

チューブ状構造の外力作用時に生じる特異な座屈変形モードに関する構造力学的研究

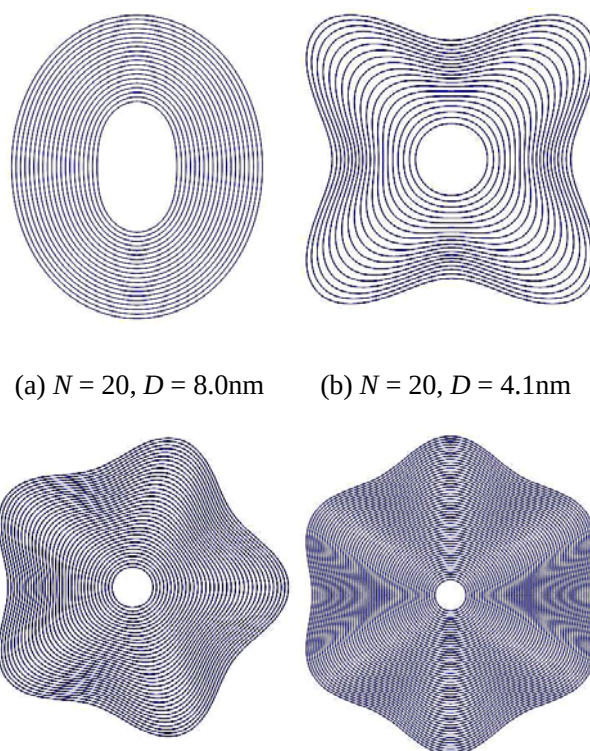
北海道大学大学院 正 員 ○佐藤 太裕
 北海道大学大学院 学生員 飯干晃太郎
 北海道大学大学院 学生員 梶田 寛人
 北海道大学大学院 学生員 水口 翼

1. はじめに

チューブあるいは円筒構造は、その優れた力学的特性からパイプラインや圧力容器等、工学分野で古くから広く用いられている。また近年では炭素原子により構成されるグラフェンシートを筒状にしたカーボンナノチューブ (Carbon nanotube, 以下 CNT) の有用性が世界的に注目され、さまざまな面から精力的な研究が進められている¹⁾ (このうち CNT の力学的特性に関する過去に行われた理論および実験研究の概略については著者の一人である佐藤らがまとめた文献 2) を参照いただきたい)。著者らは構造力学的アプローチにより、これまで CNT など弾性チューブ状構造の圧力および曲げ作用時における特徴的な波状変形座屈モードに関する研究を行ってきた。本報告では著者らの行ったこれまでの研究の概略を紹介するとともに、特にナノ科学分野における構造力学的アプローチに基づく研究の意義について述べる。

2. 圧力作用時の特異な座屈変形モード

弾性チューブの断面半径方向に静水圧が作用する場合、単層のチューブであれば楕円形の座屈モードが生じることとなる。しかしながら径の異なる何層ものチューブによって同心円状に構成される多層 CNT のような構造形式の場合、層間に作用する分子間力の影響により、非常に特徴的な座屈変形モードが生じることとなる。図-1 は著者らが理論的に導出した変形モードの一例である。定式化は系のポテンシャルエネルギーを導出し、変分原理に基づいて行ったものである (定式化の詳細については文献 2) を参照されたい)。この解析により、層数や内径の変化により、楕円モードと波状変形モードが生じうることが確認された。特に楕円モードでは、各層がほぼ同じ割合で変形するのに対し、波状変形モードは外側の数層のみが変形し、内側の層は円形を保持する点が非常に特徴的である。



(a) $N = 20, D = 8.0\text{nm}$ (b) $N = 20, D = 4.1\text{nm}$

(c) $N = 35, D = 4.1\text{nm}$ (d) $N = 50, D = 4.1\text{nm}$

図-1 圧力作用時における多層 CNT の座屈変形モード (N : 層数, D : 内径)

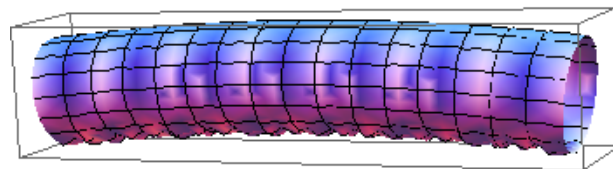
3. 曲げ作用時の特異な座屈変形モード

弾性チューブに曲げ外力が作用する場合、外力の増加に伴い断面が扁平化したのち、折れ曲がってしまうか、チューブの圧縮側に Ripple と呼ばれる波状変形を引き起こすことが経験的に知られている。図-2 は Ripple を再現した解析結果である。定式化は基本的に圧力作用時のものと

キーワード チューブ構造, 円筒シェル, カーボンナノチューブ

連絡先 〒060-8628 札幌市北区北 13 条西 8 丁目 北海道大学 佐藤太裕 TEL 011-706-6176

同様の考え方に基づいている。本解析は未だ基礎的な段階であり、今後詳細な検討を行う予定であるが、その構造挙動を適切に表現しうる数値モデルになりうると考えている。



4. ナノ科学分野での構造力学的アプローチに基づく研究の意義と今後の研究展開

CNT は軽量、高強度、高弾性というこれまでの他の物質を凌駕する非常に優れた性質を有していることから、次世代の構造材料として大きな着目を集めている⁵⁾。この中で CNT 物性研究では理論・数値計算アプローチによる挙動予測が非常に重要な役割を担う。このため古くから第一原理や分子動力学ベースの解析が広く行われている。これらは力学現象を非常に高精度で再現可能な手法であるといえる。しかしながら原子の1つ1つを

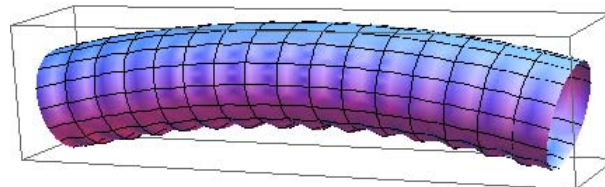


図-2 曲げ作用による波状変形モードの解析例

忠実に再現するため、特に本報告で取り上げた多層 CNT のような構造形式では、その計算負荷が極めて大きくなるという欠点がある。構造力学、連続体力学をベースにした考え方をを用いると、この問題は解消される。また連続体力学をベースにした場合、単なるケーススタディにとどまらず、力学現象、挙動の本質に迫ることが出来る点は大きな利点であると考えている。だが今度は解析精度が問題となってくる。連続体力学をベースにした場合、原子の結合体を連続体に「ならす」ため、モデル化の段階でその精度が失われる可能性が指摘される。この点について現在カタルーニャ工科大学の研究チームと合同で、原子レベルによる解析と、連続体モデルに基づく解析を比較することにより、連続体モデルの解析精度の検討を行っている。現在の予備的な比較解析では両者は非常によく一致しており、連続体モデルの妥当性が確認されつつある。上記の点から、ナノ構造解析に連続体モデルを用いることは非常に有用かつ有力なツールになりうると考えられる。今後これらの観点から更なる力学的研究を展開していく予定である。

謝辞

本研究の一部は日本学術振興会科学研究費補助金若手研究 (B) (研究課題番号: 21760662 (研究代表者: 佐藤太裕)) により実施されました。また本研究を遂行するにあたり、北海道大学島弘幸助教、カタルーニャ工科大学 (LaCàN) グループの Marino Arroyo 准教授, Susanta Gosh 博士, Mohammad Rahimi 氏からは有益な助言を頂きました。カタルーニャ工科大学との共同研究実施に際し、佐藤が北海道大学総長室重点配分経費を受けました。関係各位に厚く御礼申し上げます。

参考文献

- 1) Iijima, S.: Helical microtubes of graphitic carbon, *Nature*, **354**, pp.56-58, 1991.
- 2) Shima, H. and Sato, M.: Multiple radial corrugations in multiwall carbon nanotubes under pressure, *Nanotechnology*, Vol.19, 495705, 2008.
- 3) Sato, M. and Shima, H.: Buckling Characteristics of Multiwalled Carbon Nanotubes under External Pressure, *Interactions and Multiscale Mechanics, An International Journal*, Vol.2(2), pp.209-222, 2009.
- 4) Rahimi, M., Arroyo, M., Shima, H. and Sato, M.: Comparison between linear thin shells and an atomistic-based model for buckling of multiwalled carbon nanotubes under hydrostatic pressure, Abstract for the 16th US Congress on Theoretical and Applied Mechanics (USNCTAM2010, USA)
- 5) 新谷紀雄監修: 次世代構造材料の最新技術—社会・産業へのインパクト—, シーエムシー出版, 2008.