

ミウラ折り扇を用いた空間・流体・時間軌跡の可視化と身体芸術的応用

Visualization of spatial, fluid, and temporal trajectories using Miura fold fan and Its Physical Artistic Applications

杉山 有希子(Yukiko Sugiyama)¹, 杉山 文子 (Fumiko Sugiyama)²,

萩原 一郎(Ichirow Hagiwara)¹

¹明治大学 (Meiji University), ²就実大学 (Shujitsu University)

e-mail: sugiyuki0910@gmail.com

1 概要

日本の伝統的道具「扇」に折紙工学と身体芸術を応用し、空気と空間、時間の編成装置として再解釈するものである。

ミウラ折りを用いた構造により、空間構造・流体・動作軌跡の交差を可視化し、数理的かつ芸術的意義を探る。

2 本研究の目指すもの

本発表では、折紙構造を持つ「扇」を中心とした空間的インスタレーションについて報告する。具体的には、パフォーマーとなる人物が最初に二次元的なドローイングを行い、その脳波をモニタリングし、数値変動がトランス状態（ β 波や γ 波の増加）に達すると、測定装置によって空間にスモークが発生する。このスモークの発生により、二次元的な動作から三次元的な空間への展開が生まれる。その後、扇による立体的な気流操作が行われ、スモークを媒体として時空間（四次元）のドローイングへと発展していく。

扇はミウラ折りなどに代表される折紙の「可展構造」を備えており、開閉動作が複雑な渦構造や圧力差を生成し、気流の動的構造を“立体的”かつ“時間的”に可視化する。扇の折り畳みと展開の構造は、空気という流動体に多次元的で美的な秩序を与える役割を持つ。

本研究の新規性は、扇の動きを通じて二次元の平面から三次元の空間へ、そして時間軸を含めた四次元的な時空間への展開を具体的に実現する点にある。これにより、扇という伝統的な道具が持つ折紙的な構造美と、機能的な可能性を新たな視点から示し、応用数理分野における空間と時間の相互作用の理解に視覚領域から貢献する。

今後の展望として、空気の流動構造の数理モデル化をさらに進め、扇の運動と空間の動的変化との関係を近赤外線にて動画撮影及び画像解析^{[1],[2]}、実空間の美的構造化手法としての展開を目指す。

また、折紙工学を使った衣服は世界にもまだ数少ない。一つは我々の技術^{[3],[4]}を用いた三宅一生氏の折畳衣服^[5]。昨今、メタマテリアルの宝庫として、注目されている切り紙ハニカムは、ディアゴラの手法^[6]のみが立体構造物への対応が可能であり、エルゼビア 2023 年 4 月、5 月材料部門 download 数 No. 1^[7]と大変注目されている。これによる衣服も図 1, 2 に示

すように、美しい造形のものが得られ、「身体性」^[8]をベースに切り紙・折り紙衣服を折紙式プリンター^[9]で制作し、これらの新作を萩原研究室から発表予定である。



図1 ミウラ折衣装のイメージを生成 AI にて作成



図2 染色された衣服に杉山文子氏がミウラ折りを施した衣装実物

謝辞

本研究は、明治大学 MIMS 数理科学プロジェクトのご支援を受けて実施されたものであり、ここに記して深く感謝申します。

参考文献

- [1][Profile | Yukiko Sugiyam Photography](https://www.youtube.com/watch?v=hDvbnjXFMsY)<https://www.youtube.com/watch?v=hDvbnjXFMsY>
- [2]杉山有希子, CRASH/PHASES, 青幻舎(2022 年 2 月)
- [3]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, 第 78 巻第 789 号(2013-5), pp. 1561-1569.
- [4]萩原一郎, NHK ニュースセブン (2018 年 9 月)
- [5]萩原一郎, 奈良知恵, 寄り道の科学シリーズ, 折り紙の本, 日刊工業新聞社(2025 年 2 月)
- [6]ディアゴ・ルイス, 篠田淳一, 山崎桂子, 萩原一郎, 複雑構造に対する切り紙ハニカムの生成法に関する研究, 日本機械学会論文集, 2023 年 89 巻 917 号, 発行日: 2023 /01/25,
- [7]<http://dx.doi.org/10.2139/ssrn.4121116>
- [8][DOI](https://doi.org/10.1299/transjsme.22-00273)<https://doi.org/10.1299/transjsme.22-00273>.
- [8]http://www.unicharm.co.jp/company/news/2019/1211066_13296.html
- [9]<https://webronza.asahi.com/science/articles/2018100900012.html>

3次元細胞培養のためのタチ-三浦および野島多面体によるハニカム構造の構築

Construction of honeycomb structures with Tachi-Miura and Nojima Polyhedra for 3D cell culture

ディアゴ ルイス (Diago Luis)^{1,2}, 安達悠子 (Yuko ADACHI)²,
 萩原一郎 (Ichiro HAGIWARA)²
¹株式会社インターロカス (Interlocus Ltd. Co), ²明治大学 (Meiji University)
 e-mail: luis_diago@meini.ac.jp

1 Abstract

This work compares the patterns of Tachi-Miura vs Nojima Polyhedra and subsequently designs and analyzes their corresponding cellular structures. For the Tachi-Miura polyhedron (TMP), a 3x3 basis cell with rotational symmetry is used to construct an accordion-like pattern, whose adjacent planes around the cuts are not of equal size. For the Nojima polyhedron (NP), a 4-layered basis cell is shifted and rotated to form a periodic pattern. To allow planar folding of the resulting 3D structures, NP cells require shifting despite having a matching number of layers. When only the three overlay layers are retained, the NP structure resembles the cellular configuration of the TMP in both shape and folding behavior during cell culture flow simulations.

2 Tachi-Miura vs Nojima Polyhedra

Figure 1 (from [2]) compares NP and TMP built via the pairing technique. Both have similar sheet counts and parameters but differ in hinge design and symmetry.

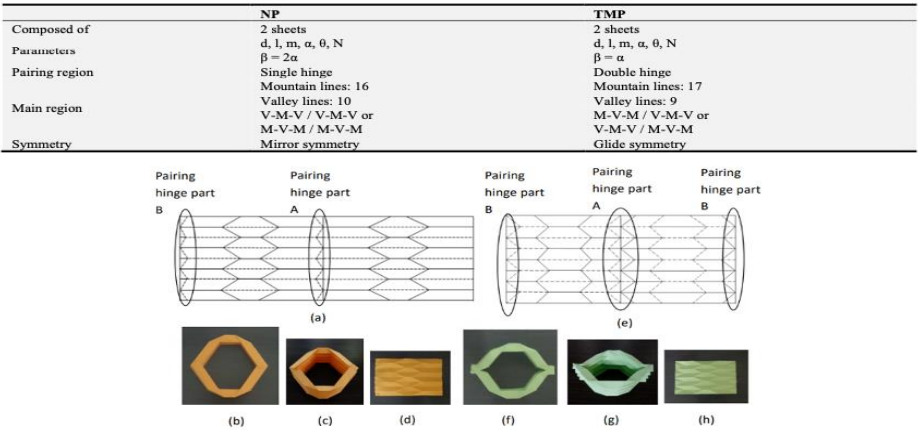


Fig.1 Comparison of NP (a, b, c, d) and TMP (e, f, g, h) [2]

3 Construction of Honeycomb structures

Figure 2 shows the base cell from [1] (bottom left) used to construct a TMP-based honeycomb. The top view shows the accordion pattern, and its simulation in

origamisimulator.org is at the bottom right. The pores are asymmetric due to discontinuous vertical lines. Regular hexagonal pores can be formed by shifting and rotating 4-layer base cells into a periodic NP pattern. Perfect alignment causes tangential gaps (not shown), which may enhance cell proliferation by inducing lateral flow. When layers are shifted and aligned (Fig. 3), the NP pattern mimics the TMP structure in shape and folding behavior.

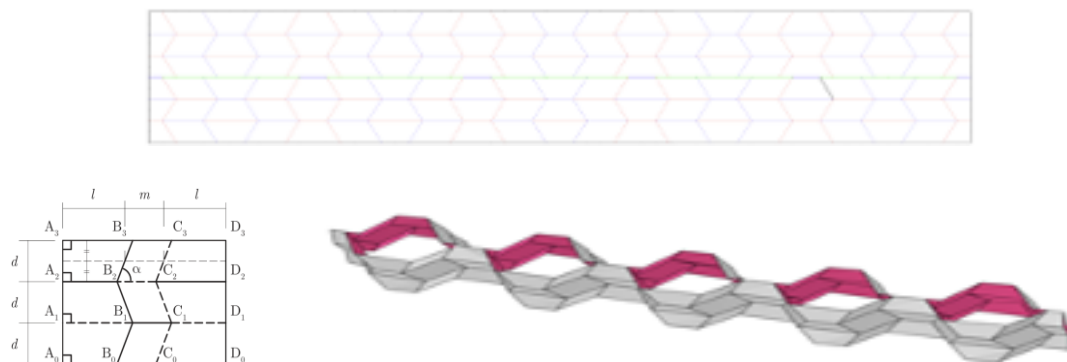


Fig.2 Building and Visualization of Honeycomb structure for the TMP [1]



Fig.3 Building a pattern for the NP-based Honeycomb structure

4 Conclusions and Future Works

In this work, NP cell structures were designed and compared to TMP, revealing new internal flow patterns. We are investigating whether non-axial flow directions may enhance cell proliferation.

Acknowledgements

This work was supported by MEXT Promotion of Distinctive Joint Research Center Program Grant Number JPMXP0724020292.

参考文献

- [1] K.Miura, T.Tachi, (2010). Synthesis of rigid-foldable cylindrical Polyhedra. Symmetry: Art Sci. 1-4.
- [2] A. Abe, I. Hagiwara, Y. Yang, C. Nara. (2022) Characteristic Analysis of Two Pairing Origami Polyhedrons and Their Application to Beverage Containers. International Journal of Mechanical Engineering and Applications. Vol. 10, No. 6, pp. 144-159.

数理的アプローチによる生物模倣ハニカムコアのせん断剛性の解明

Shear Stiffness of Bio-Inspired Honeycomb Cores with Square Tubes Using a Mathematical Approach

羽山 涼介 (Ryosuke Hayama)¹, 石田 祥子 (Sachiko Ishida)¹
¹明治大学 (Meiji University)
 e-mail: sishida@meiji.ac.jp

1 緒言

ハニカムコアは蜂の巣に見られる正六角形セルの集合体であり，軽量かつ高強度，高いエネルギー吸収性能を有する構造として広く利用されている．本研究で扱う生物模倣ハニカムコアは，昆虫の鞘羽に見られる構造を模倣して，従来の正六角形セルからなるハニカムコアに正方形セルを追加した新形状ハニカムコアであり，圧潰実験により面外方向の強度が向上することが報告されている[1]．本研究では，Gibson and Ashby[2]のせん断理論を拡張した数理的手法により生物模倣ハニカムコアのせん断剛性を定式化し，せん断実験の結果を基にせん断剛性の理論式の妥当性を検証することを目的とする．

2 生物模倣ハニカムコアの設計

図 1 に生物模倣ハニカムコアの形状と設計変数を示す．本研究では，正六角形セルとなるよう $\theta = 30^\circ$ ，正方形セルとなるよう $\phi = 45^\circ$ に固定する．また，簡単のため，正方形セルの一边の長さ x は接着部の長さと同じとする．この時，式(1)が成り立つ．

$$x = \frac{l}{2 + \sqrt{2}} \tag{1}$$

よって，生物模倣ハニカムコアの独立な設計変数は，正六角形セルの一边の長さ l ，シート材の厚み t ，コア高さ h の 3 つとなる．なお，ハニカムコアは厚み t のシート材を積層・接着して成形することから，接着部の厚みは $2t$ となる．表 1 に示す寸法で生物模倣ハニカムコア A'，B'，C'，D' の 4 種類をクラフト紙で作成した．

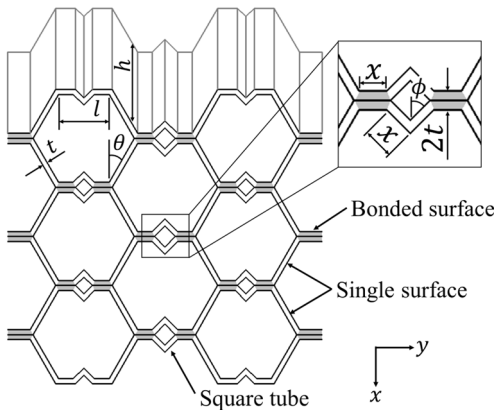


表 1 生物模倣ハニカムコアの寸法

Model	l [mm]	x [mm]	t [mm]	h [mm]
A'	7	2.05	0.24	20
B'	10	2.93		
C'	13	3.81		
D'	16	4.69		

図 1 生物模倣ハニカムコアの形状と設計変数

3 生物模倣ハニカムコアの理論式

図1に示すように x 軸, y 軸を面内方向に, z 軸を面外方向にとる. Gibson and Ashby[2]は, 最小ポテンシャルエネルギーの原理および最小コンプリメンタリエネルギーの原理により, 従来のハニカムコアのせん断剛性を定式化した. 同様の手順を生物模倣ハニカムコアに適用すると, 正方形セル壁と接着面の厚み増加の影響を考慮して, 生物模倣ハニカムコアのせん断剛性 G_{zx} は

$$\frac{G_{zx}}{G_s} = \frac{7 - 2\sqrt{2}}{3\sqrt{3}} \left(\frac{t}{l} \right) \quad (2)$$

と導出できた. ここで, G_s はシート材の横弾性係数である. 式(2)は l と t の関数であり, h に依存しない.

4 せん断剛性の理論式の検証

表1に示した寸法の生物模倣ハニカムコアの試験片において準静的なせん断実験を行い, 変位と荷重の関係を応力とひずみの関係に変換し, せん断剛性の実験値を得た. さらに, 表1の寸法を式(2)に代入し, せん断剛性の理論値を算出した. それらの結果を図3に示す. 正六角形の一辺の長さ l が小さいほどせん断剛性が高くなる傾向は理論値と実験値で一致した. 理論値は実験値と定量的には一致せず, 理論値が高くなったが, 実験では試験片の形状のばらつきや装置のあそびが影響することを考えると一般的な傾向と言える.

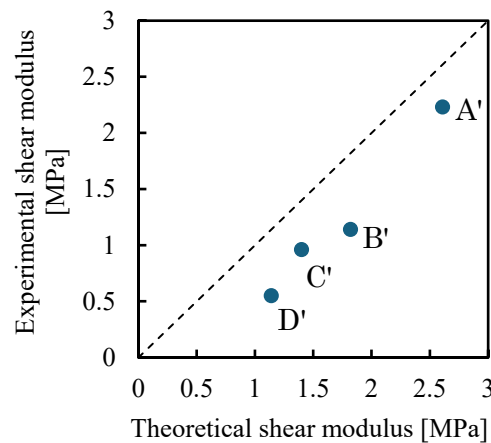


図3 生物模倣ハニカムコアのせん断剛性 G_{zx} の実験値と理論値

5 結言

生物模倣ハニカムコアのせん断剛性の理論値はせん断実験の結果と定量的には一致しなかったが, 正六角形の一辺の長さ l の変化に対するせん断剛性の傾向をとらえることができた.

謝辞 本研究は JSPS 科研費学術変革領域研究(B)24H00824 の助成を受けた.

参考文献

- [1] Ben Yue, 石田祥子, 齊藤一哉, 大久保洋志, 生物を模倣した角筒を有するハニカムコアの面外圧潰特性, 設計工学, 59 巻 6 号(2024), 287-298
- [2] L. J. Gibson, M. F. Ashby, Cellular Solids, Cambridge University Press, 1988.

正五角形二面体の最遠点写像

Farthest point map on the doubly covered regular pentagon

植田 彩加 (Sayaka Ueda)¹, 山岸 義和 (Yoshikazu Yamagishi)¹

¹ 龍谷大学 (Ryukoku University)

e-mail : y25m004@mail.ryukoku.ac.jp

1 概要

多面体上の最遠点写像は、星展開とボロノイ分割によって構成される。正五角形二面体の場合、最遠点写像 f の力学系を考えると、ある部分領域において f は対蹠的 $f(f(p)) = p$ となる。

2 正五角形二面体と最遠点写像

M を正五角形とし、その頂点を A, B, C, D, E とする。 M のコピーを 2 枚用意して周を貼りつけて封筒を作る。2 点 $p, q \in M$ について、 p を表面の点、 q を裏面の点と考えると、 p から q までの最短経路は、周上の点 s を経由した 2 本の線分 $[p, s], [s, q]$ による折れ線で表される。 p と q の“距離”を

$$\rho(p, q) = \min\{|p - s| + |s - q| \mid s \in \partial M\}$$

で定義する。

$$f(p) = \{q \in M \mid \rho(p, q) \geq \rho(p, q'), \forall q' \in M\}$$

を、正五角形二面体における p の最遠点集合と呼ぶ。

一般に、曲面 M 上において最遠点写像が一価写像で $f \circ f = \text{id}$ をみたすとき、 M は Steinhaus surface であるという。凸多面体 P の境界面 $M = \partial P$ は Steinhaus でない。したがって f を (多価写像ではあるが) 力学系として考えることができる。多面体上の最遠点写像に関する最近の結果として [1] がある。凸多面体が退化した場合として、多面体の二重被覆空間上の最遠点写像については [2, 3] がある。

3 最遠点写像の力学系

M の重心を O とし、頂点を A, B, C, D, E とする。対称性により M の片面を 10 分割して、 $p \in \Delta := \triangle(O, A, (A+B)/2)$ としてよい。辺 AB, BC, CD, DE, EA に関する p の鏡映点を p_1, p_2, p_3, p_4, p_5 とする。10 個の頂点 $A, p_1, B, p_2, \dots, E, p_5$ を結ぶ多角形は、正五角形二面体の星展開と呼ばれる。(図 1(a))

三角形 $\triangle(p_i, p_j, p_k)$ の外心を $\psi_{ijk}(p)$ で表す。

補助定理 1 Δ の分割 $\Delta = \Delta_1 \cup \Delta_{21} \cup \Delta_{22}$ が存在して、 $p \in \Delta_1^\circ$ のとき $f(p) = \{\psi_{134}(p)\}$, $p \in \Delta_{21}^\circ$ のとき $f(p) = \{\psi_{135}(p)\}$, $p \in \Delta_{22}^\circ$ のとき $f(p) = \{\psi_{345}(p)\}$ である。(図 1(b))

鏡映変換 $r : M \rightarrow M$ を、 $r(A) = D, r(B) = C, r(C) = B, r(D) = A, r(E) = E$ となるように与える。

$$r\psi_{134}(\Delta_1) \subset \Delta_2, r\psi_{135}(\Delta_{21}) \subset \Delta_1, r\psi_{345}(\Delta_{22}) \subset \Delta_1$$

が成立つ。

定理 2 $r \circ \psi_{134} \circ r \circ \psi_{135} = \text{id}$

証明 直線 AB と CD の交点を F とし、直線 AE と CD の交点を G とする。 $q = \psi_{135}(p)$ は三角形 $\triangle(A, F, G)$ に関する p の等角共役点、すなわち

$$\angle(A, F, p) = \angle(G, F, q), \angle(F, G, p) = \angle(A, G, q), \angle(G, A, p) = \angle(F, A, q)$$

である。したがって $\psi_{135}\psi_{135} = \text{id}$ である。

また、 $r\psi_{134}r = \psi_{135}$ が成立つ。あわせて $r\psi_{134}r\psi_{135} = \text{id}$ を得る。(qed)

$\Delta_1 \cap \Delta_{22} = \Lambda$ と表す。点列 $\{q_i\}_{i \geq 0}$ が p の軌道であるとは、 $q_0 = p, q_{i+1} \in f(q_i)$ ($i \geq 0$) が成立つときをいう。最遠点写像 f の極限集合 (f の軌道の集積点の集合) を Ω で表す。

定理 3 $\Omega \cap \Delta = \Lambda \cup \Delta_{21} \cup \psi_{135}(\Delta_{21})$.

証明 $p \in \Delta_{22}$ に対して点列 $\{\hat{q}_i\}$ を $\hat{q}_0 = p, \hat{q}_{i+1} \in rf(\hat{q}_i) \subset \Delta$ で定義すると、 $\exists \tilde{q} = \lim_{i \rightarrow \infty} \hat{q}_i \in \Lambda$. (qed)

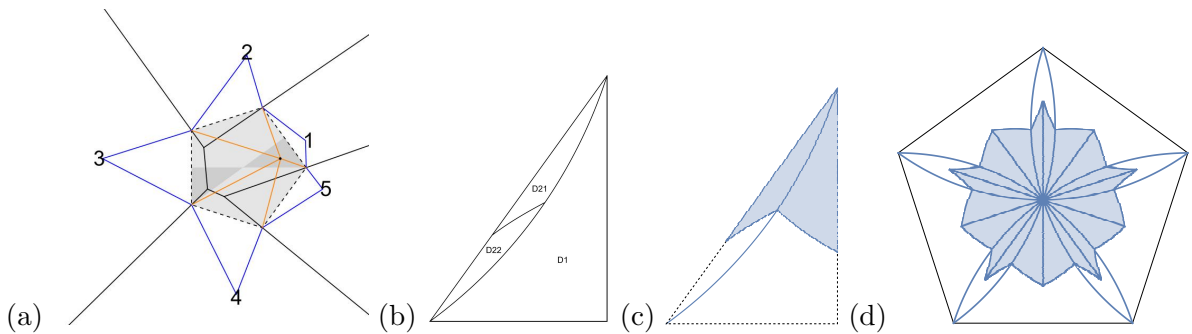


図 1. (a) 正五角形二面体の星展開. (b) パラメータ空間の分割. (c) 最遠点写像 f の極限集合 $\Omega \cap \Delta = \Lambda \cup \Delta_{21} \cup \psi_{135}(\Delta_{21})$. (d) 最遠点写像 f の極限集合 Ω .

謝辞 本研究は JSPS 科研費 24K06838 の助成を受けています。

参考文献

- [1] Y. Yamagishi, The farthest point map on the 4-cube, *European J. Math.*, 11 (2025), 48.
- [2] J. Itoh, C. Vilcu, Farthest points and cut loci on some degenerate convex surfaces, *J. Geom.*, 80 (2004), 106-120.
- [3] S. Ueda, Y. Yamagishi, Farthest point map on the doubly covered parallelotope, *Hiroshima Math. J.*, 55 (2025), 89-107.