

令和 6 年 6 月 6 日現在

機関番号：14401

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2020～2022

課題番号：20H02030

研究課題名(和文) 微視回転型不安定機構と予応力場を内在する力学的メタマテリアルの粗視化計算固体力学

研究課題名(英文) Coarse-grained computational solid mechanics for mechanical metamaterials driven by micro-rotational instabilities incorporated with pre-stress fields

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

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 12,800,000円

研究成果の概要(和文)：微視的内部構造の不安定機構と予応力場を有する材料に現れる特異な変形と、非線形性の強い力学現象に焦点を当て、粗視化計算力学理論の構築と、計算機シミュレーションによる妥当性確認を行なった。具体的に、(1) 微視的構造の不安定性とマクロ特性との関係の解明、(2) 成長する固体の変形理論の定式化と付加製造により生じる予応力場の形成過程の解明、(3) 面外回転不安定挙動を生む液体と固体の相互作用に起因する駆動力評価、(4) 力学的メタマテリアルの粗視化計算固体力学モデルの構築である。研究を通じて、メタマテリアルの設計論につながる知見を見出し、不安定現象を機能に活かす方法論の礎を築くことに成功した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

ミクロ構造の形態や要素の特性に関連して生じる強い非線形性を伴って現れる不安定化現象は、直ちにマクロな機能の喪失につながるのではなく、むしろ、新しい機能の発現に結びつくことを見出し、階層性を有する構造体の知的な潜在的能力としての不安定性の積極的意義の重要性を示した。硬さと丈夫さを兼ね備えた真珠層の力学特性の理解から、皮ふのしわの形成メカニズムまでに至る成果から、不安定性が自然界や人工物の様々なスケールの多様な構造に見られる普遍的な性質であることを明らかにした。得られた知見には、理工学のみならず、生命科学へのインパクトや学術的意義、さらには広い学術的分野の裾野をカバーする社会的意義が見い出せる。

研究成果の概要(英文)：We focused on unique deformations of materials with instability mechanisms of microstructures and prestress fields, as nonlinear mechanical phenomena. Coarse-grained theory for computational mechanics was established and validated through simulations. Specifically, the study includes (1) Relationship between instability mechanisms of microstructures and macroscopic properties, (2) Deformation theory of growing solids was formulated, and the process of formation of prestress fields due to additive manufacturing, (3) Driving forces resulting from the interaction between liquids and solids that induce out-of-plane rotation instability were evaluated. (4) Coarse-grained computational solid mechanics model for mechanical metamaterials. Through the research activities, insights relevant to the design of metamaterials were obtained, and fundamental methodologies for computer-aided engineering that utilizes instability phenomena in macroscopic functions were successfully established.

研究分野：工学

キーワード：変形体力学 計算力学 不安定性理論 マルチスケール理論 メタマテリアル

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

微細な内部構造を有する材料システムの中で、予応力場と微視回転型不安定機構を内在する力学的メタマテリアルのミクロ現象とマクロ特性の関係を記述する粗視化計算力学解析法の定式化とその実証を行うことを目的とする。特に、付加製造技術による造形プロセスを念頭に、その機構設計だけでなく、造形中に力学環境を変化させることによって応力場を織り込んだ予応力設計法を新たに発明し、力学的不均一性と幾何学的なミクロ運動の束縛の両面から研究を行い、メタマテリアル創製のための計算機援用工学技術の礎を築く。マクロ特性・機能を発現するミクロ構造を設計する手法にブレークスルーをもたらすことを目指してメカニズムを探究する。

2. 研究の目的

微細な内部構造を有する材料システムの中で、予応力場(能動的・積極的に導入する場の意味で、残留応力場とは区別してこう呼ぶ)と微視回転型不安定機構を内在する力学的メタマテリアルのミクロ現象とマクロ特性の関係を記述する粗視化計算力学解析法の定式化とその実証を行うことを目的とする。特に、付加製造技術による形態創製プロセスを念頭に、その機構設計だけでなく、造形中に力学環境を変化させることによって応力場を織り込んだ予応力設計法を新たに発明し、力学的不均一性と幾何学的なミクロ運動の束縛の両面から研究を行い、内部構造の不安定性を積極的に応用するためのメタマテリアル創製のための計算機援用工学技術の礎を築く(文献を参照)。

本報告書では、この研究目的のために実施した研究を、次の

- (1) 微視的な構造の不安定化機構とマクロ特性との関係性の解明
 - (2) 成長する固体の変形理論の定式化と付加製造によって生じる予応力場の形成過程の解明
 - (3) 面外回転不安定変形を生じさせる液体と固体の相互作用に起因する駆動力の評価
 - (4) 力学的メタマテリアルの粗視化計算固体力学モデルの構築
- の4つの研究項目に整理して報告する。

3. 研究の方法

(1) 微細な内部構造の形態が時間発展する材料システムを対象に、その内部構造とマクロな力学応答の関係性を明らかにするために、セル・オートマトン (CA)による微視的内部幾何構造の時間発展と、微視的内部構造を有する周期的セル構造体の変形シミュレーションを実施する。

(2) 力学的メタマテリアル造形装置により、面内・面外回転機構を有するセル構造体のプロトタイプを造形し、変形理論の礎となる変形を見出す。加えて、付加製造による予応力場の付与の可能性を検討するために、成長する固体の変形論の基礎を定式化する。

(3) 付加製造によって作られる積層構造体の表面不安定挙動の理解のため、液体の表面張力と薄膜のしわ(リンクル)発生に関する研究を行う。特に、液相と固相の相互作用を駆動力とする力学現象のフェーズフィールドモデルについて定式化およびシミュレーションによる研究を行う。

(4) 微視構造として硬質相と軟質相がスタッガード構造を構成する真珠層類似材料について、粗視化モデルと構造モデルからなるハイブリッドモデルによる計算力学モデルを提案し、力学特性と強靱化に関する研究を行なう。特に、モードI開口型の巨視的き裂先端近傍の強い応力こう配を有する弾性特異場において、小規模降伏の仮定を満たす損傷条件下での微視的変形とき裂進展パターンについて、界面の接線方向と垂直方向の結合強度比、および微視構造を構成する硬質材のアスペクト比をさまざまに変化させた条件下で計算機シミュレーションを実施する。

4. 研究成果

(1) 外力下での内部構造の時間発展についてCA解析を行い、局所の応力状態に基礎をおく様々なクライテリアを設定しパラメータ研究を行った。また、周期的セル構造体の解析によって、単位構造の力学応答や、不安定化が、マクロな力学応答にどのように影響するかを明らかにした(文献を参照)。多くの材料で、外部からの力学的負荷の増大に対して、塑性変形・損傷・局部破壊として現れる非弾性挙動は、不安定性を伴うが、局所的な応力を緩和させることは従来からよく知られている。本研究では、そのメカニズムを駆動する力学情報を積極的に活用することにより、生物にみられるようなある種の適応メカニズムを設計できることを示すことができた。また、そのようなメカニズムを能動的に発現する目的で積極的に内部予応力場を付与するための指針につながる知見を得た。

(2) 力学的メタマテリアル造形装置による付加製造を応用し、力学環境を変化させながら付加製造を行う過程の試作機を製作し、プロトタイプモデルの実験を行なった。具体的に、3Dプリンタにおいてカットパターンを有する構造を造形し、この造形の途中で、物質付与を一時的に中

断し、圧縮変形の拘束を与えたのちに、積層を継続する過程を実現した。圧縮変形の拘束を取り除いた後の成形後の構造体は層ごとに残留応力が分布する自己釣合い状態であることが予想され、局所回転により自発曲率が付与されていることがわかった。この曲率変化は、予応力の解放や再分配についての理論解析による評価と定性的に一致することを明らかにした。

理論的検討においては、境界面に質量流束を仮定し、物体内部に質量の生成項を取り入れた開放系固体力学の定式化を行い、移動境界を含む初期値境界値問題としての定式化を行なった。その応用として、変動する内・外圧を受ける円筒の成長問題のシミュレーションを通じて残留応力場の形成過程を解明した。結論として、検討した現象のいずれもが、非適合性という観点をから統一的に論じることができることを明らかにした。

(3) 表面張力に起因する薄膜のしわの発生機構(文献を参照)の駆動力の起源を表すモデルとして、液相と固相の相互作用によって生じる駆動される剛体板の微視的回転に関するフェーズフィールド解析を実施した。関連する研究として、ひとの顔の表情に応じて現れる表面の面内ひずみ、面外変位(文献を参照)に関して、運動解析装置による計測結果を変形理論によって定量化する方法の有効性を明らかにすることができた。

(4) 微視構造を有する材料の粗視化モデルとして直交異方弾性体モデルを提案し、その弾性特性を近似的に求める方法を提案し、異方性弾性論に基づいた線形破壊力学により評価されるエネルギー解放率の理論値が計算力学モデルで数値的に評価した J 積分値がよい一致を示すことを通じて、構造モデルと粗視化モデルのハイブリッドモデルの計算力学モデルとしての妥当性を確認した(文献を参照)。その上で、図1に示すように粗視化連続体モデルと微視構造モデルのハイブリッドモデルによるシミュレーションを実施した結果、破壊の微視的パターンは4つのカテゴリーに分類できることを明らかにし、結合強度比とアスペクト比をパラメータ空間とするメカニズムマップによって整理できることを示した。この研究で提案したマップはメタマテリアルの設計指針に有効な知見を導くと期待される。

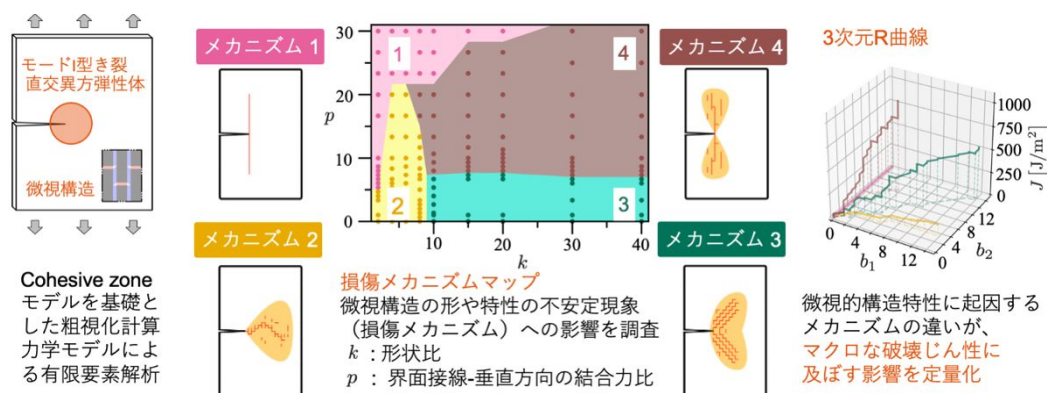


図1 真珠層類似材料の力学解析：粗視化モデルとシミュレーション、メカニズムマップの提案と靱性の評価

以上の研究を通じて、メタマテリアルの設計論につながる知見を見出し、ミクロな不安定現象を積極的にマクロな機能や特性に活かす計算機援用工学の方法論の礎を築くことに成功した。

引用文献

中谷 彰宏、非なるものへの挑戦：不安定現象を積極的かつ安全に利用するための力学、生産と技術、72巻、3号、2020、29-32

Yi Yan, Akihiro Nakatani, Crack sensitivity of nacre-like laminate composite materials: Monte Carlo simulation based on stability theory, International Journal of Solids and Structures, 202, 2020, 646-659

So Nagashima, Akihiro Nakatani, Capillary-induced wrinkle-to-fold transitions under biaxial compression, Langmuir, 37 (17), 2021, 5282-5289

Takeru Misu, Hisashi Ishihara, So Nagashima, Yusuke Doi, Akihiro Nakatani, Visualization and analysis of skin strain distribution in various human facial actions, Mechanical Engineering Journal, 10 (6), 2023, 23-00189 (1-21)

Xiaoyan Ye, Akihiro Nakatani, Computational study of the influence of microstructure on fracture behavior near crack-tip field in nacre-like materials, Mechanics of Materials, 195, 2024, 105034 (1-16)

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計6件（うち査読付論文 5件/うち国際共著 1件/うちオープンアクセス 3件）

1. 著者名 Ye Xiaoyan, Nakatani Akihiro	4. 巻 195
2. 論文標題 Computational study of the influence of microstructure on fracture behavior near crack-tip field in nacre-like materials	5. 発行年 2024年
3. 雑誌名 Mechanics of Materials	6. 最初と最後の頁 105034 (1~16)
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.mechmat.2024.105034	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 Takeru Misu, Hisashi Ishihara, So Nagashima, Yusuke doi, Akihiro Nakatani	4. 巻 10
2. 論文標題 Visualization and analysis of skin strain distribution in various human facial actions	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Mechanical Engineering Journal	6. 最初と最後の頁 23-00189 (1~21)
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1299/mej.23-00189	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 Nagashima So, Nakatani Akihiro	4. 巻 37
2. 論文標題 Capillary-Induced Wrinkle-to-Fold Transitions Under Biaxial Compression	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Langmuir	6. 最初と最後の頁 5282~5289
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1021/acs.langmuir.1c00347	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 Nagashima So, Yoon Sun Mi, Kim Do Hyun, Nakatani Akihiro, Moon Myoung Woon	4. 巻 9
2. 論文標題 Wrinkle Assisted Capillary Bridging for the Directed Assembly of Single Level DNA Nanowire Arrays	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Advanced Materials Interfaces	6. 最初と最後の頁 2102243~2102243
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1002/admi.202102243	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 Yan Yi, Nakatani Akihiro	4. 巻 202
2. 論文標題 Crack sensitivity of nacre-like laminate composite materials: Monte Carlo simulation based on stability theory	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 International Journal of Solids and Structures	6. 最初と最後の頁 646 ~ 659
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.ijsolstr.2020.06.043	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 中谷彰宏	4. 巻 72-3
2. 論文標題 非なるものへの挑戦：不安定現象を積極的かつ安全に利用するための力学	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 生産と技術	6. 最初と最後の頁 29 ~ 32
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 無
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21件（うち招待講演 1件 / うち国際学会 1件）

1. 発表者名 Hiroki Ono, Yusuke Doi, Akihiro Nakatani
2. 発表標題 Nonlinear energy transport in umklapp-free lattices with cubic and quartic nonlinearity
3. 学会等名 The 2023 International Symposium on Nonlinear Theory and Its Applications (NOLTA2023) (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 小野 弘貴、土井 祐介、中谷 彰宏
2. 発表標題 弾道的エネルギー輸送のための長距離非線形相互作用を有する格子モデルの構築
3. 学会等名 日本機械学会 2023年度年次大会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 大佐古 悠生、土井 祐介、中谷 彰宏
2. 発表標題 摺動と固着機能を持つテンセグリティ構造の力学シミュレーション
3. 学会等名 日本機械学会関西支部第99期定時総会講演会
4. 発表年 2024年

1. 発表者名 瀧川 拓己、中谷 彰宏、土井 祐介、永島 壮
2. 発表標題 表面張力による固体と液体の相互運動のフェーズフィールド解析
3. 学会等名 日本機械学会関西支部第99期定時総会講演会
4. 発表年 2024年

1. 発表者名 下田 晃大、土井 祐介、中谷 彰宏
2. 発表標題 面外荷重を受けるリボン状の弾性体の曲げ変形による形状変化の解析
3. 学会等名 日本機械学会関西支部第99期定時総会講演会
4. 発表年 2024年

1. 発表者名 高木 悠登、大佐古 悠生、土井 祐介、中谷 彰宏
2. 発表標題 不均一な初期張力分布を有するテンセグリティ構造体の非線形解析
3. 学会等名 日本機械学会関西支部2023年度関西学生会卒業研究発表講演会
4. 発表年 2024年

1. 発表者名 長縄 大世、叶 笑言、土井 祐介、中谷 彰宏
2. 発表標題 真珠層筒状構造体のき裂進展挙動の増分有限要素法解析
3. 学会等名 日本機械学会関西支部2023年度関西学生会卒業研究発表講演会
4. 発表年 2024年

1. 発表者名 阪口 敦、土井 祐介、中谷 彰宏
2. 発表標題 固有曲率を有する折り紙構造体の力学解析
3. 学会等名 日本機械学会関西支部2023年度関西学生会卒業研究発表講演会
4. 発表年 2024年

1. 発表者名 丸岡 漠、土井 祐介、中谷 彰宏
2. 発表標題 深層強化学習を適用したはりのたわみ制御に関する有限要素解析
3. 学会等名 日本材料学会第7回材料WEEK材料シンポジウム若手学生研究発表会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 永島 壮、中谷彰宏
2. 発表標題 水滴が接触する薄膜 - 基板系表面に生成する凹凸パターン
3. 学会等名 日本機械学会M&M2021材料力学カンファレンス
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 廣津 馨、新田 雄大、土井 祐介、中谷 彰宏
2. 発表標題 変形を積極的に利用した付加製造技術に関する基礎研究
3. 学会等名 日本機械学会2021年度関西学生会卒業研究発表講演会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 纈織 拓己、三須 龍、土井 祐介、永島 壮、中谷 彰宏
2. 発表標題 柔軟な基板に接着している薄膜に発生するしわの二次元パターンの比較
3. 学会等名 日本機械学会2021年度関西学生会卒業研究発表講演会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 和田 彪雅、土井 祐介、中谷 彰宏
2. 発表標題 表面張力により駆動される固体と液体の相互運動に関するフェーズフィールド解析
3. 学会等名 日本機械学会関西支部第98期定時総会講演会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 丸岡 漢、土井 祐介、中谷 彰宏
2. 発表標題 局所曲率変化に着目したはり構造体のスマート化に関する研究
3. 学会等名 日本機械学会関西支部第97期定時総会講演会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 新田 雄大、土井 祐介、中谷 彰宏
2. 発表標題 成長する固体の力学理論の定式化と残留応力場形成機構の解析
3. 学会等名 日本機械学会関西支部第97期定時総会講演会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 中谷 彰宏
2. 発表標題 ミクロ不安定性に基礎をおく機能構造の実現に向けた理論応用力学アプローチ
3. 学会等名 デジタル造形工学第一回フォーラム “異方性/等方性の視点から見たモノづくり” (招待講演)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 小池 康裕, 永島 壮, 土井 祐介, 中谷 彰宏
2. 発表標題 セル・オートマトンによる内部幾何構造の時間発展と力学特性に関する研究
3. 学会等名 日本機械学会関西支部第96期定時総会講演会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 石村 祐也, 中谷 彰宏, 土井 祐介, 永島 壮
2. 発表標題 双安定な微視的変形機構を内在する周期的セル構造体の力学特性評価
3. 学会等名 日本機械学会関西支部第96期定時総会講演会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 叶 笑言, 永島 壮, 土井 祐介, 中谷 彰宏
2. 発表標題 真珠層材料のじん性とき裂進展挙動の関係
3. 学会等名 日本材料学会第6回材料WEEK材料シンポジウム若手学生研究発表会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 石村 祐也, 永島 壮, 土井 祐介, 中谷 彰宏
2. 発表標題 内部変形機構に注目したセル構造体の力学特性評価
3. 学会等名 日本材料学会第6回材料WEEK材料シンポジウム若手学生研究発表会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 新田 雄大, 永島 壮, 土井 祐介, 中谷 彰宏
2. 発表標題 成長する固体の残留応力場形成過程の解析
3. 学会等名 日本材料学会第6回材料WEEK材料シンポジウム若手学生研究発表会
4. 発表年 2020年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

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
---------------------------	-----------------------	----

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0件

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
---------	---------