

図学と折り紙（6）

Graphic Science and Origami（6）

三谷 純 Jun MITANI

1. はじめに

本講座のタイトルは「図学と折り紙」であることから、これまでは折り紙の図的、幾何学的内容を主に取り扱ってきました。しかし、折り紙の研究には、その文化歴史の研究から、教育での活用、そして産業応用まで、幅広い対象があります。最終回となる今回は、この折り紙の研究について、国内外では現在どのようなものが研究テーマとなっているかを紹介したいと思います。筆者のアンテナがカバーする範囲の制約から、主に理工学系の内容になりますが、折り紙に関係する分野は幅広いので、読者の皆さんの関心と重なる領域が、きっと見つかることでしょう。

2. 折り紙に関するさまざまな研究分野

以降で紹介するように、折り紙に関する研究は数学・工学・生物学を含むさまざまな分野で行われています。折り紙に関係する研究の多くは、これまでに開催された折り紙の国際会議（OSME）で発表されており、それらの研究論文は第3回以降、書籍の形でまとめられています。それ以前の古い論文は入手が困難なものも多いですが、現在も文献[1-3]は通常の書籍として購入可能です。興味を持たれた方は、是非それらをご覧ください。以降では、折り紙に関する研究を筆者なりにいくつかのテーマに分けて、その概要を紹介します。

折り紙の設計技法

紙を折っていたら、なにかの動物のような形になった。というようなアプローチで、折り紙作品が生まれることがあります。このような「見立て」による創作も盛んにおこなわれますが、あらかじめ想定した形を1枚の紙を折るだけで作り上げるにはどのような方法があるか、という問題を考えるのが折り紙設計です。前川淳による作品「悪魔」(1989)^[4]が折り紙設計の時代を拓いたと評されています。折り紙の設計技法は、これまでの連続で主に取り上げてきたものであり、筆者が最も興味を持っているテーマの1つでもあります。折り紙設計について考えるには、そもそも1枚の紙から作り出される形は、どのような条件を満たしていなければならないか、ということを考える必要があります。折り紙の幾何に関する知識が求められます。

これまでは、平坦に折りたたむことで作られる形に関する研究が広く行われてきました。第3回で紹介したような、目的の形を木構造で表現し、各枝の長さを半径とする円領域を敷き詰めることで展開図を設計するアプローチが、目黒俊幸とRobert J. Langによって考案、研究され、またボックスプリーツという矩形の折り領域の組み合わせを用いた設計技法などが、体系化されています^[5]。立体的な折り紙についても、簡単なものであれば本講座の第4回で示したように、鏡映変換を基本とすることで、対話的な形状設計が可能になっています。

剛体折り紙

「多角形の剛板がヒンジで連結されたモデル」に置き換えても、折りたたむことが可能な折り紙を剛体折り紙と呼びます。折り紙作品の多くは、紙がしなやかに変形することを利用した折りたたみ工程が含まれ、剛体折り紙でないことがほとんどです。一方で、剛体折り紙として知られるミウラ折りの構造は自由度が1であるため、1か所を固定し、もう1か所を把持して動かすことで、全体の開閉を行えるという特徴があります。剛体折り可能な構造は、実際に工業製品や建築物を作る上で重要になるため、剛体折り紙で意図した形を実現することは実用上大切なテーマです。剛体折り紙に関しては、意図した形の設計、与えられた展開図が剛体折り可能であるかどうかの判定、折りによる変形のアニメーション生成など、関連する研究テーマは多くあります。特に文献[6]では、この剛体折りについて詳しく説明されています。

曲線折り・曲面折り紙

紙はしなやかに曲げることができるので、曲線・曲面を含む形も表現できます。曲面から構成される折り紙作品が、数学者のDavid Huffman氏によって数多く作られました^[7]。一方で、その設計技法については、可展面に鏡映変換を施す以外の方法は、あまり考案されていません。鏡映変換で作り出される折り線は平面曲線に限定され、空間曲線での折りを含む形の設計は未だ難しい問題です。その解決方法として、平面四角形の集合で離散化し、最適化によって曲線折りを近似表現するアプローチも取られています^[8]。同心円状に配置した折り線を

山谷交互に折ると、素材が発生させる応力とのバランスで、複雑に曲がった立体ができあがりますが、この形状が数学的にどのように表されるのかも明らかになっていません^[9]。このように、空間曲線での折りに関して、まだ研究の余地が大いにあります。図1は、曲面を含む折り紙として、筆者がデザインした最近の折り紙作品です。

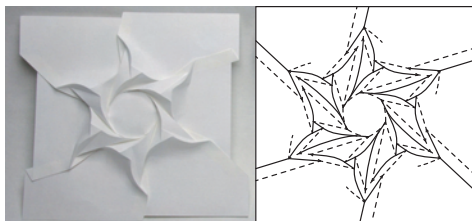


図1 平坦ねじり折りパターンを基にデザインした、曲線折りを含む折り紙

計算折り紙 (Computational Origami)

折り紙に関する諸問題を、コンピュータを使って解決しようという試み全般を指してComputational Origamiと呼びます。折り紙の設計技法が体系化された1990年代ごろから普及してきた分野です。特定の課題があるわけではなく、近年では、折り紙の設計や、折りのシミュレーション、対話的な折り紙デザインなど、コンピュータが折り紙のさまざまな分野の研究に活用されるようになってきています。対話的な操作で紙の折り操作をコンピュータ上でシミュレートできるようにした研究としては、Miyazakiらの研究^[10]が、もっとも古いものと言えるでしょう。

コンピュータを積極的に用いることで、折り紙設計やシミュレーションを効率化、高精度化でき、新規分野の開拓に役立ちます。これまで手作業では設計できなかった形の創造に貢献するようになってきています。折り紙の数理と、アルゴリズムやデータ構造、ユーザインタフェースなどを組み合わせることで、折り紙に関する研究がますます推進されると予想されます。

厚みのある素材での折り紙

折り紙の技術を工業製品に応用するためには、素材の厚さを無視できません。厚さのある素材は厳密には平坦に折りたためないため、2次元平面の問題が3次元物体の問題になります。折り線の扱い、折り線が交差する点は、厚みによる干渉が発生するため、その扱いには工夫が必要になります。場合によっては素材の伸縮、折り曲げ箇所でのひずみや皺の発生などを考慮する必要があります。厚みのある素材を折ることによる造形をしっかりモ

デル化するのは、厚さをゼロとみなす理想的な折り紙の問題よりはるかに難しい問題です。剛体折り紙の制作のために、干渉する場所を取り除いたり、基準となる面に対して裏と表の両方から傾斜を持つ部材を組み合わせて対処する手法も考案されています^[11]。布や革など、厚さのある柔軟素材を対象とした、対話的な折りのシミュレーションも研究されています^[12]。

ロボットによる折り紙

紙を折ることで作り出される製品が設計された場合、効率的な製造のためにはロボットによる折り工程の自動化が望まれます。紙をロボットで折ることは難しい問題で、まだまだ課題が多い分野です。これまでに、吸盤と薄板を用いた折りロボット^[13]や、複数のリンク機構を持つロボットアームの開発事例^[14]があります。また、マニピュレータの開発において、その「器用さ」を示すパフォーマンスとして、折り紙をすることも行われていますが、ロボットが自分で「鶴」を折れるようになるのは、まだ当分先のことだろうと思われる。

一方で、折り紙の仕組みを積極的にロボットの機構に組み込んでいくことを目的とした研究も多く行われ、Oriboticsという言葉も生まれています^[15]。

生物との関係

昆虫が羽化するときには、小さく折りたたまれた羽根が驚くほど大きく広がります。また、植物のツボミが開花する時も同様です。その仕組みを解明するために、折り紙の知識が役立ちます。

また、これとは逆に、生物がどのように広い膜を小さなスペースに格納しているかを学ぶことで、それを折り紙の分野に活用することも考えられます。たとえば、トンボは羽化の時にどのように羽を開くかの研究が、大きな幕の巻取りや展開の技術へ応用されたりしました。このようなバイオミクリーの発想を折り紙分野に適用することも研究されています^[16]。

折り紙と数学

紙を折る操作は、幾何学に密接な関係があり、古くから数学の分野で折り紙の研究が行われてきました。本連載の第2回で紹介した、山谷の折り線が平坦に折りたためるための条件(前川定理・川崎定理)など、数学的な知見が折り紙の設計に、ふんだんに活用されています。設計以外にも、折り操作で3次方程式を解く、角の三等分をする、正多角形を折り出す(10角形まではすべて折れる)など、折り紙を使って数学的な問題を解くということも行われています。また、例えば「折り線が与えられたときに、それを平坦に折りたたむことはできるか否

か判定せよ」という問題や「妥当な紙の重なり順を列挙せよ」というような問題が与えられたときに、その解を得るのにどの程度の計算量が必要か、など折り紙に関する諸問題の計算量を求める研究も盛んにおこなわれています。これらの問題を幅広く紹介したものとして文献 [17] があります。

折り紙と教育

折り紙を通して、角の二等分や、三角形の性質を学ぶなど、簡単な初等数学の教育に活用することが試みられています。例えば、鶴の展開図から、直角三角形、角の二等分線と三角形の内心などの幾何の学習を行うことができます。実際に手を動かして形を作ることが、子供たちの興味と集中力を引き出すことにつながるでしょう。折り紙に適した学習テーマを見つけることができれば、教育にも有効に貢献できるものと思われます。「折り紙」と「数学」をキーワードに検索すれば、たくさんの書籍が見つかります。

折り紙の産業応用

素材を紙に限定しなければ、「折り」の技術は産業に大きく寄与しています。人工衛星の太陽電池パネルの折りたたみや、飲料缶の表面への凹凸の付加などが、よく取り上げられますが、身近なところでは、菓子箱や紙袋、夏場に活躍する扇子やパラソルなども折りの技術の応用とみることができます。最近では、折りたたみ可能なカヤックが登場しました。一方で、最新の折り技術を応用した、新しい工業製品が次々に登場するかというと、なかなかそうでもありません。その理由の1つに、「折って作る」ということが大量生産を難しくしていることがあります。複雑な折りが必要な形の容器は、射出成型で作ってしまう方が効率的です。また、1枚の素材を折ることによる利点として、気密性を維持できることがあります。それを気にしないのであれば、無理に1枚の素材を折ることにこだわる必要はありません。産業利用を考えた場合は、ニーズとコストのバランスが重要であり、製造工程まで考慮した製品設計が必要となる点が、まだまだ難しい問題として残っています。

小さくたたむ以外にも、素材の強度を調整する目的で「折り」が使用されることもあります。飲料缶の表面の凹凸は強度を増すためのものであり、車体のサイドメンバに折り構造を加えることで、効率的に衝突エネルギーを吸収できるようにする研究や、板材の軽量化など、材料面での応用も検討されています。

その他

これまでの分類にうまくあてはまらない研究もたくさ

んあります。展開図から、折った後の形や、折り手順、折り方を説明するためのアニメーションの生成などを行う研究、ユニット折りやテセレーションと呼ばれる、折り紙の特定分野についての設計技法に関する研究もあります。ステントの折りたたみなど、医療への応用、折り方の認知に関する研究、などなど、この他にもまだまだありそうです。そもそも「折り紙」の定義が多様多様であるため、「平坦なものを折る」という操作が含まれるものは、なんでも折り紙の研究と行ってしまって構わないようにも見えます。折り紙の研究は、異分野の研究が混じり合う、稀有な研究対象と言えるでしょう。

4. 折り紙についてさらに学ぶために

最後に、折り紙についてさらに学ぶためのヒントを紹介します。

折り紙作品を鑑賞する

折り紙について学ぶ第一歩は折り紙作品を実際に自分の目で見ることでしょう。そして、実際に折ってみることで。最近の折り紙技術の進歩は目覚ましいものがあり、驚くほど精巧で、かつ芸術的な作品が世界中で作られています。東京都文京区には「折紙会館」と「おりがみはうす」があり、折り紙作品が多数展示されています。都内に赴くことが難しい場合はインターネット上でもさまざまな作品の写真を見ることができます。最近では、写真共有サイトであるFlickr (<http://www.flickr.com/>) 上で折り紙作品を公開している方が多く、少し覗いてみると膨大な数の折り紙の写真が見つかります。海外からの投稿が多く、「origami」をキーワードに検索すると、いくら時間があっても見きれないほどの件数がヒットします。ある程度ターゲットを絞るためには、origamiに関するグループを検索するといいでしょう。たとえば、Origami Tessellations, Computer Aided Origami, Curved Fold, Origami Boxes, のように、特定の分野に特化した折り紙に関するグループを見つけることができます。

最新の情報を収集する

新しい情報を得るには研究会に参加するのが一番でしょう。本学会でも折り紙に関する研究がこれまでに発表されてきましたが、折り紙に特化した研究会としては、年に2回、日本折紙学会が主催する折り紙の科学・数学・教育研究集会有り。折り紙だけを研究をしている人はあまりいませんので、参加する方々のバックグラウンドは様々です。大学に籍をおいている人よりも、そうでない人の方が多いのも特徴で、老若男女、多様な分野の方々集まります。毎回10件前後の発表があり、参加者は30名程度といった小規模なものですが、最近の折

り紙の話題を共有できる楽しい研究会です。Webページは <http://origami.gr.jp/OSME/> です。

日本応用数学会の中に折紙工学研究部会があり、主に折りの技術を工学的に活用する研究が発表されます。もう少し気軽な折り紙イベントとして、折り紙のコンベンションや講習会に参加するのも選択肢の1つです。日本を代表する折り紙作家や研究者、気鋭の若手愛好家たちに会うことができます。

折り紙の国際会議

折り紙は日本だけでなく世界中で多くの研究者に関心を持たれています。図学国際会議 (ICGG) や、国際図学会 (ISGG) が発行する論文誌 *Journal for Geometry and Graphics* でも、折り紙の研究が多数発表されています。International Meeting of Origami Science, Mathematics and Education (OSME) という、折り紙に特化した国際会議があり、これは1989年にイタリアで開催されて以来、4-6年毎に開催されています。これまでに5回、イタリア (1989)、日本 (1994)、アメリカ (2001)、アメリカ (2006)、シンガポール (2010) の順番で開催されてきました。第6回目にあたる次回は、2014年8月10日~13日に東京大学で開催されることが決まっています。20年ぶりの日本での開催です。Webページは <http://origami.gr.jp/6osme/> です。

4. おわりに

図学と折り紙に関する連載講座も、第6回となる今回で、最終回となりました。これまでの連載を通して、「なるほど、折り紙もなかなか奥が深そうだ」と感じていただけたなら幸いです。紙を折るだけのことでありながら、折り紙の世界は奥深く、研究としても面白い対象です。ORIGAMIという言葉は、世界中で使われる言葉となりましたが、海外でも活発に研究が行われ、今や日本が最先端だとは言えない状況にあります。本連載によって、折り紙に関する研究に興味を持たれた方がいらっしゃれば、望外の喜びです。

最後になりましたが、1年半にわたり、ご支援をいただきました日本図学会編集委員の皆様へ感謝申し上げます。

参考文献

- [1] Thomas Hull, 川崎 敏和 (訳), “折り紙の数理と科学”, 森北出版, 2005
- [2] Robert J. Lang (編), “Origami 4”, A K Peters/CRC Press, 2009

- [3] Patsy Wang-Iverson (編), Robert J. Lang (編), Mark YIM (編), “Origami 5: Fifth International Meeting of Origami Science, Mathematics, and Education”, A K Peters/CRC Press, 2011
- [4] 前川 淳, 笠原 邦彦, “ビバ!おりがみ”, サンリオ (1989)
- [5] Robert J. Lang, “Origami Design Secrets: Mathematical Methods for an Ancient Art”, Second Edition, A K Peters/CRC Press, 2011.
- [6] 野島 武敏 (編), 萩原 一郎 (編), “折紙の数理とその応用”, 共立出版, 第5章, 2012.
- [7] Cones, curves, shells, towers: He made paper jump to life. *The New York Times*, June 22 (2004)
- [8] Martin Kilian, Simon Flöry, Zhonggui Chen, Niloy J. Mitra, Alla Sheffer, Helmut Pottmann, Curved folding, *ACM Transactions on Graphics*, 27 (3), Article No.75 (2008)
- [9] Koschitz, D., Demaine, E., Demaine, M.: Curved crease origami, In *Abstracts from Advances in Architectural Geometry*, pp.29-32 (2008)
- [10] Miyazaki, S.Y., Yasuda, T., Yokoi, S. and Toriwaki, J. I. “An origami playing simulator in the virtual space”, *Journal of Visualization and Computer Animation*, 7 (1): 25-42, 1996
- [11] Tomohiro Tachi, “Rigid-Foldable Thick Origami”, in *Proc. of 5 OSME*, 2010.
- [12] Lifeng Zhu, Takeo Igarashi, and Jun Mitani, “Soft Folding”, *The 21st Pacific Conference on Computer Graphics and Applications*, 32 (7), 2013
- [13] Devin J. Balkcom, Matthew T. Mason: Robotic origami folding. *International Journal of Robotics Research* 27 (5): 613-627 (2008)
- [14] 大島裕貴, 木原康之, 横小路泰義, “直接教示の容易性と高難易度の折り紙作品の実現を考慮したロボットハンドの設計”, 第12回システムインテグレーション部門講演会, 2011
- [15] Matthew Gardiner, “Oribotics by Matthew Gardiner”, <http://www.oribotics.net/>
- [16] 野島 武敏 (編), 萩原 一郎 (編), “折紙の数理とその応用”, 共立出版, 第6章, 2012.
- [17] Erik D. Demaine, Joseph O'Rourke, 上原 隆平 (訳), 幾何的な折りアルゴリズム—リンクージ, 折り紙, 多面体, 近代科学社, 2009.

●2013年10月15日受付

みに じゅん

筑波大学大学院システム情報系 准教授

2004年, 東京大学大学院工学系研究科精密機械工学専攻博士課程 修了博士 (工学). 2011年より現職, CG, 形状モデリングに関する研究に従事.
mitani@cs.tsukuba.ac.jp