

機関番号：12601

領域設定期間：平成30年度～令和4年度

領域番号：6004

研究領域名（和文） 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-

研究領域名（英文） Materials science on mille-feuille structure (MFS)

- Development of next-generation structural materials guided by a new strengthen principle -

領域代表者

阿部 英司 (ABE Eiji)

東京大学・大学院工学系研究科（工学部）・教授

研究者番号：70354222

交付決定（予定）額（領域設定期間全体）：（直接経費）1,179,000,000円

## 研究の概要

微視的な硬質層・軟質層の相互積層により構築される「ミルフィーユ構造」が、キンク形成により強度発現する臨界条件・普遍性を追求することで、軽量構造材料創製の可能性を飛躍的に拡大することができる。本研究領域では、キンク強化メカニズム解明から理論構築までを、材料、力学、物理、化学、数学という異分野融合による知の結集により実現し、「ミルフィーユ構造のキンク強化」という新たな学問体系の構築へと結びつける。この新しい「キンク強化理論」に基づき、金属系・セラミックス系・高分子系の3大材料に渡って、次世代構造材料の創製を展開する。

研究分野:材料工学, 力学, 構造科学, 物理学, 化学, 数学

キーワード:軽量構造材料, 材料強化法, ミルフィーユ型層状構造, キンク変形

### 1. 研究開始当初の背景

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。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）。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。

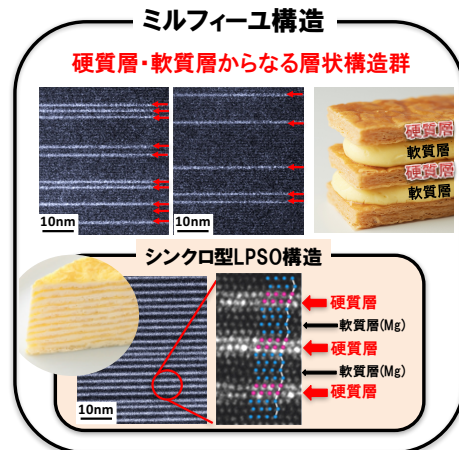


図1 LPSO構造からミルフィーユ構造へ

### 2. 研究の目的

キンク強化原理に基づいて、Mg系にとどまらず新規金属系・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

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。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だす。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。

### 3. 研究の方法

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。

### 4. 研究の進展状況及び成果

本領域研究は、当初計画に沿って概ね順調に進展している。

#### 【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

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

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

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

#### 【A02 班:ミルフィーユ構造のキンクメカニズム解明】

##### A02-1 力学解析によるキンク形成・強化のメカニズム解明

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

##### A02-2 精密構造解析によるキンク形成・強化のメカニズム解明

種々の最先端計測法を駆使した精密構造解析により、キンク強化を実現するキンク素子の実体を解明し、その定量評価法を確立することを目的としている。高温押出加工によりキンク強化を

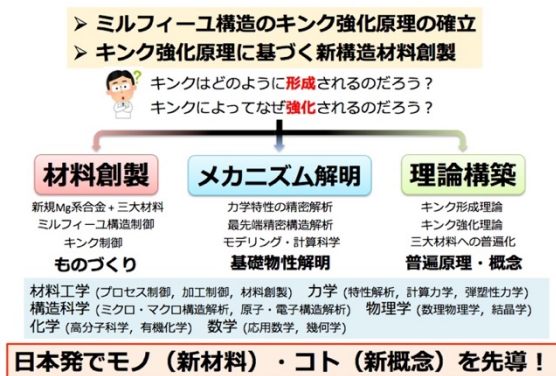


図2 本領域で実施する研究内容の3本柱

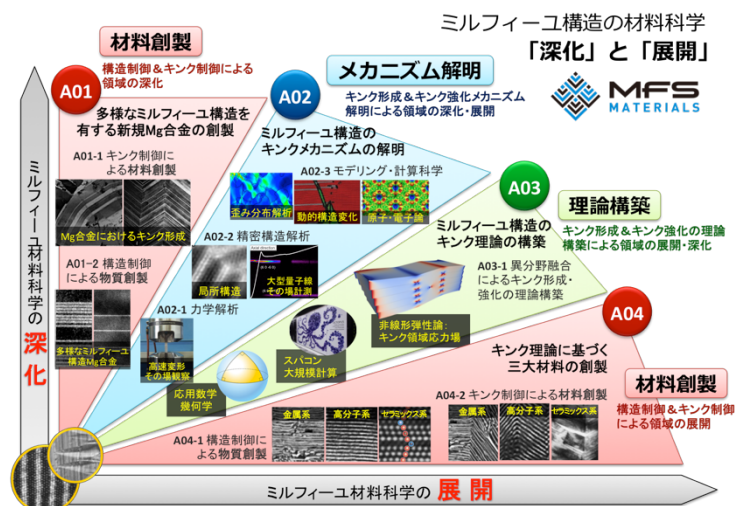


図3 ミルフィーユ構造の材料科学の「深化」と「展開」

示す Mg 合金では、ミルフィーユ組織とキンク界面分布とがナノ～マイクロメートルスケールに渡ってフラクタル的な振る舞いを示すことが見いだされた。キンクのスケールフリー的な振る舞いの普遍性を検証しつつ、3大材料のキンク強化へ指針を与える。

#### A02-3 モデリングによるキンク形成・強化のメカニズム解明

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

#### 【A03 班:ミルフィーユ構造のキンク理論構築】

##### A03-1 異分野融合によるキンク形成・強化の理論構築

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

#### 【A04 班:キンク理論に基づく新規金属・高分子系ミルフィーユ材料の創製】

##### A04-1 新規金属・高分子系ミルフィーユ構造の構造制御と物質創製

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

##### 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

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

#### 5. 今後の研究計画

領域研究後半は、A01 班から A04 班までをより有機的に連携させて3大材料への展開を加速するため、やや先行する Mg 合金の深化研究によって得られた知見を、高分子材料・セラミックス材料研究者と迅速に共有する。注力すべき研究項目に関しては、国際共同研究を積極的に展開する。

#### 6. 主な発表論文等（受賞等を含む）

学術論文: 全 163 編。以下主要な 10 編。

- [1] “Kink formation process in long-period stacking ordered Mg-Zn-Y alloy”, S. Yamasaki, T. Tokuzumi, W. Li, M. Mitsuhashi, K. Hagihara, T. Fujii, H. Nakashima, *Acta Materialia*, 195 (2020), 25.
- [2] “Duality of the incompatibility tensor”, K. Yamasaki, Hasebe, *Materials Transactions*, 61 (2020), 875.
- [3] “Introduction of mille-feuille-like alpha/beta layered structure into Ti-Mo alloy”, S. Emura, X. Ji, *Materials Transactions*, 61 (2020), 856.
- [4] “Morphology, thermal and mechanical properties of Co-continuous porous structure of PLA/PVA blends by phase separation”, N. Chuapontat, T. Ueda, T. Kurose, H. Ito, *Polymers*, 12 (2020), 1083.
- [5] “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.
- [6] “Optimization of mechanical properties of dilute Mg-Zn-Y alloys prepared by rapid solidification”, D. Drozdenko, M. Yamasaki, K. Máthys, P. Dobroň, P. Lukáč, N. Kizu, S. -I. Inoue, Y. Kawamura, *Materials and Design*, 181 (2019), 107984.
- [7] “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.
- [8] “Geometry of kink microstructure analysed by rank-1 connection”, T. Inamura, *Acta Materialia*, 173 (2019), 270.
- [9] “N- and Fe-containing carbon films prepared by calcination of polydopamine composites self-assembled at air/water interface for oxygen reduction reaction”, H. Abe, K. Nozaki, A. Kumatani, T. Matsue, H. Yabu, *Chemistry Letters*, 48 (2019), 102.
- [10] “Anisotropic plastic deformation of single crystals of the MAX phase compound  $Ti_3SiC_2$  investigated by micropillar compression”, M. Higashi, S. Momono, K. Kishida, N.L. Okamoto, H. Inui, *Acta Materialia*, 161 (2018), 161.

受賞: 総数 65 件, うち若手研究者の受賞 23 件。

- [1] 一般社団法人繊維学会 学会賞, 伊藤浩志, 2020.6.10.
- [2] 日本金属学会奨励賞, 増田紘士, 2019.9.11.
- [3] 一般社団法人軽金属学会 功績賞, 鈴木真由美, 2019.5.10.

ホームページ等

<https://www.mfs-materials.jp/> 問い合わせ: [abe@material.t.u-tokyo.ac.jp](mailto:abe@material.t.u-tokyo.ac.jp)