

令和 2 年 6 月 10 日現在

機関番号：12601

研究種目：若手研究(A)

研究期間：2016～2019

課題番号：16H06106

研究課題名（和文）自己折り機構を持つ空間構造物の設計手法の開発

研究課題名（英文）Designing Spatial Structures with Self-folding Mechanism

研究代表者

館 知宏（Tachi, Tomohiro）

東京大学・大学院総合文化研究科・准教授

研究者番号：50586740

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 15,200,000円

研究成果の概要（和文）：本研究は、軽量でかたい機能的な空間構造物を、自己折りで製造可能とすることを目的とする。自己折りとは、シート材料にパターンを組み込むことで、自律的な折り変形を通して立体化する製造プロセスであり、複数の部品を立体状態で組み立てる必要がなくなる。本研究では、自己折りの理論を初めて確立し、その制御方法を導いた。さらに、幾何学的考察、デザインシステム実装、試作のプロセスを通して、一つの平面状態から複数の立体形状に折り変形する構造システム、複数の状態をスイッチする新規の折紙空間構造、平面上のパターニングで生産できる仮設構造物を得た。

研究成果の学術的意義や社会的意義

これまで、自己折りの実験例はあったが、なぜ自己折りできるのか、あるいは失敗するのかの裏付けはなく、試行錯誤に頼るほかなかった。本研究は初めて自己折りの理論を確立し制御可能とするための道を開拓した。得られた新規折紙構造は、折り畳んだ状態で製造し短時間で展開・リユース可能な仮設建築物の実現、複数の形状に再プログラム可能な構造物やロボット開発、特殊な弾性特性をもつ新規の材料開発につながる展望がある。

研究成果の概要（英文）：This research aims to develop a manufacturing scheme of lightweight functional spatial structures through self-folding. Self-folding is a manufacturing process where a sheet material with embedded patterns of creases folds into 3D shape through self-organized folding deformation; this process substitutes the assembly of multiple pieces in the 3D state. In this study, we established the theory of self-folding for the first time and derived a method to control the folding motion. Furthermore, through the processes of geometric study, design system implementation and prototyping, we obtained structural systems that folds from a single shape to multiple target shapes, novel spatial structures that switch between multiple states, temporary buildings produced by patterning on a plane.

研究分野：構造工学

キーワード：折紙工学 自己折り 展開構造 空間構造 セル材料

様式 C-19、F-19-1、Z-19（共通）

1. 研究開始当初の背景

折紙のような折りたたみ展開をする構造物は、その収納性と可搬性を活かした災害時の仮設シェルター、折り畳んでリユースされるパビリオン、用途や環境の変化に適応する開閉屋根やアダプティブなファサードなど応用の可能性を持っている。このような構造物は形を変えることで、リユースしながらさまざまなニーズに応えることができるため、サステイナブルな社会環境のための有効な手段と考えられる。ここでは、折り畳み時の柔軟性と、展開時に荷重を支えられる構造、すなわち「柔軟性」と「剛性」を両立した構造物が求められる。応募者らは近年折紙構造を組み合わせたセル状の空間構造を提案した。一連のセル状構造からは、「剛性」と「柔軟性」の二つの性質を両立する、すなわち設計通りの折り畳み変形のモードに沿っては非常に柔らかく、それ以外の外力に対しては非常に高い剛性を持つなど、空間構造としての有用性の高いものが生み出せることが分かっている。

しかし、これまでの研究で得られた構造物は、実現するためには複雑なパーツの立体的な組み立てが必要となるため、製作困難であり、このままでは工業生産は事実上不可能に近い。変形機構を持つ複雑な構造体を合理的に実現するためには、製作方法にも革新が必要である。

そこで応募者は、この製造方法の問題解決にも、やはり「折り」が活用できると考えた。ここで着目するのは、すでにマイクロ～ミリ～センチメートルスケールにおいて提案され実験されている「自己折り(Self-Folding)」というものの作り方である。独立した部品を外から立体的に組み立てるかわりに、形状記憶ポリマーなどの材に適切に設計した折り目パターンを施すことで、折りの自律的プロセスによって機能的な立体形状を作ることができる。このような「自己折り」は小スケールで実験的には確かめられているものの、それを適切にコントロールするための理論は存在しなかった。これらの自己折りの仕組みを解明し、大きなスケールにおいて頑健に利用可能とすることによって、折紙空間構造物の自律的製造ができると考えられる。

2. 研究の目的

本研究は、高い剛性や特異な機械的性能を持つ機能的な空間構造物を、自己折りのプロセスで製造可能とすることを目的とする。折紙のシート材料を平坦状態でパターンニングすることで、複数の部品を立体状態で組み立てることなく、適切な力を加えるだけで自律的に空間構造を立体化できることを目指して研究を行った。

3. 研究の方法

次の具体的方法・テーマに分けて研究を行った。

(A)自己折りの解析と制御理論の確立：これまで、与えられたパターンがあったとき、これが欲しいモードで変形するかを判定する理論はなく、個別の実験で確かめられるのみであった。本研究では自己折りの基本数理論を提案する。このモデルに基づいて欲しいモードを選んで自己折りするための制御方法を提案する。

(B)機能性を持つ折紙構造の探索：剛性と柔軟性を両立させる構造のバリエーションや、さまざまな機械的性能を持つ折りに基づく空間構造を探索し、製作実験・構造実験を行う。創造的な発見を期待するほか、設計可能な形状の限界を理論的あるいは実践的に明らかにする。

(C)設計システムの実装：(A)(B)の研究に基づき、自己折り可能かつ剛性と柔軟性を持つ折紙構造を自在に設計できるデザインシステムを構築する。

4. 研究成果

(A) 自己折りの解析と制御理論の確立：

剛体折紙モデルにおいて自己折りの理論を確立し、その制御方法を提案した。またモード分岐現象に着目したことで、当初は想定していなかった複数の形状に変形可能なパターンを発見し、再プログラム可能な空間構造の可能性が見いだせた。

パネルとヒンジからなるメカニズム、すなわち剛体折紙に対して、ヒンジ部分にトルクを与えることで望み通りの自己変形をさせる問題を「Self-foldability（自己折り可能性）」として初めて定義を与える研究発表を行った[1]。この研究では、自己折り可能性の本質的な難しさは、自己折りを開始する平坦な状態においては、機構が特異点となり予期不可能なモード分岐がおきるという点にあることを明らかにした。この研究に関する論文発表は米国機械学会より A. T. Yang Memorial Award in Theoretical Kinematics を得ている。

さらに、これらの知見をもとにして、パターンの対称性を低くすることでモード分岐が減り「自己折り可能」となる折紙のテセレーションの例や、折り線パターンの変換によってモード分岐が指数関数的に増えて「自己折り不可能となる」例を明らかにした[2]。

これらの理論と実例を踏まえ、与えられた折紙パターンが自己折り可能でないとき、これらのパターンを部分的に修正することによって自己折り可能とするための「ガジェット」作成手法を導いた。さらにモード分岐をあえて少数残す配置でガジェットを組み合わせることで複数の形状にスイッチすることのできる、すなわち再プログラム立体形状を実現した[3]（図1）。同一の平面展開図から複数の立体形状へと変化する構造を実現すれば、再プログラム可能な空間構造物、ロボット、セル材料などが実現可能となると考えられる。

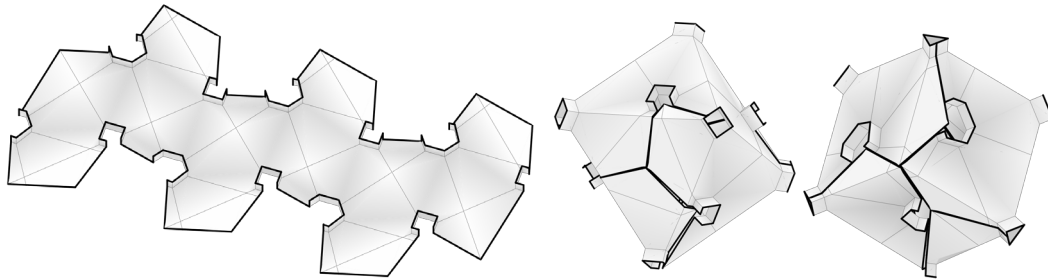


図1：八面体と六面体に自己折り変形可能なパターン

(A) 機能性を持つ折紙構造の探索：

自己折りの理論を踏まえ、機能性を持つ新規の折紙空間構造について探索を行った。実際に物を作ることと理論とを往来しながら形状の探索を行った。自己折りのテーマから得られた新規構造が、また新たな問題の発見につながる、という発想の連鎖によって、当初の研究計画では想定していなかった創造的な成果が多数得られた。

①空気圧を用いた自己展開アクチュエーションのためには、折紙の「ふいご」を作る必要がある。パネルが剛である場合は数学的にふいごが不可能であることは知られているが、材料の1%程度の弾性変形を許すことで、「ふいご」が実現可能であることを示した[4]。ここからさらに発想し、材料の微小な弾性変形に着目した弾性的な折紙のシステムに着目して研究を深めた。複数の剛体折紙モジュールを変形途中で一時的に矛盾するように組み合わせることで、複数の安定状態

をスイッチして切り替わる構造を設計可能とした[5]。

②建築設計会社と材料メーカーと協働し、平坦状態で作成可能な折紙式の展開構造物をパビリオンとして作成し、その生産方式の妥当性を検討した。平面上で複合材シートを作成し、その際に折り線部のみ柔軟なマトリックスを用いるパターンニングを行うことで、コンプライアントヒンジをもった平坦形状を一体成型できることを実証した[6] (図2)。

また、厚みのある板材 (サンドイッチパネル) に折り目パターンを施したものを二層組み合わせた状態で作成することで、その状態から立体アーチ構造に展開し剛性を持つ構造システムや、家具などを実現した[7][8] (図3)。関連して厚みのあるパネルでの折り目処理方法について研究を行い、剛体折り可能性を担保したまま折りパターンを二重線に変換する手法も導いた[9][10]。軽量で高剛性な折紙構造を平坦状態で製造・保管し、必要に応じて搬送・展開し、リユースする仮設建築物を実現するための足掛かりを得た。

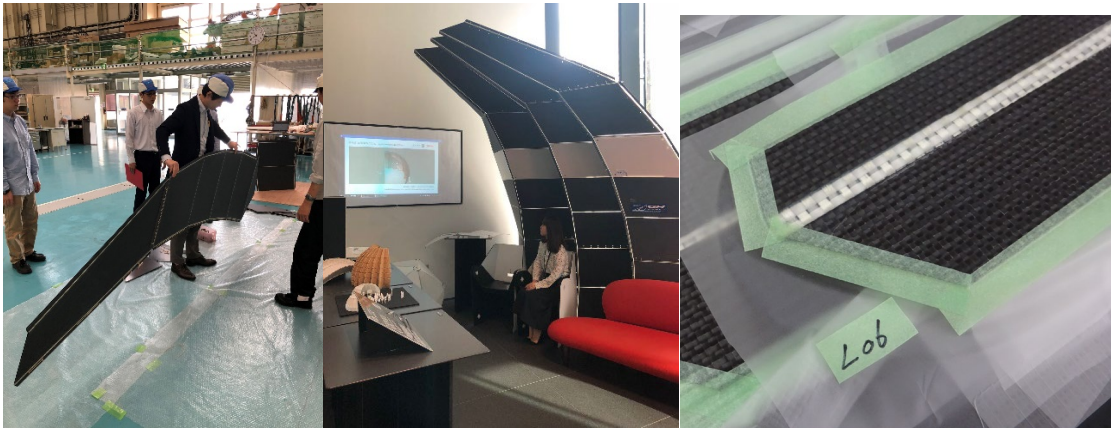


図2：平坦状態で折りヒンジが施されたFRPシート材による展開構造物



図3：折り線加工を施したサンドイッチパネルから展開するアーチ構造

③同一のパターンから複数の異なる形状へと折り変形可能なシステムとしては、正三角形分割されたストリップから複数の異なる閉じた多面体ができる形状を得られることを発見した。

(C) 設計システムの実現：自己折りのためのガジェット生成、弾性挙動を示す構造の設計、厚みを持った材料のための折りパターン変換、展開パターンからの立体形状の推定システムなど、これまでの理論及び折紙構造の成果について、設計システムをCAD上 (Rhino Grasshopper) で適宜実現している。機能性を持つ折紙構造の探索が、多様な機能性や、製造における実問題などへと発散する結果となったため、統一的な設計システムへと収斂させるのではなく、それぞれの機能をコンポーネントとして実現する形となった。実装した機能は今後公開予定である。

- [1] Tomohiro Tachi and Thomas C. Hull, "Self-Foldability of Rigid Origami", ASME. Journal of Mechanisms and Robotics. 2017;9(2)
- [2] Thomas C. Hull and Tomohiro Tachi "Self-foldability of monohedral quadrilateral origami tessellations", in Origami7: Proceedings of the 7th International Meeting on Origami Science, Mathematics, and Education
- [3] Tomohiro Tachi and Takashi Horiyama, "1-DOF Structure Folding into Multiple Polyhedra" Abstracts of the 7th International Meeting on Origami Science, Mathematics, and Education
- [4] Tomohiro Tachi, "Capping Rigid Origami Tube", Proceedings of IASS Symposium 2017, September 2017, Hamburg, Germany
- [5] Yuki Miyajima, Charles Hoberman, Tomohiro Tachi, "Designing Folding Motion of Origami Using Quadrilateral Boundary Modules," Extended Abstracts, Symmetry 2019: Art and Science -11th Congress and Exhibition
- [6] Ando, K., Izumi, B., Shigematsu, M., Tamai, H., Matsuo, J., Mizuta, Y., Miyata, T., Sadanobu, J., Suto, K. and Tachi, T. "Lightweight Rigidly Foldable Canopy using Composite Materials," In Proceedings of IASS Annual Symposia (Vol. 2019, No. 5, pp. 1-10), 2019.
- [7] Tomohiro Tachi, Kensuke Ando, Mizuki Shigematsu, Toshiyuki Morishima, "Bi-layer Thick Rigid Origami Vault", Abstracts of IASS 2019
- Seri Nishimoto, Takashi Horiyama, and Tomohiro Tachi, "Geodesic Folding of Tetrahedron," Extended Abstracts, Symmetry 2019: Art and Science -11th Congress and Exhibition.
- [8] Riccardo Foschi, and Tomohiro Tachi "Designing Self-Blocking Systems With Non-Flat-Foldable Degree-4 vertices" in Origami7: Proceedings of the 7th International Meeting on Origami Science, Mathematics, and Education, Vol. 3, Tarquin (2018), pp. 795-810
- [9] Tomohiro Tachi and Thomas Hull, "Thick Rigid Origami with Parallel Double Creases," in Origami7: Proceedings of the 7th International Meeting on Origami Science, Mathematics, and Education
- [10] Thomas C. Hull and Tomohiro Tachi, "Double-line rigid origami", Asian Forum on Graphic Science (AFGS) 2017, August 2017, Tokyo, Japan.

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計7件（うち査読付論文 7件/うち国際共著 5件/うちオープンアクセス 0件）

1. 著者名 Thomas C. Hull and Tomohiro Tachi	4. 巻 2
2. 論文標題 Self-foldability of monohedral quadrilateral origami tessellations	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Origami7: Proceedings of the 7th International Meeting on Origami Science, Mathematics, and Education,	6. 最初と最後の頁 521-532
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 該当する

1. 著者名 Erik D. Demaine, Martin L. Demaine, David A. Huffman, Duks Koschitz, and Tomohiro Tachi	4. 巻 2
2. 論文標題 Conic Crease Patterns with Reflecting Rule Lines	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Origami7: Proceedings of the 7th International Meeting on Origami Science, Mathematics, and Education,	6. 最初と最後の頁 573-590
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 該当する

1. 著者名 Kai Suto, Akito Adachi, Tomohiro Tachi and Yasushi Yamaguchi	4. 巻 2
2. 論文標題 Edge Extrusion Approach to Generate the Extruded Miura-Ori and Double Tiling Patterns	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Origami7: Proceedings of the 7th International Meeting on Origami Science, Mathematics, and Education	6. 最初と最後の頁 435-450
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 Riccardo Foschi, and Tomohiro Tachi	4. 巻 3
2. 論文標題 Designing Self-Blocking Systems With Non-Flat-Foldable Degree-4 vertices	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Origami7: Proceedings of the 7th International Meeting on Origami Science, Mathematics, and Education	6. 最初と最後の頁 795-810
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 該当する

1. 著者名 Akito Adachi, Tomohiro Tachi and Yasushi Yamaguchi	4. 巻 22
2. 論文標題 Dual Tiling Origami	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Journal for Geometry and Graphics	6. 最初と最後の頁 269-281
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 Tomohiro Tachi and Thomas C. Hull	4. 巻 9
2. 論文標題 Self-Foldability of Rigid Origami	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 ASME. Journal of Mechanisms and Robotics	6. 最初と最後の頁 9
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1115/1.4035558	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 該当する

1. 著者名 Tomohiro Tachi and Thomas C. Hull	4. 巻 9
2. 論文標題 Self-foldability of Rigid Origami	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 Journal of Mechanisms and Robotics	6. 最初と最後の頁 021008 (1-9)
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1115/1.4035558	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 該当する

〔学会発表〕 計12件 (うち招待講演 7件 / うち国際学会 11件)

1. 発表者名 Tomohiro Tachi
2. 発表標題 Geometric Problems in Structural Origami
3. 学会等名 The 7th International Meeting on Origami in Science, Mathematics and Education (7OSME) (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Tomohiro Tachi
2. 発表標題 Structural Morphology in Origami
3. 学会等名 Keynote Speech, Symposium of the International Association for Shell and Spatial Structures 2018 (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Tomohiro Tachi and Takashi Horiyama
2. 発表標題 1-DOF Structure Folding into Multiple Polyhedra
3. 学会等名 the 7th International Meeting on Origami Science, Mathematics, and Education (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Tomohiro Tachi and Thomas Hull
2. 発表標題 Thick Rigid Origami with Parallel Double Creases
3. 学会等名 the 7th International Meeting on Origami Science, Mathematics, and Education (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Thomas C. Hull and Tomohiro Tachi
2. 発表標題 Double-line rigid origami
3. 学会等名 Asian Forum on Graphic Science (AFGS) 2017 (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 Tomohiro Tachi
2. 発表標題 Origami Engineering
3. 学会等名 The International Bionics Summerschool B_CON2017 (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 Tomohiro Tachi
2. 発表標題 Growth Form and Self-organisation 4: Form in art, toys and games
3. 学会等名 Computational Origami Design (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 館知宏
2. 発表標題 構造折紙とコンピューティショナル・デザイン
3. 学会等名 第12回 コロキウム構造形態の解析と創生 2017 (招待講演)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 Erik Demaine, Martin Demaine, David Huffman, Thomas Hull, Duks Koschitz, Tomohiro Tachi
2. 発表標題 Zero-Area Reciprocal Diagram of Origami
3. 学会等名 IASS 2016 Annual International Symposium (国際学会)
4. 発表年 2016年

1. 発表者名 Tomohiro Tachi and Thomas C. Hull
2. 発表標題 Self-foldability of Rigid Origami
3. 学会等名 ASME IDETC/CIE 2016 Symposium of Origami-Based Engineering Design (国際学会)
4. 発表年 2016年

1. 発表者名 Tomohiro Tachi
2. 発表標題 Designing Rigidly Foldable Origami Structures
3. 学会等名 ASME IDETC/CIE 2016 Symposium of Origami-Based Engineering Design (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2016年

1. 発表者名 Tomohiro Tachi
2. 発表標題 Computational Design of Rigid Origami
3. 学会等名 the 19th Japan Conference on Discrete and Computational Geometry, Graphs, and Games (JCDCG3 2016) (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2016年

〔図書〕 計0件

〔出願〕 計2件

産業財産権の名称 平行平面連結構造	発明者 山口泰、館知宏、 安達瑛翔、須藤海	権利者 国立大学法人東京大学
産業財産権の種類、番号 特許、特開2019-002556	出願年 2018年	国内・外国の別 国内

産業財産権の名称 折り線ヒンジ構造及び厚板材	発明者 館知宏、森島敏之	権利者 国立大学法人東京大学
産業財産権の種類、番号 特許、特開2018-165060	出願年 2018年	国内・外国の別 国内

〔取得〕 計0件

〔その他〕

Origami Lab
<http://origami.c.u-tokyo.ac.jp/>

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