「折紙工法で得られる輸送箱の振動遮断とコアの音響解析」

阿部 綾 Aya ABE (Meiji University)

折紙工学研究の一環として、四面体と八面体ハーフの各コアから構成され、これらを箱に詰めて充填するアッセンブリトラスコアパネル(Assembly Truss Core Panel: ATCP)が開発された．それぞれのコアの中にイチゴ、ブドウ、卵、そして更には、iPS細胞、血液などを入れて輸送することを想定したATCPは緩衝材としての役割と運搬箱の両方の役割を持たせることを考えている。運搬手段として、自動車、船、飛行機を、また過疎地においては、ドローンで運ぶことを考えている。さて、上述の運搬対象はそれぞれに輸送時に極力避けたい周波数帯域がある。そのため、サスペンションを設け、問題となる周波数帯域で伝達特性を低くすることを考える。ここでは、一連の研究の方向を示し、ATCP をドローンで運び、当地で落下させたときの内側コアの損傷についてのシミュレーション結果や外箱について振動遮断のための最適化を行った検討について考察する。また、パネルの別の用途として、コアの形状的特性から遮音効果が得られることが期待されており、コア単体について行った音響解析の結果についても考察する。

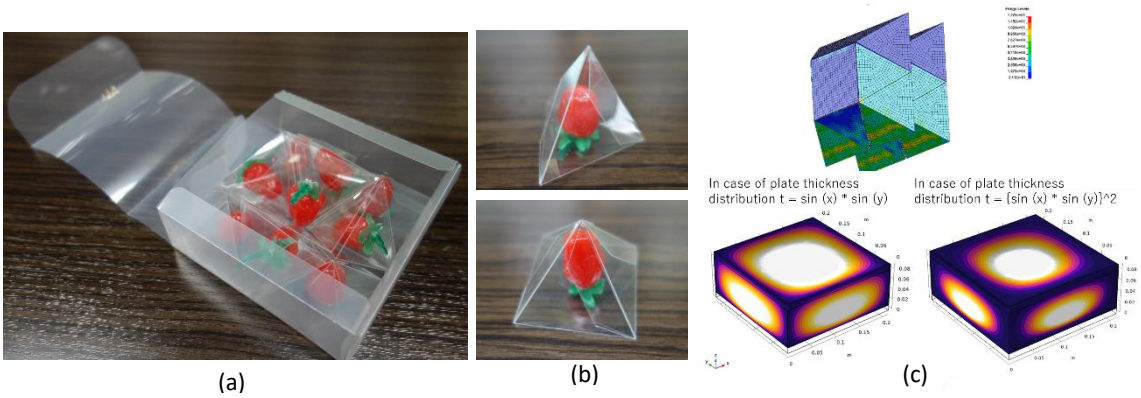


Fig. 1 (a) Strawberries in Assembly Truss Core Panel. (b) A strawberry in each tetrahedron and octahedron truss core. (c) Results of a simulation of drop test and an optimization for vibration isolation.

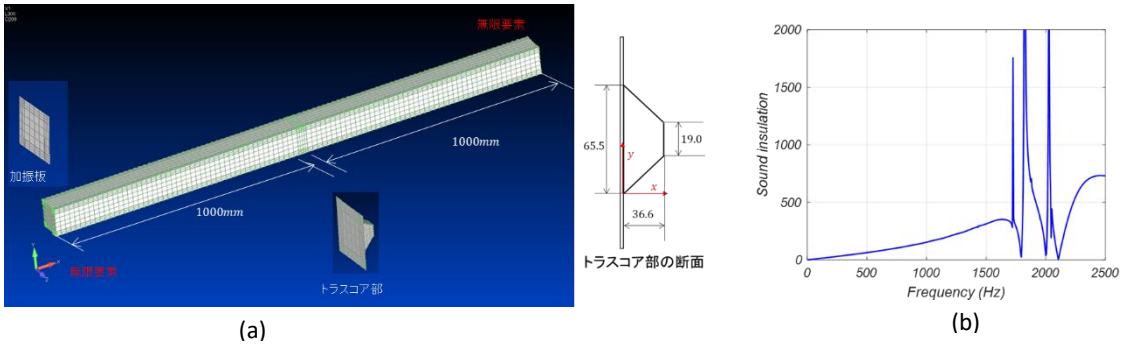


Fig. 2 (a) Truss core sound insulation calculation model. (b) Result graph of sound insulation performance.

折紙コアを折るロボットのシミュレーション

Simulation of a robot that folds origami cores

Luis Diago
Interlocus Inc & Meiji University

Introduction

Folding the paper continues to be one of the skills that even robots can not perform with the same skill that humans do. The recent development of artificial intelligence techniques has allowed robots to develop self-learning skills to manipulate objects without the need for human supervision [1]. In this work we show an example in which starting from a video of a human folding a 2D pattern of a pyramid (tetrahedron origami core), the trajectories of the faces of the pyramid and the trajectories of the hands are obtained to define the objectives of the sub-tasks (e.g. flip, rotate and fold the paper) to be developed by the robot to reach the final goal (i.e. 3D pyramid).

Materials and methods

To track the faces of the pyramid and recognize the subtasks during the video, 8 ARToolKit [http://www.artoolkitx.org] marks were used in the pattern (4 in front and 4 on the back). Figure 1 shows an example of the used pattern.

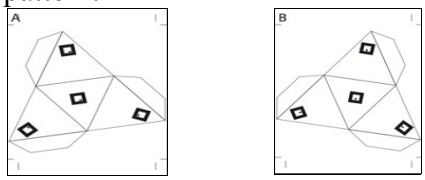


Figure 1. Pattern of the tetrahedron with 8 ARToolKit marks

To recognize the position of the hands, we used a convolutional type neuronal network that was trained with a database [http://domedb.perception.cs.cmu.edu/handdb.html] of the OpenPose project to recognize 22 characteristic points of the hands. The coordinates of the characteristic points of the hands are used as input to the Graspit simulator [2] to define the policies and the states through which the robot must travel to complete all the tasks.

Preliminary Results

Figure 2 shows a video frame with one of the marks recognized in the pattern, the characteristic points in the hands and a fragment of the trajectories defined by the 8 marks. Figure 2 also shows one of the robots included in Graspit and the pattern included in the simulation environment.

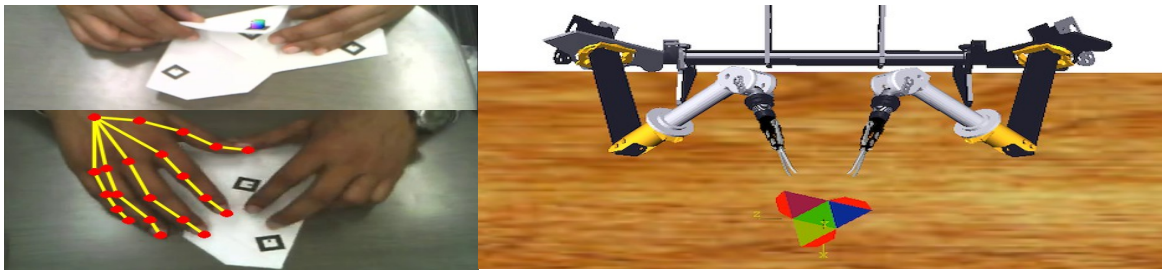


Figure 2. Recognition of marks in the pattern and characteristic points of the hands

References
[1] OpenAI. et al “Learning Dextrerous In-Hand Manipulation”, arXiv:1808.00177
[2] D. Kragic, A. T. Miller and P. K. Allen, "Real-time tracking meets online grasp planning," Proceedings 2001 ICRA. IEEE International Conference on Robotics and Automation (Cat. No.01CH37164), Seoul, South Korea, 2001, pp. 2460-2465 vol.3.

Maria Savchenko

Meiji University, MIMS

A study on the origami-inspired structure for sun protection umbrella

Origami-based engineering allows to design structures with remarkable performance characteristics. In recent years, origami applications have been developed for many engineering areas such as space structures, shelters, sandwich panels, meta-materials, medical and automobile devices.

Sun is a source of ultraviolet that produces the beneficial health effect. Too much radiation from sun light induces risks on the human health such as: serious sunburn, permanent retinal damage, and skin cancer. Radiation protection such as sunscreens, sunglasses, umbrellas, shaded, hats, and other things is necessary for everybody to avoid excessive exposure during their daily life. But, for instance, a single umbrella in an open space provides limited sun protection. Also, the broken mechanical parts of the umbrella in a result of the strong wind loading may cause damage to the human body.

We suppose that folding origami object (shape, geometry) may provide the new mechanical and physical properties to redirect solar rays and increase the stiffness of the structure.

The aims of the current study are: to simulate light propagation process through the origami structure; to simulate the behavior of the structure under wind loading for the safeness from mechanical damages.

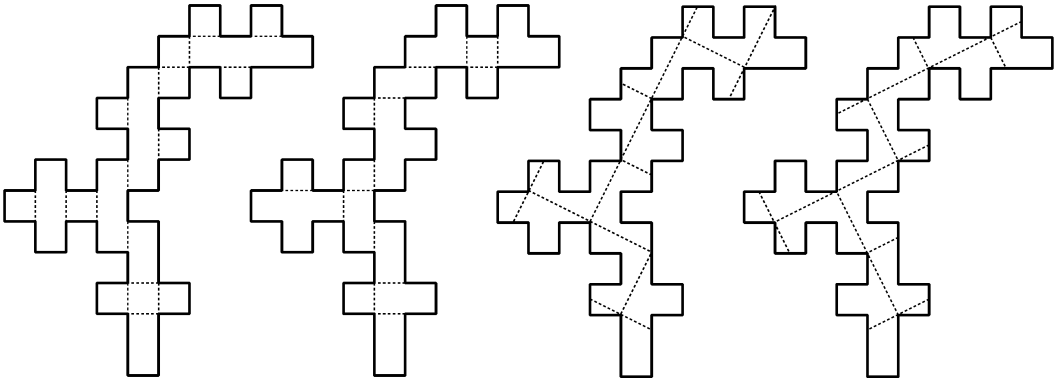
To achieve the project goals, the structural numerical analysis and the approach based on ray-tracing (a compute-intensive visual rendering) method is used for the simulation of the physical propagation of light rays through the 3D mesh models. The algorithm which is based on the combination of ray-tracing and volume visualization will provide the opportunity to calculate the distribution density of the rays, passing through the 3D polygonal umbrella model. For the numerical analysis of the origami (bending around the crease lines) and the traditional umbrella (folding by using mechanical parts), structures through wind loading kinematic and shell models are developing. LS-DYNA and ANSYS software are used to calculate the stiffness and foldability of the structures with applying material such as cardboard and polypropylene.

箱折りのためのアルゴリズム[1]

堀山 貴史

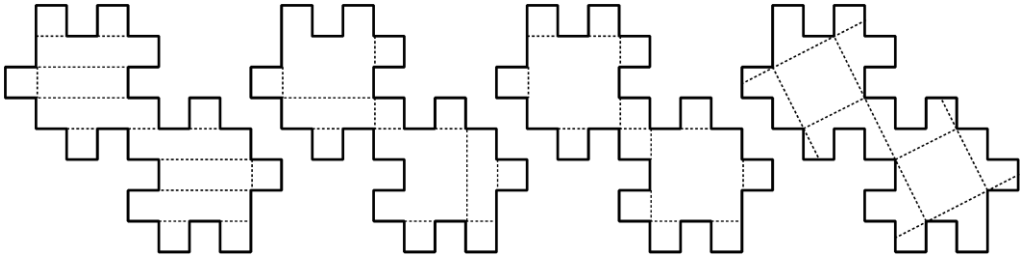
埼玉大学 理工学研究科

本講演では，箱折り問題，すなわち多角形 P が与えられた時に，P を折ってできる箱（直方体）すべてを列挙する問題を扱う．ここで，P はその境界を示す頂点の列 $(p_0, p_1, \ldots, p_{n-1}, p_0)$ として与えられ，また各頂点 p_i は有理数座標 (x_i, y_i) で表されるとする．この問題に対し，とりえる箱の大きさ（3 辺の長さの組）を推測し，その箱を多角形 P 上で転がすことですべての折り方を列挙するアルゴリズムを示す．このアルゴリズムの時間計算量は，P の直径を D として，$O(D^{11} n^2 (D^5 + \log n))$ である．このアルゴリズムの適用例として，文献 [1], [2] の図形に対するそれぞれ 4 通りの折り方を，図 1, 2 に示す．



1×1×7　　1×3×3　　√5×√5×√5　　√5×√5×√5

図 1:　4 通りの折り方で 3 種類の箱が折れる多角形（[1] より）



1×1×7　　1×3×3　　1×3×3　　√5×√5×√5

図 2:　4 通りの折り方で 3 種類の箱が折れる多角形　（[2] より）

[1] D. Xu, T. Horiyama, T. Shirakawa, R. Uehara. Common Developments of Three Incongruent Boxes of Area 30. Computational Geometry: Theory and Applications, 64:1-17, 2017.

[2] K. Mizunashi, T. Horiyama, R. Uehara. Efficient Algorithm for Box Folding. In Proc. of the 13th International Conference and Workshops on Algorithms and Computation, Lecture Notes in Computer Science, 11355:277-288, 2019.

[1] 水無浩一（埼玉大学），上原隆平（北陸先端科学技術大学院大学）との共同研究

Möbius Kaleidocycles – Folding Linkages with a Single Degree of Freedom from Paper

Johannes Schönke

Okinawa Institute of Science and Technology, Okinawa, Japan

Origami and mechanical mechanisms are closely related. Whenever we make a straight fold into paper we actually create a hinge. In classical origami, like, for example, the crane, the hinges are not supposed to move anymore after the model is finished. But there is also the idea of action origami, where the finished model has some internal degrees of freedom, such that if one pulls at certain points of it, other parts will move. Examples are the flapping bird, the fortune teller, or kaleidocycles. Classical six and eight-hinged kaleidocycles are known for a long time, the earliest depictions are about one hundred years old. We present a recently discovered family of ring linkages called Möbius kaleidocycles with a single internal degree of freedom which can be made with an arbitrary number (larger than six) of hinges. Möbius kaleidocycles can be folded from paper and therefore be considered action origami. We will discuss some of the intriguing properties of Möbius kaleidocycles and present several paper models.

A nine-hinged Möbius kaleidocycle made from paper.

連続折り畳みー仕切りのある双ピラミッドー

Continuous Flattening of Bipyramids with Partitions

奈良 知惠（Chie Nara）
明治大学先端数理科学インスティチュート（Meiji University，MIMS）
cnara@jeans.ocn.ne.jp

厚みを無視でき，紙のように折り目によって折れる素材でできた多面体を切込みや伸縮なしで連続的に平坦化する問題[1]に対して，種々の結果が筆者ら［2］によって示されている。また，仕切りの入った多面体について連続的に平坦化する問題を筆者は提案し，4 次元の超立方体の 3 次元空間への射影として用いられる仕切りのある立方体（二重箱）について，展開図や平坦化状態の存在を[3]で報告した。ここでは，仕切りの入った双ピラミッドについて連続的平坦化の問題を扱う。尚，仕切りのない双ピラミッドについては［4］で議論し，部分的に解決している。

定義　底面が合同な２つの正 n 角錐について，底面を削除し，側面の縁同士を貼り合わせたものを**双ピラミッド**(bipyramid)，より一般には，底面が円に内接し，側面が合同な二等辺三角形の n 角錐を**準角錐**(semi-pyramid)，さらに，底面が合同な２つの準 n 角錐の底面を削除し，側面の縁同士を貼り合わせたものを**準双ピラミッド**(semi-bipyramid)という。底面を除去せずに，貼り合わせて同一視した面を合わせた立体を仕切りのある準双角錐（semi-bipyramid with partition）という。ここでは，表面が凸の立体であることを仮定する。角錐の頂点に接続する辺を**ラディアル辺**，他の辺を**水平辺**とよぶ。

定理　仕切りのある準双ピラミッドは，ラディアル辺を剛性に保ち，水平辺の各辺を中点で２つ折りにした変形によって，連続的に平坦折り畳み可能である。

系　拡張した準双ピラミッド(図２)は，ラディアル辺を剛性に保ち，水平辺の各辺を中点で２つ折りにした変形によって，連続的に平坦折り畳み可能である。

図 1.

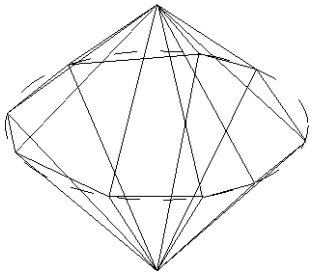
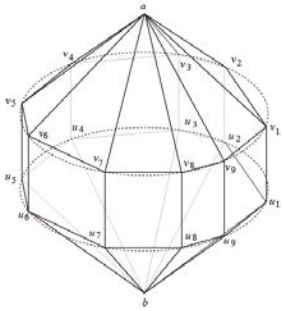


図 2.



References

[1] Demaine, E.D., O'Rourke, J. Geometric folding, Algorithms, Lincages, Origami, Polyhedra. Cambridge University Press, 2007.

[2] Itoh, J., Nara, C., Vilcu, C. Continuous flattening of convex polyhedral. *Comp. Geometry*, EGC 2011, LNCS 7579, Springer (2012) 85-97.

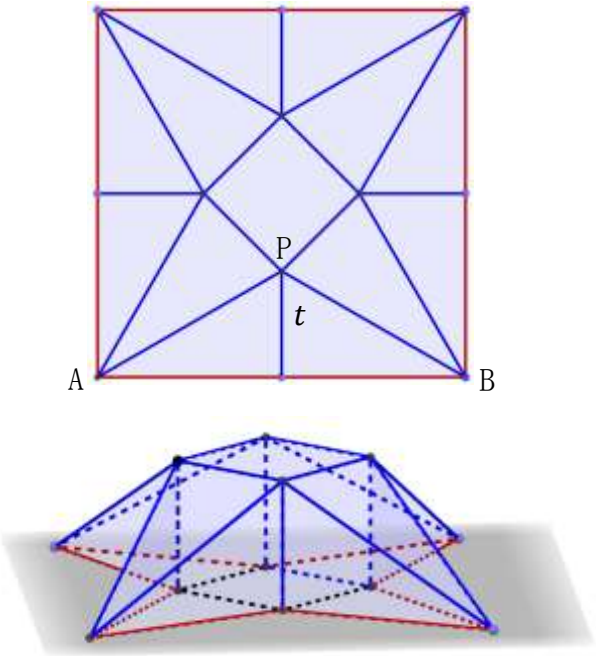
[3] 奈良知惠，4次元超立方体と仕切りのある箱の折り畳み，MIMS 現象数理学拠点共同研究集会「折紙数学と折紙工学を基盤とする産業応用」2018 年 8 月 17 日−18 日，明大中野キャンパス.

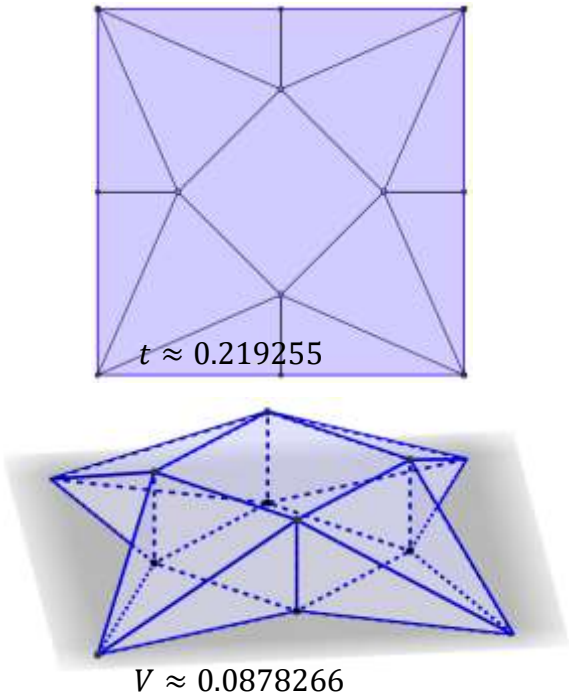
[4] Nara, C, Itoh, J. Continuous flattening of extended bipyramids with rigid radial edges. In The Proceedings from 7OSME, **2**, tarquin, Oxford, (2018) 561--571.

折り紙テントII

伊藤仁一　（椙山女学園大学教育学部）
堀尾直史　（荒尾市立荒尾海陽中学校）

昨年，「折り紙テント」と題して以下のような発表を行った．正方形の紙を以下の様に折って水平面との間の囲む体積の最大値を求め左図のような結果をえた．



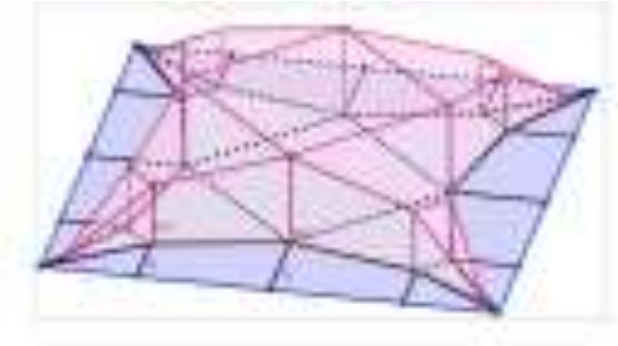


定義１　多角形を貼り合わせたもので境界付き曲面と同相であるものを**polyhedral surface**と呼ぶ．このとき，多角形の厚みは0とする（[1]）．

定義２　以下を満たす連続変形$f_t: M \to R^3, t \in [0,1]$を$R^3$におけるpolyhedral surface$M$ の**origami-deformation**と呼ぶ．

(1) f_0は包含写像
(2) Mの各面は剛性を保つ
(3) この変形の中で２面が重なることはあるが，互いに通り抜けることはない（[1]）．

定義３　境界付き平面を origami-deformation により折ってその周の全てを平面に接させることができる立体を**折り紙テント**と呼ぶ．



昨年の発表の際に折り方を任意にした場合に Paper bag problem の片面だけを考える問題と捉えることが出来ることが分かった．そこで，Paper bag problem の半分の値に近づける折り方の例を考察する．最後の図の様に2段折りにすることで上記の折り方よりは少しは体積が大きくなることが分かった．

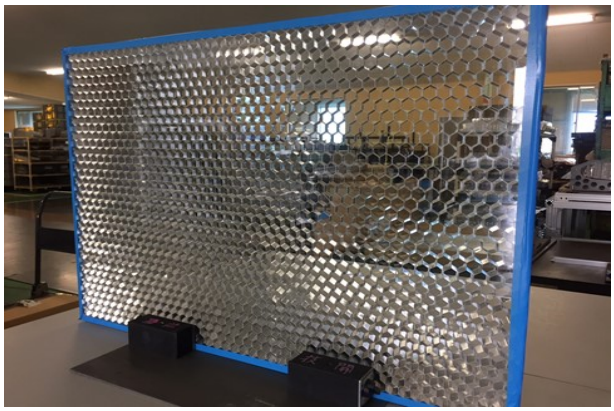
参考文献

[1] H.Maehara: Reversing a polyhedral surface by origami-deformation, European Journal of Combinatorics 31 (2010), 1171-1180
[2] Paper bag problem: Wikipedia, https://en.wikipedia.org/wiki/Paper_bag_problem

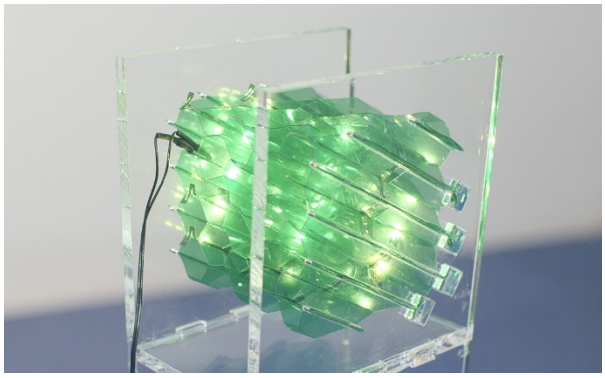
ハニカムコア折紙工法の現状と今後の展開

九州大学大学院芸術工学研究院　斉藤一哉 (k-saito@design.kyushu-u.ac.jp)

折紙や切紙の幾何学を応用することで、1 枚の紙から様々な周期的なセル構造体を立体化できる。Foldcore、Origami core と呼ばれるこれらの構造体は優れた機械的特性を有し、多くの場合既存の軽量高剛性パネルより安価に製作可能であることから、サンドイッチパネル用の芯材や衝撃吸収材、遮音構造として様々な分野への応用が期待されている。本講演では周期的なスリットを入れた平板から折り曲げのみで様々な形状のハニカム構造体を立体化する折紙工法について、開発状況と今後の展開について述べる。折紙工法は従来のハニカムコアの製造法である展張式と比べ、①安価に製作可能（コスト 1/10~1/5 程度）、②任意断面形状で制作可能、③正 6 角形の高精度なセル形状の利点を有する。現在、城山工業株式会社の主導で連続自動製造装置の開発が進められており、平板及び曲面ハニカム自動製造に成功している。講演ではこの自動製造装置の紹介及び上記①～③の利点を活かした風力発電用タービンブレード、建材用意匠パネルの開発について報告する。



ガラスを表面に貼った透光型ハニカムパネル



フレキシブル基盤で作成したハニカム照明器具（エレファンテック(株)制作）

折紙工法ハニカムコアで製作した風力発電用タービンブレードの取り付け（東京大学生産技術研究所、柏実験所）

折紙に基づく展開立方体宇宙構造物の開発

有田祥子（Shoko Arita）
静岡大学（Shizuoka University）

宇宙機の設計・開発において，折紙に基づく展開構造物は，ロケットによる輸送の観点から，利点の多い構造様式として多用されている．本研究では，大型構造物の支持構造や，膜面デバイスの足場としての利用が期待できる宇宙構造物として，図 1 に示す折紙に基づく宇宙構造物の提案を行い，宇宙実証に向けた研究・開発を行っている．図 1 に示す折紙は，展開する Jackson Cube[1]であり，円筒螺旋折の一種でもある．円筒螺旋折の特徴であるバイステーブルを利用することで，収納時も展開後も無歪安定形状を得られる構造物が構築できる．これまでに，折紙の折り目や各面の構造的機能を整理し，図 2 に示す通り，金属材料を用いて，それらの機能を有する宇宙用構造物の模型を作成した．そして，支柱の座屈解析，展開実験を経てバイステーブルの性質を確認した．また，自律展開機構の開発（図 3），展開挙動の測定実験，熱特性調査を実施し，展開の制御や再現性向上に向けた開発を行っている．本発表ではこれらの調査内容や結果を紹介する．

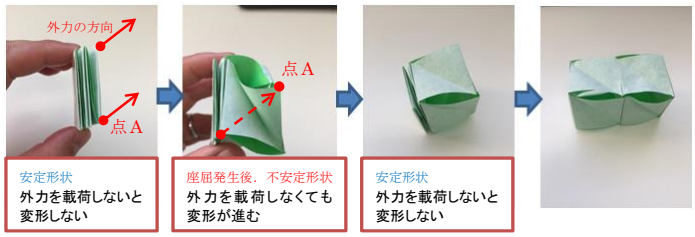


図 1　展開する Jackson Cube

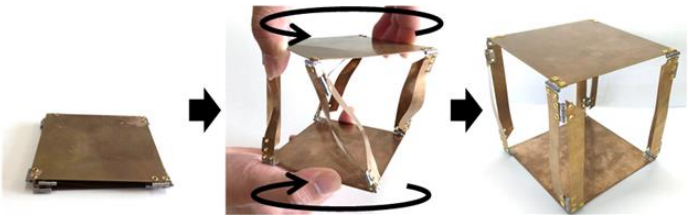


図 2　折紙に基づいて作成した模型

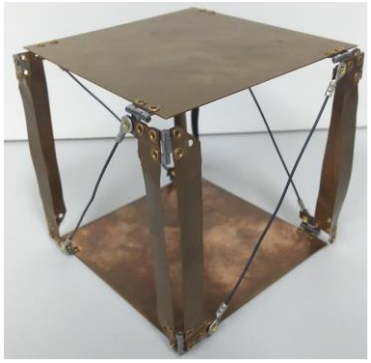


図 3　自律展開機構を搭載した模型

[1] Paul, J., CUT AND FOLD TECHNIQUES FOR PROMOTIONAL MATERIALS, Laurence King Publishing, 2013, pp112-123.

超小型人工衛星(OrigamiSat-1)における展開膜の折畳みと展開特性について

東京工業大学・工学院　古谷　寛（Hiroshi Furuya）
e-mail: furuya.h.ab@m.titech.ac.jp

展開膜構造を小型人工衛星に搭載することで様々な利用が提案されている．これらの技術実証として，著者らのグループは 1m 四方の展開膜を 10cm 立方の超小型衛星に搭載した OrigamiSat-1 を開発し，2019 年 1 月に打ち上げた．

人工衛星搭載の展開膜の折畳み方法は，著者らが提案してきた Skew fold[1](図 1 を利用した．図 2-3 は最初の概念スケッチと折り目パターンである．しかし，10cm 角の超小型衛星に納めるためには様々な要求からデザインを修正する必要があり，最終的に図 4 の折り目パターンを採用することで，図 5 の全体図に示すような衛星の設計を行った．図 6-7 は展開膜の展開・収納状態の写真である．[2-4]

本発表では，具体的な衛星搭載展開膜の折り畳み設計の変遷について述べるとともに，展開構造物で重要になる展開抵抗等について技術的な側面について述べる．

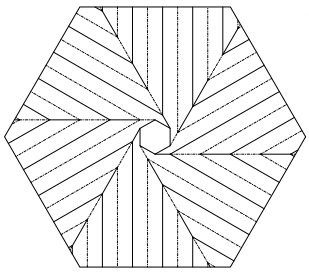


図 1　Skew fold (hexagonal)

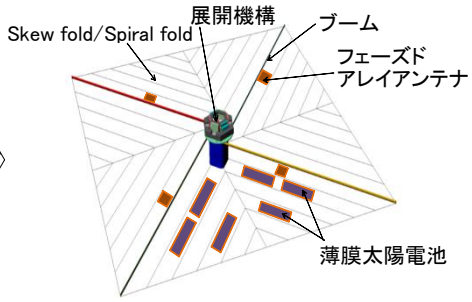


図 2 衛星初期概念図

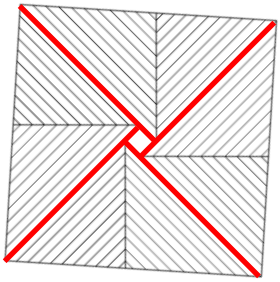


図 3 展開膜初期パターン

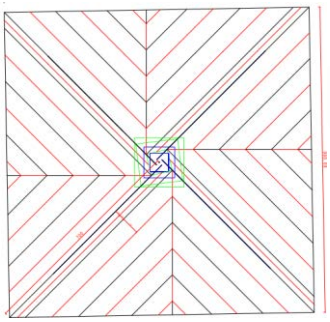


図 4 FM 膜折り畳みパターン

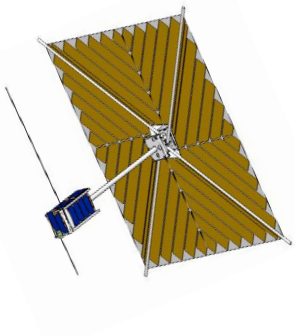


図 5 FM 全体図

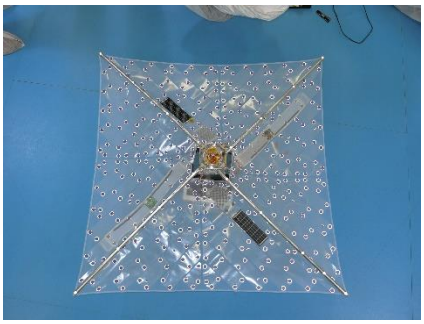


図 6 FM 膜展開状態

参考文献：[1] H. Furuya, et al., IAC-04-I.1.05, 2004.
[2]H. Furuya, et al., IAC-14-C2.3.10, 2014.
[3]H. Sakamoto, et al., JSASS ISTS 2015-f-74.
[4] T. Chubachi, et al., AIAA-2018-0695, SciTech2018.

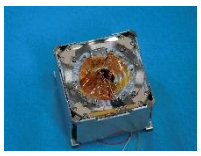


図 7 FM 膜収納状態

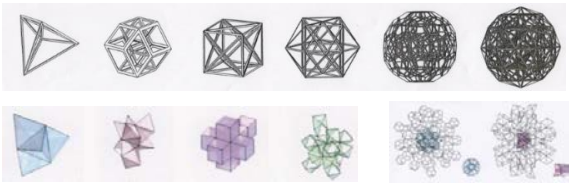
多胞体の影を折る

宮崎興二（京都大学名誉教授）

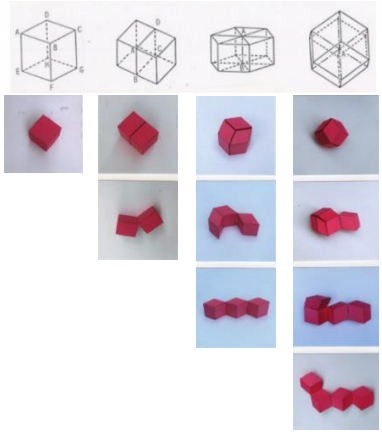
（キーワード：4 次元正多胞体、展開模型、4 次元投影）

3 次元の多面体は、2 枚の多角形状側面が 1 本の辺を共有し合いながら連結するかたちで２次元平面上に展開でき、逆にその展開図を、共有する辺を折り目にして 3 次元空間で折り曲げていくことによって元の多面体を作ることができる。同じように 4 次元の多胞体は、2 個の多面体状側胞が 1 枚の側面を共有し合いながら連結するかたちで 3 次元空間内に展開することができる。ただし 3 次元空間では、その展開模型を、共有する側面で折り曲げることはできない。それでここでは、多胞体をあらかじめ 3 次元空間へ投影し、その投影を、2 個の多面体状側胞が 1 本の稜を共有しながら連結するかたちで 3 次元空間内に立体的に展開し、逆に、その展開模型を、共有する稜を折り目にして 3 次元空間で折り曲げていくことによって元の 3 次元空間へ投影された多胞体を作る。ただし、投影には、主として、互いに平行な光線による平行投影と、1 点から発散する発散光線による発散投影がある。

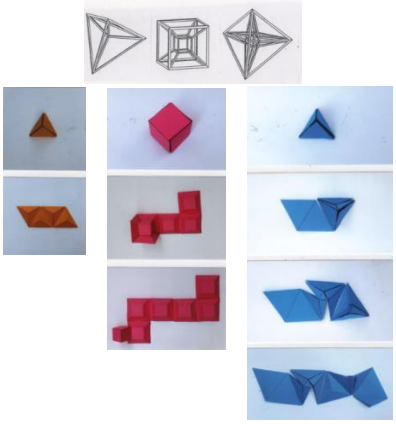
このような操作によって、3 次元空間へ投影された 4 次元多胞体の錯綜した構造を、一連になった模型で明示することができる。とくに発散投影の場合は、与えられた多胞体の適当な胞の外殻になっている一つの多面体に他のすべての胞を収納できるという特徴がある。



4 次元正多胞体の 3 次元空間への平行投影(上段)と 3 次元空間内でのそれぞれの展開模型の例(下段)。左から、正 5 胞体、4 次元立方体、正 16 胞体、正 24 胞体、正 120 胞体、正 600 胞体。



構成要素を中心とする 4 次元立方体の平行投影(最上段)とその立体展開(下 4 段)。左列から、胞心、面心、線心、点心。



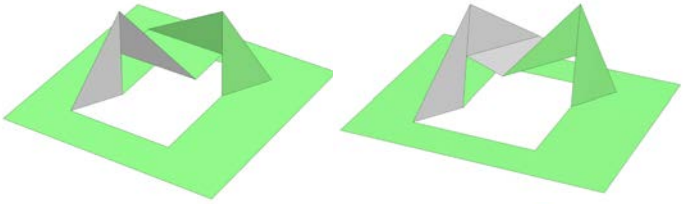
側胞としての正多面体の中に埋め込まれた発散投影(最上段)とその立体展開(下 4 段)。左列から、正 5 胞体、4 次元立方体、正 16 胞体。

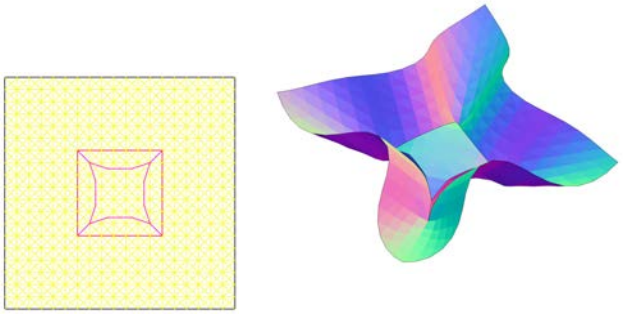
Creative Design with Origami Simulator and Fusion360
デジタル・シュミレーターによる折り紙造形

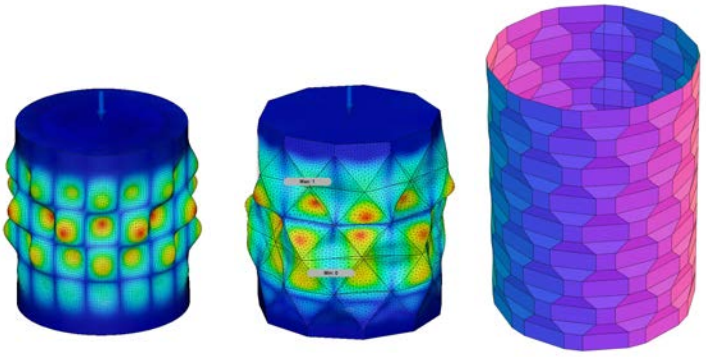
Yoshinobu Miyammoto
宮本 好信

Origami Simulator (Amanda Ghassaei 2018)とFusion360(Autodesk 2019)のシミュレーション機能を、創作的な折り紙造形に活用する方法を考察する。これらを紙や薄板の挙動を仮想実験する道具として活用し、手作業や経験則を拡張するデザイン・ツールとしての可能性を模索する。類似の発想でスマート素材の開発に座屈パターンを利用した最近の既往事例を紹介する。

1. 切り紙 Kirigami & Pop Up
    a. 回転建立方式 RES
    b. 自己相貫通過 RES
2. 曲線折り (メッシュ細分化)
   Curved Fold with meshing
    a. SelfLock-Kaki
    b. Huffman Tower
3. 圧縮円筒座屈パタン応用
   Buckling pattern of Cylinder under axial compression
    a. 既往研究
        i. 座屈バタン利用スマート材料
           SGUI: Seeded Geometric Imperfections, Nan Hu, Rigoberto Burgueno 2017
        ii. 座屈による表面形状加工
           (円筒、楕円筒、翼型)
           Surface Texturing Through Cylinder Buckling, K. A. Seffen, S. V. Stott, 2014
    b. 検討案 (薄板材加工)
        i. Euler/Koiter Pattern
        ii. Yoshimura Pattern
        iii. Octagonal Pattern







ファブリケーション指向の折紙設計支援ツール「Crane」の開発

東京大学　須藤海

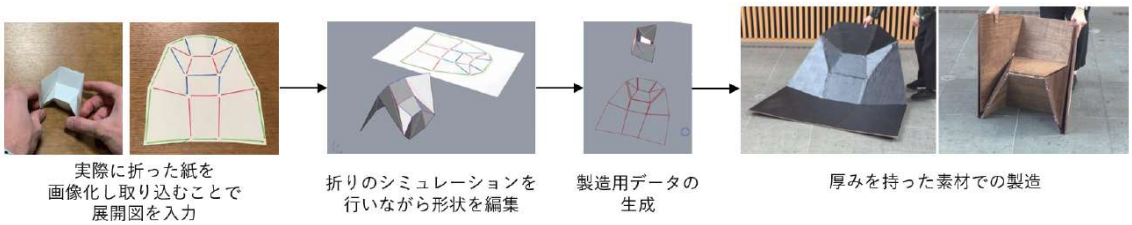
1.　概要

折紙に関する学術研究は多くの成果や応用可能性を蓄積しておりデザイナーや建築家，他分野の研究者により大きな関心が寄せられているが，様々な理由からその社会実装は進んでいない．その理由の一つとして，折紙に関する専門的な知識を持たない人々が折紙構造を設計・シミュレーション・製造するための統合的な情報環境が存在しないことがあげられる．設計ツールとして三谷氏による ”ORI-REVO” や “ORI-REF”，シミュレーションツールとして舘氏による “Freeform Origami” や Ghassaei による “Origami Simulator”，などそれぞれ独立したソフトウェアは存在するが，統合的なソフトウェアは存在しない．また，厚み処理が可能な製造用ツールに至ってはそもそもツールとして存在せず，各ユーザが自前で実装している状況となっている．そこで，これらを統一的に扱える情報環境である，”Crane” を開発した．実装はデザイナーや建築家にとってポピュラーな CAD ソフトウェアである Rhino+Grasshopper 上のプラグインとして行った．

2.　実装内容

Crane を用いた折紙プロダクトのプロトタイピングは以下のワークフローから構成される．

1　紙を折って折紙プロダクトをデザイン，スキャンして取り込み
2　スキャン画像からメッシュデータ作成，剛体折シミュレーション
3　厚みを処理した製造図面生成
4　厚みを持った素材（今回は木製の合板）で製造



折紙プロダクトのデザインワークフロー

Crane は大きく分けて入力コンポーネント群，シミュレーションコンポーネント群，ファブリケーションコンポーネント群から構成されており，合計 25 個のコンポーネントが実装されている．詳しい開発内容については以下を参照されたい．

https://www.ipa.go.jp/files/000073290.pdf
https://www.ipa.go.jp/files/000073291.pdf

ビーズ等面四面体

山岸義和 (龍谷大学), 堀部和経 (大同大学)

2019 年 4 月 26–27 日「折紙を基盤とする数理と折紙工学への応用発展」明治大学

球面の三角形分割 P ([1]) の双対は Goldberg 多面体と呼ばれ、次数 3 の正則な平面グラフ (G とする) を与える。そのような多面体の例については和算においても研究があった [2]。G が 6 角形と 5 角形のみで構成される場合はフラーレンと呼ばれる。

G の各辺にビーズ (穴の空いた球) を置き、ビーズに糸を (2 回ずつ) 通すことによって、多面体のビーズ編みが得られる。各ビーズで糸が交差するように編むと、一本の糸は辺をジグザグに通る。これをビーズ測地線 [3](あるいは zigzag [4], geodesic [5], left-right path [6]) と呼ぶ。P の三角形分割をすべて正三角形で構成すると、ビーズ測地線に対応して P 上の測地線が存在する。

G が六角形と三角形のみで構成される場合に対応する P を考える。これを折り紙で作ると、3 価の頂点 (4 つある) を結ぶ線分で折れば等面四面体が得られる (三角形分割の辺では折らない)。 P を平面に置いて滑らないように転がせば、等面四面体による平面タイリングと、三角形分割の正三角形による平面タイリングの両方が得られる。P の二重被覆面はトーラスとなる。

この等面四面体 P を単一閉曲線 γ で切って、頂点を二つずつに分けたとする。γ に少し幅をもたせると、ねじれのない帯となる。帯は、展開された平面上ではタイリングの周期の一つを表している。この帯の幅を広くしたり狭くしたりすることによって、等面四面体の変形を考えることができる。言い換えれば、等面四面体を、いわば北半球と南半球の二つに切り分けて、赤道部分にまっすぐなベルトを継ぎ足すことによって、新しい等面四面体が得られる。

一つの等面四面体 P から他の等面四面体 P' へ、高々 2 回のベルトの継ぎはぎによって変形できることがわかる。

G が六角形と四角形のみで構成される場合に対応する P を、ここでは octahedron [1] と呼ぶ。P は 4 価の頂点を 6 つ持つ。この場合は、頂点を 3 つずつに分けるような単一閉曲線で P を切り分けると、まっすぐなベルトを継ぎ足すことができる。任意の二つの octahedron が、このようなベルトの継ぎはぎによって移りあえるかは不明である。

参考文献

[1] W. P. Thurston, Shapes of polyhedra and triangulations of the sphere, Geometry and Topology Monographs 1 (1998) 511-549.

[2] 会田 安明, 算法截籠集 (さんぽうさいろうしゅう)（東, 西, 南, 北）, 1798 頃.

[3] 山岸義和, 野田頭美羽, 中島香歩, ビーズ正二十面体上の測地線, かたちシューレ 2018, 2018 年 12 月 25-26 日, 琵琶湖マリオットホテル.

[4] M. Deza, M. Sikirić, and M. Shtogrin, Geometric structure of chemistry-relevant graphs, 2015, Springer.

[5] B. Grünbaum, and T. S. Motzkin, The number of hexagons and the simplicity of geodesics on certain polyhedra, Can. J. Math. 15 (1963) 744-751.

[6] H. Shank, The theory of left-right paths, Lecture Notes in Mathematics 452 (1975) 42-54.

金属製組立式トラスコアパネル高効率製造工法についての研究
Study on high efficiency manufacturing method of metal assembly truss core panel

国立高等専門学校機構　奈良工業高等専門学校　機械工学科　寺田　耕輔

1　緒言

組立式トラスコアパネル（ATCP, Assembly Truss Core Panel）は高剛性構造体として防音壁や機械・建築構造物の補強材などに利用が期待されている[1]．現在のところ，ATCPはマシニングセンタによる折線の溝加工，レーザーによる穴あけ・切断，平面状態のコアのグリッパー曲げ加工等により製造されている．しかし，現行の方法では加工時間は周長や個数に比例するため大量生産に適さない．そこで穴あけ・溝加工・切断を三回のプレス加工で行う高効率製造工法の研究開発を進める．多数個を一度にプレス加工すれば大量生産に対応できるからである．本稿では，プレス加工実験と考察により得られた知見とメカニズムについての検討結果を報告する．

2　実験方法

(1)溝加工：エッジ工具(2mm×2mm×65mm，ハイス製)を用いたプレス加工を行う．万能試験機の圧縮部に，エッジ工具と幅50mm長さ100mmの試験片(厚さ0.4mm-1.0mm)を挟んだ刃置台を設置し，試験片としてアルミニウム(A1050P-H24)と冷間圧延鋼材(SPCC-SD)を用いる．送り速度は加工速度の影響をのぞくため0.6mm/min一定とする．溝を折線とし，グリッパーを用いて120°程度まで折り曲げるために必要な最小荷重を，試験片材質，板厚，試験力等を条件として荷重制御による溝加工実験から求める．なお，グリッパー曲げに適した溝幅寸法は板厚寸法としている[2]．

(2)切断加工：ピアスおよび型打抜きは，送り速度は80mm/minとし，ストローク制御によるプレス加工で行う．

3　結果

(1)溝加工：A1050P，SPCC-SD試験片幅50mmの必要荷重P_{A1050P}，$P_{SPCC-SD}$は，板厚t(mm)に比例する次式の関係が得られている．

$$P_{A1050P} = 3.92 + 9.8(t - 0.4) \qquad (0.4 \leqq t \leqq 1.0)$$

$$P_{SPCC-SD} = 14.7 + 36.75(t - 0.4) \qquad (0.4 \leqq t \leqq 0.8)$$

SPCC-SDはA1050Pと比較して約4倍の荷重を必要とする．これはSPCC-SDとA1050Pの変形抵抗の比によると考えられる．

(2)切断加工：ピアスおよび型打抜き等を行い，プレス加工法によるATCP試作(図1)を行っている．

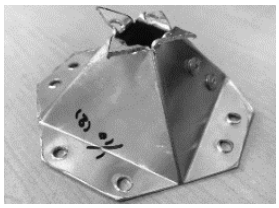
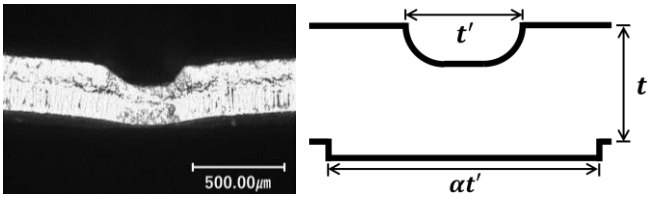


Fig.1 Produced ATCP by press method

4　溝加工における必要荷重についての考察

溝加工後の試験片断面(図2(a))を図2(b)のようにモデル化して溝加工における必要荷重について考察する．



(a) Groove cross section　(b) Model of groove section

Fig.2 Model of groove cross section

試験片に生成される凹部と凸部のメカニズムは，塑性変形によるもので，体積一定により図2(b)の凹部と凸部の断面積は等しいはずである．凹部幅をt'，凸部幅を$\alpha t'$とすると，αが変形率であるから，溝加工による材料の真ひずみεは，$ln\,\alpha$となる．実験結果(図3)によるとαはほぼ一定になっている．

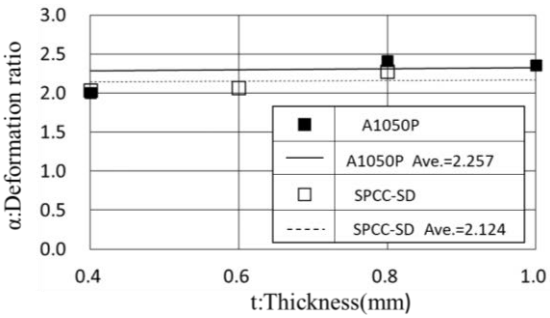


Fig.3 Measured data α (deformation ratio)

溝加工に必要荷重Pは，平均変形抵抗k_m，接触面積S（＝溝長さ$L\cdot t'$）とすると次式で表される．ここで，$C_1 \cdot C_2 \cdot C_3$は平均変形抵抗の材料定数である．

$$P = k_m \times S$$

$$= C_1 \varepsilon^{C_2} \dot{\varepsilon}^{C_3} \times (L \cdot t')$$

よって，真ひずみεはほぼ一定で，t'以外は全て定数となり，Pは板厚（≒t'）と加工長さLに比例すると考えられる．

5　結論

(1) 溝加工に必要荷重は，板厚と加工長さにほぼ比例する．そのメカニズムについて溝周辺の顕微鏡写真からの測定結果をもとに検討している．

(2) 本工法の今後の課題は，形状寸法精度(穴位置および切断寸法など)の向上や多数個どり金型の製作等である．

参考文献

1) 寺田耕輔・戸倉直・高橋徹・萩原一郎，“組立式トラスコアパネル(ATCP)の実用化開発”，国立高等専門学校機構福島工業高等専門学校研究紀要，58(2017)，pp.1-8.

2) 寺田耕輔，“グリッパー曲げ加工における板材変形メカニズム”，ぷらすとす（日本塑性加工学会会報誌），vol.1，No.3（2018-3），pp.33-37.

Impossible Folding Font

Erik D. Demaine[1], Martin L. Demaine[1], Tomoko Taniguchi[2], and Ryuhei Uehara[2]

[1]CSAIL, MIT, Massachusetts, USA; {edemaine,mdemaine}@mit.edu
[2]School of Information Science, JAIST, Ishikawa, Japan; {tomoko-t,uehara}@jaist.ac.jp

Humans are fascinated by *impossible objects* — physical objects that obviously exist yet appear to be impossible. For extensive examples, see Sugihara's award-winning collection [11]. The *International Puzzle Party* has a session devoted to impossible objects, which can only be attended by those who have already created something "impossible".

One elegant form of the impossible objects is the *hypercard* [1, 5, 4, 9, 10], as popularized by Martin Gardner in 1978 [6]. Hypercards are typically made from one complete playing card or index card, and yet seem to be impossible. Figure 1 shows an example: (1) cut along the black solid lines, (2) mountain fold along the red dash-dot line, and (3) valley fold along the blue dashed line. When we fold both crease lines by 90°, we obtain the hypercard, which seems to be impossible at first glance. Using this type of trick, many different impossible cards have been designed and sold in magic shops [4]. Gardner [6] describes hypercards as a kind of minimalist sculpture.

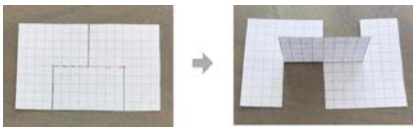


Figure 1: How to make a hypercard.

Why do these objects seem to be impossible? One reason is that the sheet has been twisted, and twisting is necessary to form the 3D shape, while the resulting folded state does not seem to be twisted. A key feature of the folded state is a vertical flap extending from a horizontal plane, with the property that the vertical flap overlaps other material when rotated in either direction onto the horizontal plane, thus seeming to be impossible from a single sheet of material. We call such a folded state a *one-flap impossible folding*.

In this paper, we design several new one-flap impossible foldings that together form an *impossible folding font*. From the viewpoint of origami design, the symbols of the impossible origami font require several nontrivial origami/paper craft techniques. From the viewpoint of computational origami [3], this framework can be seen as a natural extension from 2-dimensional origami and a natural intermediate model to general 3-dimensional origami. In our designs, we use a square sheet of paper with crease lines on horizontal, vertical, and 45° diagonal lines. Each folding angle is orthogonal, that is, ±90° or ±180°.

Here we show the impossible folding font. Due to space limitation, we only show upper case letters, but lower case letters and numbers are also available. For each letter, we show the crease pattern (as described above) on the left, and the folded state visualized by Origami Simulator [7, 8] on the right.

References

[1] Jack Botermans. *Paper Capers*. Henry Holt, 1986.

[2] Erik D. Demaine, Jason Ku, and Robert J. Lang. FOLD file format for origami models, crease patterns, etc. https://github.com/edemaine/fold.

[3] Erik D. Demaine and Joseph O'Rourke. *Geometric Folding Algorithms: Linkages, Origami, Polyhedra*. Cambridge University Press, 2007.

[4] Tom Frame. The Hypercard Project. Booklet, 2006.

[5] Karl Fulves. Hypercard. In *The Chronicles*. 1978. Volume 1, numbers 1 and 12.

[6] Martin Gardner. Minimal sculpture. In *Hypercards and More Mathematical Recreations from Scientific American Magazine*, chapter 8. W. H. Freeman and Company, New York, 1992. Original article in *Scientific American*, 1978.

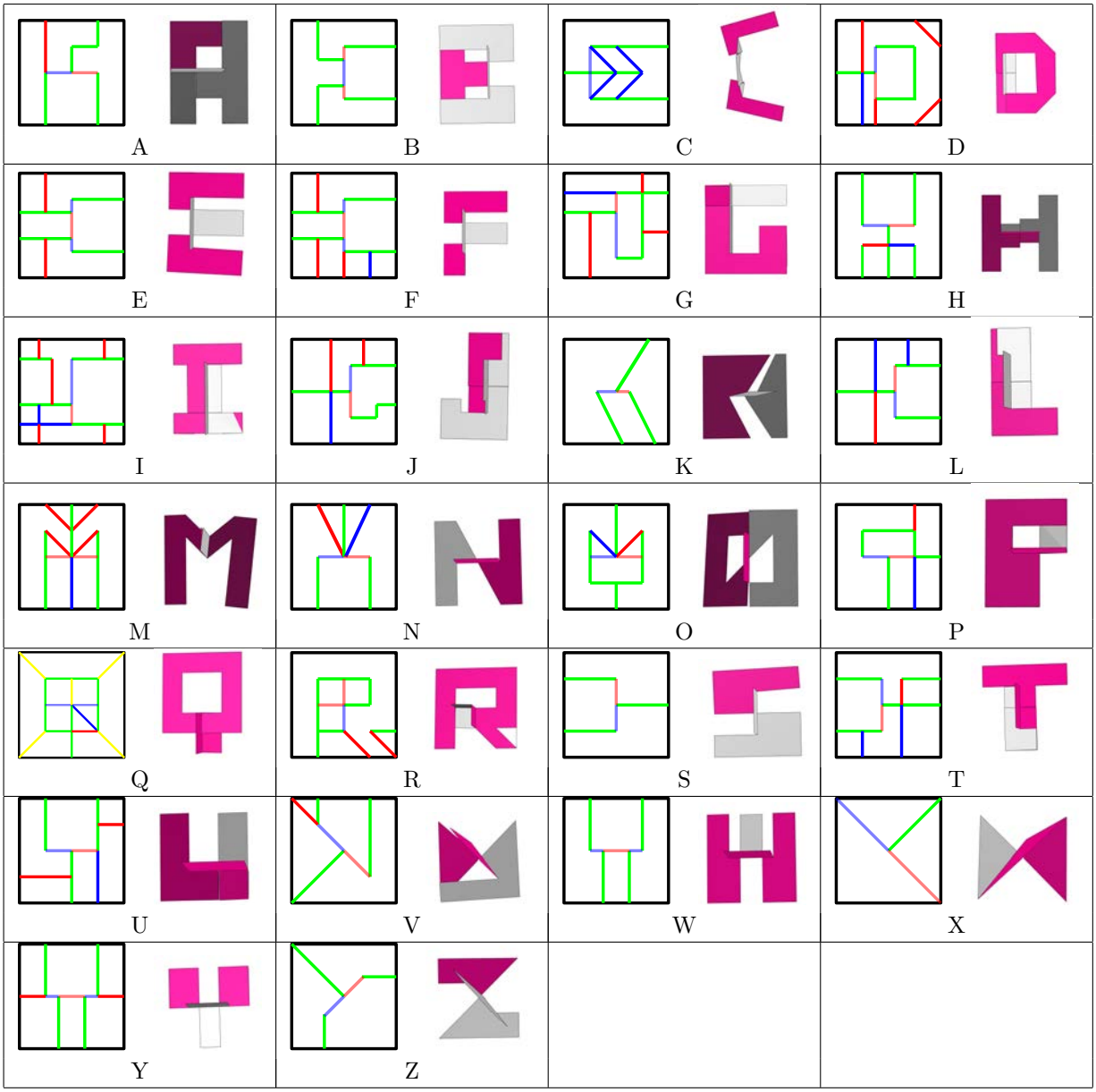
[7] Amanda Ghassaei. Origami Simulator. http://apps.amandaghassaei.com/OrigamiSimulator/.

[8] Amanda Ghassaei, Erik D. Demaine, and Neil Gershenfeld. Fast, interactive origami simulation using GPU computation. In *Proceedings of the 7th International Meeting on Origami in Science, Mathematics and Education*, Oxford, England, September 2018.

[9] Ben Harris. *The Hypercard Experience*. Ben Harris Magic, Queensland, Australia, 1965.

[10] Gordon Jepperson. The Ultracard Principle. Privately issued magic trick, 1985.

[11] Kokichi Sugihara. http://www.isc.meiji.ac.jp/~kokichis/Welcomee.html.



曲線折りのシミュレーション

筑波大学 三谷純

概要：

Ghassaei らによって開発された Origami Simulator というソフトウェアを用いることで、展開図を折る過程における、紙の形状の変化をシミュレートし可視化できる。Origami Simulator では、折り紙の形状は三角形の集まりで表現され、それぞれの三角形の辺には、長さを一定に保つようなダンパ付きのバネを配置した、バネのネットワークとしてモデル化されている。このようなモデル化のために、折り紙の性質として重要な可展性、等長性は厳密には保持されないが、それゆえに剛体折り可能ではない展開図に対しても、柔軟な変形シミュレートを行う事ができる利点がある。また、シミュレートによって生じた歪みの程度を可視化することも可能である。Origami Simulator に入力として与える折り線に対しては、山・谷の区別と最終的に目指す折りの角度を指定できるが、折り線は 2 点を結ぶ線分として指定する必要があり、曲線を扱うことはできない。曲線を短い線分の集合によって曲線を近似することで、曲線折りを近似したシミュレートを行うこともできるが、その際には可展面の ruling に相当する位置に補助線（多角形を三角形分割することで追加される辺）を適切に配置する必要がある。本研究では、曲線折りをシミュレートするための補助線の配置を適切に行う事を目指し、異なる 2 つのアプローチについて検討した。

2 つのアプローチのうちの 1 つは自動処理で対処しようというもので、他方はインタラクティブな操作で、使用者の意図した ruling の配置を得られるようにしようとしたものである。いずれも、展開図上の曲線を折れ線で近似し、そのことによって生じる多角形の領域を三角形分割する際に、ruling に相当する線分が三角形の辺になるようにする。こうして得られた展開図を Origami Simulator の入力とすることで、曲線での折りによる変形をシミュレートした（図 1,2）。その結果、実際に紙で作成した形をある程度再現できたが、どちらにも課題が残されていることを確認した。

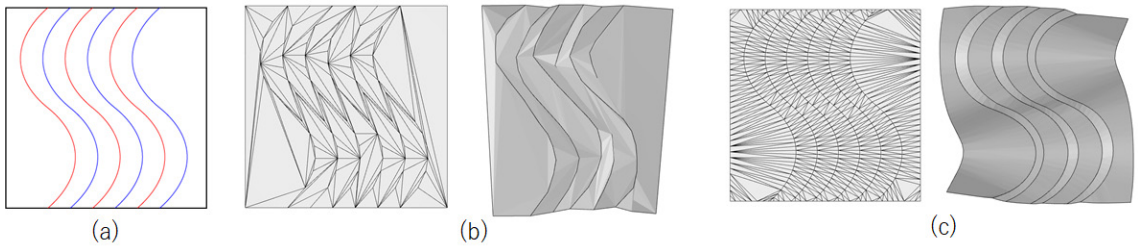


図 1 (a)展開図（b）Origami Simulator での三角形分割とシミュレーション結果。(c）提案手法による三角形分割とシミュレーション結果

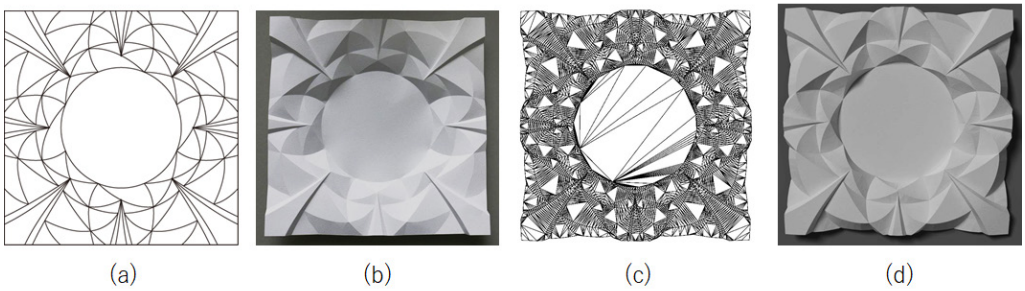


図 2 （a)展開図（b）実際に紙で折った様子（写真）（c）提案手法による三角形分割。（d)シミュレーションで得られた 3D モデル(CG)

剛体折り変形経路の分岐点近傍特性

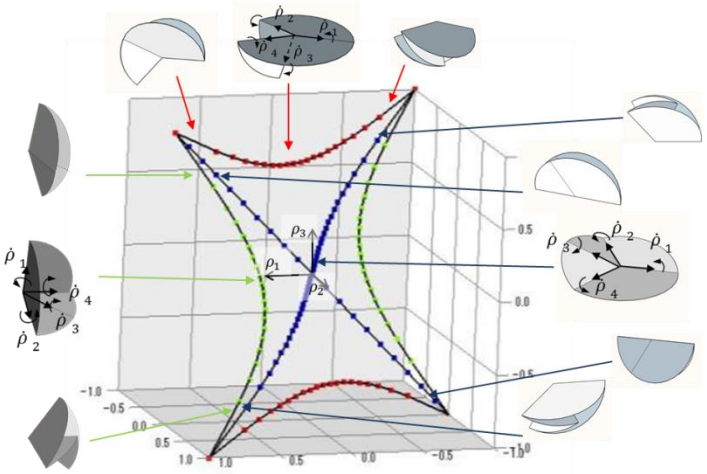
（岐阜高専　渡邉尚彦）

概要：

単頂点モデルにおける剛体折り可能な二面角速度モード抽出にあたって，平坦状態というのは拘束条件に関する 2 階微分項までの考慮が必要となるという意味で特異な状態である[1]．また，平坦状態というのは折線周りの折り角が取ることのできる経路空間において複数モードに分岐する点でもある[2]．それに対し非可展単頂点を含む剛体折紙は分岐点を経由しない特性を持つことから，折り角の取りうる範囲に制限がつくもののスムーズな変形を可能にする構造要素として適用が注目されている[3].

本研究は，折り経路中で平坦状態を通過しない単頂点周り平面角の和が 2π でなく正負のガウス曲率を持つような非可展ディスクを比較対象として，可展ディスクの剛体折り経路分岐点近傍の特徴づけを行う．ここで，1 階微分項までを考慮した頂点周りの剛体折り条件 $\sum_{i=1}^{n}\dot{\rho}_i\,\boldsymbol{l}_i=\boldsymbol{0}$ （$\dot{\rho}_i$；折り角速度，$\boldsymbol{l}_i$；折線ベクトル）の観点から非可展単頂点の特性を考える．正負いずれのガウス曲率を持つ場合も非可展ディスクは変形経路で 1 折線を残して残る折線が一平面上に乗るという状態が見られる場合がある．これを剛体可折条件と考え合わせると，その 1 折線の折り角速度$\dot{\rho}_i$は 0 でなければならないことになり，これはその折り角が極値を取ることを意味し，リンク機構の死点に相当する点の存在を示唆する．

図は，頂点周りの各平面角比を同じとする正/負/0 のガウス曲率を持つ 4 価単頂点モデルの折り角の経路図を例として示したものである．可展ディスクは分岐点を通るのに対し，非可展ディスクは常に連続的な折り角速度をとる代わりに死点を持ち，各平面角を持つディスクとして取りうる 2 状態間をジャンプできない特徴がみられる．そして正負のガウス曲率を持つ非可展ディスクの取る経路の漸近線として可展ディスクのとる分岐経路を捉えることができる．



[1]渡邉, “剛体折紙モデルの特異状態における可折条件”, 日本応用数理学会論文誌 Vol.28 (1), pp.54-71 (2018).

[2]T. Tachi, T. C. Hull, “Self-Foldability of Rigid Origami”, J. of Mechanisms and Robotics, Vol.9 (2), 021008 (2017).

[3]H. Buffart, et. al, “Folding Mechanisms with Discriminate Extremal Configurations for Structural Purposes”, Origami7, pp.685-697, tarquin, (2018).

折紙とタイヤの力学

Dynamics of Origami and Tires

石田祥子　明治大学理工学部機械工学科
Sachiko ISHIDA, Dept. of Mechanical Engineering, Meiji University

空気入りタイヤはその構造上，非常に軽くかつ大きな荷重を支持することのできる効率的で利便性に富んだ機械部品である．自動車に一般的に使用されるラジアルタイヤについて述べると，接地するトレッド部は金属ベルトと硬質なゴムの複合材からなり，車両重量を支持できるよう剛な構造となっている．筆者は，回転運動する機械要素に適用できるよう円筒状[1]や球状[2]等，特殊な形状のハニカムコアの設計を行ってきた．ハニカムコアは面外方向には高剛性であるが，面内方向の負荷に対しては変形しやすいため，対象とする構造にかかる荷重の向きを考慮した上で，コアの方向を決定する必要がある．本講演では，円筒状ハニカムコア(図 1)に内圧をかけた際，コアの方向と変形量および応力との関係について数値解析の結果を紹介し，タイヤトレッド部の補強材としての適用可能性について述べる．

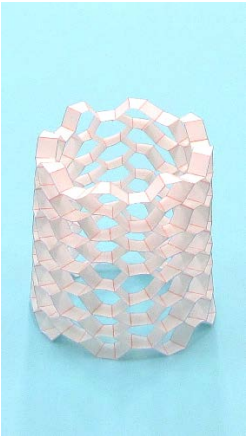


図 1 円筒ハニカムコア([1]より抜粋)

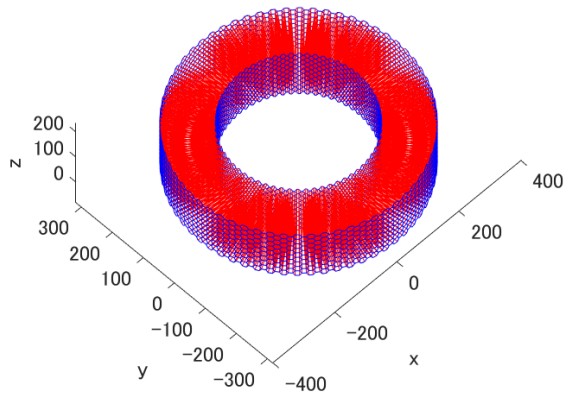


図 2 タイヤトレッド部を模擬した数値モデル

References

[1] Sachiko Ishida, Design of Cylindrical Honeycomb Cores – Geometric Consideration –, Mechanical Engineering Journal, Vol. 5, No. 4 (2018), No. 18-00147.

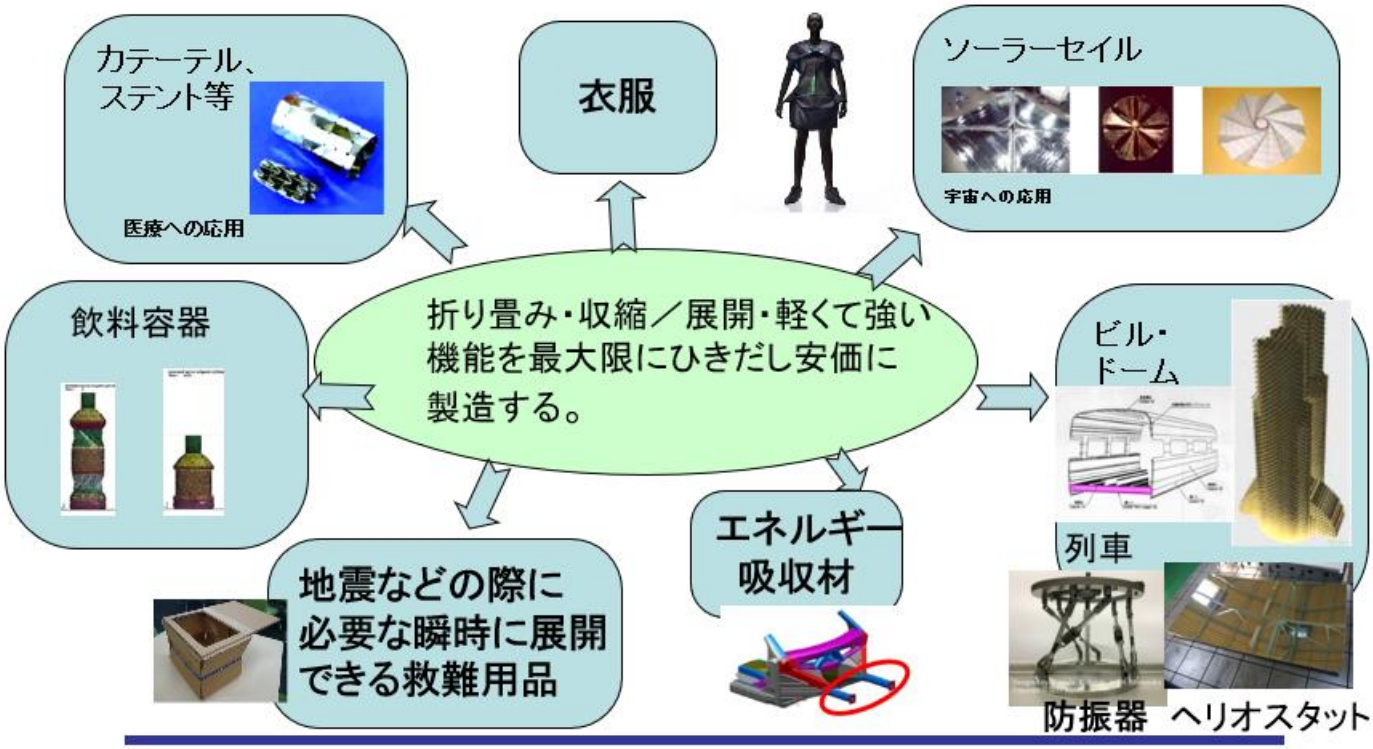
[2] 明治大学プレスリリース, 球状ハニカムコアを開発 第 8 回世界水フォーラムにて発表, https://www.meiji.ac.jp/koho/press/2018/6t5h7p00000rktjh.html, 2018 年 5 月 8 日公開.

萩原 一郎（I. Hagiwara，明治大）「折紙構造物の産業化と課題」

題名：折紙構造物の産業化と課題

Abstract

折紙構造には、軽くて強い、展開収縮能があるなど優れた特性を有すものの、実際の産業化には、折紙構造の大量生産方式の開発が困難などの理由で、生産コストの制限が比較的緩やかな宇宙産業以外の適用は困難である。折紙式プリンター、折紙工法などの開発により、これらの課題は克服されつつある。ここでは、MIMS から製品化されたもの製品化に近いものについて、その克服法と共に議論する。



現在実用化検討されている例