

科学研究費助成事業 研究成果報告書

令和 6 年 6 月 13 日現在

機関番号：13501

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2019～2023

課題番号：19K03766

研究課題名(和文) 生物の機能形態に学ぶ擬周期型材料の高機能化と物性応答操作

研究課題名(英文) Bio-inspired quasi-periodic materials: their functionalization and physical property control

研究代表者

島 弘幸 (SHIMA, HIROYUKI)

山梨大学・大学院総合研究部・教授

研究者番号：40312392

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,300,000円

研究成果の概要(和文)：本研究課題の目的は、植物をはじめとする生物一般に広くみられる擬周期構造の力学的合理性と潜在的な応用価値を体系的に書き下すことである。研究遂行の結果、中空茎構造をもつ植物種(タケ・イネ・フキなど)については、擬周期的な節分布に起因する力学機能と形態合理性の相関関係を実験と理論の両面から明らかにするとともに、その機能的形態の技術応用価値(タケを模した高剛性タワー構造、イネの倒伏耐性の向上方針)などを定量的に評価することができた。また、マスクメロン表皮の網目模様や樹木の樹皮にみられるひび割れ模様を詳細に解析した結果、亀裂ネットワークに潜む普遍的な幾何特性を破壊力学の観点から定式化することができた。

研究成果の学術的意義や社会的意義

分子生物学が発達した今日では、生物の備える形態と機能の多くが、遺伝子レベル・細胞レベルで緻密に制御されていることがわかっている。いっぽう、その一つ上の階層である組織レベルの形態と、そこに作用する各種のチカラ(重力・曲げ応力・膨圧・摩擦力など)は、絶妙な釣り合いを保ちながら時々刻々と変化する環境条件に適応しているはずである。本研究課題は、このような生物組織のカタチとチカラが織りなす機能美を、基礎科学の視点から掘り起こしたものである。その成果は、生物が自然淘汰の過程で獲得したカタチのからくりに新たな知見を与えるものであり、次世代型の生物模倣科学の展開に資するものである。

研究成果の概要(英文)：In this project, we systematically described the mechanical rationality and potential application of quasi-periodic structures that are widely found in plants and other living organisms. We clarified the correlation between the mechanical function and morphological rationality relating to a quasi-periodic node distribution both experimentally and theoretically for plant species with hollow stem structures (e.g., bamboo, rice, and butterbur). In addition, we quantitatively evaluated the technical application of the functional form, through the consideration regarding a highly rigid tower structure imitating bamboo and policy for improving the lodging resistance of rice. We further analyzed in detail the mesh pattern on the skin of cantaloupes and the crack patterns found on tree bark and thus formulated universal geometric properties hidden in crack networks from the perspective of fracture mechanics.

研究分野：数理科学、物性理論

キーワード：パターン形成 自己組織化現象 生物模倣科学 生物規範工学 かたちの科学 植物物理学 生物物理学

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。

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

生物模倣科学・技術の概念は、1980年代後半における分子エレクトロニクスの台頭と相俟って、現在までに国内外で広く浸透・発展している。なかでも機械工学・流体工学分野での進展は著しく、昆虫の飛翔・魚の泳ぎを真似たロボットや、コウモリの反響定位・昆虫の感覚毛を模倣したソナー・レーダーなど、数多くの技術が開発されている。さらに材料工学の分野でも、ハスの葉を模倣したテフロンフリーの撥水材料や、ヤモリの指先を模倣した接着剤フリーの粘着テープなどが、環境低負荷・省材料型の材料として民生レベルで広く普及している。

こうしたニーズ先行型の生物模倣「技術」の進展に加え、自然のからくりを解き明かす基礎学問としての生物模倣「科学」の追求も、当該分野の発展には重要と考える。つまり、単に生物の形や動きを表層的にまねるだけではなく、生物が自然淘汰の過程で獲得したカタチのからくりを理論的に深く解釈することを目指す研究姿勢である。それにより、幅広い学術分野を跨ぐ自然現象への理解の深化に繋がるとともに、天然物・人工物の双方に実装しうる機能美を発掘することができる。こうした背景のもと本申請課題は、植物・動物の擬周期パターンの形成メカニズムと機能的意義を学術的な問題意識から追及したものであり、各種のパターンを魅せる生物の進化のしくみについても新たな知見の獲得を目指したものである。

2. 研究の目的

天然の生物(植物・動物・昆虫など)をよく観察すると、その構成要素には、しばしば空間的な周期パターンが認められる。こうした天然物の周期パターンは、人工的な周期構造物で発現する各種の物理機能を連想させる。それでは果たして、空間周期パターンを帯びた生物やその構成要素は、何からの物理機能を発現しうるのだろうか？このような動機から本申請課題では、動植物器官(タケの節・哺乳類の汗腺・野菜の表皮など)にみられるほぼ周期的な構造(擬周期構造)を対象に、物性科学の視点からその機能探索を試みた。擬周期構造に由来する物理機能の発現機序を定量的・体系的に書き下すことで、周期長の外的制御を通じた物性応答操作手法を構築することを目的とした。

3. 研究の方法

本申請課題で対象とした植物種のひとつが「タケ」である。タケの稈には一定の間隔を置いて節が分布しており、擬周期構造を示す典型的な植物種のひとつといえる。日本に自生するタケの種類は、高さ15mに及ぶモウソウチクから、3m程度までしか伸びないクロチクまで多様性に富んでおり、その高さや外形は種によってバラバラである。いっぽう、タケの稈に沿って擬周期的に配列された「節」は、種によらずタケ稈全体の剛性を高めることで知られる。また、木質部に埋没した繊維(維管束鞘)の傾斜配置によって、剛性分布が最適化されている。本研究ではこのタケの力学的最適構造の理解をさらに深めるべく、断面形状の多様性と稈の力学的安定性との間の相関関係を精査した。具体的には、高さ・太さ・稈に沿った細り具合、がそれぞれ異なる複数種のタケを選び、日本各地で伐採した竹サンプルの形態測定データを集計した。さらに、野外調査で得た各種のタケの採寸データを用いて、タケの形態を特徴づける形数(Form Factor)に係る法則の導出を試みた。ここで形数とは、各種の樹木の形態の違いを数値化するための幾何学的な概念であり、樹幹の表面積(または体積)を、ある参照円筒体の表面積(体積)で除した値で定義される量である。

さらに、タケと類似の構造をもつ「イネ」について、その断面形状と倒伏耐性との関係性を理論と実験の両面から調べた。イネはタケと同様に中空の稈をもち、複数の節間が連結した構造を示す。近年の品種改良技術の進展により、各節間の太さ・長さ・硬さを、遺伝子レベルで操作することが一定程度可能となってきた。よって各節間の形態を人工的に制御することで、横風や強雨に晒されても倒伏しない、強いイネを創り出すことが望まれている。そこで、研究代表者が過去に構築した中空円筒構造の座屈近似理論をさらに拡張・改良し、さまざまなイネ品種の形態パラメータを代入することで、各品種のイネ形態の時系列変化を定量的に再現することを目指した。

本申請課題における3つめの研究対象は、「フキ」である。フキは他の種の植物と比べて、次に示す三つ顕著な特徴を有する：i)地上高の最も高い先端に大きな葉が広がっている、ii)茎の断面が馬蹄形である、iii)茎の表面には長手方向に沿ったリブが付着している。特にi)で述べた大きな葉は、個体の先端に大きな集中荷重を与えており、ii)とiii)の形態に由来する力学機能によってその荷重を支えていると予想される。この予想を検証するために、野外で自生するフキの採寸と力学試験を実施した。

4つめの研究対象は、「メロン」の表皮にみられる網目模様である。一般的な果実の表皮は、厚いくちくちくで様に覆われていることが多い。しかし一部の種類の果実では、表皮に特異な構造が見られる。その代表例が、ネットメロン表皮の網目構造である。このメロンの網目は、個体の生長段階で生じる表皮のひび割れに起因する。果実部の肥大速度が表皮の伸長速度を追い越すと、表皮の一部が破断し、その亀裂間隙に内部からスベリンという油脂状の蠟性物質が分泌される。このスベリンが表皮の亀裂を埋め、コルク質を形成することで、メロン表皮全体を覆う網目模様が生成される。しかしその機序解明は十分ではなく、局所的な化学反応過程と大域的な模様形成の両者において、未だ議論の余地が残されている。そこで本申請課題では、ネットメロン果皮の画像解析および果皮供試体の力学試験から、果皮全体を覆う大域的パターンの形成過程を推察するとともに、閉じた球面上で実現される亀裂パターンの特性を理論と実験の両面から精査した。

4. 研究成果

タケの研究においては、3種類にわたるタケ（モウソウチク・マダケ・ハチク）の供試体：570本あまりを国内各地の竹林から伐採した。それらの採寸データを詳細に解析して、タケの形態を特徴づける新しい指数 TIFF (Taper Index based on Form-Factor) を定義することができた。各種のタケの TIFF 値を比較した結果、その値が種ごとに有意に異なり、かつ種内変動がかなり小さいことがわかった。この結果は、少数の供試体データをもとに、種固有の形態を TIFF によって評価できることを意味する。さらに、形状(高さ・太さ・稈に沿った細り具合)が異なる複数種のタケを選び、日本各地で伐採した竹サンプルの形態測定データを集計した。その結果、各節間における木質部の正味体積および各節間部の細長比(断面二次半径を節間長で除した量)のデータ点が、複数種にわたって一定の共通曲線に載ることがわかった。この成果は、種によらずタケの形態を支配する力学ルールがあることを示しており、生体模倣科学の観点から植物形態の普遍則を抽出できたことを意味する。

当初予定していなかったシホウチクの構造力学特性に関しても、新たな知見を得ることができた。丸みを帯びた四角形の断面を示すことで知られるシホウチクは、四国・高知県の名産品として知られている[図1]。この四角形断面が、通常円形断面を示すタケに比べて、某かの力学的優位性をもつか否か？この問題を解くため、丸みを帯びた四角形の断面形状を数学的に記述する手法を独自に考案し、各種の断面性能(断面二次半径、断面係数など)を定量評価した。その結果、内側境界線の角張り度合いと、外側境界線の丸み度合いが、各々異なる様式で断面性能に寄与することがわかった。

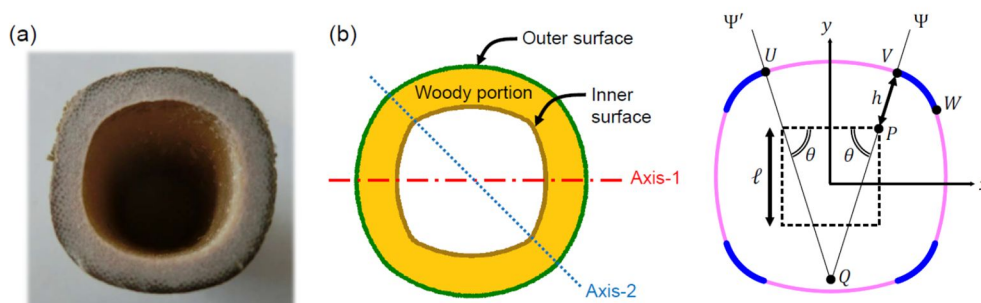


図1. シホウチクの断面写真と、断面性能の定式化における変数設定の模式図

イネの研究においては、イネの力学的安定性を理論と実験の両面から多面的に解析し、倒伏耐性の強いイネ品種を作るための形態学的指針を提示することを目指した。秋田県立大学の協力を得て風防実験を実施し、横風を受けたイネの傾斜角度とイネ各部の稈径・イネ全体の稈長との関係を系統的に調べ、多変量解析に基づきイネの倒伏耐性を決定づける物理要因を特定した。さらにフォーステスターを用いて、品種ごとのイネ各部のヤング率と破断強度を計測し、一連の結果をデータベース化することができた。その結果、横荷重下におけるイネ稈の倒伏耐性を評価するための定量的指標を提案することができた。今後はこの成果を発展させて、日本で広く栽培されているイネ種の品種改良を通じて、イネの倒伏耐性の向上に資する予定である。

また、タケとイネの両者にみられる節の分布の力学的合理性を探るために、横風や自重によるタケ稈のたわみを評価するための簡易式を新たに導出することができた[図2]。この手法は、タケに作用する力のつり合い方程式を、簡易な多項式展開で表現したものであり、有限要素法などの複雑なコンピュータ計算を使わずにイネ稈の変形を推算することができる。さらに同手法をイネに適用した結果、稲穂の重みで徐々にたわむイネ稈の形状解析に対しても有効であることがわかった。

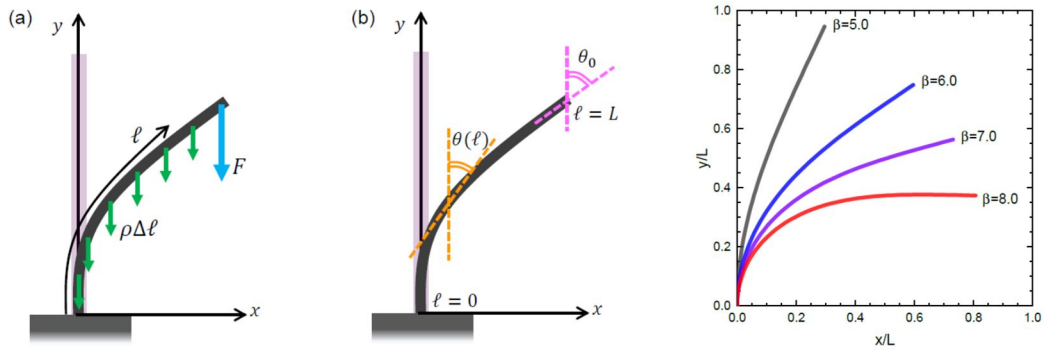


図2 . 中空茎の自重座屈と後座屈状態の傾斜角および数値再現の結果

フキの研究においては、北海道足寄郡足寄町のラウンプキ鑑賞圃場に短期滞在し、20 本以上のラウンプキ(=高さ 3 メートルに成長する特異なフキの一種)をサンプル採取して、それらの形態測定と断面剛性の評価を行った。フォーステスター(MCT2150)を用いた力学試験にあたっては、フキ個体を表皮・維管束・細胞質の3種類に分離し、各材料の応力歪み曲線を導出することで、フキの断面剛性の評価を行った。その結果、フキの表皮には最も力学負荷の高い箇所に剛性の高いリブが配置されていること、フキの維管束は延性に優れていること、フキの細胞質は膨圧増加によって個体の安定性に寄与していること、などがわかった。

ネットメロンの研究においては、表皮で生じる網目パターンの解析を行った。ネットメロン果皮の画像解析および果皮供試体の力学試験から、果皮全体を覆う大域的パターンの形成過程を推察した結果、複数種のメロンについて、網目を構成する多角形状セルの面積が、普遍的な確率分布に従うことが判明した[図3]。さらに、成長応力が引き起こす表面破断に起因するマスクメロン表皮の網目模様について、その幾何学的性質を破壊力学の視点から解析した結果、果皮断片の面積の確率分布がメロン個体の種類や大きさによらない普遍曲線に従うことを初めて明らかにした。

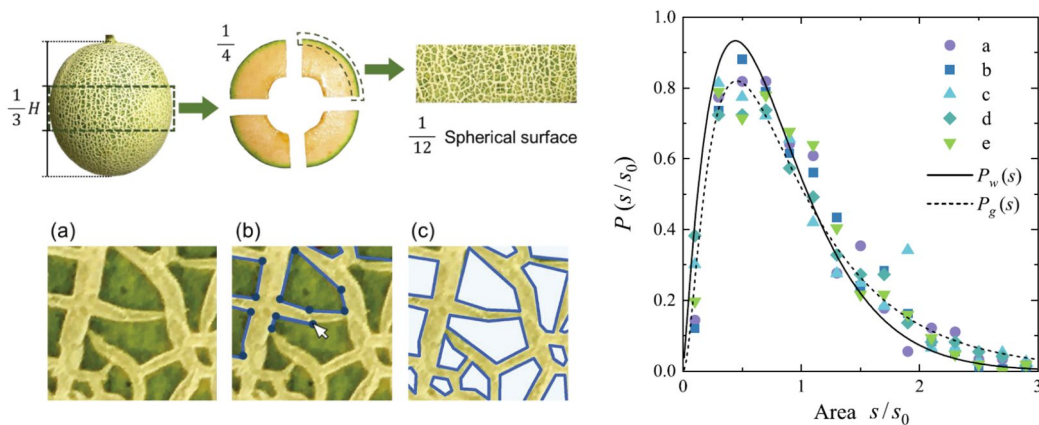


図3 . ネットメロンの網目模様と多角形パターンの正規化統計分布

上述のネットメロンに関する研究成果から新たな着想を得て、樹木の樹皮に多くみられる縞模様の亀裂パターンの解析も行った。イチヨウやマツなどの樹木の幹の表面には、幹の周方向に沿った周期的な樹皮のひび割れ模様や剥離が観察される。このような樹皮の形態は樹種の同定にも役立っており、たとえば葉を落とした冬季の落葉樹でも、樹皮を見て樹木の種類を推測することができる。樹皮が剥離する要因は、樹幹内部の膨張力や、樹皮外側の周皮が外部から乾燥収縮を受けることだと考えられている。その一方で、周期的なひび割れ模様が出来る力学的な仕組みを定量的に考察した例は少ない。そこで本研究では、このひび割れ模様の周期性の力学的起源を明らかにすることを目的として、樹皮の型取り実験と各種の数値分析(楕円フーリエ解析・主成分分析など)を行った。具体的には、大学構内にあるイチヨウとクロマツを数本選定し、シリコン樹脂とウレタン樹脂を用いて、樹木の水平断面の模型を作成した。この模型の輪郭線を画像解析することで、周方向に沿った詳細な樹皮凹凸データを得た。さらに樹皮のひび割れを「積層構造の引張破断現象」とみなし、Shear-lag 理論を適用することで、現実に観測されるひび割れの

周期長を理論的に再現できた。

さらにネットメロンの網目構造に関する成果を発展させて、当初予定していなかった火山岩の亀裂構造についても新しい知見を得ることができた。溶岩流の固化により発生した柱状節理の露頭には、ネットメロンと同様に、秩序だった多角形状の亀裂パターンがしばしば発達する。この多角形の直径は露頭ごとにかなり均一であるが、多角形を構成する辺の数と内角の値は大きなばらつきを示す。そこで本研究では、過去にドローン空撮で得た柱状節理露頭の空撮画像を詳細に解析し、ネットメロンに適用した手法と類似の手法を用いて多角形パターンの幾何特性を抽出した。その結果、柱状節理における多角形亀裂パターンの統計的変動は、極値分布クラスのひとつであるガンベル分布に従うことが明らかとなった。この結果は、樹木で観察される樹皮のひび割れパターンや、メロン表皮で発達する網目状の亀裂パターンと対比して議論することで、植物に広くみられる脆性破断現象を統一的に解釈できる可能性を示唆するものである。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計36件（うち査読付論文 36件 / うち国際共著 0件 / うちオープンアクセス 20件）

1. 著者名 Tsugawa Satoru, Shima Hiroyuki, Ishimoto Yukitaka, Ishikawa Kazuya	4. 巻 13
2. 論文標題 Thickness-stiffness trade-off improves lodging resistance in rice	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Scientific Reports	6. 最初と最後の頁 10828
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1038/s41598-023-37992-3	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 Kubo Atsushi, Kawai Emi, Sumigawa Takashi, Shima Hiroyuki, Umeno Yoshitaka	4. 巻 31
2. 論文標題 Defect formation mechanisms in metal nanowire under cyclic loading: a molecular dynamics study	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Modelling and Simulation in Materials Science and Engineering	6. 最初と最後の頁 065020 ~ 065020
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1088/1361-651X/acea3b	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 Shima Hiroyuki, Umeno Yoshitaka, Sumigawa Takashi	4. 巻 15
2. 論文標題 Spot-Ladder Selection of Dislocation Patterns in Metal Fatigue	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Symmetry	6. 最初と最後の頁 1028 ~ 1028
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3390/sym15051028	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 Akiba Yuri, Wang Siyu, Sato Motohiro, Shima Hiroyuki	4. 巻 92
2. 論文標題 Impact of Land-Use Differences on Block-Size Distribution in Tokyo	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Journal of the Physical Society of Japan	6. 最初と最後の頁 104801
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.7566/JPSJ.92.104801	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 Tobise Akihiro, Shima Hiroyuki, Akiba Yuri, Umeno Yoshitaka, Kawai Emi, Kubo Atsushi, Abe Masataka, Sumigawa Takashi	4. 巻 65
2. 論文標題 Surface outflow effect on dislocation structures in micrometer-sized metals	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Extreme Mechanics Letters	6. 最初と最後の頁 102094 ~ 102094
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.eml.2023.102094	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 Nishimoto Mayu, Yoshioka Hideo, Shima Hiroyuki	4. 巻 93
2. 論文標題 Spectral Functions of Metallic Fullerene Polymers: A Theoretical Tool for Atomic Structures Identification	5. 発行年 2024年
3. 雑誌名 Journal of the Physical Society of Japan	6. 最初と最後の頁 14701
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.7566/JPSJ.93.014701	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 Umeno Yoshitaka, Kawai Emi, Kubo Atsushi, Shima Hiroyuki, Sumigawa Takashi	4. 巻 16
2. 論文標題 Inductive Determination of Rate-Reaction Equation Parameters for Dislocation Structure Formation Using Artificial Neural Network	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Materials	6. 最初と最後の頁 2108 ~ 2108
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3390/ma16052108	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 Kanahama Tohya, Chalerm sin Carol Lee, Sato Motohiro	4. 巻 39
2. 論文標題 Mechanical instability of heavy column with rotational spring	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Journal of Mechanics	6. 最初と最後の頁 480 ~ 490
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1093/jom/ufad035	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 Kanahama Tohya, Tsugawa Satoru, Sato Motohiro	4. 巻 13
2. 論文標題 Rigidity control mechanism by turgor pressure in plants	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Scientific Reports	6. 最初と最後の頁 2063
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1038/s41598-023-29294-5	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 Kanahama Tohya, Sato Motohiro	4. 巻 120
2. 論文標題 Mechanics-based classification rule for plants	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Proceedings of the National Academy of Sciences	6. 最初と最後の頁 e2308319120
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1073/pnas.2308319120	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 Kanahama Tohya, Sato Motohiro	4. 巻 13
2. 論文標題 Plant strategies for greatest height: tapering or hollowing	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Scientific Reports	6. 最初と最後の頁 18158
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1038/s41598-023-45468-7	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 Akiba Yuri, Ishibashi Akari, Sato Motohiro, Shima Hiroyuki	4. 巻 91
2. 論文標題 Empirical Rule of Fruit Rind Fragmentation in Muskmelon Netting	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Journal of the Physical Society of Japan	6. 最初と最後の頁 104801
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.7566/JPSJ.91.104801	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 Shima Hiroyuki, Umeno Yoshitaka, Sumigawa Takashi	4. 巻 9
2. 論文標題 Analytic formulation of elastic field around edge dislocation adjacent to slanted free surface	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Royal Society Open Science	6. 最初と最後の頁 220151
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1098/rsos.220151	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 Shima Hiroyuki, Sumigawa Takashi, Umeno Yoshitaka	4. 巻 15
2. 論文標題 Nonsingular Stress Distribution of Edge Dislocations near Zero-Traction Boundary	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Materials	6. 最初と最後の頁 4929 ~ 4929
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3390/ma15144929	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 Naito Ayana, Go Kentaro, Shima Hiroyuki, Kijima Akifumi	4. 巻 12
2. 論文標題 Synchrony in triadic jumping performance under the constraints of virtual reality	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Scientific Reports	6. 最初と最後の頁 12417
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1038/s41598-022-16703-4	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 Umeno Yoshitaka, Kubo Atsushi, Wang Chutian, Shima Hiroyuki	4. 巻 12
2. 論文標題 Diameter-Change-Induced Transition in Buckling Modes of Defective Zigzag Carbon Nanotubes	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Nanomaterials	6. 最初と最後の頁 2617 ~ 2617
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3390/nano12152617	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 Nishiyama Ryo, Sato Motohiro	4. 巻 38
2. 論文標題 Effective length of bamboo-like stiffened hollow cylindrical structures	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Journal of Mechanics	6. 最初と最後の頁 250 ~ 256
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1093/jom/ufac019	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 Kanahama Tohya, Sato Motohiro	4. 巻 123
2. 論文標題 Summation rules in critical self-buckling states of cylinders	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Mechanics Research Communications	6. 最初と最後の頁 103905 ~ 103905
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.mechrescom.2022.103905	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 Nishiyama Ryo, Sato Motohiro	4. 巻 12
2. 論文標題 Structural rationalities of tapered hollow cylindrical beams and their use in Japanese traditional bamboo fishing rods	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Scientific Reports	6. 最初と最後の頁 2448
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1038/s41598-022-06426-x	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 Kanahama Tohya, Sato Motohiro	4. 巻 12
2. 論文標題 Mathematical modelling to determine the greatest height of trees	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Scientific Reports	6. 最初と最後の頁 2039
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1038/s41598-022-06041-w	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 Akiba Y., Takashima A., Inoue A., Ishidaira H., Shima H.	4. 巻 8
2. 論文標題 Geometric Attributes of Polygonal Crack Patterns in Columnar Joints	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Earth and Space Science	6. 最初と最後の頁 2020EA001457
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1029/2020EA001457	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 Akiba Yuri, Takashima Aika, Shima Hiroyuki	4. 巻 104
2. 論文標題 Universal fluctuation of polygonal crack geometry in solidified lava	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Physical Review E	6. 最初と最後の頁 25009
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevE.104.025009	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 KANAHAMA Tohya, FUJIMURA Takanori, SATO Motohiro	4. 巻 77
2. 論文標題 CRITICAL HEIGHT FOR SELF-WEIGHT BUCKLING IN TAPERED TREES	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Journal of Japan Society of Civil Engineers, Ser. A2 (Applied Mechanics (AM))	6. 最初と最後の頁 62 ~ 71
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.2208/jscejam.77.1_62	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 Inoue Akio, Sato Motohiro, Shima Hiroyuki	4. 巻 140
2. 論文標題 A new taper index based on form-factor: application to three bamboo species (Phyllostachys spp.)	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 European Journal of Forest Research	6. 最初と最後の頁 1533 ~ 1542
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1007/s10342-021-01416-6	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 Shima Hiroyuki, Furukawa Nao, Kameyama Yuhei, Inoue Akio, Sato Motohiro	4. 巻 12
2. 論文標題 Cross-Sectional Performance of Hollow Square Prisms with Rounded Edges	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Symmetry	6. 最初と最後の頁 996 ~ 996
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3390/sym12060996	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 Matsuyama C., Tanaka Y., Sato M., Shima H.	4. 巻 476
2. 論文標題 Corrugation of an unpaved road surface under vehicle weight	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Proceedings of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences	6. 最初と最後の頁 20200323
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1098/rspa.2020.0323	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 Sato Motohiro, Ishigami Kazusa, Kato Hiroyuki, Umeno Yoshitaka, Shima Hiroyuki	4. 巻 40
2. 論文標題 Scaling law for the onset of the surface wrinkling of multilayer tubes	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Extreme Mechanics Letters	6. 最初と最後の頁 100970
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.eml.2020.100970	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 Shima Hiroyuki, Furukawa Nao, Kameyama Yuhei, Inoue Akio, Sato Motohiro	4. 巻 12
2. 論文標題 Cross-Sectional Performance of Hollow Square Prisms with Rounded Edges	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Symmetry	6. 最初と最後の頁 996 ~ 996
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3390/sym12060996	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 Matsuyama C., Tanaka Y., Sato M., Shima H.	4. 巻 476
2. 論文標題 Corrugation of an unpaved road surface under vehicle weight	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Proceedings of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences	6. 最初と最後の頁 20200323
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1098/rspa.2020.0323	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 Shima Hiroyuki	4. 巻 10
2. 論文標題 Simple Approximate Formulas for Postbuckling Deflection of Heavy Elastic Columns	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Applied Sciences	6. 最初と最後の頁 7163 ~ 7163
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3390/app10207163	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 Tsugawa Satoru, Sano Tomohiko G., Shima Hiroyuki, Morita Miyo Terao, Demura Taku	4. 巻 1
2. 論文標題 A mathematical model explores the contributions of bending and stretching forces to shoot gravitropism in Arabidopsis	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Quantitative Plant Biology	6. 最初と最後の頁 e4
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1017/qpb.2020.5	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 Inoue Akio, Koshikawa Kazuki, Sato Motohiro, Shima Hiroyuki	4. 巻 24
2. 論文標題 Allometric equations for predicting the aboveground biomass of square bamboo, Chimonobambusa quadrangularis	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Journal of Forest Research	6. 最初と最後の頁 376 ~ 381
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1080/13416979.2019.1690723	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 Umeno Yoshitaka, Sato Masanobu, Sato Motohiro, Shima Hiroyuki	4. 巻 100
2. 論文標題 Buckling-induced band-gap modulation in zigzag carbon nanotubes	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Physical Review B	6. 最初と最後の頁 155116
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevB.100.155116	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 Akiba Yuri, Shima Hiroyuki	4. 巻 88
2. 論文標題 Flow-Velocity-Dependent Transition of Anisotropic Crack Patterns in CaCO ₃ Paste	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Journal of the Physical Society of Japan	6. 最初と最後の頁 024001 ~ 024001
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.7566/JPSJ.88.024001	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 Inoue Akio, Koshikawa Kazuki, Sato Motohiro, Shima Hiroyuki	4. 巻 24
2. 論文標題 Allometric equations for predicting the aboveground biomass of square bamboo, <i>Chimonobambusa quadrangularis</i>	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Journal of Forest Research	6. 最初と最後の頁 376 ~ 381
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1080/13416979.2019.1690723	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 Akio Inoue, Miyuki Shimada, Motohiro Sato, Hiroyuki Shima	4. 巻 30
2. 論文標題 Estimation of culm volume reduction factors in five bamboo species (<i>Phyllostachys</i> spp.)	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Journal of Forestry Research	6. 最初と最後の頁 2069 ~ 2078
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1007/s11676-018-0767-6	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37件（うち招待講演 12件 / うち国際学会 9件）

1. 発表者名 岡本航暉、秋葉祐里、島 弘幸
2. 発表標題 和麵の茹で加減の定量化：弾性キャピラリー効果の簡易計測
3. 学会等名 第61回 高分子と水に関する討論会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 藤岡 真希、島 弘幸
2. 発表標題 紐の結び方と材質の使い分けに関する力学的考察
3. 学会等名 第19回日本感性工学会春季大会
4. 発表年 2024年

1. 発表者名 児玉 まなみ、島 弘幸
2. 発表標題 肌のハリに対する表皮-真皮境界面の凹凸効果
3. 学会等名 第25回日本感性工学会大会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 島 弘幸,河合 江美, 久保淳, 秋葉祐里, 梅野宜崇, 澄川貴志
2. 発表標題 力学系理論による疲労転位構造の安定性解析
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 Hiroyuki Shima, Yoshitaka Umeno and Takashi Sumigawa
2. 発表標題 Application of Biological Pattern Formation Theory to Non-Biological Systems
3. 学会等名 International Conference on Biological Physics (ICBP2023) (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Hiroyuki Shima
2. 発表標題 Mechanical Optimality Hidden in the Structure of Plants
3. 学会等名 6th Yamada Symposium on "Diversity of Biological Patterns and Forms in Nature: toward a Comprehensive Understanding" (PFN2023) (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Hiroyuki Shima, Yoshitaka Umeno and Takashi Sumigawa
2. 発表標題 Fatigue of nanometals: Dynamical systems theory of dislocation patterning under cyclic load
3. 学会等名 The International Conference on PROCESSING & MANUFACTURING OF ADVANCED MATERIALS Processing, Fabrication, Properties, Applications (Thermec'2023) (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Hiroyuki Shima, Yoshitaka Umeno and Takashi Sumigawa
2. 発表標題 Weakly nonlinear analysis of fatigue-induced dislocation self-organization
3. 学会等名 XXVII Sitges Conference on Statistical Mechanics (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 島弘幸
2. 発表標題 メロンの網目の幾何法則
3. 学会等名 日本物理学会 2023年春季大会 (招待講演)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 池谷汐織、島弘幸
2. 発表標題 樹皮の周期凹凸パターン：画像解析と力学的考察
3. 学会等名 日本機械学会 第34回バイオエンジニアリング講演会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Hiroyuki Shima
2. 発表標題 Reaction-Diffusion Theory for Self-Organized Dislocation Patterning in Fatigued Metals
3. 学会等名 The 6th International Conference on Materials and Reliability (ICMR2022) (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 堀内晶裕, 佐藤太裕, 島 弘幸
2. 発表標題 フキ葉柄の馬蹄形断面に潜む構造合理性
3. 学会等名 日本物理学会 2022年秋季大会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 秋葉祐里, 山崎雅也, 島弘幸, 佐藤太裕
2. 発表標題 街区の幾何歪度に着目した空間利活用効率指標の提案
3. 学会等名 日本物理学会 2022年秋季大会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 池谷汐織、島弘幸
2. 発表標題 楕円フーリエ解析による樹皮剥離パターンの特徴量抽出
3. 学会等名 日本物理学会 2022年秋季大会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 島 弘幸
2. 発表標題 自由エネルギー原理の数理構造：熱力学の視点から
3. 学会等名 Japanese Motor Learning Seminar: JMLS2022 (招待講演)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Hiroyuki Shima, Akihiro Tobise, Takashi Sumigawa
2. 発表標題 Describing the dislocation pattern formation in metals at submicron scales: A rate equation approach
3. 学会等名 Materials Research Meeting 2021 (MRM2021) (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 島 弘幸
2. 発表標題 Bio/Abioをまたぐパターン形成の数理
3. 学会等名 ソフトバイオ研究会（招待講演）
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 島 弘幸
2. 発表標題 大自然が魅せる不思議な周期構造 そのメカニズムを探る
3. 学会等名 日本セラミックス協会第34回秋季シンポジウム（招待講演）
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 秋葉祐里, 山崎雅也, 島弘幸, 佐藤太裕
2. 発表標題 幾何形状解析による道路網の土地利用評価
3. 学会等名 日本物理学会第77回年次大会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 石橋明里, 秋葉祐里, 佐藤太裕, 島弘幸
2. 発表標題 メロン表皮の網目パターンに内在する幾何学的法則性の抽出
3. 学会等名 日本物理学会第77回年次大会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 市川祐実, 佐藤太裕, 島 弘幸
2. 発表標題 あて材を考慮した樹枝モデルの力学応答
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 佐々木重也, 堀内晶裕, 井上昭夫, 島弘幸, 佐藤太裕
2. 発表標題 竹の維管束配列による曲げ特性向上効果に関する理論および数値解析的検証
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 秋葉祐里, 佐藤太裕, 島弘幸
2. 発表標題 メロンの網目に学ぶ球面での破断パターン形成機構
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 Yuri Akiba, Aika Takashima, Hiroyuki Shima
2. 発表標題 Is there a unified rule for polygonal cracking in cooled lava surface?
3. 学会等名 The 25th International Congress of Theoretical and Applied Mechanics (ICTAM 2020+1) (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 秋葉祐里, 島弘幸
2. 発表標題 火成岩の破断パターンに潜む幾何形状の共通則
3. 学会等名 Young Soft Webinar (招待講演)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 秋葉祐里, 島弘幸, 佐藤太裕
2. 発表標題 道路網が作り出す街区の面積分布と土地利用の相関解析
3. 学会等名 MIMS現象数理学研究拠点共同研究集会「社会物理学とその周辺」
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 島 弘幸
2. 発表標題 直立型植物の座屈耐性を司る「0.3法則」
3. 学会等名 MIMS 現象数理学研究拠点 共同研究集会 (招待講演)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 島 弘幸
2. 発表標題 竹の巧妙なカラダ作り その力学的合理性を探る
3. 学会等名 「シェル・空間構造」セミナー2020 (招待講演)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 島 弘幸
2. 発表標題 植物物理学 その多様性と普遍性
3. 学会等名 第62回日本植物生理学会年会（招待講演）
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 島 弘幸
2. 発表標題 自然の造形美を科学する - 天然周期パターンの形成機構
3. 学会等名 第31回 自己組織化セミナー（招待講演）
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 島 弘幸
2. 発表標題 竹の形態に学ぶ新しい構造設計概念の創出
3. 学会等名 山梨科学アカデミー（招待講演）
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Y. Akiba and H. Shima
2. 発表標題 Columnar joint: Geometric pattern analysis and analogue experiment using starch pastes
3. 学会等名 Japan Geoscience Union Meeting 2019 (JpGU2019) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Y. Akiba and H. Shima
2. 発表標題 Effect of Particle Attributes on Desiccation Crack Patterns
3. 学会等名 Frontiers of Statistical Physics (FSP2019) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 秋葉祐里, 高島愛果, 島弘幸
2. 発表標題 火成岩体を貫く角柱型破断面の空間分布特性
3. 学会等名 日本物理学会 秋季大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 秋葉祐里, 高島愛果, 島弘幸
2. 発表標題 デンプンでマグマしてみよう：アナログ実験の再検討
3. 学会等名 第3回キッチン地球科学研究集会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 秋葉祐里, 高島愛果, 島弘幸
2. 発表標題 ドローンを活用した柱状節理の空撮測量と空間解析
3. 学会等名 日本火山学会2019年度秋季大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 秋葉祐里, 島弘幸
2. 発表標題 冷却収縮が駆動する火成岩の亀裂ネットワーク
3. 学会等名 ネットワーク科学セミナー2019
4. 発表年 2019年

〔図書〕 計3件

1. 著者名 島 弘幸	4. 発行年 2022年
2. 出版社 コロナ社	5. 総ページ数 288
3. 書名 これならわかる微積分学	

1. 著者名 Hiroyuki Shima, Akio Inoue, Motohiro Sato	4. 発行年 2023年
2. 出版社 Springer Singapore	5. 総ページ数 29
3. 書名 "Bamboo Science and Technology" in Book: Bamboo Science and Technology	

1. 著者名 佐藤 太裕	4. 発行年 2023年
2. 出版社 岩波書店	5. 総ページ数 118
3. 書名 竹取工学物語	

〔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
研究 分 担 者	佐藤 太裕 (SATO MOTOHIRO) (00344482)	北海道大学・工学研究院・教授 (10101)	

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