

科学研究費助成事業 研究成果報告書

令和 5 年 6 月 19 日現在

機関番号：12608

研究種目：新学術領域研究（研究領域提案型）

研究期間：2018～2022

課題番号：18H05481

研究課題名（和文）異分野融合によるキンク形成・強化の理論構築

研究課題名（英文）Theory development of kink formation and strengthening through interdisciplinary collaboration

研究代表者

藤居 俊之（Fujii, Toshiyuki）

東京工業大学・物質理工学院・教授

研究者番号：40251665

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 120,500,000円

研究成果の概要（和文）：結晶幾何学から、Ridgeキンク形成時には、回位の生成が不可避となることを理論的に導いた。この結果は、高精度の結晶方位解析による実験からも実証された。また、微分幾何学に基づいて、転位論と回位論を統一する結晶欠陥理論の体系化を行い、新理論に基づいた回位のフランクベクトルの定量化に成功した。さらに、キンク強化の観点では、回位の弾性応力場の寄与に加え、変形に伴う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理論的に示した。領域内共同研究により、LPSO相のキンク形成後の室温変形過程において、溶質原子濃化したキンク界面がポルトヴァン・ルシャトリエ効果を発現させながら移動する特異現象を見出した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究は、硬質層と軟質層から成るミルフィーユ構造物質におけるキンク形成とキンク強化に対し、理論的な説明を与える意義を持つと同時に、微分幾何学に基づいて転位論と回位論を統一する新格子欠陥理論を構築したことにより、材料の力学特性を連続体力学として扱う分野に対し、汎用性の高い理論的枠組みを提供する。さらに、LPSO型マグネシウム合金をはじめとするミルフィーユ構造材料の実用化に対し、キンクを積極的に導入した材料強化手法の利用に対して、設計指針となり得る有益な知見を与えている。

研究成果の概要（英文）：Based on the crystal geometry, we theoretically derived that the generation of a disclination is inevitable during the formation of ridge kinks. This result was also verified by experiments using high-precision crystal orientation analysis. We also succeeded in quantifying the Frank vector of the disclination based on the new theory by unifying the lattice-defect theory of dislocation and disclination based on differential geometry. Furthermore, from the viewpoint of kink strengthening, we theoretically demonstrated that, in addition to the contribution of the elastic strain field of the dislocation, the energy increment due to the generation of the disclination acts as a deformation resistance. In collaboration with other researchers in our group, we found a unique phenomenon in which the solute-atom-enriched kink interface moves with a Portevin-Le Chatelier effect during room-temperature deformation after kink formation in the LPSO phase.

研究分野：材料強度学，材料組織学

キーワード：ミルフィーユ構造 キンク形成 キンク強化 回位 微分幾何学 マグネシウム合金

1. 研究開始当初の背景

(1) 硬質層と軟質層から成る層状構造物質におけるキンクの発見の歴史は古く、キンク形成やそれに伴う材料の降伏現象の議論は、1970年代に非晶質高分子材料を中心に行われてきた。しかし、金属材料を対象とした検討は、今世紀に入り、シンク口型 LPSO 構造を有するマグネシウム合金においてキンクが見いだされるまで、長期の学術的空白期間が存在した。

(2) その後、先のシンク口 LPSO 新学術の取組により、キンク導入に伴って材料が顕著に強化されることが見出された。しかし、先の取組ではキンクによる強化機構の本質を理論的に説明するには至らなかった。そこで、キンクを利用した材料強化法をマグネシウム合金のみならず、新規金属・セラミックス・高分子系材料へと発展させるには、広義の層状構造を“ミルフィーユ構造”と位置づけ、その一般化されたミルフィーユ構造物質におけるキンク形成およびキンク強化機構を包括的に理解し、ミルフィーユ構造材料としての変形挙動や力学特性を普遍的に説明するための体系的なキンク理論の確立が不可欠であると考えに至った。

(3) このような背景のもとに、キンクによる新たな材料強化法を与える学理の構築を目指して、材料学の転位論・回位論、数学の微分幾何学、非線形微分方程式論、結晶物理学、非線形・非局所弾性論、曲率概念を取り入れた結晶塑性論、といった広範な学問をすべて関連づけたキンクダイナミクスとして本研究を計画し、ミルフィーユ構造体におけるキンク形成理論、およびキンク強化理論を統一させたキンク理論の確立を目指すこととした。

2. 研究の目的

(1) 本計画研究は、軟質層と硬質層が層状となったミルフィーユ構造体におけるキンク形成を理論的に説明し、ミルフィーユ構造を持つ材料がキンク形成に伴って強化される機構を理論的に説明することを目的とする。さらに、これらを体系的なキンク理論として確立させ、新規ミルフィーユ材料の創製に活かせる材料設計指針を導くとともに、キンクダイナミクスに基づく新たな材料強化法の新学理を創出する。

3. 研究の方法

(1) ミルフィーユ構造体のキンク形成とキンク強化の理論構築を目指し、解析学および微分幾何学などの数学をはじめ、結晶幾何学、結晶塑性学、材料強度学、および材料組織学などの材料科学から地質学にまで及ぶ多様な学問分野からのアプローチによって、実験データを参照しながら、キンク形態のモデル化を行い、本計画研究に参画する全ての研究者で研究対象とするキンク形態に関する共通認識を図る。マグネシウム合金の LPSO 相で顕著に現れる Ridge 型キンクは、より単純な Ortho 型キンクとともに、典型的なキンク形態と位置づける。

(2) キンク形成の観点から、結晶幾何学に基づく数理解析、エネルギー汎関数の極小化原理に基づく数理モデルの構築と有限要素法による数値シミュレーション、微分幾何学に立脚して、大型計算機群を利用した非線形・非局所弾性力学の数値解析を行う。また、本計画研究内の独自の実験的研究として、LPSO 相を対象として、走査電子顕微鏡内での圧縮試験のその場観察、および高精度の方位解析、力学試験による変形挙動の温度とひずみ速度依存性の解析を実施する。これら理論と実験と両面の研究アプローチによって得られた結果を統合し、キンク形成に関する合理的な理論を導く。なお、の研究遂行にあたっては、海外研究者との共同研究により進める。

(3) キンク強化の観点からは、上記、およびの理論解析を発展させ、特にキンク形成に伴って発生する回位に着目した理論解析を深める。また、実験においても、の走査電子顕微鏡観察により、キンク形成後の試験片の二段変形に伴う方位変化およびキンク周辺における弾・塑性ひずみ分布解析を実施する。さらに、の力学試験から得られる力学特性解析にあたっては、領域内の他の計画研究班と共同研究を実施し、走査透過電子顕微鏡観察および分子動力学法による数値シミュレーションとの比較から、キンク強化に直接関与する変形素過程を解明する。

4. 研究成果

(1) 本計画研究では、LPSO 相で発見された典型的な Ridge 型キンクに着目し、キンク界面形成時の変位の連続性担保を条件とした幾何学的観点から、弾塑性変形時のエネルギー最小化原理にも基づく数理モデリングから、および、微分幾何学に基づいた格子欠陥論から、層状構造物質における Ridge 型キンク形成を理論解析した。まず、の解析結果が示すことは、Ridge 型キンクがキンク内の単一せん断のみによって形成される場合、キンク界面での変位の連続性を満たすには、回位の導入が不可欠となる、換言すれば、回位の導入がなければキンク界面は剥離を起こす、ということである。この理論解析結果は、本計画研究内で行った精緻な走査電子顕微鏡観察による底面回転角の測定により、Ridge 型キンクの両側で確かに回位に相当する回転成分が存在することが実証され、その定量値も解析から予測された値とよい一致を示した(図 1)。

本成果は、理論と実験の両面からキंक形成に伴う回位発生を明らかにしたものであり、領域内の共通認識となる重要な知見となった。

(2) の数理解析では、海外研究協力者との共同研究として実施し、ミルフィーユ構造をモデル化するために、硬質層に挟まれた軟質層にのみすべり変形が生じる条件を与えた。この層状構造のエネルギーを「収束」という数学的手法を用いて均質化し、均質な物質のエネルギー密度を評価した。この均質化解析を基に、変形中に生じる散逸を含むエネルギー変化を第二法則に従う変分原理に基づいて解析した。その結果、硬い層と柔らかい層の物理定数に応じて、Ridge型キंकが複数、折りたたまれるように形成される様子がシミュレートされ、モデル実験として行った紙束の圧縮試験で生じるキंक形成と比較すると、変位分布やせん断ひずみ分布が極めてよく再現されることがわかった(図2)。これにより、ここでの数値モデルが数学的に矛盾のない解を持ち、汎用性の高い手法であることが証明されたことで、経験的ミルフィーユ条件の修正(ミルフィーユ構造を構成する層面とすべり面との平行関係の束縛条件は不要)がなされ、さらにはミルフィーユ条件の定量化が行えることが示された。また、変形に伴い散逸したエネルギー量が見積もれるなど、エネルギー収支を基礎としたモデルのため、エネルギー障壁の形成が要因となり得るキंक強化量の解析のための基盤となるモデルが構築できたことになる。

(3) の微分幾何学に基づく解析では、Riemann-Cartan多様体の持つ数学的性質を利用している。計量を固定したまま接続を取り替えるという数学的操作を行うことで、捩率と曲率の置換が可能であることを示し、これまでの回位を転位で表現するという現象論的理解が、数学によって証明された。ここでの微分幾何学に基づく連続体力学では、転位の導入により Ridge型キंकが形成可能であること、また、幾何学的に得られた Rank-1 接続条件を満たす Ridge型キंकが再現され、そこに生じた回位のフランクベクトルの大きさを微分幾何学のホロノミー解析という新規の手法によって定量化できることが示された(図3)。本成果の意義は大きく、連続体力学への微分幾何学の導入によって、より普遍性の高い格子欠陥理論の新しい枠組みを世界で初めて構築したことになる。この微分幾何学に基づくキंक形成の解析では、研究協力者による成果も得られており、曲率の概念にあたる“不適合度テンソル”を結晶塑性シミュレーションの構成方程式に陽に取り入れた数値解析から、ミルフィーユ構造のキंक形成を再現することができ、キंक形成に対する不適合度の寄与が明確に示された。この結果は、上に述べた幾何学から得られる結果とも整合性を持ち、Ridge型キंक形成の議論に対し、回位概念の導入の重要性を示している。

(4) キंक形成に関して、本計画研究での種々の実験から顕著な成果が得られている。LPSO相の圧縮試験の際、マクロな降伏が生じる前段階から試料表面起伏を観察し続けたところ、典型的な Ridge型キंकが形成される前に pre-kink あるいは gentle kink と位置づけられる前駆組織が形成されることを発見した(図4)。この pre-kink は除荷によって一部元に戻る性質を持ち、弾性変形を含んだものとなっていることを突き止めた。つまり、キंक形成前段階には、底面の弾性的な湾曲が生じ、その後、塑性変形としての

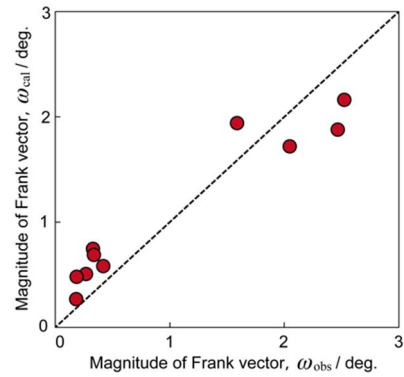


図1 回位フランクベクトルの実測値と理論値の比較

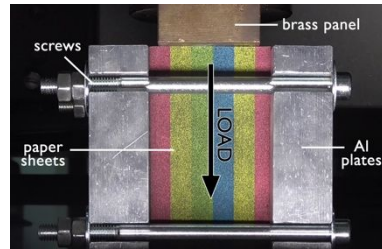
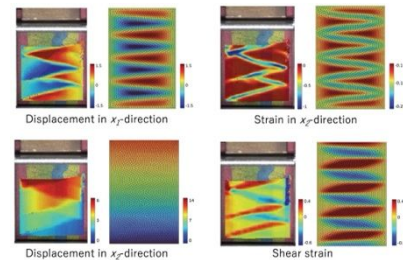


図2 キंक形成のシミュレーションと紙束実験の比較

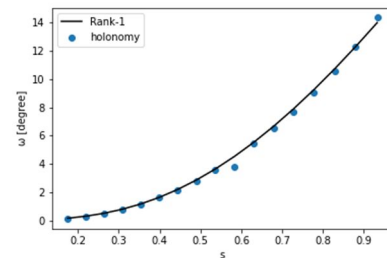


図3 フランクベクトルの大きさに関する Rank-1 解析と微分幾何学による結果の比較

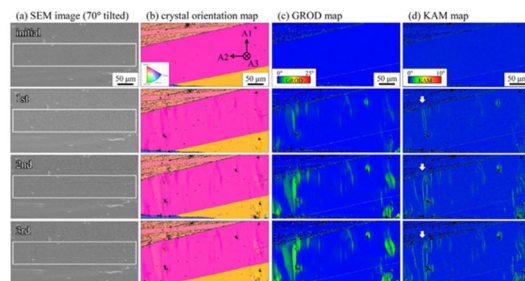


図4 走査電子顕微鏡観察で捉えた pre-kink の形成

キंक形成に至ることを明らかにしている。またキंक形成後の底面回転角の精密測定から、キंक形成に伴った回位をフランクベクトルの実測から証明したことは、上述の通りである。これら、キंक形成現象の理論的、実験的な説明は、材料におけるキंक形成後のキंक強化を議論する上で、有益な情報を与えている。

(5) 本計画研究において、キंक強化を理論的に解析するにあたり、Rank-1 接続条件を満たす典型的な Ridge 型キंकを対象とするキंकと位置づけ、理論と実験の両面から解析を進めた。キंक形成後のせん断変形を議論する際にも、純粋な幾何学で求まる Rank-1 接続の束縛条件を与えた考えは有効である。Ridge 型キंकがキंक界面を跨いでせん断変形すると仮定した場合、すでに存在する回位に加えて、新たな回位導入が必須となり、この回位が変形抵抗となってキंक強化に寄与するとの合理的結論を得た。また、複数のキंकが連結した状態で、せん断変形がキंकを横切って進行する場合、それらのキंकが Rank-1 接続条件を満たすように連携的な変形を起こす必要があるため、その際に大きな塑性仕事を要し、キंक強化に寄与する(図5)。これらの塑性仕事はエネルギーとして換算でき、そこからキंक強化量の見積を行い、実験から得られる強化量にほぼ一致する値を得た。

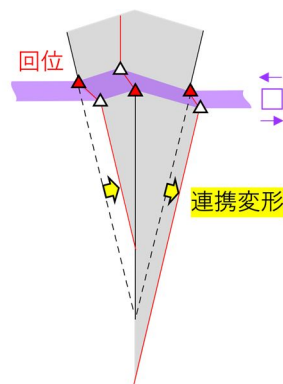


図5 回位発生と連携変形によるキंक強化

(6) 微分幾何学に基づく解析においても、Ridge 型キंकの界面を後続の転位が通過することを想定した解析が可能で、切断されたキंक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も成功している。微分幾何学に基づく回位の応力場解析およびフランクベクトルの定量評価手法は、くさび型回位に限定されず、ねじれ型回位が存在する場合(転位で言えば混合転位)にも、同一の手法から正確な(数学に裏打ちされた)定量値が評価できるという利点を持ち、典型的な Ridge 型キंक以外の形態を持つ多様なキंकにも適用可能な極めて汎用性の高い手法であり、回位によるキंक強化を定量的に扱うための基礎理論となる。

(7) キंक強化に関しても、本計画研究での実験から極めて重要な成果が得られている。LPSO 相単相合金を用いた二段圧縮試験において、一段目の圧縮試験によりキंकを導入し、続く二段目の試験では一段目の圧縮試験により形成されていた Ridge 型キंकの一方に優先的なひずみ発生が認められ、対をなすもう一方のキंकでは逆符号のせん断変形が生じていることが検出された(図6)。この結果は、キंक同士が界面で連結した Ridge 型キंकにおいては、互いのキंकが連携して変形していることを意味し、形成されたキंकそのものが塑性変形を担う存在であることを示している。一方、キंकは母相の塑性変形を抑制する存在であるともいえ、上の理論解析でキंकを一種の障害物として捉えることの妥当性を示している。

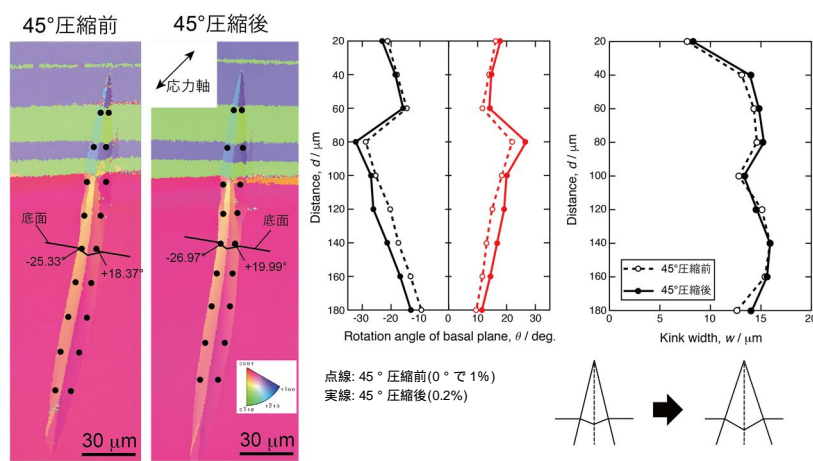


図6 降伏後のキंक内底面回転角度の変化

(8) キंक強化に関する本計画研究の実験結果として、LPSO 相単相合金におけるキंक形成後の室温での特異な塑性変形挙動の発見は、キंक形成後の塑性変形に関し、常識を覆す極めて重要な成果となった。LPSO 相単相合金をキंकが生じやすい方位でひずみ速度急変させながら圧縮変形した実験により、塑性ひずみ約 10%を超える段階から、ひずみ速度感受性指数が負と

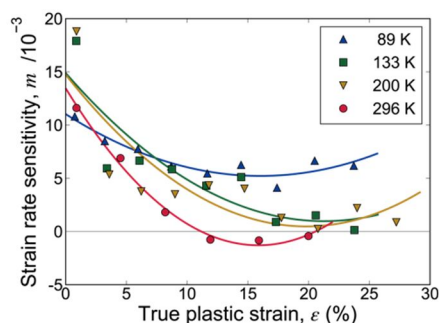


図7 ひずみ速度感受性指数の塑性ひずみ依存性

なり，ポルトヴァン-ルシャトリエ（PLC）効果が現れることが明らかとなった（図7）。さらに，領域内 A02-2 および A02-3 計画研究との共同研究から，LPSO 相におけるキンクの組織的，力学的な特異性を示す以下の重要な挙動が発見された。圧縮試験において，PLC 効果が発現する塑性変形段階では，溶質原子が濃化したキンク界面自体が移動し，界面後方に底面垂直方向のパーガースベクトル成分を有する転位を残していく現象が透過電子顕微鏡観察により捉えられた。この現象は，外部負荷応力によるキンク界面のせん断とキンク界面移動が協働して生じる現象であると解釈することにより，全ての実験結果を矛盾無く説明できることがわかった。ここで観測された PLC 効果は，結晶粒内可動転位と溶質原子の相互作用から説明されるような既知の現象ではなく，キンク界面上に濃化した溶質原子とキンク界面上の格子欠陥とのあいだで生じる捕捉・離脱の効果であると解釈される。LPSO 相においては，キンク界面移動が塑性変形の担い手であるとすれば，LPSO 相のキンク強化には，キンク界面移動が支配因子として寄与することが示唆される。今後，本研究の成果を活かし，より研究を発展させるには，キンク界面あるいはキンクそのものを動的に捉えたキンク強化の議論が必要となる。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計26件（うち査読付論文 25件 / うち国際共著 3件 / うちオープンアクセス 5件）

1. 著者名 Ma Tianchang, Miyazawa Tomotaka, Fujii Toshiyuki	4. 巻 177
2. 論文標題 Crystallographic features of deformation-kink bands in coplanar-double-slip-oriented copper single crystals	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Materials Characterization	6. 最初と最後の頁 111151 ~ 111151
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.matchar.2021.111151	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -
1. 著者名 Gavhale Siddharth, Svadlenka Karel	4. 巻 1
2. 論文標題 Dewetting dynamics of anisotropic particles: A level set numerical approach	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Applications of Mathematics	6. 最初と最後の頁 1 ~ 29
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.21136/AM.2021.0040-21	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する
1. 著者名 Yuta Nawa, Tadashi Hasebe	4. 巻 15
2. 論文標題 FTMP-based Kink Deformation and Strengthening Mechanisms for Mille-feuille Structures	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 International Journal of Multiphysics	6. 最初と最後の頁 325-348
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.21152/1750-9548.15.3.325	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -
1. 著者名 S. Yamasaki, T. Tokuzumi, W. Li, M. Mitsuhashi, K. Hagihara, T. Fujii, H. Nakashima	4. 巻 195
2. 論文標題 Kink Formation Process in Long-Period Stacking Ordered Mg-Zn-Y Alloy	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Acta Materialia	6. 最初と最後の頁 25-34
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.actamat.2020.04.051	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 T. Tokuzumi, S. Yamasaki, W. Li, M. Mitsuhashi, H. Nakashima	4. 巻 12
2. 論文標題 Morphological and crystallographic features of kink bands in long-period stacking ordered Mg-Zn-Y alloy analyzed by serial sectioning SEM-EBSD observation method	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Materialia	6. 最初と最後の頁 100716
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.mtla.2020.100716	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 小林舜典, 垂水竜一	4. 巻 87
2. 論文標題 Weitzenbock多様体によるらせん転位のモデル化と数値解析	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 日本機械学会論文集	6. 最初と最後の頁 20-00409
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1299/transjsme.20-00409	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 小林舜典, 垂水竜一	4. 巻 87
2. 論文標題 Weitzenbock多様体による刃状転位のモデル化と数値解析	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 日本機械学会論文集	6. 最初と最後の頁 21-00031
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1299/transjsme.21-00031	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 K. Yamasaki, T. Hasebe	4. 巻 61
2. 論文標題 Duality of the incompatibility tensor	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Materials Transactions	6. 最初と最後の頁 875 ~ 877
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.2320/matertrans.MT-MM2019004	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 T. Inamura	4. 巻 173
2. 論文標題 Geometry of kink microstructure analysed by rank-1 connection	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Acta Materialia	6. 最初と最後の頁 270 ~ 280
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.actamat.2019.05.023	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 T. Inamura, Y. Shinohara	4. 巻 61
2. 論文標題 Rank-1 connection of kink bands formed by non-parallel shears	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Materials Transactions	6. 最初と最後の頁 870 ~ 874
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.2320/matertrans.MT-MM2019005	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 S. Kobayashi, R. Tarumi	4. 巻 61
2. 論文標題 Dislocation-based modeling and numerical analysis of kink deformations on the basis of linear elasticity	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Materials Transactions	6. 最初と最後の頁 862 ~ 869
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.2320/matertrans.MT-MM2019006	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 Yamazaki Moeko, Ishikawa Kazuhiro, Fujii Toshiyuki, Miyajima Yoji	4. 巻 64
2. 論文標題 Effects of a Preannealing Process on the Morphology of Developed Kinks in Mille-Feuille Structured Cu/A5052 Alloy Fabricated by Accumulative Roll Bonding: Criteria for Kink Formation	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Materials Transactions	6. 最初と最後の頁 827 ~ 834
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.2320/matertrans.MT-MD2022003	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Drozdenko Daria, Knapek Michal, Kruzik Martin, Mathis Kristian, Svadlenka Karel, Valdman Jan	4. 巻 90
2. 論文標題 Elastoplastic Deformations of Layered Structures	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Milan Journal of Mathematics	6. 最初と最後の頁 691 ~ 706
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1007/s00032-022-00368-9	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する

1. 著者名 Matsumura Ryutaro, Shinohara Yuri, Inamura Tomonari	4. 巻 64
2. 論文標題 Numerical Analysis of Disclinations in Connecting Kink Bands Formed by Multiple Basal Shear	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Materials Transactions	6. 最初と最後の頁 817 ~ 826
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.2320/matertrans.MT-MD2022020	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Mizutani Kota, Nawa Yuta, Hasebe Tadashi	4. 巻 64
2. 論文標題 Kink Modeling and Simulations Based on Field Theory of Multiscale Plasticity (FTMP) Part I: Explicit Kink Model and Double Compression Test	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Materials Transactions	6. 最初と最後の頁 785 ~ 794
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.2320/matertrans.MT-MD2022016	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Tokuzumi Tsubasa, Mitsuhashi Masatoshi, Yamasaki Shigeto, Inamura Tomonari, Fujii Toshiyuki, Nakashima Hideharu	4. 巻 248
2. 論文標題 Role of disclinations around kink bands on deformation behavior in Mg-Zn-Y alloys with a long-period stacking ordered phase	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Acta Materialia	6. 最初と最後の頁 118785 ~ 118785
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.actamat.2023.118785	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Y. Miyajima, T. Yamada, T. Fujii	4. 巻 306
2. 論文標題 Plastic instability criterion based on new necking parameters for Cu-Al, Cu-A5052, and Cu-A5083 roll-bonded laminated metal composites fabricated without post-annealing	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Journal of Materials Processing Technology	6. 最初と最後の頁 117634-117634
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.jmatprotec.2022.117634	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 S. H. Pranoto, S. Yokota, S. Kobayashi, R. Tarumi	4. 巻 64
2. 論文標題 Mechanics and Energetics of Kink Deformation Studied by Nonlinear Continuum Mechanics Based on Differential Geometry	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Materials Transactions	6. 最初と最後の頁 in press
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.2320/matertrans.MT-M2023059	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

[学会発表] 計171件(うち招待講演 70件/うち国際学会 47件)

1. 発表者名 Toshiyuki Fujii
2. 発表標題 Theoretical criteria to predict formation of kinks in materials with mille-feuille structure
3. 学会等名 THERMEC'2021 (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Tomotaka Miyazawa, Ryota Namba, Toshiyuki Fujii, Shigeto Yamasaki, Masatoshi Mitsuhashi, Hideharu Nakashima
2. 発表標題 Evaluation of residual strain distributions around ridge-type kinks in a single-phase Mg-6at%Zn-9at%Y alloy by synchrotron x-ray radiation
3. 学会等名 The 12th International Conference on Magnesium Alloys and Their Applications (Mg 2021) (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Masatoshi Mitsuhashi, Tsubasa Tokuzumi, Shigeto Yamasaki, Hideharu Nakashima, Koji Haghigara, Toshiyuki Fujii
2. 発表標題 Experimental aspects of kink and pre-kink formation process in Mg-Zn-Y alloy with LPSO phase
3. 学会等名 The 12th International Conference on Magnesium Alloys and Their Applications (Mg 2021) (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 T. Inamura, Y. Shinohara, R. Matsumura
2. 発表標題 Disclination in connecting kink bands formed by multiple basal slips
3. 学会等名 The 12th International Conference on Magnesium Alloys and Their Applications (Mg 2021) (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 垂水竜一
2. 発表標題 微分幾何学を用いた格子欠陥のモデリングと解析
3. 学会等名 IMS 現象数理学研究拠点 共同研究会「幾何学・連続体力学・情報科学の交差領域の探索」(招待講演)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 垂水竜一
2. 発表標題 微分幾何学による転位のモデル化と力学場の解析
3. 学会等名 日本金属学会2021春期(第168回)講演大会(招待講演)
4. 発表年 2021年

1 . 発表者名 T. Fujii, A. E. Romanov
2 . 発表標題 Estimation of kink nucleation stress by a disclination-propagation model
3 . 学会等名 The International Conference "Advanced Materials Week 2019" (招待講演) (国際学会)
4 . 発表年 2019年

1 . 発表者名 H. Nakashima, S. Yamasaki, M. Mitsuahara, K. Hagihara, T. Fujii
2 . 発表標題 Premonitory symptoms of kink deformation in Mg-Zn-Y alloy with LPSO phase
3 . 学会等名 The International Conference "Advanced Materials Week 2019" (招待講演) (国際学会)
4 . 発表年 2019年

1 . 発表者名 M. Mitsuahara, H. Nakashima, S. Yamasaki, K. Hagihara, T. Fujii
2 . 発表標題 Microscopic observation of formation process of kink bands in Mg-Zn-Y alloy with LPSO phase
3 . 学会等名 Mini-symposium: "Elastic defects and structures. Modeling and experiments" (招待講演) (国際学会)
4 . 発表年 2019年

1 . 発表者名 K. Svadlenka
2 . 発表標題 Numerical analysis of mechanics of layered structures
3 . 学会等名 EU-Japan Workshop on Mille-feuille Structured Materials (招待講演) (国際学会)
4 . 発表年 2019年

1. 発表者名 垂水竜一, 小林舜典
2. 発表標題 格子欠陥の微分幾何学とキンク解析への応用
3. 学会等名 日本物理学会 第75回年次大会 (招待講演)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 T. Inamura
2. 発表標題 Kinematical modeling of kink microstructure and kink strengthening
3. 学会等名 EU-Japan Workshop on Mille-feuille Structured Materials (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 T. Inamura
2. 発表標題 Kinematical theory of kink microstructure
3. 学会等名 The International Conference "Advanced Materials Week 2019" (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 T. Hasebe
2. 発表標題 FTMP-based Descriptions of Rotational Field Evolutions
3. 学会等名 Materials Research Meeting 2019 (MRM2019) (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 光原昌寿, 山崎重人, 惣島雅樹, 中島英治, 萩原幸司, 藤居俊之
2. 発表標題 LPSO 单相Mg-Zn-Y合金におけるキンク変形の前駆現象
3. 学会等名 日本金属学会2019年秋期(第165回)講演大会(招待講演)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 藤居俊之, 斎藤拓
2. 発表標題 高分子材料におけるキンク形成を伴った降伏現象
3. 学会等名 繊維学会2019年次大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 K. Svadlenka
2. 発表標題 Gradient flows of weighted networks and patterns
3. 学会等名 Gradient flows and related topics: analysis and applications
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 R. Tarumi, S. Kobayashi, S. Yamada, M. Ogino
2. 発表標題 Dislocation-Based Modeling and Numerical Analysis on the Formation of Kink Band
3. 学会等名 2019 Sustainable Industrial Processing Summit & Exhibition (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 垂水竜一
2. 発表標題 転位論に基づくキンク変形の表現とその数値解析
3. 学会等名 結晶の界面, 転位, 構造の先進数理解析
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 T. Inamura
2. 発表標題 Kinematical modeling of kink microstructure
3. 学会等名 2019-Sustainable Industrial Processing Summit & Exhibition (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 T. Hasebe, Y. Nawa
2. 発表標題 FTMP-based Kink Deformation and Strengthening Mechanisms for Mille-feuille Structures
3. 学会等名 Materials Research Meeting 2019 (MRM2019) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 T. Fujii
2. 発表標題 Constructing a comprehensive theory of kink formation and strengthening: An interdisciplinary approach
3. 学会等名 The 4th International Symposium on Long-Period Stacking Ordered Structure and Mille-feuille Structure (LPSO2018) (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 中島英治, 光原昌寿
2. 発表標題 格子回転を伴うキンク変形による特異な組織
3. 学会等名 日本金属学会 第164回秋期講演大会 公募シンポジウム S1 キンク強化の材料科学 I (招待講演)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 K. Svadlenka
2. 発表標題 On some extensions of thresholding schemes
3. 学会等名 The 12th AIMS Conference on Dynamical Systems, Differential Equations and Applications (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 T. Inamura
2. 発表標題 Incompatible microstructure of martensite and kink deformation
3. 学会等名 Mathematical design of new materials: strategies and algorithms for the design of alloys and metamaterials (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 R. Tarumi
2. 発表標題 Dislocation-based Modeling and Isogeometric Analysis for Kink Deformation
3. 学会等名 Russia-Japan International Seminar on Advanced Materials (RJISAM-IV) (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2018年

1 . 発表者名 S. Kobayashi and R. Tarumi
2 . 発表標題 Extended isogeometric analysis for two-dimensional kink deformations
3 . 学会等名 The 4th International Symposium on Long-Period Stacking Ordered Structure and Mille-feuille Structure (LPSO2018) (国際学会)
4 . 発表年 2018年

1 . 発表者名 T. Kitano and T. Hasebe
2 . 発表標題 FTMP-based Modeling and Simulations of HCP Mg Single Crystal
3 . 学会等名 The 9th International Conference on Multiscale Materials Modeling (MMM2018) (国際学会)
4 . 発表年 2018年

1 . 発表者名 T. Miyazawa, R. Endo, T. Fujii
2 . 発表標題 Temperature and strain dependence of plastic deformation behavior of long-period stacking-ordered magnesium alloys
3 . 学会等名 The 5th International Symposium on Long-Period Stacking/Order Structure and Mille-feuille Structure (国際学会)
4 . 発表年 2022年

1 . 発表者名 N. Amemiya, .D. Egusa, T. Miyazawa, T. Fujii, E. Abe
2 . 発表標題 Deformed microstructure in LPSO-type magnesium alloys exhibiting PLC effect
3 . 学会等名 The 5th International Symposium on Long-Period Stacking/Order Structure and Mille-feuille Structure (国際学会)
4 . 発表年 2022年

1. 発表者名 藤居俊之
2. 発表標題 LPSO型マグネシウム合金におけるキンク形成を伴った塑性変形の特徴
3. 学会等名 金属学会シンポジウム「ミルフィーユ構造の創製とキンク強化：新強化原理として見えてきたこと」(招待講演)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 稲邑朋也
2. 発表標題 変形の連続性に基づくキンク強化の幾何学理論
3. 学会等名 日本金属学会キンク研究会(2023年第1回)(招待講演)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 垂水竜一
2. 発表標題 微分幾何学を用いたキンク変形解析：現状と今後の課題
3. 学会等名 日本金属学会キンク研究会(2023年第1回)(招待講演)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 光原昌寿, 徳澄翼, 福島碧, 山崎重人, 中島英治
2. 発表標題 LPSO単相Mg-Y-Zn合金におけるキンク強化の実験的検証
3. 学会等名 日本金属学会2022年秋期(第171回)講演大会(招待講演)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 K. Svadlenka
2. 発表標題 Understanding of kink-band formation by means of a rate-independent model obtained by homogenization of mille-feuille structure
3. 学会等名 The 5th International Symposium on Long-Period Stacking/Order Structure and Mille-feuille Structure (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Tomonari Inamura
2. 発表標題 Geometrical aspects of strengthening by kink band and its aggregate
3. 学会等名 Polycrystals: Microstructure and Plasticity (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 上田佑理, 松村隆太郎, 篠原百合, 宮澤知孝, 藤居敏之, 稲邑朋也
2. 発表標題 LPSO型Mg合金の二重圧縮試験におけるキンク組織変化と変形挙動
3. 学会等名 日本金属学会2022年秋期(第171回)講演大会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 垂水竜一
2. 発表標題 微分幾何学を用いた格子欠陥のナノ力学解析
3. 学会等名 第二回マルチスケールマテリアルモデリングシンポジウム (招待講演)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 岡大貴, 小林舜典, 垂水竜一, 鈴木厚
2. 発表標題 連続分布転位論とホロノミーによるキンク帯先端の部分回位のフランクベクトルの解析
3. 学会等名 第35回計算力学講演会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 K. Mizutani, T. Hasebe
2. 発表標題 FTMP-based Series of Simulations on Kink Deformation/Strengthening in Mille-feuille Structured Mg
3. 学会等名 WCCM/AEPA2022 (15th WCCM - 8th AEPA) (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 藤居俊之, 稲邑朋也, 垂水竜一
2. 発表標題 実験と理論の協働 によるミルフィーユ構造体のキンク形成と強化の考察
3. 学会等名 軽金属学会第144回春期講演大会 (招待講演)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 光原昌寿, 徳澄翼, 福島碧, 山崎重人, 中島英治
2. 発表標題 LPSO型マグネシウム合金のキンク強化に関わる定量解析
3. 学会等名 軽金属学会第144回春期講演大会 (招待講演)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 雨宮直輝, 江草大佑, 宮澤知孝, 藤居俊之, 板倉充洋, 君塚 肇, 阿部英司
2. 発表標題 PLC効果を発現するLPS0型マグネシウム合金におけるキンク変形組織
3. 学会等名 軽金属学会第144回春期講演大会
4. 発表年 2023年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

A03-1 異分野融合による キンク形成・強化の理論構築 http://kamonohashi.iem.titech.ac.jp/fujii/mfsa03/

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究分担者	中島 英治 (Nakashima Hideharu) (80180280)	九州大学・総合理工学研究院・教授 (17102)	
研究分担者	S V A D L E N K A K A R E L (Svadlenka Karel) (60572188)	京都大学・理学研究科・准教授 (14301)	
研究分担者	稲邑 朋也 (Inamura Tomonari) (60361771)	東京工業大学・科学技術創成研究院・教授 (12608)	

6. 研究組織（つづき）

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究分担者	垂水 竜一 (Tarumi Ryuichi) (30362643)	大阪大学・基礎工学研究科・教授 (14401)	

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究協力者	長谷部 忠司 (Hasebe Tadashi)		
研究協力者	光原 昌寿 (Mitsuhara Masatoshi)		
研究協力者	山崎 重人 (Yamasaki Shigeto)		

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計5件

国際研究集会 MFS mini-workshop	開催年 2022年～2022年
国際研究集会 EU-Japan Workshop on Mille-feuille Structured Materials	開催年 2019年～2019年
国際研究集会 The 5th International Symposium on Long-Period Stacking/Order Structure and Mille-feuille Structure	開催年 2022年～2022年
国際研究集会 The 5th Japan-Russian Seminar on Advanced Materials: the structure and mechanisms of plasticity of advanced magnesium alloys and related materials	開催年 2019年～2019年
国際研究集会 The 4th International Symposium on Long-Period Stacking/Order Structure and Mille-feuille Structure	開催年 2018年～2018年

8 . 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関			
チェコ	The Czech Academy of Sciences	Charles University in Prague		
ロシア連邦	ITMO University			