

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 26 年 6 月 18 日現在

機関番号：14401

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2011～2013

課題番号：23656071

研究課題名(和文) 多重安定系の状態間遷移の非凸性に基礎をおく変形構造体の力学理論の確立

研究課題名(英文) Establishment of theory on deformable body mechanics based on non-convexity of state transition in multistable systems

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) 2,800,000円、(間接経費) 840,000円

研究成果の概要(和文)：力を受けて変形する固体の形状変化を、ある安定点から別の安定点への遷移として理解する力学理論について研究しました。安定点近傍ではエネルギー下に凸の形状を有していますが、状態遷移が起こる領域では上に凸の形状を有しています。このような非凸性に着目し、様々なシステムのミクロな現象とマクロな性質との関係を明らかにできるマルチスケール理論に結びつく知見を得ました。

研究成果の概要(英文)：A theory of deformable body mechanics has been studied based on understanding the deformation of solid subjected to external force as a transition from one stable point to another stable point. While energy function with respect to variables of state has convex property in the vicinity of each stable point, some non-convex region exists in transition state between the stable points. Such non-convexity has been focused on to obtain essential understanding for establishment of multiscale theory which clarify a relationship between microscopic phenomena and macroscopic characters of the different systems.

研究分野：工学

科研費の分科・細目：応用物理学・工学基礎

キーワード：計算力学 変形体力学 不安定現象 連続体力学 シミュレーション

1. 研究開始当初の背景

多重安定性は、巨視的状态あるいは前提となる入力に対して複数の安定な状態をとりうる性質と理解することができる。このような複数の状態間の遷移は、古くから多くの研究者の関心を引き付けており、例えば座屈荷重(分岐点)の評価に代表されるような不安定化クライテリアを評価する研究はミクロ・マクロ問わず多数なされている。一方、国内外の研究を見ても、現象論やマクロ変形の比較的少数自由度の状態間遷移を扱った研究を除いて、多数の安定状態を有する系の時間発展を考慮して材料の非弾性的変形や破壊現象を統一的に、かつ、定量的に表現する目的で取り組まれた研究は、ほとんど見当たらない。

現在、様々な分野でマルチスケール理論の重要性が唱えられているが、その多くは既存の定式化の枠に縛られて困難に直面している、あるいは ad hoc 的な解決を余儀なくされている。このような理論上の困難を打破するとともに新しい原理の発見に結びつく研究が期待される。慣用的な連続体近似では、局所体積素の瞬間の安定状態の上に大域的な安定性が成り立つと考えて定式化がなされる場合が多いが、現実には、格子欠陥を含む結晶体や非晶質体など、局所的・瞬間的には不安定性(エネルギー面の非凸性)を有しているが大域的には安定性(凸性)を示している系が大半であり、局所構造の時間発展が大域的性質と密接に関係している。多重安定性の概念は、そのような系に対して、様々な研究者の頭の中には有りながら、力学理論の定式化に際しモデリングのノウハウとして暗黙的に用いられているにとどまっている。

2. 研究の目的

本研究課題は、変形体の非弾性特性をマクロ変数が規定された状態で多数の局所安定なミクロ状態をとりうる多重安定系の状態遷移によって記述する新しい連続体力学理論の定式化を行おうとするものである。背景に隠れた系としての多重安定状態の時間発展を陽に記述する定式化を行うことによって、現象論的支配方程式の素過程からの導出や、マルチスケール理論における粗視化の新しい方法論に結びつく知見を得ることを目的としている。多重安定性の概念をミクロレベルから陽的に記述し、マクロ特性をミクロ安定状態の汎関数とするような理論の構築を目指し、また、研究の過程で獲得される知見が、個々の分野の研究者の暗黙知として理解されている知見の共通点を見出し、分野の垣根を越えて力学現象解析の分野に新しい視点をもたらし、学術上の突破口を切り拓くと十分期待される。

3. 研究の方法

研究課題の目的を遂行するために、微視的現象と巨視的性質を対応づける理論・解析研

究を行う。研究期間の成果を具体的に以下の3つに大別して研究成果をまとめる。

(1) 微細構造を有するさまざまなシステム
微細構造を有するさまざまなシステムに現れる微視的現象と巨視的性質の関係を解明するためにマルチスケール解析に関する研究

(2) テンセグリティ構造体の解析

(3) 固体と液体の界面の安定性解析

4. 研究成果

(1) 微細構造を有するさまざまなシステムについて、微視的構造の不安定性が巨視的な特性に与える影響する系の性質を検討した。

(i) 軟化再硬化特性、すなわち二つの局所安定点を有する構成関係式を用いて局所不安定の伝ば機構に関する有限要素解析を行った。結果が幾何学的な制約条件と力学的平衡条件により予測される簡易モデルにより再現できることを明らかにした。

(ii) 間欠泉のパターン形成について垂直管モデルを用いた物理シミュレーションと修正ロトカ・ボルテラモデルによる数理的検討を行った。加える熱流束と入り口の流速に依存して現れる噴出様式の違い(図1)について次元解析と数理モデルによる解の性質の観点から明らかにした。

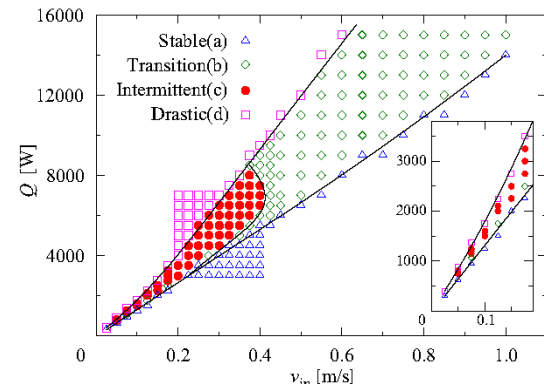


図1 間欠泉を模擬した鉛直管の噴出様式(入口流速と加熱量により、(a)安定、(b)定常への遷移、(c)間欠的振動、(d)発散に分類できる)

(iii) 選択的二状態遷移による多分子モーターモデルの運動特性解析を行い、無負荷、負荷時の応答を、拡散の微視的理論により整理できることを明らかにした。

(iv) 均質化理論を用いて液相を有する多孔質体の変形解析の定式化と解析を行い、微視的内部構造の違いによるマクロ特性の評価を行うことができることを示した。

(v) 微視的内部構造と巨視的物体形状というスケールの異なる寸法パラメータによって規定される物体の弾塑性有限要素解析を行い、局所的な不安定変形と大域的な不安定変形との間の遷移のメカニズムを明らかにした。

(vi) 微細な離散構造を有する表面の摺動

摩擦特性解析を実施し、マイクロな摩擦則がマクロな摩擦則に与える影響について検討を行い、マイクロ構造の離散性・階層性がマクロな摩擦則に与える影響を明らかにした。

(2) テンセグリティ構造体の解析

多重安定テンセグリティの状態遷移に基礎をおく力学理論の定式化を進めた。テンセグリティ構造に対して複数の安定状態が存在することを見出し、そのエネルギーを評価した(図2)。さらにこの多重安定テンセグリティ構造に対して状態遷移間の最小エネルギー経路をNEB法や節点拘束法により評価することができた(図3)。

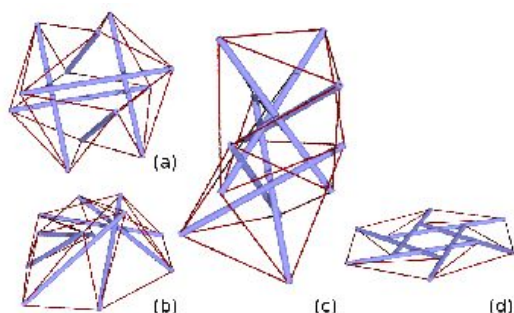


図2 6剛部材 24柔部材テンセグリティの構造 (a), (b), (c)は安定配置、(d)は自己釣合状態を形成)

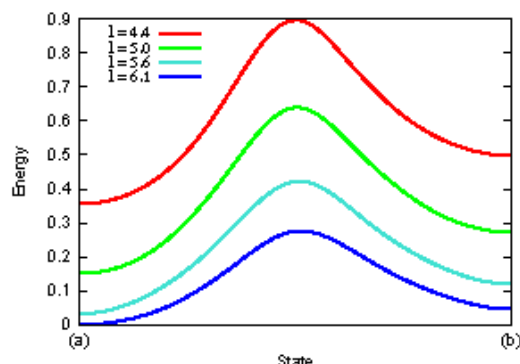


図3 二つの安定状態の間の遷移に必要なエネルギーに関する考察の例

また、狭窄部を通過するテンセグリティ構造に対して変形とひずみエネルギーの変化を調べた。拘束条件を考慮したエネルギー最小化法による評価と、粘弾性系の運動方程式を用いた時間発展シミュレーションを実施し、状態遷移の非凸性に由来する変形メカニズムの違いが現れることを明らかにした。

(3) 固体と液体の界面の安定性解析

固体表面の曲率とその変化を利用した水滴の安定性の向上や輸送の駆動力の発生に関する検討を行った。表面張力、界面エネルギー、物体力などの力学的要因、幾何学的要因を考慮した支配方程式を導出し、フェーズフィールド法を用いて水滴の形状決定と安定性解析を行った。

さらに、微細な表面構造を有する固体と液体の接触現象に関するフェーズフィールドシミュレーションを行った(図5)。具体的には周期境界条件を適用した系を用いて、球面の固体に強制変位を与え、水面の形状と系のエネルギーを評価した(図6)。得られた解析結果に、水面に浮く固体の物体力に対するポテンシャルを考慮することにより、安定から不安定への遷移をエネルギー曲面の非凸性から明らかにした。

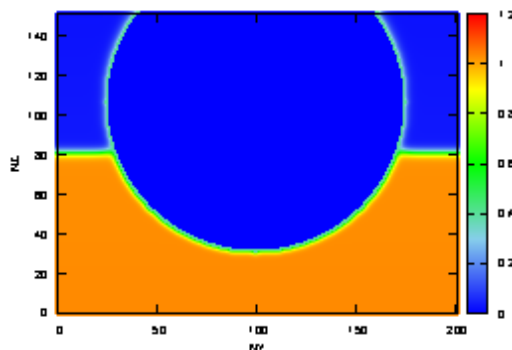


図4 球形固体と液面との接触に関するフェーズフィールドシミュレーション

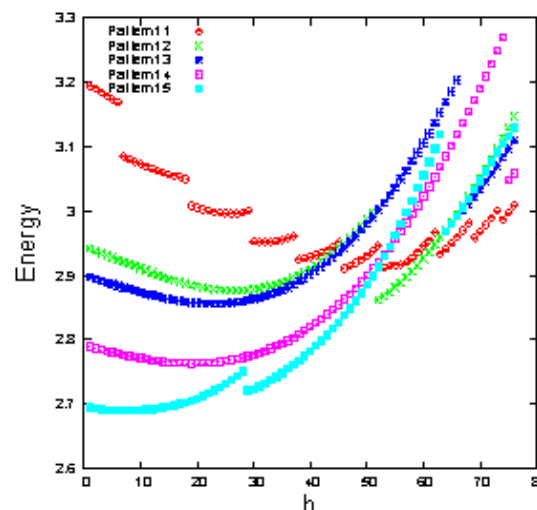


図5 さまざまな寸法に対する固体の変位とエネルギーの関係の例

以上の研究成果から新しい理論の基礎を構築することができた。今後、より多自由度の構造マイクロ原子スケールから、メゾ格子欠陥スケール、マクロスケールまでを結びつけるマルチスケールモデルへの応用が期待される。引き続き、基礎理論の定式化を進めるとともに具体的な問題に対する適用可能性を示すことにより新しい学問分野の開拓につながると期待される。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文](計4件)

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, 査読有, Vol.81 (2012), 124402 (9pages) (DOI: 10.1143/JPSJ.81.124402)

Y. Doi and A. Nakatani, Numerical study on unstable perturbation of intrinsic localized modes in graphene, Journal of Solid Mechanics and Materials Engineering, 査読有, Vol.6 (2012), 70-81 (DOI: 10.1299/jmmp.6.71)

A. Nakatani, Analysis of interaction between dislocation and grain boundary by using a lattice defect model, Procedia Engineering, 査読無, Vol.10 (2011), 1047-1052 (DOI: 10.1016/j.proeng.2011.04.173)

Y. Doi and A. Nakatani, Structure and stability of nonlinear vibration mode in graphene sheet, Procedia Engineering, 査読無, Vol.10 (2011), 3393-3398 (DOI: 10.1016/j.proeng.2011.04.559)

〔学会発表〕(計 34 件)

中谷彰宏、格子欠陥モデルを用いた変形体の力学理論の記述、京都大学構造材料元素戦略拠点平成 25 年度第 1 回シンポジウム(招待講演)、2013.6.14、京都市

中谷彰宏、材料の微視的構造に着目した階層的力学モデリング、日本ゴム協会第 15 回ゴムの力学研究分科会(招待講演)、2013.8.22、大阪市

Y. Doi, 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), 2013.7.24, Tokyo

A. Nakatani, M. Akita, Finite deformation modeling of crystalline defects in hyper-elastic material, 13th International Conference of Fracture (ICF13) (Keynote Lecture), 2013.6.16-21, Beijing, China

A. Nakatani, Disclination plasticity modeling for microscopic structure, Colloquium Spring 2014 University of Puerto Rico Mayaguez Campus(招待講演), 2014.1.10, Mayaguez, Puerto Rico

中谷彰宏、ミクロ・メゾ力学モデリングによる積層構造体のキック変形機構の表現、日本機械学会 2013 年度年次大会(招待講演) 2013.9.9-11、岡山市

X. Wang, A. Nakatani, Cohesive zone analysis of crack propagation on a hierarchical structured interface, 13th International Conference of Fracture (ICF13), 2013.6.16-21, Beijing, China

X. Wang, A. Nakatani, 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), 2013.12.11, Singapore

X. W. Lei, A. Nakatani, 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), 2013.12.11, Singapore

A. Nakatani, 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), 2013.12.11, Singapore

X. W. Lei・中谷彰宏、微視的階層構造を有する界面の破壊力学に関する研究、日本機械学会第 26 回計算力学講演会、2013.11.3、佐賀市

王孝汝・土井祐介・中谷彰宏、微視的階層構造を有する界面の破壊力学に関する研究、日本機械学会第 26 回計算力学講演会、2013.11.3、佐賀市

秋山拓也・土井祐介・中谷彰宏、くりこみ群を用いた非弾性結合法則の粗視化法の検討、日本機械学会関西支部第 89 期定時総会講演会、2014.3.18-19、堺市

木下光太郎・X.W. Lei・土井祐介・中谷彰宏、有限変形理論に基づく格子欠陥の配置力の評価と安定構造の解析、日本機械学会関西支部第 89 期定時総会講演会、2014.3.18-19、堺市

札幌翔太・王孝汝・土井祐介・中谷彰宏、微細な離散構造を有する表面の摺動摩擦特性解析、日本機械学会関西学生会卒業研究発表講演会、2014.3.17、堺市

松永慎太郎・X.W. Lei・土井祐介・中谷彰宏、分子動力学法を用いた変形双晶の成長過程の解析、日本機械学会関西学生会卒業研究発表講演会、2014.3.17、堺市

松岡興二・土井祐介・中谷彰宏、微細な表面構造を有する固体と液体との接触現象に関する研究、日本機械学会関西学生会卒業研究発表講演会、2014.3.17、堺市

中谷匡志・X. W. Lei・土井祐介・中谷彰宏、すべり変形および双晶変形により誘起される弾性波の解析、日本機械学会関西学生会卒業研究発表講演会、2014.3.17、堺市

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 回分子力学シンポジウム、2012.6.5、東京都

Y. Doi, S. Ishikawa, A. Nakatani, Numerical study on structure and stability of phonon modes in a model of layered

structure of magnesium, International Symposium Long-Period Stacking Ordered Structure and Its Related Materials 2012, 2012.10.1-10.3, Sapporo.

②土井祐介・神谷和典・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12回秋期大会、2012.11.10、習志野市

②山田郁美・土井祐介・中谷彰宏、曲率を有する固体表面に接触する水滴形状とその安定性の解析、日本機械学会関西学生会卒業研究発表講演会、2013.3.15、大阪市

②谷田幸宏・土井祐介・中谷彰宏、内部構造を有する弾塑性体の形状に起因する不安定性に関する研究、日本機械学会関西学生会卒業研究発表講演会、2013.3.15、大阪市

②松本卓紘・土井祐介・中谷彰宏、多重安定性テンセグリティの安定性と状態遷移に関する解析、日本機械学会関西学生会卒業研究発表講演会、2013.3.15、大阪市

②土井祐介・中谷彰宏、原子モデルによるマグネシウム積層構造の有限振動特性解析、日本金属学会春期大会、2013.3.27、東京都

②A. Nakatani, Plasticity of crystal rotation based on a disclination theory, 2011 World Congress on Advances in Structural Engineering and Mechanics (ASEM'11+), 2011.9.21, Seoul, South Korea

②T. Ogawa, H. Liu and A. Nakatani, Application of multi-scale modeling to deformation of metal under uniaxial torsion, International Symposium on Disaster Simulation & Structural Safety in the Next Generation 2011 (DS'11), 2011.9.18, Suita, Osaka, Japan

②中谷彰宏、自由度の束縛の視点からみた素過程と粗視化、第1回マルチスケールマテリアルモデリングシンポジウム(基調講演)、2011.5.24、吹田市

②奥山真司・土井祐介・中谷彰宏、間欠泉の噴出様式とその形成メカニズムに関する検討、第1回マルチスケールマテリアルモデリングシンポジウム、2011.5.23、吹田市

②奥山真司・土井祐介・中谷彰宏、間欠泉の噴出様式に現れるパターン現象のマルチスケール数理モデルによる研究、日本機械学会関西支部第87期定時総会講演会、2012.3.16、吹田市

②國枝直弘・土井祐介・中谷彰宏、選択的二状態遷移による多分子モーターの運動特性の解析、日本機械学会関西支部第87期定時総会講演会、2012.3.16、吹田市

②劉賀彬・土井祐介・中谷彰宏、軟化再硬化特性を有する弾塑性体の局所変形伝ば機構に関する有限要素解析、日本機械学会関西支部第87期定時総会講演会、2012.3.16、吹田市

②秋山拓也・土井祐介・中谷彰宏、多孔質体の固液連成解析による力学特性の評価、日本機械学会関西学生会卒業研究発表講演会、

2012.3.15、吹田市

②奥山真司・土井祐介・中谷彰宏、間欠泉のリズムに関する物理シミュレーションと数理モデルに関する検討(招待講演)、日本応用数理学会2012年研究部会連合発表会、2012.3.9、福岡市

〔図書〕(計1件)

中谷彰宏(日本機械学会編、分担)、丸善、機械実用便覧 改訂第7版、(2011)、総1109ページ、pp.13-25

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) 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