会における多数の受賞、国内外の講演会にて基調講演、招待講演、特別セッションの企画等々は、研究成果が内外から高く評価されていることの客観的な証であると考えられる。論文も多数刊行されたが、今後の引用数の推移等をフォローすることは、本研究の注目度・貢献を定量的に諮るための一助となるであろう(数値が独り歩きすることは避けるべきではあるが)。本研究によって、良好な特性を有する数多くの新材料の創製が可能となってきたことは、高く評価される。今後は、それら材料が我が国の強みとなる用途を見極めつつ、いかにして新たな設計法を確立・提示していくかが本研究の次のフェーズであると感じる。

藤井 保彦 先生(東京大学 名誉教授:構造科学・物性物理学)

本プロジェクトは、先行の「シンクロ型 LPSO 構造の材料科学」の後継に位置づけられ、周期的積層構造を持つ Mg 合金を発展させ、より一般的なミルフィーユ構造を持つ金属、高分子、セラミックスの三大材料をターゲットとし(展開軸)、導入されたキンクによる材料強度の飛躍的増大のメカニズム解明を目指す(深化軸)2軸の張る平面内に、実験・理論を含めて、大分類で4、小分類で8研究班を配置し目指すべき方向を明示してスタートしたが、その戦略は最後までよく機能した。先行プロジェクトの共通試料製作・提供拠点の設置を踏襲し、この種のプロジェクトでありがちな実験試料の不完全性によるデータの不確定性を回避した。各班独自の研究とともに班間連携研究を強力に推進して、多くの優れた成果が得られた。深化軸に沿った新規 Mg 系物質の創製では、MgZn_{0.07}Y_{0.19}の溶質元素の稀薄極限でもキンク形成により LPSO 並の耐力約 400MPa と難燃性を有する、より経済的な実用材料候補が得られている。このような稀薄な溶質元素 Zn-Y が、Mg(軟質層)中でどのように硬質層を形成しミルフィーユ構造を保ちキンク強化に寄与しているかについては、多種類の量子ビーム(放射光、中性子、電子線)を戦略的に利用して、中核となる Zn-Y クラスターの形態を明らかにした。展開軸に沿った高分子系では、多種の試料でミルフィーユ構造形成からキンク導入までは実現できたが、飛躍的なキンク強化例はなお探索中である。一方、PVDF や HDPE の試料作製中に、熱延伸により 400%延伸で 170MPa という驚くべき耐力を示すことが明らかになり、新たな高分子の強化法として注目される。不運にもプロジェクト最中にパンデミックに見舞われ、研究者の交流や施設利用、国内外出張等に大きな制限が生じたが、プロジェクトリーダーや研究代表者の臨機応変な対応やオンライン会議導入等によりプロジェクトを遂行し、異分野融合を促進した優れたマネジメントに敬意を表する。

西 敏夫 先生(東京工業大学 名誉教授:高分子科学)

本新学術領域研究の目的は、「ミルフィーユ構造」における「キンク強化現象」を普遍的原理として確立し、金属・高分子・セラミックスの 3 大材料にわたる次世代構造材料の創製へと展開することであった。この原理は、LPSO 構造型 Mg 合金で見いだされた高温加工による著しい材料強化現象「キンク強化現象」にあり、このキンク強化を新しい材料強化法として確立することにあつた。具体的には、領域代表者を中心に、4 グループ構成で研究が進められた。各グループからは、質・量ともに十分な論文発表、学会発表などが行われた。一方、特許件数は少なかった。また、各グループ間の連携、共同研究も相当数行われた。但し、2020 年から 3 年間以上続いた COVID-19 パンデミックによる行動規制により、実験、国内外出張、国際会議での発表、交流などが制限されてしまったのは痛恨の極みである。オンライン会議が活用されたが、対面にはかなわないのが残念であった。一方、ポスター発表で若手の研究者が育ってきたのが実感出来たのが嬉しい。個別の成果と今後の展望は、2023 年 3 月発行のニュースレター最終号 (https://www.mfs-materials.jp/activity-report/pdf/MFS_NLvol9.pdf) に大変上手く纏められているが、特に興味深かったのは、ある程度キンク強化の定量化が可能になったのとセラミックスの塑性変形可能性が分かったことである。高分子材料に関しては、キンク強化は不明な点が多かったが、圧縮による強化可能性が見いだされたのは有意義である。今後は、もう少し構造材料としての試作や評価、問題点の解決が望まれる。最後に領域代表者のリーダーシップは抜群であり、この新分野の今後の発展を期待している。

Professor Michel W. Barsoum (Professor, Drexel University, USA : Pioneer of “Kink-deformation”, h-index 131)

"Millefeuille" is a project that is truly world-class, bringing together cutting-edge research in fundamental science and its practical applications. The project aims to develop a new generation of materials that have exceptional mechanical properties, making them suitable for a wide range of industrial and scientific applications. At its core, the "Millefeuille" project is focused on the development of so-called "layered materials". These are materials that consist of a series of thin layers, each with its own unique properties, which are stacked together in a carefully designed pattern. The resulting material is incredibly strong and resilient, making it ideal for use in high-stress applications such as aerospace, automotive, and defense. The project involves a wide range of disciplines, including materials science, chemistry, physics, and engineering where the fundamental properties of these layered materials, including how the layers interact with each other and how their properties change at different scales. They are also developing new methods for manufacturing these materials, which must be done with extreme precision and control. One of the key challenges of the project is to develop materials that are strong tough and lightweight. This requires a deep understanding of the underlying physics and chemistry of these materials, as well as innovative engineering approaches to create new structures and architectures. The potential applications of these materials are vast, ranging from high-performance aircraft to next-generation medical implants. Overall, the work on the "Millefeuille" project is truly excellent, representing the cutting edge of materials science and engineering. By bringing together researchers from a wide range of disciplines, the project is poised to make significant contributions to both fundamental science and practical applications, paving the way for a new era of high-performance materials.

Professor Alexey E Romanov (Professor, ITMO University, Russia : Pioneer of “Disclination theory”, h-index 56)

These comments concern the progress in the understanding of the role of kinks (kink bands) in the formation of the properties of various types of Mille-Feuille structures including those that form in alloys with LPSO component. Because of the pronounced plastic anisotropy, solids with layered structure demonstrate a strong tendency to kinking of their plate-like elements because of mechanical loading or even in during their processing and fabrication. In the last five years considerable results were obtained in the experimental analysis of kinking phenomenon in metallic alloys, ceramics, and polymers. This research was focused as well as on the already established Mg-Zn-Y alloys and such perspective materials as directional solidified eutectic alloys and composites. Kinks were found in Mille-Feuille structures subjected various types of treatment, e.g. equal-channel extrusion and high-pressure sliding. The theoretical studies of kinking phenomenon were carried out exploring various approaches starting from the analysis of kink boundary atomic structure within DFT calculations and MD atomistic modeling and ending with geometrical models in the framework of continuum mechanics. Important direction of the kinking theory was related to the application of the disclination approach to the analysis of kink nucleation and propagation in the materials with layered structure. Publication activity in the field of kinking phenomenon was rather remarkable. Several high-quality experimental papers have been published by the participants of the Mille-Feuille project. New experimental techniques, e.g. in situ neutron diffraction measurements during deformation, were applied for the study of the layered materials behavior. In overall, a strong advance has been demonstrated in the understanding of kinking phenomena during implementation of the Mille-Feuille project.