

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 27 年 6 月 23 日現在

機関番号：10101

研究種目：若手研究(A)

研究期間：2012～2014

課題番号：24686096

研究課題名(和文)剛・柔の効果的組合せにより高靱性・応力集中低減を実現する革新的海洋構造技術の開発

研究課題名(英文)Development on state-of-the-art high performance structural technologies by combination of hard and soft materials

研究代表者

佐藤 太裕 (Sato, Motohiro)

北海道大学・工学(系)研究科(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) 7,600,000円

研究成果の概要(和文)：本研究は、海洋構造物をはじめとする広範な工学的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「剛・柔材料を効果的に組み合わせることにより高靱性・応力集中の低減を容易に実現可能な新しい発想に基づく構造システム」の研究開発を目的としたものである。本研究により合理的な積層構造、中詰剤充填パイプインパイプ、カーボンナノチューブを用いた次世代構造材料といった幅広い構造技術が提案され、その高い構造性能について主に解析的見地から新規な研究知見が得られた。

研究成果の概要(英文)：This study proposes the state-of-the-art high performance structural systems by combination of hard and soft materials in order to prevent stress concentration and to realize high durability and resilience. To do this, we have investigated the structural properties of some new structural technologies, such as pipe-in-pipe systems with granular core materials, laminate structures, carbon nanotubes, and so on. Theoretical and analytical researches have been carried out throughout the latest numerical techniques and we have shown some noble structural performances.

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

## 1. 研究開始当初の背景

社会基盤構造物が過酷な環境下においても要求性能として靱性能の向上や、応力集中を高次元で回避すべく、積層構造の材料開発も含めた次世代を見据えた構造材料開発のイノベーションを目指すという背景のもと、申請研究が立案された。

## 2. 研究の目的

本研究は、海洋構造物をはじめとする広範な工学的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「剛・柔材料を効果的に組み合わせることにより高靱性・応力集中の低減を容易に実現可能な新しい発想に基づく構造システム」の研究開発を目的としたものである。

## 3. 研究の方法

上記研究目的を達成するために、主に解析的、理論的見地より多角的な検証を行い、想定する構造形式の力学的優位性について実証することとした。

## 4. 研究成果

研究期間内に得られた成果を以下に列挙する。

- (1) 剛・柔の簡易な二次元規則積層構造モデルを構築し、定式化を行った。その結果、柔層の存在しない構造に対して剛・柔の規則積層構造は亀裂進展に対する応力集中低減効果があることが解析的に確認された。
- (2) 高靱性パイプとして期待されるパイプインパイプの曲げ挙動について、断面偏平の観点から検証し、塑性領域での高靱性化に提案する砂粒子コア材の有用性を確認した。またその断面偏平抑制効果を解析的にも実証した。
- (3) 他媒体に埋め込んだカーボンナノチューブの機能を解析的に検証した。具体的には他媒体との相互作用による外圧印加時のカーボンナノチューブの力学的性質の変化を、分子動力学モデルおよび連続弾性体モデルを構築し、両モデルに対して座屈変形解析を実施した。その結果外圧印加の状態や多層化などによりいくつかの特異な幾何形状の変化がみられ、それによる導電性変化の可能性が見出された。分子動力学解析においては大変形の解析を正確に行うことができ、連続体モデルでは計算負荷の少ない解析を行えることから、双方の利点を活かした諸特性の検証が可

能となった。

- (4) 単層および多層カーボンナノチューブの外圧作用時の大変形挙動について、これまで用いてきた円筒シェル理論ベースの解析では再現できなかった欠陥を有する、いわゆる不完全系のカーボンナノチューブの解析を分子動力学解析により再現した。
- (5) 上記分子動力学解析より、二層カーボンナノチューブにおいて外圧作用時に欠陥部分が突出する特異な現象を見出し、かつ除荷後に完全系では見られなかった塑性変形が生じることを明らかにした。この結果はカーボンナノチューブの工学的応用、特に他媒体の内包などといった観点から有用な知見である。
- (6) 外圧作用により断面変形が生じた状態のカーボンナノチューブにおいて、バンドギャップ計算により導電性変化を検証した。その結果、単なる座屈変形ではなく、大変形が進行し相対する原子間距離が接近した際に導電性が変化することが明らかになった。
- (7) 構造材と弾性媒質の相互作用がもたらす力学的性質について、構造力学的観点から検証を行った。具体的には相互作用により生じうる「螺旋座屈現象」について詳細な定式化を行い、構造材に引張力が作用している時にも螺旋変形が発達しうることなど、特徴的な性質を明らかにした。

## 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 13 件)

- 1) S. Harasawa and M. Sato: Helical buckling of slender beam structures surrounded by an elastic medium, *Journal of mechanics* (査読有) (published online), 2015.  
DOI: 10.1017/jmech.2014.92
- 2) M. Sato, Y. Ishiwata: Brazier effect of single and double walled elastic tubes under pure bending, *Structural Engineering and Mechanics, An International Journal* (査読有), Vol.53, No.31, pp.17-26, 2015.  
DOI: 10.12989/sem.2015.53.1.017
- 3) H. Shima, Y. Umeno and M. Sato: Molecular dynamics study of radial corrugation in carbon nanotubes, *Mechanics of Advanced Materials and*

- Structures (査読有), Vol.22, No.6, pp.423-427, 2015.  
DOI: 10.1080/15376494.2012.761303
- 4) M. Sato, Y. Konishi and S. -J. Park: Interlayer coupling effect on buckling modes of spherical bilayers, Journal of mechanics (査読有), Vol.31, No.1, pp.29-36, 2015.  
DOI: 10.1017/jmech.2014.64
- 5) Y. Umeno, I. Koike, A. Kusano, H. Shima and M. Sato: Atomistic origin of radial corrugation in few-walled carbon nanotubes: A molecular dynamics study, Physica E (査読有), Vol. 65, pp.135-140, 2015.  
DOI: 10.1016/j.physe.2014.09.010
- 6) H. Shima, M. Sato and S. -J. Park: Suppression of Brazier effect in multilayered cylinders, Advances in Condensed Matter Physics (査読有), Volume 2014, Article ID 923896, 10 pages, 2014.  
DOI: 10.1155/2014/923896
- 7) 小池育代、草野彩子、佐藤太裕、梅野宜崇、島 弘幸: 分子動力学法を用いた多層カーボンナノチューブの波状変形挙動解析, 土木学会論文集 A2 (応用力学) (査読有), Vol.70, No.2, 2014.  
DOI: 10.2208/jscejam.70.I\_25
- 8) M. Sato, H. Shima and S. -J. Park: Stiffener Insertion based Variance in Radial Stiffness of Multi-concentric Hollow Tubes under hydrostatic pressure, Journal of Mechanics (査読有), Vol.29, No.4, pp. 583-588, 2013.  
DOI: 10.1017/jmech.2013.59
- 9) S. -J. Park, H. Shima and M. Sato: Kaleidoscopic mode change in cross-sectional deformation of reinforced carbon nanotubes, International Journal of Modern Physics B. (査読有) Vol.27, No.31, pp. 1350179\_1- 1350179\_9, 2013.  
DOI: 10.1142/S0217979213501798
- 10) H. Taira and M. Sato: Effect of open-core screw dislocation on axial conductivity in semiconductor crystals, Advances in Nano Research, An International Journal (査読有), Vol. 1, No. 3, pp.171-182, 2013.  
DOI: 10.12989/anr.2013.1.3.171
- 11) H. Taira, H. Shima, Y. Umeno and M. Sato: Radial deformation and band-gap modulation of pressurized carbon nanotubes, Coupled Systems Mechanics, An International Journal(査読有), Vol.2, No.2, pp.147-157, 2013.  
DOI: 10.12989/csm.2013.2.2.147
- 12) M. Sato, H. Taira, T. Ikeda and H. Shima: Embedding effect on the mechanical stability of pressurised carbon nanotubes, Journal of Nanomaterials (査読有), Volume 2013, Article ID 767249, 9 pages, 2013.  
DOI: 10.1155/2013/767249
- 13) M. Sato, M. A. Wadee, K. Iiboshi, T. Sekizawa and H. Shima: Buckling Patterns of Complete Spherical Shells Filled with an Elastic Medium under External Pressure, International Journal of Mechanical Sciences (査読有), Vol.59(1), pp.22-30, 2012.  
DOI: 10.1016/j.ijmecsci.2012.02.001
- 〔学会発表〕(計 28 件)
- 1) 池岡 直哉: "カーボンナノチューブの断面座屈挙動に与える外圧印加方向の影響" 土木学会北海道支部平成 26 年度年次技術研究発表会. (2015 年 2 月 1 日). 室蘭工業大学(北海道室蘭市)
- 2) 草野 彩子: "分子動力学法を用いたカーボンナノチューブの座屈挙動と電子状態変化に関する解析" 土木学会北海道支部平成 26 年度年次技術研究発表会. (2015 年 2 月 1 日). 室蘭工業大学(北海道室蘭市)
- 3) 原澤 祥典: "弾性拘束された線状構造に生じる螺旋座屈形態の解析的検討" 土木学会北海道支部平成 26 年度年次技術研究発表会. (2015 年 1 月 31 日). 室蘭工業大学(北海道室蘭市)
- 4) 梅野 宜崇: "多層カーボンナノチューブの静水圧下皺状変形の原子モデル解析" 日本機械学会第 6 回マイクロ・ナノ工学シンポジウム. (2014 年 10 月 20 日). くにびきメッセ(島根県松江市)
- 5) 丸山 俊樹: "弾性拘束を受ける各種構造部材の座屈荷重におけるべき乗則の検討" 土木学会平成 26 年度年次学術講演会. (2014 年 9 月 10 日). 大阪大学豊中キャンパス(大阪府豊中市)
- 6) 小池 育代: "分子動力学法による単層および多層カーボンナノチューブの断面変形挙動解析" 土木学会平成 26 年度年次学術講演会. (2014 年 9 月 12 日). 大阪大学豊中キャンパス(大阪府豊中市)
- 7) Yuko Matsuo: "Comparison of highway bridge RC-Slab designs between Hong Kong and Japan" The 2014 World Congress on Advances in Civil, Environment & Materials Research. (2014 年 8 月 26 日). BEXCO(韓国・プサン)
- 8) Ikuyo Koike: "Molecular dynamics

- simulations of hydrostatically pressurized multi-walled carbon nanotubes" The 2014 World Congress on Advances in Civil, Environment & Materials Research. (2014年8月26日). BEXCO(韓国・プサン)
- 9) Yoshitaka Umeno: "Atomistic modelling analysis of corrugating instability and deformation of multi-walled carbon nanotubes" ACEX2014: 8<sup>th</sup> International Conference on Advanced Computational Engineering and Experiment. (2014年7月1日). SPACES CAP15(フランス・パリ)
  - 10) 原澤 祥典、丸山 俊樹: "弾性拘束された構造部材群の座屈荷重におけるべき乗則の導出" 土木学会第17回応用力学シンポジウム(ポスター発表). (2014年5月11日). 琉球大学工学部(沖縄県那覇市)
  - 11) 小池 育代、草野 彩子: "分子動力学法を用いた多層カーボンナノチューブの波状変形挙動解析" 土木学会第17回応用力学シンポジウム(ポスター発表). (2014年5月11日). 琉球大学工学部(沖縄県那覇市)
  - 12) 石渡 裕太: "多層カーボンナノチューブの曲げ挙動における後座屈挙動の解析" 土木学会北海道支部平成25年度年次技術研究発表会. (2014年2月1日). 札幌コンベンションセンター(北海道札幌市)
  - 13) 小池 育代: "静水圧荷重が作用する単層および二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精度検証" 土木学会北海道支部平成25年度年次技術研究発表会. (2014年2月1日). 札幌コンベンションセンター(北海道札幌市)
  - 14) 丸山 俊樹: "弾性拘束された構造部材の座屈荷重におけるべき乗則の導出" 土木学会北海道支部平成25年度年次技術研究発表会. (2014年2月1日). 札幌コンベンションセンター(北海道札幌市)
  - 15) 寺田 豊: "ファイバーモデルによるパイプインパイプの弾塑性挙動評価" 土木学会北海道支部平成25年度年次技術研究発表会. (2014年2月1日). 札幌コンベンションセンター(北海道札幌市)
  - 16) Hisao Taira: "Effects of a screw dislocation on axial conductivity", 2013 International Conference on Innovative Structural Engineering & Mechanics (ISEM13), Int'l Convention Center Jeju (2013年9月11日)(韓国・チェジュ)
  - 17) Ayako Kusano: "Buckling patterns of hydrostatically pressurized multiwalled carbon nanotubes embedded in an elastic medium", 2013 International Conference on Innovative Structural Engineering & Mechanics (ISEM13), Int'l Convention Center Jeju (2013年9月10日)(韓国・チェジュ)
  - 18) Yoshiteru Konishi: "Buckling of double-walled complete spherical shells under pressure", 2013 International Conference on Innovative Structural Engineering & Mechanics (ISEM13), Int'l Convention Center Jeju (2013年9月10日)(韓国・チェジュ)
  - 19) Shosuke Harasawa: "Helical buckling of slender beam structures surrounded by an elastic medium", 2013 International Conference on Innovative Structural Engineering & Mechanics (ISEM13), Int'l Convention Center Jeju (2013年9月9日)(韓国・チェジュ)
  - 20) 池田 哲郎: "弾性体中多層カーボンナノチューブの弾性体性質変化に対する座屈特性の比較検討" 土木学会北海道支部平成24年度年次技術研究発表会. (2013年2月3日). 函館工業高等専門学校(北海道函館市)
  - 21) Motohiro Sato: "Brazier effect of single and double walled elastic tubes under pure bending", 2013 International Conference on Innovative Structural Engineering & Mechanics (ISEM13), Int'l Convention Center Jeju (2013年9月9日)(韓国・チェジュ)
  - 22) 木村 響: "剛柔の規則積層構造における応力集中低減効果について" 土木学会北海道支部平成24年度年次技術研究発表会. (2013年2月3日). 函館工業高等専門学校(北海道函館市)
  - 23) 原澤 祥典: "弾性拘束された線状構造の収縮による螺旋座屈形態の解析的検討" 土木学会北海道支部平成24年度年次技術研究発表会. (2013年2月3日). 函館工業高等専門学校(北海道函館市)
  - 24) 草野 彩子: "分子動力学法を用いた静水圧荷重下における多層カーボンナノチューブの座屈挙動解析" 土木学会北海道支部平成24年度年次技術研究発表会. (2013年2月3日). 函館工業高等専門学校(北海道函館市)
  - 25) 笹 祐也: "数値近似による中詰材充填パイプインパイプの塑性変形評価" 土木学会北海道支部平成24年度年次技術研究発表会. (2013年2月3日). 函館工業高等専門学校(北海道函館市)
  - 26) 林 昌宏: "中詰材料がもたらすパイプインパイプの塑性曲げ変形特性につい

て" 土木学会北海道支部平成 24 年度年次技術研究発表会. (2013 年 2 月 3 日). 函館工業高等専門学校(北海道函館市)

- 27) Tetsuro Ikeda: "Wavy-Shaped Cross-Sectional Deformation in Multiwalled Cylinders with Inner Stiffener" World Congress on Advances in Civil, Environmental, and Materials Research. (2012 年 8 月 28 日). COEX(韓国・ソウル)
- 28) Takafumi Sekizawa: "Symmetry-Breaking Deformation Mode in Radially-Pressurized Complete Spherical Shells" World Congress on Advances in Civil, Environmental, and Materials Research. (2012 年 8 月 28 日). COEX(韓国・ソウル)

〔図書〕(計 1 件)

- 1) H.Shima and M.Sato : Elastic and Plastic Deformation of Carbon Nanotubes, Pan Stanford Publishing, 272 pp. ISBN: 978-981431075-8, 2013.

〔産業財産権〕

取得状況(計 1 件)

名称: 埋設用二重管、該埋設用二重管を有するパイプライン

発明者: 蟹江俊仁、佐藤太裕、赤川 敏、田中俊哉

権利者: JFE エンジニアリング株式会社

種類: 特許権

番号: 第 5262684 号

出願年月日: 2008 年 12 月 24 日

取得年月日: 2013 年 5 月 10 日

国内外の別: 国内

〔その他〕

本研究成果等に関連して平成 25 年度北海道科学技術奨励賞(北海道知事表彰)を受賞  
報道 URL:

<http://e-kensin.net/news/article/7942.html>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

佐藤 太裕 (MOTOHIRO SATO)

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

なし

(3) 連携研究者

なし