

令和 6 年 5 月 20 日現在

機関番号：10101

研究種目：基盤研究(A)（一般）

研究期間：2018～2022

課題番号：18H03818

研究課題名（和文）空間周期性の構造安定論的解釈と合理化社会・構造システム設計思想のパラダイムシフト

研究課題名（英文）Structural stability interpretation of spatial periodicity and paradigm shift in social and structural system design philosophy

研究代表者

佐藤 太裕（Motohiro, Sato）

北海道大学・工学研究院・教授

研究者番号：00344482

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 31,100,000円

研究成果の概要（和文）：私たちの身の回りには、数多くの不思議な「空間周期パターン」が何気なく存在する。しかしその何気ない空間周期パターンの発生には、いずれも何らかの合理的意味・力学的必然性があると考えられる。本研究はこの空間周期パターンを形成する性質を構造力学・構造安定論の見地から深く洞察し、その根源的意味を理論的に解釈するとともに、その新知見を基盤とする従前まで当たり前とされた概念を覆す社会・構造システム設計思想の構築を目的としたものである。研究期間中には、「植物力学」という学術領域を新たに開拓し、今後のものづくりに生きる多くの知見を得、それらの成果は数多くの学術論文、および著書により公表された。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究で得られた成果は、主に植物の形状がもつ力学的意味から構造設計に生かす技術として昇華できる可能性を有している。学術的にもこれまでの植物学者が気づかなかった視点、方法論でのアプローチによる新しい発見が多く、多くの学術論文にてそれが評価をされている。また、この研究の集大成といえる研究代表者の著書「竹取工学物語 土木工学者、植物にものづくりを学ぶ」が2023年7月に岩波書店から「岩波科学ライブラリー」として出版され、広く一般市民にもその内容が公表されている。

研究成果の概要（英文）：Many mysterious "spatial periodic patterns" casually exist in the natural phenomena that surround us. However, the occurrence of such casual spatial periodic patterns is thought to have some kind of rational meaning or mechanical necessity. This research provides a deep insight into the properties that form this spatial periodic pattern from the perspective of structural mechanics and structural stability theory, and theoretically interprets its fundamental meaning. The purpose is to create a social and structural system design philosophy that overturns concepts. During the research period, he developed a new academic field called "plant mechanics" and gained a lot of knowledge that will be useful in future manufacturing, and the results were published in numerous academic papers and books.

研究分野：構造力学

キーワード：空間周期性 構造安定論 植物力学

様式 C - 19、F - 19 - 1 (共通)

1. 研究開始当初の背景

私たちの身の回りには、自然発生的に生じる不思議な空間周期パターンが数多く存在する。例えば未舗装路では、自動車の加減速が行われる区間で周期的な波状起伏が生じやすいことが知られている。また、竹の節(図-1)は高さ方向に周期的に配列されていることや、南瓜など硬い野菜や果実の多くには特徴的な周期的凹凸が見られることも、誰しもが知るところである。これらはあくまで自然界に見られる周期性のほんの一例であり、他にも DNA 二重螺旋構造や砂漠の波紋など、数多くの例が存在する。ものの形の生成には何らかの外力作用が必要である。さらに、植物は外力に効率よく抵抗するための形状を、進化の過程で選択し形成しているのかもしれない。いずれにしても、空間的にランダムではなく周期性が存在する場合、その形成過程や周期長に必ず何らかの力学的意味が存在すると我々は考える。しかし、その空間周期性のほとんどについて、現時点で発生の根源的理由を理論的に説明できていなかった。



図 - 1 竹の節の周期性

2. 研究の目的

本研究は、上記背景のもと、この空間周期パターンを形成する性質(=空間周期性)を構造力学・構造安定論の見地から深く洞察し、その存在理由・根源の意味を理論的に解釈するとともに、その新知見を基盤とする従前まで当たり前とされた概念を覆す社会・構造システム設計思想の構築を目的として行われたものである。

3. 研究の方法

理論力学および数値解析的アプローチにより、空間周期性の見られる現象に対し、構造安定論的な解釈を試みた。

4. 研究成果

以下、研究成果を対象物ごとではなく、研究期間の時系列順に示す。

- ・竹の節構造の周期性と維管束分布の相互作用による、力学特性向上効果を検証した。これにより、節と維管束分布が相乗効果で剛性、強度を高めていることを実証した。
- ・炭素ナノ材料(カーボンナノチューブ)における周期的な欠陥と強度向上の関係性について数値解析的検討を行い、欠陥が強度上昇につながる可能性があるという新たな知見を得た。
- ・樹木(樹形)の構造力学的合理性について、新たな研究に着手し、自重に対する応力均一化、振動特性の観点から新たな知見を得た。
- ・竹の節構造の周期性について、5種類の竹(モウソウチク、マダケ、ハチク、クロチク、キンメイチク)の高さ、節間隔などに着目し、これらの値自体は異なるものの、細長比に相当するパラメータが種別によらずほぼ一致することを見出した。また、竹の節構造について、理論計算と並行して有限要素モデルによる検証を行い、断面扁平抑制効果を示す理論式が竹の肉厚比程度であれば十分な精度で適用可能であることを示した。
本実績に関連して、研究代表者の佐藤が2019年12月に文部科学省科学技術・学術政策研究所より「科学技術への顕著な貢献 2019(ナイスステップな研究者)」に選定された。(選定理由:「竹が「軽さ」と「丈夫さ」を併せもつ理由の構造・材料力学的解明」)
- ・炭素ナノ材料(カーボンナノチューブ)における周期的な欠陥と強度向上の関係性についてカイラリティの違いによる影響を検証した。また、多層ナノチューブ構造の曲げにおいてみられる圧縮側の周期的な波状変形モードを、理論解析によりモデル化し、その特性をシンプルな式で記述することに成功した。
- ・竹の節構造にみられる空間周期性を有限要素解析により詳細に検証し、節が力学的に変形を拘束する影響範囲の導出を行うとともに、空間周期性を支配する可能性のある新しい無次元パラメータの存在があることを明らかにした。

・自重座屈の観点から、樹木の限界高さに関する力学理論を構築することを試み、テーパーがついた（上に向かって細くなる）形状のタワー構造における限界高さの評価式を新たに導出した。

・これまで継続的に実施していた自動車の走行により自然発生する周期的な凹凸形状路面に関するこれまでの理論、実験成果を取りまとめ、海外学術雑誌に公表した。

・空間周期性を有する植物の代表的なものの一つである竹について、実際に材料として使用される状況を考慮した解析を実施した。具体的には、「竹竿」の曲げ特性を、独特なテーパー形状との関係性から大変形解析により明らかにし、竹の形状が曲げ応力を効果的に低減していることを示した。

・自重座屈の観点から、樹木の限界高さに関する力学理論を構築することを試み、枝葉が自身の幹の高さを増すのに効果的に配置されていることを解析的に実証した。

・フキなどの断面内に周期性を有する形態の解析に着手し、その力学的合理性の一端を明らかにした。特にフキの独特な馬蹄形断面が、荷重の非対称性（葉が特定の方向についている）と密接に関係していることを新たに示した。さらに、非円形断面を有する植物の断面形状を解析的に表示する Gielis 曲線の導入により、新しい定式化を試みた。

・自重座屈の観点から樹木の最大高さ式を理論的に導出するとともに、初期曲がりや支える地盤のゆるさといった要因が樹木高さにどのような影響を与えるかについて、理論式から導出することに成功した。

・草本植物の体勢支持機構を、膨圧により生じる張力として理論式に取り込み、これにより、力学的な観点から木と草を分ける新しい考え方を提示した。

・タワーが直立する際の、テーパー形状と中空構造について、最大高さの観点から両者の優位性の比較を行った。

これら一連の成果は、後述する複数の海外学術雑誌に投稿、掲載に至っている。また、植物形態を構造力学的視点から紐解いた本研究の集大成として、これらの知見をまとめ、2023年7月に岩波書店より岩波科学ライブラリー「竹取工学物語 土木工学者、植物にもものづくりを学ぶ」（右図）を発刊した。今後これらの成果は植物の炭素貯蔵量の正確な推定や、プラントミメティクス的な観点から新しいものづくりに活かせる知見として更なる展開が可能であると考えている。



5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計18件（うち査読付論文 17件 / うち国際共著 0件 / うちオープンアクセス 6件）

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 -
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 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 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 -
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 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 -
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 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
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 Inoue, A., Shimada, M., Sato, M. and Shima, H.	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 -

1. 著者名 Jeong Seonghun, Otsuki Kyoichi, Inoue Akio, Shinohara Yoshinori	4. 巻 24
2. 論文標題 Marked difference of rainfall partitioning in an unmanaged coniferous plantation with high stand density	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Journal of Forest Research	6. 最初と最後の頁 107 ~ 114
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1080/13416979.2018.1551116	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 Umeno Yoshitaka, Yachi Yu, Sato Motohiro, Shima Hiroyuki	4. 巻 106
2. 論文標題 On the atomistic energetics of carbon nanotube collapse from AIREBO potential	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Physica E: Low-dimensional Systems and Nanostructures	6. 最初と最後の頁 319 ~ 325
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.physe.2018.08.006	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 Y. Akiba and H. Shima	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_1-_5
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, Miyazawa Yoshiyuki, Sato Motohiro, Shima Hiroyuki	4. 巻 9
2. 論文標題 Allometric Equations for Predicting Culm Surface Area of Three Bamboo Species (<i>Phyllostachys</i> spp.)	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Forests	6. 最初と最後の頁 295 ~ 295
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3390/f9060295	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, Shimada Miyuki, Sato Motohiro, Shima Hiroyuki	4. 巻 -
2. 論文標題 Estimation of culm volume reduction factors in five bamboo species (<i>Phyllostachys</i> spp.)	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Journal of Forestry Research	6. 最初と最後の頁 -
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 -

1. 著者名 Inoue Akio, Sato Motohiro, Shima Hiroyuki	4. 巻 425
2. 論文標題 Maximum size-density relationship in bamboo forests: Case study of <i>Phyllostachys pubescens</i> forests in Japan	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Forest Ecology and Management	6. 最初と最後の頁 138 ~ 144
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.foreco.2018.05.044	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 N. Uchida and H. Shima	4. 巻 7
2. 論文標題 Ocean tide-induced secular variation in the Earth-Moon dynamics	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Coupled Systems Mechanics	6. 最初と最後の頁 611-626
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.12989/csm.2018.7.5.611	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 鎌田弥成, 谷内 湧, 佐藤太裕, 島 弘幸, 梅野宜崇	4. 巻 23
2. 論文標題 Stone-Wales欠陥がカーボンナノチューブの断面座屈挙動に及ぼす影響について	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 計算工学講演会論文集	6. 最初と最後の頁 B-02-04_01-_02
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29件 (うち招待講演 6件 / うち国際学会 4件)

1. 発表者名 佐藤太裕 (研究代表者)
2. 発表標題 「植物」がエンジニアに教えてくれること - 植物のかたちの力学的合理性から見えてくるもの -
3. 学会等名 北海道技術者育成プラットフォームシンポジウム (招待講演)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 佐藤太裕 (研究代表者)
2. 発表標題 賢い「竹」がもつ構造・材料力学的戦略
3. 学会等名 日本塑性加工学会 ポーラス材料分科会 2021年研究討論会「自然界のポーラス構造」 (招待講演)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 佐藤太裕 (研究代表者)
2. 発表標題 直立植物のかたちに着目材料力学的合理性: 樹木、竹 (など) を例に
3. 学会等名 日本材料学会 北海道・東北支部合同材料フォーラム (招待講演)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 井上昭夫 (研究分担者)
2. 発表標題 樹幹形の効率的かつ安定的な定量化指標
3. 学会等名 第77回九州森林学会大会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 井上昭夫 (研究分担者)
2. 発表標題 針葉樹における樹幹の発達にともなう細りの変化
3. 学会等名 第133回日本森林学会大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 金浜暲也、佐藤太裕 (研究代表者)
2. 発表標題 樹木のテーパ形状が限界高さに与える影響
3. 学会等名 第24回応用力学シンポジウム
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Tohya Kanahama, Motohiro Sato (研究代表者)
2. 発表標題 Growing rule in tapered trees under self-weight loading
3. 学会等名 The 2021 World Congress on Advances in Structural Engineering and Mechanics
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 金浜瞳也、佐藤太裕 (研究代表者)
2. 発表標題 樹木の幹形状と樹冠重量および位置が自重座屈耐性に与える影響
3. 学会等名 令和三年度土木学会全国大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 金浜瞳也、佐藤太裕 (研究代表者)
2. 発表標題 樹木の重量分布が自重座屈耐性に与える影響
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 佐藤太裕 (研究代表者)
2. 発表標題 工学の視点で植物を見る - 賢い「竹」が軽さと丈夫さを併せもつ秘密 -
3. 学会等名 ナイスステップな研究者2019講演会 (招待講演)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 柳井駿斗・亀山侑平・島 弘幸（研究分担者）・井上昭夫（研究分担者）・佐藤太裕（研究代表者）
2. 発表標題 竹の種別による形状の違いと共通性に関する考察
3. 学会等名 第23回応用力学シンポジウム
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 柳井駿斗・亀山侑平・島 弘幸（研究分担者）・井上昭夫（研究分担者）・佐藤太裕（研究代表者）
2. 発表標題 竹の種別比較による特徴的な形状および構造力学的特性の抽出
3. 学会等名 2020年度土木学会全国大会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Motohiro Sato（研究代表者）
2. 発表標題 Learning from bamboo: New mechanical concept of "Plant"-mimetics
3. 学会等名 The 9th East Asia Mechanical and Aerospace Engineering Workshop（招待講演）（国際学会）
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 佐藤太裕（研究代表者）
2. 発表標題 賢い「竹」が生み出す巧みな材料力学的機能の秘密
3. 学会等名 第51回溶融塩化学討論会（招待講演）
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 島弘幸（研究分担者）
2. 発表標題 竹の自然美と機能美
3. 学会等名 第85回形の科学シンポジウム
4. 発表年 2018年

〔図書〕 計1件

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 土木工学者、植物にもものづくりを学ぶ	

〔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	島 弘幸 (Shima Hiroyuki) (40312392)	山梨大学・大学院総合研究部・教授 (13501)	
研究 分担者	梅野 宜崇 (Umeno Yoshitaka) (40314231)	東京大学・生産技術研究所・教授 (12601)	
研究 分担者	井上 昭夫 (Inoue Akio) (80304202)	近畿大学・農学部・教授 (34419)	

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