

---

# 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 －

---

領域番号：6004

平成30年度～令和4年度  
科学研究費助成事業（科学研究補助金）  
「新学術領域研究（研究領域提案型）」

### 研究成果報告書

令和6年 5月

領域代表 阿部 英司

東京大学大学院 工学系研究科・教授



本報告書は、平成30年度～令和4年度に科学研究費助成事業(科学研究費補助金)の新学術領域研究(研究領域提案型)として実施された、「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-」(領域番号 6004, 領域略称「MFS 材料科学」)の研究成果についてまとめたものである。

## 目次

1. 研究領域の目的及び概要	1
2. 研究組織・交付額	3
3. 本研究領域により得られた主な成果	9
4. 研究発表の状況	13
5. 領域の広報・学術交流活動	16
6. 領域のさらなる展開へ向けて	18

付録：論文選集（欧文誌30編，和文解説7編）

# 1. 研究領域の目的及び概要

## 【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—一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1-1). 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だすことが本研究の目的である.

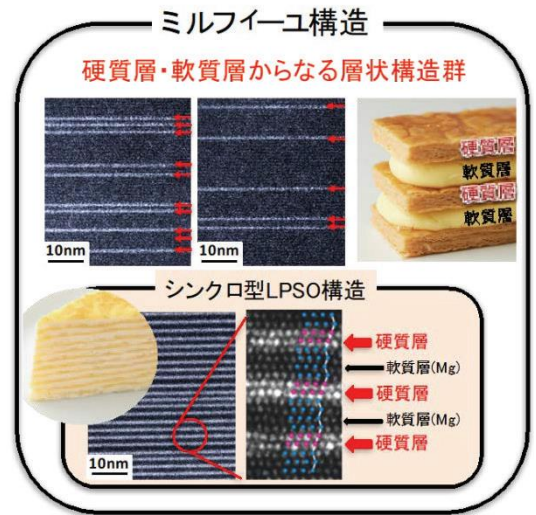


図1-1 LPSO 構造からミルフィーユ構造へ

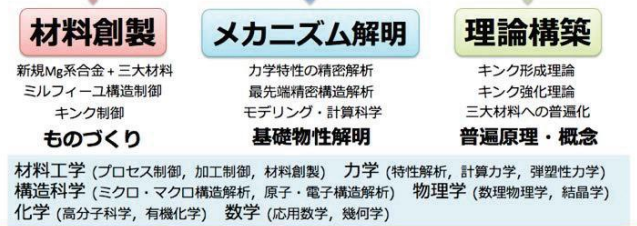
## 【本領域に期待される革新的・創造的な学術展開】

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1-2). 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1-2 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。

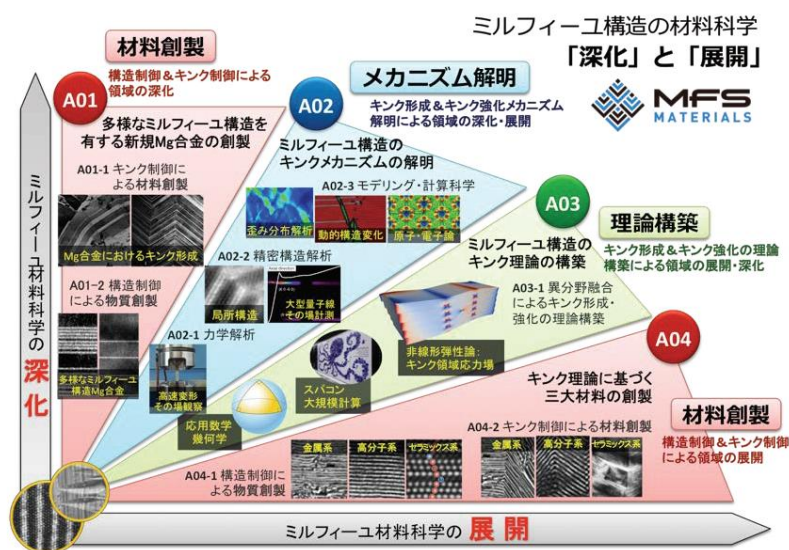


図1-3 ミルフィーユ構造の材料科学の「深化」と「展開」

## 【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。

## 2. 研究組織・交付額

\*所属・職名は、令和6年5月末におけるデータに基づく。

### 【総括班】

・研究代表者(領域代表者)

阿部 英司 (東京大学・大学院工学系研究科・教授)

・研究分担者

中島 英治 (九州大学・総合理工学研究院・教授)

河村 能人 (熊本大学・先進マグネシウム国際研究センター・教授)

藤居 俊之 (東京工業大学・物質理工学院・教授)

斎藤 拓 (東京農工大学・工学研究科・教授)

相澤 一也 (日本原子力研究開発機構・原子力科学研究部門・研究主席)

三浦 誠司 (北海道大学・工学研究院・教授)

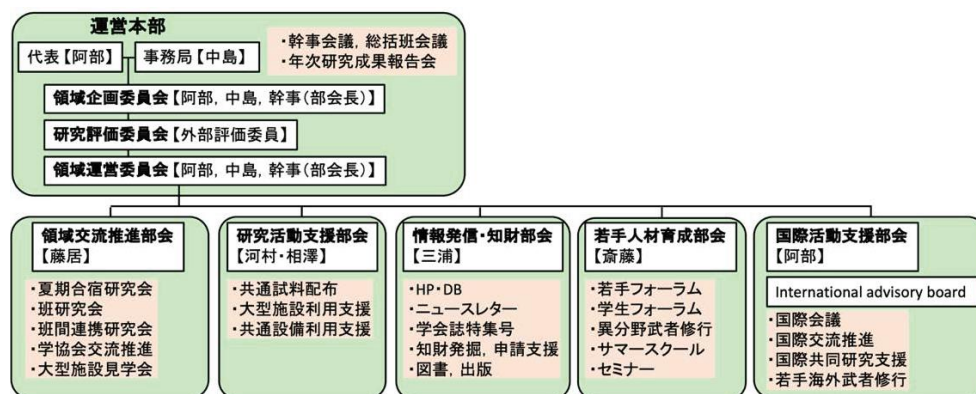
山崎 倫昭 (熊本大学・大学院先端科学研究部・教授)

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)

萩原 幸司 (名古屋工業大学・工学研究科・教授)

君塚 肇 (名古屋大学・工学研究科・教授)

伊藤 浩志 (山形大学・大学院有機材料システム研究科・教授)



### 【計画研究】

#### 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」

班長:河村 能人 (熊本大学・先進マグネシウム国際研究センター・教授)

##### 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

研究代表者:山崎 倫昭 (熊本大学・先端科学研究部・教授)

研究分担者:河村 能人 (熊本大学・先進マグネシウム国際研究センター・教授)

研究分担者:奥田 浩司 (京都大学・工学研究科・教授)

研究協力者:小川 由希子 (物質・材料研究機構・構造材料研究拠点・研究員)

研究協力者:竹田 修 (東北大学・工学研究科・准教授)

##### 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

研究代表者: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)

研究分担者:戸高 義一 (豊橋技術科学大学・工学研究科・教授)

研究協力者:湯浅 元仁 (同志社大・理工学部・准教授)

研究協力者:安藤 大輔 (東北大学・大学院工学研究科・准教授)

A01 公募研究者:安藤 大輔, 小川 由希子, 唐 永鵬

## A02 班「ミルフィーユ構造のキンクメカニズム解明」

班長:相澤 一也 (日本原子力研究開発機構・原子力科学研究部門・研究主席)

### A02-1 力学解析によるキンク形成・強化のメカニズム解明

研究代表者:萩原 幸司 (名古屋工業大学・大学院工学研究科・教授)

研究分担者:岸田 恭輔 (京都大学・大学院工学研究科・教授)

研究分担者:榎 学 (東京大学・大学院工学系研究科・教授)

研究協力者:鈴木 真由美 (富山県立大学・工学部・教授)

研究協力者:白岩 隆行 (東京大学・大学院工学系研究科・講師)

### 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

研究代表者:阿部 英司 (東京大学・大学院工学研究科・教授)

研究分担者:波多 聰 (九州大学・大学院総合理工学研究院・教授)

研究分担者:Stefanus Harjo (日本原子力研究開発機構・研究主幹)

研究分担者:相澤 一也 (日本原子力研究開発機構・原子力科学研究部門・研究主席)

研究分担者:上梶 真之 (公益財団法人高輝度光科学研究センター・研究員)

研究協力者:木村 滋 (公益財団法人高輝度光科学研究センター・室長)

研究協力者:津田 健治 (東北大学・多元物質科学研究所・教授)

研究協力者:川崎 卓郎 (日本原子力研究開発機構・原子力科学研究部門・研究員)

研究協力者:江草 大佑 (東京大学・大学院工学系研究科・助教)

### 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

研究代表者:君塚 肇 (名古屋大学大学院工学研究科 材料デザイン工学専攻・教授)

研究分担者:板倉 充洋 (日本原子力研究開発機構・研究主幹)

研究分担者:只野 裕一 (佐賀大学・大学院工学研究科・教授)

研究協力者:眞山 剛 (熊本大学・大学院先端科学研究部・教授)

研究協力者:山口 正剛 (日本原子力研究開発機構・研究主幹)

A02 公募研究者:木村 耕治, 多根 正和, 増田 紘士, 宮崎 秀俊, 佐藤 庸平, 高木 秀有  
椎原 良典, 萩田 克美

## A03 班「ミルフィーユ構造のキンク理論構築」

班長:藤居 俊之 (東京工業大学・物質理工学院・教授)

### A03-1 異分野融合によるキンク形成・強化の理論構築

研究代表者:藤居 俊之 (東京工業大学・物質理工学院・教授)

研究分担者:中島 英治 (九州大学・大学院総合理工学研究院・教授)

研究分担者:Svadlenka Karel (京都大学・大学院理学研究科・准教授)

研究分担者:稲邑 朋也 (東京工業大学・科学技術創成研究院・教授)

研究分担者:垂水 竜一 (大阪大学・大学院基礎工学研究科・教授)

研究協力者:長谷部 忠司 (神戸大学・大学院工学研究科・准教授)

研究協力者:光原 昌寿 (九州大学・大学院総合理工学研究院・准教授)

研究協力者:山崎 重人 (九州大学・工学研究院 材料工学部門・准教授)

A03 公募研究者:長濱 裕幸, Cesana Pierluigi

## 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」

班長: 斎藤 拓 (東京農工大学・工学研究科・教授)

### 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

- 研究代表者: 三浦 誠司 (北海道大学・工学研究院・教授)  
研究分担者: 江村 聡 (国立研究開発法人物質・材料研究機構・主幹研究員)  
研究分担者: 斎藤 拓 (東京農工大学・工学研究院・教授)  
研究分担者: 藪 浩 (東北大学・材料科学高等研究所・准教授)  
研究協力者: 徳永 辰也 (九州工業大学・大学院工学研究院・准教授)  
研究協力者: 池田 賢一 (北海道大学・工学研究院・准教授)  
研究協力者: 早川 晃鏡 (東京工業大学・物質理工学院材料系・教授)  
研究協力者: 堀内 寿晃 (北海道科学大学・工学部機械工学科・教授)

### 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

- 研究代表者: 伊藤 浩志 (山形大学・大学院有機材料システム研究科・教授)  
研究分担者: 寺田 大将 (千葉工業大学・工学研究科・准教授)  
研究協力者: 兼子 佳久 (大阪公立大学・工学研究科機械系専攻・教授)  
研究協力者: 瀧 健太郎 (金沢大学・理工研究域自然システム学系・教授)

A04 公募研究者: 吉田 英弘, 戸木田 雅利, 石川 和宏, 櫻井 伸一, 上路 林太郎, 森田 孝治

## 【公募研究】

### 第一期 (24件)

- A01 「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」  
研究代表者: 安藤 大輔 (東北大学・大学院工学研究科・准教授)
- A01 「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: 小川 由希子 (物質・材料研究機構・構造材料研究拠点・研究員)
- A02 「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」  
研究代表者: 宮澤 知孝 (東京工業大学・物質理工学院・助教)
- A02 「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」  
研究代表者: 松中 大介 (信州大学・工学部・教授)
- A02 「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」  
研究代表者: 木村 耕治 (名古屋工業大学・工学系研・助教)
- A02 「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」  
研究代表者: 多根 正和 (大阪大学・工学研究科・教授)
- A02 「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」  
研究代表者: 西堀 麻衣子 (東北大学・多元物質科学研究所・教授)
- A02 「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」  
研究代表者: 眞山 剛 (熊本大学・大学院先端科学研究部・教授)
- A02 「GN転位列による強化因子とキンク界面の易動度制御」  
研究代表者: 鈴木 真由美 (富山県立大学・工学部・教授)
- A02 「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」  
研究代表者: 増田 紘士 (東京大学・大学院工学系研究科・講師)
- A02 「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」  
研究代表者: 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)



- A02 「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」  
研究代表者:木村 滋 (高輝度光科学研究センター・回折散乱推進室・室長)
- A03 「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」  
研究代表者:長濱 裕幸 (東北大学・理学研究科・教授)
- A03 「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」  
研究代表者:山崎 和仁 (神戸大学・理学研究科・講師)
- A03 「Mesoscale modeling for disclinations toward a theory for kink and materials strengthening」  
研究代表者:Cesana Pierluigi (九州大学・マスフォアインダストリ研究所・准教授)
- A04 「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」  
研究代表者:池田 賢一 (北海道大学・工学研究院・准教授)
- A04 「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」  
研究代表者:藤森 厚裕 (埼玉大学・理工学研究科・准教授)
- A04 「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」  
研究代表者:戸木田 雅利 (東京工業大学・物質理工学院・教授)
- A04 「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」  
研究代表者:中田 伸生 (東京工業大学・物質理工学院・教授)
- A04 「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」  
研究代表者:斎藤 礼子 (東京工業大学・物質理工学院・准教授)
- A04 「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」  
研究代表者:石川 和宏 (金沢大学・機械工学系・教授)
- A04 「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う仮説の検証」  
研究代表者:瀧 健太郎 (金沢大学・理工研究域自然システム学系・教授)
- A04 「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」  
研究代表者:櫻井 伸一 (京都工芸繊維大学・大学院工芸科学研究科・教授)
- A04 「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」  
研究代表者:吉田 英弘 (東京大学・大学院工学系研究科・教授)

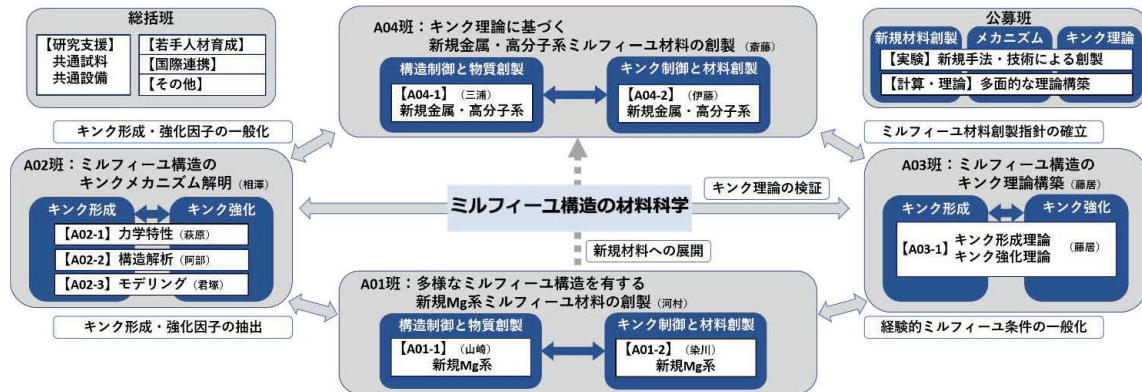
## 第二期 (23件)

- A01 「ねじり押出により導入した三次元キンクによる超強化」  
研究代表者:安藤 大輔 (東北大学・工学研究科・准教授)
- A01 「高圧スライド加工(HPS)法による Mg-Zn-Y 合金の組織変化とキンク変形挙動」  
研究代表者:唐 永鵬 (九州工業大学・大学院工学研究院・研究職員)
- A02 「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」  
研究代表者:佐藤 庸平 (東北大学・多元物質科学研究所・准教授)
- A02 「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」  
研究代表者:増田 紘士 (東京大学・大学院工学系研究科・講師)
- A02 「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」  
研究代表者:江草 大佑 (東京大学・大学院工学系研究科・助教)
- A02 「Rank-1 接続に基づくキンク変形ダイナミクスの解明」  
研究代表者:白岩 隆行 (東京大学・大学院工学系研究科・講師)
- A02 「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」  
研究代表者:宮崎 秀俊 (名古屋工業大学・工学研究科・准教授)

- A02 「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」  
研究代表者:木村 耕治 (名古屋工業大学・工学研究科・助教)
- A02 「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」  
研究代表者:多根 正和 (大阪大学・大学院工学研究科・教授)
- A02 「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」  
研究代表者:眞山 剛 (熊本大学・先進マグネシウム国際研究センター・教授)
- A02 「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」  
研究代表者:鈴木 真由美 (富山県立大学・工学部・教授)
- A02 「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」  
研究代表者:高木 秀有 (日本大学・工学部・准教授)
- A02 「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」  
研究代表者:椎原 良典 (豊田工業大学・工学研究科・准教授)  
\* 椎原氏が, 令和4年度・学術変革 B へ研究代表者として採択されたことに伴い, 同年廃止.
- A02 「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」  
研究代表者:萩田 克美 (防衛大学校・応用科学群・講師)
- A03 「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」  
研究代表者:長濱 裕幸 (東北大学・理学研究科・教授)
- A03 「Understanding strengthening in mille-feuille structures via mesoscale modeling of structural and material instabilities」  
研究代表者:Cesana Pierluigi (九州大学・マス・フォア・インダストリ研究所・准教授)
- A04 「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」  
研究代表者:池田 賢一 (北海道大学・工学研究院・准教授)
- A04 「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」  
研究代表者:吉田 英弘 (東京大学・大学院工学系研究科・教授)
- A04 「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」  
研究代表者:戸木田 雅利 (東京工業大学・物質理工学院・教授)
- A04 「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」  
研究代表者:石川 和宏 (金沢大学・機械工学系・教授)
- A04 「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」  
研究代表者:櫻井 伸一 (京都工芸繊維大学・繊維学系・教授)
- A04 「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」  
研究代表者:上路 林太郎 (物質・材料研究機構・構造材料研究拠点・主幹研究員)
- A04 「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」  
研究代表者:森田 孝治 (物質・材料研究機構・機能性材料研究拠点・主席研究員)

## 【研究組織の連携体制】

本領域では、領域の深化寄りのテーマとして A01 班:2グループと A02 班:3グループを、領域の展開寄りのテーマとして A03 班:1グループと A04 班:2グループを設定した。これに公募研究47件(第一期24件, 第二期23件)が加わり、以下に示す連携のもと領域研究を推進した。



### 【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)
- 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)
- 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)

### 【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)
- 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)
- 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)
- 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)

### 【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)
- 公募研究5件**(地層褶曲, 数理モデリング)

### 【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)
- 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)
- 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)

## 【交付決定額 (配分額)】

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

### 3. 本研究領域により得られた主な成果

#### 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立した。熱処理条件と押出加工率の最適化により、動的再結晶粒の生成を抑制したミルフィーユ単相組織材料の創製、および緻密なキングの導入に成功した。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、キング強化分はおよそ 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グ制御と材料創製

押出、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 合金にキング導入・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グ構造・形態を作製した結果、緻密かつ狭隘なキング分布が強化に効果的であることを見いだした。また、これらキング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-キング数密度-硬度(図 A01-2)」によって表記できた。

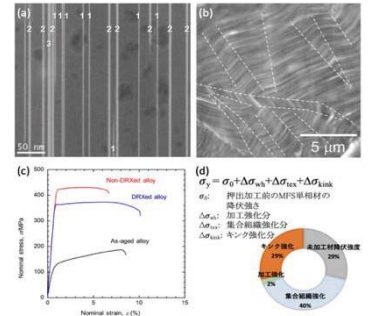


図 A01-1 Mg<sub>99.6</sub>Zn<sub>0.4</sub>Y<sub>1.0</sub> 急冷合金の (a)ミルフィーユ構造, (b)キング組織, (c)室温引張特性, (d)各強化機構の貢献度の見積。

**[A01-公募・安藤]** (第一期) 高温ねじり加工法によるMFS物質のキング強化材料化に不可欠なキング形成素因子抽出 (第二期) ねじり押出加工により導入した三次元キングによる超強化  
**[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グ強化

ねじり押出加工によりキング導入を試みたところ、小傾角なキングが無数に形成され、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)。

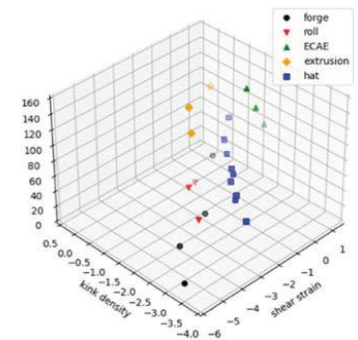


図 A01-2 Mg 合金群のせん断ひずみとキング数密度と硬度の関係

#### A02 班「ミルフィーユ構造のキングメカニズム解明」の主な研究成果

##### [A02-1] 力学解析によるキング形成・強化のメカニズム解明

キング形成・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、キング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グ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グ現象の確率、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 合金押出材を用いた精緻な力学実験により、キング強化現象を実証。②極希薄 Mg 合金のミルフィーユ構造単結晶を作製し、キング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ミクロンレベルの複相ミルフィーユ組織材料においてもキング誘導可能なことを、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)。キング強化のためには、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、「キング帯形成を均一微細に誘導する方策の付与」がキング強化発現に必須であることを明らかにした。具体的には、キング帯を形成する結晶粒形状制御、キング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。

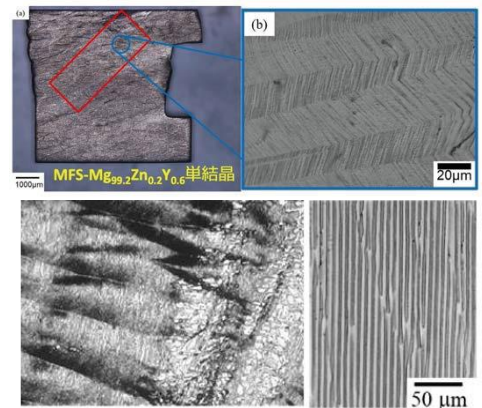


図 A02-1 極希薄ミルフィーユ Mg 単結晶(上部), および Al/Al<sub>2</sub>Cu 共晶組織型ミルフィーユ材料に形成されたキング帯

- [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グ界面の易動度制御  
 (第二期) 曲げ変形を受けた LPSO 型 Mg 一方向凝固材中のキング帯の組織的応答  
**[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グ変形原理の解明  
 (第二期) 高対称性セラミックスにおけるキング形成機構の深化と展開  
**[A02-公募・白岩]** Rank-1 接続に基づくキング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グ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.

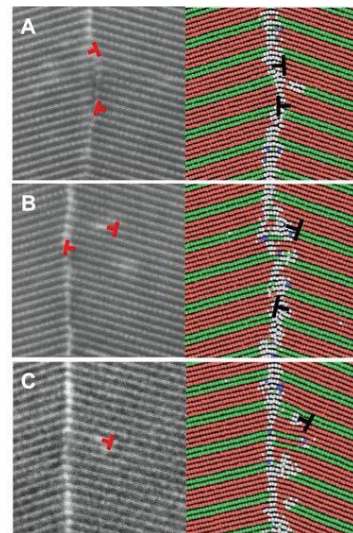


図 A02-2 キンク界面の STEM 原子像(左)と分子動力学シミュレーション(右).

- 【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 L1<sub>2</sub> 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. ② Mg 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

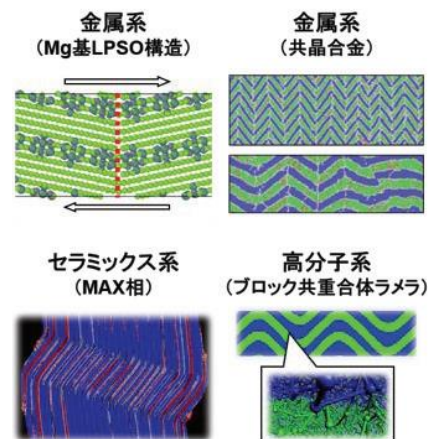


図 A02-3 金属系・セラミックス系・高分子系 MFS におけるキンクの微視的モデル

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。

- [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.

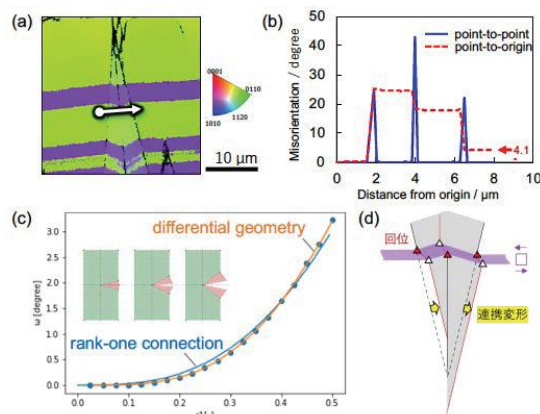


図 A03-1 キンク形成に伴う回位生成とキンク強化への寄与

- [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てい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」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, さらに圧延加工でキンク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, キンク構造ではなく, 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.

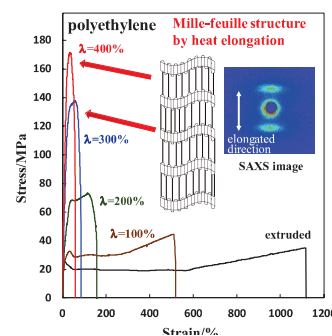


図 A04-1 熱延伸ポリエチレンのミルフィーユ構造による強化

- [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ンク形成クライテリア
- [A04-公募・池田]** (第一期) 配向制御法を利用したキンク強化型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ンク強化機構の解明
- [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ンク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ンク変形とミルフィーユ条件の一般化
- [A04-公募・上路]** 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
- [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ンク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ンク形成・強化を確認した。キンク以外の強化因子を分離する組織学的手法を提案し、キンク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ンク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、キンク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、キンク変形の特徴を定量的に評価した(中田)。Fe-C パーライトのキンク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 相のキンク強化を、キンク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ンク制御と材料創製**

新規金属系では Al/Ag<sub>2</sub>Al 系, Cu/Nb 系ミルフィーユ構造体, 高分子系ではブロックポリマー, 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ンク構造導入を確認した。ポリプロピレンに対し高压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、高压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(キンク)形状が頻りに観察されることが判明した。高分子材料のキンク強化現象を示唆する初めての結果を得た。

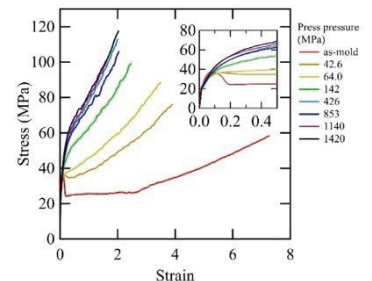


図 A04-2 PP の様々な圧力下での塑性加工後の応力-ひずみ挙動

- [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ンク形成と力学物性  
(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ンク導入と力学物性
- [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ンク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ンク形成と材料強化
- [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]** 有機高分子シリカナノ複合体による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ンク強化が起こるという仮説の検証

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ンク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・緩和過程によるキンク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、延伸によるキンク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 を圧縮させることでキンク状変形領域が形成され、せん断応力が増加するキンク強化現象を見いだした(瀧)。

## 4. 研究発表の状況

### 1) 学術的成果公表状況の概要

- ① 学術論文について：表4-1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4-1)、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4-1 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	-

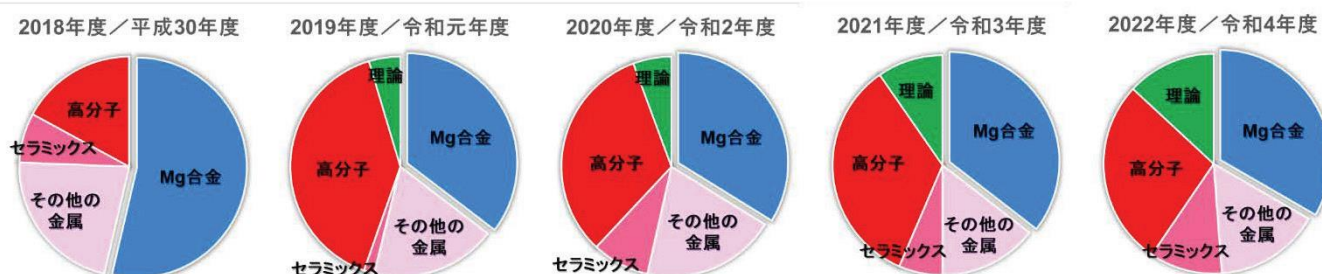


図4-1 公表された学術論文が扱う三大材料(金属, セラミックス, 高分子)および理論の割合



## 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)

\*以下, 論文業績記載において, 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\*】を付した.

### 【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  $\alpha$ 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/Al<sub>2</sub>Cu 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 Ti<sub>3</sub>SiC<sub>2</sub> 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 Mg<sub>75</sub>Zn<sub>10</sub>Y<sub>15</sub> 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 Ti<sub>3</sub>SiC<sub>2</sub> 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】“ $\alpha$ -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  $\alpha/\beta$  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, (2023) 774-779.
- [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 Millefeuille 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ック制御と材料創製”, 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.

## 5. 領域の広報・学術交流活動

### 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”

[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ンク現象」

[3] Materials Transactions, Vol.61, (2020), “Materials Science on Mille-Feuille Structure”

学術書: “LPOS/MFS Structured Mg Alloys -unique structure and kink deformation” Ed. E. Abe and Y. Kawamura,  
Springer Nature より, 本領域研究の成果報告として Open Access にて出版予定.

### 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, 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	天阪大学・天阪	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 (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
R3	R3.6.1-6.5	International Conference on Processing & Manufacturing of Advanced Materials (THERMEC'2021)	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) 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.

## 6. 領域のさらなる展開へ向けて

本研究領域「ミルフィーユ構造の材料科学」は、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した研究課題である。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」は確かな足跡を残し、当領域が今後さらなる学術的発展を図るための礎を築き上げた。以下、本領域研究が創成し、次なる展開へと引き継ぐべき事項を述べる。

### 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( $\sim 10^{-6}\text{m}$ )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。

キンクがマイ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、双晶変形に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 6-1)、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。このマイ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 10 ページ, A02-2 成果)。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。

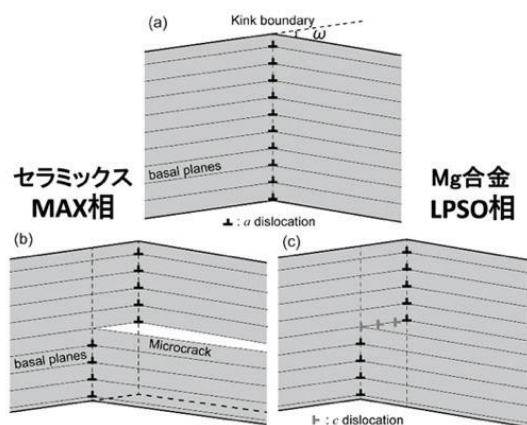


図 6-1 キンク界面の局所構造変化。(a)理想界面 (b)界面にずれが生じた状態 (c)転位による緩和状態。

### 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  $1+1 \gg 2$  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 11 ページ, A04-1 成果)。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。



図 6-2 本研究領域における学融合。