

令和 2 年 6 月 3 日現在

機関番号：34315

研究種目：挑戦的研究（萌芽）

研究期間：2018～2019

課題番号：18K18741

研究課題名（和文）幾何学的な弾性：柔軟と堅固、適応と機能

研究課題名（英文）Geometric elasticity: Flexibility, rigidity, and functionality

研究代表者

和田 浩史（Wada, Hirofumi）

立命館大学・理工学部・教授

研究者番号：50456753

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 4,800,000円

研究成果の概要（和文）：本研究課題では、リボンやシェル、あるいはそれらを折りこんだ構造（折り紙）が示す力学特性を、理論と実験を組み合わせて明らかにした。具体的には、4つの独立したテーマについて研究成果を得た。一つ目は、半円筒シェルの保持長を調べ、幾何学的な剛性との関係を明らかにした。二つ目には、ねじりによって誘起する弾性リボンのスナップ座屈現象について調べ、そのふるまいと仕組みを解明した。三つ目には「かみばね」の構造と力学特性について調べ、ねじれと引っ張りの間の大きな結合の起原を明らかにした。最後に、開いた円筒シェルをモデル系に選び、スナップフィットとよばれる工学デザインのもつ力学的仕組みを明らかにした。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究の主題は、物体の変形の様子や、硬い柔らかいといった印象についてであり、誰もが手で触って確かめることができる性質である。薄い構造は、木々の葉っぱから卵の殻、折り紙、衣服、自動車の車体など、我々の身のまわりにあふれている。多くの場合、これらの構造はその目的にかなう機能性を備えており、その機能を実現するために適した力学特性を持っている。本研究は、そのような特性がいかにして材質とかたちから創発するのかを明らかにする。研究対象は「スナップ」や「かみばね」など親しみやすいものを含むが、得られた概念は一般的なものであり、身近な対象を深く理解する楽しみとともに、工業デザインへの潜在的な応用性を提供する。

研究成果の概要（英文）：In this research project, we have studied mechanics of slender elastic structures such as a ribbon, shell, and origami by combining experiment and theory. Specifically, we have obtained the major results in four different research subjects. First, we have investigated the persistence of pinch in an open semi-cylindrical shell and discussed its relevance to the geometric rigidity of a shell with open free edges. Second, we have revealed a novel snapping dynamics found in a bent and twisted elastic ribbon, and discussed its potential applications to soft robotics. Third, we have studied the design and mechanics of a paper spring that is known as a popular origami-like craft for kids, and clarified its remarkable geometric coupling between stretch and twist. Finally, we have studied a physical basis for "snap-fits" widely used in industrial products, by constructing a simple snap-fit system with a cylindrical shell.

研究分野：連続体物理学

キーワード：幾何的な弾性論 構造力学 スナップ 座屈

1. 研究開始当初の背景

本研究はかたちのもつ力学についての研究である。とくに、フィラメントやプレート、シェルなど、細いまたはうすい構造物の示す特徴的な力学についての研究である。これらの形態は、細菌の鞭毛、植物の葉っぱ、卵の殻から、自動車の車体まで、あらゆるスケールの自然と人工の物質においてみられる。それらに共通する力学的特性を調べる研究は、構造力学や材料力学分野において長い研究の歴史を持つが、近年、物理学の研究対象としてリバイバルし、大きな注目を集めている。背景には、3D プリントなどのデジタルベースの造形技術の普及により、理論と実験の両面から十分に定量的な研究が実施できるようになってきたという事情があげられる。うすい構造物においては、構造のもつ幾何学的な性質がその力学特性に大きな影響を与える。「うすい構造のもつ曲率が、構造全体の変形をどのように支配し、その力学特性を決めるのか」「自然界や人工のデザインが、しなやかな力学特性をつうじて、どのようにその機能性を獲得しているのか」という問題は、メカニクス分野における重要課題となり、世界的にも活発な研究分野となっている。このような背景を踏まえ、本計画では、断面に曲率を持つリボンをはじめとして、いくつかの典型的な形状を持つシェルの力学的特性について、実験、数値シミュレーション、理論の両側面から調べる研究課題を提案した。

2. 研究の目的

本研究では、断面に曲率をもつリボン(半円筒シェル)の力学特性を物理学的に定式化する。純粋に幾何学的な効果がマクロな物体に剛性ととも(ある種の)柔軟さ、しなやかさ、をもたらしうることを理論と実験を組み合わせることで明らかにする。

重力のもとでしっかりとその形状を保つ「硬い」物体は、しばしばもろい。例えば、割り箸を強く曲げると、破壊してしまう。針金は大きく塑性変形し、外力を取り除いても、もとには戻らない(不可逆過程)。一般に「壊れにくさ」と「硬さ」は相反する特性であり、材料科学的には両極の特性を単一の材質で実現することは容易ではない。ところが、メジャーテープのような構造は重力のもとで十分硬く、かつ断面が適応的に変形することで「可逆的に」折れ曲がることできる。これは材質ではなく、幾何学的なデザインにその力学応答の起源をもつためである。そう考えると、植物の葉っぱなど、「柔軟な幾何学的性質」が生かされていると思われる実例は自然界に数多くあることに気がつく。

本研究の目的は「幾何学的な力学特性」の理論的なフレームワークを確立し、形態学や工学デザインにも有益な知見を生み出すことである。

3. 研究の方法

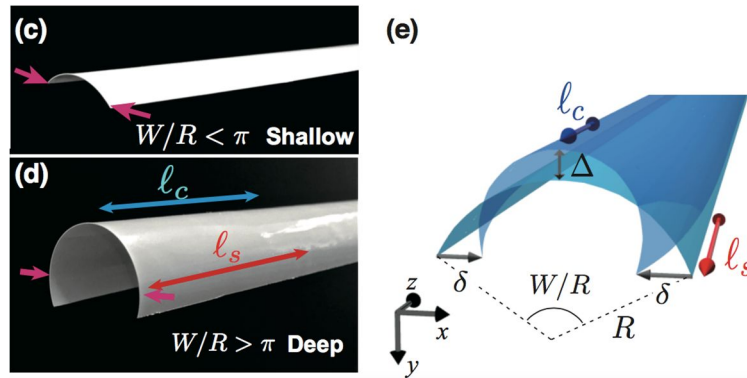
本研究では、数値シミュレーション、マクロ模型実験、理論(解析的+スケーリング)の3つのアプローチを組み合わせる方法論を実践した。マクロ模型の作成には、市販のプラスチック板の加工(コンピュータベースのカッティング、熱による形成加工)または液体からエラストマーゴムを硬化形成する方法を用いた。変形状計測には画像解析・レーザ変位計(キーエンス)、力測定には標準的な方法(ステップモータによる位置制御+ロードセル)などを用いた。数値シミュレーションによる構造解析や応力場の計算には、カスタマイズのコード開発に加えて、汎用の有限要素解析ツールである Abaqus(ダッソーシステム社)をもちいた。これにより、実験結果を裏付け、さらに実験では容易にアクセスできない物理量(例えば、全域にわたる空間的な曲率分布や応力分布)を知ることができた。

4. 研究成果

2年間の研究実施期間に、大きく分けて4つの成果をあげることができた。このうち3件については論文を出版済み、1件については現在、学術誌において査読中である。以下、順番に要約を与える。

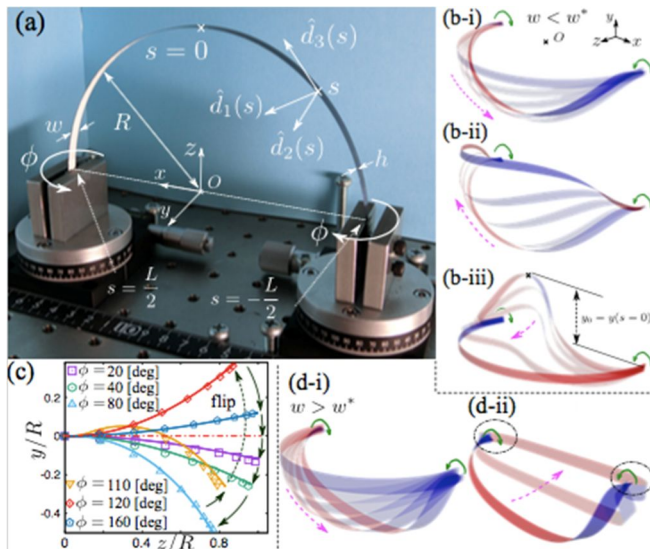
(1) 開いた円筒シェルの保持長と幾何学剛性：

「研究目的」の項で述べたとおり、理想的な円筒シェルは幾何学的な剛性を示す。では、葉っぱのような開いた円筒系シェルはどうであろうか。われわれは、断面に曲率を持つリボン的一端に一对の圧縮力を加え、それによって誘起された変形が軸に沿って減衰し、シェルが元の形を取り戻すまでの距離(回復長)を調べた。まず、浅い半円筒シェルに対して回復長の新しいスケーリング則を理論的に導出した。次に、有限要素法による数値シミュレーションと実際の模型をもちいた精度の高い測定実験を実施し、このスケーリング則を確立した。加えて、これらの実験結果から、浅いシェルに対して導いたスケーリング則が、任意の深さのシェルに対して正当であることを発見した。以上の成果を論文にまとめて Europhys. Lett. (EPL) に出版した。



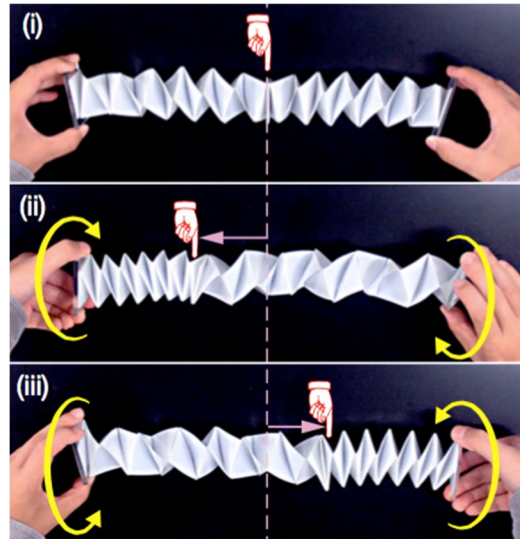
(2) まげとねじりによって誘起する弾性リボンのスナップ座屈現象：

紙やプラスチック薄膜からなるリボンを半円をなすように拘束し、両端を同じ方向に回転させていく。すると、リボンははじめ面外へたわむように変形するが、そのあと跳ねかえり、「パチン」という音とともに、表と裏が反転して初期配置にもどる。この反転現象はスナップ座屈の一種であるが、ねじりをもなった3次元的動きが生じるため、過去の研究例よりも非自明で興味深い性質をもつ。我々は実験、理論、シミュレーションを組みあわせ、この現象の仕組みを明らかにした。リボンのねじりスナップ現象は、曲げとねじれの幾何学的な結合をうまく利用しているので、両端の境界条件を調整するだけで、蓄えた弾性変形エネルギーを、思いどおりのタイミングで一気に運動エネルギーに変換することができる。しかも、このサイクルプロセスは、繰り返し何度でも行うことができる。これは、応用を考えるうえでも好ましい性質である。以上の成果を論文にまとめ、Phys. Rev. Lett. に出版した。



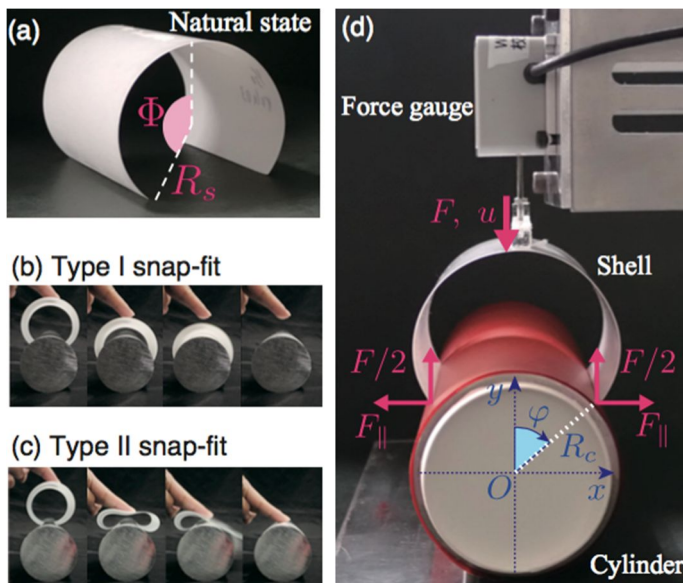
(3) かみばねの構造、デザイン、力学特性：

二枚の紙を折り合わせてつくる「かみばね」のもつ力学特性を、実験と数値シミュレーションの両面から調べ、その特異な幾何学的構造から生まれる大きな「ひっぱり-ねじれ結合」の起原を明らかにしたことである。「かみばね」は子供たちによく親しまれた折り紙の一種であるが、そのばね的な弾性力とともに、ねじれによって大きく伸縮するという顕著な特徴をもち、学術的にも興味深い対象である。我々はプラスチック薄膜をもちいて精巧なかみばね模型を系統的に作成し、その詳細な力学計測をおこなった。同時に ABAQUS による有限要素解析を実施し、実験結果とのよい一致を得た。これらとスケーリング理論を合わせ、かみばねの創発的な弾性力およびメタマテリアル的な特性を明らかにした。これらの成果をまとめた論文は Physical Review E に出版され、Editor's suggestion にも選出された。



(4) 「スナップフィット」デザインの背後にある力学：

スナップフィットは、プラスチックカバーなど、多くの工業製品の着脱部に使われる汎用的なデザインである。しかしながら、「なぜスナップフィットはうまく機能するのか」という問いに対して、今日までかならずしも物理学に基づく明確な回答はえられていないようである。我々は、開いた円筒形の弾性シェルがそれよりもいくぶん大きい半径をもつ円筒に押しつけられたとき、ある臨界押し込み力以上で「パチンとはまる」現象に注目し、このモデル系を実験、数値シミュレーション、解析理論を組み合わせることで詳しく調べた。そして、シェルの幾何形状、弾性、摩擦力がどのように相互作用にして、スナップフィットの持つ「はめやすいが、外しにくい」という特徴的な力学性質が創発するのか、を明らかにした。これらの成果をまとめた論文はプレプリントサーバに公開済みであり、現在、学術誌において査読中である。



5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計4件（うち査読付論文 4件/うち国際共著 0件/うちオープンアクセス 1件）

1. 著者名 Daichi Matsumoto, Tomohiko G. Sano, and Hirofumi Wada	4. 巻 123
2. 論文標題 Pinching an open cylindrical shell: Extended deformation and its persistence	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 EPL (Europhysics Letters)	6. 最初と最後の頁 14001
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) https://doi.org/10.1209/0295-5075/123/14001	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 Tomohiko G. Sano and Hirofumi Wada	4. 巻 122
2. 論文標題 Twist-induced snapping in a bent elastic rod and ribbon	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Physical Review Letters	6. 最初と最後の頁 114301
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.122.114301	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 Taiju Yoneda, Daichi Matsumoto and Hirofumi Wada	4. 巻 100
2. 論文標題 Structure, design, and mechanics of a paper spring	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Physical Review E	6. 最初と最後の頁 13003
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) https://doi.org/10.1103/PhysRevE.100.013003	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 佐野友彦 和田浩史	4. 巻 74
2. 論文標題 しなやかさとともにかたちあり --弾性と幾何	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 日本物理学会誌	6. 最初と最後の頁 822-829
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 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2件（うち招待講演 1件 / うち国際学会 1件）

1. 発表者名 Hirofumi Wada
2. 発表標題 A snapping ribbon, cone, and cylinder
3. 学会等名 GFS follow on: Mathematics of form in active and inactive media (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 和田浩史 吉田圭介
2. 発表標題 からくり玩具パタパタ(ヤコブの梯子)の力学模型
3. 学会等名 日本物理学会 2019年秋季大会
4. 発表年 2019年

〔図書〕 計1件

1. 著者名 Hirofumi Wada and Daichi Matsumoto	4. 発行年 2018年
2. 出版社 Springer	5. 総ページ数 441 (うち127-140を執筆)
3. 書名 Plant Biomechanics ("Twsiting Growth in Plant Roots"の章を執筆)	

〔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
---------	---------------------------	-----------------------	----