

## 研究終了報告書

### 「自己組織化による構造折紙パターンの創生」

研究期間：2019年10月～2023年3月

研究者：舘 知宏

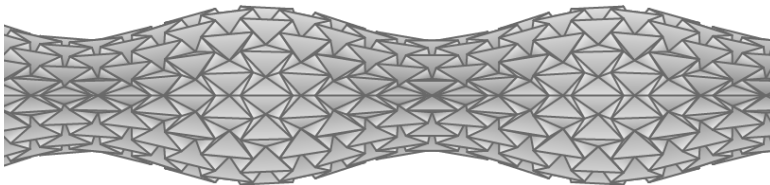
#### 1. 研究のねらい

三次元的構造を折り畳む「オリガミ」の原理からは、展開・折り畳みを繰り返して用いることのできる仮設建築物、自己変形し機能が切り替わるソフトロボット、特異な剛性や振動特性を持つ機械的メタマテリアルなどへの応用の展望がある。このような折り畳みによる動的な機能性は、折りパターンの配置によって劇的に変わり、既存の材料や構造物からは生み出せない特異な性質が得られることが近年の研究で分かってきた。その一方で、どのような配置の折りパターンとすれば、欲しい構造性能を得られるのかはほとんどの場合未解決であった。

この限界の主たる要因は、(1) 形状と性質の関係についてその背後にある「なぜ」の部分に迫っていないこと、(2) 個別のパターンごとに研究が閉じておりパターンを横断した枠組みが存在しないこと、(3) 50年以上前に発見されたパターンを使いまわして新規パターンを生み出すためのアプローチが不足していることであると考えた。そこで、本研究では、折りの形と構造機能の背後にある原理を記述できるようにすること、さらに新規パターンを生み出すための仕組みを提案することを目指す。

本研究では、特に「巨視的視点」と「自己組織化」をキーアイデアとして研究アプローチを構築した。巨視的視点とは、個別のパターンや部分の幾何学的状態よりも、全体システムの挙動をとらえる枠組みを提供することである。自己組織化とは、折りの部分が隣接する部分と互いに作用しあうことで具体的なパターンや巨視的なモードが生まれることに着目することである。

具体的には、(A) 成長によるシワの自己組織化を模擬したシワの形成システム (B) 曲面設計手法 (C) 構造折紙の数理解明 (D) 諸分野への応用とアウトリーチ、の4項目から研究を行ってきた。折りが「形」を作る現象に関して、(A)が「自己組織化」に関して、(B)が「巨視的視点」を担っている。一方で(C)は折りが「動き」や機械的性質を作る現象を含む幅広い項目であるが、その具体的アプローチは研究開始時点では明らかになっておらず、領域を横断した研究者とのコラボレーションによってその原理を見出していくことをねらった。最後に(D)の項目は、STEAM(科学、技術、工学、アート、数学)を横断した協働活動を行い、本研究テーマの様々な分野への広がりを目指した。



図：左：巨視的な曲面変形に着目する。右：「シワ」の自己組織化に着想を得た

#### 2. 研究成果

## (1) 概要

研究項目(A)では、物理シミュレーションベースのシステムによって曲面のシワを自己組織化させパターンを抽出する手法を開発した。また、(B)では、シワのある曲面を縮小写像として巨視的にとらえることで、折りで実現可能な曲面を特徴づけした。そのうえで、三角形メッシュを利用した曲面について制約を満たす縮小写像を計算する手法を開発した。(A)(B)を合わせて、自在な曲面形状を一枚のシート材から作り出す新規パターンの生成手法を実現した。

研究項目(C)では、(C-1)折りが「動き」を作る剛体折紙理論に基づいて、「巨視的」な「自己組織化」現象を記述する方法として離散力学系を用いたアプローチを新規開拓した。折紙テセレーションと呼ばれる繰り返し構造を持つパターンについて、部分的な変形を行うと、その部分変形が隣接部分に伝播して、全体を変化させる仕組みを明らかにした。具体的には、不動点周りの準周期解の存在、安定性・不安定性の分岐現象、保存系としての性質を明らかにしたほか、孤立波(ソリトン)があらわれることを発見した。(C-2)加えて、国内外の研究者との協働によって、曲面を含む折紙の解析、弾性変形を含む折紙の解析、剛体折紙の新規手法など、多角的な構造折紙の成果を得た。これに際して「折紙」に関する学際的協働未解決問題ワークショップ(Structural Origami Gathering)の主催(2020~2022)などを通して国際協働のネットワークを構築した。

研究項目(D)では、美術家・学部生・大学院生・共同研究者との協働による数理とアートを横断する研究を行った。この活動からは新規の問いが生まれ、研究論文と同時に作品も得られた。STEAMを横断した取り組みを「つながるかたち展」として開催し、アウトリーチを行った。(A)(B)の「かたち」の自己組織化に関する当初目標を達成したほか、(C)からは当初想定していなかった、折りの「動き」の力学系という領域を新規開拓し、大きな飛躍があった。(C)(D)の国際協働ワークショップやアウトリーチを通じたSTEAM協働をきっかけとして「かたちの数理」に関する問いが多く得られ、本研究をきっかけとした国際協働ネットワークが構築された。

## (2) 詳細

### (A) 成長によるシワの自己組織化を模擬したシワの形成システム

三角形メッシュを用いた物理シミュレーションおよび最適化ベースのシステムによって曲面のシワを自己組織化させパターンを抽出する手法を開発した。変形後の曲面を「外在的ターゲット」、変形前の曲面を「内在的ターゲット」として定義し、外在的ターゲットに対する引力、内在的ターゲットに対する等長性を保つ面内剛性、曲面全体の正則性のために導入する曲げ剛性の3種類の力のつり合いを求めるシステムを構築した。オープンソース化を見据え、現在普及しているプロシージャルモデリングソフトのHoudiniおよび3D CAD Rhinoceros/Grasshopper上で実装を行った。本研究を進めるうえで(1)自己組織化される折り目特徴のコントロールと、(2)完全な等長性を実現する場合の計算の不安定さの2点が課題となった。(1)はパターン周期とシャープさの特徴が、3種類の力の重みづけによって変化することに着目し、それらをコントロールするメタパラメータを導出することで解決した。(2)は、メッシュの形状を自由に变化できる等長性と、なめらかな単曲面としての性質を維持する最適化手法の組み合わせにより解決した。結果として整理された曲線折紙が生成される仕組みを構築した。

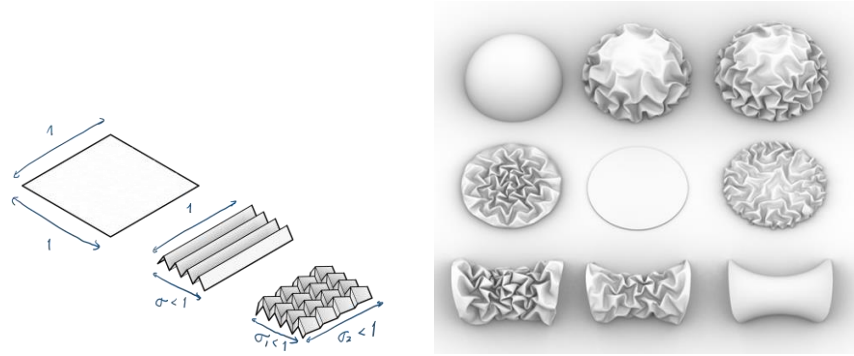


図: (左) 折りによって実現される写像 (右) 力のつり合いによって生成される折り目パターン。

(B) 曲面設計手法

シワが近似することのできる巨視的な曲面を写像としてとらえると、この写像は縮小写像であることが必要十分条件となる。さらに、(A)の結果からシワの形状や効率性が縮小率の最大値と最小値によって支配されることが分かったため、性質の良い折紙の縮小率のヒューリスティックな条件を導いた。そこで、縮小率に関する条件を写像の変形勾配テンソルの二つの特異値に対する制限として表現したモデルを構築し、計算可能とした。具体的には与えられた三角形メッシュに対して特異値の制限を加えた写像を構築する手法を 3D CAD Rhinoceros / Grasshopper 上で実装した。

(A)と(B)の成果を組み合わせることで、自在な曲面形状を一枚のシート材から作り出す手法を構築した。折り線パターンのトポロジーを事前に与えることが前提となっていた既存手法とは異なり、曲面生成の条件から折り線パターンが導かれる点に新規性がある。特に、縮小率の設定によって効率の良い折りパターンが生じること、自己組織的に曲線折紙のパターンが現れることなどが特徴である。この成果は、SIGGRAPH(CG のトップカンファレンス)査読付き展示で展示された[4]、論文は投稿準備中である。論文発表と併せてソフトウェアツールの公開も計画している。論文出版自体は研究期間後を予定しているが、研究計画の目的は達成できた。



図: (左) 内在的、外在的ターゲットから、折り目パターンを生成する (右) 生成されたパターンを用いた曲線折紙 ([4])

(C) 構造折紙の数理解明

### (C-1) 離散力学系による折りの動きの記述:

筒状に閉じた折紙テセレーション(繰り返し構造を持つ折りパターン)について、従来の枠組みでは、部分の折り状態が一様に繰り返されていることを仮定した「一様な折り」のモデルが使われてきた。しかし、実際には部分的な変形を行うと、その部分変形が隣接部分に伝播するとき、異なる変形状態を生み出し、それらの連鎖によって全体が非自明な変化を起こすことに着目した。このような非一様な変形からは、たとえば波型の曲面が生じるなど豊かな現象の源であることが分かっていたが、その挙動を表現する数理は知られていなかった。

本研究では、折紙テセレーションが持つ非一様な折り挙動を離散力学系で表現することによって、折りの動きの巨視的な自己組織化現象に迫った。なまこ折りと呼ばれる筒状の折紙テセレーションについて、波状の形状変形が不動点周りの準周期解として記述できること、さらに安定性・不安定性の分岐現象が現れることを明らかにした[1]、また一般化した筒状の折紙テセレーションについて同様の系をなすことを突き止め、それを保存系に由来するものであることを明らかにした[2]、さらに系のホモクリニック軌道を用いること折紙テセレーションの孤立波(ソリトン)を作れることを発見した[5]。折紙を含むメカニズムを力学系で扱うこと自体が新規開拓のテーマであり、その汎用性の高さから今後メタマテリアルに携わる科学者や数学者が参入して大いに発展する余地がある。当初の想定を超えた成果である。

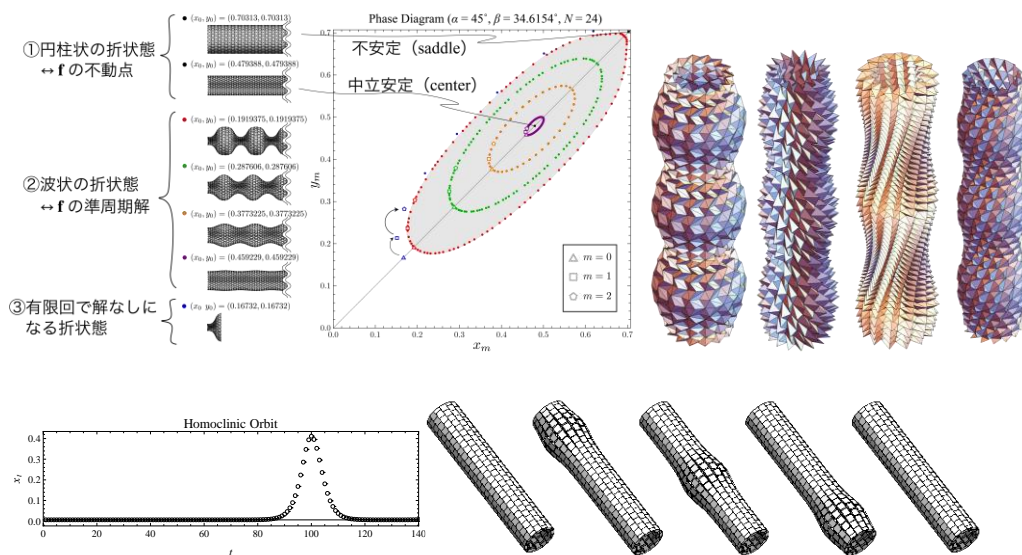


図: 左上: 不動点と不動点回りの安定性が全体形状に影響を与える[1]。右上: 様々なパターンで現れる波型パターン[2]。下: 折紙テセレーションから生み出される孤立波(ソリトン)[5]

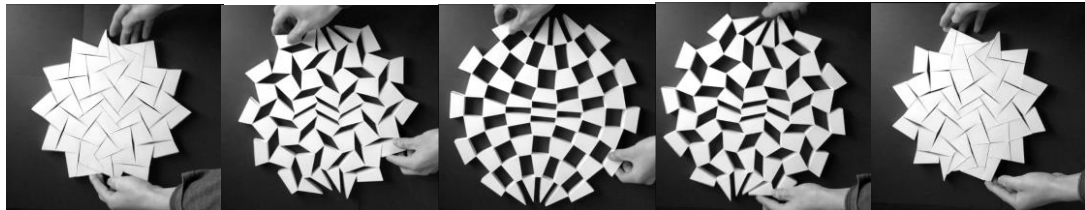
(C-2) 加えて、「折紙」に関する国際的な協働未解決問題ワークショップ(Structural Origami Gathering [8])の主催(2020~2022)などを通して、国内外の研究者との協働を行った。曲面を含む折紙の解析、弾性変形を含む折紙の挙動解析(アメリカ機械学会の全論文誌を横断した論文賞 Melville Medal の受賞[7]など)、剛体折紙の新規手法など、多角的な構造折紙研究(建築幾何学の国際会議での招待講演[6]など)を行った。想定を超えた幅広い協働成果と、新たな問いを得て、今後持続発展可能な活発な国際協働のネットワークを構築した。

### (D) 諸分野への応用とアウトリーチ

STEAM(科学、技術、工学、アート、数学)を横断した協働活動を行い、本研究テーマの様々



な分野への広がりを目指した。美術家・学部生・大学院生・共同研究者とともに、数理とアートを横断する研究活動・制作活動を行った。これらの成果は新規の問いを生み多くの論文発表（[3]など多数）につながると同時に、多くの作品を作り出した。これら STEAM を横断した取り組みを紹介するために、展示シリーズである「つながるかたち展 CONNECTING ARTIFACTS」を開始し、2021 年および 2022 年に開催した [9]。さきがけ研究のアウトリーチとなると同時に、今後、STEAM 協働による研究活動を拡大していく上でのプラットフォームともなった。



図：アートとの協働（東京 2020 エンブレムからの発想）による auxetic 材料[3]



図：左：道明（組紐老舗）との協働による展示（Photo: Wagner Romano / Japan House São Paulo）。右：つながるかたち展 01/02 [9]

### 3. 今後の展開

本研究の(A)(B)から得られた、折り形状を巨視的に扱える手法は、平面への印刷と加熱による自己変形で立体化する「自己折り手法」と組み合わせ、社会実装されることで、プロダクト製造方法の革新につながる展望がある。現在、国内研究者と UV プリントと熱収縮フィルムを使った自己折り (Inkjet 4D Print) について共同研究を行い、平面材料を折ることで立体化する技術を開発している。自己折りを用いた自在な形状の製造方式について、応用研究を進める予定である。

本さきがけ研究を拡張し一般化した研究プロジェクトも開始している。本研究では折紙によって生まれる「巨視的な収縮」を扱ったが、紙に切り目を入れた切り紙やリンケージでは、「巨視的な伸展」を引き起こすことができる。切り紙に引っ張り力を与えることで様々な立体構造が誘起される仕組みについて、その数理解明やデバイス応用を目指し、「切り紙構造が誘起する折り紙構造の学理創出とデバイス実証」（科研費基盤 S、代表：岩瀬英治、2022 年度～）が開始している。

(C-1)で得られた、折りの動きを巨視的に扱う枠組みは、生まれたてのテーマであり、数理的な未解決問題も多い。さきがけ領域の数学者との協働や(C-2)で構築した国際協働ネットワークなどを通して、「折紙」や「キリガミ」が系として持つ性質を解き明かす計画であ

る。新たに発見したソリトンや大域的自由度などの現象は「機械的メタマテリアル」の実現に用いることができる。特異な動的な挙動を生み出す折紙構造の系を設計することで、衝撃吸収、振動抑制、物性の切り替えが可能な材料などの研究を目指している。既に民間研究所との共同研究でメタマテリアル基礎研究と応用研究を進めている。

研究項目(C-2)と(D)から生まれた、STEAM 横断型のアクティビティと国際協働のネットワークは今後さらに輪を広げていく予定である。すでに「つながるかたち展」は、東京大学教養学部のSTEAM 教育プログラム「文理融合ゼミナール」と連携して、意欲的な学部生を学際研究の最前線に巻き込む場として機能している。さらに国際協働ネットワークとも連動することで、将来、国際的な研究コミュニティの中核を担う研究者の育成にもつなげる計画である。具体的には、ADCORP(世界のトップ研究者ネットワーク参画のための国際研究協力プログラム)「計算機を活用した設計技術と製造技術による人と環境にやさしい人工物の実現」(代表者:五十嵐健夫、2023.4～)のなかで国際研究ネットワークの発展に挑む。

#### 4. 自己評価

研究目的の達成状況: 本研究のすべての項目について、当初目的が順調に達成できた。さらに、(C-1)の分野の新規開拓と、(C-2)および(D)から生み出された STEAM 協働の国際ネットワークは、今後大きな発展が見込め、当初の想定を超える進展があった。

研究の進め方(研究実施体制及び研究費執行状況): 研究実施にあたっては、研究代表者が実質的な研究活動に注力するため、ソフトウェア実装、制作、イベント企画、展示、アーカイブなどを、各分野のスペシャリスト(プロシージャルモデリングのスペシャリスト、ファブリケーションのスペシャリスト、アーティスト)が補助する体制を構築した。研究費執行については、COVID-19 の影響で減額した国際会議等旅費を、展示をはじめとする国内アウトリーチ活動に注力する体制づくりのために充てており、パンデミックの状況下で最大限の効果を狙ったものとなっている。

研究成果の科学技術及び社会・経済への波及効果: アートを含む分野協働アプローチは、社会的課題解決や科学技術イノベーションの強力な源泉である。本研究では分野協働を双方向的で実りあるものにするため、オリガミやメカニズムの本質的面白さを科学・数学的に解釈可能にし、またアート・人工物の制作を通して数学・科学のポテンシャルを引き出すことを心掛けた。具体的には、プロダクト・建築物の製造方法の革新、変形変化するプロダクトやインタフェース、新規材料の開発など科学技術イノベーションに直接的に寄与するものである。さらに、このような領域への新たな研究者の関心・理解を高め参入を促したことにより、幅広い社会・経済における価値創造につながることを期待される。

## 5. 主な研究成果リスト

### (1) 代表的な論文(原著論文)発表

研究期間累積件数: 23件

1. Rinki Imada, Tomohiro Tachi, “Geometry and Kinematics of Cylindrical Waterbomb Tessellation”, *Journal of Mechanisms and Robotics*, 14(4), 041009 (14 pages), DOI: 10.1115/1.4054478

なまこ折りと呼ばれる筒状に閉じた折紙テセレーションが大域的に波状の形状を取ることが知られていたが、その原理については未解明であった。そこで、剛なパネルとヒンジで構成された剛体折紙の運動学を用いて、なまこ折りを軸方向に時間発展する離散力学系としてモデル化することで、その性質に迫った。特に、筒形状となる不動点、波型変形を伴う安定不動点周りの準周期的挙動、発散を伴う不安定な挙動、それらの折りパターンのパラメータ変化による分岐を特定し、解析した。

2. Rinki Imada, Tomohiro Tachi, “Conservative Dynamical Systems in Oscillating Origami Tessellations”, *Proceedings of International Conference on Geometry and Graphics 2022*

筒状に閉じた折紙テセレーションの広範な族に対して、その剛体折紙モデルに基づく運動学を表す二次元離散力学系モデルを構築した。これらのモデルを適切なパラメータで表現することで、面積保存系としての性質を証明した。結果として、これらの保存的な折紙テセレーションでは、中立安定不動点を持てば、その周囲での準周期軌道をもつため、波状の巨視的変形を起こすことを示した。

3. Kanata Warisaya, Hiroaki Hamanaka, Asao Tokolo, Tomohiro Tachi, “Auxetic Structures Based on Rhombic Tiling”, *Proceedings of IDETC CIE, ASME, 2021*

美術家、野老朝雄(第三著者)がデザインした東京 2020 オリンピック・パラリンピックエンブレムは菱形を充填した非周期的タイリング構造の中点を取ったタイルによってできている。本研究では、そのエンブレムのタイル部分を穴としてキリガミ構造のメカニズムを作ると、1自由度の Auxetic 材料(負のポアソン比を持つ材料)とみなせることを明らかにしたものである。本研究は野老氏と研究代表者の協働授業がきっかけになったもので、学生、数学者、美術家、研究代表者による協働によって生み出された成果である。

### (2) 特許出願

なし

### (3) その他の成果(主要な学会発表、受賞、著作物、プレスリリース等)

4. Tomohiro Tachi, Junichiro Horikawa, Daiki Kanaoka, “Origami Tessellations Induced by Growth”, *SIGGRAPH ASIA 2022 Art Gallery*, 2022-12-06 [査読付き展示]
5. 今田凜輝, 舘知宏, “折紙/切紙テセレーションに現れるソリトンと力学系による解析”, *日本応用数理学会 2022 年度年会*, 2022-09-08 [学会発表]
6. Tomohiro Tachi, “Advances in Architectural Origami”, *Keynote Lecture at Advances in Architectural Geometry 2020* [招待講演]

7. Ke Liu, Tomohiro Tachi, Glaucio H. Paulino, “Melville Medal”, The American Society of Mechanical Engineers, 2022-11. [受賞]
8. Structural Origami Gathering, (2021: オンライン 2021/2/12-16, 2022:ハイブリッド 2022/3/17-21) [国際協働ワークショップ主催]
9. 「つながるかたち展 CONNECTING ARTIFACTS 01/02」 (01:東京大学駒場博物館 2021 9/18-11/28, 02:TIRS GALLERY 2022 10/27-11/13) [展示企画]