

# 研究報告書

## 「物理ベースデザインのためのインタラクティブ情報環境の構築」

研究タイプ: 大挑戦型(※大挑戦型課題として延長有/増額有)

研究期間: 平成22年9月～平成28年3月

研究者: 舘 知宏

### 1. 研究のねらい

3DプリンタやCNC加工機械の助けにより、少品種大量生産から多品種少量生産へ、さらに個人が様々な目的や趣向のためにオリジナルなものを作るパーソナル・ファブリケーションへと、ものづくりの多様化が進んでいる。これを成り立たせているデジタル・ファブリケーション技術は、「何でも作れる」技術として捉えられることもある。しかし、実際にはものの立体的なかたちは、それを成り立たせている物理的性質から逃れることはできない。むしろ設計の自由度が格段に上がることで、物理的に成立しないデザインや悪いデザインに陥る危険性も高まっている。このような背景におけるデザインにおいては、立体的な形状とその物理的なふるまいの関係に根ざして設計を行う、「物理ベースデザイン」が本質的に重要である。

本研究では、物理ベースデザインをパーソナルなものづくりに展開するための、インタラクティブな情報環境の構築を目指した。さらに、期間中の研究の進展を受けて、折紙の折り畳み・展開・変形の機構を大スケールでも成立できるための理論とその設計方法という、延長テーマを提案した。利用者自身がその時々ニーズにあわせて空間を折り畳み・展開して使うフレキシブルな住まい方、あるいは天気や気候変化に呼応して変形し、光や空気を調整するようなアダプティブな建築空間実現のためのブレイクスルーをねらった。

### 2. 研究成果

#### (1) 概要

平面を折るだけで作れる折紙構造や、力のつり合い状態を満たす張力構造のような合理的構造は、材料の変形特性や力のつり合いなどの条件によってとりうる形状が大きく制限される。このような形状は試行錯誤では得られず、素材の物理的な性質や欲しい性能から、それを満たす形状を得るという逆問題を解くアプローチが有効である。一方でデザインとは、数理的に表現できる物理的な制限以外に、コンテキストや身体感覚、美的センスなど、明示的でない条件を含んだ問題であり、本質的に試行錯誤を繰り返して発見的に解く必要がある。物理的な制約と、デザインプロセスの試行錯誤の両立は、デザイナーとエンジニアが長期間協働してはじめて実現できる困難な問題であった。

そこで、本さきがけ研究テーマでは、このように両立困難な物理ベースデザインを計算機と人のインタラクティブ環境を構築することで実現した。計算機が物理的制約の問題をリアルタイムで解くことで、デザイナーが部分空間のみを直感的に探索できるシステムを構築した。シートの折り曲げのみで作れる自由形状と、自己釣り合い安定となるテンセグリティ構造を初めてインタラクティブにデザインできるようにした。

さらに、折紙の「かたち」だけに注目するのではなく、折紙の折り畳み・展開変形の「うごき」を建築スケールで成立させれば、用途に応じて、あるいは環境変化に応じて、開閉／伸縮する建築空間を実現できるはずである。このようなコンセプト自体は 1960 年ごろから提案されてきているが、実際には、既知の折り畳みパターンは構造的剛性・強度が足りず、大きなスケールへの展開が合理的にできないという問題を含んでいた。そこで、剛性を持ち、かつ必要な展開動作が意図通りに制御できる「うごきのデザイン」を挑戦目標として研究期間延長を行った。剛体折紙メカニズムの理論研究を深め、複数の折紙機構を並列に複合させたセル状構造を世界に先駆けて発見した。この構造は、剛性と柔軟性を両立する機械的メタマテリアルの性質を持つ。さらに、展開の動きが構造全体にすみやかに伝わり、変形制御が可能な折り畳み構造を発見し、これらを自由な曲面形状に沿って設計する手法を提案し、折紙構造を用いたアダプティブな建築を実現可能とした。

## (2) 詳細

### ■当初の研究テーマ:「かたちのデザイン」

**折りのかたち:**折紙テセレーションと呼ばれる折り目のパターンを持つ曲面は、素材の伸び縮みがないにもかかわらず、実質上ヒダが入ることで縮んだ状態となっている。このような立体構造に着目して、自由な三次元形状を立体的な折紙形状で実現することで、一枚のシート材料を折るだけで自由な形状を実現する手法を提案した [4]。与えた三次元メッシュから、自動的に立体的パターンを生成することで、得られる三次元形状を拡張した。さらに、材料の厚みと折りの角度の処理、折りの重なりと衝突の回避を実現することで、たとえば金属シートによる自由形状の実現など、今まで不可能であった新しい製造方法を可能とするシステムを構築した(図 1)。この成果は Freeform Origami システムとして実装され、公開した ([www.tsg.ne.jp/TT/software/](http://www.tsg.ne.jp/TT/software/))。延べ 15000 回程度ダウンロードされ、建築・デザイン教育・研究目的で利用されている。展示 1 では、実際に板金への CNC 加工と手作業を組み合わせ自由な立体造形を行うオリガミ・ファブリケーションを発表した。解析曲面への折紙テセレーションのフィッティングの解析[14]や曲線の折り線を複数含む複雑な立

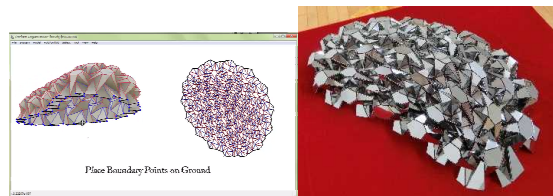


図 1: 自由折紙システムとステンレス鋼での実現 [3]

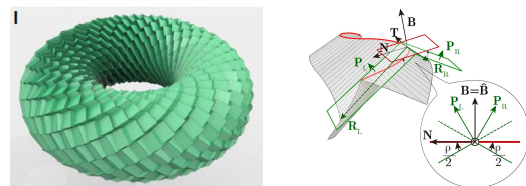


図 2: 解析曲面の折紙 [14] 図 3: 曲線折りの数理 [5]



図 4: 自由形状テンセグリティデザインと建築提案 [2]

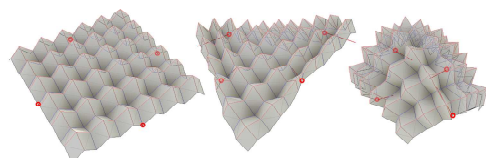


図 5: 曲げが形状を支配する卵箱型形状の形態探索 [10]

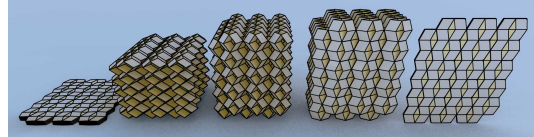


図 6: 剛体折り可能なセル状構造 [1]

体形状のレビューおよび数学的定理の導出 [6,13]など、折紙の理論を深化させた。**釣り合いのかたち**:曲げを含む折紙や、張力の加わった構造は力が釣り合った状態にある。このような形を求めるには力学的解析を繰り返す試行錯誤が必要であったが、形態と力を同時に幾何条件として解くことで、インタラクティブに扱えるようにし、デザインのバリエーションを拡張した[3,9](図2)。また曲げが支配するモーフィング構造の形態が扱えるようにした[8](図3)。これらの研究により、当初の研究テーマであった、「物理ベースのかたちのデザイン」に関して当初目的を達成した。

**折りのメカニズム**:折りのかたちの研究を進める中で、紙を厚みのある実際の素材に変えても成立する変形メカニズムの研究が必要となった。これは**剛体折紙**と呼ばれる研究テーマである。剛体折紙メカニズムを自在に設計する手法を提案したほか、剛体折紙がメカニズムとなるかを判定するアルゴリズムの研究を行った。これらの研究を深めることで、さらに、折紙の形を対称性に基づいて組み合わせることで過拘束メカニズムを作る手法を得た[5](受賞 2)。ここに、**延長期間研究テーマへつながる発見**があった。すなわち、従来の折紙構造では、シート材料自体が曲がることで意図しない変形が容易におき、展開時に構造的強度が得られなかったが、これらを複合させることで強固な構造となるということである[7,10]。薄いシート材料を縫って制作した実証モデル(図7 展示2)は、自立したヴォールト構造であるが、折り畳むと非常にコンパクトになり、ある種の剛性と柔軟性を両立する。用途に応じてアダプティブに変化できる建築空間 ([1]受賞4 図8) を構造的に実現する手段となりうる。



図7: 自立し平坦に折り畳める複合構造[7]

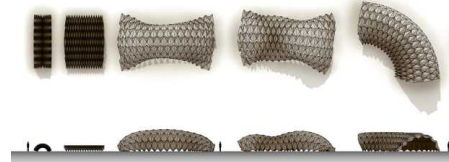


図8: 用途に応じて変形する建築提案[1]

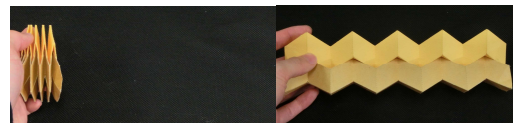


図9: 端部から駆動できる新折紙構造[11]

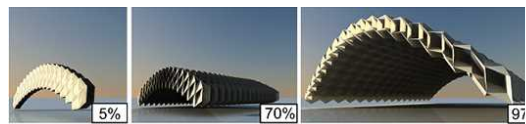


図10: 展開屋根の提案。既存構造の100倍の剛性



図11: モーフィングするサンドイッチパネル[5]

### ■延長期間研究テーマ:「うごきのデザイン」

アダプティブな空間を作るためには、剛性と柔軟性を両立するだけでなく、展開の挙動を制御可能としなくてはならない。従来の構造では、展開収縮を駆動するアクチュエータ周辺で部分的な展開が起きてしまい、展開動作が意図通りに制御できないという課題があった。そこで、設計通りの折り畳みモードと望ましくない変形モードの剛性比を解析し、この比が劇的に高くなる(従来の4倍から400倍、まであげた)構造を考案した [5][11](プレス1 図9 特許1)。この「究極の折紙構造」は、軽くて構造的な剛性が得られ、一様で制御しやすい展開機構を持つことから、可動式の屋根(図10)や折り畳める建築、ロボットのアクチュエータ、マイクロスケールの材料として応用の展望がある。また、自在に変形可能なサンドイッチパネル[5](図11)



は航空宇宙分野のモーフィング構造につながる。

■**アウトリーチ**:本研究は、論文発表・学会発表のみならず、4件の科学展示と6件のアート展示、ワークショップを通して、実際に触って計算折紙の研究を体感できる工夫をした。コンピュータショナル・デザインや最先端の科学研究と、伝統性のある「折紙」のテーマが融合する未来を提示した。

■**研究の波及**:本さがけの研究をきっかけとして国際的な交流や共同研究も活発となった。Origami のテーマで研究する留学生や研究者を受け入れ国際協働の中心となっている。現在 Origami は数学・計算機科学・材料科学・生命科学・工学・建築・アートなどの領域を横断するテーマとなっており、国際的な競争分野として急成長している。本研究で得られたソフトウェアがこの分野におけるデファクト・スタンダードとなっているなど、本さがけ研究はこの分野の形成に貢献している。

### 3. 今後の展開

従来、変形する構造物を大きなスケールで実現する際にボトルネックとなっていた剛性の確保という問題を本質的に解決する成果が得られた。この研究がブレイクスルーとなって、建築・ロボット・航空・宇宙・医療・材料など様々な分野での応用が展望される。さがけ研究期間は、理論と設計手法、モックアップによる実証にとどまっていたので、今後は様々な分野での応用と、実用化を含めて、研究を計画している。

### 4. 評価

#### (1) 自己評価

(研究者)

当初の計画では「かたちのデザイン」のためのシステムに絞った研究目標が立てられていた。この目標のコアとなっていた、折紙などの幾何拘束を持った曲面形状、力のつり合いを持つ張力構造、曲げを含む構造について十分に達成することができた。一方で研究スタート時には、折紙と張力構造の形だけではなく、例えば編む・組むといった別のしくみを含めて物理ベースデザインへ裾野を広げ汎用性の高いシステムを作る展望もあった。しかし実際に折紙の研究を深めるに従い、その基本的かつ重要な理論が得られたため、折紙にフォーカスして深く掘り下げる研究に重点を置いた。

その結果、物理ベースデザインを広くカバーするには至らなかったが、高い独自性と先進性を持った研究を主導することができた。論文発表・国際コラボレーション・ソフトウェア公開・アート・科学展示などを通して、国際的に現在発展しつつある学際的学問分野「Origami」の形成に貢献することができた。さらに、折紙のメカニズムに関する研究を深めたことで、「かたくてやわらかい」物理的性質を持つセル型折紙構造の発見につながり、「うごきのデザイン」という、延長期間の研究テーマへとつながった。

延長期間では、「究極の折紙構造」とよべる飛躍的・画期的な成果を得た。これまで、構造強度が担保できなかった折り畳みの仕組みを、構造的に解決し、マイクロメートルから数十メートル級の構造まで応用ができる構造システムの基本コンセプトを提案できた。最終報告時点では、具体的な建築応用提案までは至らなかったが、今後実用化において鍵となる未公開の

成果とあわせて、今後実用化研究などを経て、ロングスパンでの社会への波及効果が見込まれる成果が得られた。

(2) 研究総括評価(本研究課題について、研究期間中に実施された、年2回の領域会議での評価フィードバックを踏まえつつ、以下の通り、事後評価を行った)。

(研究総括)

本研究は、設計の自由度が増すパーソナルなものづくりにおいて、物理に基礎をおくデザインが重要であるとし、そのためのインタラクティブ環境の実現を目指したものである。デジタルファブリケーションの普及を先取りした挑戦的なテーマの設定であったと言える。研究内容は、申請時に計画された「形のデザイン」と、期間を延長して行った「動きのデザイン」からなり、それぞれ驚くべき進展を見せている。まず、形のデザインでは、一枚の紙や金属シートから自由な形状を実現するシステムを構築している。また、剛体折紙と呼ぶ、厚みのある実際の素材に対する変形メカニズムを提案している。次に、動きのデザインでは、剛性と柔軟性の両立に加えて、一様で制御しやすい展開機構を実現している。本研究成果はマイクロメートルから数十メートル級の構造に応用可能で、建築、航空宇宙、ロボット、材料など、当初想定したパーソナルなものづくりをはるかに超える展開が期待できる優れたものである。

これらの学術的成果に加えて Freeform Origami と呼ぶソフトウェアを公開した。このソフトウェアは数多くダウンロードされ、世界の教育研究現場で広く利用されている。また、国際的な研究コミュニティの形成に尽力し、留学生や研究者を多数受け入れ、研究分野として急成長する Origami の国際協働の中心となったことも高く評価できる。今後の研究のさらなる進展を期待したい。

## 5. 主な研究成果リスト

### (1) 論文(原著論文)発表

[1] Tomohiro Tachi, Motoi Masubuchi, and Masaaki Iwamoto, "Rigid Origami Structures with Vacuumatics: Geometric Considerations", in Proceedings of the IASS-APCS 2012, Seoul, Korea, May 21-24, 2011.
[2] Tomohiro Tachi and Koryo Miura, "Rigid-Foldable Cylinders and Cells", Journal of the International Association for Shell and Spatial Structures (IASS), 53(4), pp. 217-226, 2012.
[3] Tomohiro Tachi, "Interactive Freeform Design of Tensegrity", Advances in Architectural Geometry 2012, pp. 259-268, 2012.
[4] Tomohiro Tachi, "Designing Freeform Origami Tessellations by Generalizing Resch's Patterns", Journal of Mechanical Design, 135(11), 111006 (Oct 03, 2013)
[5] Tomohiro Tachi, Evgueni T. Filipov and Glaucio H. Paulino, "Deployable Folded-core Sandwich Panels Guided by a Generating Surface", in Proceedings of IASS 2015, Amsterdam, August 17-20, 2015.

## (2)特許出願

研究期間累積件数:1件

## (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)

### 受賞

1. 科学的卓越性と独創性を反映した論文として認める PNAS 論文賞を受賞。(2016 年 5 月 1 日に NAS 年次総会にて授賞式)
2. 科学技術への顕著な貢献 2014(ナイスステップな研究者), 文部科学省 科学技術・学術政策研究所, 2014 年 12 月
3. Tsuboi Award, International Association for Shell and Spatial Structures (IASS), 2013 年 9 月 23 日 (三浦公亮と共同) [2012 年 Journal of the IASS 最優秀論文]
4. 優秀研究発表賞 (2011 年度日本図学会秋季大会), 日本図学会, 2012 年 5 月 12 日
5. 形態創生コンテスト 2011 最優秀作品, 日本建築学会 2011,10/27 (増淵基, 岩元真明と共同)

### 主要な学会発表

- [6] Erik D. Demaine, Martin L. Demaine, Duks Koschitz, Tomohiro Tachi (著者アルファベット順): "Curved Crease Folding – a Review on Art, Design and Mathematics", in Proceedings of the IABSE-IASS Symposium 2011, London, UK, September 20–23, 2011.
- [7] Tomohiro Tachi, "Composite Rigid-Foldable Curved Origami Structure", in Proceedings of Transformables 2013, Seville, Spain, September 18–20, 2013.
- [8] Tomohiro Tachi, "Interactive Form-Finding of Elastic Origami", in Proceedings of IASS 2013, Wroclaw, Poland, September 23–27, 2013.

### 他原著論文

- [9] Tomohiro Tachi, "Design of Infinitesimally and Finitely Flexible Origami Based on Reciprocal Figures", Journal for Geometry and Graphics, 16(2), 223–234, 2012.
- [10] Kenneth Cheung, Tomohiro Tachi, Sam Calisch, Koryo Miura, "Origami Interleaved Tube Cellular Materials", Smart Materials and Structures, 23 (2014) 094012 (10pp)
- [11] E. T. Filipov, T. Tachi, G. H. Paulino, "Origami tubes assembled into stiff, yet reconfigurable structures and metamaterials", *PNAS*, doi:10.1073/pnas.1509465112 2015
- [12] Tomohiro Tachi: "Rigid Folding of Periodic Triangulated Origami Tessellations," in Origami6, pp. 97–108, 2016.
- [13] Erik D. Demaine, Martin L. Demaine, David A. Huffman, Duks Koschitz and Tomohiro Tachi : (著者アルファベット順) "Characterization of Curved Creases and Rulings: Design and Analysis of Lens Tessellations ," in Origami6, pp. 209–230 2016.
- [14] Levi H. Dudte, Etienne Vouga, Tomohiro Tachi, L. Mahadevan, "Programming curvature using origami tessellations", *Nature Materials*, 2016.
- [15] Evgueni T. Filipov, Glaucio H. Paulino, Tomohiro Tachi, "Origami tubes with

reconfigurable polygonal cross-sections”, *Proceedings of the Royal Society A*, volume 472, issue 2185, 2016.

- [16] T. Tachi, “Designing Rigidly Foldable Horns using Bricard’s Octahedron”, *Journal of Mechanisms and Robotics*, doi:10.1115/1.4031717, 2015.

### 招待講演

1. “Computational Design of Freeform Origami”, Keynote Speech at NICOGRAPH International 2013, Fukuoka Japan, June 2–3, 2013
2. “The Science of Origami”, Tomohiro Tachi and Erik Demaine, Keynote Speech at The 9th International FAB LAB conference, Yokohama Japan, August 28th, 2013
3. 剛体折紙の形態創生”, 第 36 回 情報・システム・利用・技術シンポジウム, 建築学会, 東京, 2013 年 12 月 6 日
4. “Geometric Design of Rigid Origami and Curved Origami”, 16th International Conference on Geometry and Graphics, Innsbruck, Austria, August 5th, 2014.
5. “Designing Rigid Origami Structures”, Invited Speech of 26th International Conference on Adaptive Structures and Technologies (ICAST 2015), October 14–16, 2015 Kobe, Japan

### 解説記事

1. “かたい形、やわらかい形 —折り紙の構造形態学—” 『建築と社会』, 日本建築協会, 2015
2. “折紙の形と構造,” 特集 機能とかたち——製造限界から生まれるディテール 折版構造, 建築技術, 2014
3. “剛体折紙”, 応用数理ハンドブック, 薩摩順吉, 大石進一, 杉原正顯(編), pp. 268–269, 2013 年
4. “デジタルファブリケーション:6. 折紙ファブリケーションとコンピューテーション,” 情報処理, 情報処理学会, 54(2), pp. 114–120, 2013.

### 書籍編集

1. K. Miura, T. Kawasaki, T. Tachi, R. Uehara, R. Lang, P. Wang–Iverson, Origami6 parts 1 and 2: Proceedings of the Sixth International Meeting on Origami Science, Mathematics, and Education, AMS, 2016

### 主な展示

1. フリーフォーム・オリガミ (Freeform Origami), マテリアライジング展 (Materializing Exhibition), 東京藝術大学陳列館, 東京, 2013/06/08–06/23, <http://materializing.org/> (招待)
2. 東京大学大学院総合文化研究科・教養学部 自然科学博物館, 『計算折紙のかたち』展, 駒場博物館, 東京, 2013/07/20–09/16 (監修)
3. 『折り紙の呼吸 Breathing of ORIGAMI』, 竹尾見本帖本店, 東京, 企画・監修, 2014 年 8 月 8 日 – 9 月 26 日

4. Stiff and Flexible Material, マテリアライジング III (Materializing III), @KCUA(京都市立芸術大学ギャラリー), 京都, 2015/05/16-06/21, <http://materializing.org/> (招待)
5. 『計算するオリガミ - 舘知宏 かたちの探索』, 竹尾見本帖@Itoya イベントスペース, 東京, 2015/06/16-08/31 (個展・招待)

#### プレスリリース

1. 「固くて柔らかいオリガミ展開構造物」 東京大学, 2015.9.14