

図学と折り紙（1）

Graphic Science and Origami (1)

三谷 純 Jun MITANI

1. はじめに

筆者はコンピュータグラフィックスを専門とし、そのなかで立体的な形の構築を扱う「形状モデリング」の分野を主に研究しています。本学会においては、これまでに立体と展開図をキーワードとして、計算機を用いた紙模型および折り紙に関する研究の発表をさせていただいてきました。最近では曲面を含む折り紙の設計と制作に関心を持ち、研究の合間に作った折り紙作品を Flickr というインターネット上の写真共有サイト^[1]に投稿しています。たとえば図1のような作品があります。これらは、折った後の形を計算機で設計し、展開図に従ってカッティングプロッタで折り筋を加工しています。お時間のある時にご覧いただければ幸いです。



図1 Flickr で公開している曲面を持つ折り紙

このたび、本誌の講座で連載記事を執筆させていただく機会を得ましたので、この「折り紙」をテーマに取り上げ、図学と折り紙に関係する話題を紹介していきたいと思っています。コンピュータグラフィックスを専門とするものの視点から見た「折り紙」であるため、内容に偏りがあるとは思いますが、折り紙に対する新しい視点を提供できれば幸いです。

2. 折り紙の歴史

研究の第一歩として、対象の歴史を学ぶことは大切なことでしょう。ここでは、一般的に知られている折り紙の歴史について簡単に紹介します。

「折り紙」をどのように定義するかにも依りますが、鶴や舟を折る遊戯的な折り紙が普及したのは、江戸時代初期からと考えられているようです。それ以前にも、「畳紙」や「熨斗（のし）」のような「礼法折り紙」の文化はあったようです。世界的に origami という単語が使われるようになっていますが、ヨーロッパでも紙を折る文化は古くからありました。そのため「折り紙は日

本を発祥の地として世界に広まった」という考えは正確では無いようです。

誰もが一度は折ったことがあると思われる「鶴」は江戸時代初期の作品であると考えられています。この鶴のさまざまなバリエーションをまとめた本「秘伝千羽鶴折形」が、今から200年以上も前の1797年に刊行されました^[2]。この本には、複数の鶴が連なった作品を中心に49種類もの完成図と切込みの入れ方が載っています。折り紙というと、正方形の紙を使って、切込みを入れてはいけない、と考える方が多いと思いますが、古くは自由な発想に基づいて、多くの作品が考案されていたことがうかがい知れます。この「秘伝千羽鶴折形」は、世界でもっとも古い遊戯的な折り紙の本と言われています。この文献の各ページの写真が、日本折紙学会の Web サイト^[3]で公開されています。

近代的な創作折り紙が登場したのは戦後のようです。折り紙の作品を芸術の域まで高め、また新しい折り紙の基礎を築き上げた人物として、吉澤章氏の功績は国内外で高く評価されています。1980年前後から折り紙に「設計」の概念が導入され、さまざまに新しい折りの技法が考案されるようになりました。近年では、昆虫をはじめとする複雑な構造を持った作品が折り出されるようになってきました。古典的な折り紙とは一線を画する精巧さで、折りの手数が多い複雑なものは「complex origami（コンプレックス折り紙）」とも呼ばれます。

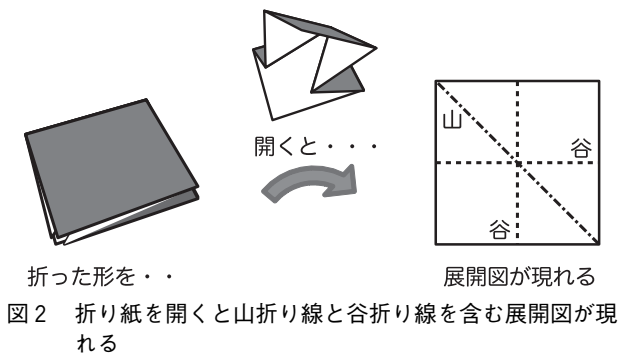
1989年には折り紙の国際会議（現在は「折り紙の科学・数理・教育に関する国際会議：The International meeting of Origami Science, Mathematics, and Education」）が開催され、学術的な観点からの研究も進展しました。2000年以降はコンピュータの普及とともに、折り紙の設計を支援するソフトウェアや、折りによる紙の変形をシミュレーションするソフトウェアなどが多く登場するようになりました。このようなコンピュータを使った折り紙の設計・研究を指して、Computational Origami という言葉も使用されるようになってきています。

人工衛星の太陽電池パネルの折りたたみや自動車のエアバッグの折りたたみなど、工学分野へ折り紙の技術

を活用する動きもあり、産業界へのさらなる応用が模索されています。

3. 折り紙と展開図

紙を折ってできた「形」と、紙を開いた時に見られる「折り線」の関係についてよく観察することが折り紙について深く知る第一歩になります。折り線には、「山折り(Ridge foldまたはMountain fold)」と「谷折り(Valley fold)」の2種類があり、この折り線の様子を図で表したものを「展開図」と呼びます(図2)。実際の折り紙作品を開くと、完成した時点では折られていない線(折り工程の途中でしるしをつけるために折られた線など)も現れますが、これらは「補助線」として区別し、展開図には含めないことが一般的です。



展開図では、山折りを赤、谷折りを青とすることが多く(Ridge=RedでアルファベットのRつながりである、覚えるといいそうです)、色を付けない場合には山折りを一点鎖線、谷折りを破線として表すことが一般的のようです。これはなぜかペーパークラフトでみられる区別とは逆になっています。紙をひっくり返せば、山と谷が反転しますので、区別さえできれば、どちらが山でどちらが谷かにあまりこだわる必要はないのかもしれませんが(左右対称な形に限りますが)。本稿では、谷折りを破線、山折りを実線で表すこととします。

4. よく知られている折りのパターン

鶴や舟のように、何か具体的な対象物を折るのではなく、規則的なパターンを繰り返し折ることで、幾何学的に、場合によっては工学的にも興味深い形とすることがあります。ここでは、よく知られている折りのパターンをいくつか紹介します。

4.1 蛇腹折り

蛇腹折り(図3)は山折り線と谷折り線が交互に並び基本的なパターンで、アコーディオンのように伸縮します。1枚の素材から接合部無しで、伸縮する機構を作れ

るため、加工機の防塵カバーに使用されることもあります。図4の例のように、平行な折り線群を横切るような折りを新しく加えることで、より複雑なパターンを作ることができます。蛇腹折りは、折り紙設計においても、よく使われるパターンです。

蛇腹折りの山と谷の並び方を、山・山・谷・谷とすると、図5に示すトタン屋根のような形になります。折り線の並びの間隔を変えたり、傾きを持たせたりすることで、さらにバリエーションを増やせます。

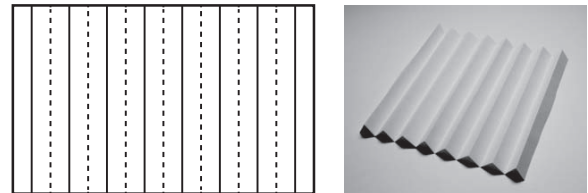


図3 山と谷を交互に折った蛇腹折り



図4 蛇腹折りを横断するように折った様子

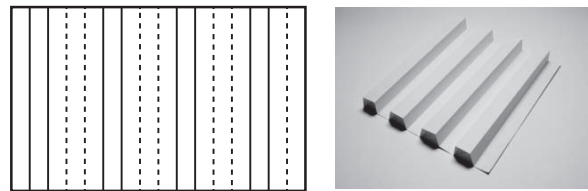


図5 山・山・谷・谷の繰り返しで得られる形

4.2 ミウラ折り

ミウラ折り(図6)は人工衛星に搭載された太陽電池パネルの折りたたみに使用されたパターンとして広く知られています。一点を固定し、他の点を移動させると全体が連動して開閉する一自由度の剛体折りパターンです。開閉が容易なことから、地図の折りたたみにも活用されています。東京大学名誉教授の三浦公亮氏の名にち

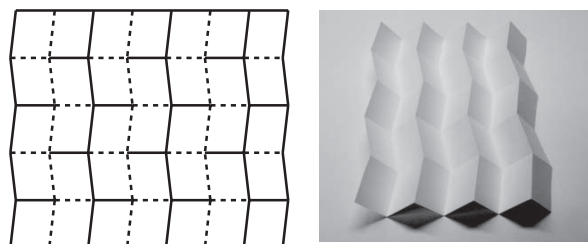


図6 ミウラ折りのパターン

なんでミウラ折りと呼ばれていますが、当の三浦氏は当初「二重波型可展構造」と呼んでいたそうです。ミウラ折りに関する詳しい情報はMIURA-ORI GroupのWebサイト^[4]内の「ミウラ折りの発見と科学」のコーナーで紹介されています。

4.3 吉村パターン (ダイヤモンド・パターン)

吉村パターン (図7) は円筒をつぶした時に現れる、ダイヤモンド・パターンと呼ばれる構造と同じ折り構造を持ったパターンです。丸めて両端を貼りあわせることで円筒になります。この構造を深く研究された吉村慶丸氏の名前にちなんで、吉村パターンとも呼ばれます。表面にこのパターンが加工された飲料缶 (ダイヤカット缶) もあります。

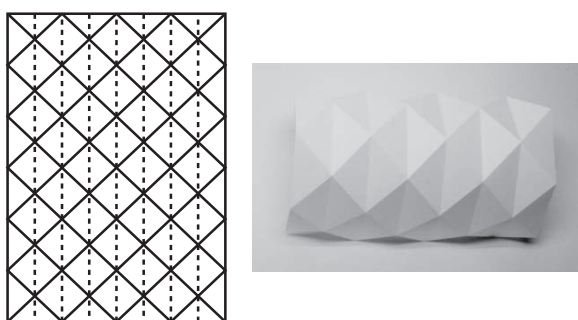


図7 吉村パターン (ダイヤモンド・パターン)

4.4 風船の基本形と、その敷き詰め

図8は折り紙でよく知られている「風船」を折るときに現れる基本的なパターンで、「風船の基本形」と呼ばれています (これ以外にも、いくつかのパターンが「~の基本形」と呼ばれています)。

これは図9のように、三角形の辺をつなげて連結することができ、この展開図も平坦に折りたためます。これをさらに、基本形の半分だけずらして隣に並べていくと、「Folding Techniques for Designers: From Sheet to Form (Paul Jackson 著) ^[5]」の表紙にも使われている図10の面白い形になります (写真と展開図では、山と谷が反転しています)。風船の基本形はいくらでも連結できるので、さらに数を増やすと図11のような形にな

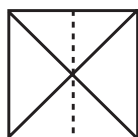


図8 風船の基本形の展開図

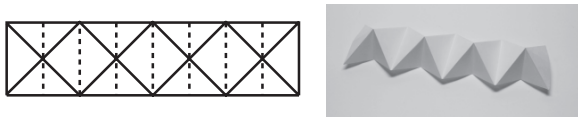


図9 風船の基本形を横に並べた様子

ります。独立した1つの風船の基本形同様に平らに折りたたむことができる一方で、支えがないと紙の元に戻ろうとする力でクルッと丸まってしまいます。両手を使って自由に変形できます。

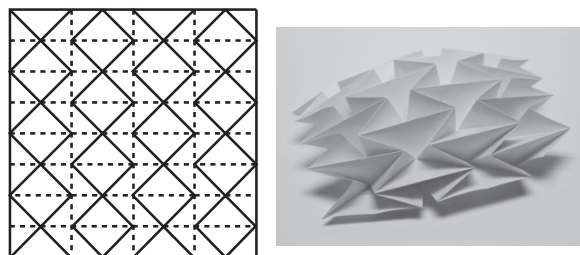


図10 風船の基本形の敷き詰めパターン(1)

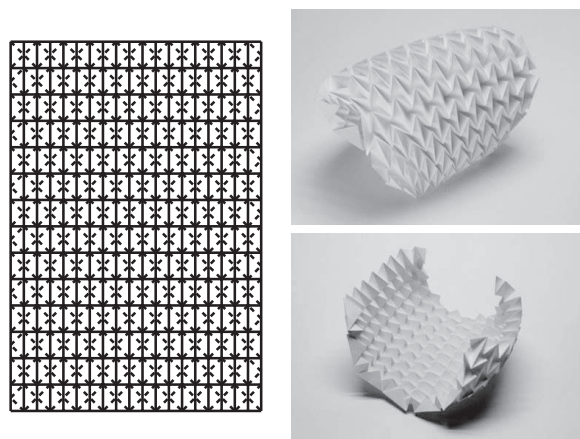


図11 風船の基本形の敷き詰めパターン(2)

4.5 イカロスの帆に使用されたパターン

人工衛星でもロケットでも無く、どう表現するべきか難しいところですが、「世界初の宇宙ヨット」と称され、2010年に宇宙に飛び出したソーラー電力セイル機「イカロス」の薄膜太陽電池の折りたたみに使われたパターンが図12です^[6]。展開図は4つの三角形が組み合わさった形になっていて、それぞれが蛇腹折りで折りたたまれます。上の写真のように折った後で、これを中心の四角形に巻きつけます。

中央部にも折り線を入れてこのパターンを平らに折りたたみ、そのあとに端を持って広げると、双曲放物面状の形になることが知られています (数学的には双曲放物面にならないということが文献 [7] で示されていま

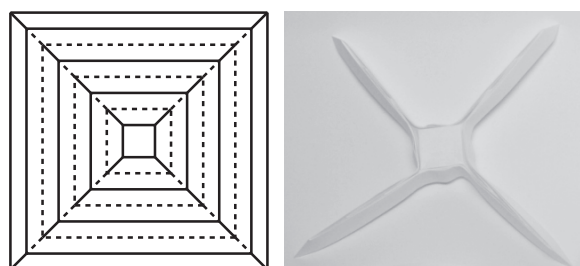


図12 イカロスの帆に使われたパターン

す)。不思議な形なので、ぜひ一度作ってみることをお勧めします。

4.6 ねじり折り

図13は紙をひねって折る構造をしていて、完全に折りたたむと平坦になります。紙がねじれた状態で重なり合い、重なり順が循環します。中央部分は正方形である必要はなく、図14は中央が三角、四角、六角の例です。畳紙（タトウ）や「花紋折り」などに見られ、また Tessellation と呼ばれる分野の折りにもよく登場します。

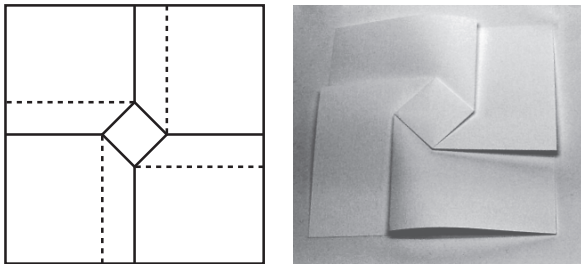


図13 ねじり折りのパターン



図14 正三角形、正四角形、正六角形のねじり折り

4.7 三角形のスパイラル

図15は三角形の集合で円錐状の形が作られる構造で、平坦に折りたたむことができます。折りたたんだ状態を上から見ると、三角形が中から外に向かってらせん状に広がります。折り紙作家の布施知子氏によって、このパターンを持った作品が多く作られています^[8]。また一方で、野島武敏氏によっても、その設計手法が研究され^[9]、それぞれ「ねじれ多重塔」、「円錐殻」などの名称で呼ばれています。ねじれの角度や重ねる段数を変えることが可能で（上記は5角形の例）、2010年に発表された「132 5. ISSEY MIYAKE」シリーズの服飾にも、こ

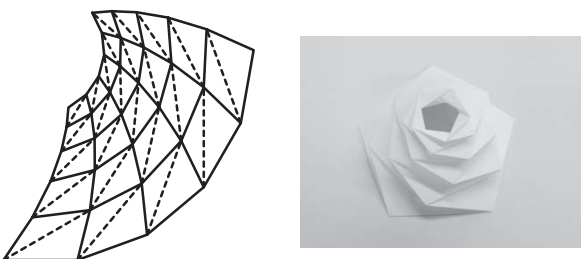


図15 三角形のスパイラル（5角形）のパターン

のパターンのバリエーションが使用されたデザインが生まれます。

5. おわりに

連載第一回目ということで、折り紙の簡単な歴史と、ミウラ折りなどの、よく知られている折りのパターンを紹介しました。折り紙というと、鶴や舟など、具体的な対象物のかたちを折ることばかりに目が行きがちですが、幾何学的な折り線の配置パターンからも興味深い形を折り出すことができることをそれぞれの展開図で確認いただけたでしょうか。また、ここで紹介したパターンからは、紙を正方形に限定する必要がないことがわかりいただけたものと思います。固定概念に縛られない自由な発想が、新しい形を折り出すことにつながります。次回は、平坦に折りたたむ「平坦折り」と展開図の関係について紹介したいと思います。

参考文献

- [1] Flickr: Jun Mitani's photostream, http://www.flickr.com/photos/jun_mitani/
- [2] 山口真, 日本を伝える! 英語で折り紙, ナツメ社, 2005
- [3] 『秘伝千羽鶴折形』—折紙探偵団, <http://origami.gr.jp/SenbazuruOrikata/index.html>
- [4] 株式会社ミウラ折りラボ, ミウラ折りの発見と科学, <http://www.miuraori.biz/hpgen/HPB/categories/80201.html>
- [5] Paul Jackson, Folding Techniques for Designers: From Sheet to Form, Laurence King Publishers, 2011
- [6] 宇宙航空研究開発機構, 小型ソーラー電力セイル実証機「IKAROS (イカロス)」のセイル展開の成功について, http://www.jaxa.jp/press/2010/06/20100611_ikaros_j.html
- [7] Erik D. Demaine, Martin L. Demaine, Vi Hart, Gregory N. Price and Tomohiro Tachi. (Non) existence of Pleated Folds: How Paper Folds Between Creases, JCCGG 2009.
- [8] 布施知子, MANIFOLD, #05, pp. 3-5, 2002.
- [9] 野島武敏, 折りたたみ可能な円錐殻の創製, 日本機械学会論文集. C編 66 (647), pp. 2463-2469, 2000.

●2012年5月10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