

博士論文要旨

論文題名： 効果的な展開・収納を実現する 「折り」「切り」構造のデザインとメカニクス

立命館大学大学院理工学研究科
基礎理工学専攻博士課程後期課程
ヨネダ タイジユ
米田 大樹

本論文では、折り紙や切り紙ベースの展開型構造に注目し、具体的なモデルに対してその基本的な作動メカニズムを明らかにした研究結果について述べる。本研究は将来的に、最適設計されたシート弾性構造を人工システムで使用方法を提供することにつながると期待される。この数十年の間に、うすい構造の展開と収納に関する研究は物理学において活発な研究分野となった。その中でも図1のように昆虫の翅や植物の花弁など、有限の厚さと材料の弾性を有するうすいシート構造の剛性や弾性についての理解が飛躍的に進展してきた。弾性のあるシートを折ったり切ったりして、特定の構造を持たせると、変形と弾性力が密接に相互作用することにより、展開収納を可能にする機能を創発する。この機能を得るための最小の構造が何なのか、幾何学と力学の関係を、定量的に予想する普遍的な枠組みを構築することが、学問的には大きな目標である。

本論文では、特定の機能を持つ2つの構造に注目し、定量的な実験と有限要素法シミュレーションを組み合わせて、その物理学的特性を詳細にわたって明らかにした。前半では、回転と並進の運動をカップリングさせる紙ばねという、身近で子どもにも人気のある折り紙遊戯に焦点を当てた(図2)。紙ばねは、2本の細長い紙をじゃばらで折り込んだだけの単純な構造であるにも関わらず、動かすとばねの伸縮とねじれに強いカップリング機能が生じる。本研究では、紙ばねの非線形な弾性力と、ねじれが生じる原因となる構造、そして1枚のシートの



図1 生物に見られる折りたたみ構造例。展開に面弾性を巧みに利用するが、その仕組みは未解明なことが多い。

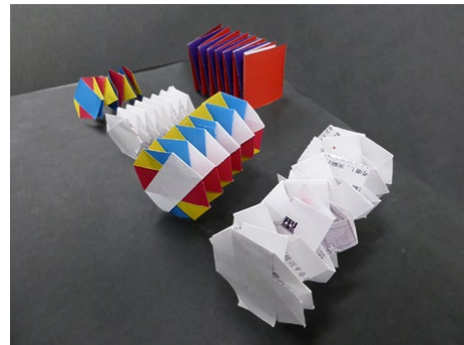


図2 デスクトップスケールで作成が可能な身近な折り紙に注目、その力学機能を詳しく調べた。

みの弾性を詳細に調べ、それらの関係性を明らかにした。その結果、2本の紙が互いの変形を制約し合うインターロッキング構造によって、うすいシートが幾何学的な変形制約を受け、展開時に局所的な曲げと面内圧縮を余儀なくされたことで、構造の剛性が強化されることを示した。この構造デザイン的设计によって、構造の両端にかかる力とモーメントを制御するだけで、回転運動と並進運動の可逆的な変換が可能になる。

論文の後半では、平面シートから三次元構造を形成する、折り紙と切り紙が融合した RES (Rotational Erection System) という設計手法を取り上げた。折り紙と切り紙を組み合わせることで、折り紙が持たない、横方向の系のサイズを維持したまま縦方向に立体化できる機能と、切り紙には実現が難しい、形状の多重安定性を同時に発現させている。ここでは、有限要素法解析と物理実験を組み合わせることで、3回対称 RES の機械的特性を明らかにした。折り目と切り目の幾何的パターンにもとづく、この系は剛体折りでは展開できない。しかし、面の弾性を伴った曲げ変形によって、エネルギー的に離散した2つの形状を繋ぐ物理的な経路ができていたことを実証できた。これによって、RES の弾性は、スナップスルー変形で立体化することを可能にし、RES を双安定の機能が生まれていることがわかった。双安定のエネルギーバリアは、構造のサイズには依存せず、曲げ変形が最も顕著に起こる部位のアスペクト比にのみ依存することも示した。また立ち上がった状態の RES は、その独特なセルフロックの機構によって剛性を発揮し、強い耐荷重の機能も有することを示した。

以上のように、本論文では、折り紙および切り紙の発想にもとづくうすい構造体において、シンプルなデザインを持つ二つの具体例に注目し、その物理的特性を細部にわたり、また十分に定量的に明らかにした。これらの結果は、実用的要求に応えるより複雑な構造を発想するさいの概念的な基盤となり、将来的に折り紙・切り紙ベースの構造による機能をプログラムできるようなデザインを可能にするという点で重要である。

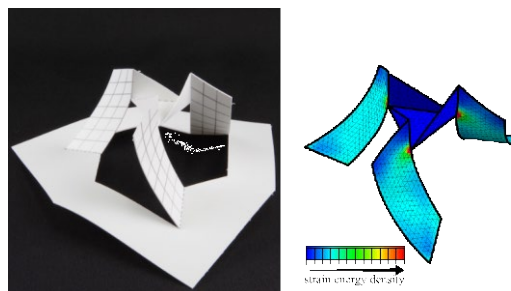


図 3 実験模型と有限要素法シミュレーションの図。これらと理論解析等を組み合わせ、展開収納のデザインに必要なメカニズムを明らかにした。

Abstract of Doctoral Dissertation

Title:
**Mechanics of "Ori-kirigami" designs
for efficient folding and deployment**

Doctoral Program in Advanced Mathematics and Physics
Graduate School of Science and Engineering
Ritsumeikan University

ヨネダ タイジュ

YONEDA Taiju

Foldable thin structures, ubiquitous in engineering, arts, architecture, and biology, are currently exploited in a range of applications including solar sails, soft robotics, and mechanical metamaterials. To understand geometrical and mechanical properties of those functional solid systems, the study of deployable thin structures has become an active research field in physics in the last two decades. In the present thesis, we describe the detailed study of two specific examples in a class of origami-based structures. By combining fabrication, physical experiment and numerical simulation, we show how a particular function of each system emerges from its elasticity and geometric design.

In the first part of the thesis, we describe a quantitative study of a paper spring during its actuation. While a paper spring is a simple paper craft popular with children due to its curious springy response, this origami-based composite also exhibits a significant twist deformation during its extension, which we explain in terms of its unique interlocking structure.

In the second part of the thesis, we describe an extensive physical study of rotational erection system (RES) that represents an origami-based design method to generate a three-dimensional (3D) structure from a planar sheet. Its 3D rotational and translational kinematics is fully encoded in the form of prescribed cuts and folds in 2D. We show how the elasticity of RES allows the RES to morph into a 3D shape via a snap-through transition. We also reveal that the RES in the standing position has considerable structural rigidity, owing to its unique self-locking mechanism, indicating its superior load-bearing performance in a range of applications.

The present study clarifies the fundamental actuation mechanism in the two examples of origami-based deployable structures, which will facilitate a way to use the optimally designed "ori-kirigami" structures in a variety of man-made systems.