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 Ⅶ」プログラム（Program 2026/11/15 第2版）2026 年 12 月 10 日(木)－ 11 日（金）明治大学中野キャンパス 6 階 603

10 日（木）

9:50 – 10:00 開会（Opening）

① 10:00 – 11:00 特別招待講演 時枝 正（Tadashi Tokieda, スタンフォード大学教授）
「TBA」

11:00 –11:10 ～休憩～

② 11:10 – 11:40 舘 知宏（Tomohiro Tachi, 東京大学）
「展開式折紙パビリオン」

③ 11:40 – 12:10 村井 紘子（Hiroko Murai, 奈良女子大学）
「折り紙の折り可能性をめぐるいくつかの問題」

④ 12:10 – 12:40 萩原 一郎（Ichiro Hagiwara, 明治大学）
「折紙構造による音響メタマテリアル創成とその吸遮音機構の解明

12:40 – 14:00 ～昼休み～

⑤ 14:00 – 14:30 杉原 厚吉（Kokichi Sugihara, 明治大学）
「多義錯視立体の紙工作による汎用創作法」

⑥ 14:30 – 15:00 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７）」

⑦ 15:00 – 15:30 宮本 好信（Yoshinobu Miyamoto, 愛知工業大学）
「OrigamiFold――折り順序の記述と順序最適化による仮想折紙の実装」

⑧ 15:30 – 16:00 布施 知子（Tomoko Fuse, 折り紙作家）
「フリーズする折り紙 - II」

16:00 – 16:10 展示ポスター・作品紹介

16:20 – 17:20 ポスター・セッション

11 日（金）

⑨ 10:00 – 10:30 上原 隆平（Ryuhei Uehara, JAIST）
「複数の箱が折れる展開図の最新の結果について」

⑩ 10:30 – 11:00 鎌田 斗南（Tonan Kamata, JAIST）
「TBA」

⑪ 11:00 – 11:30 今田 凜輝（Rinki Imada, JAXA）
「Maxwell Origami の運動学と力学系」
⑫ 11:30 – 12:00 斉藤　一哉（Kazuya Saito, 九州大学）
「生物模倣スマートマテリアルの開発」
12:00 – 12:10 展示ポスター・作品紹介

12:10 – 14:00 ～昼休み/ポスター・セッション～

⑬ 14:00 – 14:30 三谷 純（Jun Mitani, 筑波大学）
「近年の AI を用いた折紙設計等に関する研究紹介」
⑭ 14:30 – 15:00 ルイス ディアゴ （Luis D. Diago, 明治大学）
「Origami-Inspired Collagen Scaffolds for 3D Cell Culture: Biofabrication and Computational Modeling」
⑮ 15:00 – 15:30 堀山 貴史（Takashi Horiyama, 北海道大学）
「TBA」
⑯ 15:30 – 16:00 松原 和樹（Kazuki Matsubara, 埼玉大学）
「空間充填性を保つ多面体の連続的平坦化問題」
⑰ 16:00 –16:30 奈良 知惠（Chie Nara, 明治大学）
「正二十面体上の単純な閉じた準測地線と二面体」

16:30 – 16:40 閉会（Closing）

展開式折紙パビリオン

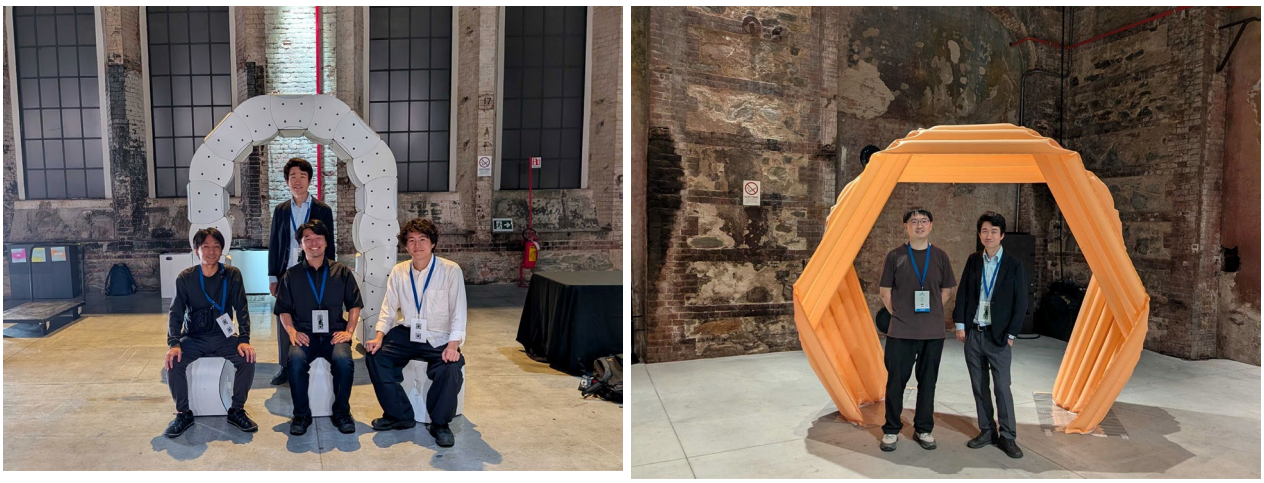
舘 知宏
東京大学 大学院総合文化研究科

折紙構造は平面状態で収納・運搬でき、立体状態へ展開して使用できるため、災害時に用いる仮設の生活空間や、イベント時のテントなどへの応用が期待される。実装のためには、材料、加工制約、可搬性、収納性、ユースケース、構造強度、耐久性など、さまざまな観点からの検討と試行錯誤・実証が欠かせない。本講演では二つのパビリオン・プロジェクトを紹介する。

CC-Chair は、東京大学舘研究室・クイーンズランド大学・日建設計・プチプチ株式会社の協働によるプロジェクトであり、曲線折紙の幾何学を用いた閉じたブロック構造をモジュールとするシステムである[1]。ポリプロピレン製サンドイッチ板の折り線加工によって実現されたブロックは、平坦に折りたたんだ状態から立体状態にスナップすることで安定し、スツールとして用いることができる。さらに、ブロックの凹部と凸部を連結させていくことで、大きなベッド、アーチ、パーティションといった異なる用途にも対応できる。災害時以外にも普段からさまざまな用途に活用できるフェーズフリーデザインを目指している。

Pneu-gami は、東京大学舘研究室・竹中工務店の協働によるプロジェクトであり、平坦な二重の膜を部分溶着して空気を注入することで、円柱状パウチの並列配置を実現する[2]。この円柱状パウチを曲線折紙のルーリングとして用い、折り目部分にレンズ状の溶着パターンを設けることで、構造全体が自己折りし、立体状態で安定する。4 メートルスケールの空間構造物をスーツケース一つに収めて運搬、展開ができるシステムが構築された。

いずれのプロジェクトも、プロトタイプ構造を IASS 2026 においてメートルスケールの構築物として実装した。現在の達成状況、課題点、今後の発展について述べる。



CC-Chair (Left) and Pneu-gami (Right)

[1] M. Lee, J. Gattas, K. Hayashi, Y. Kurusu, T. Morishima, H. Sato, M. Shigematsu, M. Takiguchi, H. Tamai, I. Tanaka, T. Tachi, “CC-Chair: Reconfigurable Multistable Curved-Crease Origami Chair Block,” Proceedings of the IASS-IWSS 2026 Symposium, 2026.
[2] Y. Zhang, T. Inaba, Y. Idosako, T. Kobayashi, A. Moriya, T. Tachi, “Pneumatically Stabilized and Actuated Structures Derived From Rigid-Ruling Curved Origami,” Proceedings of the IASS-IWSS 2026 Symposium, 2026.

Deployable Origami Pavilions

Tomohiro Tachi
Graduate School of Arts and Sciences, The University of Tokyo

Origami structures can be stored and transported in a flat state and deployed into three-dimensional forms for use, making them promising for applications such as temporary living spaces in disaster relief and event tents. Implementation requires careful consideration, iteration, and validation across a wide range of factors, including materials, fabrication constraints, portability, compactness, use cases, structural strength, and durability. This talk presents two meter-scale projects.

CC-Chair is a collaborative project between the Tachi Laboratory at the University of Tokyo, the University of Queensland, Nikken Sekkei, and Puchi Puchi Co., Ltd. It is a modular system based on closed block structures derived from curved-crease origami geometry [1]. The blocks, fabricated from polypropylene sandwich panels with scored fold lines, snap from a flat-folded state into a stable three-dimensional form and can be used as stools. By connecting the concave and convex faces of multiple blocks, the system can also accommodate a range of larger applications, including beds, arches, and partitions. The design aims to be phase-free — useful in everyday settings as well as in disaster scenarios.

Pneu-gami is a collaborative project between the Tachi Laboratory at the University of Tokyo and Takenaka Corporation. Cylindrical pouches arranged in parallel are formed by partially heat-sealing a flat double-layered membrane and inflating it with air [2]. These cylindrical pouches serve as the rulings of a curved-crease origami surface, and lens-shaped weld patterns at the crease lines cause the entire structure to self-fold and stabilize in a three-dimensional configuration. The result is a system capable of deploying a four-meter-scale spatial structure that can be transported in a single suitcase.

Both projects were implemented as meter-scale physical demonstrators at IASS 2026. The talk will cover current achievements, remaining challenges, and future directions.

[1] M. Lee, J. Gattas, K. Hayashi, Y. Kurusu, T. Morishima, H. Sato, M. Shigematsu, M. Takiguchi, H. Tamai, I. Tanaka, T. Tachi, “CC-Chair: Reconfigurable Multistable Curved-Crease Origami Chair Block,” Proceedings of the IASS-IWSS 2026 Symposium, 2026.

[2] Y. Zhang, T. Inaba, Y. Idosako, T. Kobayashi, A. Moriya, T. Tachi, “Pneumatically Stabilized and Actuated Structures Derived From Rigid-Ruling Curved Origami,” Proceedings of the IASS-IWSS 2026 Symposium, 2026.

折り紙の折り可能性をめぐるいくつかの問題

村井 紘子（奈良女子大学）

折り紙の折り可能性を数学的に考える際には，局所的な折り可能性，大域的な折り状態（folded state）の存在，そして展開状態から目的の折り状態に至る連続的な折り動作（folding motion）の存在を区別する必要がある．本講演ではこれらの違いに着目し，講演者が認識している平坦折り可能性および剛体折り可能性に関するいくつかの問題を取り上げる．

Irii 等 [1] は，2 次元トーラスの相似構造を用いて，ミウラ折りを一般化した局所的に平坦折り可能な折り紙展開図の構成法を与えた．この論文では，構成された展開図が平坦折り可能であると述べているが，実際に示されているのは，各頂点の近傍において局所的に平坦折り可能であることのみである．

この構成法では，外側の折り線を縮小したものを内側に繰り返し配置することができる．任意の有限段階で構成を止めると，中央には凸でない多角形領域が残る．この領域を紙の一部として残した場合，山谷割当をどのように与えても flat folded state は存在しない．一方，中央の領域を取り除くと紙は円環領域となり，flat folded state の存在を示すことができる．しかし，円環領域は単連結でないため，flat folded state の存在から folding motion の存在が従うとは限らない．

単連結な紙については，Demaine 等 [2] により，適切な条件のもとで，folded state の存在から folding motion の存在が従うことが示されている．一方，単連結でない紙については，この結果は一般には成立しない．講演者らは 2023 年に，単連結でない紙において folded state が存在しても，そこに至る folding motion が存在しない例を示した．

このような背景から，円環領域上の folded state に対して，folding motion が存在するための必要十分条件を考える．講演者は，次を予想している:

予想 1　$P \subset \mathbb{R}^2$ を，その 2 つの境界成分がそれぞれ凸多角形をなす円環領域とし，(f, λ) を適切な条件を満たす folded state とする．このとき，展開状態から (f, λ) に至る folding motion が存在するための必要十分条件は、$f(\partial P)$ から stacking order λ を用いて定められる $\mathbb{R}^3$ 内の絡み目が自明な絡み目（trivial link）となることである．

本講演では，この予想の根拠となるアイディアを紹介するとともに，残されている問題について述べる．

また，剛体折り可能性についても，折り角の整合性条件と，実際の剛体折り運動の存在を区別する必要がある．各頂点における折り角が整合し，それらが紙全体として矛盾なく定まることは，剛体折り可能性の必要条件である．しかし，折り角の整合性条件だけでは，面同士の自己交差が生じないことは保証されず，自己交差のない連続的な剛体折り運動が存在するかどうかは，別途検討する必要がある．

本講演では，これらの具体例を通して，折り紙の折り可能性に関する既知の結果と，数学的に厳密な証明が与えられていない問題を整理し，折り可能性を数学的に厳密に示すための課題について考察する．

参考文献

[1] M. Irii, T. Kobayashi and H. Murai, ”Similarity structure on 2-dimensional torus and flat origami”, JP Journal of Geometry and Topology, 22(2019)45—63.

[2] E. D. Demaine, J. O’Rourke, Geometric folding algorithms: linkages, origami, polyhedra. Cambridge university press, 2007.

本研究は JSPS 科研費 JP23K03231 の助成を受けたものです

折紙構造による音響メタマテリアル創成とその吸遮音機構の解明

萩原一郎（明治大学）

スピーカ筐体内部では、多重反射や定在波の発生が音質劣化の要因となるため、一般にグラスウールやシンサレートなどの吸音材が用いられている。これまでに、折紙工学に着想を得てミウラ折構造を音響制御へ応用し、その吸音特性を検証してきた。その結果、図 1 に示すように、ミウラ折構造は、自動車分野等で広く利用されている厚さ 13 mm のシンサレートを上回る吸音性能を有する可能性を示した。一方、最近の在宅活動の定着を受け、電話ボックス型の簡易音響室が販売されているが、多くはフェノール樹脂やポリエステル系吸音材を多用するため重量が 50～80 kg に達し、中には 200 kg を超える製品も存在する。そのため、設置場所の制約、移設の困難さ、保管性の低さといった課題を抱えている。これに対し、我々は、簡易音響室の側面 4 面のうち 2 面を吸音壁から紙製あるいは段ボール製の図 2 に示す蛇腹折紙構造に置換したモデルを提案し、数値解析および試作評価を通じて、総重量約 11kg という極めて軽量な構造でありながら、市販製品と同等レベルの遮音性能を実現できることが 2023 年からの研究で得られている。以上から、折紙構造の中で最も身近な蛇腹折り、ミウラ折りとも、優れた音響メタマテリアルと捉えることができる。これらの現象を解明し、ヘルムホルツレゾネータ以上の、汎用的で新しい音響メタマテリアルを目指す。

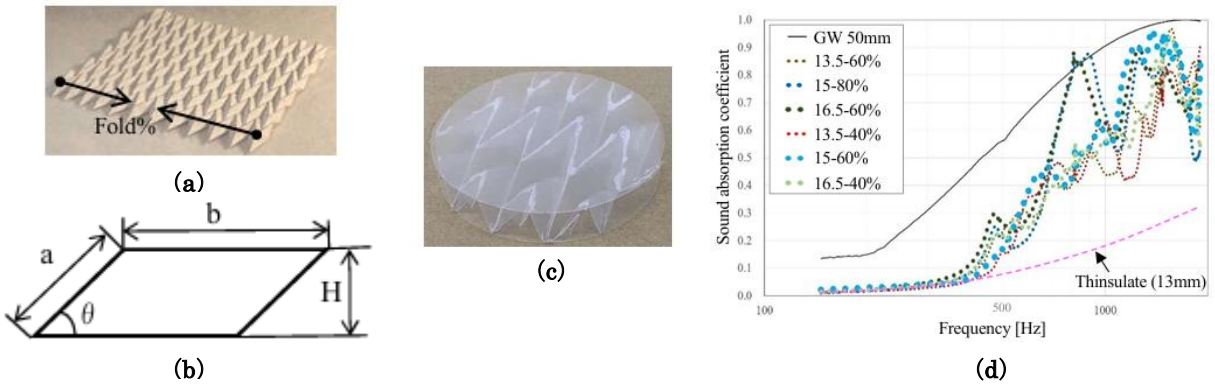


図 1　ミウラ折(a)、4 変形の 1 ユニット(b)、片面に板材を取付た構造(c)と吸音率(d)：厚さ 50㎜ のグラスウールと比較している。同図(d)で 13.5, 15, 16.5 とあるのは、同図(b)の H であり、40, 60, 80%は折畳率である。レゾネータと異なり右上がりの特性が得られている(d)。

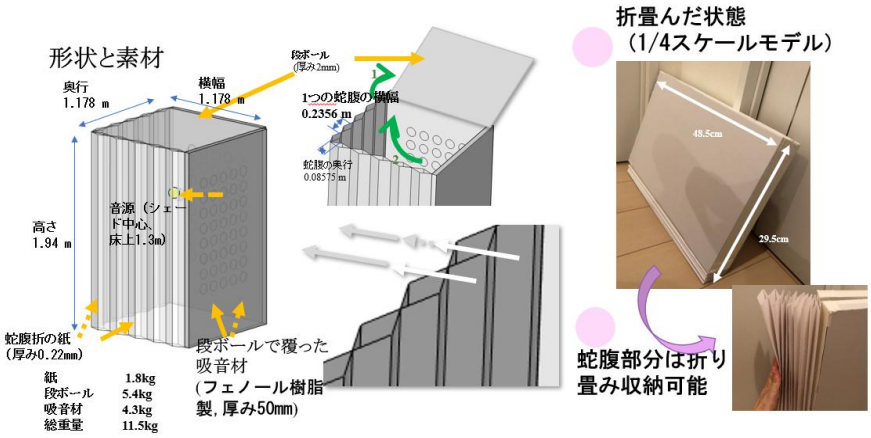


図 2　市販の簡易音響室の基本形状と側面4面のうち、2面を蛇腹折りにした概要

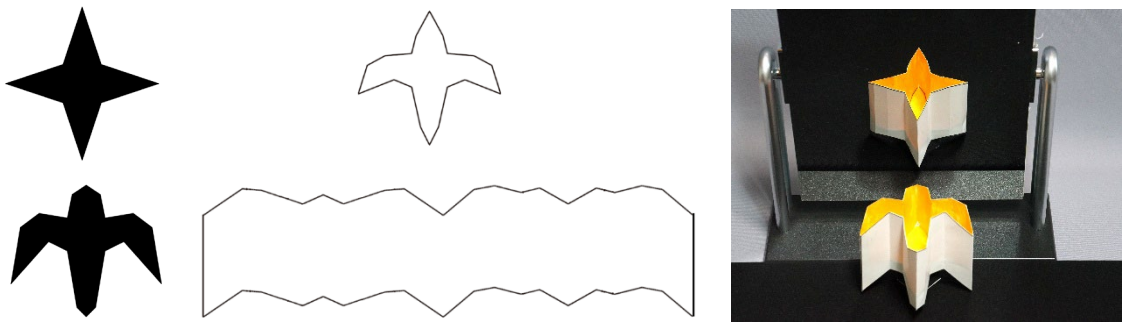
多義錯視立体の紙工作による汎用創作法

杉原厚吉（明治大学先端数理科学インスティテュート）

鏡に映すと姿や姿勢が不条理に変わって見える多義錯視立体を発見してから、その創作法について論じてきたが、それらは一般に３Ｄ プリンタで制作することを前提にしたものであった。例外的に、左右が反転する錯視立体と振り向かない錯視立体は、対称性を持たせることによって実現できるという性質を利用して、直感に基づいた紙工作でも作れることを昨年のこの研究集会で紹介した。

本講演では、対称性を満たさない一般の多義錯視立体を紙工作で作る方法を紹介する。まず、二つの視線方向とそれぞれの方向から見えてほしい二つの目標図形（単連結な図形に限る）を定める。次に、目標図形の輪郭上の点を、二つの方向から見たとき一致するように１対１に対応付ける。（この対応が取れない場合は、その時点で、望みの錯視立体は存在しないことが確認できる。）対応するそれぞれの点対に対して、その点を通り視線方向に平行な二つの直線の交点を求める。これを繋ぐと一つの閉曲線が得られる。最後に、この閉曲線を目標図形に垂直な方向へある距離だけ平行移動させ、掃き出した曲面を採用する。これが求める錯視立体である。この曲面は柱体となるから、断面形状と側面の展開図によって作ることができる。したがって、紙工作でもできる。

図１にこの方法で作った立体の例を示す。(a)は見えてほしい二つの目標図形である。視線方向は、この紙面を水平に置いたとき、互いに反対方向から斜め 45 度の角度で見下ろす方向とする。これらの目標図形の輪郭は上半分と下半分がそれぞれ左から右へ単調に進む曲線であるから、垂直方向に並ぶ点同士で１対１対応が取れる。(b)は、その対応に基づいて作った閉曲線から求めた柱体の断面図と側面展開図で、(c)はそれから作った紙製の立体である。立体の内側に一様な色を塗り、側面と断面の区別がつきにくくした。これによって閉曲線（柱体の上端の曲線）がよく目立ち、錯視を強めることができる。



(a)　目標図形　　(b)断面と側面の展開図　　(c) 紙製錯視立体

図 1. 紙工作による錯視立体の制作例

平行山谷付き平坦折り問題（その７）

── x 軸凸紙片 無限長折り線の線形時間アルゴリズム──

伊藤 大雄 *　　舩越 佳奈
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あるが、どちらも一般には NP 完全である [3]。

著者らのグループは、折り線が平行という制約の下での平坦折り問題に挑んでいる（図 1)。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)）である。我々は軸凸多角形に対する線形時間アルゴリズムを得ている [4]。

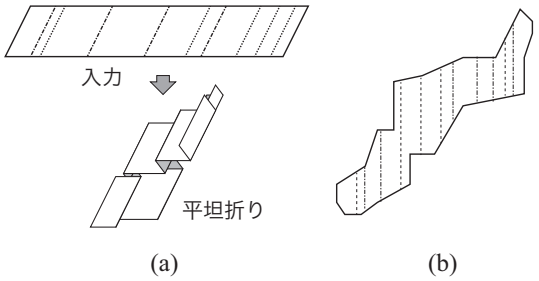


図 1: 平行山谷付き平坦折り問題：(a) 紙片が平行四辺形の例と (b) 軸凸多角形の例

本発表では、軸凸多角形をさらに緩和し、x 軸凸多角形に対するアリゴリズムを述べる。***x* 軸凸**とは軸凸から折り線に平行な直線に関する制約を除外したものである（折り線は y 軸と平行であるとしている。図 2 (a))。なお、y 軸方向の凸性を排除した場合、折り線は図形によって複数の線分に分断される可能性がある。我々が扱う問題では、折り線は y 軸に平行な無限直線である[1]と仮定する。すなわち、折り線が途中で消滅したり、山折と谷折が入れ替わったりしないものとする（これを**無限長折り線**と呼ぶ)。

我々は x 軸凸多角形上の無限長折り線平行山谷付き平坦折り問題に対する線形時間アルゴリズムを得た。本アルゴリズムは以下の構成をしている（用語の定義は文献 [4] 参照)。

Step 1 入力の全面シート (universal sheet) に対し、可能な限り段折 (crimp) する。

[1]そして図形との共通部分にのみ意味がある。

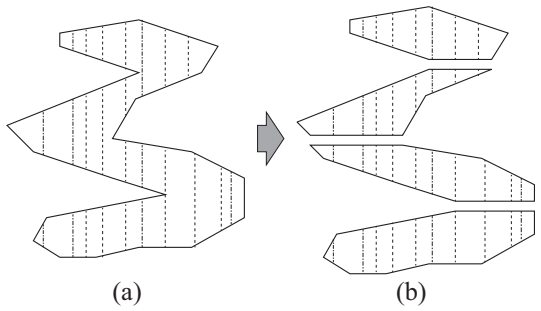


図 2: (a) x 軸凸多角形と (b) その軸凸多角形への分解

Step 2 軸凸になるように分解し（図 2)、さらに軸凸のアルゴリズム [4] の分割（separate）を適用する。

Step 3 得られた全ての部分問題（の全面シート）が「切断の際の切れ目の整合性を保ちつつ」端折 (end-fold) 可能であることを判定する。

本講演では以上のアルゴリズムが正常に作動することを解説する。

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 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 JCDCG^3, J. 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.

[4] Hiro Ito and Sae Neshiba: Flat folding problem with parallel creases on an axis-convex polygonal piece of paper, IEICE Trans., Vol. E109-A, No. 9, pp. 1571–1580, 2026.

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 Ⅶ」
2026年12月10日（木）15:00–15:30　明治大学中野キャンパス 6階603

OrigamiFold――折り順序の記述と順序最適化による仮想折紙の実装

宮本 好信（建築家・独立研究者／元 愛知工業大学）

目的

展開図は完成形の折線を与えるが、どの順に、どの中間形を経て折るかは与えない。その手順を伝えてきたのが伝承の折り図である。本研究は、蛋白質構造予測のAlphaFoldが構造データベース（PDB）を基盤としたことになぞらえ、折り図を「折紙のPDB」とみなす。折り順序を機械可読に記述し、仮想の紙で実行して検証する枠組みがOrigamiFoldである（図1）。

方法

全折線を同時に駆動する標準的なシミュレーションは、多層が重なる伝承作品では完成形に届かない。そこで次の3段階をとる。

1. 折り図・展開図・写真から、平坦に折れた中間状態の列を層順まで含めて記述する。記述には、折り手順を時系列で書く言語oriseqを開発している。
2. 状態の間を伸びのない経路でつなぎ、折線群に時間枠を割り当てる段階駆動の順序を探索する。
3. 伸びと層の貫通を禁じる紙の物理計算で検証する。

図1　研究構想：資料から検証済みの折り順序へ

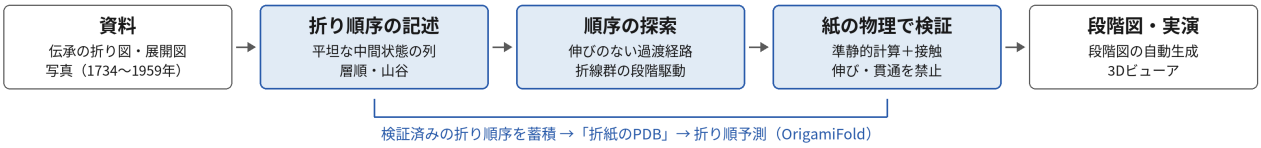
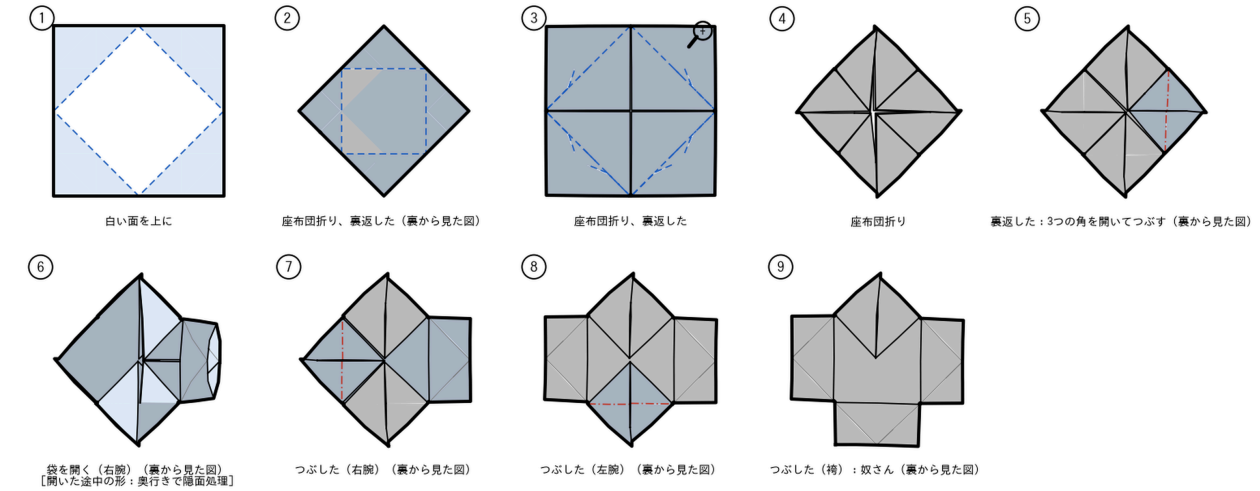


図2　実装が出力した折り順序段階図の例（奴さん）



現状と講演内容

折鶴は、平らな紙から全段階を通して完成形に到達した。兜、奴さん、スペインの小鳥、風車、だまし船でも中間状態の列と物理計算を実装し、計算結果から折り順序の段階図を自動生成している（図2）。三方、福助、蛙などは開発中である。講演では、1734〜1959年の資料にもとづく伝承作品への展開と、発表時点までの実装実験を、実演を交えて報告する。

キーワード：折り順序、折り図、段階駆動、紙の物理シミュレーション、伝承折紙

フリーズする折り紙・II

布施知子　（折り紙アーティスト）
中川功大、来栖裕也、舘知宏　（東京大学 ）

布施は繰り返しの折りを使った様々なパターンを研究し、アート作品として面白く美しい形を探している。その中で「両面同紋折り」と名付けた、表と裏の両面で同じパターンが現れるものがある。
「表裏同等折り」と呼ばれているものは、表に現れた形が捩れを挟んですぐその真下に現れるのに対し、「両面同紋折り」は、反対側の紋様は一段ずつずれて上下が逆なることが多い（図1）。

その「両面同紋折り」の中で、開いてほどき、また縮めるとき、途中のどの位置でも固定されてフリーズするものがあることを見つけた（図2）。

これらのパターンに対して舘研究室で解析を進めている。これまでの解析から、ミウラ折りパターンにフラップを付加すると干渉が生じ、その際の摩擦によってロック効果がもたらされることが分かった。本発表では、解析の途中経過と、この知見をもとにフラップを別の展開図に移植して作成した新たなフリーズする折り紙について報告する。。

図:1　平面
60°うろこパターン

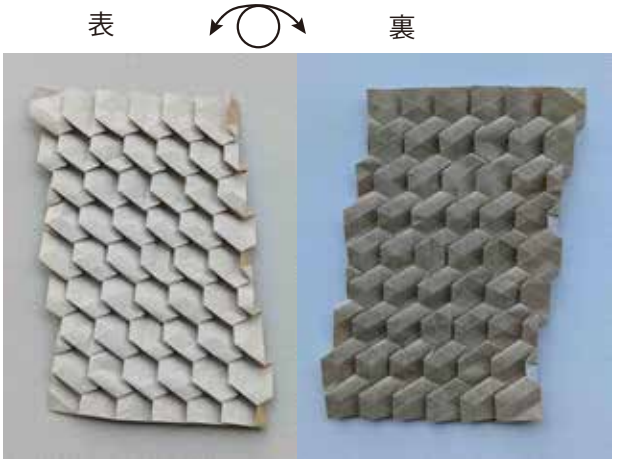
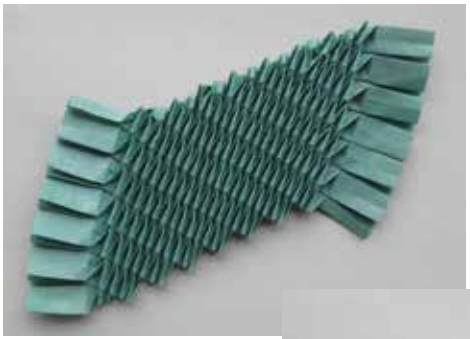
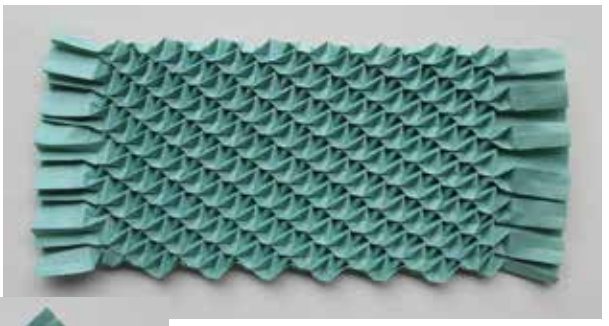


図:2　厚みがあるもの　45°の折り線の場合

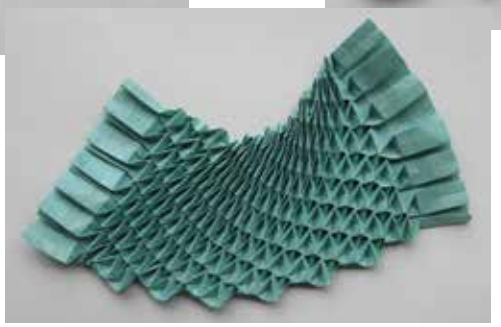
閉じたところ



完全に開いたたところ ; フリーズしている



途中の形:
フリーズしている



複数の箱が折れる展開図の最新の結果について

上原隆平

北陸先端科学技術大学院大学

概要　計算折紙分野では，多面体と，そこから折れる多面体の関係についてよく研究されている．中でも単位正方形を辺でつないだポリオミノと，そこから折れる直交な凸多面体，つまり箱についての研究は自然な問題である．では 1 枚の展開図から複数の箱を折れるだろうか．折れるとすれば，いくつ折れるだろうか．本稿では，ポリオミノを格子線で折る場合に限定し，複数の箱を折れる共通展開図の研究を紹介する．既存の研究により，2 つの箱，3 つの箱を折れるポリオミノが無限に存在することが知られているが，2026 年 10 月上旬には 4 つの箱，5 つの箱が，さらに 11 月には 6 つの箱が折れるポリオミノが無限に存在することが判明した．一連の成果においては，2 重被覆長方形の存在に基づいた構成方法が鍵となる．

1　問題の設定と背景

本稿でいう「箱」とは，辺長が正の整数である直方体であり，辺長の並べ替えで一致する箱は同じものと数える．あるポリオミノが異なる複数の箱の表面をそれぞれ重なりなく覆えるとき，それらの箱に対する共通展開図という．自由な折り線を許す一般の折り紙の問題とは区別し，ここでは格子線に沿う折り方を扱う．

辺長が a, b, c の箱の表面積は $2(ab + bc + ca)$ である．したがって，共通の展開図をもつには各箱の表面積が等しいことが必要である．例えば $1 \times 1 \times 5$ と $1 \times 2 \times 3$ は，ともに表面積が 22 であり，実際に共通の展開図をもつ．ただし，表面積の一致だけでは，共通の展開図の存在は保証されない．

この問題の出発点には，Demaine・O'Rourke の著書 [1] に示された Biedl らの 1999 年の例がある．三谷・上原による研究 [2] では，ランダムに展開する素朴な方法で 2 箱に共通する多数の例が得られ，そうした展開図が無限に存在することも示された．一方，3 箱以上への拡張は容易ではなかった．

2　2 箱から 6 箱への進展

白川・上原は 2012 年，既存の 2 箱の展開図を手がかりに，計算機による探索を使わず 3 箱に共通する展開図を構成した [3]．この展開図は一般化でき，3 箱の共通展開図が無限にあることが示された．この時点での最小の共通展開図の面積は 532 であった．2026 年 8 月には Tardibuono ら [4] が面積 106 の例を報告し，面積が大幅に改善された．

2026 年 10 月，Silverstein 兄弟が生成 AI を用いて 4 箱に共通する面積 532 の例を得たことをきっかけに，大幅に研究が進展した [5]．4 箱の共通展開図が無限に存在することが示され，さらに面積 178 の展開図が発見された．またこの展開図を 5 箱の共通展開図にも拡張することが判明し，面積 358 の 5 箱の共通展開図が示されると同時に，5 箱の共通展開図が無限に存在することが示された．（さらに 11 月 12 日に Rodion Novikov が 6 箱の共通展開図を発見した．これについては発表に向けての準備中である．）

箱の種類数	スライドで示された面積	結果の位置づけ
2	22	最小面積；2007 年の研究
3	$532 \to 106$	2012 年から 2026 年 8 月への改善
4	$532 \to 238 \to 178$	2026 年 10 月の構成と改良
5	$2128 \to 712 \to 358$	2026 年 10 月の構成と改良
6	10 252	2026 年 11 月 12 日報告の構成例

表の 3〜6 箱の数値は構成例の面積であり，最小面積の確定値ではない．

3　構成方法：紙帯から共通の展開図へ

本章では 4 箱の共通展開図の構成において重要な役割を果たした鍵となるアイデアを紹介する．

まず，1 つの紙帯から 4 つの異なる 2 重被覆長方形を作れることを示す．互いに素な奇数 p, q と正実数 a, b に対し，幅 w と長さ L がそれぞれ $w = \frac{ab}{\sqrt{a^2+b^2}}$ と $L = 2pq\sqrt{a^2+b^2}$ である紙帯から，次の 4 種類の長方形を二重被覆できる：$a \times bpq$，　$ap \times bq$，　$aq \times bp$，　$apq \times b$．いずれも長方形の面積は $abpq$ であり，帯の面積 $wL = 2abpq$ と整合する．構成中の帯は実際には輪として考えてよい．

次に，2 重被覆長方形の角を正方形に切り落とし，平坦な状態を膨らませれば箱になるというアイデアである．ここで，同じ帯のどの位置が角に対応するかは折る箱ごとに異なる．ある箱に必要な凹みが別の箱では欠損にならないよう，対応する凸部を配置して整合させることが要点となる．ここで，帯の上側同士・下側同士が接着される性質を利用すれば，上下を独立に扱うことができる．

上記の 2 つのアイデアを用いて，まず 4 つの箱の共通展開図を多角形として構成し，続いて境界の方向と頂点の配置をそろえて格子上のポリオミノに直せば 4 つの箱の共通展開図となるポリオミノを構成できる．ここで複数の折り方で同じ紙の境界が成立するよう調整することが必要である．a, b, p, q を自由に選べるので，4 箱の共通展開図を無限に構成できる．

5 箱の共通の展開図は，4 箱の構成を変形・拡張し，第 5 の折り方を両立させることで構成できる．構成した展開図において，5 箱のどの折り方でも他の部分と独立になる単位正方形の集合を生成 AI で見つけることにも成功した．この集合に属する単位正方形のサイズを $1 \times r$ に置き換えても依然として 5 箱の共通展開図であり，この事実より，5 箱の共通展開図を無限に構成できる．

4　2026 年 11 月 12 日の進展

上記をまとめた文献 [5] を発表後，Rodion Novikov から，生成 AI を用いて 6 箱の共通展開図であるポリオミノを見つけたとの連絡があった．この展開図の面積は 10,252 である．この展開図に 5 箱の共通展開図と同様の技法が適用可能であることを上原が示したことで，6 つの箱が折れるポリオミノが無限に存在することが示された．

5　未解決問題と展望

まず，3〜6 箱に共通する展開図の最小面積の決定が課題として挙げられる．上記の構成例は上界を与えるが，最小性には，より小さい全候補の排除や下界の証明が必要になる．また，7 箱以上，さらには任意の個数に対する共通するポリオミノの存在性が未解決問題として残されている．

参考文献

[1] E. D. Demaine and J. O'Rourke, *Geometric Folding Algorithms: Linkages, Origami, Polyhedra*, 2007.

[2] J. Mitani and R. Uehara, Polygons Folding to Plural Incongruent Orthogonal Boxes, *CCCG 2008*, pp. 39–42, August 2008.

[3] T. Shirakawa and R. Uehara, Common Developments of Three Incongruent Orthogonal Boxes, *International Journal of Computational Geometry and Applications*, Vol. 23, No. 1, pp. 65–71, 2013.

[4] M. Tardibuono et al., Polyomino Nets Covering Three Different Boxes of Area 106 and Related Results, *CCCG 2026*, pp. 143–152, August 2026.

[5] E. D. Demaine, T. Shirakawa, C. Silverstein, R. Silverstein, M. Tardibuono, R. Uehara, Polyominoes Folding into Four and Five Distinct Boxes, *arXiv:2611.04246*, November 2026.

マクスウェル折紙の運動学と力学系

今田 凜輝 [1, 2]

[1] 宇宙航空研究開発機構, [2] 東京大学

「剛体折紙モデルのもとで、どのような折状態や折りモーションが可能か？」という問題を扱う「折紙の運動学」は、折紙の科学・工学の基盤の一つである。中でも、折線パターンが周期性を持った「折紙テセレーション」の運動学は、展開構造や機械的メタマテリアルなどへの応用の基礎となる、重要なトピックである。講演者らは、折紙テセレーションの運動学を体系的に理解し、設計可能にするための理論の構築を目指し、研究を進めてきた [1–6]。一連の研究に共通するのは、「折紙テセレーションは幾何学的に関係づけられたセルの集合であり、セル間のローカルな関係がグローバルな動きを規定する」という視点である。これまで、多くの折紙テセレーションは境界の“長さ”に比例する程度の自由度しか持たない「マクスウェル格子」であることや、隣接セルの連動関係を表す漸化式を「力学系」と解釈すれば、折紙の動きと力学系の数理構造を対応づけできることを見出し、筒状折紙のうねりや順次展開など、様々な動きを理解・設計してきた。本講演では、これらの考え方を説明しつつ、これまでの結果を概観する。

謝辞

本研究は、JSPS 科研費 JP26KJ0431、JP25K24763 の支援を受けたものです。

参考文献

[1] R. Imada and T. Tachi, “Geometry and kinematics of cylindrical waterbomb tessellation,” *Journal of Mechanisms and Robotics* **14**(4), 041009 (2022).

[2] R. Imada and T. Tachi, “Undulations in tubular origami tessellations: A connection to area-preserving maps,” *Chaos* **33**(8), 083158 (2023).

[3] R. Imada and T. Tachi, “Maxwell origami tube,” *Physical Review Research* **7**, 013032 (2025).

[4] R. Imada, A. Adachi, S. Terashima, E. Iwase, and T. Tachi, “Kinematic folding propagation in degree-4 origami strips,” *Extreme Mechanics Letters* **77**, 102337 (2025).

[5] R. Imada, T. C. Hull, J. S. Ku, and T. Tachi, “Nonlinear kinematics of recursive origami inspired by the Spidron,” in *Origami8*, Vol. I, pp. 63–78 (Springer, Singapore, 2026).

[6] R. Imada and T. Tachi, “Programming sequential deployment of origami via kinematic transition fronts,” *Proceedings of the National Academy of Sciences* **123**(37), e2615468123 (2026).

近年の AI を用いた折紙設計等に関する研究紹介

三谷純
筑波大学 システム情報系

2026 年になってから、大規模言語モデル（LLM）や視覚言語モデル（VLM）を折紙に応用する研究が散見されるようになった。COrigami（Google DeepMind ほか）[1]は自然言語で与えられた題材から平坦に折れる蛇腹展開図と立体形状を自動生成し、Learn2Fold [2]は展開図から折り手順を計画する。FoldingAgent [3]は折り方動画を実行可能な折り手順に変換し、OrigamiBench [4]は VLM が折りの因果を理解できるかを評価した。これらに共通するのは「提案は AI、検証は数理」という分業であり、平坦折り判定やシミュレータといった折紙の数理が AI のガードレールとして機能している。

著者はこうした動向を踏まえ、断面を軌道に沿って鏡映しながら掃引することで立体と展開図を生成する設計ツール[5]を、AI エージェント（Claude Code）に直接操作させ、既存作品と異なる魅力的な形を生み出せるかを試みた。エージェントはブラウザ上でアプリを操作し、スクリーンショットを見て形を自己評価するとともに、幾何的な有効性を自動で検証する。

まず、あらゆる可能性の探索を指示すると、AI は 100 例を網羅的に生成し、すべて幾何的に有効であったが、審美的には劣るものであった。次に著者の過去作品 6 点を示すと、AI は「上下の縁」「周期の整合」「控えめな振れ幅」などの要素を言語化して作品を再現し、36 例のバリエーションを作ったが、いずれも既存作品の延長にとどまった。そこで「長さが 0 の辺が生じる特異点をうまく使うとよい」と助言を与えると、AI は特異点で形がどう切り替わるかを可視化する道具を自ら作り、それを設計規則に落とし込んで、著者が高く評価する例を生み出した（図 1）。

AI が網羅的な生成と検証を担い、人間が審美的な評価と方向づけを担う分業は、創作支援における AI 活用の一つの形と考える。

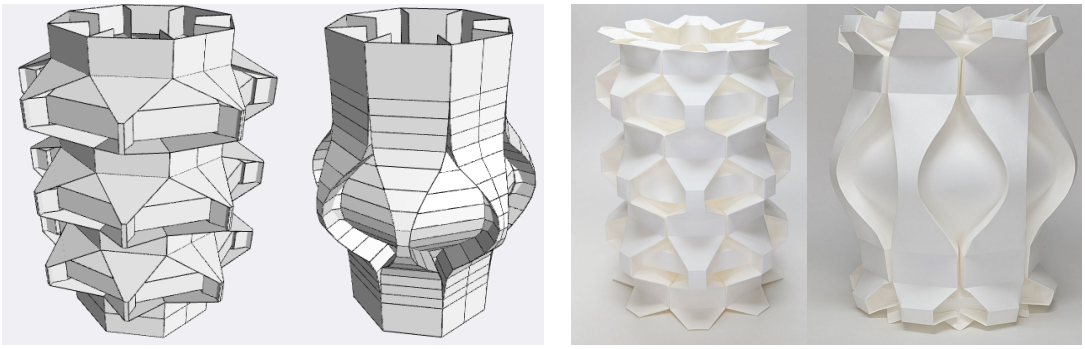


図 1 AI エージェントが特異点を活用して設計した鏡映掃引型の立体折紙モデル（左）と制作物（右）

参考文献

[1] T. Zahavy, S. Hou, T. Tumiel, et al.: COrigami: An AI Pipeline for Co-Designing Flat-Foldable Visually Recognisable Origami, arXiv:2606.26299, 2026.
[2] Y. Huang, Y. Chen, Y. Jiang, J. Han, Z. Tu, Y. Yang, C. Jiang: Learn2Fold: Structured Origami Generation with World Model Planning, arXiv:2603.29585, 2026.
[3] M. Moriya, S. Raab, Y. Vinker, T. Dekel: FoldingAgent: Inferring Parametric Origami Procedures from Demonstration Videos, arXiv:2609.00377, 2026.
[4] N. Agarwal, Y. Wu, X. Guan, et al.: Can AI Understand the Language of Origami?, arXiv:2603.13856, 2026.
[5] Jun Mitani, "Column-shaped origami design based on mirror reflections", in Proc. Of ICGG2012, 2012.

Origami-Inspired Collagen Scaffolds for 3D Cell Culture: Biofabrication and Computational Modeling

Luis Diago, Ichiro Hagiwara, Yuko Adachi (Meiji University);
Miho Shimizu, Yoriko Atomi (The University of Electro-Communications, UEC);
Shinomi Yagi (Nippi, Inc.)

Meiji University Research Seminar | 11 December 2026

Objective and approach

We investigate collagen scaffolds based on honeycomb (HC), Nojima polyhedron (NP), and Tachi–Miura polyhedron (TMP) architectures, integrating CAD design, extrusion-based biofabrication, and cell-dynamics simulation.

Biofabrication and measured geometry

Nippi fabricated HC after scaling the CAD design 1.5× in XY (Z unchanged). The original-size HC was not tested with collagen because ink spreading was expected to obstruct its pores. A crosslinked 27G HC specimen was measured using calipers; values are approximate and represent multiple-point averages [1,2].

Feature	Scaled CAD (mm)	Nippi measured (mm)	Difference
Height	4.50	5.11 (4.8–5.4)	+13.6%
Wall thickness	0.33	0.94 (0.8–1.2)	+184.8%
Channel opening	1.95	0.64 (0.5–0.75)	−67.2%
Outer X / Y	20.99 / 21.00	19.98 / 20.65	∼ −4.8% / −1.7%

Nominal CAD-to-print comparison assumes corresponding wall/channel features; caliper measurements are indicative rather than metrological validation.

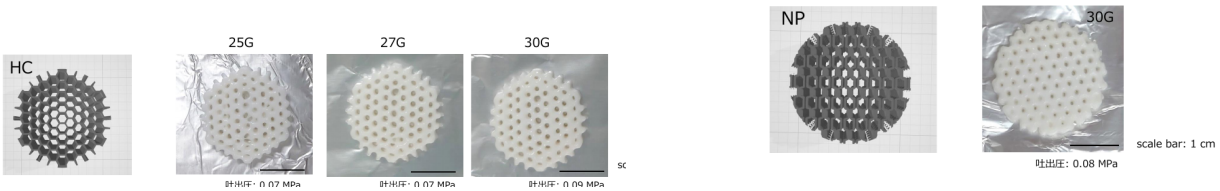


Figure 1: Selected images from Nippi biofabrication reports [1,2].

CompuCell3D myoblast-expansion simulations

An independent CompuCell3D v7 implementation inspired by Kagawa and Kino-oka [3] simulated 169 initial cells over 240 h. Final cell counts were 4,293 (Plain), 9,433 (Laminin), and 9,600 (EGF), corresponding to 44.7%, 98.3%, and 100% confluence. At 120 h, proliferative fractions were 37.8%, 65.9%, and 88.1%, respectively.

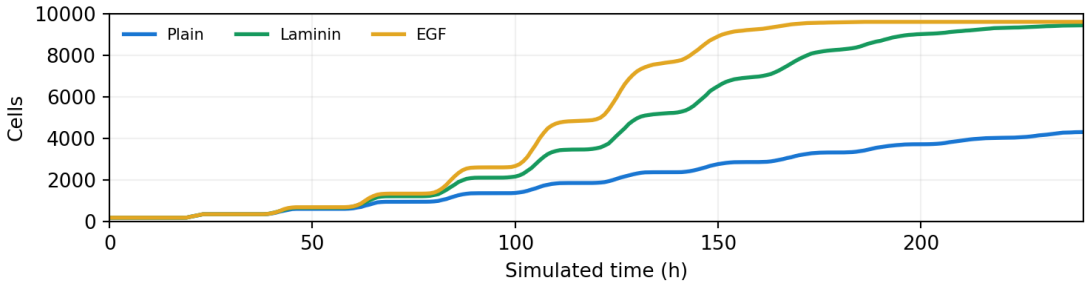


Figure 2: Cell population trajectories from CompuCell3D v7 CSV files (without smoothing).

Next steps

UEC plans to seed L6 myoblasts onto HC, quantify adhesion and proliferation, and assess confocal live imaging of microtubule dynamics. The ∼5 mm scaffold thickness and hydrated transport require testing. Experimental observations will inform future geometry-aware simulations; cell-culture results are not yet available.

References

[1] S. Yagi, *Nippi HC/NP/TMP Printing Progress Report* (2 Oct 2026, internal). [2] S. Yagi, *Nippi HC Dimensional Measurements* (30 Oct 2026, internal). [3] Y. Kagawa and M. Kino-oka, *R. Soc. Open Sci.* **3**, 160500 (2016), doi:10.1098/rsos.160500. [4] M. H. Swat et al., *Methods Cell Biol.* **110**, 325–366 (2012).

空間充填性を保つ多面体の連続的平坦化問題

松原 和樹 （埼玉大学教育学部）
奈良 知惠 （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（[1] 参照）について，辺や面をできるだけ折らない連続的平坦化手法を考察してきた（[2] 参照）。ここで，多面体の連続的平坦化とは，多面体の表面を切断したり伸縮させたりすることなく，連続的な変形によって平坦に折り畳むことをいう（例えば，図 1）。

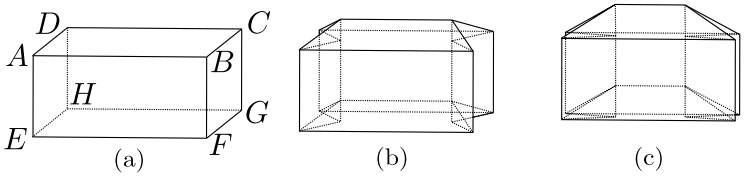


図 1: (a) 直方体，(b) 連続的平坦化動作の途中の状態，(c) 平坦に折り畳まれた状態.

本研究では，空間を隙間なく敷き詰める多面体に着目し，合同な多面体のみからなる空間充填に対して，隣接する多面体が境界部分を共有し続けながら，すべての多面体を同時に同一の動作で平坦化し，その変形の途中において空間充填性が保たれるような連続的平坦化動作の存在性を考える。ただし，平坦化が完了した状態では空間充填性を要求しない。また，隣接する多面体同士が面全体で接する face-to-face な空間充填であることは仮定しない。例えば，図 1 に示した直方体の連続的平坦化を利用すると，図 2 のように空間充填性を保ちながら連続的に平坦化することができる。

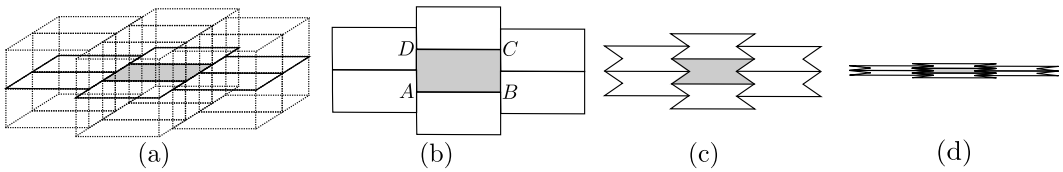


図 2: (a) 直方体による空間充填，(b)–(d) 上面と底面を省略し，側面の平坦化動作を上方から見た図

本講演では，辺の剛性に着目して，次の結果を紹介する。

定理. 次のような底面をもつ直角柱 P に対して，空間充填性を保つ連続的平坦化が可能な P による空間充填が存在する。

(1) 底面が三角形である。
(2) 底面が平行四辺形である。
(3) 底面が非凸四角形 $ABCD$ であり，$AB + CD = BC + AD$ を満たす。

[1] E. D. Demaine and J. O'Rourke, *Geometric Folding Algorithms: Linkages, Origami, Polyhedra*, Cambridge University Press, 2007.

[2] K. Matsubara and C. Nara, Continuous flattening of non-convex quadrangular pyramids with every edge rigid, *J. Inf. Process.* **33**, 1005–1009 (2025).

正二十面体上の単純な閉じた準測地線と二面体

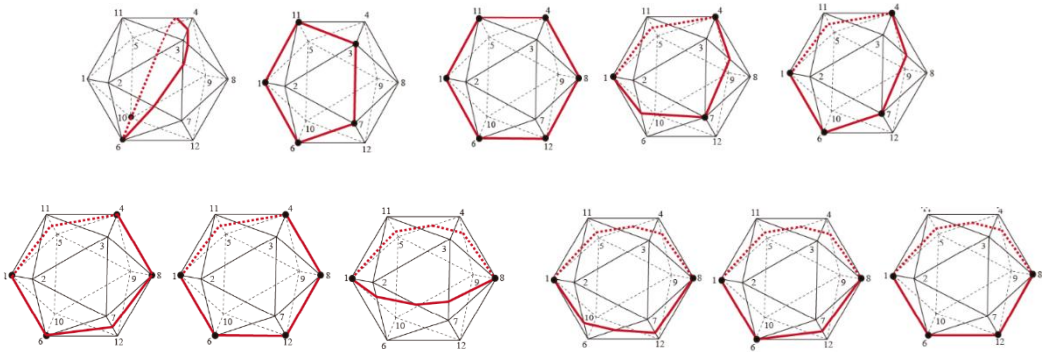
奈良知惠（明治大学 MIMS）

凸多面体の表面を2つに分割し縁をずらしてから再び縁を糊付けする操作を「**準ねじり(quasi-twisting)**」と呼ぶ。例えば，正四面体は準ねじりの操作で長方形の二面体に変形される。また，立方体や正八面体も準ねじりの操作によって多角形の二面体に変形できることが知られている[1]。そこで，残りの正多面体である正十二面体や正二十面体では二面体になるような準ねじり操作が存在するだろうか。これを解くための一つの手段として，分割線に注目する。

凸多面体 P 上の曲線が「どの点においても表面を両側共に丁度π（ラジアン）に分ける」とき**測地線**という。この条件を緩和して「条件 C：どの点においても表面をどちらの側もπ以下に分ける」とき**準測地線**という。したがって、測地線は頂点を通過することはできないが，準測地線は頂点を通過することができる。特に（準）測地線が自分自身と交差しないとき**単純**，始点と終点が同じとき**閉**（準）測地線という。正多面体の単純な閉測地線については Fucks-Fucks [2]の研究があり，例えば，正二十面体には，合同を除いて，３本の単純な閉測地線が存在する。

さて，「凸多面体上には単純な閉準測地線は何本存在するか？」という問いに対して，立方体には（測地線を除くと）１５本存在することが知られている［3]。ここでは，正二十面体について考察する。詳細については論文を参照のこと。

定理［4］正二十面体上には（測地線を除いて）１１本の単純な閉準測地線が存在する，ただし，合同なものを同一視する。



[1] O'Rourke, J., Lebiw, A., Uehara, A., Nara, C., Hull, T., Mundilova, K., Tkadlec, J. Quasi-twisting convex polyhedra, *Canad. Conf. Comp. Geom*. August, 2022.

[2] Fuchs, D.B. and Fuchs, E., Closed geodesics on regular polyhedra. *Moscow Mathematical J*., 7 (2) :265—279 (2007).

[3] MIT CompGeom Group, Akitaya, H., Demaine, E.D., Hesterberg, A., Hull, T. C. , Lebiw, A., Mundilova, C., Nara, C., O'Rourke, J., Stock, F., Tkadlec, J., Uehara, R. Quasigeodesics on the cube. *Canad. Conf. Comp. Geom*. August, 2025.

[4] Nara, C. and O'Rourke, J. Quasigeodesics on the regular icosahedron. To appear in *CCIS*, 3183, Springer.