

平成 30 年 6 月 7 日現在

機関番号：10101

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2015～2017

課題番号：15H04207

研究課題名(和文) ナノ技術および生物科学の積極導入による新しい多重機能型構造システムの研究開発

研究課題名(英文) Research and development of new structural system with multiple functions by introducing nanotechnology and bioscience

研究代表者

佐藤 太裕 (Sato, Motohiro)

北海道大学・工学研究院・准教授

研究者番号：00344482

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 10,100,000円

研究成果の概要(和文)：本研究はナノ技術および生物科学的知見を積極的に導入することにより、既存の概念にとらわれない卓越した多重機能を有する構造材料、構造システムの提案を行うことを大きな目的とするものである。具体的には「カーボンナノチューブ」に代表されるナノスケール炭素繊維の形状変形性能と、それに伴う電子状態変化を積極利用した新しい構造システムや、竹を例に植物が長年の進化の過程で獲得した力学的に最適な形態の模倣技術を活かした構造設計技術の新規提案を行ったものである。

研究成果の概要(英文)：This study proposes new structural systems with multiple functions by introducing nanotechnology and bioscience. To achieve the purpose of this study, we have investigated (1) the novel structural behaviours of "carbon nanotubes" and (2) the new structural biomimetical design concept based on the example of "bamboo".

研究分野：構造力学、応用力学

キーワード：構造力学 構造・機能材料 座屈 生物形態模倣

1. 研究開始当初の背景

本研究は、過酷な環境下にさらされる構造物に用いられる既存の構造材料、複合構造の概念を大きく覆す、「ナノテクおよび生物科学（生物形態の最適模倣技術）の知見を積極的に活用した新しい発想に基づく新しい次世代型構造システム」の研究開発を究極の目標として構想されたものである。

2. 研究の目的

上記の研究目標を達成するために、具体的には「カーボンナノチューブ」に代表されるナノスケール炭素繊維の形状変形性能と、それに伴う電子状態変化を積極利用した新しい構造システムや、竹の特異な構造形態に着目し、長年の進化の過程で獲得した力学的に最適な形態の構造力学的合理性の検証およびその工学的応用技術の開発を目的とした。

3. 研究の方法

ナノメカニクスについては、分子動力学解析および連続体薄肉構造としてのモデリングをベースとして、解析的なアプローチを用いて研究を行うこととした。生物（竹）形態については、現地での計測と構造力学的アプローチの併用により検証を行った。

4. 研究成果

得られた研究成果を列挙すると、以下の通りである。

- (1) カーボンナノチューブの種々の外力作用に対する変形挙動を追跡する解析コードの整備と、それを用いて欠陥を有する層数の少ない(1-3層程度の)カーボンナノチューブに生じる特異な変形挙動を見出した。(これは静水圧作用時に欠陥部分が突出し、外圧除荷後も塑性変形が残るということを意味する。)
- (2) カーボンナノチューブの曲げ、軸圧縮荷重を受ける状況下における挙動の把握を行う解析モデルを薄肉円筒シェル理論ベースで構築した。これにより特に多層ナノチューブにおいて軸方向に波状変形を伴う興味深い挙動が抽出された。また静水圧荷重下における解析は軸方向の周期境界を用いることにより原子数の制約が少ないことから、分子動力学解析を実施し、特に欠陥のあるナノチューブに対して特徴的な荷重 - エネルギー曲線が得られることを確認した。
- (3) カーボンナノチューブの欠陥に着目

し、円周方向に欠陥が複数配置された場合の断面座屈強度について分子動力学解析手法により検証を行った。その結果、欠陥を周期的に配置した場合に、断面座屈強度を大きく増加させることを新たに見出した。

- (4) 竹の節構造に着目し、竹自身の曲げ抵抗メカニズムと節間長の関係を合理的に定量化する構造モデルを新たに提案した。これにより竹が外力に対し曲げモーメントが大きくなる根本付近で節間長や肉厚、半径の最適な組み合わせにより曲げに抵抗する一方、曲げモーメントが小さくなる先端付近に向かうにつれ、曲げ抵抗性を弱めるという合理的な構造諸元をとっていることを構造力学的に実証した。
- (5) 竹の断面内組織構造（維管束分布）に着目し、これが曲げ剛性に与える影響について構造力学的に考察し、既往の維管束分布計測結果と比較を試みた。その結果維管束分布平均密度に応じて竹は曲げ剛性が最大となるように分布していることを見出した。具体的には断面積が小さく維管束密度も低い先端部分では一次関数に従い、断面積が大きく維管束密度が大きい根本付近では二次関数に従うとされた計測結果に対し、各断面で曲げ剛性を最大とする分布密度の関数形は非常によく一致することが確認された。(この成果は科学雑誌Newton2017年8月号にScience Sensorの記事として紹介された。)
- (6) 竹の断面内組織構造（維管束分布）に着目し、上記成果(5)曲げ剛性に関する断面内組織構造の最適配列が、曲げ応力に対しても最適配列であることを理論的に示した。また竹の節と組織配列の影響を考慮した、曲げ変形に対する断面偏平化メカニズムについて検討を行い、これらの影響を全て含めた新たな断面偏平抑制効果を示す無次元パラメータを理論的に導出した。このように、竹の断面内組織配列が非常に巧みに構造特性を最適性していることから、この事実ヒントを得た、新しい複合構造技術の開発に着手した。

また、また本申請課題を基課題とする科研費（国際共同研究強化）に採択となり、本課題の期間中英国ケンブリッジ大学(2017年)、韓国仁川大学(2016年)での在外共同研究を実施し、本申請課題と有機的に融合することで、研究の内容を充実させることができた。

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 6 件)

- 1) M. Sato, A. Inoue and H. Shima:
Bamboo-inspired optimal design for functionally graded hollow cylinders, PLoS ONE, 12(5): e0175029 (2017), 査読有
DOI: <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0175029>
- 2) A. Inoue, S. Tochihara, M. Sato and H. Shima:
Universal node distribution in three bamboo species (*Phyllostachys* spp.), Trees -Structure and Function, Vol.31, pp.1271-1278 (2017), 査読有
DOI: 10.1007/s00468-017-1546-2
- 3) M. Sato, Y. Yachi, I. Koike, H. Shima and Y. Umeno:
Cross-sectional Deformation in Multi-walled Carbon Nanotubes under Hydrostatic Pressure, Solid State Phenomena, Vol. 258, pp. 65-68 (2017), 査読有
DOI: <https://www.scientific.net/SSP.258.65>
- 4) Y. Umeno, M(asanobu). Sato, H. Shima and M(otohiro) Sato: Atomistic modeling analysis of buckling behavior of compressed carbon nanotubes, Solid State Phenomena, Vol. 258, pp. 61-64 (2017), 査読有
DOI: <https://www.scientific.net/SSP.258.61>
- 5) 佐藤太裕, 谷垣俊行, 佐藤諭佳, 島弘幸, 井上昭夫:
竹の節・組織構造が織り成す円筒体としての合理的な構造特性の理論的解明, 土木学会論文集 A2(応用力学), Vol.72, No.2, p.I_25-I_34 (2016), 査読有
DOI: https://doi.org/10.2208/jscejam.72.I_25
- 6) H. Shima, M. Sato and A. Inoue:
Self-adaptive formation of uneven node spacings in wild bamboo
Physical Review E, Vol.93, 022406 (2016), 査読有
DOI: 10.1103/PhysRevE.93.022406

[学会発表](計 16 件)

- 1) 齋藤 太郎: 竹の組織配列に学ぶ複合円筒構造の応力負担最適化に関する考察, 土木学会北海道支部平成 29 年度年次技術研究発表会, 2018.
- 2) 鎌田 弥成: Stone-Wales 欠陥を有した単層カーボンナノチューブの静水圧荷重下における座屈挙動解析, 土木学会北海道

支部平成 29 年度年次技術研究発表会, 2018.

- 3) 宮川 奨: 剛性の傾斜分布にみる竹の力学的最適化戦略, 第 20 回応用力学シンポジウム, 2017.
- 4) 谷内 湧: 静水圧荷重下における Stone-Wales 欠陥を有する CNT の特異な断面変形性質, 第 20 回応用力学シンポジウム, 2017.
- 5) 石上 一翔: カーボンナノチューブの軸圧縮挙動における層間相互作用の力学的役割, 第 20 回応用力学シンポジウム, 2017.
- 6) 佐藤 太裕: 竹の節・組織構造が織り成す円筒体としての合理的な構造特性の理論的解明, 第 19 回応用力学シンポジウム, 2016.
- 7) 谷内 湧: 多層カーボンナノチューブに生じる特異な断面座屈挙動の分子動力学解析, 第 19 回応用力学シンポジウム, 2016.
- 8) 谷内 湧: 静水圧荷重を受ける単層及び多層カーボンナノチューブにおける座屈挙動解析モデルの検討, 第 21 回計算工学講演会, 2016.
- 9) K. Ishigami: Size-dependency of bending moment and critical curvature relationship in multi-walled carbon nanotubes under pure bending, The 2016 World Congress on Advances in Civil, Environmental, and Materials Research (ACEM16), 2016.
- 10) T. Tanigaki: Rational bending properties of wild bamboo with peculiar tissue structures and nodes, The 2016 World Congress on Advances in Civil, Environmental, and Materials Research (ACEM16), 2016.
- 11) Y. Yachi: Buckling behavior analysis of hydrostatically pressurized multi-walled carbon nanotubes by molecular dynamics simulations, The 2016 World Congress on Advances in Civil, Environmental, and Materials Research (ACEM16), 2016.
- 12) 宮川 奨: 竹の特異な組織配列から学ぶ円筒構造の傾斜剛性の最適化に関する考察, 土木学会北海道支部平成 28 年度年次技術研究発表会, 2017.
- 13) 樋口 諒: カイラリティの違いがカーボンナノチューブの断面座屈荷重に及ぼす影響, 土木学会北海道支部平成 28 年度年次技術研究発表会, 2017.

- 14) 池岡直哉：種々の外力を受けるカーボンナノチューブの波状変形モード解析，第18回応用力学シンポジウム，2015.
- 15) 佐藤諭佳：竹の特異な構造形態に学ぶ円筒構造の最適な曲げ抵抗メカニズムに関する基礎的検討，第18回応用力学シンポジウム，2015.
- 16) 佐藤太裕：分子動力学法を用いたカーボンナノチューブに生じる特異な断面座屈モードの解析，日本計算工学会第20回計算工学講演会，2015.

〔図書〕(計 0 件)

〔産業財産権〕

出願状況(計 0 件)

取得状況(計 0 件)

〔その他〕

6. 研究組織

(1)研究代表者

佐藤 太裕 (SATO, Motohiro)

北海道大学・大学院工学研究院・准教授

研究者番号：00344482

(2)研究分担者

()

研究者番号：

(3)連携研究者

なし

(4)研究協力者

なし