

MIMS現象数理学拠点共同研究集会

「折り紙の科学を基盤とするアート・数理および折紙工学への応用 V」プログラム (Program 2024/12/10 第7版) 2024年12月13日(金) - 14日(土) 明治大学中野キャンパス6階603

13日(金)

9:50 - 10:00 開会 (Opening)

① 10:00 - 11:00 特別招待講演 (Special invited talk): Professor Glaucio H. Paulino (Princeton University, zoom) 「Origami Metamaterials」

11:00 - 11:15 ~休憩~

② 11:15 - 11:45 舘 知宏 (Tomohiro Tachi, 東京大学)

「座屈不安定性スタディのためのスタディ」

③ 11:45 - 12:15 堀山 貴史 (Takashi Horiyama, 北海道大学)

「閉路を利用した格子直方体の共通展開図の列挙」

④ 12:15 - 12:30 山崎 桂子 (Keiko Yamazaki, 明治大学)

「蛇腹折形状の音響に関する特性の検討」

12:30 - 14:00 ~昼休み~

⑤ 14:00 - 14:30 上原 隆平 (Ryuhei Uehara, JAIST)

「ダブル・キュービック・コアの拡張」

⑥ 14:30 - 15:00 松原 和樹 (Kazuki Matsubara, 埼玉大学)

「剛辺数に着目した四角錐の連続的平坦化問題」

⑦ 15:00 - 15:30 ルイス ディアゴ (Luis D. Diago, 明治大学)

「Development of Origami-based Dynamic Scaffolds for 3D cell-culture」

15:30 - 15:45 ~休憩~

⑧ 15:45 - 16:15 寺田 耕輔 (Kosuke Terada, 明星大学)

「紙・樹脂・金属製 ATCP 構造(Assembly Truss Core Packed Structure)の力学的特性の紹介」

⑨ 16:15 - 16:45 萩原 一郎 (Ichiro Hagiwara, 明治大学)

「数理科学と社会科学による防災・復興の実現/折紙工学からの貢献」

14日(土)

⑩ 10:00 - 10:30 杉原 厚吉 (Kokichi Sugihara, 明治大学)

「鏡に映すとあり得ない方向を向く錯視立体の折り紙設計法」

⑪ 10:30 - 11:00 三谷 純 (Jun Mitani, 筑波大学)

「円形膜の折りたたみ法に関する先行研究のレビュー」

⑫ 11:00 - 11:30 賈 伊陽 (Yiyang Jia, 日本女子大学)

「平坦折りに存在する順序」

⑬ 11:30 - 12:00 村井 紘子 (Hiroko Murai, 奈良女子大学)

「折り紙の folding motion に対応する local stacking order の変化の様子を表す幾何的 object の提案」

⑭ 12:00 - 12:15 佐々木 淑恵 (Toshie Sasaki, 明治大学)

「折紙ハットの数理とヘルメット制作へのシミュレーション」

⑮ 12:15 – 12:30 阿部 綾 (Aya Abe, 明治大学)

「新しい解析技術を用いた折紙構造の遮音特性の評価(音響流線に着目して)」

12:30 – 14:00 ~昼休み~

⑯ 14:00 – 14:30 金森 慧 (Kei Kanamori, CG アーティスト)

「日本初 学生アカデミー賞受賞作品 ” Origami” のCGアニメーション制作」

⑰ 14:30 – 15:00 斉藤 一哉 (Kazuya Saito, 九州大学)

「生物模倣展開構造の開発」

⑱ 15:00 – 15:30 伊藤 大雄 (Hiro Ito, 電気通信大学)

「平行山谷付き平坦折り問題 – その5 –」

15:30 – 15:45 ~休憩~

⑲ 15:45 – 16:15 宮本 好信 (Yoshinobu Miyamoto, 愛知工業大学)

「RESユニット充填相持構造」

⑳ 16:15 – 16:45 下田悠太 (Yuta Shimoda, 佐藤淳構造設計事務所)

「折り紙の発想で作る軽量膜構造 -建築、ファッション、高分子材料とのつながり」

㉑ 16:45 – 17:15 奈良 知恵 (Chie Nara, 明治大学)

「連結正十二面体 (正二十面体) の連続的平坦折りたたみ」

17:15 – 17:25 閉会 (Closing)

組織委員 : 奈良知恵 (Chie Nara, Chair), 萩原一郎 (Ichiro Hagiwara), 上原隆平 (Ryuhei Uehara),  
三谷純 (Jun Mitani), 館知宏 (Tomohiro Tachi), 西森拓 (Hiraku Nishimori)

**Presentation Title:** Origami Metamaterials

**Speaker:** Prof. Glaucio H. Paulino, Margareta E. Augustine Professor of Engineering, Princeton Univ.

**Abstract:** We study the geometric mechanics of origami assemblages, including tubes and tessellations, and investigate how geometry affects behavior and properties. Understanding origami from a structural standpoint allows for conceptualizing and designing feasible applications across scales and disciplines. We present a reduced-order-model, which consists of an improved bar-and-hinge model, to understand the nonlinear mechanics of non-rigid origami. We couple compatible origami tubes into a variety of cellular assemblages that enhances mechanical characteristics and geometric versatility, leading to the design of structures and configurational metamaterials that can be deployed, stiffened, and tuned. One of these assemblies includes a modular multi-degree-of-freedom soft origami robot with reprogrammable electrothermal actuation based on the Kresling pattern. Another assembly consists of an origami-architected metamaterial at the micron-scale, which was designed, fabricated (using DLW, direct laser writing), and tested (in-situ SEM). This resulted not only in the smallest scale origami assembly, but also in a metamaterial with intriguing mechanical properties, such as anisotropy, reversible auxeticity, and large degree of shape recoverability. Finally, we present the “folded kirigami” approach, in which kirigami assemblies are complemented by means of folding, typical of origami patterns, and demonstrate its physical properties. We provide a plethora of emerging metamaterial functionalities, including topological phase-switching reconfigurability between polarized and nonpolarized states in kagome kirigami, and availability of nonreciprocal mechanical response in square-rhombus kirigami.

**Brief Bio:** Professor Paulino is the Margareta E. Augustine Professor of Engineering at Princeton University. His seminal contributions in the area of computational mechanics include the development of methodologies to characterize the deformation and fracture behavior of existing and emerging materials; topology optimization for large-scale multiscale/multiphysics problems; variational methods; deployable and adaptable structures; and origami engineering. He is a fellow of ASME, EMI, AAM, USACM and IACM, and SES. Recently, he received the Daniel C. Drucker Medal of ASME (2020), the Raymond D. Mindlin Medal of ASCE (2020), the Reddy Medal from Mechanics of Advanced Materials and Structures (MAMS 2020), and the Eringen Medal from SES (2023). *He also received the 2015 Cozzarelli Prize from the National Academy of Sciences, “which recognizes recently published PNAS papers of outstanding scientific excellence and originality.”* He is a member of the US National Academy of Engineering (NAE), and a former President of SES. More information about his research and professional activities can be found at the following link:

<http://paulino.princeton.edu/>

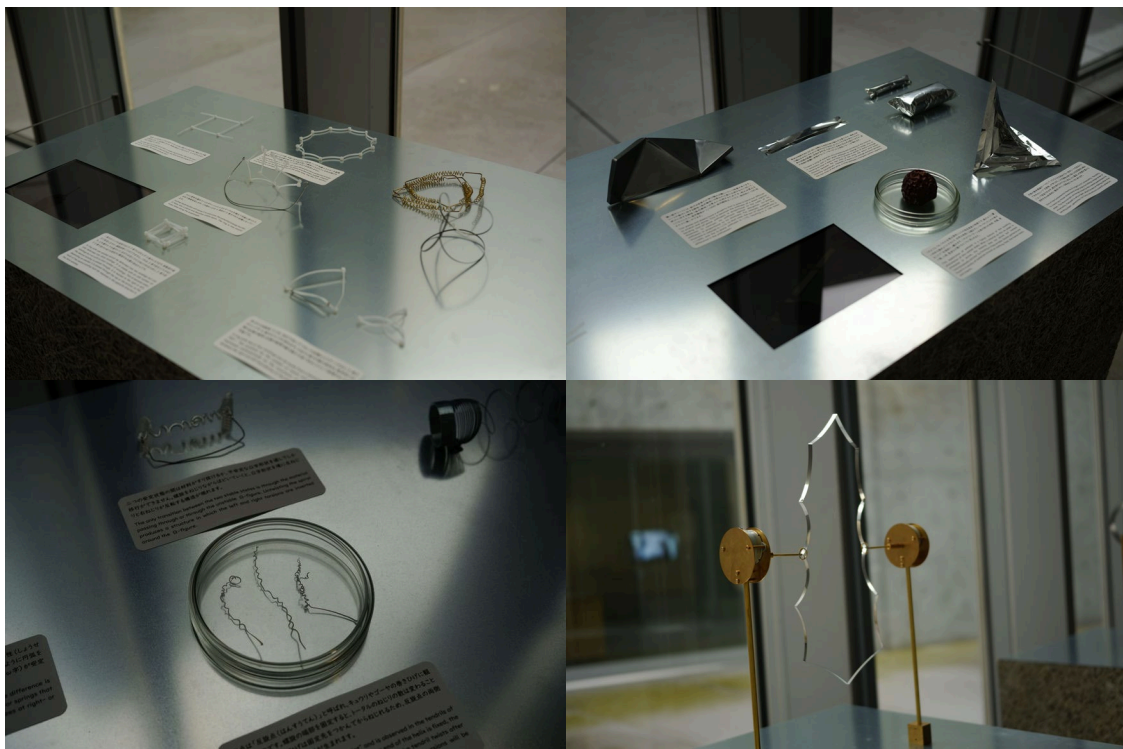
## 座屈不安定性スタディのためのスタディ

館 知宏（東京大学 大学院総合文化研究科）

荒牧 悠（アーティスト／多摩美術大学）

薄い材料や細長い構造物に力を加えると、つり合い状態が急に崩れて複雑なパターンが現れる「座屈現象」が起こります。この現象を身近な材料を使って観察し、「座屈不安定性スタディ」という作品群を制作しました。結束バンド、電話コード、フィルムなどの観察から生まれたこれらの作品は、荒牧と館によるアートとサイエンスのコラボレーションとして、21\_21 DESIGN SIGHT 企画展「未来のかけら」や愛媛県総合科学博物館「未来をつくる」で展示されました。

本講演では、これらの作品に現れる模様や、その背後にある座屈現象について詳しくお話しします。また、座屈現象が私たちの身近な人工物や自然の中でどのように関連しているかについても探ります。



上図：座屈不安定性スタディのスタディ

左下図：まきひげに見られる反旋点 右下図：座屈不安定性スタディ「まき↔まきまきまき」



# Studies for Buckling Instability Studies

Tomohiro Tachi (The University of Tokyo)

Haruka Aramaki (Artist/ Tama Art University)

When force is applied to thin materials or slender structures, a phenomenon called “buckling” occurs, in which the state of equilibrium suddenly disrupts, and a complex pattern appears. Observing this phenomenon using familiar materials, we created a series of artwork called “Buckling Instability Studies”. These works, which were born from the observation of cable ties, telephone cords, and film, were exhibited as a collaboration of art and science by Aramaki and Tachi at the 21\_21 DESIGN SIGHT exhibition “Future Elements” and at the Ehime Museum of Science's “Creating the Future” exhibition.

In this lecture, I will discuss in detail the patterns that appear in these works and the buckling phenomenon behind them. It will also explore how the buckling phenomenon relates to our familiar artifacts and nature.



Upper Figure: Studies for Buckling Instability Studies

Left Bottom Figure: Tendril perversion    Right Bottom Figure: Buckling Instability Studies, “wind ⇌ windwindwind”

# 閉路を利用した格子直方体の共通展開図の列挙<sup>i</sup>

堀山 貴史 (北海道大学 情報科学研究院)

本講演では、格子直方体の共通展開図を列挙するために、格子直方体上の閉路を利用する手法について述べる。ここで、格子直方体は、単位正方形を辺々接着して得られる直方体である。格子直方体は、図1のように各辺の長さが整数の  $(x, y, z)$ -格子直方体を含み、図2の  $(\sqrt{5}, \sqrt{5}, \sqrt{5})$ -直方体など、整数格子点を結ぶ線分の長さ  $L=(a^2 + b^2)^{1/2}$  ( $a$  は正整数,  $b$  は非負整数,  $a \geq b$ ) をもとした  $(xL, yL, zL)$ -格子直方体として定義される。

提案手法は、以下の3つのアイデアに基づいている。(1) 格子直方体のどの辺を切るかではなく、どの辺を切らないかに着目する。これは、格子直方体の面 (単位正方形) について、どの面とどの面を接続するかを表している。1つの格子直方体の展開図を表面積の等しい他の格子直方体に貼りつける際に、面の接続関係に矛盾が生じないように貼り合わせることができれば、その展開図は共通展開図である。また、部分展開図を貼りつけることで、その構造が共通展開図の一部となりえるかを調べることができる。(2) 貼り付けた際に重なりを持つ構造が得られれば、それを含む展開図はすべて共通展開図の候補から除外できる。(3) 格子直方体の上で重なりが生じる構造は、格子直方体上の閉路と対応している。

本講演では、また、提案手法を面積 30, 34, 38 の格子直方体に適用した計算機実験の結果を示す。Intel Xeon Gold 6134, 3.2 GHz, 1.5 TB メモリの計算機で計算機実験を行い、面積 30, 34, 38 の格子直方体それぞれで、1,080 個、35,703 個、4,513 個の共通展開図を得ている。計算時間は、それぞれ 4,960 秒、47,297 秒、426,599 秒である。図3および図4に、面積 34、38 の共通展開図の一部をそれぞれ示す。

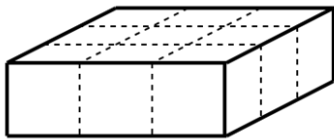


図1.  $(1, 3, 3)$ -格子直方体

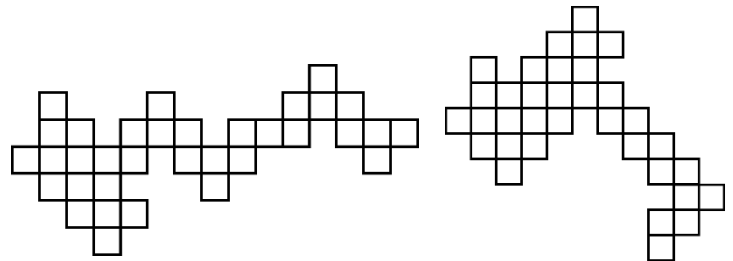


図3. 面積 34 の共通展開図

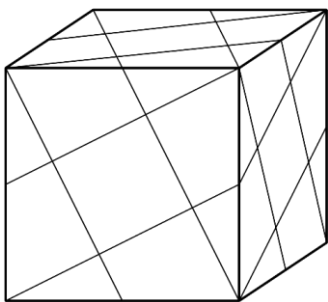


図2.  $(\sqrt{5}, \sqrt{5}, \sqrt{5})$ -直方体

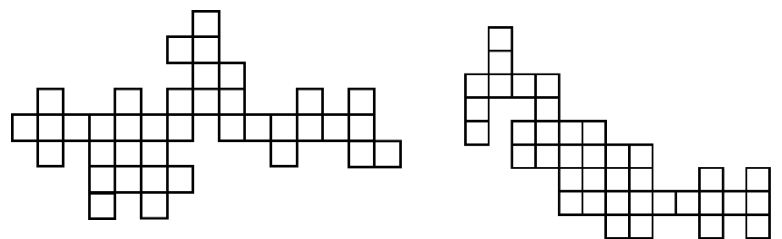


図4. 面積 38 の共通展開図

<sup>i</sup> 以下の方々との共同研究です： 五郎部誠士 (北海道大学), 脊戸和寿 (北海道大学)

# 蛇腹折形状の音響に関する特性の検討

山崎桂子<sup>\*1</sup>, 阿部綾<sup>\*1</sup>, 米大海<sup>\*2</sup>, 橋口真宜<sup>\*2</sup>, 萩原一郎<sup>\*1</sup>

<sup>\*1</sup> 明治大学, <sup>\*2</sup> 計測エンジニアリングシステム株式会社

筆者らは軽量かつ折畳み収納可能な比較的安価な簡易防音室の開発に取り組んできたが、その中で、防音室の壁の一部に蛇腹折の形状を適用した場合に防音室内の共振の音圧が低下することを FEM シミュレーションで確認した。図 1 に示すとおり、4 つの壁面に吸音材を用いた壁を用いたシェード（以下、「4 面吸音材モデル」と、その 2 面を紙製の蛇腹を貼り合わせた構造に置き換えたシェード（以下、「2 面蛇腹モデル」）において 100Hz、350Hz 及び 450Hz で、2 面蛇腹モデルのシェード外側（吸音材側）で音圧が低下する（図 2）。紙製の蛇腹 2 面への置換えで約 8kg の軽量化にも関わらず、50~1000Hz の音圧の積分値はほぼ同じである。これは、角度のついた壁面による音波の複雑な反射、蛇腹を貼り合わせた内側で上下水平方向の干渉及び位相の変化が起きる可能性及びフレキシブルな蛇腹壁の変位によるシェード内部音圧低減効果によると考える。

この蛇腹近傍で起こる現象を明らかにするため、蛇腹を切り出したモデルとその蛇腹の形状を一部変形したモデルに対し、周波数領域及び時間領域で圧力音響解析と変形応力解析を実施した。周波数領域では熱粘性音響の解析を施すことで微細部分の音の大きさとその向きを表示し、モデルの変形と併せて表示することで、モデルの変形による音圧への影響について可視化した（図 3, 4）。より詳細な検討については研究集会にて報告する。

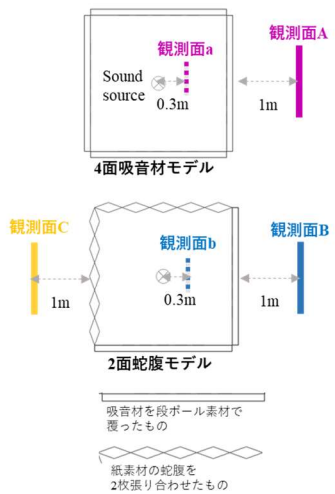


図1 モデル断面図

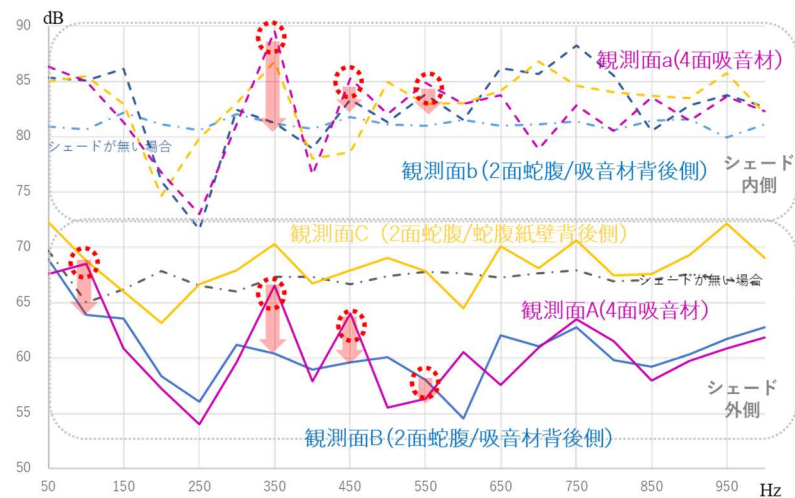


図2 周波数領域での音圧レベル

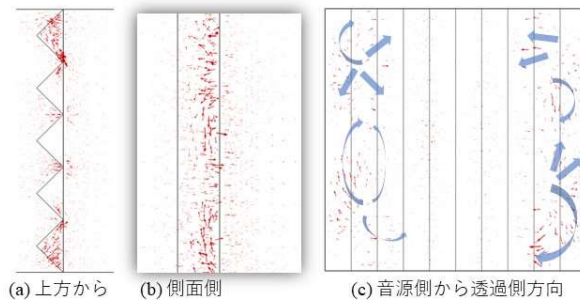
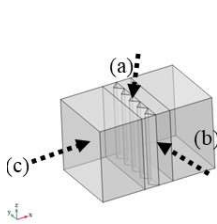


図3 半面蛇腹形状の1000Hzの音響インテンシティ [W/m<sup>2</sup>]

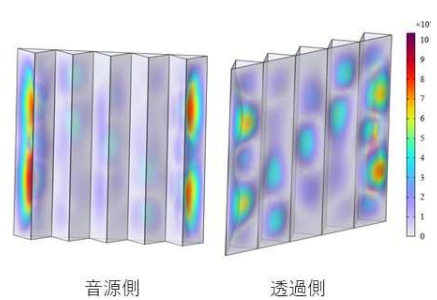
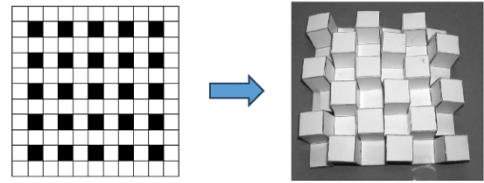


図4 半面蛇腹形状の1000Hzの変位

## ダブル・キュービック・コアの拡張

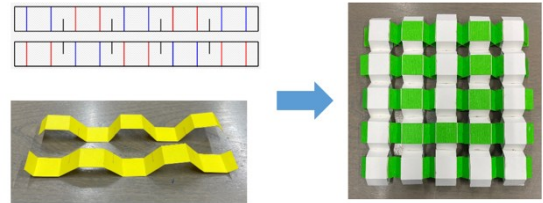
谷口智子(JAIST)・上原隆平(JAIST)

キュービック・コアは、2006年頃に野島と齋藤によって考案された構造であり、1枚の正方形に等間隔に穴を開けて折るだけで作成できる[1]。従来のハニカム・コアとはいくつかの点で異なる性質があり、近年、いくつかの研究が行われている。

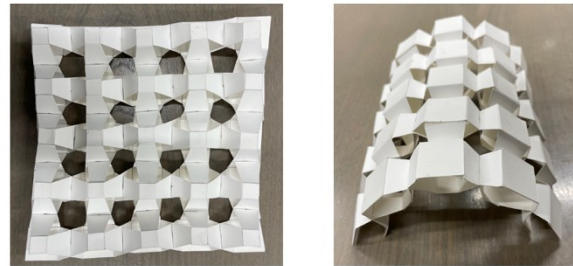


完成した形状は市松模様状に凹凸があり、これは特徴の一つではあるが、応用によっては欠点となりうる。そこでキュービック・コアを2つずらして重ねることで凹凸をなくすことを考え、得られる構造をダブル・キュービック・コアと名付けた。

ダブル・キュービック・コアの実現方法は複数考えられるが、紙の帯にスリットを入れて編むように組む方法がリーズナブルである。特にスリット部分がパンタグラフあるいはシザー構造として機能し、自由度1で変形する。この機構により、完全に平坦な状態から、厚みのある2重構造まで滑らかに変形する。またこの構成方法であれば、両面に任意のパターンを作れることから、デザイン面でも優位性がある。



2024年7月に開催された8OSME(The 8th International Conference on Origami in Science, Mathematics and Education)で本結果を発表したところ、Oxford大学のJingyi Yang氏から、正方形の大きさを変えれば曲面が作れるかどうかという質問を受けた。



それをきっかけに拡張の可能性を考察した。結論として、上下の対応する正方形の大きさを変更すれば、フラットな状態から、ある程度曲がる構造が構築できることがわかった。しかし、単に正方形を小さくしただけだと、紙の弾力に頼っていて、理論上、存在しない曲面になる。(これは4角錐を敷き詰めて曲面を作れないという事実から説明できる。)一方で、上下の正方形の一方を長方形にすれば、紙の弾力に頼らなくても、円筒状に曲がる構造は作ることができる。

さらなる拡張として、ある種のタイリングを2重にしてパンタグラフ構造で接続すれば、同様のダブル・コア構造を構築できることがわかった。例えば三角格子や六角格子は容易にダブル・コア構造が実現可能である。一般には、タイリングの各多角形を互いに離して、多角形の対応する辺同士の距離がすべて同じにできるという性質があれば、同様のコア構造を作ることができる。どのようなタイリングであればこうした性質をもつかは、今後の研究課題である。



[1] T. Nojima, K. Saito. Development of Newly Designed Ultra-Light Core Structures, *JSME International Journal*, Ser. A, Vol. 49, No.1, pp. 38–42, 2006.



## 剛辺数に着目した四角錐の連続的平坦化問題

松原 和樹 (埼玉大学教育学部)

奈良 知恵 (明治大学先端数理科学インスティテュート)

折り目によって折ることができる紙のような素材でできた多面体を平坦に折り畳む問題 (詳細は [3] を参照) を考える。ただし, ここでは紙の厚さは考えず, 切込みや伸縮は許されないものとする。「多面体が各面の形状を変えずに連続的に変形したとしても, その体積は不変である」というフィゴ定理 [2] より, 多面体の連続的平坦化においてすべての面の剛性を保つことは不可能であることが示される。つまり, 平坦化状態への連続的な変形においては, いずれかの面を連続的に動く折り目 (移動折り目) によって変形させる必要がある。一方, 辺の剛性に着目すると, いずれの辺も折ることなく連続的平坦化が可能な非凸多面体が存在する。例えば, 非凸四角錐の連続的平坦化が考えられる。

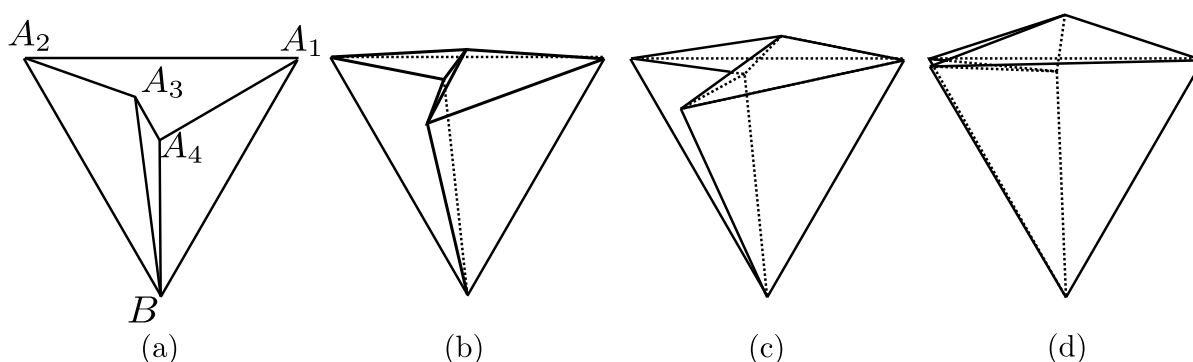


図. すべての辺の剛性を保つ非凸四角錐の連続的平坦化

非凸四角錐については, すべての辺の剛性を保つ連続的平坦化が可能であるための必要条件として, 頂点  $B$  付近での平坦化可能条件, つまり,

$$\angle A_1BA_2 - \angle A_2BA_3 + \angle A_3BA_4 - \angle A_4BA_1 = 0 \quad (1)$$

が挙げられる。本講演では, 条件 (1) を満たす任意の非凸四角錐  $A_1A_2A_3A_4-B$  に対する, すべての辺の剛性を保つ連続的平坦化手法を述べる。また, できるだけ多くの辺の剛性を保つ連続的平坦化手法について, 条件 (1) を満たさない非凸四角錐および凸四角錐に対して得られた結果を紹介する。

### 参考文献

- [1] Connelly, R.: Rigidity. In: Gruber, P.M., Wills, J.M. (eds.) Handbook of Convex Geometry, North-Holland, Amsterdam, 223-271, 1993.
- [2] Connelly, R., Sabitov, I., Walz, A.: The bellows conjecture. Beiträge Algebra Geom. **38**, 1-10, 1997.
- [3] Demaine, E.D., O'Rourke, J.: Geometric Folding Algorithms: Linkages, Origami, Polyhedra. Cambridge University Press, 2007.
- [4] Matsubara, K., Nara, C.: Continuous flattening of non-convex quadrangular pyramids with every edge rigid, submitted.

**3D 細胞培養のための折り紙ベースの動的足場の開発**  
**Development of Origami-based Dynamic Scaffolds for Three-dimensional (3D) Cell Culture**  
**(Preliminary results in the development of a new microfluidic device)**

Luis DIAGO <sup>\*1,2</sup>, Junichi SHINODA <sup>\*2</sup>,  
 Aya ABE <sup>\*1</sup>, Yuko ADACHI <sup>\*1</sup> and Ichiro HAGIWARA <sup>\*1</sup>  
<sup>\*1</sup> 明治大学 Meiji University  
<sup>\*2</sup> 株式会社インターロカス Interlocus Inc.

**Introduction**

Dynamic scaffolds based on origami cellular structures (OCS) are an emerging area of research that combines principles of tissue engineering and advanced materials design [1]. These structures use origami concepts to create scaffolds that can change their properties and configurations in response to external stimuli, such as mechanical loads. A notable example is the use of the Tachi-Miura polyhedron (TMP), which enables transitions between collapsible and load-bearing states, offering potential applications as meta-materials and reconfigurable structures in medical devices [2]. Currently, there are no available researches that combine TMP with scaffolds for 3D cell cultures. Although OCS-TMP have been the most studied, this project explores other OCS based on Reverse Spiral (RS), Nojima (N), and Water-Bomb (WB)[3] polyhedrons in Fig 1 for 3D cell culture. Previously developed method for manufacturing kirigami honeycomb-type structures [4] will be used to manufacture OCS with 3D bio-printers. Here we describe the MIMS Collaboration Project 2024 entitled “Development of Origami-based Dynamic Scaffolds for Three-dimensional (3D) Cell Culture” focusing on the development of a new microfluidic device to study how OCS-dynamics affects medium perfusion and diffusion.

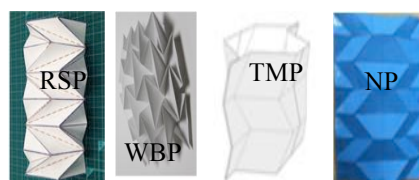


Fig.1 Origami polyhedrons used for dynamic scaffolds design

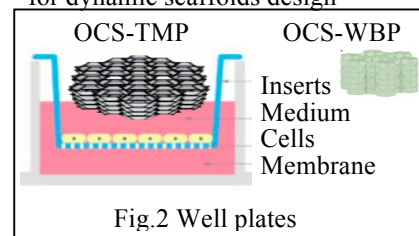


Fig.2 Well plates

**Materials and methods**

We designed a chip that can be inserted into current cell culture platforms and allows testing origami-based dynamic scaffolds. Starting from the idea of transforming a well into a microchip [APL Bioeng. 5, 026103 (2021); doi: 10.1063/5.0039366] and using ChatGPT iOS app we generated and modified the original chip. The main difference with the original design is that the entrance and exit are at different heights to allow scaffolds dynamic. We simulated water ingress and diffusion under two conditions (with the chamber open under ambient pressure conditions and with the chamber closed) using Solidwork’s Flow Simulation Add-in. The model with the chamber open was 3D-printed and water diffusion experiments were also performed.

**Preliminary Results and Future Works**

Figure 3 shows a) the CAD design of the chip, b) the results of the water simulations in Solidworks (open chamber on the left and closed chamber on the right) and c) a photo of the printed model with the OCS proposed in [2] and [3]. We are currently adapting the method of [4] to include the OCS in the small chamber of the microchip.

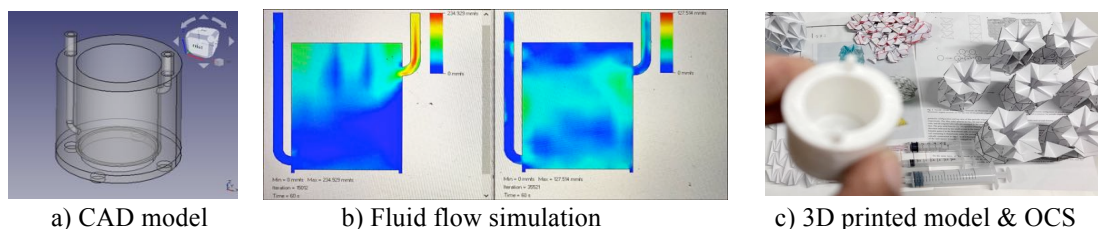


Fig. 3 Insert-Chip Design

**References**

[1] X, Huang Z, Gao W, Gao W, He R, Li Y, Crawford R, Zhou Y, Xiao L, Xiao Y. Current Advances in 3D Dynamic Cell Culture Systems. Gels. 2022 Dec 16;8(12):829. doi:10.3390/gels8120829  
 [2] T.Tachi and K. Miura, Rigid-Foldable Cylinders and Cells, Journal of the International Association for Shell and Spatial Structures 53(174):217-226, 2012  
 [3] Y. Bai Z Wang and Y. Shi, Design and mechanical properties of a cellular Waterbomb origami, Theoretical and Applied Mechanical Letters, 2024.  
 [4] Diago, et al. Study on Kirigami honeycomb generation for complicated structures, Nihon Kikai Gakkai ronbunshu, Vol. 89, no. 917, pp. 22-00273 doi: 10.1299/transjsme.22-00273

# 紙・樹脂・金属製 ATCP構造(Assembly Truss Core Packed Structure) の力学的特性の紹介

明星大学 理工学部 機械工学系 寺田耕輔

概要 近年、ネット通販の活況により物流が増加し、輸送工程において商品を保護するために衝撃エネルギー吸収性能に優れた緩衝材のニーズが高まっている。また、交通事故および地震などによる被害から、人命を守るためにおいても緩衝材は重要である。そのなかで筆者は、イノベーション・ジャパン2017において、ATCP構造を用いた緩衝材を考案し出展している。本研究でも、ATCP構造の力学的特性について紹介しているが、これまでは主に静的荷重試験による三点曲げ実験結果を対象としていた。しかし、ATCP構造の最大の利点は、静的荷重ではなく衝撃圧潰において発揮される。ATCP構造ではコア（正四面体形状と正八面体ハーフ形状）を組立て構造内をコア充填することによって、衝撃エネルギー吸収性能を向上させる。コア充填の様式によって、緩衝材はマット状や筒状になるが、その様式によらず衝撃圧潰過程においてコアはほぼ一定の割合で塑性変形が進行するため、FEM解析結果（図1, 2）が示すように荷重-変位推移グラフは横這いになり、商品や人身への衝撃負担を軽減しやすい。図3に市販ペーパーハニカムと紙・樹脂製ATCP試作品についての衝撃圧潰実験による荷重-変位推移グラフを示すが、ATCP試作品は市販ハニカムに比べて荷重-変位推移グラフのアップダウンが非常に小さく横這いに近いことがわかる。これに対して、衝撃圧潰過程において緩衝材の荷重-変位推移グラフが、図3の赤線のようにアップダウンの激しい場合、商品や人身に大きな衝撃負担を及ぼす危険性がある。

ここでは、衝撃荷重試験による実験およびFEM解析などを行った結果から得られた知見について報告する。

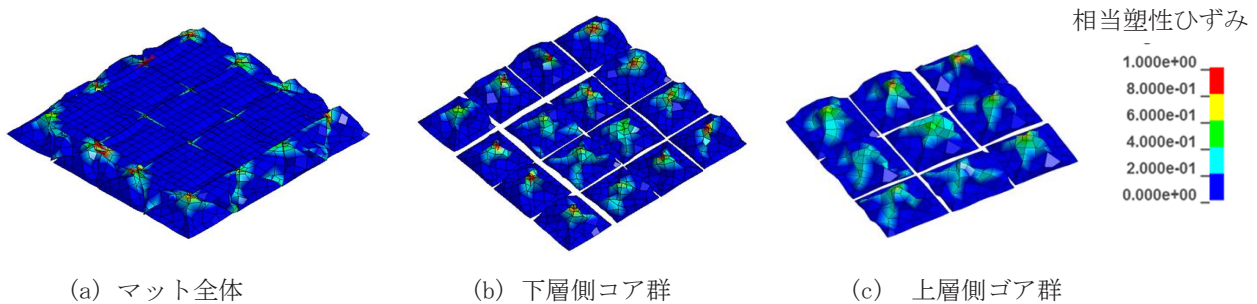


図1 FEM解析によるATCP構造の衝撃圧潰過程における変形形状と相当塑性ひずみ分布図

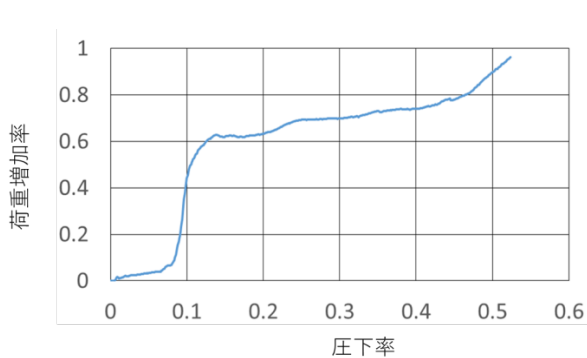


図2 FEM解析によるATCP構造の衝撃圧潰過程における荷重-変位推移グラフ

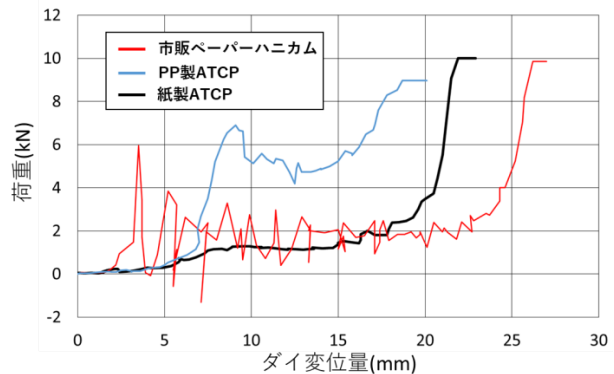


図3 衝撃圧潰実験による市販ペーパーハニカムと紙・樹脂製ATCP試作品の荷重-変位推移グラフ

## 参考文献

- 1) 特許番号：第7161180号，発明の名称：コアパネルおよび緩衝材，発明者：萩原一郎，寺田耕輔。



# 数理学と社会科学による防災・復興の実現／折紙工学からの貢献

萩原一郎（明治大学）

- ① 日本応用数学会誌の本年第3号（9月発行）で「数理学と社会科学による防災・復興の実現」という特集が組まれた。
- ② 本特集の契機となったのは、第25期日本学術会議（2020年10月～2023年9月）「未来の学術振興構想」の公募に、日本応用数学会から応募した「数理学と社会科学に基づいた分野横断的な先進的自然災害予測・評価による防災・復興の実現と国際社会への発信」が採択されたことである。
- ③ 日本応用数学会では、数理学と諸問題への貢献をはかるため、当学会の有する23の研究部会のうち、数理政治学、数理ファイナンス、機械学習、折紙工学、位相的データ解析の各研究部会と一般財団法人電力中央研究所、国立研究開発法人防災科学技術研究所が協力して、世界的課題である自然災害とその評価、防災・減災、災害からの復興についての議論を重ねてきた。
- ④ 数理政治学研究部会、数理政治学の観点から見た防災・復興の実現  
数理ファイナンス研究部会、自然災害リスクの移転  
機械学習研究部会、数理学と機械学習による津波高即時予測と津波減災への展開  
位相的データ解析研究部会、位相的データ解析の紹介とその防災・災害復興への貢献可能性  
電力中央研究所、原子力発電所の信頼性評価のための地震・構造解析の高度化  
防災科学技術研究所、防災科学研究所の地震応答解析に関連する取組
- ⑤ 折紙工学研究部会からは、「数理学と社会科学による防災・復興の実現—折紙工学からの貢献—」と題して寄稿した。
- ⑥ 減災に有用な折紙構造として、柱構造とパネル構造に分け、次について記した。

## 1) 柱構造関連

- ① 災害低減のために要求される柱構造のエネルギー吸収特性
- ② 自動車の前面衝突時のエネルギー吸収現象とその制御
- ③ 反転螺旋折紙構造(RSO)と反転振り折紙構造(RTO)

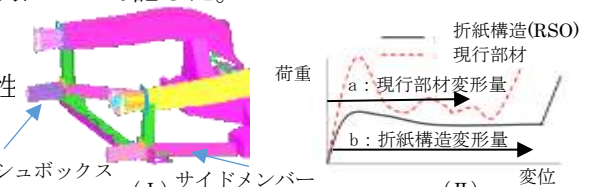


図1 現行部材の初期ピーク荷重が高く変形量も短い課題を折紙構造が解決する様子

- ④ RSOとRTOの製造法
- ⑤ 折紙型油圧ダンパー

## 2) パネル構造関連

- ① ハニカムコアの特徴と課題
- ② ハニカムコアからオクテット型トラスコアへ
- ③ ハニカムコアからキュービックコア(CBコア)へ
- ④ ハニカムコアから切り紙ハニカムコアへ

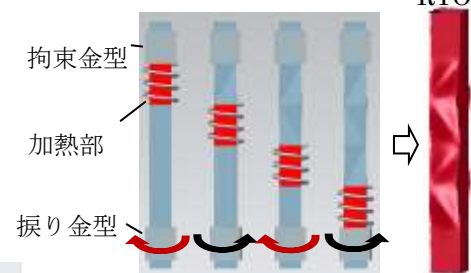


図2 部分加熱振り加工法とそれによるRTO

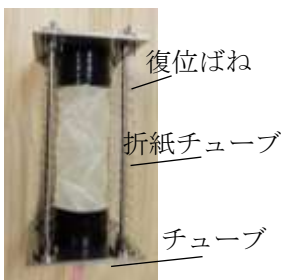


図3 基本式の折紙型油圧ダンパー

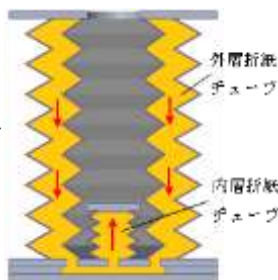


図4 内外二重式折紙型油圧ダンパー

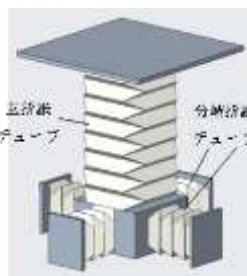


図5 多岐式折紙型油圧ダンパー



図6 切紙ハニカムによる二重曲率パピリオン

# 鏡に映すとあり得ない方向を向く錯視立体の折り紙設計法

杉原厚吉（明治大学先端数理科学インスティテュート）

立体を鏡に映した像の形は、鏡面反射という光学的法則に従って一意に定まる。しかし、錯視によってこの法則に反した映り方をしているように知覚される場合がある。その中には、立体の形が激変するものと、立体の姿勢が不合理な変り方をするものがある。そのうちの後者に属す 2 種類の錯視立体に注目する。

その第 1 は、鏡に映すと右を向いていたものが左を向く左右反転錯視立体である。これは、垂直な線に関して線対称性を持つ[1]。その第 2 は、鏡に正面を向いたものが鏡に映っても振り向かない平行移動錯視立体である。これは、鏡に平行な面に関して面对称性を持つ[2]。これらの対称性が錯視の要因となるから、「対称性を持つように立体を作ればよい」というわかりやすい設計指針が得られる。この指針を手掛かりとすれば、プログラミングや数値計算を行わないで、素朴な直観に基づいた試行錯誤で錯視立体が作れる。その結果、紙製の錯視立体を、紙と鉛筆で設計してはさみとのりを使って制作することもできるし、さらに折り紙に限定しても設計・制作することができる。

筆者が設計・制作した錯視折り紙の例を図 1～図 3 に示す。図 1 は、直接見ると右を向いたアヒルの子であるが、後ろに立てた鏡に映すと左を向く。図 2 は、鏡に向かって飛ぶフェニックスであるが、鏡に映っても振り向かないで同じ方向へ飛ぶ。図 3 は、鏡に向かうカタツムリであるが、これも鏡に映しても振り向かないで同じ向きを向いたままである。これらは、折り鶴などの標準的な折り紙で対称性を確保しやすいものを選んで、それを少し変形するだけで作ることができた。

線対称性や面对称性は立体固有の性質であって、それを見る視点位置には依存しない。したがって、これらの錯視はどこから見ても成立するという安定性も持つ。設計が容易でかつ錯視が安定に起こるから、コンピュータが使える環境がなくても、オリジナルの立体を作って錯視を体験することができる。この意味で、幾何学的対称性と立体錯視を学ぶ教材としても適している。

本研究は、科研費（課題番号 23K21712 および 24K22325）の援助を受けている。

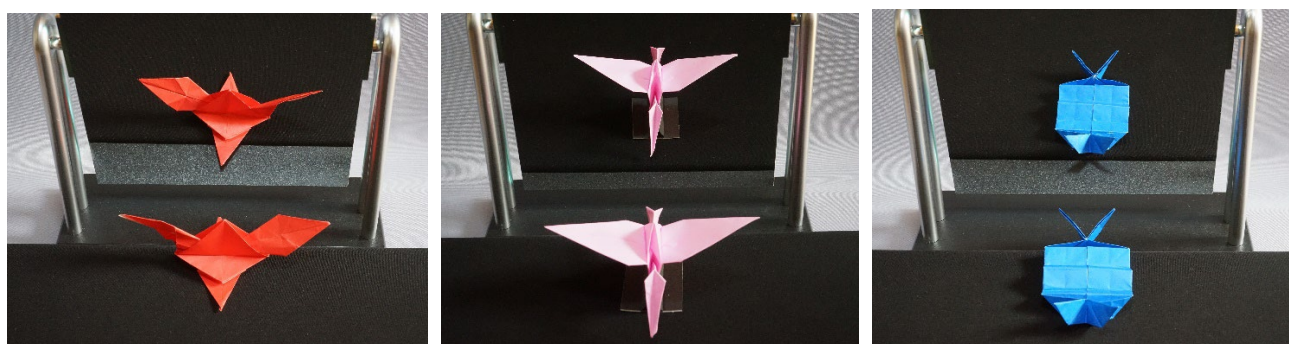


図 1. 逆を向くアヒルの子      図 2. 振り向かないフェニックス      図 3. 振り向かないカタツムリ

参考文献 [1] K. Sugihara, Anomalous mirror symmetry generated by optical illusion. *Symmetry*, **8**, article 21 (2016). [2] K. Sugihara, Translation illusion of 3D objects in a mirror. *The Journal of the Society for Art and Science*, **22**, 4:1-4:12 (2023).

# 円形膜の折りたたみ法に関する先行研究のレビュー

三谷純

筑波大学 システム情報系

膜状の素材を折りたたむための方法にはミウラ折りをはじめとする様々な折り方が考案されてきたが、とくに円形膜の折りたたみについては中心に配置したハブに巻き取る方法が過去に複数提案されている[1]。また、日本国内においては2000年代初頭に野島武敏によって、同心円または螺旋状に配置された折り線による折りたたみのための展開図生成方法が複数発表されている[2-4]。その後、石田らによって、等角写像を応用することで、折りたたみのバリエーションを増やせることが示された[5]。本講演では、これらの先行研究をまとめるとともに、そのいくつかを詳しく説明する。ところで、上記の文献では、その設計手法が明記され、異なるパラメータによるバリエーションがいくつか示されているが、パラメータの変更を対話的に行うことができるようなツールは提供されてこなかった。今回、いくつかのアルゴリズムを実装して、対話的なパラメータの変更が可能な展開図設計ツールを開発した(図1)。得られた展開図データをSVGフォーマットで出力できるようにすることで、Origami Simulatorを用いた折りたたみの可視化をすることが可能となった。このようなツールを用いることで、過去の文献で紹介されてきたものの以外の様々なバリエーションを視覚的に確認できるようになった。

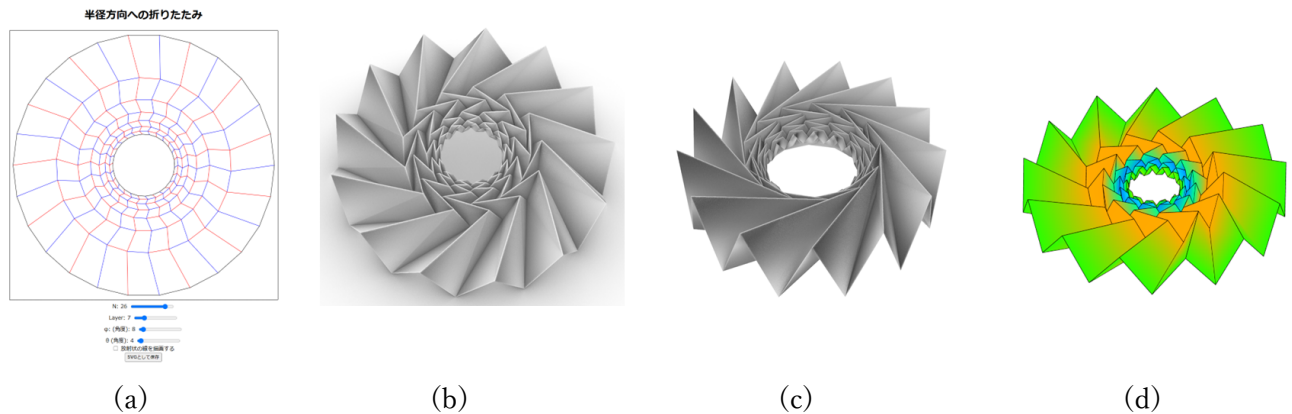


図1 (a) 半径方向への折りたたみが可能な展開図を生成するツール。(b)(c) Origami Simulator による折りたたみシミュレーションを行ったモデル。(d) Origami Simulator でひずみを可視化した様子。

## (参考文献)

1. Guest, S. D. and Pellegrino, S. . Inextensional wrapping of flat membranes. *In Proceedings of First International Seminar on Structural Morphology*, 203–215, 1992
2. 野島武敏, 容易な展開を考慮した薄い円形膜の折りたたみ法の折紙によるモデル化(半径方向への折りたたみとアルキメデスのらせん折り線による収納), *日本機械学会論文集C編*, 67 (653), 2001
3. 野島武敏, 薄い円形膜の折りたたみ法のモデル化(等角ら旋様式による折りたたみ法), *日本機械学会論文集C編*, 67 (657), 2001
4. 野島武敏, 展開の容易な円形膜の折りたたみ/巻き取り収納法, *日本機械学会論文集C編*, 70 (689), 2004
5. 石田祥子, 野島武敏, 萩原一郎, 等角写像の折紙への応用(巻き取り可能な円形膜作成法), *日本機械学会論文集C編*, 79 (801), 2013

## 平坦折りに存在する順序

日本女子大学数物情報科学科 賈伊陽

本発表では、平坦折りにおける折り畳み状態の集合を形式的に分析し、その中に存在する順序構造について検討する。まず、山谷割り当てによって定義される面の重なり順に着目する。この順序は面集合上で半順序として表され、面の上下関係を通じて折り畳み状態の幾何的特性を把握する手がかりとなる。

次に、折り畳み状態間の遷移について考察する。この遷移は、「面の順番の置換」と「面の上下関係の追加」という2つの操作によって定義される。「面の上下関係の追加」のみを考えた場合、折り畳み状態集合上に前順序が形成される。一方で、「面の順番の置換」のみを考慮すると、同値関係が構築されることが明らかになる。このように、異なる操作に基づく順序構造の特徴を明確にすることで、折り畳みの状態空間の性質を深く理解することができる。

さらに、展開図をリソースとして利用し、平坦折りを Petri ネットに関連付けて分析する。この過程では、展開図の構造を活用することで、Petri ネットの実行（発火）に対応する前順序を導出することが可能である。これにより、折り畳み構造と計算モデルとの接点を探る新たな視点を提示する。

加えて、圏論の視点を取り入れることで、さらなる洞察を得ることができる。前順序 (preorder) は最も単純な圏として解釈され、グラフは Kleisli 圏と密接な関係を持つ。また、Petri ネットは可換モノイダル圏としてモデル化することが可能であり、これにより折り畳み構造や展開図の操作を圏論的に記述するための枠組みが明らかになる。



# 折り紙の folding motion に対応する local stacking order の変化の様子を表す幾何的 object の提案

村井 紘子 (奈良女子大学)

## 1 概要

$n = 1, 2$  に対し,  $n$  次元折り紙  $P$  の folded state  $(f, \lambda)$  が, Demaine-O'Rourke [1] により定義されている. ここで  $P$  は  $\mathbb{R}^{n+1}$  内の向き付け可能  $n$  次元多様体,  $f$  は  $P$  から  $\mathbb{R}^{n+1}$  への写像であり,  $\lambda$  はその multiple set  $S(f)$  に対して,  $f(S(f))$  の stacking order を表す  $S(f) \times S(f)$  から  $\{1, -1\}$  への関数である. さらに彼らは folded state の 1-parameter family  $(f_t, \lambda_t)$  ( $0 \leq t \leq 1$ ) に対して,  $\lambda$  のどのような変化が可能であるかを注意し, その条件を満たすような  $(f_t, \lambda_t)$  を folding motion と呼んでいる. 本講演では Demaine-O'Rourke の定義を少し修正し, folding motion における stacking の変位を表す  $P \times P \times [0, 1]$  内の幾何的 object (graphic) を定義する. さらに特殊な 1 次元折り紙の folding motion に対しては, その folded state がより簡明な形で記述できることに注意し, graphic の具体例といくつかの性質を紹介する.

## 2 Graphic の提案と具体例

$n = 1$  または  $2$  とする.  $P$  を  $\mathbb{R}^{n+1}$  内の向き付け可能  $n$  次元多様体とし,  $C$  を  $P$  に埋め込まれた  $n-1$  次元複体とする. つまり  $n = 1$  のとき,  $C$  は有限個の点から成る集合であり,  $n = 2$  のとき,  $C$  は有限個の頂点と, いくつかの頂点を結ぶ線分から成る集合である. いま  $\mathbb{R}^{n+1}$  には標準的な向きが入っているとす. このとき組  $(P, C)$  を  $n$  次元折り紙の crease pattern といい,  $P \setminus C$  の各成分を  $(P, C)$  の face と呼ぶ.  $f$  を  $P$  から  $\mathbb{R}^{n+1}$  への piecewise- $C^2$  級写像とし, (ここでは正確に定義することはしないが)  $f(P)$  には “横断的な自己交差 (紙の通り抜け)” がなく,  $f$  の特異集合が  $C$  に含まれており,  $f(P)$  が内在的距離に関して  $P$  と isometric であるとする.

$S(f) := \{(p, q) \in (P \setminus (\partial P \cup C)) \times (P \setminus (\partial P \cup C)) \mid p \neq q, f(p) = f(q)\}$  とおく. いま  $P$  は向き付け可能であるから, その向きを 1 つ固定する.  $P \setminus (\partial P \cup C)$  の成分を  $P_1, P_2, \dots, P_m$  とし, 各  $P_i$  には  $P$  の向きから誘導される向きが定められているとする. このとき  $p \in P \setminus (\partial P \cup C)$  に対し,  $\mathbf{n}(f(p))$  を  $f(p)$  における  $f(P)$  の長さ 1 の法線ベクトルとする. ここで法線ベクトルは次のように定義される:  $n = 1$  に対しては,  $\mathbf{n}(f(p))$  は  $f(p)$  における単位接ベクトルを 90 度回転したものである.  $n = 2$  に対しては,  $(P, C)$  の face で  $p$  を含むものを  $P_i$  とするとき,  $\mathbf{n}(f(p))$  は  $f(P_i)$  の  $f(p)$  における接平面に垂直で,  $f(P_i)$  の正の方向を指す単位ベクトルである.

[1] では,  $S(f)$  から  $\{-1, 1, *\}$  への写像  $\lambda$  が定義され, 良い条件を満たすような  $f$  と  $\lambda$  の組として folded state  $(f, \lambda)$  が定義されている. ここでは定義を紹介することはしないが, 法線ベクトル  $\mathbf{n}(f(p))$  を用いて,  $f(P)$  における紙の重なり順を表すものである. さらに folded state の変形を表す folding motion という概念が, 良い条件を満たす 1-パラメータ族  $M = (f_t, \lambda_t)$  ( $t \in [0, 1]$ ) として定義されている.

定義 1  $(f, \lambda)$  を  $P$  の folded state とし  $M = (f_t, \lambda_t)$  ( $t \in [0, 1]$ ) を  $P$  から  $(f, \lambda)$  への folding motion とする. このとき  $P \times P \times [0, 1]$  の部分集合  $G(M)_+, G(M)_-, G(M)$  を次のように定め,  $G(M)$  を  $M$  の graphic と呼ぶ.

$$G(M)_+ = \{(p, q, t) \in P \times P \times [0, 1] \mid \lambda_t(p, q) = 1\},$$

$$G(M)_- = \{(p, q, t) \in P \times P \times [0, 1] \mid \lambda_t(p, q) = -1\},$$

$$G(M) = G(M)_+ \cup G(M)_-.$$

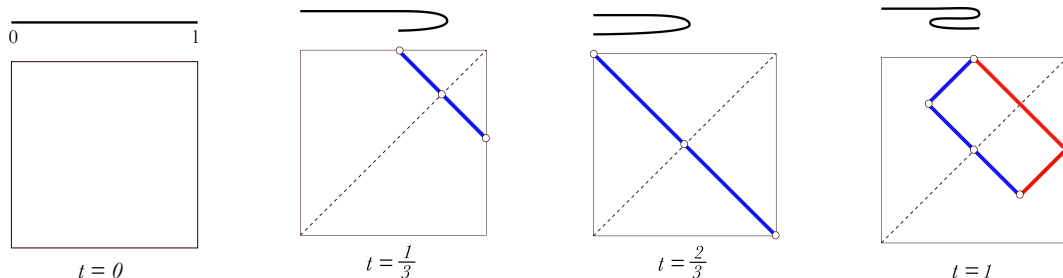
以降では 1 次元の折り紙の特殊な場合を例に挙げて考察する.  $P$  を閉区間  $[0, 1] \subset \mathbb{R} \subset \mathbb{R}^2$  とし,  $(P, C)$  を crease pattern とする.  $P$  から  $\mathbb{R}^2$  への連続写像  $f$  が strongly flat であるとは,  $(P, C)$  の各 face  $F$  に対し,  $F$  と  $f(F)$  が isometric であり,  $f(P)$  が  $\mathbb{R}(\subset \mathbb{R}^2)$  に含まれるときにいう.

定義 2  $f, (P, C)$  を上の通りとし,  $(f, \lambda)$  を  $(P, C)$  の folded state とする.  $f$  が strongly flat であるとき  $(f, \lambda)$  を  $P$  の strongly flat folded state という. また, folding motion  $M = (f_t, \lambda_t)$  が, 任意の  $t \in [0, 1]$  に対し,  $(f_t, \lambda_t)$  が  $P$  の strongly flat folded state であるとき,  $M = (f_t, \lambda_t)$  を strongly flat folding motion という.

このとき, 必要ならばパラメータ  $t$  を調整することにより次の条件を満たすようにできる:

$C(M)$  は  $P \times P \times [0, 1]$  内の “多角形” をいくつか貼り合わせた形をしている.

例 3 下の図は  $P$  の strongly flat folding motion  $M = (f_t, \lambda_t)$  を表す模式図 (上段) と, それに対応する graphic  $G(M)$  の  $t = 0, \frac{1}{3}, \frac{2}{3}, 1$  それぞれにおける断面 (下段) を表したものである. ここで赤は  $G(M)_+$ , 青は  $G(M)_-$  を表している.



## 参考文献

- [1] Erik D Demaine, Joseph O'Rourke, Geometric folding algorithms: linkages, origami, polyhedra. Cambridge university press, 2007.

## 折紙ハットの数理とヘルメット制作へのシミュレーション

佐々木淑恵（明治大），寺田耕輔（明星大），戸倉直（（株）トクラシミュレーションリサーチ），  
楊陽（明治大），萩原一郎（明治大）

これまで，図1に示す改良型ナマコ折りと蛇腹折りを組み合わせた折畳める帽子を開発してきた[1]．一方，図2に示すように翼折とハニカムを組み合わせた「作業ヘルメット並の強度を有す」帽子を開発し販売されている[2-4]．論文[4]で翼折りとハニカムのエネルギー吸収分担率を検討しているが，大方は，ハニカムによるエネルギー吸収である．そこで，ハニカム構造と図1の帽子を組合せ，「作業・自転車ヘルメット並の強度を有す」帽子群の開発を検討している．図3の正四面体と正八面体ハーフの空間充填構造ATCP(Assembly Truss Core Panel)とハニカム構造の衝撃圧壊試験結果を図4に寺田研究室の実験装置で行った結果を示す．ATCPは荷重の立ち上がり滑らかであり頭への急な衝撃がないため，頭に易しい．図5は作業ヘルメット規定の試験装置である．①図4の実験装置に対応するATCP及びハニカム構造のシミュレーションを行い図4の実験結果と比較しモデルを確立する．②図5に対応するシミュレーションを基にハニカム，ATCPの最適化を行う．③帽子とハニカムまたはATCPの組合せで図4の実験装置に対応するシミュレーションを行い実験結果と比較してモデル化を確立する．④図5の試験条件でシミュレーションを行い作業ヘルメットの要件に合うか確認⑥自転車のヘルメットの強度検討を行う．当日は，実際のシミュレーション結果も発表予定である．



図1 なまこ折りとじゃばら折りを組み合わせた帽子

(a)翼折リカバー (b)ハニカム

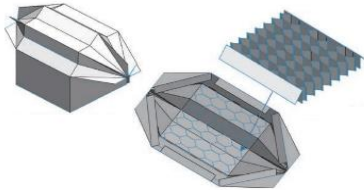


図2 ダンボール製折紙帽子（蛇腹折りのカバー，ハニカムから構成）

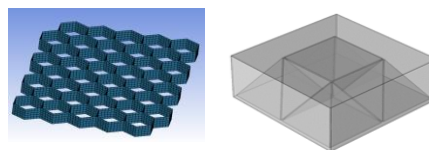


図3 ハニカム及びATCP構造

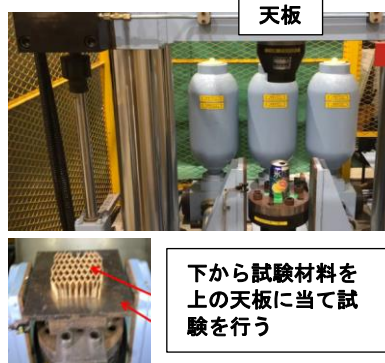


図4 衝撃実験装置

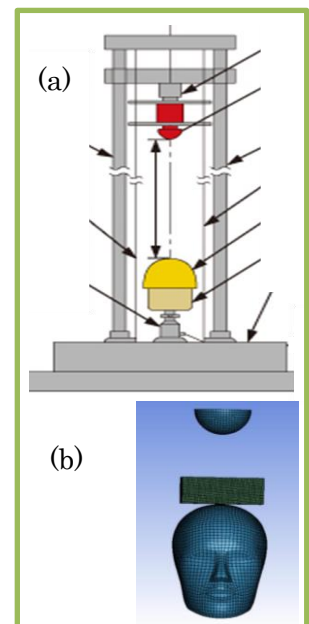


図5(a)作業帽試験装置 (b)シミュレーション

### 参考文献

- [1] 萩原一郎，佐々木淑恵，帽子，特願 2023-194075(2023年11月15日)
- [2] 萩原一郎，奈良知恵，折り畳み構造物，登録番号：特許 6628308号(2019年12月13日)
- [3] 萩原一郎，奈良知恵，小澤範雅，ヘルメット，実願 2016-000870，出願日：2016年2月26日，実用新案 3205084(2016年6月15日)
- [4] 楊陽，奈良知恵，萩原一郎，折紙構造による折畳みヘルメットの適用に関する検討，日本シミュレーション学会論文誌，2019年11巻1号，p.1-13

# 新しい解析技術を用いた折紙構造の遮音特性の評価（音響流線に着目して）

阿部綾<sup>1</sup>, 米大海<sup>2</sup>, 山崎桂子<sup>1</sup>, 笹島学<sup>3</sup>, 内田善照<sup>3</sup>, 萩原一郎<sup>1</sup>

\*1 明治大学, \*2 計測エンジニアリングシステム, \*3 フォスター電機

## 1 概要

情報伝達手段の一つであるスピーカは、昨今の情報化社会の進展に伴って家電や自動車など様々な製品への搭載が進んでいる重要なアイテムである。まず、スピーカユニットがあり、スピーカボックスがある。スピーカユニットは、アンプからの電流が流れて磁界内でコイルが上下に動きスピーカユニットが振動して音が出る現象を利用するものである。スピーカ音質に要求される性能は、“入出力効率が優れていること（能率が良いこと）”、“周波数応答特性が平坦であること”、“歪が少ないこと”、および、“再生周波数帯域が広いこと”を同時に満足することである。これらを満たすために、まずスピーカボックスの遮音／吸音現象特性を決定すべく、1次元と見なせる細長い音響管に共試品として振動板の遮音／吸音現象特性を実験で確認される。

## 2 折紙遮音壁モデルを用いた音響管シミュレーションについて

これまでに音響解析でなく手間のかかる実験でなされていたのはFEMでは、質量則現象の理論解と長らく合わないからであった。透過損失は音源側の前進波音圧に対する受音側前進波音圧で定義されるが、FEMで得られる値を境界条件として用いて、ヘルムホルツの理論解から正確に前進波と後退波とに分離する計算手法を開発し、吸音材の効果やコア付平板のコアのアスペクト比の効果などの新たな知見を得た。その際、折紙コアの遮音は、吸音材では困難な500Hz以下で有効であることを示したため、様々な折紙構造の中から極めて優れたものがあるのではと期待されている。そこで本研究では、この手法をベースに様々な折紙構造の遮音／吸音特性を求める。ここで注意したいのは、複雑形状のテストピースの場合、音響管内のソリッド要素との結合が困難であることもFEM検討を阻んでいたこともあり、この解決も目指す。

- (1) 振動板の遮音／吸音現象特性を把握するため、音響管の透過損失シミュレーション手法を用いて、いくつか検討を行う。1つの垂直コアでは効果的なことが確認できたことから、複数の垂直コアで検討
- (2) 折紙の複雑形状（波型プリーツ遮音板/回転星型遮音板）について遮音性能の検討を行う。等質量平板との透過損失の比較
- (3) 遮音板付近の音響流線について（熱粘性解析手法により、音響速度や音響強度の表示が可能）

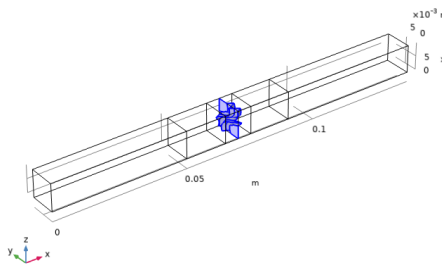


図 1. 折紙遮音壁モデル

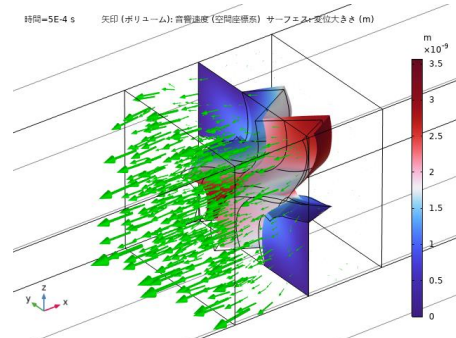


図 2. 1000Hz での音響速度と折紙遮音板の変位

## 3 結語

この遮音／吸音特性と、“再生周波数帯域が広いこと”など望ましいスピーカ特性との相関を、多目的スピーカ特性最適化解析や機械学習を用いて明確にする。



# 平行山谷付き平坦折り問題（その5）

伊藤大雄

電気通信大学 大学院 情報理工学研究科

itohiro@uec.ac.jp

折り紙の平坦折り問題とは、紙片とその上に描かれた折り線が与えられ、全ての折り線を180度に折って、折り上がりを平坦にすることができるか否かを問う問題である。各折り線に山折り(M)か谷折り(V)かが与えられている問題と、与えられず自由に折れる問題の二通りがあるが、どちらも一般にはNP完全である[3]。

しかし多項式時間解法が知られている部分問題も存在する。例えば、紙片を長方形とし、折り線を短辺に平行なものだけに限定し、折り線に山谷を与えた問題<sup>1</sup>、一次元山谷付き平坦折り問題に対する線形時間アルゴリズムが2004年にArkinら[1]によって与えられている。

著者らのグループは、折り線が平行という制約の下での一般化された問題に挑んでいる。紙片を平行四辺形に拡張し、折り線をやはり短辺に平行なものだけに限定した問題、平行斜め山谷付き帯平坦折り問題（図1(a)参照）に対する線形時間アルゴリズムを2020年に示し[2]、さらに拡張し、凸多角形を含む軸凸(axis convex)多角形に対する線形時間アルゴリズムの存在を2024年に示した<sup>2</sup>[4]。なお、平行山谷付き平坦折り問題の問題例が軸凸であるとは、折り線に平行または垂直な任意の直線について、その図形との共有部分が連続(線分)であること(図1(b)参照)であり、折り線が平行という条件の下では凸多角形を含む、より広い概念である。

折り線が平行という条件の下での計算困難な問題という観点からは、一次元問題であっても折り線の制約(ラベル)に「山折り」と「谷折り」の他に「山折り・谷折り・折らない」の内のどれでも良い」という意味の「全」というラベルを許した問題、一次元山谷全付き平坦折り問題が弱NP完全であることを2022年に[5]、さらに紙片の形状を一般の多角形に拡張した上で、平坦折りの結果「指定の図を浮かび上がらせる」という制約を加えた問題、平行山谷付き絵画折り問題が強NP完全であることを2023年に証明[6]した。

本発表では、その後の研究状況について報告する。

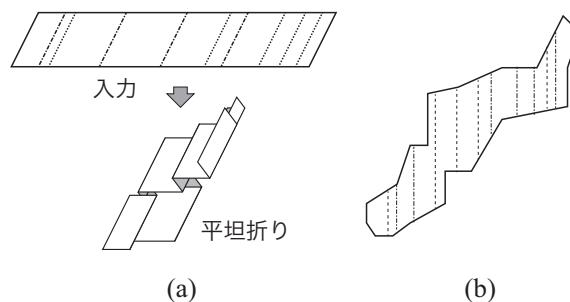


図1: 平行山谷付き平坦折り問題: (a) 紙片が平行四辺形の例と (b) 軸凸多角形

map?, Computational Geometry: Theory and Applications, Vol. 29, No. 1, pp. 23–46, 2004.

- [2] Erik D. Demaine, Martin L. Demaine, Hiro Ito, Chie Nara, Izumi Shirahama, Tomohiro Tachi, and Mizuho Tomura: Flat folding a strip with parallel or nonacute zig-zag creases with mountain-valley assignment, Special Issue on Discrete and Computational Geometry, Graphs, and Games, Journal of Information Processing, Vol. 28, No. 12, pp. 825–833, 2020.
- [3] Erik D. Demaine and Joseph O’Rourke: Geometric Folding Algorithms: Linkages, Origami, Polyhedra, Cambridge University Press, 2007. The 23rd Thailand-Japan Conference on Discrete and Computational Geometry, Graphs, and Games (TJCDGC<sup>3</sup> 2020+1), Chiang Mai, Thailand, Sept. 3–5, 2021.
- [4] Hiro Ito and Sae Neshiba: The 26th Japan Conference on Discrete and Computational Geometry, Graphs, and Games (JCDGC<sup>3</sup> 2024), Tokyo University of Science, Tokyo, Sept. 10–12, 2024.
- [5] 伊藤大雄, 根芝冨, 平行山谷付き平坦折り問題(その3), 折り紙の科学を基盤とするアート・数理および折紙工学への応用 III, 明治大学(遠隔混合), 2022年12月17日.
- [6] 伊藤大雄, 平行山谷付き絵画折り問題の強NP完全性, 折り紙の科学を基盤とするアート・数理および折紙工学への応用 IV, 明治大学中野キャンパス, 2023年12月15-16日.

## 参考文献

- [1] Esther M. Arkin, Michael A. Bender, Erik D. Demaine, Martin L. Demaine, Joseph S.B. Mitchell, Saurabh Sethia, and Steven S. Skiena: When can you fold a

<sup>1</sup>山谷を与えられていない場合はジグザグに折る(すなわち、山谷を交互に与える)ことで自明に平坦折り可能。

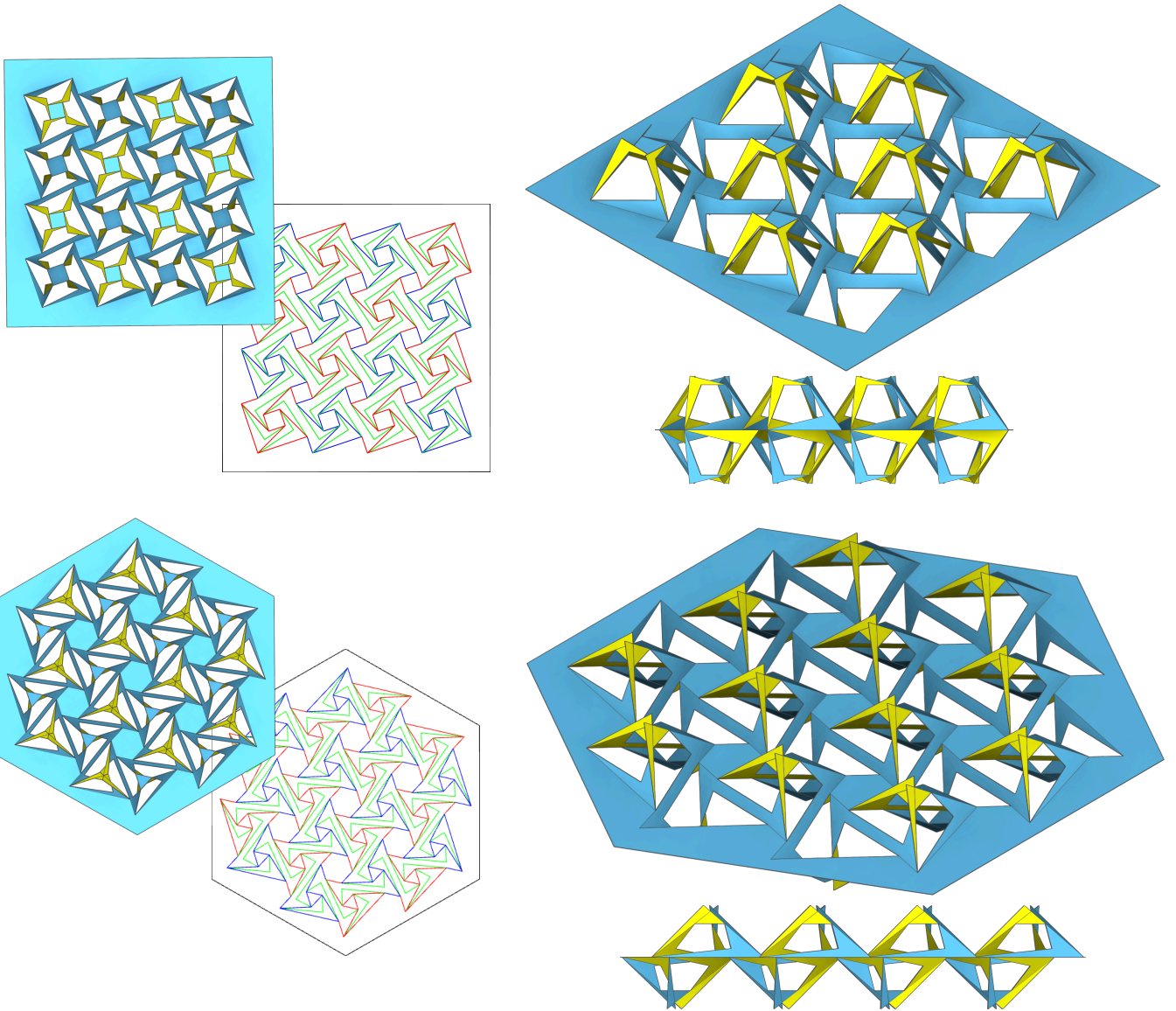
<sup>2</sup>アルゴリズムの詳細は現在執筆中。

# RESユニット充填相持構造

RES (Rotational Erection System) Unit  
Tessellated Reciprocal Structure

愛知工業大学 工学部 Aichi Institute of Technology  
建築学科 宮本 好信 Yoshinobu Miyamoto

RES (Rotational Erection System) は切り目と折り目で板材を面外に造形する技法である。RESのユニットを平面上に充填配置し、起立後、全体の面剛性を高める構造システムを提案する。



## RESユニット充填相持構造設計例

上：正方形RESユニット市松模様配置。両面に上下交互に起立する。

下：正三角形RESユニット市松模様配置。両面に上下交互に起立する。

## 折り紙の発想で作る軽量膜構造 -建築、ファッション、高分子材料とのつながり

下田悠太 (Biomatter Lab, 佐藤淳構造設計事務所)

本発表で紹介する膜構造、「膜テンセグリティ構造」は棒（圧縮材）と膜（引張材）を組み合わせた建築構造であり、棒同士が接していなくても膜の張力のおかげで安定するため、棒がまるで空中に浮いているように見える。筆者らは折紙テッセレーション<sup>(1)</sup>を膜テンセグリティ構造に変換することで、任意の多面体を膜テンセグリティでつくる設計手法を提案した<sup>(2)</sup> (図 1)。本手法を用いて実際に 4m×8m の実物大建築の試行建設<sup>(3)</sup>を行ったほか、ファッションブランドと表面の布が構造となっている服の設計を行ったり、高分子材料で平面から任意曲面を作る手法を提案したりしている<sup>(4)</sup> (図 2 a-c)。また、本構造はハリセンボン科の魚であるイシガキフグの棘の形状と類似している (図 2 d)。このように共通の幾何学を背景とした領域横断的な制作、研究について紹介する。

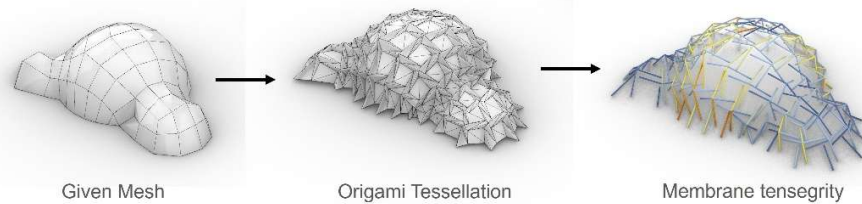


図 1. 膜テンセグリティの逆問題を解くプロセス。



図 2. 膜テンセグリティを応用した研究や制作の例。(a)実物大の建築構造物<sup>(3)</sup>。(b)コムデギャルソン noir kei ninomiya 2021 A/W。(c)平面から任意曲面に立ち上がるポリマーフィルム<sup>(4)</sup>。(d)イシガキフグの剥製。

1. Tachi, T. (2013). Designing freeform origami tessellations by generalizing resch's patterns. *Journal of mechanical design* 135(11).
2. Shimoda, Y., Suto, K., Hayashi, S., Gondo, T. & Tachi, T. (2023). Developable Membrane Tensegrity Structures Based on Origami Tessellations. In *Advances in Architectural Geometry 2023* (pp. 303-312).
3. Shimoda, Y., Hayashi, S., Awaji, H., Nakamura, T., Kamijo, H., Gondo, T., Tachi, T. & SATO, J. (2023, October). Construction of developable freeform membrane tensegrity structures. In *Proceedings of IASS Annual Symposia* (Vol. 2023, No. 3, pp. 1-11). International Association for Shell and Spatial Structures (IASS).
4. Ito, S., Shimoda, Y., Fukunishi, H. & Hayashi, M. (2024). Polymer Membrane Tensegrity: Inverse Design of Polymer Films Morphing into Arbitrary 3D Surfaces with Digital Photopatterning Technique. *Gyroid is everywhere*.



## 連結正十二面体（正二十面体）の連続的平坦折りたたみ

奈良 知恵（明治大学先端数理科学インスティテュート, [cnara@jeans.ocn.ne.jp](mailto:cnara@jeans.ocn.ne.jp)）

多面体の表面を連続的に平坦化する方法がある。ここでは合同な2個の正十二面体を一つの面同士を貼り合わせた連結正十二面体や連結正二十面体について「ひし形の翼折り」を利用した連続的折りたたみについて述べる。ただし、伸縮や切り込みなしで「移動折り目」によって連続的に平坦化し、素材の厚みは無視できるものとする。

連結正十二面体を縦長に平面上に置いたとき、上面を底面に重ねるように平行移動しながら、2面の間にある10個の面に「ひし形の翼折り」を適用すると反転らせん正五角形プリズムができる ([1,2])。これを平坦化するにはさらに移動折り目が必要になるが、変形が小さいことから紙製の場合は小さい力で平坦化できる (図1)。正十二面体の各々はそれぞれ回転しながら変形するが一对の対称な動きになるように折り目を入れることによって、全体として上面の回転が消失する。

一方、1個の正二十面体の場合は、平行な2面の間にある18個の面のうち2個ずつのペア6組に対して「ひし形の翼折り」を適用すると、上面を底面に重ねるように平行移動して正八面体（正三角形プリズム）を作ることができる。また、異なるペアによる6組の面に「翼折り」を適用すると、上面を回転させながら平行移動によって正八面体に変形することができる (図2の右端)。これらは辺グラフの完全マッチングによる辺の縮退として捉えることができる。

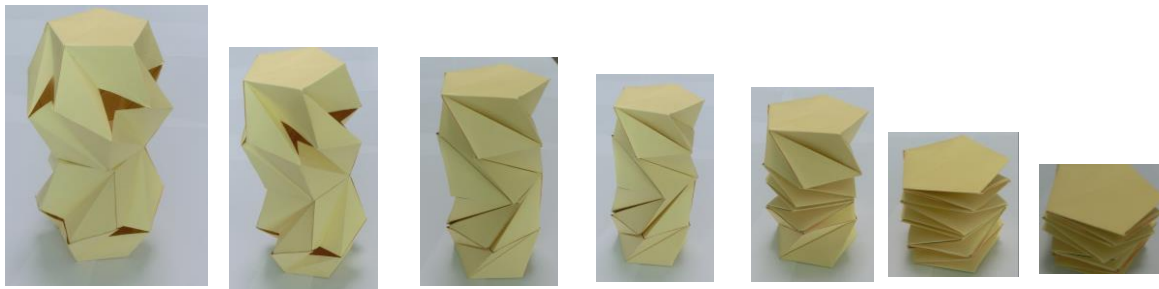


図1. 連結正十二面体の連続的平坦折りたたみ

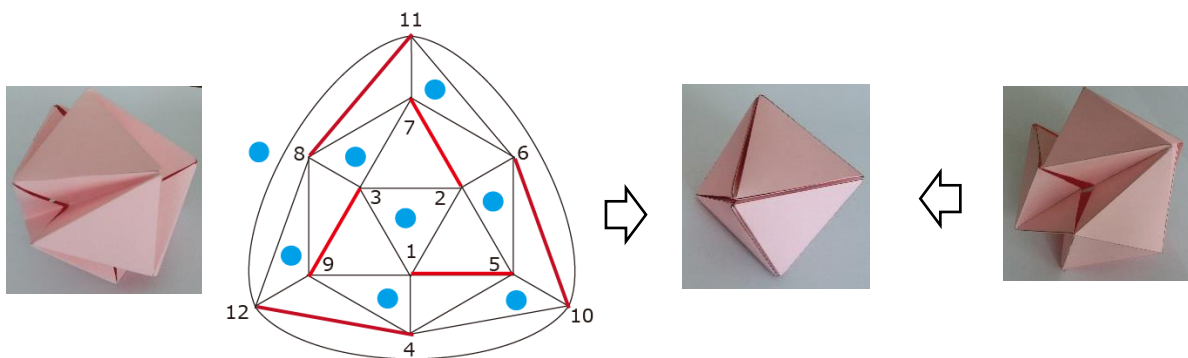


図2. 正二十面体から正八面体への2通りの連続的変形

### 参考文献

- [1] Itoh, J., Nara, C.: Continuous flattening of Platonic polyhedral}. Computational Geometry, CGGA 2010, LNCS 7033, 108--121 (2011).
- [2] Horiyama, J. Itoh, N. Katoh, Y. Kobayashi, C. Nara, Continuous folding of regular dodecahedra, [3] Itoh, J., Nara, C.: Continuous flattening of Platonic polyhedral}. Computational Geometry, CGGA 2010, LNCS 7033, 108--121 (2011).