

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 28 年 6 月 10 日現在

機関番号：14401

研究種目：新学術領域研究（研究領域提案型）

研究期間：2011～2015

課題番号：23109010

研究課題名（和文）数理形態学と階層構造科学の融合による積層構造体の力学特性発現機構の解明

研究課題名（英文）Study of deformation mechanism and mechanical properties of layered solids based on collaboration between mathematical morphology and hierarchical structural science

研究代表者

中谷 彰宏（NAKATANI, AKIHIRO）

大阪大学・工学（系）研究科（研究院）・教授

研究者番号：50252606

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 57,900,000円

研究成果の概要（和文）：シンクロ型 LPSO構造を有するマグネシウム合金の優れた力学特性の起源を解明するために、キンク変形帯の時間発展挙動を調べる。まずディスクリネーションと不安定性に着目し理論・計算モデルを発展させ、有限変形理論の枠組みで理想的なキンク変形に対する完全適合条件を導いた。さらに、Mg-Zn-Y合金のLPSO相のキンク境界の微視的観察を行った。様々なキンク境界に対して透過電子顕微鏡/高角度散乱暗視野走査透過電子顕微鏡法による観察を通じて幾何構造の特性を調べた。実験結果はキンク境界が多くの転位からなる転位列で構成されており、結果はディスクリネーションモデルに基づいた理論予測とよく合致した。

研究成果の概要（英文）：To reveal the origin of the superior mechanical properties of magnesium alloys with synchronized long-period-stacking-ordered (LPSO) structure, the temporal behavior of kink deformation bands are studied. We have developed theoretical and computational models based on disclination and instability, and have showed a full compatibility condition for an ideal kink deformation in the framework of finite deformation theory. Moreover, microstructures of kink boundaries of LPSO phases of Mg-Zn-Y alloy have been observed. We have examined the characteristics for a variety of kink boundaries using a field-emission transmission electron microscope (TEM), high-angle annular dark-field (HAADF) scanning transmission electron microscope (STEM) and related equipment. The experimental result has showed that the kink boundaries consist of a large number of dislocation array and it agrees well with the theoretical prediction based on disclination model.

研究分野：変形体力学

キーワード：材料力学 格子欠陥 構造・機能材料 透過型電子顕微鏡 変形体力学 計算力学 非線形力学

1. 研究開始当初の背景

微視的内部構造を設計することによって、物質の巨視的特性を制御し、材料に新機能を付与するためには、構造と特性のスケールを越えた関係すなわちメカニズムを理解することが不可欠である。領域が中心課題に据えている高強度マグネシウム合金を実現するシンク口型 LPSO (Long Period Stacking Order) 構造に対しては、研究開始当初は国内国外を問わずすでにその優れた力学特性に関する報告が多くなされていたが現象論的研究が大半であり、本領域のメンバーが中心となって行っていた先駆的研究においてようやくその微視的構造と巨視的特性の関わりが明らかになり始めたという状況であった。シンク口型 LPSO 構造は、積層面内と積層方向の異方性を有しているだけでなく、六方晶や金属間化合物よりも大きいスケールの周期性を持つことから、新物質相という視点からは、メソスコピック領域の変形構造体という特徴を有している。特異な変形機構であるキンク変形もそのひとつであり、金属結晶の塑性変形の主要機構である転位よりもさらに高次の格子不整合(広義の格子欠陥)がその非弾性変形の担い手となっている可能性が指摘されていた。このような可能性は、双晶変形が見いだされないなどの観察から間接的には裏付けられているものの、その詳細は研究開始当初は明らかにされていなかった。材料科学研究の持続的発展において重要となる研究成果の普遍化・体系化が、領域において目的としている次世代軽量構造材料への革新的展開に必要な新しい学理構築に結びつくことから、本計画研究で実施する力学特性と変形メカニズムの解明と、高次不整合を媒介とする新しい理論体系を確立が必要とされていた。

2. 研究の目的

実験・計測科学と理論・計算力学の融合研究によって、シンク口型 LPSO 構造を起源とする物質系の力学特性と変形メカニズムを解明し、高次不整合を媒介とする新しい理論体系を確立する。そのさらなる普遍化・体系化により、新しい変形・力学理論の構築を行うことを目的とする。具体的には、外力負荷下のキンク帯の形成について、シンク口型 LPSO 構造の特異な微視的幾何構造と新奇な力学特性の表裏一体の関係を、透過型電子顕微鏡による高分解能観察とイメージング、および非リーマン幾何学に基礎をおく不連続場のマルチスケール理論を用いた階層型シミュレーションによって浮彫りにする。そして高次不整合を媒介とする階層科学による力学と数形形態学による幾何学を結び付けるエネルギー論に関する学理を構築する。

3. 研究の方法

(1) 微細構造観察手法

キンク変形帯の形成メカニズムと力学特性との関わりを実験観察によって解明するために、圧縮試料に現れる様々なキンク境界に対して結晶構造、元素分布、格子欠陥などのキャラクターゼーションを行う。総括班が提供する共通試料の Mg-Zn-Y 合金押出材を試料として用いる。同押出材を押し出方向に圧縮変形を施した圧縮試験片の TEM/STEM 観察を行う。変形材の試料作製には、機械研磨によるひずみ導入を避けるために、マイクロサンプリングシステムを備えた FIB (Focused Ion Beam; Hitachi FB-2000K) を用いて行う。試料作製に用いた加速電圧は 30 kV である。TEM/STEM 観察には、九州大学超高压電子顕微鏡室所有の CCD カメラと HAADF 検出器を備えた FEI Tecnai-F20 を加速電圧 200kV の条件で用いる。HAADF-STEM 観察および STEM-EDX 組成分析には、電子線プローブ径を約 0.3nm になる条件において、キンク境界近傍の観察ならびに元素分析を行う。

(2) 理論力学・計算力学解析手法

キンク変形帯の形成メカニズムと力学特性との関わりについて現象を駆動している力学場の観点から理論計算力学的なアプローチによって解明するために、転位やディスクリネーションを含む境界値問題として取り扱うための理論を定式化する。

さらに、キンク変形の幾何モデルを提案し、それを基礎とするばね質点モデルによる力学モデルを提案し、解析を行う。シミュレーションの利点を活用し、層間の強さなどの材料に固有の特性をパラメーターとして変化させてシミュレーションを行うとともに、弾性支持条件や変形速度などの外部の力学環境の違いによる影響を調べる。また方位差による固有エネルギーを考慮した拡張されたディスクリネーション双極子理論を具体化できる方法のひとつとして注目する。

4. 研究成果

(1) LPSO 相内のキンク帯の微細構造観察

キンク変形の微視的観察を実施するための試料として用いた Mg-Zn-Y 系 LPSO 合金は、18R と 14H の構造を有する LPSO 相、2H 構造の α -Mg および複数の金属間化合物で構成されていることが明らかになった。図 1(a) はキンク境界と金属間化合物が近傍に存在する領域の HAADF-STEM 像であり、図 1(b) はこの領域の模式図である。Mg-Zn-Y

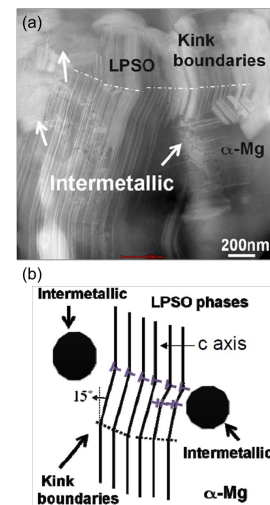


図 1 LPSO 相内のキンク境界と近傍の金属間化合物の HAADF-STEM 像 (a) とその模式図 (b)

系合金には多くの金属間化合物が存在することが明らかとなり、EDX 組成分析の結果、本研究で観察された金属間化合物は、六方晶構造を有する Mg-Zn-Y 系、Mg-Zn 系および Mg-Y 系であることが明らかとなった。図 1(a)より、LPSO 相はこれらの金属間化合物近傍で屈曲しており、キック境界を形成していることがうかがえる。すなわち、これらの金属間化合物は LPSO 相よりも硬質であり、熱的にも安定であると考えられ、押出時に LPSO 相がこれらの近傍でキック変形を起こしていることが示唆された。一般にキック帯などの変形帯は、不均一な活動すべりの結果、形成される。特にマグネシウムなどの六方晶構造を有する場合は、基本的には刃状 a 転位が底面に垂直に集合して形成される。すなわち、LPSO 相中のキック変形は底面すべりの活動が必要になるが、場所的に不均一なすべり変形が生じない限り、底面の湾曲すなわちキック変形は生じない。本研究で観察された金属間化合物は、LPSO 相の底面すべりの不均一性を助長することになり、キック帯形成にとって重要な因子であると結論づけられる。

図 2 は、 $Mg_{88}Zn_5Y_7$ 押出材を押出方向から圧縮変形を施した試料の TEM/STEM 像である。図 2(a) に示す TEM 明視野像から、LPSO 相が A と B で示される部分において大きく屈曲していることが明らかになった。同一領域の HAADF-STEM 像を図 2(b) に示す。屈曲した領域において多くのキック境界が形成されていることがわかる。特に領域 B では顕著である。図 2(b) の矢印で示した領域の EDX 線分析を行った結果、HAADF-STEM 像でも示されているようにキック境界において Zn/Y が濃化していることが明らかになった。この結果は、図 1 で示した押出材に形成されたキック境界の濃度分布とは逆の結果であった。図 2(c) と (d) は、図 2(a) で示した領域 A と B の高倍率の TEM 明視野像である。両領域とも試料を傾斜させることによって、キック境界面を観察面と垂直 (edge-on) の条件で観察している。両領域とも LPSO 相の底面屈曲が扇状に多数のキック境界を伴って生じていることが確認できた。このような多くのキック境界(ここでは、サブキ

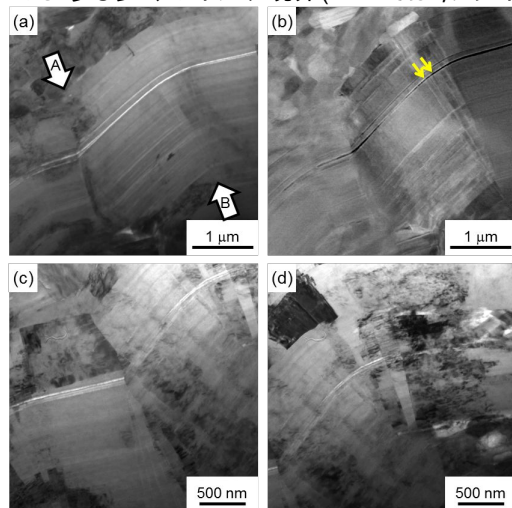


図 2 $Mg_{88}Zn_5Y_7$ 押出材を圧縮変形した時に形成されたキック境界近傍の BF-TEM 像 (a)、同一領域の HAADF-STEM 像 (b) および、(a) 内の領域 A と B のエッジオン条件で観察した、高倍率の BF-TEM 像 (c)、(d)

ック境界と呼ぶ)の方位差は、 $5 \sim 10^\circ$ であることも電子回折図形の解析により明らかになった。これらの境界とその周辺に見られる転位は LPSO 相の底面すべりと関係していることが明らかになり、キック境界の形成が底面すべりと関連していることが示唆された。

(2) 積層構造体の力学特性評価とキック変形解析

キック変形を底面の折れ曲りと捉えて「完全キック条件」と呼ぶ幾何学的条件を導いた。折れ曲がりを層間すべり (層に対するせん断成分の不連続変形) とはく離 (層に対する法線成分の不連続変形) と考える。これまでの研究をまとめると、もしこの折れ曲がりが層間のすべり変形のみで生じるとき、キック変形はディスクリネーション (回位) のみの時間発展として運動として表現することができる。一方、はく離変形は面内ソミグリアナ刃状転位の成分が 0 でなくなることを意味する。つまりキックの素過程は回位双極子であることを明らかにした。

また、力学的にはキック変形の開始は基本つまり合い経路上の様な変形様式がある負荷レベルあるいは変形量レベルを境に折れ曲がり変形に遷移する不安定化現象ととらえることができることを示した。キックの成長過程においては、幾何学的構造変化を考えることにより、キック変形の成長と飽和について分解せん断応力の変化から力学応答を表現できることを示し、折れ曲がりの角度依存項の強さによって形成されるキック帯の形状に変化があることを示した。さらに転位の集団挙動を意味するディスクリネーションを拡張した高次の格子欠陥理論を、超弾性体を用いた有限変形理論に基礎をおく有限要素法などで計算力学的に取り扱う拡張有限要素法的手法を提案し、時間発展モデリングに不可欠である駆動力を Configurational force として定式化できる可能性を示した。これらの理論的考察は実験結果をよく説明するものである。

以上の理論を用いて材料のミクロ特性とマクロ現象の関係を明らかにするためにばね質点モデルを用いたシミュレーションを実施した。解析の結果ひずみエネルギーがたくわえられ、その後、底面すべり変形が開始しエネルギーが解放される様子が観察された。図 4 に異なる三体力の強さを持つ材料の解析結果を比較して示す。色づけは底面の角度を意味している。図 4 から、曲げ剛性が 0 のモデルでは、細い Ortho 形キック帯が形成されていることがわかる。曲げ剛性の大きさが大きくなるとキック帯の幅がひろがり、リッジ形キック構造が現れるようになる。この非弾性変形が弾性変形からの分岐点が起点となって生じていると捉えると単純な座屈モデルでは試料形状の他に、曲げ剛性の大きさが座屈荷重と関係する。実際、非弾性変形の開始は case 1 が最も早く、case 3 が最も遅い。すなわち、case 1 に比べて、case 2 や case 3 は非弾性変形開始までに蓄えられる弾性エネルギーの量が多い。このことが不安定変形後を構造の違いと関係している可能性が示された。

一方、角度依存項の物理的意味は一般化連続体理論の非局所理論および偶応力理論とも関係がある。すなわち、リッジ形キック構造の形成を考察するには古典的な連続体モデルを拡張する必要があることを示唆している。つまり、角度依存ポテンシャルはキック界面の界面エネルギーを導入することにも対応しており、界面エネルギーがキック変形モードの決定に関係している可能性がある。

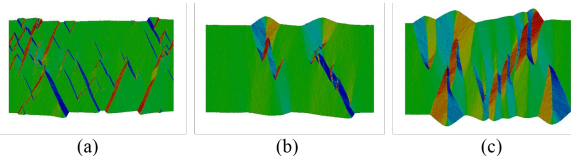


図. 4 ばねモデルの計算結果: (a) case 1, (b) case 2 and (c) case 3

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計 8 件)

1. 中谷彰宏, 雷 霄雯, シンク型LPSO構造の新展開—ミルフィーユ構造の変形機構と力学特性—, 金属, 第86巻, 第6号 (2016), pp. 486-492.
 2. X.-W. Lei and A. Nakatani, Analysis of kink deformation and delamination behavior in layered ceramics, Journal of the European Ceramic Society, Vol.36 (2016), pp. 2311-2317.
 3. Y. Doi and A. Nakatani, Structure and stability of discrete breather in zigzag and armchair carbon nanotubes, Letters on Materials, Vol.6, pp.49-53 (2016).
 4. X.-W. Lei and A. Nakatani, A deformation mechanism for ridge-shaped kink structure in layered solids, The American Society of Mechanical Engineers (ASME) Journal of Applied Mechanics, Vol.82 (2015), pp. 071016-1-6.
 5. H. Gao, K. Ikeda, T. Morikawa, K. Higashida and H. Nakashima, Analysis of kink boundaries in deformed synchronized long-period stacking ordered magnesium alloys, Materials Letters (2015) Volume 146, 1 May 2015, pp. 30-33
 6. M. Sato, T. Nakaguchi, T. Ishikawa, S. Shige, Y. Soga, Y. Doi and A.J. Seivers, Supertransmission channel for an intrinsic localized mode in a one-dimensional nonlinear physical lattice, Chaos, Vol.25 (2015), pp.103122.
 7. H. Gao, K. Ikeda, T. Morikawa, K. Higashida and H. Nakashima, Microstructures of Long-Period Stacking Ordered Phase of Mg-Zn-Y Alloy, Materials Transactions, Vol.54, No. 5 (2013) pp. 632-635.
 8. Y. Doi and A. Nakatani, Modulational instability of zone boundary mode and band edge modes in two-dimensional nonlinear lattices, Journal of Physical Society of Japan, Vol. 81 (2012), pp. 124402.
- 〔学会発表〕(計 59 件)
1. A. Nakatani and X.-W. Lei, Mathematical foundation of kink deformation in layered solids, The International Conference Advanced Materials Week - 2015 AMW 2015, Russia, Jun. 2015.
 2. A. Nakatani and X.-W. Lei, Analysis of kink deformation in layered structures using lattice defect model, Modelling and Simulation Meet Innovation in Ceramics Technology, Italy, Jul. 2015.
 3. X.-W. Lei and A. Nakatani, Analysis of kink deformation behavior in multilayered solid considering debonding, Modelling and Simulation Meet Innovation in Ceramics Technology, Italy, Jul. 2015.
 4. A. Nakatani and X.-W. Lei, Deformation of ridge-shape kink structure as material instability, 9th European Solid Mechanics Conference, Spain, Jul. 2015.
 5. X.-W. Lei and A. Nakatani, A continuum mechanics analysis of lattice defects in carbon nanotube, 9th European Solid Mechanics Conference, Spain, Jul. 2015.
 6. T. Ishimaru and A. Nakatani, Effect of distribution between stress and couple stress on Saint-Venant's decay rates for micropolar elastic solids in pure bending, 6th International Conference on Computational Methods (ICCM2015), New Zealand, Jul. 2015.
 7. X.-W. Lei and A. Nakatani, Microdynamics modeling for kink deformation and delamination in multilayered solid, 6th International Conference on Computational Methods (ICCM2015), New Zealand, Jul. 2015.
 8. Y. Doi and A. Nakatani, Stability analysis of discrete breathers in carbon nanotube, International Workshop Discrete Breathers in Crystals, Russia, Sep. 2015.
 9. Y. Doi, Mobility of discrete breathers in symmetric lattices, 10th Workshop on Energy Localization in Nonlinear Lattices, Japan, Sep. 2015.
 10. H. Nakashima, H. Gao, K. Ikeda, T. Morikawa and K. Higashida, Characteristic of Kink Deformation in Synchronized LPSO Mg Alloys, The 10th International Conference on Magnesium Alloys and Their Applications (Mg2015), Jeju, Korea, Oct. 2015.
 11. H. Gao, K. Ikeda, T. Morikawa, K. Higashida and H. Nakashima, Dislocation around Kink Boundaries of Long-Period Stacking Ordered Mg-Zn-Y Alloy, The 10th International Conference on Magnesium Alloys and Their Applications (Mg2015), Jeju, Korea, Oct. 2015.
 12. K. Ikeda, R. Nishio, H. Gao, S. Hata, H. Nakashima and S. Miura, Deformation Behavior of LPSO Phase in Mg-Zn-Y Alloy by Four-Point Bending Test using a Thin Sheet, The 10th International Conference on Magnesium Alloys and Their Applications (Mg2015), Jeju, Korea, Oct. 2015.
 13. H. Gao, K. Ikeda, T. Morikawa, K. Higashida and H. Nakashima: "Dislocations around kink boundaries of long-period stacking ordered Mg alloy" The 157th Conference of Japan Institute of Metals (2015).
 14. N. Higashiyama, Y. Doi and A. Nakatani, Nonlinear Vibration Property of Local Resonators in Dynamics of an Acoustic Metamaterial, 2015 International Symposium on Nonlinear Theory and its Applications (NOLTA2015), Hong Kong, Dec. 2015.
 15. Y. Doi and A. Nakatani, Dynamics of Discrete Breathers in Carbon Nanotube, 2015 International Symposium on Nonlinear Theory and its Applications (NOLTA2015), Hong Kong, Dec. 2015.
 16. 中谷彰宏, LEI Xiao-Wen, 回位双極子を用いたキック変形理論と応力解析, 日本機械学会 2015 年度年次大会, 北海道大学工学部, 2015.9.13-16
 17. 中谷彰宏, LEI Xiao-Wen, 積層構造体のリッジ形キック変形帯の形成機構, 日本金属学会 2015 年講演秋期大会 (第 157 回), 九州大学伊都キャンパス, 2015.9.16-18
 18. LEI Xiao-Wen, 中谷彰宏, アコーディオンキックモデルを用いたキック変形帯の形成と強化機構の解析, 日本金属学会 2015 年講演秋期大会 (第 157 回), 九州大学伊都キャンパス, 2015.9.16-18

19. 中谷彰宏, LEI Xiao-Wen, 回位理論によるキンク変形の形成機構, 日本機械学会第28回計算力学講演会 (CMD2015), 横浜国立大学, 2015.10.10-12.
20. A. Nakanani and X.-W. Lei, Disclination plasticity modeling for microscopic structure of kink deformation in magnesium alloy with lpsO structure, International Symposium on Plasticity 2014.
21. A. Nakatani and X.-W. Lei, Analysis of kink deformation using disclination model, In Proc. of 11th World Congress on Computational Mechanics (WCCM XI), 3501 (2014).
22. X. Wang and A. Nakatani, Finite element analysis of frictional properties of hierarchical ramification structure on a flat surface, In Proc. of the 5th International Conference on Computational Methods (ICCM2014), 358 (2014).
23. A. Nakatani and X.-W. Lei, Lattice defect model of kink deformation and configurational force, In Proc. of the 5th International Conference on Computational Methods (ICCM2014), 517 (2014).
24. Y. Doi and A. Nakatani, Stability of discrete breather on atomic scale in deformed carbon structures, IUTAM Symposium on Complexity of Nonlinear Waves, pp.43 (2014).
25. N. Higashiyama, Y. Doi and A. Nakatani, Nonlinear dynamics of a quasi-one-dimensional model of acoustic metamaterials, In Proc. of 2014 International Symposium on Nonlinear Theory and its Applications (NOLTA2014), pp.404-407 (2014).
26. Y. Doi and K. Yoshimura, Constructing a lattice model supporting highly mobile discrete breathers, In Proc. of 2014 International Symposium on Nonlinear Theory and its Applications (NOLTA2014), pp.401-403 (2014).
27. X.-W. Lei and A. Nakatani, Stress analysis of ridge-shaped kink structure in mg alloy with LPSO structure based on linear elasticity, In Proc. of International Symposium on Long-Period Stacking Ordered Structure and Its Related Materials 2014 (LPSO2014), Pos-29 (2014).
28. K. Ikeda, R. Nishio, H. Gao, S. Hata and H. Nakashima, Three-dimensional analysis of kink bands in LPSO phase by using FIB-SEM, Proc. of International Symposium on Long-Period Stacking Ordered Structure and Its Related Materials 2014 (LPSO2014), Pos-38 (2014).
29. H. Gao, K. Ikeda, T. Morikawa, K. Higashida and H. Nakashima, Dislocations analysis around kink boundaries of Mg-Zn-Y Alloy, Proc. of International Symposium on Long-Period Stacking Ordered Structure and Its Related Materials 2014 (LPSO2014), Pos-39 (2014).
30. Y. Doi and A. Nakatani, Dynamics and stability of nonlinear vibration modes in layered structure of magnesium, In Proc. of International Symposium on Long-Period Stacking Ordered Structure and Its Related Materials 2014 (LPSO2014), Pos-42 (2014).
31. Y. Doi, Nonlinear atomic energy localization in crystals, In Proc. of 15th Workshop on Fine Particle Plasmas (WFPP15), pp.5 (2014).
32. LEI Xiao-Wen, 中谷彰宏, 母相の影響を考慮した LPSO 相のキンク変形の格子欠陥解析, 第5回日本複合材料会議 (JCCM-5), キャンパスプラザ京都, 2014.3.6
33. 雷 霄雯, 中谷彰宏, キンク変形の格子欠陥モデルと配置力の解析, 日本金属学会 2014年春期講演大会 (第154回) 公募シンポジウムS4: 塑性異方性の強い結晶性材料のキンク変形ダイナミクスと強化機構, 東京工業大学大岡山キャンパス, 2014.3.21-23
34. 土井祐介, 神谷和典, 中谷彰宏, マグネシウム積層構造の非線形挙動と不安定性解析, 日本金属学会 2014年春期講演大会 (第154回) 公募シンポジウムS4: 塑性異方性の強い結晶性材料のキンク変形ダイナミクスと強化機構, 東京工業大学大岡山キャンパス, 2014.3.21-23
35. H. Gao, S. Tokunaga, K. Ikeda, T. Morikawa, K. Higashida and H. Nakashima, Analysis of Kink Boundaries in Synchronized LPSO Mg alloys, 日本金属学会2014年春期講演大会 (第154回) 公募シンポジウムS4: 塑性異方性の強い結晶性材料のキンク変形ダイナミクスと強化機構, 東京工業大学大岡山キャンパス, 2014.3.21-23
36. 松永慎太郎, LEI Xiaowen, 土井祐介, 中谷彰宏, 分子動力学法によるHCP金属の変形双晶の発生と成長のシミュレーション, 第19回分子動力学シンポジウム講演論文集, P26(USB) (2014).
37. LEI Xiao-Wen, 中谷彰宏, ディスクリネーション理論に基づいたリッジ形キンク構造の漸近応力場, 第63回理論応用力学講演会講演論文集, GS01-02-02 (2014).
38. 中谷彰宏, LEI Xiao-Wen, 回位と連続分布転位によるキンク変形のモデリング, 第58回日本学術会議材料工学連合講演会講演論文集, 424 (2014).
39. LEI Xiao-Wen, 中谷彰宏, リッジ形キンク構造の漸近応力場と境界値問題の解析, 日本機械学会講演論文集(第27回計算力学講演会), 2029 (2014).
40. 高紅葉, 西尾理恵, 池田賢一, 森川龍哉, 東田賢二, 中島英治, Mg系合金におけるキンクバンド周囲の転位組織観察, 軽金属学会 第127回秋期大会, 東京工業大学 (2014).
41. H. Gao, K. Ikeda, T. Morikawa, K. Higashida, H. Nakashima, Kink boundaries in long period stacking ordered phases of Mg-Zn-Y alloy, 第56回日本顕微鏡学会九州支部学術講演会, 宮崎市民プラザ (2014).
42. Y. Doi and A. Nakatani, Stability of nonlinear vibration modes in periodic structure of magnesium, International Symposium on Atomistic Modeling for Mechanics and Multiphysics of Materials 2013 (ISAM4 2013), L-2.
43. X. Wang and A. Nakatani, Cohesive zone analysis of crack propagation on a hierarchical structured interface, 13th International Conference of Fracture (ICF13), S08-11.
44. A. Nakatani and M. Akita, Finite deformation modeling of crystalline defects in hyper-elastic material, 13th International Conference of Fracture (ICF13), S08-38.
45. Y. Doi and A. Nakatani, Numerical study of nonlinear vibrations in layered structure in magnesium, 2013 International Symposium on Nonlinear Theory and its Applications (NOLTA2013), p. 226.
46. X.-W. Lei and A. Nakanani, An Extended Finite Element Analysis on Evolution of Disclination Structure, 5th Asia Pacific Congress on Computational Mechanics & 4th International Symposium on Computational Mechanics (APCOM & ISCM 2013), 1733.
47. X. Wang and A. Nakanani, Fracture Toughness of Discrete Structure and Hierarchical Ramification Structure, 5th Asia Pacific Congress on Computational Mechanics & 4th International Symposium on Computational Mechanics (APCOM & ISCM 2013), 1735.
48. A. Nakanani and X.-W. Lei, Disclination Modeling for Microscopic Structure of Kink Deformation Band, 5th Asia Pacific Congress on Computational Mechanics & 4th International Symposium on

Computational Mechanics (APCOM & ISCM 2013), 1737.

49. 土井祐介, 中谷彰宏, マグネシウム積層構造体における非線形振動とその不安定化, 日本材料学会第18回分子動力学シンポジウム, 東京工業大学 大岡山キャンパス, 2013.5.17
50. LEI Xiao-Wen, 中谷彰宏, ディスクリネーションの一般化力に関する検討, 日本機械学会第26回計算力学講演会, 佐賀大学 本庄キャンパス, 2013.11.3
51. 土井祐介, 中谷彰宏, マグネシウム積層構造の非線形フォノンモード解析, 日本機械学会第26回計算力学講演会, 佐賀大学 本庄キャンパス, 2013.11.3
52. Y. Doi and A. Nakatani, Modulational instability and chaotic breathers in two Dimensional Fermi-Pasta-Ulam lattices, In Proc. of 19th International Symposium on Nonlinear Acoustics (ISNA19), (2012) p. 77.
53. A. Nakatani, Analysis of kink-fold deformation based on disclination theory, In Proc. of 23rd International Congress of Theoretical and Applied Mechanics (ICTAM2012), (2012) SM13-039.
54. Y. Doi, S. Ishikawa and A. Nakatani, Numerical study on structure and stability of phonon modes in a model of layered structure of magnesium, In Proc. of International Symposium on Long-Period Stacking Ordered Structure and Its Related Materials 2012 (LPSO2012), (2012) Pos-22(CD-ROM).
55. H. Gao, K. Ikeda, T. Morikawa, K. Higashida and H. Nakashima, Microstructures of Long Period Stacking Ordered Structure of Mg-Zn-Y Alloy, In Proc. of International Symposium on Long-Period Stacking Ordered Structure and Its Related Materials 2012 (LPSO2012), (2012) Pos-31(CD-ROM).
56. A. Nakatani, Analysis of kink-fold deformation in single slip model based on higher-order lattice defect theory, In Proc. of 4th International Conference on Computational Method (ICCM 2012), (2012) 195 (USB).
57. 土井祐介, 石川省吾, 中谷彰宏, 経験的ポテンシャルを用いたマグネシウム周期積層構造の振動モード解析 第17回分子動力学シンポジウム講演論文集, (2012), P29(USB). 東京大学生産技術研究所, 2012.6.5
58. 中谷彰宏, 秋田光広, 回位場によるキンク変形モデリング, 軽金属学会第123回秋期大会, 千葉工業大学津田沼キャンパス, 2012.11.10-11
59. 土井祐介, 神谷和典, 石川省吾, 中谷彰宏, 経験的ポテンシャルを用いたマグネシウム積層構造体のフォノン構造と安定性解析, 軽金属学会第123回秋期大会, 千葉工業大学津田沼キャンパス, 2012.11.10-11

〔図書〕(計 1 件)

1. K. Yoshimura, Y. Doi and M. Kimura, Localized modes in nonlinear discrete systems, Progress in Nanophotonics 3 (M. Ohtsu and T. Yatsui (eds.)), pp.119-166 (2014).

6. 研究組織

(1)研究代表者

中谷 彰宏 (NAKATANI, Akihiro)
大阪大学・大学院工学研究科・教授
研究者番号: 50252606

(2)研究分担者

中島 英治 (NAKASHIMA, Hideharu)

九州大学・大学院総合理工学研究院・教授
研究者番号: 80180280

(3)連携研究者

土井 祐介 (DOI, Yusuke)
大阪大学・大学院工学研究科・准教授
研究者番号: 10403172

池田 賢一 (IKEDA, Ken-ichi)
北海道大学・大学院工学研究院・准教授
研究者番号: 20335996

(4)研究協力者

雷 霄雯 (LEI, Xiao-Wen)
福井大学・学術研究院工学系部門・講師
研究者番号: 50726148

高 紅葉 (GAO, Hongye)
九州大学・大学院工学研究院・特任准教授
研究者番号: 60467884