

令和 7 年 5 月 5 日現在

機関番号：13901

研究種目：挑戦的研究（開拓）

研究期間：2022～2024

課題番号：22K18284

研究課題名（和文）摂動解析の動的非線形化による凸凹パターン変態の全貌解明

研究課題名（英文）Elucidation of surface pattern transformation by nonlinear perturbation analysis

研究代表者

奥村 大（Okumura, Dai）

名古屋大学・工学研究科・教授

研究者番号：70362283

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 19,800,000 円

研究成果の概要（和文）：本研究では、摂動解析の動的非線形化による凸凹パターン変態の全貌解明を目的とする研究課題に取り組んでおり、得られた成果の概要は以下のようにまとめられる。1．リンクルークリース変態の機構解明、2．リンクルークリース変態に及ぼす表面張力の影響、3．リンクルークリース変態におけるI2不変量の影響とGent-Gentモデルを用いた影響因子解析、4．二層構造体表面の液滴によって駆動するリンクルーフールド変態の影響因子解析、5．二層構造体の基盤中の繊維構造の及ぼすパターン変態への影響。

研究成果の学術的意義や社会的意義

表面不安定はハード材料にとっては回避事項であるが、ソフト材料にとっては高性能な機能性の発現と関わっている。本研究では、これまで発生機構が明らかではなかった尖り点を有するクリースという表面不安定に対して摂動解析を動的非線形化することによってリンクルと呼ばれる既知の表面不安定現象からの繋がりを明らかにした。リンクルとクリースの間の変形経路が明らかになったことで、今後、クリースを制御するための研究や工学応用が新しく発展することが期待される。

研究成果の概要（英文）：This research focuses on elucidating the mechanism of surface pattern transformations induced by dynamic nonlinear perturbation analysis. The obtained results can be summarized as follows: 1. Clarification of the mechanism of wrinkle-crease transformation. 2. Influence of surface tension on wrinkle-crease transformation. 3. Analysis of influential factors in wrinkle-crease transformation using the I2 strain invariant and the Gent-Gent model. 4. Analysis of influential factors in wrinkle-fold transformation driven by droplets on a bilayer surface. 5. Influence of fiber structures embedded in the substrate of bilayer systems on pattern transformations.

研究分野：非線形固体力学

キーワード：固体力学 材料力学 分岐座屈 ゲル 高分子合成 不安定変形 パターン変態 形態制御

科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属します。

1. 研究開始当初の背景

凸凹パターン変態とは硬質膜中に作用する面内圧縮応力を駆動力として生じる表面不安定変形であり、2016年に非常に挑戦的な研究がフィンランド・フランス・アメリカの合同研究グループによって報告された [Tallinen et al., Nature Phys. (2016)]. 一般に高等生物ほど大脳皮質には複雑で細かなしわが形成され、大脳皮質の表面積増加に寄与している。彼らの検証実験では、高分子の膨潤を成長因子とみなすことによって脳の成長過程の再現実験が行われており、非常に類似した大脳皮質のしわ形成の再現に成功している。すなわち、進化の歴史において固体力学的貢献は相当に大きいことを期待させる結果である。したがって、生物の形態形成を固体力学的に再現し、機構を解明することは工学の枠組みを超えて非常に重要であり、将来的に生物を模倣した効率的かつ能動的なシステム開発を進める上でも挑戦的かつ重要な研究未開拓領域を提供している。

2. 研究の目的

軟質基盤上に硬質膜という組み合わせは、工業的に極めて重要であり(例えばダイヤモンド状炭素被膜)、自然界においても頻出する最も基本的な構成要素である。脊椎動物の大脳は大脳皮質という硬質膜で覆われており、生体中の皮膚や消化器官といったありふれた部位にも、類似の組み合わせを容易に見つけることができる。また、植物もこの基本構造で幹や枝、果実を形成している。凸凹パターン変態の解析を挑戦的研究とみなす理由は、この現象が単なるモノづくりの設計段階における回避事項ではなく、生物の進化や成長の歴史に極めて重要な役割を果たしているという検証実験に基づいている。進化の歴史に刻み込まれた固体力学的寄与の大きさや機構を明らかにすることは、工学の枠組みを超えて重要であり、将来的に生物模倣した能動的システム開発を進める上でも挑戦的で重要な研究未開拓領域を提供している。本研究では摂動解析を動的な非線形化することを新規に提案し、クリーズ変形の未解明問題を解決し、基礎的特徴を明らかにする。さらには材料非線形性や表面張力との相互作用によって多様に複雑化する凸凹パターン変態の全貌解明を達成する。

3. 研究の方法

成果によって異なるため、次章にて必要に応じてその都度、説明する。

4. 研究成果

この章では、得られた研究成果の中で代表的な内容について5つの節に分けて説明する。

(1) リンクルークリース変態の機構解明

摂動解析の動的な非線形化によってリンクル不安定の発生源からクリーズ不安定の発生源を結ぶ不安定経路の存在が明らかとなった。結果として、図1に示すような連鎖反応モデルが提案され、リンクルークリース変態の変形機構が合理的に説明できるようになった。

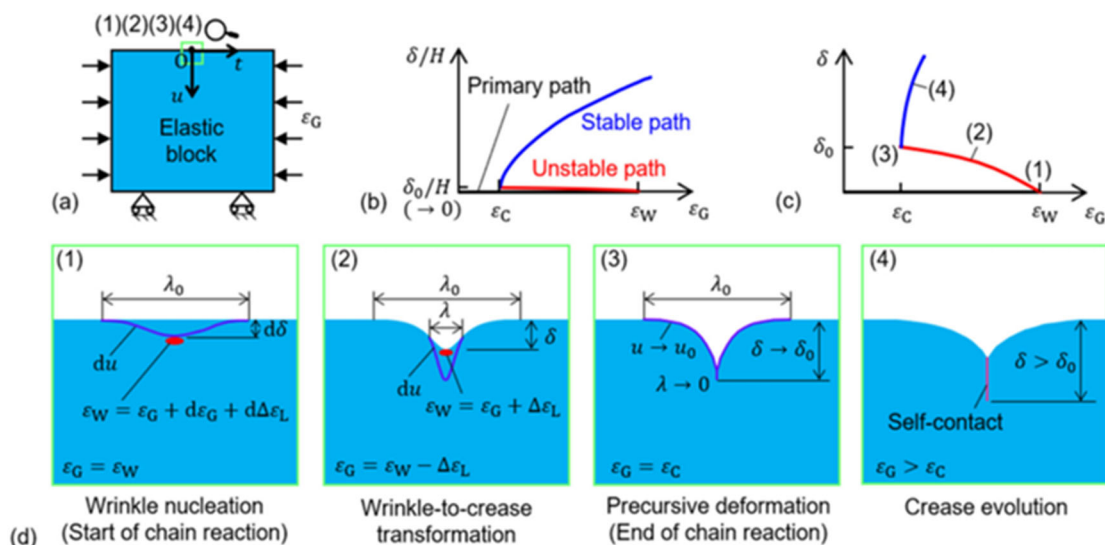


図1 連鎖反応モデルの概要。(a) 変態の発生源の座標と負荷状態、(b) 全体ひずみとクリーズ深さの全体図、(c) 全体ひずみとクリーズ深さの拡大図、(d) リンクルの連鎖発生によるクリーズ核の形成機構とクリーズ成長の説明図。

(2) リンクルークリース変態に及ぼす表面張力の影響

非連成解析によって表面張力の無次元量を用いてクリース発生ひずみを評価した。実験結果とも定性的に一致しており、定量的にもよい一致を示している。クリースの発生を遅らせる原因として、表面張力 ( $\gamma$ ) の増加、材料の剛性 ( $\mu$ ) の低下、膜厚 ( $H$ ) の減少が無次元量の関係にしたがって影響することがわかる。

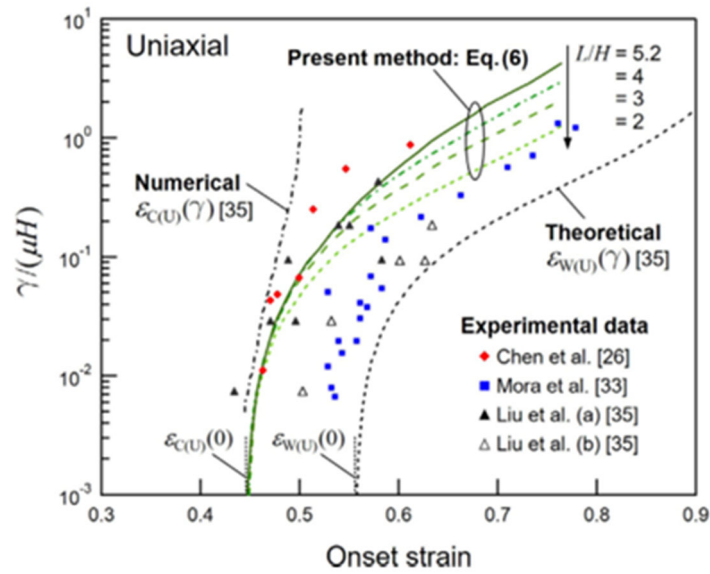


図2 無次元化された表面張力とクリース発生ひずみの関係。

(3) リンクルークリース変態における材料非線形性の影響

リンクルークリース変態における材料非線形性の影響を Gent-Gent モデルを用いて解析した。したがって、 $I_2$  ひずみ不変量の影響と分子鎖伸び切りの影響が調べられた。図3に示されるように負荷条件に依存して  $I_2$  ひずみ不変量 ( $\omega$ ) と分子鎖伸び切り ( $J_m$ ) はクリース発生ひずみに影響を及ぼすことが評価された。

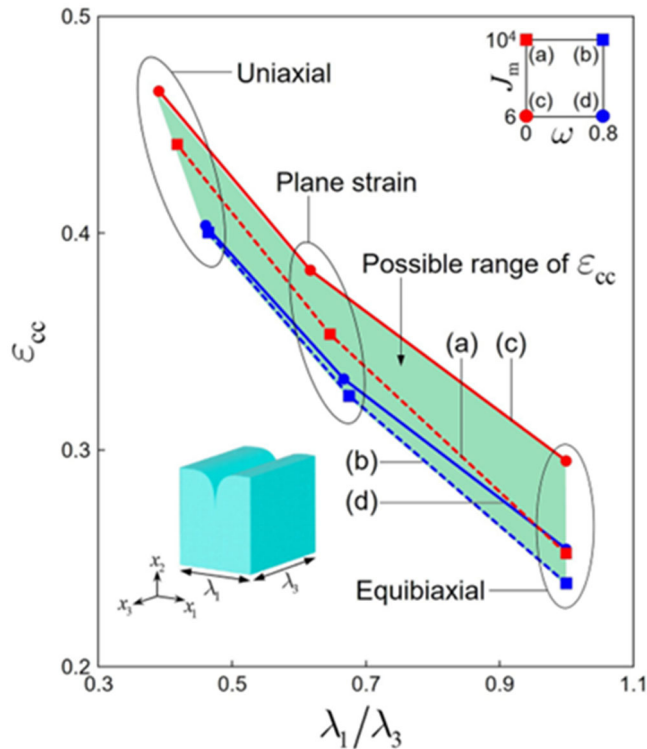


図3 負荷条件を関数とするクリース発生ひずみの関係。 $I_2$  ひずみ不変量 ( $\omega$ ) と分子鎖伸び切り ( $J_m$ ) の影響をパラメータとして図示されており、 $\omega$  が大きくなるにしたがって  $I_2$  不変量が主体的となり、 $J_m$  が小さくなるにしたがって分子鎖伸び切りのための伸びは小さくなる。

(4) 二層構造体表面の液滴によって駆動するリンクルフォールド変態の影響因子解析

二層構造体表面にリンクルが形成している状態にて、液滴が付着すると、リンクルフォールド変態が生じることが実験的に観察されていた。この未知の現象に対して、表面張力を影響因子と考へて有限要素解析を行った。図4に示すように液滴に付着によって表面張力の発生を想定すると、リンクル状態よりもフォールドと呼ばれる単一の深いしわの状態の方がエネルギー的に優位になることがわかった。パラメータ空間を網羅的に解析することによって、リンクルフォールド現象の解空間を明らかにした。

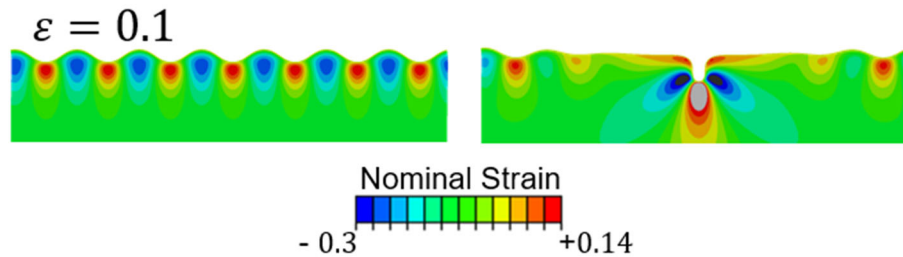


図4 液滴によって駆動するリンクルフォールド変態の有限要素解析。左図がリンクル、右図が中央部に液滴が付着することによって生じるフォールド変形。

(5) 二層構造体の基盤中の繊維構造の及ぼすパターン変態への影響

大脳皮質の表面パターンには白質内の軸索繊維が影響を及ぼしているといわれている。したがって、二層構造体を考えるときに基盤内の繊維構造が表面パターンを制御する支配因子と成り得ると考えられる。この現象を実験的に確かめるため、アクリルアミド水ゲルを用いて実験観察した。膜に座屈を誘起させるために、研究室で発見されたゲル化誘起パターン変態の機構が用いられた。図5に示すように、基盤内のパターンによって表面に現れるパターンの統計データには差が現れることが明らかとなった。一方、表面パターンには初期不整や境界の効果も影響するため、表面パターンを自在に制御するためにはより緻密な実験や事前の計算が必要であることが示唆された。

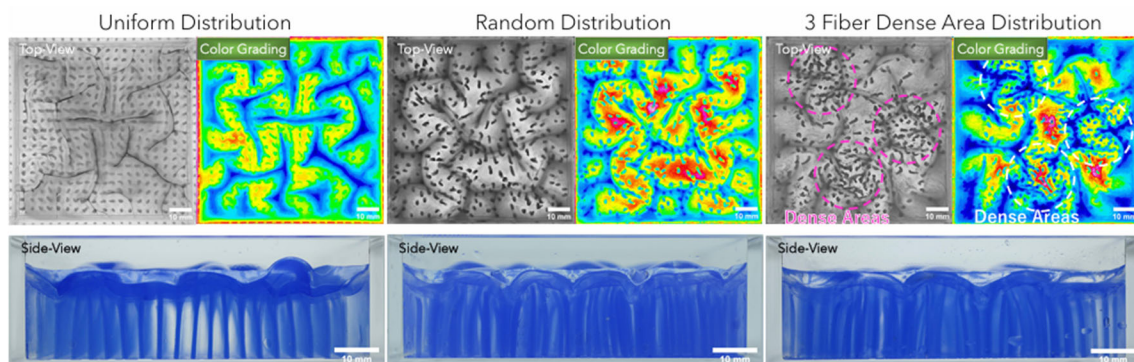


図5 基盤中の繊維構造が表面パターンに及ぼす影響の実験観察結果。左図は軸索が正方向配列する場合、中図はランダムに配列する場合、右図はクラスターを形成してランダムに配列する場合。

## 5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計10件（うち査読付論文 10件 / うち国際共著 0件 / うちオープンアクセス 5件）

1. 著者名 Matsubara Seishiro, Kobayashi Keijiro, Ishida Tatsuya, Nagashima So, Okumura Dai	4. 巻 280
2. 論文標題 Crease instability in Gent-Gent hyperelastic materials	5. 発行年 2024年
3. 雑誌名 International Journal of Mechanical Sciences	6. 最初と最後の頁 109549
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.ijmecsci.2024.109549	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, UCHIYAMA Wataru, HAYASHI Shunsuke, MATSUBARA Seishiro, OKUMURA Dai	4. 巻 11
2. 論文標題 Inhomogeneous instability patterns in polyacrylamide hydrogel bilayers	5. 発行年 2024年
3. 雑誌名 Mechanical Engineering Journal	6. 最初と最後の頁 24-00350
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1299/mej.24-00350	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 太田陸斗, 永島壮, 松原成志朗, 奥村大	4. 巻 24
2. 論文標題 水フィラメントに駆動されるリンクル・フォールド変態の数値解析	5. 発行年 2024年
3. 雑誌名 計算数理工学論文集	6. 最初と最後の頁 05-241213
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 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 岡村太暉, 松原成志朗, 永島壮, 奥村大	4. 巻 24
2. 論文標題 クリースの形成に及ぼすひずみ第二不変量の影響	5. 発行年 2024年
3. 雑誌名 計算数理工学論文集	6. 最初と最後の頁 06-241213
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 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 Matsubara, S., Ogino, A., Nagashima, S., Okumura, D.	4. 巻 288
2. 論文標題 Computational and physical aspects for the occurrence of crease in an elastomer under general loading conditions	5. 発行年 2024年
3. 雑誌名 International Journal of Solids and Structures	6. 最初と最後の頁 112610
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.ijsolstr.2023.112610	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 Ishida, T., Matsubara, S., Nagashima, S., Okumura, D.	4. 巻 298
2. 論文標題 Deformation in the wrinkle-crease transformation	5. 発行年 2024年
3. 雑誌名 International Journal of Solids and Structures	6. 最初と最後の頁 112876
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.ijsolstr.2024.112876	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 石田竜也, 永島壮, 松原成志朗, 奥村大	4. 巻 23
2. 論文標題 クリースの発達過程に対する影響因子の調査	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 計算数理工学論文集	6. 最初と最後の頁 143-148
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 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. Nagashima, N. Akamatsu, X. Cheng, S. Matsubara, S. Ida, H. Tanaka, M. Uchida, D. Okumura	4. 巻 39
2. 論文標題 Self-Wrinkling in Polyacrylamide Hydrogel Bilayers	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Langmuir	6. 最初と最後の頁 3942-3950
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1021/acs.langmuir.2c03264	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. Matsubara, A. Takashima, S. Nagashima, S. Ida, H. Tanaka, M. Uchida, D. Okumura	4. 巻 194
2. 論文標題 TIME-SWELLING SUPERPOSITION PRINCIPLE FOR THE LINEAR VISCOELASTIC PROPERTIES OF POLYACRYLAMIDE HYDROGELS	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Advanced Structured Materials	6. 最初と最後の頁 175-204
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 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 田中大地, 若林駿人, 松原成志朗, 永島壮, 奥村大	4. 巻 22
2. 論文標題 リッジパターン変態のプレストレッチ依存性と分岐座屈特性	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 計算数理工学論文集	6. 最初と最後の頁 117-121
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 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 -

〔学会発表〕 計23件 (うち招待講演 6件 / うち国際学会 9件)

1. 発表者名 Okumura, D.
2. 発表標題 Bifurcation and Deformation of Surface Instability
3. 学会等名 The Fifteenth Asia-Pacific Symposium on Engineering Plasticity and Its Applications (AEPA 2024) (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2024年

1. 発表者名 Okumura, D. Ishida, T., Matsubara, S., Nagashima, S.
2. 発表標題 Deformation in the wrinkle-crease transformation of a monolayer system
3. 学会等名 The 4-th International Workshops on Advances in Computational Mechanics (IWACOM-IV) (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2024年

1. 発表者名 奥村大
2. 発表標題 リンクルークリース変態の変形
3. 学会等名 日本機械学会材料力学部門2024年度第2回ゴムの材料力学に関する研究会（招待講演）
4. 発表年 2024年

1. 発表者名 奥村大
2. 発表標題 Bifurcations and Deformations of Surface Pattern Evolution
3. 学会等名 日本材料学会 第73期第3回塑性工学部門委員会（第1回塑性力学分科会）（招待講演）
4. 発表年 2024年

1. 発表者名 奥村大
2. 発表標題 構造と材料の分岐・座屈・不安定 - ハニカム構造の座屈から表面不安定まで -
3. 学会等名 第2回軽金属学会「キンク研究部会」（招待講演）
4. 発表年 2024年

1. 発表者名 Ohta, R., Nagashima, S., Matsubara, S., Okumura, D.
2. 発表標題 NUMERICAL ANALYSIS OF WRINKLE-TO-FOLD TRANSITIONS INDUCED BY WATER SURFCE TENSION
3. 学会等名 The 26th International Conference of the Theoretical and Applied Mechanics (ICTAM2024) (国際学会)
4. 発表年 2024年

1. 発表者名 Hayashi, S., Nagashima, S., Solhtalab, A., Matsubara, S., Razavi, M.J., Okumura, D.
2. 発表標題 Folding of a Thin Film on a Fiber-Incorporated Soft Substrate
3. 学会等名 IUTAM Symposium on Mechanics of Soft Materials and Soft Robots (国際学会)
4. 発表年 2024年

1. 発表者名 Okumura, D., Ishida, T., Matsubara, S., Nagashima, S.
2. 発表標題 Wrinkle-to-Crease Transformation on Unstable Deformation Path
3. 学会等名 ASME 2023 International Mechanical Engineering Congress and Exposition (IMECE2023) (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Okumura, D., Ogino, A., Matsubara, S., Nagashima, S.
2. 発表標題 Effects of surface tension on crease nucleation and evolution in an elastomer subjected to uniaxial, plane strain, and equibiaxial compressions
3. 学会等名 IUTAM Symposium Creep in Structures (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Matsubara, S., Ogino, A., Nagashima, S., Okumura, D.
2. 発表標題 Study on the effects of mesh resolution and surface tension on the occurrence of crease in an elastomer
3. 学会等名 The 7th Asia-Pacific International Conference on Computational Methods in Engineering (ICOME2023) & The 13th Chinese National Conference on Computational Methods in Engineering (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Ishida, T., Matsubara, S., Nagashima, S., Okumura, D.
2. 発表標題 Deformation in wrinkle-to-crease transformation
3. 学会等名 The 7th Asia-Pacific International Conference on Computational Methods in Engineering (ICOME2023) & The 13th Chinese National Conference on Computational Methods in Engineering (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 奥村大, 太田陸斗, 松原成志朗, 永島壮
2. 発表標題 リッジパターンの発現に至る第二分岐特性
3. 学会等名 日本機械学会 M&M2023材料力学カンファレンス
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 永島壮, 鈴木航, 松原成志朗, 奥村大
2. 発表標題 異方濡れ特性を有する階層凹凸パターンのボトムアップ形成
3. 学会等名 日本機械学会 M&M2023材料力学カンファレンス
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 程相輔, 永島壮, 松原成志朗, 奥村大
2. 発表標題 重合促進剤によるゲル化誘起パターンの制御
3. 学会等名 日本機械学会 M&M2023材料力学カンファレンス
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 太田陸斗, 永島壮, 松原成志朗, 奥村大
2. 発表標題 水の表面張力によるリンクル-フォールド変態の数値解析
3. 学会等名 日本機械学会計算力学講演会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 松原成志朗, 永島壮, 奥村大
2. 発表標題 膨潤エラストマーに対する高分子鎖の伸び切り効果を考慮した溶媒拡散・変形連成解析
3. 学会等名 日本機械学会計算力学講演会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 荻野敦也, 松原成志朗, 永島 壮, 奥村 大
2. 発表標題 クリースのスケール・メッシュ依存性に及ぼす負荷条件の影響
3. 学会等名 日本機械学会第35回計算力学講演会(CMD2022)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 中島大貴, 松原成志朗, 永島 壮, 奥村 大
2. 発表標題 ソフトマテリアルの表面不安定に及ぼす底面の影響
3. 学会等名 日本機械学会第35回計算力学講演会(CMD2022)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 石田竜也, 荻野敦也, 松原成志朗, 永島 壮, 奥村 大
2. 発表標題 リンクルからクリースへの変態制御のための非線形有限要素解析
3. 学会等名 日本機械学会最適化シンポジウム2022 (OPTIS2022)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 神 圭佑, 松原成志朗, 永島 壮, 奥村 大
2. 発表標題 チューブ内壁に生じるクリースの伝播及び間隔の制御
3. 学会等名 日本機械学会最適化シンポジウム2022 (OPTIS2022)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 奥村 大, 星 亮吾, 中島大貴, 松原成志朗, 永島 壮
2. 発表標題 切り欠きから伝播するクリースの周期間隔
3. 学会等名 日本機械学会M&M2022材料力学カンファレンス
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 松原成志朗, 高島 晃, 永島 壮, 伊田翔平, 田中 展, 内田 真, 奥村 大
2. 発表標題 ハイドロゲルの線形粘弾性特性評価のための時間・膨潤重ね合わせの原理
3. 学会等名 日本機械学会M&M2022材料力学カンファレンス
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 D. Nakajima, R. Hoshi, S. Matsubara, S. Nagashima, D. Okumura
2. 発表標題 Crease Nucleation and Propagation from a V-shaped Notch in an Elastomer
3. 学会等名 15th World Congress on Computational Mechanics (WCCM-XV) (国際学会)
4. 発表年 2022年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

<p>大学ホームページ  <a href="https://www.mech.nagoya-u.ac.jp/mml/">https://www.mech.nagoya-u.ac.jp/mml/</a>          Google Scholar  <a href="https://scholar.google.com/citations?user=uY5i9UkAAAAJ&amp;hl=en">https://scholar.google.com/citations?user=uY5i9UkAAAAJ&amp;hl=en</a>          Research Gate  <a href="https://www.researchgate.net/profile/Dai-Okumura">https://www.researchgate.net/profile/Dai-Okumura</a>          ORCID  <a href="https://orcid.org/0000-0002-4020-8258">https://orcid.org/0000-0002-4020-8258</a>          Web of Science  <a href="https://www.webofscience.com/wos/author/record/2271990">https://www.webofscience.com/wos/author/record/2271990</a>          大学ホームページ  <a href="https://www.mech.nagoya-u.ac.jp/mml/">https://www.mech.nagoya-u.ac.jp/mml/</a>          GoogleScholar  <a href="https://scholar.google.com/citations?user=uY5i9UkAAAAJ&amp;hl=en">https://scholar.google.com/citations?user=uY5i9UkAAAAJ&amp;hl=en</a>          ResearchGate  <a href="https://www.researchgate.net/profile/Dai-Okumura">https://www.researchgate.net/profile/Dai-Okumura</a>          ORCID  <a href="https://orcid.org/0000-0002-4020-8258">https://orcid.org/0000-0002-4020-8258</a></p>
--

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	永島 壮  (Nagashima So)  (80800317)	名古屋大学・工学研究科・准教授   (13901)	
研究分担者	松原 成志朗  (Matsubara Seishiro)  (40823638)	名古屋大学・工学研究科・助教   (13901)	2025.4より東北大学准教授

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