

科学研究費助成事業 研究成果報告書

令和 4 年 6 月 8 日現在

機関番号：34315

研究種目：基盤研究(B)（一般）

研究期間：2018～2021

課題番号：18H01192

研究課題名（和文）スケールアップモデルで探る細菌のメカニカルデザイン

研究課題名（英文）Mechanics of walled biological cells explored with macroscale physical models

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） 13,000,000円

研究成果の概要（和文）：本研究課題では、円筒シェルを始めとする多彩な形状を持つ弾性シェルが示す力学特性や不安定性を、定量的なマクロ模型実験（計測）と詳細な計算機シミュレーション、および理論的解析を組み合わせることで総合的に明らかにした。当初の目的は、細菌や植物細胞のように、堅固な細胞壁を有する生物細胞がもつ強さと柔軟さの起源を明らかにし、その生物学な機能の仕組みを物理学の言葉で理解することであった。4年の研究期間を通じて、関連するテーマも積極的に追求することで、大きく分けて5つの成果を得ることができた。それらは、円筒シェルから、弾性リボン、折り紙や切り紙、そしてスナップフィットのような工業デザインまで、多岐にわたる。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究課題の主題は、バクテリアや植物細胞の生物学的機能を支える力学的構造についての理解を深めることであった。力学的側面に着目する限り、類似の構造を有するもっと巨視的でありふれた対象を深く調べることには大きな意義がある。本研究では、円筒型の弾性シェルの変形に始まり、弾性リボン、折り紙や切り紙、そしてスナップフィットのような工業デザインの力学的仕組みまで、多岐にわたる系の新たな性質をいくつも明らかにした。これらの成果は、親しみやすい系への我々の理解を直接的に促進しただけでなく、細胞壁をもつ生物の力学デザインを明らかにするための概念的基盤を提供するものである。

研究成果の概要（英文）：In this research project, we have investigated mechanics and geometry of a range of thin structures including rods, ribbons, plates and cylindrical shells by combining physical experiments, numerical simulations and analytical theory. The project aimed at obtaining mechanical insights onto the structures and functions of walled biological cells such as bacteria and plant cells. While we were less successful at revealing effects of large turgor pressure on such stiff walled cells, we were able to obtain the major results in the five inter-related projects, the details of which are described separately in this final report.

研究分野：メカニクス

キーワード：弾性シェル 座屈不安定性 バイオメカニクス

1. 研究開始当初の背景

本研究課題の主目的は、主に円筒形の弾性シェルがもつさまざまな力学特性や不安定性を、定量的なマクロ模型実験(計測)と詳細な計算機シミュレーション、および理論的解析を組み合わせることで総合的に明らかにすることである。このような研究テーマを設定した当初の背景には、細菌などの微生物および植物の細胞のように、堅固な細胞壁を有する生物細胞がもつ力学的な強さと柔軟さの起源を明らかにし、その生物学な機能の仕組みを物理学の言葉で理解しようという狙いがあった。この学問的文脈において、まずは膨圧の効果に注目し、内圧によって張力を生じた弾性膜を準備し、その圧力を制御しつつ力学的な性質を計測するという研究計画を提案した。また、細菌学において、細胞壁の内側にある骨格構造も細胞の剛性にかなりの程度寄与することを示す研究報告がなされていた。これを受けて、マクロ模型においてこの効果を定量化する研究も計画していた。

2. 研究の目的

いざ取り組んでみると、風船型の物理模型を精度よく作成するにあたっていくつかの技術的な困難(膜のシーリングや内圧の制御と計測の問題など)があることが判明した。また、作成してもあまり幅広い圧力領域で計測を行うことが難しいことが理論と数値計算から示唆された。以上の事実を踏まえ、2-3年目からは、内圧の効果の有無にこだわらず、本課題の主テーマから派生する興味深いテーマについても意欲的に追及してきた。したがって、全体的な研究目的は、曲率を持つ弾性膜やシェルが引き起こすさまざまな不安定性と創発する機能性を、物理学的な視点から解明するという、より力学的な方面にシフトしてきた。と同時に、細菌のメカニカルデザインというテーマの路線では、細菌の鞭毛が円筒形の菌体に巻ついてドリル運動をするという新しい微生物学上の発見に対して、その力学的仕組みを水槽内のマクロ実験で調べるという研究も推進してきた。

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、カスタムメイド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7つの成果をあげることができた。このうち5件については論文を出版済み、2件については現在さらに研究を推進中である。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:

円筒型のシェルは桿菌や植物細胞の理想的な力学モデルである。また、円筒シェルは周方向に曲率を持つため、幾何学的な剛性を示す。これらの理由から、円筒シェルに対しては多くの研究報告がある。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の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：

リボンやストリップと呼ばれるうすく長い構造はありふれているが、細菌や植物細胞の細胞骨格を形成するたんぱく質繊維リボンなどを理想化したモデルでもある。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の種であるが、ねじりをともなった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ため、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。「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」とその機能を創発する力学：

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、「そもそもなぜスナップフィット構造はうまく機能するのか？」という基本的な問いに対して、物理学に基づく明確な答えはこれまで与えられていなかった。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 Physical Review Letters に出版され、海外の科学系メディアにもカバーされた。

(5) 平面からポップアップして立体構造を生み出す「折り切り構造」:

平面に描いた折り線と切り線のパターンから一気に三次元構造を作り上げるユニークな「折り切り紙」デザインについて、その構造と力学特性をマクロモデルによる計測実験と有限要素解析計算によって明らかにした。このデザインは建築家の宮本氏(愛知工業大学)によるもので、本研究成果は宮本氏との共同研究である。この成果は Phys. Rev. Applied 誌に出版され、同ジャーナルの Editor's Suggestion にも選出された。

(6)現在進行中の関連テーマ：

細菌のメカニカルデザインというテーマの路線では、細菌の鞭毛が円筒形の菌体に巻ついてドリル運動をするという新しい発見に対して、その力学的仕組みを水槽内のマクロ実験で調べている。これまでは水中で準備実験を行ってきたが、今年度は液体をグリセリンに置換して実験を開始している。鞭毛のモデルは、シリコンエラストマーに鉄粉を混ぜることで密度マッチングした。その結果、モーターの逆回転に誘起されて巻きつき転移が起こる様子を再現することができた。

セル構造を基盤とする曲面構造は、細胞壁から骨の構造まで、生物界の幅広い長さスケールに渡ってみられ、バイオデザインの典型例であるが、詳細な物理的研究は未だに少ない。我々は、エラストマー材を使った3Dプリンタ技術をもちいて、セル構造体を基盤とする弾性板(「メタプレート」と呼ぶべきもの)を作成し、その曲げ変形において生じるさまざまな曲率構造(双曲面や楕円面、放物面など)と力学応答を調べている。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計6件（うち査読付論文 6件/うち国際共著 0件/うちオープンアクセス 3件）

1. 著者名 Keisuke Yoshida and Hirofumi Wada	4. 巻 125
2. 論文標題 Mechanics of a Snap Fit	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Physical Review Letters	6. 最初と最後の頁 194301
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1103/PhysRevLett.125.194301	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） 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 -
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 (Europhys 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） 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) 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 Yoneda Taiju, Miyamoto Yoshinobu, Wada Hirofumi	4. 巻 17
2. 論文標題 Structure, Design, and Mechanics of a Pop-Up Origami with Cuts	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Physical Review Applied	6. 最初と最後の頁 L021004
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevApplied.17.L021004	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 -

[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 和田浩史
2. 発表標題 からくりおもちゃパタパタ (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

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

〔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 ("Twisting 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
---------------------------	-----------------------	----

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1件

国際研究集会 APEF2018	開催年 2018年～2018年
--------------------	--------------------

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