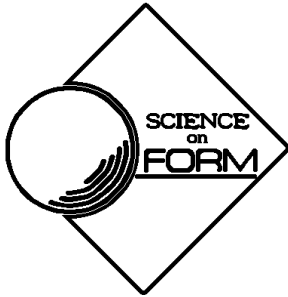
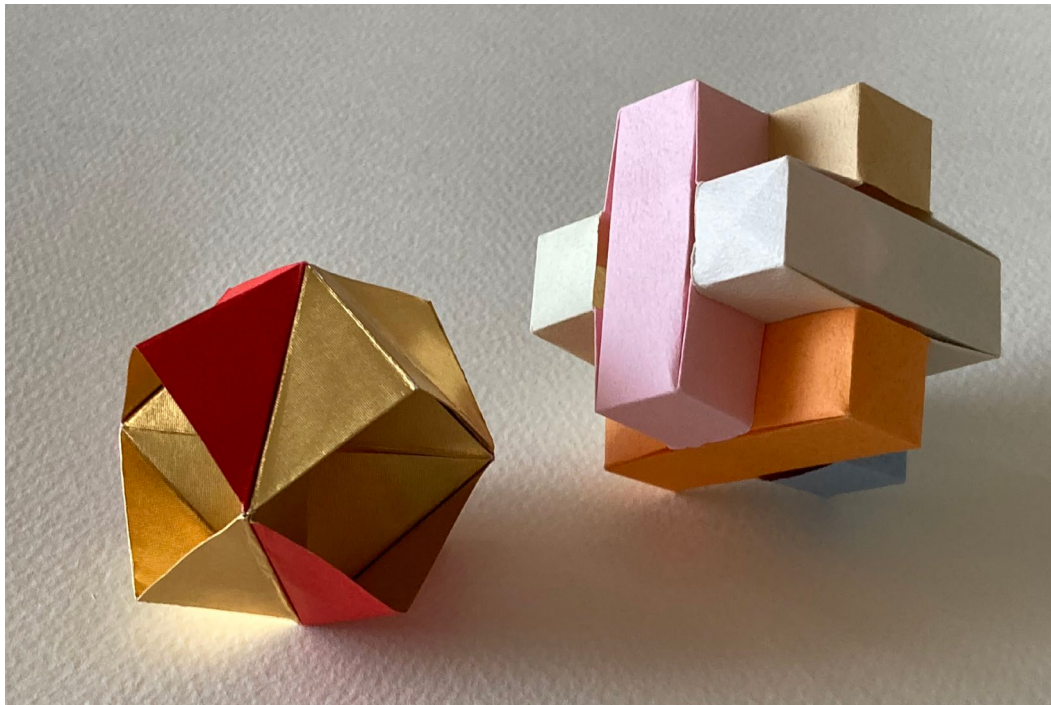


形の科学シンポジウム講演予稿集 Vol. 10 No. 1 (2025 年 6 月)

Proceedings of Symposium of the Society for Science on Form, Japan



第 98 回 形の科学シンポジウム 「折り紙の科学 平面と立体の交差点」



「表裏同等 1 枚折り菌部星、6 枚組 19 キューブ」(前川淳)

会期: 2025 年 6 月 14 日(土)、15 日(日)

会場: 千葉工業大学 津田沼キャンパス 7 号館

形の科学会

<https://katachi-jp.com/>

第 98 回 形の科学シンポジウム「折り紙の科学 平面と立体の交差点」

【主催】形の科学会 【共催】千葉工業大学

【会期】2025 年 6 月 14 日（土）、15 日（日）

【会場】千葉工業大学津田沼キャンパス 7 号館 4 階 〒275-0016 千葉県習志野市津田沼 2-17-1

講演会場：7404 号室～7405 号室、 展示会場：7403 号室

【オンライン】オンライン講演者とオンライン聴講者に接続情報を通知

【代表世話人】石原正三（埼玉県立大学名誉教授、科学芸術学際研究所理事長）

E-mail: shozo8961@gmail.com

【世話人】 手嶋吉法（千葉工業大学 工学部 宇宙・半導体工学科）

E-mail: yoshinori.teshima@it-chiba.ac.jp

【参加費】会員・非会員とも同額

対面参加： 一般 5000 円、学生 2000 円

オンライン参加： 一般 8000 円、学生 4000 円

※公開講演のみを対面聴講の場合の参加費は 500 円

【懇親会】 6 月 14 日（土）18 時頃から、1 号館 20 階ラウンジにて開催

【懇親会費】 一般 5000 円、学生 2000 円

【WEB サイト】<https://katachi-jp.com/sympo98>

プログラム

（変更される場合があります）

中村健蔵（幾何学デザイン工房）…………… 3

9:50-10:15

生徒が個別調整する生成 AI フィードバックⅡ

井戸季詠子（いずみの森義務教育学校）、後藤
勝洋（渋谷本町学園）、松浦執（東京学芸大学）

…………… 6

6 月 14 日（土）

8:30 受付

8:55 開会の辞

形と知（3 件）

9:00-9:25

科学リテラシーの方法 1

根岸利一郎（科学リテラシー研究所）、齋藤茂
（まなびクラブ・リクウェイ）、杉田一郎（同）、
牧ロー男（同）、三上修平（同）、関口久美子（埼
玉工業大学）、高橋優（同）…………… 1

9:25-9:50

工芸と幾何学デザインのコラボ②印伝の文様と
ゆらぎ

10:15-10:35 休憩

形の科学一般（3 件）

10:35-11:00

ドーム空間での 3D モデル活用をより身近にす
る試み

吉岡翼（富山市科学博物館）、中ユミ子（サイ
エンスヒルズこまつ）、井内麻友美（オリハルコ
ンテクノロジーズ、郷土と天文の博物館）、高幣
俊之（オリハルコンテクノロジーズ）…………… 9

11:00 -11:25

X 線 CT 技術を適用したジュラ紀貝類化石の形状構築

松岡篤(新潟大学、千葉工業大学)、吉岡翼(富山市科学博物館) 11

11:25-11:50

ペルム紀放散虫 Albaillellaria にみられる二形性の形態的特徴と原因

伊藤剛(産業技術総合研究所) 13

展示 (4 件) (各 5 分間、質疑無し)

11:50-11:55

放散虫マリンスノーのイメージ動画上映

北嶋円(新江ノ島水族館)、吉岡翼(富山市科学博物館)、松岡篤(新潟大学)、三次明日香(Space Travelium TeNQ) 15

11:55-12:00

蛋白質の立体構造模型の開発

雪松遥人(千葉工業大学)、坂本泰一(同)、河合剛太(同)、手嶋吉法(同) 16

12:00-12:05

木造継手の立体教材の開発(第 5 報)

原嶋耕介(千葉工業大学)、手嶋吉法(同) 17

12:05-12:10

機械機構を学ぶ為の立体教材の開発(第 4 報)

神長輝(千葉工業大学)、手嶋吉法(同) 19

12:10-13:40 昼休み

(12:20-13:20 運営委員会)

折り紙の科学 (3 件)

13:40-14:05

折り紙開閉機構に基づく連結多面体の幾何学変

形と空圧駆動

遠藤洋史(富山県立大学)、高橋昂也(同) 21

14:05-14:30 (オンライン講演)

折り紙工学による宇宙機タンク用ダイアフラムの研究

奥泉信克(室蘭工業大学)、谷弦耶(同) 23

14:30-14:55

ユニット折り紙にルーツを持つモデリングスキルで準結晶もダイヤモンド結晶も作れます! もちろん模型の話です。

八十嶋章雄(SSDS Symmetric) 25

14:55-15:10 休憩

形の科学一般 (3 件)

15:10-15:35

置換パズルに関する研究(1): 場合の数と最短コストについて

東汐夏(愛媛大学)、松浦真也(同) 27

15:35-16:00

置換パズルに関する研究(2): 模様の生成について

松浦真也(愛媛大学)、東汐夏(同) 29

16:00 -16:25

染色像の立体構築像による肝疾患の線維化領域の定量的評価

上田稜真(関西学院大学)、昌子浩登(同) 31

16:25-16:40 休憩

16:40-17:40 総会

18:00-20:00 懇親会

6月15日（日）

8:30 受付

形の科学一般（3件）

9:00-9:25

アルキメデス・タイリングから設計された
kirigami 構造の設計プロセスに基づく分類

鈴木雄也（東洋大学）、吉野隆（同）…… 33

9:25-9:50

エッシャー「円の極限 III」に見られる白い曲線
を球面に描く

吉野隆（東洋大学）…… 35

9:50-10:15

車のフロントガラスの雪巻物

納口恭明（Dr. ナダレンジャー）、罇優子（オフ
ィスナダレンコ）、和泉薫（環器）…… 37

10:00-10:15 休憩

形の科学一般（2件） および 形と知（1件）

10:15-10:40

Mathematica の機械学習機能を用いた波動逆散
乱問題の解析

植田毅（東京慈恵会医科大学）…… 39

10:40-11:05

細胞の増殖および細胞の消滅を応用したトラス
構造物の形態創生に関する研究 — 塑性座屈
を考慮した場合 —

小野聡子（近畿大学）…… 41

11:05-11:30

シェルピンスキー四面体プロジェクションマッ
ピング2

出原立子（金沢工業大学）、石川元（同）、平坂
希心（同）…… 43

昼休み 11:30-12:50

12:50-13:00 公開講演 挨拶 石原正三

13:00-13:50 【公開講演・招待講演】

折り紙 - 裏と表の話

前川淳（日本折紙学会）…… 45

13:50-14:00 休憩 10分

14:00-14:50 【公開講演・特別講演】

科学折り紙で立体の鏡像体を作る

石原正三（イスタ科学折り紙研究室）… 47

14:50-15:00 休憩 10分

15:00-15:50 【公開講演・特別講演】

4次元折り紙の性質 -正四面体の折りたたみ、

4次元正多胞体のリングの皮むき展開-

海野啓明（仙台高等専門学校名誉教授）

…… 49

15:50-16:05 休憩 15分

形の科学一般（2件）

16:05-16:30 （オンライン講演）

バツタ目の腸内に共生する *Unguispora* 属真菌は
腸内付着に特化した固有の形態を示す

李知彦（筑波大学）、出川洋介（同）…… 51

16:30-16:55 （オンライン講演）

タイ文字の特性に着想を得た字形と筆記具持ち
方指導の検討

杓名健一郎（タクシン大学）、Kunaj
Somchanakit（同）、Patcharaporn Nilabul（同）、
Chaiyot Rongdech（同）、高田宗樹（福井大学）
…… 53

17:00 閉会の辞

【事務局より】

論文投稿案内 (Call for Papers)	55
シンポジウム世話人の募集	56
入会案内	57

科学リテラシーの方法 1

根岸利一郎¹, 齋藤茂², 杉田一郎², 牧口一男², 三上修平², 関口久美子³, 高橋優³

¹ 科学リテラシー研究所, 〒366-0052 埼玉県深谷市上柴町西 6-15-7

² NPO 法人 まなびクラブ・リクウェイ, 〒366-0052 埼玉県深谷市上柴町西 6-15-7

³ 埼玉工業大学, 〒369-0293 埼玉県深谷市普濟寺 1690

Method for scientific literacy 1

Riichirou NEGISHI¹, Shigeru SAITOH², Ichirou SUGITA², Kazuo MAKIGUCHI², Shuhei MIKAMI²
Kumiko SEKIGUCHI³, Masaru TAKAHASHI³

¹ Research Institute for Science Literacy, 6-15-7 Kamishibachou-nishi, Fukaya, Saitama 366-0052, Japan

² NPO Manabi_club_Rikuway, 6-15-7, Kamishibachou-nishi, Fukaya, Saitama 366-0052, Japan

³ Saitama Institute of Technology, 1690 Fusaiji, Fukaya, Saitama 369-0293, Japan

rikuway.negishi@gmail.com

Abstract: A key element to develop scientific literacy is to understand scientific concepts through practical activities, rather than memorization of the concepts.

Keywords: Education, Learning, PISA, Science, Scientific literacy

はじめに

発端は「科学リテラシー」の評価と言われる PISA の科学（理科）についての高得点と低い自己効力感の大きなギャップの原因検討です。このギャップの傾向は 2022 年でも変わりません。

私たちのこれまでの科学の普及に関する活動によって、参加者の多くは科学体験を楽しんでいますが、判断に自信がついたという実感がありません。そこでこれまでの科学と科学リテラシーの普及に関しての目的や方法を比較して問題点と対策を検討します。

科学と科学リテラシー

ここでは科学リテラシーを「諸問題への科学的理解によって判断・対処ができること」¹⁾として科学と科学リテラシーの目的と方法について比較します。

	科 学	科学リテラシー
対象者	生徒・学生, 一般のひと	生徒・学生, 一般のひと
目 的	新事実の解明	事象の科学的理解と有用性・判断
動 機	新しい現象かどうか	事象のふしぎさや成功体験
方 法	未知の方法か応用	既知の体験的方法
検 証	実験と確認	確かめによる納得
獲 得	体系的解釈	分かった!!感動と有用性

目的が異なることから科学リテラシーの方法も科学の方法とは異なると考えられます。

方法の検討

科学の方法では一般に問題把握, 仮説, 演繹, 観察・実験, 検討・結論に進むと言われます²⁾。「考えるカラス」もまた図 1. (a) の方法であり³⁾, 私たちも踏襲して (b) のように考え⁴⁾, 参加者にできるだけ興味を持ってもらえるようにしてきました。「仮説実験授業」も「子どもたちが興味を持つかどうか」を最も重要視し, “科学者の発見した道筋を追体験する授業であるともいえます”⁵⁾。

科学リテラシーにとってどのような方法がよいかは学習との比較から検討する必要があります。発見学習では学習者が事実を発見する過程を体験させる手法で, 「○○があると何が起きるか」と

いう教師の問いに学習者が発見した事実に対する仮説を立て、論理的思考で検証しながら結論に至ります⁶⁾。問題解決学習も、教員が示した

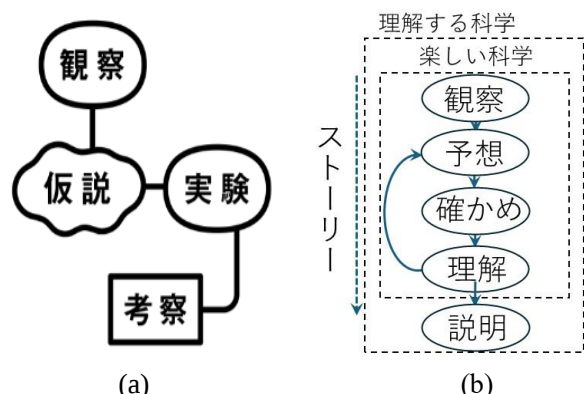


図1. 科学の方法例

テーマから学習者自身が問題を発見してその解決過程を経験し、問題解決能力を身につけることが目的です⁷⁾。また、探究型学習は、実社会や実生活の中から問いを見だし、自分で課題を立て、情報を集め、整理・分析して、まとめ・表現する学習活動⁸⁾です。“Learn Better”の“学び方を学ぶ”手法では自己効力感(self-efficacy)の重要性が説かれます⁹⁾。これら学習は事象観察から仮説を立て、

科学的に検証することで科学の考え方を身に付けようとしています。

科学リテラシーの方法では成功体験が重要な役割を果たすと考えます。図2は“化学反応で色を作る”の2時間の例です。最初の観察は興味をもつ事象の提示、模倣と体験で各自が成功体験します。そして科学の有用性を納得します。その体験活動の結果によって無理なく仮説の設定ができるようになります。

(例)「化学反応で色を作る」

- 【観察】アルカリを使った色変化観察
- 【模倣】指示薬を作ろう (ムラサキキャベツ)
- 【体験】4種の色変化, 呼気での色変化の成功体験
- 【納得】酸性・アルカリ性と指示薬で色が作れる
- 【仮説】ものの色は化学変化で作られる

図2. 実践例

まとめ

誰もが科学的理解によって判断・対処ができるためには科学リテラシーが必要であり、その方法の第一歩は科学的ではあるが学習によって科学知識を学ぶこととは異なり、学問的・科学的本質の理解の前に一定時間の探究活動を含む科学体験での達成感や科学の有用さを会得する仕方であり、この成功体験が身近な事象の科学的理解と判断に役立つと考えます。こうした科学リテラシーの普及の先にSDGs(気候変動におけるCO₂の影響や効率的な再生可能エネルギーの利用など)がありそうです。これらの検討結果を報告します。

文献

- 1) (OECD 定義からの簡略) https://www.nier.go.jp/kokusai/pisa/pdf/2015/07_pamph.pdf
- 2) 例えば, Somerville, J./ 市井三郎(1987);「科学入門」, 白揚社.
- 3) NHK「考えるカラス」(佐藤雅彦監修); <https://www.nhk.or.jp/school/rika/karasu/>
- 4) 根岸利一郎ほか(2024); 形の科学シンポジウム講演予稿集, Vol.9, pp23-24.
- 5) 中井俊己(2014); <http://hiro12.cocolog-nifty.com/blog/2014/12/post-1a26.html>
- 6) Bruner, Jerome S./鈴木祥蔵,佐藤三郎訳〔新装版〕(1985); 教育の過程, 岩波書店.
- 7) 国立教育政策研究所, 研究事例 (2017); https://www.nier.go.jp/kaihatsu/shiteikou/pdf/h29_hig_jyoho_kawagoeminami-h_2.pdf
- 8) 文部科学省 (2017); https://www.mext.go.jp/a_menu/shotou/sougou/main14_a2.htm
- 9) Ulrich Boser/月谷真紀(2018); “Learn Better”, 英治出版.

工芸と幾何学デザインのコラボ②印伝の文様とゆらぎ

中村健蔵

幾何学デザイン工房代表、長崎県

E-mail: col.kenzou.nakamura@gmail.com

Collaboration Report of Traditional crafts and geometric design:

② Inden Pattern & Fluctuation

Mr. Kenzo Nakamura

Geometric Design Studio, Nagasaki Prefecture

Abstract: I report on the collaborative creation of a geometric design combined with Inden pattern Fluctuation.

Keywords: geometric design, Collaboration Report, Inden Pattern, Fluctuation, Kyoto

1 経緯

京都の漆屋さんを訪問し、「実は印伝の文様は狭い範囲の繰り返しで、自由に広い範囲の文様が出来れば、可能性が広がる！」というお話を伺ったので印伝の文様について考察した。

2 印伝の文様について

(1) 印伝の文様の種類

- ・動物模様：虫、鳥や魚などの動物をモチーフ
- ・植物模様：花や葉などの植物をモチーフ
- ・幾何学模様：繋ぎ模様や角繋ぎ、渦巻き模様など、

(2) 印伝文様の特徴①稠密で重ならないパターン②実は狭い範囲の繰り返し
従って、稠密で重ならないパターンを広い範囲で作成したい。



図1：稠密で重ならない例：トンボと桜



図 2：印伝文様の狭い範囲の繰り返し例：葡萄文様

3 配置の作成と比較

(1) 配置の作成：①円の範囲で図案化②円配列にゆらぎを付与



図 3：トンボを円の範囲で図案化

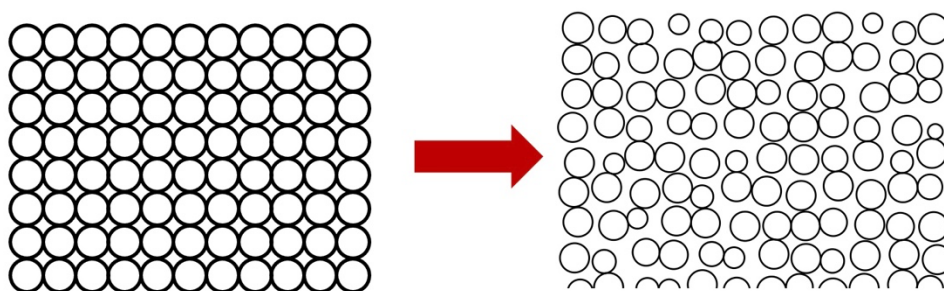


図 4：円配列にゆらぎを付与：正方格子の例

(2) 配置の比較：ゆらぎを付与した円配列に図案を挿入。方向はランダム。

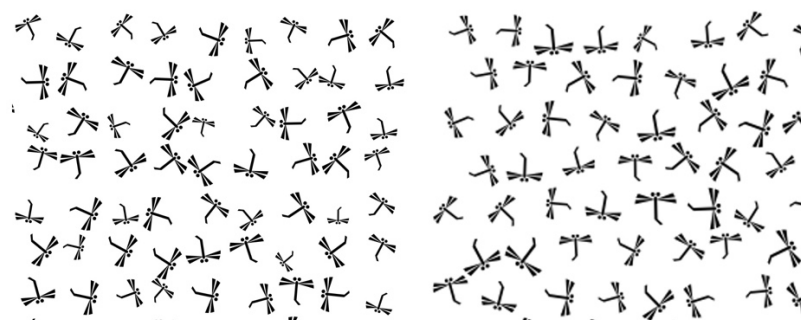


図 5：トンボの配置の比較：正方格子と六方格子

4 まとめ

今回、京都の漆屋さんと対話を通じて印伝文様の配置についてのヒントを得たので、印伝模様の散らばり・ゆらぎについて考察し、与謝野町の織物とコラボを行い、色々な可能性を見出せました。今後、甲州印伝や江戸小紋などとのコラボを模索したいと考えています。

展示：工芸と幾何学デザインのコラボ②印伝の文様とゆらぎ

中村健蔵

幾何学デザイン工房代表、長崎県

E-mail: col.kenzou.nakamura@gmail.com

Exhibition: Collaboration of crafts and geometric design:

② Inden Pattern & Fluctuation

Mr. Kenzo Nakamura

Geometric Design Studio , Nagasaki Prefecture

Abstract: This exhibition is a collaboration between Jacquard Fabric and Geometric Design, and includes Tapestries using an Inden Style Pattern.

Keywords: Jacquard Fabric, geometric design, **Inden Pattern**, crafts, Kyoto

京都の漆屋さんとの対話を通じて印伝文様の配置についてのヒントを頂き、印伝模様の散らばり・ゆらぎについて考察し、与謝野町の織物とコラボを行いました。その作品を展示します。今後、さらに色々な応用を検討して行きたいと考えています。



図：作品例：桜のタペストリー

生徒が個別調整する生成 AI フィードバック II

井戸季詠子¹, 後藤勝洋², 松浦執³

¹八王子市立いずみの森義務教育学校、東京都八王子市立子安町 2-18-1

²渋谷区立渋谷本町学園、東京都渋谷区本町 4-3-1

³東京学芸大学教育学部、東京都小金井市貫井北町 4-1-1

(連絡先アドレス) shum00@u-gakugei.ac.jp

Generative AI Feedback Individually Tailored by Students II

Kieko Ido¹, Katsuhiro Goto², Shu Matsuura³,

¹Hachioji City Izuminomori Compulsory Education School, 2-18-1, Koyasumachi,
Hachioji, Tokyo 192-0904,

²Shibuya Ward Shibuya Honmachi Gakuen, 4-3-1 Honmachi, Shibuya, Tokyo 151-0071

³Tokyo Gakugei University, Faculty of Education, 4-1-1 Nukuikita Koganei,
Tokyo 184-8501

Abstract: A generative AI was set up to provide interactive feedback on open-ended responses in junior high school science classes. The typical patterns, CCCC (Analytical-Directive) and AAAA (Supportive-Empathetic), became prominent in the transition from the ‘continuity of life’ unit to the ‘ions’ unit. Mixed modes with more C increased, while those with more A decreased, showing diverse shifts similar to those seen with single EM configurations.

Keywords: Feedback Text, Feedback setting, Generative AI, Education with AI.

1. はじめに

生成 AI を活用した業務や学習が浸透しつつある。東京都教育委員会では生成 AI 研究指定校の成果をもとに、都立高等学校・中等教育学校(256校、生徒数約14万人)において、「都立 AI」のサービスを導入し、教職員、児童・生徒の利用に供することを決めた[1]。生成 AI を活用した授業展開や探究学習のサポート、事務文書作成の効率向上などに活用される予定であるという。

本研究は、学校教育で生成 AI を生徒の対話パートナーとすることで、個々の生徒に応じて問う力を養うことを目的としている。問うことは主体的で、個の内面的なものである。学ぶことは個が内面の認識を調整することで起きる。一方で個は外部とのコミュニケーション活動を行い、これが個の内面に影響を及ぼし得る。コミュニケーションが内面的に問うこと、内面を調整することを導くのではないか。

本研究では、コミュニケーションの引き金となる対話での、AI フィードバックの語調(Engagement Modality, EM)を好みに応じて調整させるため、4つの態度を特徴付ける2つずつの特性の選択肢(Feedback Style Matrix, FSM)を4つ生徒に選択させた。存在感としては人間的が機械的を大きく上回り、介入態度としては親切的な指摘が励ましを上回った。

形シュレー 2024 では、生命の連続性領域からイオン領域へと単元が移行する過程での

FSM の選択のされ方の遷移に着目し、構成的態度、介入の態度、認知的傾向、存在感の質の順に配置した FSM での cognitive と affective の選択パターンを調べ、単元の移動に伴う遷移を検討した。その結果 Supportive-Empathetic mode の縮減が起きていることが推測された。しかし、1 種の並び方の FSM の変化を調べるにとどまり、24 種全てを検討しなかった。本研究ではすべての並び方の FSM を調べ、FSM の検討方法を考える。

2. 方法と結果

言葉の表現を生成 AI のプロンプトで調整するために、表 1 に示す C と A の 2 項対置の分類を行い、生徒に生成 AI のプロンプトとして各分類の一方の項目を選択させた。選び方として 16 のパターンが考えられ、それぞれのパターンの選択者数が単元の遷移でどう変わったかを作図して検討した。この時 4 つの項目を変えた 24 通りについての見え方を確認する。

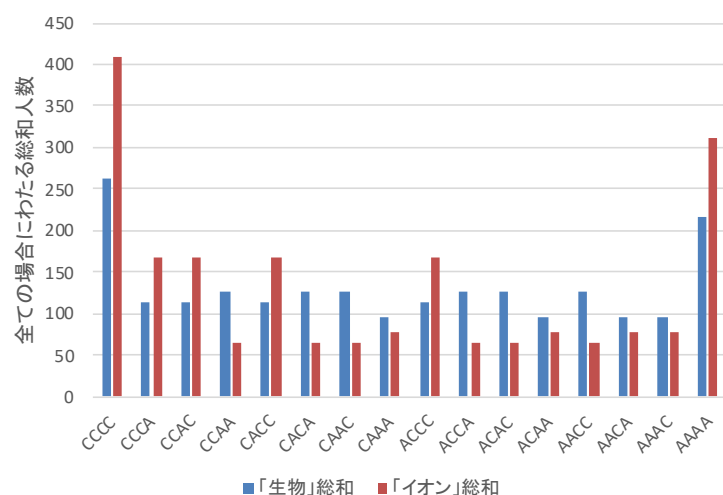


図 1. 4 つの Engagement Motility (EM) の 24 の配列について、FSM の全てのパターンごとに人数和をとり、2 つの単元で比較したもの。

3. 結果 (生徒のパラメータ選択傾向)

各対置項目の選択者数を図 1 に示す。典型的パターンである CCCC を Analytical-Directive mode、AAAA を Supportive-Empathetic mode と呼び、大まかな傾向を示している。生命の連続性単元からイオン単元に移ることに伴い、これらのモードが強くなり、CA が混合するモードは、C の多い側 (CCCA, CCAC, CACC, ACCC) で強くなり、A の多い側で弱くなった。単一の EM 配置で判断した場合と同様に、幅広い遷移が起きていることが見られる。

参考文献

- [1] <https://www.kyoiku.metro.tokyo.lg.jp/information/press/2025/05/2025051201>
(2025. 5. 12)

表 1. EM 順序 1 例についての
Feedback style matrix の分類
記号 C: Cognitive, A: Affective

pattern num.	存在感の質 (人間的/機械的)	構成的態度 (創造的/分析的)	認知的傾向 (直感的/合理的)	介入の態度 (励まし/懇切丁寧)
1	C	C	C	C
2	C	C	C	A
3	C	C	A	C
4	C	C	A	A
5	C	A	C	C
6	C	A	C	A
7	C	A	A	C
8	C	A	A	A
9	A	C	C	C
10	A	C	C	A
11	A	C	A	C
12	A	C	A	A
13	A	A	C	C
14	A	A	C	A
15	A	A	A	C
16	A	A	A	A

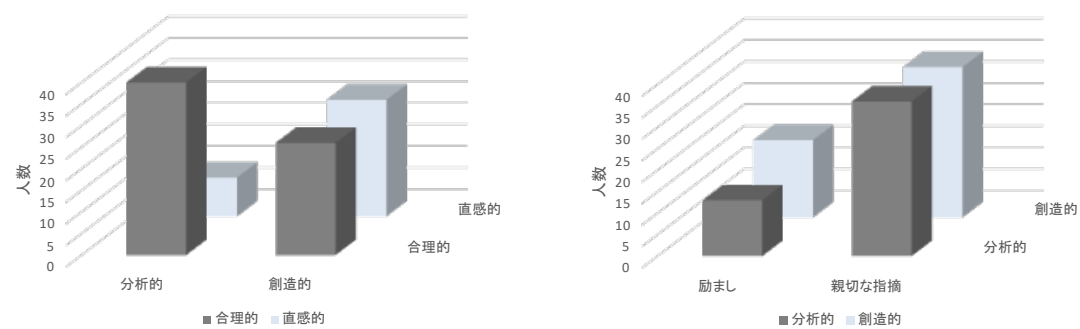


図 2. 構成的態度、認知的傾向、介入の態度の各分類についてのクロス集計

ドーム空間での 3D モデル活用をより身近にする試み

吉岡 翼¹, 中ユミ子², 井内麻友美^{3,4}, 高幣俊之³

¹ 富山市科学博物館, 富山市西中野町一丁目 8-31

yoshioka@tsm.toyama.toyama.jp

² サイエンスヒルズこまつ, 石川県小松市こまつの杜 2

³ 株式会社オリハルコンテクノロジーズ, 東京都中野区中野 3-33-18-301

⁴ 葛飾区郷土と天文の博物館, 東京都葛飾区白鳥 3-25-1

Making the Use of 3D Models in Dome Spaces More Accessible

Tasuku Yoshioka¹, Yumiko Naka², Mayumi Iuchi^{3,4}, Toshiyuki Takahei³

¹ Toyama Science Museum, 1-8-31 Nishinakano-machi, Toyama, Japan

² Science Hills Komatsu, 2 Komatsunomori, Komatsu, Ishikawa, Japan

³ ORIHALCON Technologies, Inc., 3-33-18-301 Nakano, Nakano-ku,
Tokyo, Japan

⁴ Katsushika City Museum, 3-25-1 Shiratori, Katsushika-ku, Tokyo, Japan

Abstract: Realtime 3D model visualization in dome spaces offers high immersion and spatial depth without the need for special glasses. As part of our recent initiatives, we conducted a workshop for planetarium staff aimed at promoting the utilization of 3D models. We also developed two computer tools, "Amateras Model Viewer" and "Model Viewer for Dome", to efficiently display 3D models inside the dome space. This paper reports on these efforts and discusses future challenges and prospects for expanding 3D model use beyond astronomy.

Keywords: planetarium, dome, realtime 3D, science communication

はじめに

視覚を用いた「形」を扱うコミュニケーション手段として、ドーム空間における 3D モデルのリアルタイム映像があげられる。ドーム空間の映像は裸眼でも高い没入感・立体感が得られ、複数名で空間を共有できるというヘッドマウントディスプレイに対する優位性がある。近年のプラネタリウムに導入されているデジタルシステムで実現できるため、プラネタリウムが持つ天文という文脈を超えた活用も期待される^[1,2]。しかし、その普及には越えるべき課題もある。本発表では、ドーム空間における 3D モデルの活用をより身近にするための、我々の最近の取り組みについて報告するとともに、今後の展望について考える。

プラネタリウム関係者向け研修会

3D モデルを作る手段・扱う手段は身近になったが、日常的に誰もが行うものではなく、プラネタリウム関係者でも同じことである。2024 年 12 月に開催された日本プラネタリウム協議会の全国研修会は「プラネタリウムの可能性を広げよう！」が研修テーマとされ、

その分科会のひとつとして「3D データ活用コース」を設けた（講師：吉岡，運営担当：中）。参加者らがフォトグラメトリや X 線 CT で作成した 3D モデルを，イベント投影をテーマとした分科会と連携し，研修会参加者全約 100 名が見守る中プラネタリウムに映し出した（図 1）。先着とした 20 名のコース定員はいち早く埋まったほか，参加できなかった方からの問い合わせもあるなど，関心の高さがうかがい知れた。

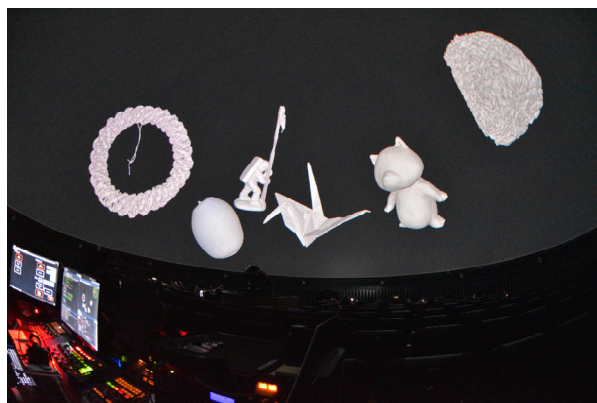


図 1 研修会参加者が作成しドームに映し出された 3D モデル。

Amateras Model Viewer

上記研修の成果を受け，2025 年 2 月にオリハルコンテクノロジーズが，3D モデルをインタラクティブに解説するためのフリーソフト Amateras Model Viewer^[3]を，5 月には吉岡がウェブブラウザ上で動作する Model Viewer for Dome^[4]を公開し

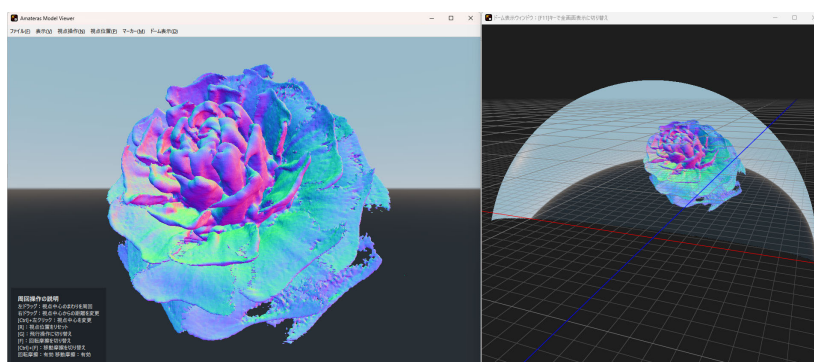


図 2 Amateras Model Viewer のウィンドウ。

た。これらはプラネタリウムで採用されているドームマスター形式での映像出力が可能な 3D モデルビューアーであり，動作するノート PC などの端末を，外部映像入力ができるプラネタリウムやドームシアターに接続すればすぐに映し出すことができる。既存のプラネタリウムシステムにはない機動性と誰もが容易に利用できるインターフェースを備えており，3D モデルを使った解説の強力なツールとなり得る。

展望

3D モデルの活用はプラネタリウム関係者の中でも関心が高く，技術的な障壁も低くなっている。一方，プラネタリウムで天体以外の何を映して何ができるかという思考はまだ十分に深まっていない。実践例を蓄積していくことがまず求められるが，欠かせないのは映し出す対象について語ることができ，相応しいデータを提供できるコンテンツホルダーの存在である。プラネタリウム施設の天文以外の専門職員はもちろん，「形」を探求する外野のコンテンツホルダーからの働き掛けや需要の醸成も重要であると思われる。ビューアーを入れたノート PC を片手に，最寄りのプラネタリウムに足を運んでみてはいかがだろう。

文献

- [1] Kwasnitschka, T. (2017) *Nature*, 544: 395-395. [2] Yoshioka, T. *et al.* (2024) *Forma*, 39(1): S25-S28. [3] オリハルコンテクノロジーズ <https://www.orihacon.co.jp/amateras/modelviewer/> [4] 吉岡 https://www.tsm.toyama.toyama.jp/_ex/curators/yoshioka/ModelViewer4Dome/

X 線 CT 技術を適用したジュラ紀貝類化石の形状構築

松岡 篤^{1,2}・吉岡 翼³

¹新潟大学形の科学研究センター, 950-2181 新潟市西区五十嵐 2 の町 8050

²千葉工業大学次世代海洋資源研究センター, 275-0016 習志野市津田沼 2-17-1

amatsuoka@geo.sc.niigata-u.ac.jp

³富山市科学博物館, 939-8084 富山市西中野町 1-8-31

Reconstruction of shell morphology of Jurassic molluscs by X-ray CT technology

Atsushi MATSUOKA (Niigata University/Chiba Institute of Technology) and Tasuku YOSHIOKA
(Toyama Science Museum)

Abstract: X-ray computed tomography (CT) was applied for molluscan fossils of earliest Jurassic age. The materials come from the lowest Jurassic (Hettangian) Niranohama Formation of the Shizukawa Group in the South Kitakami Belt, Northeast Japan. The shells of molluscan fossils had been completely dissolved due to weathering. Fossils are represented by voids within host rocks of sandstone and mudstone. High contrast in density between voids and host rocks enable to detect shell morphology in a non-destructive manner.

Keywords: Molluscan shell, X-ray CT, Niranohama Formation, Shizukawa Group, earliest Jurassic

1. はじめに

X 線 CT は医学分野で発展してきたが、現在では多くの分野で活用されている。古生物分野においても、化石のサイズを問わず様々な分類群の研究に使用されている[1] [2] [3]。ジュラ紀の二枚貝化石を主体とする軟体動物の殻を対象に、X 線 CT を用いた検討を行ったのでその概要について報告する。本研究の新規性は、軟体動物の炭酸カルシウム殻が溶脱し、母岩中で空隙となつて産出している化石標本を非破壊で形状を把握するところにある。

2. 方法と装置の概要

検討には NAOMi-CT 3D-M (株式会社アールエフ) を用いた。本機では撮影から三次元画像の再構成までの工程が数分で完了するため、多数の標本を短時間に検討することが可能である。DICOM スタックとして出力したボクセルデータは Molcer (有限会社ホワイトラビット) によってサーフェスモデルに変換し、Blender 上で法線を反転したうえでメッシュを構造的に分離し、岩石中の空隙を個々のメッシュモデルとして抽出した (図 1)。

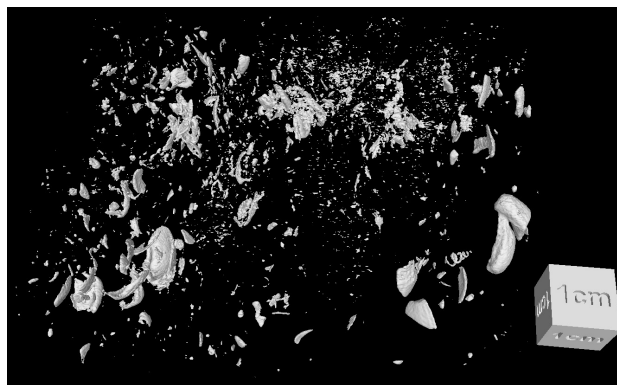


図 1 可視化した岩石中の空隙.

3. 軟体動物殻の X 線 CT 観察結果

X 線 CT による検討に用いたのは、南部北上帯のジュラ系下部統へタンジアン階の志津川層群 葦の浜層から産出した軟体動物化石群である。化石は二枚貝を主体とし、少数の巻貝を伴う。化石を含む母岩の岩相は砂岩および泥岩である。いずれの岩相においても、軟体動物の炭酸カルシウムの殻は風化によって溶脱しており、化石の部分は母岩中の空隙となっている。通常このような産状の場合は、ゴムや石膏などで型どりを行って殻の形状を把握する。今回の検討では、空隙の形状を X 線 CT により捉え、前述の手法で化石の形状を構築した。二枚貝化石についての例を図 2 に示す。

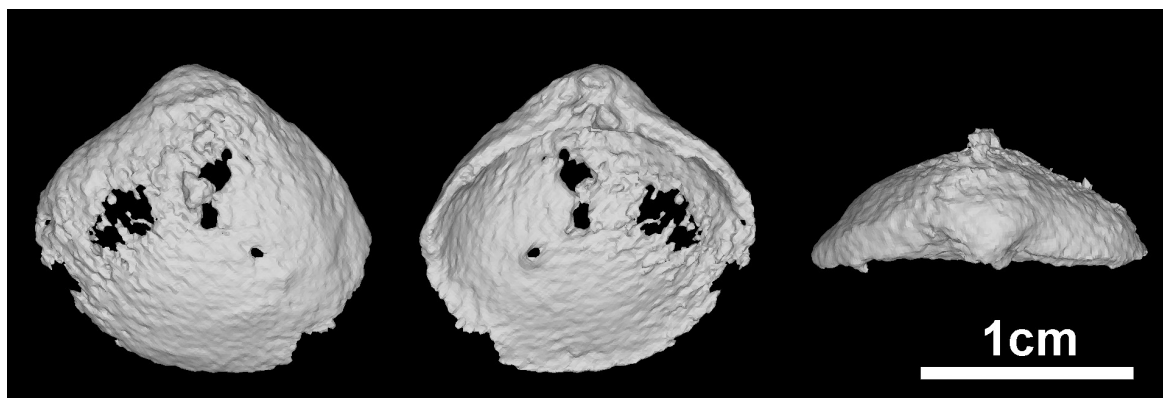


図 2 X 線 CT 技術で取り出した葦の浜層産のジュラ紀二枚貝化石.

4. おわりに

本研究では、風化により殻が溶脱した化石について X 線 CT を適用し殻の形状を構築することができた。本手法の利点は、X 線 CT 技術の特長を生かし非破壊で化石の形状を把握する点にある。これまで、日本国内の砂岩や泥岩から産出する中生代および古生代軟体動物化石は、殻が溶脱していることが多く、古生物学的検討には適した材料ではないとみられることが多かった。化石を構成していた炭酸カルシウムが溶脱し、母岩と空隙との密度コントラストが高いことに着目した X 線 CT の利用は、非破壊の利点を生かした新たな方法として今後の発展が期待される。

文献

- [1] Matsuoka, A. et al., 2012. Exact number of pore frames and their configuration in the Mesozoic radiolarian *Pantanellium*: An application of X-ray micro-CT and layered manufacturing technology to micropaleontology. *Marine Micropaleontology*, 88–89, S36–S40.
- [2] Imai, T. et al., 2023. High-energy synchrotron-radiation-based X-ray micro-tomography enables non-destructive and micro-scale palaeohistological assessment of macro-scale fossil dinosaur bones. *Journal of Synchrotron Radiation*, 30, 627–633
- [3] Teshima, Y. et al., 2024. Development of radiolarian shell models using microfocus X-ray CT and additive manufacturing technologies. *Forma*, 39(1), S35–S42.

ペルム紀放散虫 *Albaillellaria* にみられる二形性の形態的特徴と原因

伊藤 剛

産業技術総合研究所 地質調査総合センター, 305-8567 茨城県つくば市東 1-1-1

Email: ito-t@aist.go.jp

Morphological characteristics and cause of dimorphism of Permian *Albaillellaria* (Radiolaria)

ITO Tsuyoshi

Geological Survey of Japan, AIST, Tsukuba 305-8567, Japan

Abstract: Some taxa of the Permian *Albaillellaria* (Radiolaria, marine protist) represent dimorphism composed of normal and swollen types. The swollen type is characterized by swollen part of the skeleton. The cause of the dimorphism is thought to reflect differences in reproductive generations.

Keywords: *Albaillellaria*, dimorphism, Permian radiolarian, paleobiology, swollen type, reproductive generation

はじめに

Albaillellaria 目は、3本の骨針からなる基本構造によって特徴づけられる珪質殻を持つ。殻の大きさは0.1~0.3 mm程度で、放散虫の一群と考えられている。ペルム紀の *Albaillellaria* は塔状の殻を持つが、しばしばその頂部が膨らんだ個体が産出することが知られており、これらは二形成であると捉えられている (Ishiga, 1991 ; Ito et al., 2018 など)。

著者は、継続的にペルム紀放散虫の検討を行っており、その形態的特徴や原因について議論を行ってきた (Ito et al., 2018 ; 伊藤, 2025 など)。本論では、*Albaillellaria* における二形性の形態的特徴や原因を紹介するとともに、その検証方法について検討する。

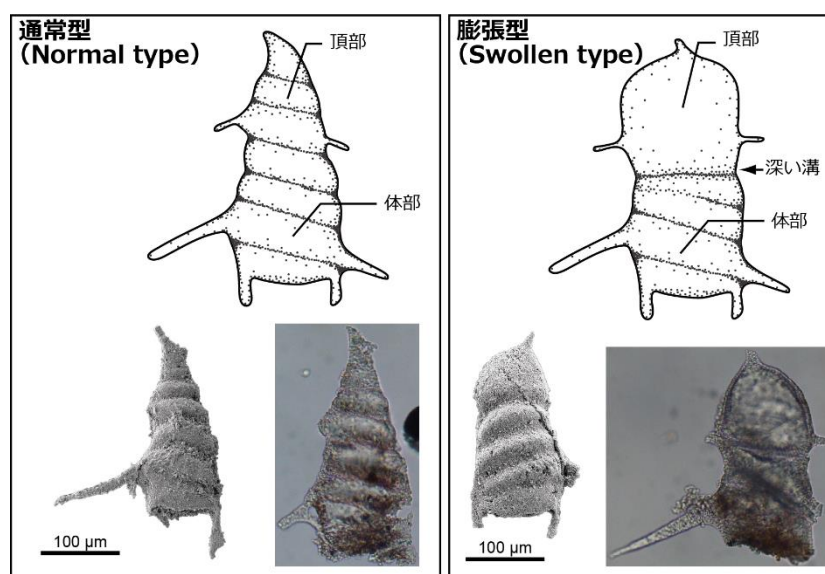


図 1. ペルム紀放散虫 *Albaillella sinuata* の二形性 (伊藤, 2025 を一部修正)

Albaillellaria 二形性の概要と形態的特徴

主に Ito et al. (2018) に基づいて、形態的特徴を記述する。膨張型は、その名の通り頂部が膨張していることで特徴づけられ、頂部と体部の間に深い溝がある。殻の膨らみ具合を瘦身度 (Slimness value) として定量化を行ったところ、瘦身度はそれぞれ正規分布を示した。また、膨張型は通常型よりも全長が短いことも明らかとなった。

Albaillellaria 二形性の原因と産出頻度からのアプローチ

伊藤 (2025) は、Albaillellaria の二形性の原因として、個体差、付加成長、進化傾向、生殖世代差の 4 つの仮説を提唱した (図 2)。Albaillellaria における二形性は、明瞭に区別できる形態、膨張型の個体数の少なさ、膨張型の不均一な産出などによって特徴づけられる。これらの特徴に基づくと、個体差と付加成長によってこの二形性が生じる可能性は極めて低いと結論付けられる。進化傾向によって説明できる点もあるが、肯定的な証拠も限られている。生殖世代差が、Albaillellaria の二形性の特徴を説明可能であり、現時点では最も有力な仮説であると考えられる (伊藤, 2025)。

通常、有性生殖は遺伝的多様性を生み出すために採用されると考えられる。膨張型の産出頻度を数学的に検討することにより、別方面からその妥当性が検証できるかもしれない。

引用文献

Ishiga, H., 1991. "Dimorphic pairs" of Albaillellaria (Late Paleozoic radiolaria), Japan. *Memoir of the Faculty of Science, Shimane University*, **25**, 119–129.

伊藤 剛, 2025. ペルム紀アルバイレラリアにみられる二形性についての諸考察. 大阪微化石研究会誌特別号, no. 18, 57–68.

Ito, T., Matsuoka, A. and Feng, Q.L., 2018. Morphological characteristics of a dimorphic pair of *Albaillella sinuata* Ishiga and Watase: Dimorphism in the lineage of the Permian Albaillellaria (Radiolaria). *Island Arc*, **27**, e12271.

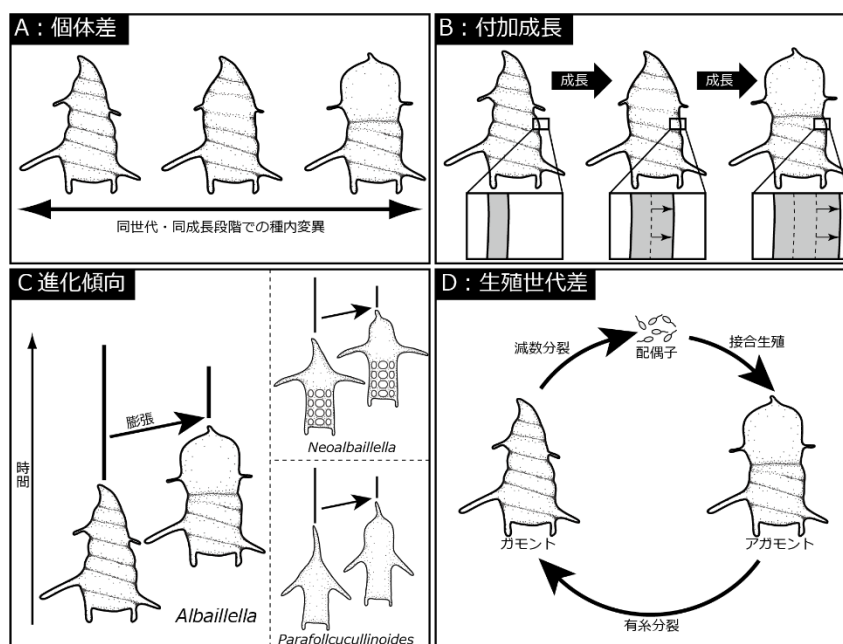


図 2. Albaillellaria 二形性における 4 つの仮説 (伊藤, 2025 を一部修正)

放散虫マリンスノーのイメージ動画上映

北嶋 円¹, 吉岡 翼², 松岡 篤³, 三次 明日香⁴

- 1) 新江ノ島水族館 神奈川県藤沢市片瀬海岸 2-19-1
- 2) 富山市科学博物館 富山県富山市西中野町 1-8-31
- 3) 新潟大学 新潟県新潟市西区五十嵐 2 の町 8050
- 4) Space Travelium TeNQ 東京都文京区後楽 1-3-61 黄色いビル 6F
kitajima@enosui.com

A video showing radiolarians sinking into the deep sea like marine snow.

Madoka Kitajima¹, Tasuku Yoshioka², Atsushi Matsuoka³,
Asuka Mitsugi⁴

¹Enoshima Aquarium, 2-19-1 Katasekaigan, Fujisawa, Kanagawa 251-0035, Japan

²Toyama Science Museum, 1-8-31 NishiNakano-machi, Toyama 939-8084, Japan

³Niigata University, 8050 Ikarashi 2-no-cho, Nishi-ku, Niigata 950-2181, Japan

⁴Space Travelium TeNQ, 6F Yellow Bldg 1-3-61 Koraku, Bunkyo-ku, Tokyo 112-0004, Japan

Abstract: The accumulation of biological remains sinking into the deep sea is called “marine snow.” Imagining that radiolarian skeletons fall like snow in the deep sea, we created a video depicting this scene. The video was screened at the Space Travelium TeNQ, a space experience facility, as part of a special exhibition on plankton, with the aim of allowing visitors to experience the mystery and beauty of radiolarians.

Keywords: radiolaria, marine snow, movie, deep sea, plankton

放散虫は、おもに二酸化ケイ素の骨格をもつ海洋性の単細胞生物で、化石種から現生種まで多様な種がこれまで知られている。生きているときは浮遊生活を送っているが、命を終えると骨格だけになり、重い骨格は海の底へ沈んでいく。海底には炭酸カルシウムなどほかの骨格を持つ生物の遺骸も同様に沈殿していくが、非常に深い海では pH の低下と高水圧により炭酸塩が溶解してしまうため、溶解しにくい二酸化ケイ素の放散虫骨格が主に堆積していく。生物の遺骸が集積しながら深海へ沈降していく様子をマリンスノーと呼ぶが、深海では放散虫骨格が雪のように降ってくるのではないかと想像し、その様子をイメージした動画を Adobe After Effects を用いて作成した(図1)。作成した動画は、2025 年 5 月 24 日～9 月 7 日の期間に宇宙体感施設「Space Travelium TeNQ」のプランクトンをテーマにした企画展にて、来館者に放散虫の形態の不思議や美しさを体感できるコンテンツのひとつとして上映している。本発表ではこの上映動画を紹介する。



図1 放散虫マリンスノー動画の1シーン

蛋白質の立体構造模型の開発

雪松遥人¹, 坂本泰一², 河合剛太², 手嶋吉法^{1,3}

千葉工業大学¹機械電子創成工学科,²生命科学科,³宇宙・半導体工学科
〒275-0016 千葉県習志野市津田沼 2-17-1

Development of protein structure models

Haruto Yukimatsu, Taiichi Sakamoto, Gota Kawai, and Yoshinori Teshima*

Chiba Institute of Technology,
2-17-1 Tsudanuma, Narashino-shi, Chiba 275-0016, JAPAN

* yoshinori.teshima@it-chiba.ac.jp

Abstract: For the purpose of education and research support, we developed models of the three-dimensional structure of proteins. We created monomeric proteins and constructed multimers composed of monomers using magnets. We also used hinges to change the protein structure.

Keywords: 3D printer, Protein, Trimer, Tetramer

生命現象を生体高分子の立体構造を基に理解することは重要である。しかし、生体高分子の立体構造は複雑なため紙面上の図では理解が難しい。そこで、教育および研究支援を目的とした蛋白質の立体構造模型の開発を行った。FAU-1 三量体 (FAU-1 単量体より形成される 3 回回転対称の 3 量体) (PDB ID: 8W08) [1]および RNaseE 四量体 (RNaseE 単量体より形成される 2 回回転対称の四量体) (PDB ID: 2C0B)を開発対象とした。

蛋白質の立体構造データ (PDB ファイル) を 3D 可視化ソフト (UCSF Chimera) により表面形状モデルとして表示し、造形データ (STL 形式) に変換した。分割可能な模型を作製するため、造形データ編集ソフト (Magics) を使い、回転軸を起点とし結合部分付近を分割した (図 1, 図 2)。実体化には、熱溶解積層方式の 3D プリンタ AFINIA H+1 を用いた。材料には強度および加工性を考慮して主に ABS 樹脂を用いたが、基質に関しては高弾性な Thermoplastic Polyurethane を使い、着脱可能にした。造形後、単量体毎に水性塗料で塗装し、分割面に磁石を設置した。さらに、FAU-1 の折れ曲がる箇所に蝶番を取り付けた。



図 1 FAU-1 の模型

左: 三量体、右: 単量体の境界付近で分割

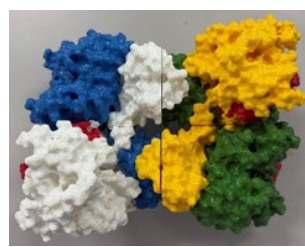


図 2 RNaseE の模型

左: 四量体、右: 単量体の境界付近で分割

参考文献 [1] Kawai, *et al.*, Homo-trimeric structure of the ribonuclease for rRNA processing, FAU-1, from *Pyrococcus furiosus*, *J. Biochem.*, **175**, 2024, 671-676.

木造継手の立体教材の開発 (第5報)

原嶋耕介¹、手嶋吉法^{1,2}

千葉工業大学 工学部¹機械電子創成工学科、²宇宙・半導体工学科

〒275-0016 千葉県習志野市津田沼 2-17-1

Development of three-dimensional teaching materials to learn wooden joints V

Kousuke HARASHIMA & Yoshinori TESHIMA*

Chiba Institute of Technology, 2-17-1 Tsudanuma, Narashino, Chiba 275-0016, Japan

*yoshinori.teshima@it-chiba.ac.jp

Abstract. In previous study, we had developed 94 kinds of 3D models for traditional wooden joint. In this study, we generated 3D shape data for 41 kinds of traditional wooden joint, by utilizing a 3D CAD software. They were materialized as small models by a 3D printer. In addition, we have created animations to help learner understand the behavior of each wooden joint.

Keywords: traditional wooden joint, 3D shape data, 3D printed model, animation

1. 研究背景と目的

ネジや釘や接着剤を使わずに部材を接合する継手や仕口は、日本に昔からある伝統的な技法である。2つ以上の部材を長手方向に継ぐ手法またはその接合部を継手と呼び、異なる方向に継ぐ手法またはその接合部を仕口と呼ぶ。状況に応じて多種多様な形が使用されており、多くの種類がある[1]。

継手と仕口の中には複雑な構造を持つものもあり、立体教材を自分で操作することがそれらを理解する上で極めて有効である。また、伝統的な継手や仕口をデジタルデータとして保存する意義もある。そこで本研究では、3D-CAD (Autodesk Fusion)を使用して継手と仕口を設計し、3D プリンタ (AFINIA H+1)を使用して立体模型を作製し、立体教材として活用する。さらに、継手や仕口の嵌め方および外し方を示すアニメーションを3D-CADで作成した。

我々の研究グループでは、これまでに合計 94 種類の継手または仕口の形状データを設計し、実体模型を作製した[2][3][4][5]。本研究では過去に設計されてない継手や仕口を選定し、設計および立体模型の作製を行った。

2. 立体模型作製手順

2.1 継手と仕口の設計

木造継手と仕口の文献[1]の図を参考にして、3D-CAD を使用し、41 種類の設計を行った。例として落とし蟻継ぎ、被せ相欠き目違い継ぎ、留め先差し柄接ぎの設計データを図 1、図 2、図 3 の上段に示す。立体教材として手に取って操作する際の安全性を考慮し、角部に面取りを施した。

2.2 3D プリンタによる造形

設計した形状データを 3D プリンタで造形し、実体化した。立体模型に使用したフィラメント

は ABS+, 積層ピッチは 0.15mm、密度は 20 %とした。例として立体模型を図 1、図 2、図 3 の下段に示す。

3. アニメーションの作成

継手や仕口の嵌め方および外し方を示す動画を 3D-CAD のアニメーション機能を用いて作成した。

4. まとめ

本研究では合計 41 種類（継手 7 種類、仕口 34 種類）の設計を行い、全ての立体模型の実体化とアニメーション作成を行った。

謝辞 全 135 種類の継手および仕口の模型に対して貴重なコメントを頂いた「伝統木構造の会」の皆様へ感謝します。本研究は JSPS 科研費 24H00162 の助成を受けたものです。

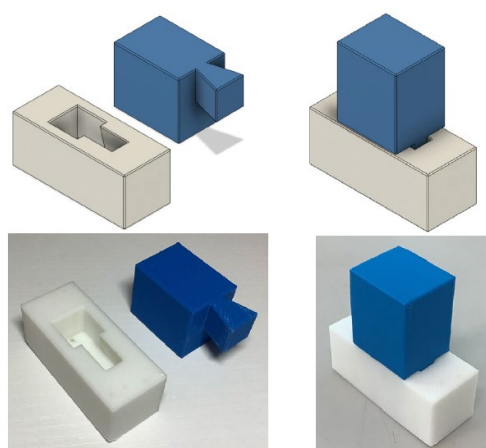


図1 落とし蟻継ぎの設計データ（上段）と立体模型（下段）

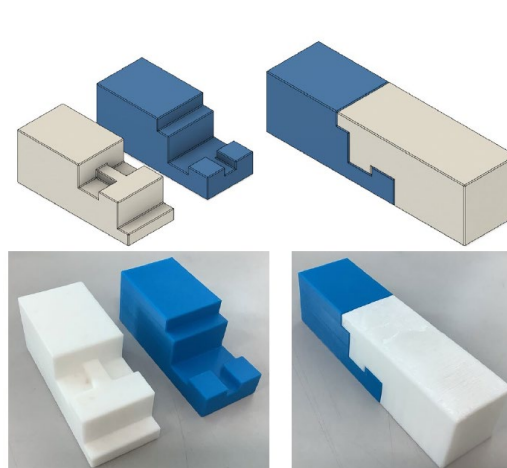


図2 被せ相欠き目違い継ぎの設計データ（上段）と立体模型（下段）

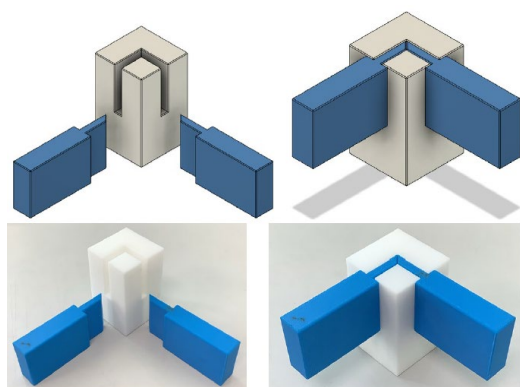


図3 留め先差し柄接ぎの設計データ（上段）と立体模型（下段）

参考文献

- [1] 鳥海義之助、図解 木工の継手と仕口(増補版)、オーム社(1980).
- [2] 大和田、手嶋、木造継手のデジタル化と模型製作、形の科学シンポ講演予稿集, 5-1 (2020) pp. 1-2.
- [3] 麻生、手嶋、木造継手の立体教材の開発 II、形の科学シンポ講演予稿集, 7-2 (2022) pp. 24-25.
- [4] 長谷川、手嶋、木造継手の立体教材の開発 III、形の科学シンポ講演予稿集, 8-1 (2023) pp. 35-36.
- [5] 山田、手嶋、木造継手の立体教材の開発 IV、形の科学シンポ講演予稿集, 9-1 (2024) pp. 15-16.

機械機構を学ぶ為の立体教材の開発 (第4報)

神長輝、手嶋吉法

千葉工業大学 工学部 機械電子創成工学科

〒275-0016 千葉県習志野市津田沼 2-17-1

Development of three-dimensional teaching materials for learning mechanism IV

Hikaru KAMINAGA & Yoshinori TESHIMA*

Chiba Institute of Technology, 2-17-1 Tsudanuma, Narashino, Chiba 275-0016, Japan

*yoshinori.teshima@it-chiba.ac.jp

Abstract. In the 19th century, more than 300 types of mechanical models were developed under the guidance of F. Rouleau. We have created 3D shape data of those models and made three-dimensional teaching materials for studying mechanical mechanisms. In the previous report, we showed 27 different models. This time, we made nine new models and improved five previous models.

Keywords: mechanism, teaching material, digital shape data, additive manufacturing, three-dimensional model, mechanism animation

1. はじめに

機械や構造物には機構と呼ばれる内部の部品同士が作用しあう為に必要な仕組みがあり、その種類は数多い。19世紀のドイツの機械工学者フランツ・ルーローは、数多くの機構の原理を伝えることを目的に300種類以上の機構模型(以下、ルーロー模型と呼ぶ)の製作プロジェクトを指揮した。現在において、ルーロー模型はアメリカのコネル大学で最も多く所蔵(232種類)されている[1]。コネル大学WEBサイトには、模型のデジタル写真が公開されているが、模型を手にとって動作確認することは出来ない。

そこで本研究では、コネル大学のWEBサイトから情報を読み取り、3DCADを用いてルーロー模型の3次元形状データを設計し(デジタル化)、実際に手に取って仕組みを学べるように3Dプリンタでの実体化を行う。我々の研究グループでは上記232種類中27種類のデジタル化と実体化が完了している[2][3][4]。

2. ルーロー模型のデジタル化と実体化

本研究では2023年度までに作製されていなかったルーロー模型のうち、C4「高次対偶のスライダークランク機構」、C5「高次対偶の反転スライダークランク機構」、C6「スライダークランク機構」、C8「リングギア付きの単純な歯車チェーン」、G3「遊星歯車列」、G4「二重遊星歯車列」、G5「平行軸上の二重遊星歯車列」、G6「反転歯車の複合歯車列」、G7の連結された逆回転の歯車対」の合計9種類のデジタル化及び実体化を行った。

例として、本研究で作製した三種類の機械模型を以下に示す。C4「高次対偶のスライダークランク機構」(図1)は、回転運動を往復直線運動に変換するために使われる機構であり、内燃機構などに使われている[1]。作製した模型は止め具などの小さなパーツを使わないように設計し、簡単に組み合わせが出来るようにした。

C6「スライダークランク機構」(図2)は、クランクリンクがスライダピンの中をスライドすることで、回転運動が直線運動に変換される機構である[1]。

G6「反転歯車の複合歯車列」(図3)は、五つの歯車で構成されており、小さい歯車が大きい歯車の外周を回転する機構である。

3. 本研究以前に作製された模型の改良

前年度までに我々の研究グループで作製されていたC7「単純平歯車機構」、F5「ウェディング・チャンパー・クランク機構」、G1「複合歯車列」、G2「遊星歯車列」、I8「リベリオンチャンバース

クリューホイール機構」の改良模型を作製した。改良を行った例としてC7「単純平歯車機構」を図4に示す。これは、歯車の組み合わせにより動力を伝達する機構である。この作製模型はハンドルにかかる力が大きく、付け根が破損した。そこで、ハンドルをシンプルで壊れにくい形状に変更した。

4. まとめ

新たに9種類のルーロー模型のデジタル化と実体化を行った。また、前年度までに作製されていた実体化模型の改良を5種類行った。

謝辞 本研究は JSPS 科研費 24H00162 の助成を受けたものです。



図1 C4 高次対偶のスライダークランク機構
(左)ルーロー模型、(中)3D形状データ、(右)実体化模型



図2 C5 スライダークランク機構
(左)ルーロー模型、(中)3D形状データ、(右)実体化模型

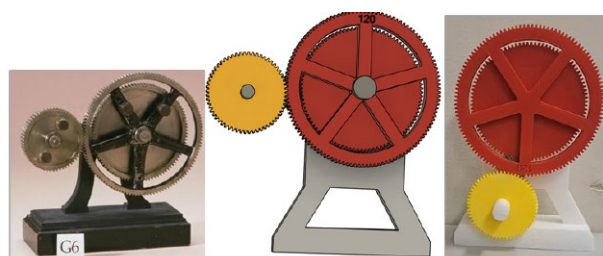


図3 G6 反転歯車の複合歯車列
(左)ルーロー模型、(中)3D形状データ、(右)実体化模型

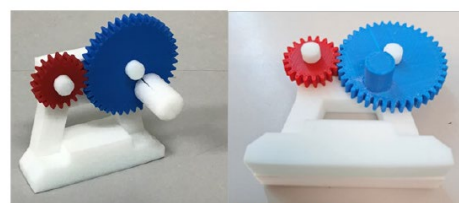


図4 C7 単純平歯車
(左)2022年度作製模型、(右)本研究で作製した模型

参考文献

- [1] Cornell University Library , Kinematics Models for Design Digital Library (KMODDL)
<https://digital.library.cornell.edu/collections/kmoddl>
- [2] 伊美、手嶋、「機械機構を学ぶ為の立体教材の開発」、形の科学シンポジウム講演予稿集, 第7巻2号 (2022) pp. 30-31.
- [3] 湊川、中沢、伊美、手嶋、「機械機構を学ぶ為の立体教材の開発Ⅱ」、形の科学シンポジウム講演予稿集, 第8巻1号 (2023) pp. 13-14.
- [4] 遠矢、手嶋、「機械機構を学ぶ為の立体教材の開発Ⅲ」、形の科学シンポジウム講演予稿集, 第9巻2号 (2024) pp. 9-10.

折り紙開閉機構に基づく連結多面体の幾何学変形と空圧駆動

○遠藤 洋史¹・高橋 昂也²

富山県立大学工学部¹, 大学院工学研究科² 〒939-0398 富山県射水市黒河 5180
endo@pu-toyama.ac.jp

Pneumatic Locomotion and Elastic Deformation of Triangular Connected Structures Based on Origami-Opening/Closing Mechanism

Hiroshi ENDO, Koya TAKAHASHI

Toyama Prefectural University • 5180 Kurokawa, Imizu-shi, Toyama 939-0398, Japan

Abstract: The mechanism of origami can be utilized not only deformation from a two-dimensional sheet to a three-dimensional object, but also geometric deformation of polyhedron. In recent years, it has made relatively easy to create complex shapes with the development of 3D printing technology. It has been increased particularly the research and developments of soft robotics using materials such as gels and elastomers. For example, the noncontact type and ultra-gentle type robotic grippers attract great attention as they cause less damage to the grasped objects.

In this study, we fabricated a cylindrical structure with each vertex of a triangle connected to each other, the assembled cylinder, and octahedral structures. It was investigated the deformation behavior under mechanical and pneumatic control.

Keywords: Soft robot, Origami, Kirigami, Auxetic structure, Pneumatic control

【緒言】折り紙機構は2次元平面から3次元立体物への変形のみならず、多面体の幾何学変形にも活用できる[1]。近年では3Dプリンティングの技術進展に伴い、複雑な形状も比較的容易に造形できるようになった。特にゲルやエラストマーといった素材から造形したソフトロボティクスに関する研究開発が活発である。例えば Teoh らは大規模な折り畳み多面体である非接触グripperを開発した[2]。海洋生物を迅速かつ非侵襲で多面体内へ封入することに成功している。Xia らはさらに、この多面体非接触グripper機構を改良した[3]。既存の一方向からの捕捉プロセスでは捕捉効果の少ない水流が生成する。そこで無指向性の捕捉プロセスにより水流を軽減できた。

当研究室においてもこれまでに、折り紙類似の切り紙構造を非対称ベローズアームに固定したソフトグripperを作製してきた[4]。アームを敢えて拘束する発想のもと、ベローズ由来の構造変形に限定されたグripper機能の拡張を目的として、事前に切り紙天板に固定してからのポスト機能動作を検証した。他にも負のポアソン比を有する Auxetic 構造を利用した種々の幾何学変形について議論してきた。リエントラント矢じり型 DAH (double arrowhead honeycomb) 構造をヘビの鱗様のアーマードに見立て、ベローズチューブ周囲に一体化したシリンダー構造体を設計した。

以上を踏まえ、本研究では三角形の各頂点を連結したシリンダー構造体やその集合体、および八面体を作製した。力学および空圧駆動に伴う変形・開閉挙動について検討した。

【実験方法】各種構造体作製には光造形(SLA)方式の3Dプリンタ Form 3(Formlabs 社)を使用した。レジンには Elastic 50A を使用した。カイヤル回転を誘起するために一辺:12 mm の三角形を連結させたシリンダー(全長:80 mm)および集合体(シリンダー10 体を連結)を造形した。また開閉機構を誘起する構造として、一辺:20 mm の三角形を連結させた八面体を造形した(Fig.2 (b))。さらに、この八面体中央にアクチュエータとして機能する全長:35 mm のベローズ(Fig.2 (a))を一体造形した(Fig.2 (c), (d))。

【結果および考察】シリンダー両端を圧縮していくと単位セル構造である三角形辺部が接するまで回転し、全体が一軸収縮した(Fig.1 (a))。シリンダー側面の三角形同士を連結した集合体においては、上面からの圧縮により全体が体積収縮しクッシングの応用性が期待された(Fig.1 (b))。

一方、本設計の八面体は任意の対となる頂点を伸長-圧縮操作すると上下対称と左右対称の辺部空隙が交互に開閉する特徴がある。この機構を利用して、ベローズへ空気注入-吸引を繰り返した結果、ベローズ一軸伸長に伴う交互開閉を確認した。開閉による物体把持可能なグripperとしての応用も考えられるが、加えて、ピラー付属による歩行性を検証した。興味深いことに円筒管内において八面連結体は回転しながら歩行推進し、連結体組み合わせにより進行方が逆転することを見出した。円管内の探索ロボや腸内メディカルロボへの展開に期待される。

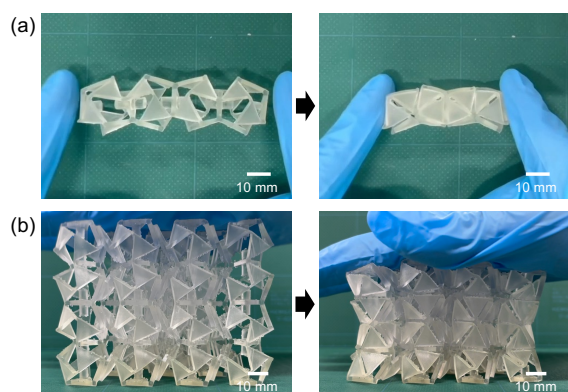


Fig. 1 Before and after compression behavior of (a) triangular connected-(a) single cylinder and (b) gathering cylinder.

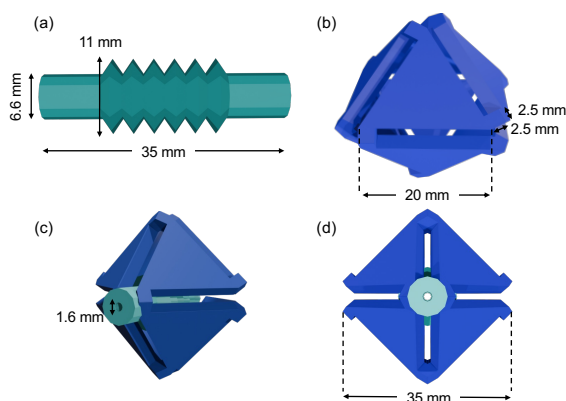


Fig. 2 Schematic illustration of the (a) bellows, (b) triangular connected octahedron, (c) bellows integrated octahedron (overall view) and (d) bellows integrated octahedron (top view).

【参考文献】

- [1] X. Ning *et al.*, “Assembly of Advanced Materials into 3D Functional Structures by Methods Inspired by Origami and Kirigami: A Review” *Adv. Mater. Interfaces*. 5, 1800284 (2018).
- [2] Z. E. Teoh *et al.*, “Rotary-actuated folding polyhedrons for midwater investigation of delicate marine organisms” *Sci. Roboti.* 3, eaat5276 (2018).
- [3] Q. Xia *et al.*, “An Omnidirectional Encircled Deployable Polyhedral Gripper for Contactless Delicate Midwater Creatures Sampling” *Adv. Eng. Mater.* 25, 2201416 (2025).
- [4] 遠藤洋史, 本多佑希, 守川和馬「空圧駆動に基づく幾何学形状可変性グripperやリング構造の構築」第96回形の科学シンポジウム講演予稿集, pp.25-26(2024).

【謝辞】本研究の一部は JSPS 科研費 (23K26393)からの援助により実施した。

折り紙工学による宇宙機タンク用ダイアフラムの研究

奥泉信克^{1*}, 谷弦耶¹

¹ 室蘭工業大学, 北海道室蘭市水元町 27-1

okuizumi@muroran-it.ac.jp

Study on diaphragms for spacecraft tanks applying origami engineering

Nobukatsu Okuizumi¹, Genya Tani¹

¹Muroran Institute of Technology, 27-1 Mizumoto-cho, Muroran, Hokkaido, 050-8585, Japan

Abstract: Recently, JAXA developed a new lightweight hemispherical diaphragm made of PTFE resin for a spacecraft oxidizer tank. But the manufacturing was difficult, and the deformation behavior was not satisfactory. In this study, origami engineering was applied to create thin hemispherical diaphragms from PTFE resin sheets, and water discharge tests were conducted to evaluate their deformation properties.

Keywords: Diaphragm, Spacecraft tank, Semispherical shell, PTFE sheet, Origami

1. はじめに

宇宙機のタンク内の推薬を排出するため、ゴム製や金属製の薄肉半球殻ダイアフラムで推薬を覆っておき、外側から気体の圧力でダイアフラムを圧縮して推薬を排出する方法があるが、ゴム製ダイアフラムは酸化剤に耐性がないため、酸化剤タンクには重量の大きな金属製が使われてきた。そのため近年 JAXA では、フッ素系の PTFE (Polytetrafluoroethylene) 樹脂を用いた軽量化なダイアフラムが開発されたが、PTFE 樹脂で薄肉半球殻を製造するにはブロックからの切削による方法しかなく、均一な薄肉化が困難で、変形挙動や製作精度、コストなどに大きな問題があった^{1,2)}。そこで本研究では、折り紙工学を利用して一様な薄さの PTFE シートを半球殻形状に折り畳むことによってダイアフラムを製作する方法を考案し、実際に 4 種類のダイアフラムを試作して注排水試験を行った。

2. 切削による PTFE ダイアフラム試作モデル

図 1 に切削により製作された PTFE ダイアフラムの試作モデルの 1 つを示す。直径約 800 mm, 最も薄い箇所肉厚が 0.5 mm の半球殻形状である。推薬排出中に上からダイアフラムが潰されていくとき、ダイアフラムが非対称に変形すると、液体の重心が偏って宇宙機の姿勢制御に悪影響を及ぼす。それを防ぐには、液体の動きにダイアフラムが追従するようにできるだけ均一で薄い方がよいと考えられる。しかし、PTFE 樹脂ブロックの削り出しでは加工中の熱変形等のため薄肉化が困難だったため、同心円状のリブを付加して非対称変形を抑える設計としたが、重心変動の要求を十分満足することは困難だった。

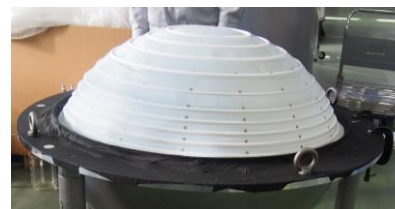


Fig. 1. PTFE diaphragm prototype

3. PTFE シートの折り畳みによる半球殻ダイアフラムの試作

上述の理由から、本研究では、均一な薄さの 1 枚のシートの折り畳みによって、ダイア

フラムを作る方法を検討した。そこで、折紙工学分野で開発された回転体ベースの立体折紙設計ツール ORI-REVO³⁾を利用し、円形のシートをつば付き疑似半球殻に変形する折り畳みパターンを出力して、市販の厚さ 0.1mm の PTFE シートで直径 300 mm のモデルを 4 通り試作した。例として 2 種類の折り線図と試作ダイアフラムの概観を図 2 に示す。この方法により、数時間の折り畳み作業で 1 モデルの製作が可能である。

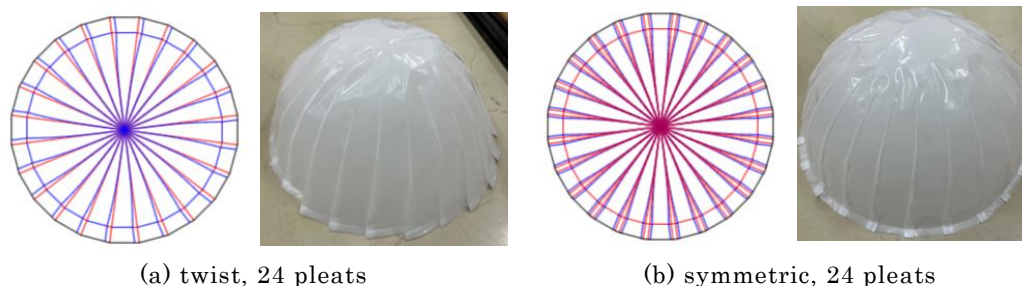


Fig. 2. Folding patterns for hemispherical diaphragms with flanges

4. 注排水試験

次に、図 3 のように 2 個のフランジ付きアクリル半球ドームの間に試作ダイアフラムを挟んでクランプで固定し、ドーム底部に取り付けたポートからポンプで注排水してダイアフラムの変形挙動を観察した。その結果、折り畳みパターンによらず、試作ダイアフラムは SLIM 用と比べて柔軟で、最初に中央部から凹み始め、折り畳みの影響で凹凸のあるドーナツ形状を経て外側が反転し、最後にドーム内壁に張り付く挙動が確認された。

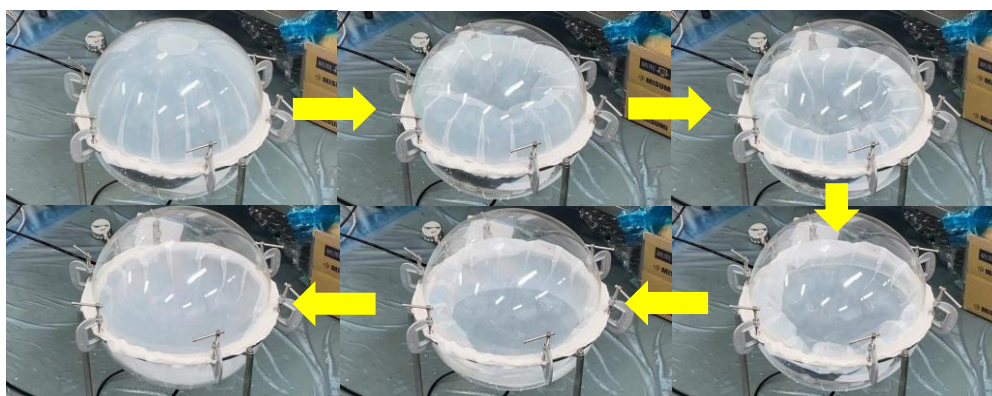


Fig. 3 Water discharging test of a prototype diaphragm

5. おわりに

折紙工学を利用して、1 枚のシートから宇宙機タンク用ダイアフラムを製作する方法の基礎検討を行い、実際にシートの折り畳みでダイアフラムを試作し、注排水を行うことができた。しかし、試作モデルフランジをアクリル半球ドームのフランジで挟んで固定する際、折り畳みによる凹凸のため隙間が生じてしまうため、不乾性充填材で隙間を埋めて試験を行った。実際のタンクにおいて完全に密閉する方法の検討が今後の重要な課題である。

参考文献

- [1] 奥泉信克ほか、折り返しのある半球殻 PTFE ダイアフラムの反転シミュレーション、第 59 回構造強度に関する講演会、2A05、(2017)。
- [2] 奥泉信克ほか、折り返しのあるフルスケール半球殻 PTFE ダイアフラムの反転挙動、第 60 回構造強度に関する講演会、1B22、(2018)
- [3] Jun Mitani, “ORI-REVO: A Design Tool for 3D Origami of Revolution”, http://mitani.cs.tsukuba.ac.jp/ori_revo/, (Jan.25, 2015)

ユニット折り紙にルーツを持つモデリングスキルで準結晶もダイヤモンド結晶も作れます！もちろん模型の話です。

八十嶋章雄

SSDS Symmetric 福井県坂井市三国町殿島 2-19

Yaso0511@yahoo.co.jp

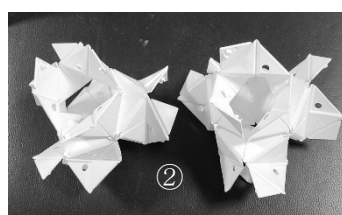
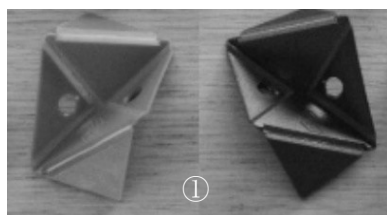
Using modeling skills that have their roots in unit origami, you can make quasicrystals and diamond crystals! Of course, we're talking about models.

Akio Yasoshima

SSDS Symmetric 2-19 Tonoshima, Mikuni-cho, Sakai City, Fukui Prefecture

Abstract: The modeling skills used here have a slight but significant difference from the basic modeling rules of "Unit origami." The difference is that the unit is folded in two chiral ways. By introducing a chiral folding method, versatility was created in the modeling results. As a result, here we will introduce a "quasicrystal structure model" and a "diamond crystal model" using the basic shape of the SP3 hybrid orbital

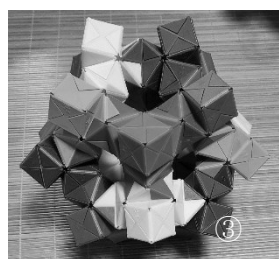
Keywords: Unit origami. Chiral. quasicrystal structure. SP3 hybrid orbital



5 回対称と 6 回対称の基本形で結晶構造を製作

並進対称性を持つダイヤモンド結晶⑥は、モジュール①を、二種類の折り方

でサブユニット②を作って交互に組んで制作した⑦結晶は、1 種類の折り方のサブユニットを使って、つなげるときだけ、3 枚はずしてキラリティを反対にして、違うキラリティ



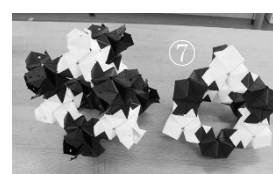
にしてつなげる。このやり方で、③のセンターモチーフができる。センターモチーフの一番外側のキューブ（頂点）にセンターモチーフとはキラリ

ティが反対のサブユニットを 20 個つなげる④。つなげたサブユニットの先に、5 回対称の構造を 12 個つくる⑤。

ボール&スティックとは違う造形原理

このモデリングスキル（モジュラー折り

紙+キラリティ）で使われる「頂点」や「辺（エッジ）」の次元について、一般的な表現を使えば、3 次元になっている。点（頂点）には体積はなく、エッジ（辺）には、太さがな



いのが一般的な表現であろう。しかしながら、実際の原子は物質であり、実体のあるものだから、頂点にもエッジにも「体積」を想定した方が、現実と相性がいいのかもしれない。

原子核を頂点に、電子（結合の腕）を辺（エッジ）対応させたモデリングスキル（共有電子を許容する、枠の重なり⑧）

この分子構造模型のシュミレーション（モジュラー折り紙＋キラリティ）では頂点（原子核）のまわりに接合の腕（電子）を伸ばした存在の「個数」を一つの目安として制作している⑧。頂点に原子核があって、となりあう原子とはエッジの中点等でつながっている感じだ。（造形上の方便としてのイメージである。）⑥の模型では、腕は 1.5 で接続、⑤の準結晶では、1.5 と 0.5 で接続（反角柱の個数でカウントする。）



準結晶のセンターモチーフには 20 個の原子を想定している。（頂点 20 個分のサブユニットで制作）ジョイントにも原子を 20 個想定している。第 3 殻に当たる、モチーフ 12 個の構造にも各モチーフには原子を 20 個使うことを想定している。

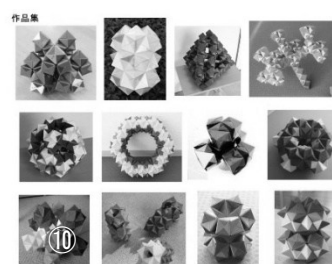
分子の構造は頂点を基準として考えた方がとらえやすい。頂点に原子核があって、エッジの部分で半ばまでは電子による結合部分というイメージである。頂点にもエッジにも量があって 3 次元で表現する。という方が自然である気がする。そして、ここで紹介するモデリングスキルで表現される分子の形には、SP2 混成軌道（②平面三角形）と SP3 混成軌道（③正 4 面体）がある。

ブラウン一般化学 I より→

そのべ式ユニット折り紙とモジュラー折り紙＋キラリティの違い

「そのべ式ユニット折り紙」では、「そのユニットの折り方は一種類と決まっている。同じユニットで制作することが前提である。ところが、このモデリングスキル「モジュラー折り紙＋キラリティ」の考案者は、鏡対称の折り方のユニットは接合できるうえに、結果としての造形物に汎用性が生まれることを見出した。このことは、ユニット折り紙の愛好者であれば、多くの人が気付いていたであろうことが予想される。

しかし、そのモデリングスキルの実用例の探索や、新しい利用の方法の創作を試した方はいなかったようである。⑩で示すのは「モジュラー折り紙＋キラリティ」というモデリングスキルで制作されたプロトタイプ。すべて 2017 年の短い時期に集中的に制作された。この中に共有結合の結晶構造が見られたことから、「ダイヤモンド結晶構造」さらに、擬似ブリルアンゾーンの模型製作から準結晶構造模型につながった。



<参考文献>

1. 「準結晶の物理」 竹内 伸, 枝川圭一, 蔡安邦, 木村薫著 朝倉書店
2. 「準結晶の科学」 佐藤憲昭, 石政勉 名古屋大学出版会
3. ブラウン一般化学 I 荻野和子 監訳 上野圭司, 鵜沼英郎, 荻野和子 鹿又宣弘 訳

置換パズルに関する研究(1)：場合の数と最短コストについて

東汐夏¹，松浦真也²

愛媛大学大学院理工学研究科，愛媛県松山市文京町 2-5

¹ m807002k@mails.cc.ehime-u.ac.jp

² matsuura.masaya.mx@ehime-u.ac.jp

A Study of Permutation Puzzles (1): On the Number of Cases and the Shortest Cost

¹Shioka Azuma, ²Masaya Matsuura

Graduate School of Science and Engineering, Ehime University,

2-5 Bunkyo-cho, Matsuyama-shi, Ehime

Abstract: We study $2 \times n \times 1$ permutation puzzles related to the Rubik's Cube, focusing on defining operations and analyzing the number of cases and the minimum cost, aiming to provide mathematical explanations for these aspects. This presentation will explain the number of cases and the minimum cost.

Keywords: Rubik's Cube, $2 \times n \times 1$ permutation puzzles, the number of cases, the minimum cost

1. はじめに

誰もが一度は遊んだことがあろうルービックキューブ(メガハウス社の商標). ルービックキューブに関する研究が多くある中で, 私はルービックキューブと似ている置換パズルについて研究を行うことにした. パズルごとに操作を定義し, 群論を使って数学的に説明することを目標とする. その中でも特に, 場合の数と最短コストに注目する.

2. 置換パズル

私は現在 $2 \times n \times 1$ 置換パズルについて研究を行っている. $2 \times n \times 1$ 置換パズルとは, 以下の図1のようなパズルである. 以下, $2 \times n \times 1$ 置換パズルを $2n1$ パズルと表記する. これらは, 4面体または3面体から構成され, ルービックキューブと同様に, 白, 黄, 青, 赤, 緑, 橙の6色で考える.

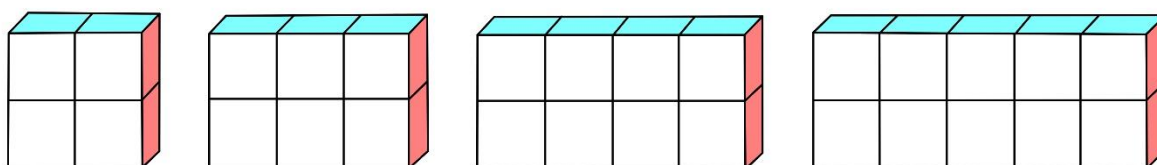


図1 左から $2 \times 2 \times 1$, $2 \times 3 \times 1$, $2 \times 4 \times 1$, $2 \times 5 \times 1$

それぞれの置換パズルごとに操作を定義し, 以下に挙げる場合の数や最短コストについて研究を行う. ここでは, 221 パズルを例にして操作の定義を行う.

U : 221 パズルの上段を横に 180 度回転させる操作

D : 221 パズルの下段を横に 180 度回転させる操作

R : 221 パズルの右列を縦に 180 度回転させる操作

L : 221 パズルの左列を縦に 180 度回転させる操作

3. 場合の数

置換パズルにおけるキューブの色の配置の総数のことを場合の数とする．たとえば，ルービックキューブの場合の数は，43,252,003,274,489,856,000 通りである．

場合の数は先ほどの操作（221パズルの場合は U, D, R, L の4つの操作）を使って求めることができる．操作を生成元とした群を221パズル群とする．その群の位数が場合の数となる．さらに，プログラムにより簡単に計算することができる．

置換パズル	場合の数	置換パズル	場合の数
211	8	281	331776
221	24	291	2654208
231	192	2101	7962624
241	576	2111	63700992
251	4608	2121	191102976
261	13824	2131	1528823808
271	110592	2141	4586471424

また， $2n1$ パズルの場合の数は次の式を用いて計算することもできる．

(1) $n = 2k$ ($k \in \mathbb{N}$) のとき

$$(4!)^{\frac{n}{2}} = (4!)^k$$

(2) $n = 2k + 1$ ($k \in \mathbb{N}$) のとき

$$(4!)^{\frac{n-1}{2}} \times 2! \times 2 = (4!)^k \times 8$$

4. 最短コスト

各状態から色と配置が揃っている完成の状態までの最短の手順に含まれる操作の数のことを最短コストという．たとえば，ルービックキューブの最短コストは 20 手である．ルービックキューブの最短コストは一般的に「神の数字」と呼ばれ，どんな状態からでも完成までに最小 20 手必要であることを表す．

パズルをグラフで表現し，そのグラフに関する最短経路問題を解くことにより最短コストを求めている．

参考文献

- [1] David Joyner 著 (川辺治之訳)『群論の味わい ―置換群で解き明かすルービックキューブと 15 パズル―』共立出版株式会社 2010 年 12 月 10 日発行
- [2] God's Algorithm – Optimal solutions of the Rubik's Cube – Speedsolving.com Wiki
https://www.speedsolving.com/wiki/index.php?title=God%27s_Algorithm 閲覧日：2025 年 5 月 17 日
- [3] C. Bandelow. Inside Rubik's Cube and Beyond. Birkhäuser, (1982).
- [4] Bonzio, Stefano; Loi, Andrea; Peruzzi, Luisa. On the $n \times n \times n$ Rubik's cube. (English summary) Math. Slovaca 68 (2018), no. 5, 957–974.

置換パズルに関する研究(2)：模様の生成について

松浦真也¹、東汐夏²

愛媛大学大学院理工学研究科、愛媛県松山市文京町 2-5

¹matsuura.masaya.mx@ehime-u.ac.jp

²m807002k@mails.cc.ehime-u.ac.jp

A Study of Permutation Puzzles (2): On the Generation of Patterns

Masaya Matsuura¹ & Shioka Azuma²

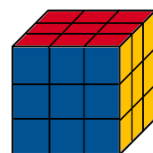
Graduate School of Science and Engineering, Ehime University,
2-5 Bunkyo-cho, Matsuyama-shi, Ehime

Abstract: The national flags of the Nordic countries are all based on a cross design called Nordic Cross. In this presentation, we show that all the patterns of these flags are expressed simultaneously on a $3 \times 3 \times 3$ permutation puzzle (a slightly modified version of Rubik's cube). We analyze this fact from the viewpoint of both group theory and graph theory. The topic is strongly related to harmonious coloring (a kind of graph coloring), which is of growing interest.

Keywords: permutation puzzles, octahedral group, graph coloring, harmonious coloring, national flags of the Nordic countries

1. はじめに

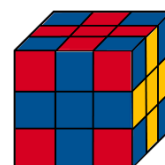
本発表では、ルービックキューブ（メガハウス社の商標）と同様な置換パズルにおいて、各面を同一色に揃えるのではなく、色の組合せにより、各面に模様を生成することを考える。特に、ルービックキューブと同じ $3 \times 3 \times 3$ 型（ただし、配色は異なる）の置換パズルを用いて、北欧諸国の国旗を模した模様を生成する。一般に、北欧諸国とはデンマーク、フィンランド、アイスランド、ノルウェー、スウェーデンの5か国のことを指す。これらの国の国旗は、いずれも十字模様であり、デンマークは赤色の背景に白色の十字、フィンランドは白色の背景に青色の十字、アイスランドは青色の背景に赤色の十字、ノルウェーは赤色の背景に青色の十字、スウェーデンは青色の背景に黄色の十字である。実際には、アイスランドとノルウェーの国旗の



国旗（デンマーク、フィンランド、アイスランド、ノルウェー、スウェーデン）

十字模様は、白色で縁取られているが、ここでは、背景の色と十字模様の色のみを考察の対象とする。また、各国の国旗は正方形ではなく、十字模様の位置も中心からずれている。このため、これらの国の国旗を、 $3 \times 3 \times 3$ パズルの模様で厳密に再現することはできない

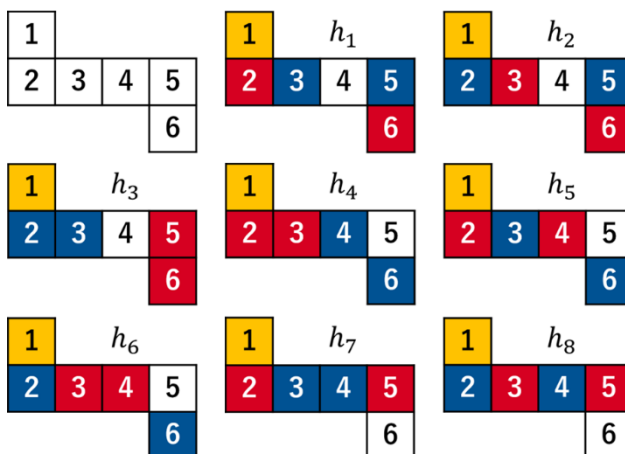
が、下図のように、各面の中心部分に十字模様を配置することで、各国の国旗を表現する。



国旗をパズルの十字模様で表現

2. 初等的な考察

$3 \times 3 \times 3$ 型パズルの6面のうち、5面を用いて北欧5か国の国旗の模様を表現することを考える。まず、パズルの6つの面を右図のように展開図で表し、各面に1から6の番号を付す。次に、各面の配色パターンを考える。簡単な考察から、北欧5か国の国旗を単一のパズルで同時に表現するためには、パズルの初期状態での配色は、赤と青を2面ずつ、白と黄を1面ずつにする必要がある。これを満たす配色パターンは、パズル全体を回転させて一致するものを同一視すると、本質的には右図に示す $h_1 \sim h_8$ の8通りである。

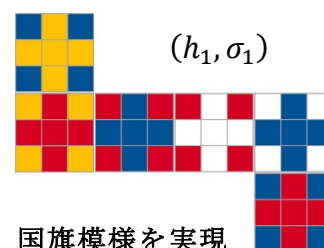


パズルの展開図と配色

ここで、各面の十字部分の色は固定したまま、背景の部分の色を動かす操作 $\sigma_1 \sim \sigma_4$ を考える。

$$\sigma_1 = (1\ 2\ 3)(4\ 5\ 6), \quad \sigma_2 = (1\ 2\ 5)(3\ 6\ 4), \quad \sigma_3 = (1\ 3\ 4)(2\ 6\ 5), \quad \sigma_4 = (1\ 4\ 5)(2\ 3\ 6).$$

例えば、 σ_1 における $(1\ 2\ 3)$ は、面1の背景を面2に、面2の背景を面3に、面3の背景を面1に移すことを意味し、 $(4\ 5\ 6)$ は、面4の背景を面5に、面5の背景を面6に、面6の背景を面4に移すことを意味する。操作前の配色と、上記の操作を適切に組み合わせることで、北欧5か国の国旗を同一パズル上に同時に配置することができる。例えば、初期配色 h_1 と、背景移動の操作



国旗模様を実現

σ_1 を組み合わせることで、右図のように各国の国旗を一斉に表現できる。なお、パズルには6面あるので、面が1つ余る。実は余った面の模様も、北欧諸国と深い関係がある。

3. グラフ理論との関係

本発表では、 $3 \times 3 \times 3$ 型のパズル上で北欧5か国の国旗模様を生成するという問題や、それを一般化した問題が、調和的彩色問題に帰着できることを示す。調和的彩色問題は、グラフ理論における彩色問題（グラフの頂点などに、制約条件を満たすように色を塗る問題）の一種であり、それ自身、研究対象として興味深い。

参考文献

- [1] Edwards, K.: Harmonious chromatic number of directed graphs. Discrete Applied Mathematics 161, 369–376 (2013).
- [2] Hegde, S.M., and Castellino, L.P.: Harmonious colorings of digraphs. Ars Combin. 119, 339–352 (2015).

染色像の立体構築像による肝疾患の線維化領域の定量的評価

上田 稜真¹, 昌子 浩登^{1, #}

¹ 関西学院大学大学院理工学研究科数理科学専攻, 三田市学園 2-1

[#] shoji@kwansei.ac.jp

3D Reconstruction for Quantitative Assessment of Liver Fibrosis

Ryoma Ueda¹, Hiroto Shoji¹

¹ Kwansei Gakuin University, Gakuen, Sanda, 699-1330, Japan

Abstract: Liver diseases often progress through morphological changes in tissue over time, and quantifying these changes is crucial for diagnosis and treatment evaluation. In this study, we developed a method to accurately measure temporal morphological changes in diseased liver tissue using stained images. The progression speed was evaluated quantitatively. Furthermore, based on the acquired data, previously proposed mathematical models of morphological transformation were compared using statistical and mathematical approaches. Through this comparative analysis, we aimed to elucidate and predict the mechanisms underlying disease progression.

Keywords: Liver Fibrosis, Image Analysis

1. はじめに

肝臓疾患の多くは、時間と共に臓器組織の構造変化として進行する。特に線維化や腫瘍形成に代表されるような形態変化は、疾患の重症度や進行段階の指標となる重要な情報を含んでいる[1, 2]。従来の診断手法では、ある一時点の静的画像に基づいて病理的評価を行い、診断がつけられてきた[1, 3]。しかし、昨今のAI技術の進展による画像解析技術の飛躍的な発展により、画像情報を複雑に組み合わせ、疾患の動態的变化を捉えることが可能になってきた[3]。これらの技術を活用し、より精度の高い診断や予後予測の手法開発が行われている[3]。本研究では、まず肝臓疾患部分の時間的な形態変化を定量的に捉える画像解析手法を開発した。肝臓の組織・細胞塊レベルの構造は肝細胞や血管系である類洞が三次空間に配置していることから、画像解析のための三次元再構築立体像を作成する手法を作成した。さらに、疾患進行の複数時点の三次元立体像を準備し、変化領域の抽出やその体積・形状指標の時系列解析を行った。これらの計測結果をもとに、疾患進行に伴う形態変化を数理モデルとして記述し、力学的要因の解明を現在試みている。

2. 三次元再構築像の作成

高脂肪高コレステロール食を継続的に投与することで脂肪肝を誘発するラットモデル（それぞれ継続餌与期間 4 週, 8 週, 12 週, 16 週の個体を以下では 4w, 8w, 12w, 16w とする）を作製し、各時点における肝臓を摘出した。摘出した肝臓組織から連続薄切り切片を作成し、各切片に対してアザン染色（図 1 左において、肝細胞:赤, 線維化部分:青）を施した。



図 1: 立体構築のための手法概要

染色後の切片を明視野顕微鏡(BZ-X810)により撮像した。得られた染色像に対して、図1(左と真ん中)に示すように位置合わせ(ランドマーク6点を用いたアフィン変換)を行い、構造的な整合性を確保した後、画像処理により線維化部分を抽出するため2値化を実行した。2値化された連続画像群を用いて、コンピュータ内でサンプルの線維化した領域の立体再構築を行なった(図1右側)。

3. 計量比較など

コンピュータ内で立体再構築した疾患領域の体積変化(図2)など、いくつかの形態特徴量を計測し、その時間変化に注目した。それぞれの特徴を比較対象として、古典的に有名な形態変化を表す数理モデルを用いて、形態変化を最も近似するモデルの検討を行なった。最尤法並びに統計的なモデル選択手法を用いることで、最良モデルを探索した。さらに、疾患領域と健康領域との界面の成長が二次元的な成長であるか三次元的な成長であるかについても考察した。

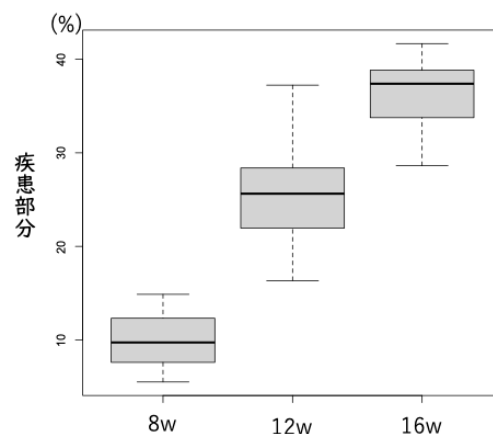


図2: 疾患部分の割合の時間変化

4. 議論

本検討はまだ考察段階であるが、複数の数理モデルの比較から、線維化領域は二次元的に拡張していく傾向が示唆された。特に門脈周囲を基点として繊維性構造が周囲へ放射状に広がる傾向が顕著であり、線維化の初期段階では三次元的な体積拡大というよりも肝組織面内での広がりが主要な進展様式と考えられる。また、時間とともに形態指標の変化も充分考慮すべく、進行パターンのモデル化と予想精度の向上が今後の課題となる。

参考文献

- [1] S. Sherlock, J. Dooley, *Disease of the Liver and Biliary System*, Wiley-Blackwell (2002).
- [2] A. Sanyal *et al.*, *Zakim & Boyer's Hepatology: A Textbook of Liver Disease*, 17th-ed. Elsevier, (2018).
- [3] M. Hashizume ed. *Multidisciplinary Computational Anatomy*, Springer, (2020).

アルキメデス・タイリングから設計された kirigami 構造の 設計プロセスに基づく分類

鈴木雄也¹⁾, 吉野隆²⁾

1) 東洋大学大学院理工学研究科, 2) 東洋大学理工学部

〒350-8585 埼玉県川越市鯨井 2100

1) s36a02500137@toyo.jp ,2) tyoshino@toyo.jp

Classification of Kirigami Structures Designed from Archimedean Tilings Based on the Design Processes

Y. Suzuki¹⁾, T. Yoshino²⁾

1) Graduate School of Science and Engineering, Toyo University,

2) Department of Mechanical Engineering, Toyo University

Abstract: We investigate kirigami structures used in engineering based on Platonic and Archimedean tilings. We propose both a naming rule by focusing on the shape of pores and a classification of their design processes.

Keywords: Kirigami

1. はじめに

本研究では主にアルキメデス・タイリングを元に工学において通常用いられる kirigami 構造のデザインを試みた。また kirigami が展開する際の動きを司る孔の性質に注目した kirigami の表現方法を提案し、設計プロセスによる分類をする。

2. 方法

本研究で対象となる kirigami とは一部の頂点がジョイントで連結された多角形の集合体である。多角形を並進及び回転させることでシートが展開する。Fig.1 はアルキメデス・タイリングの1つである (3, 4, 6, 4) をもとにした kirigami が展開する様子であり, Fig.2 は実際に作成したものである。

kirigami を表す記号として $[\{n_1, k_1\}^{m_1}, \{n_2, k_2\}^{m_2} \dots]$ といった表記を提案する。 $\{n_i, k_i\}$ は1つの正多角形の寄与を表し、複数の $\{n_i, k_i\}$ は多角形の時計回りに並ぶ順番を意味する。 $\{ \}^{m_i}$ は繰り返しを意味している。 $\{ \}^{m_i}$ はさらに外側に多重化しても良い。 n_i は i 番目の孔の周りにある多角形の辺数, k_i は i 番目の多角形がヒンジとヒンジの間にもつ頂点の数, そして m_i は $\{ \}^{m_i}$ 内の構造が

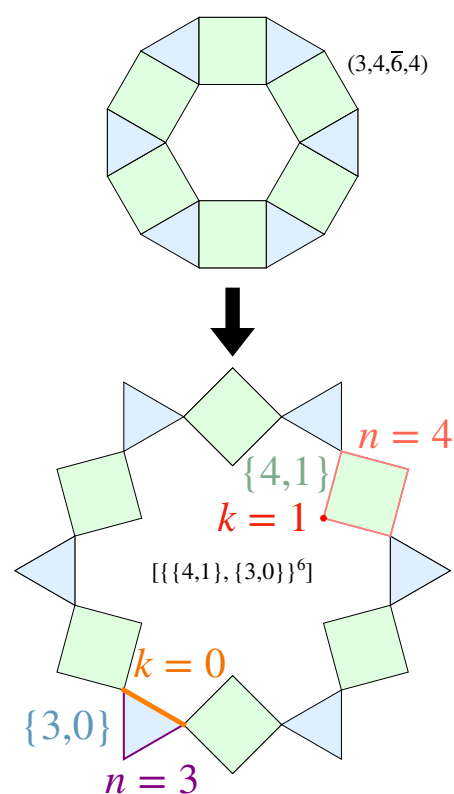
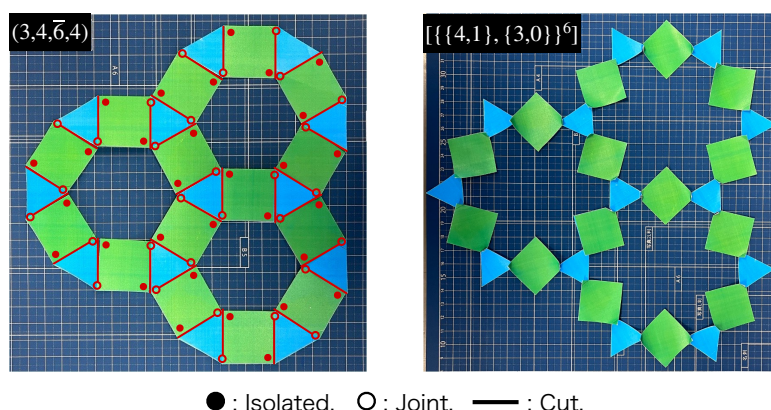


Fig. 1 模式図 $[[\{4,1\}, \{3,0\}]^6]$

繰り返される回数を示している．複数の $\{\}$ がある場合には， n が一番大きいものから始めることとする．また， n が同じで k が複数種類あるときはその中で k がもっとも大きいものから始める．この表現方法に従うと Fig.1 の構造は， $[\{4,1\},\{3,0\}]^6$ となる．

3. 結果

プラトニックおよびアルキメデス・タイリングをもとにした kirigami の多様性を検討した．さらに，元になったタイリングとそこからできた kirigami の対応関係を明らかにするため，タイリングに対して行った作業によるタイプ分けを行った．結果を Fig.3 に示す．



● : Isolated. ○ : Joint. — : Cut.
Fig. 2 (3,4,6,4) をもとに kirigami を作成した例

Fig.3 の見方を説明する．左側に並ぶタイリングは黒い背景のプラトニックなタイリングと背景がオレンジのアルキメデス・タイリングを表している．タイリングをもとにそれらから出る矢印の先にある，kirigami が作られる．矢印上の数字はもとのタイリングの中で「 $\bar{}$ 」がつく図形に孔を空けたことを表す．

設計プロセスによって4つのタイプに分類をすることができた．Type A は孔を空けず， $k=0$ のみでできていることを示す．Type B は孔を空けず， $k>0$ が含まれる kirigami であることを示す．Type C は偶数角形に孔を空けて作られる構造である．Type D は切り込みを入れずに複数の多角形に孔を空けるのみで完成する構造である．

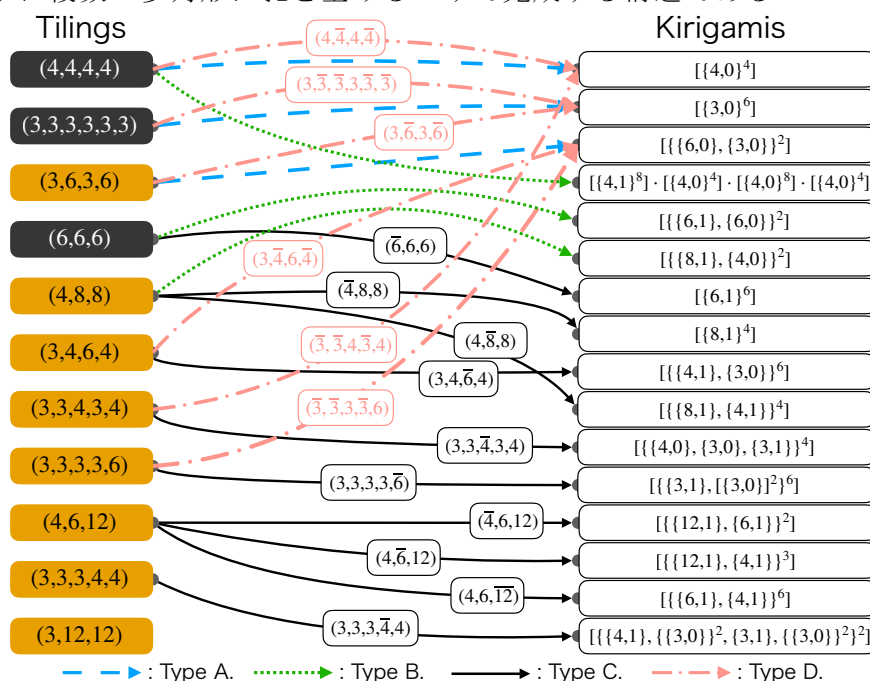


Fig. 3 Tiling と kirigami の関係

文献

G. P. T. Choi, L. H. Dudte and L. Mahadevan, Programming shape using kirigami tessellations, NATURE MATERIALS, Vol 18, No.52 (2019), 999-1004

エッシャー「円の極限 III」に見られる白い曲線を球面に描く

吉野隆

東洋大学理工学部、〒350-8585 川越市鯨井 2100

tyoshino@toyo.jp

Drawing the White Curves Appeared in Escher's "Circle Limit III" onto a Sphere

Takashi Yoshino

Toyo University, Kujirai 2100, Kawagoe, 350-8585

Abstract: I applied the drawing rules of equidistant curves introduced by Escher's "Circle Limit III" to spherical surfaces. The results are shown in Fig. 2 of this manuscript.

1. はじめに

エッシャー「円の極限 III」は双曲面における測地線を用いた三角形タイリングをモチーフにした作品として広く知られている（著作権が気になるので作品画像を本稿に挿入しない）。しかし、この作品で最も目立つ白色で描かれた曲線は測地線ではない。Coxeter[1]は曲線が測地線ではなく等距離線であることを指摘した。本研究ではこの指摘を踏まえて、同様な描画手法を球面に導入したときにどのようなパターンが得られるのかを検討した。

2. 「円の極限 III」におけるタイリング

「円の極限」シリーズの幾何学的な基礎となっているのは、シュワルツ三角形と呼ばれる測地線のみを用いた双曲面上のタイリングをポアンカレ円板（双曲面を2次元平面への投影する方法の一種）上で描いたパターンである。測地線とはユークリッド幾何学における直線に相当する曲線を言い、双曲幾何の場合には双曲線関数の組み合わせで表される双曲線である。シュワルツ三角形とは合同な三角形による曲面のタイリングで、その特徴はそれぞれの頂点が偶数個の同じ大きさをもつ内角で構成されることにある。双曲面におけるシュワルツ三角形は無限の種類が存在するが、この作品に使われているのは $\{6, 4, 2\}$ と表される直角三角形である。しかし、実際にこのタイリングを「円の極限 III」と重ねてみるとその頂点は特徴的な部分（魚の顔の先端が集まるなど）と正確に一致するものの、最も目立つ白い線は測地線にはなっていないという不可解な特徴を持っていることがわかる。

Coxeter[1]は、白い曲線の正体がペトリ多角形[2]とコクセターが呼んだ多角形の頂点を用いた等距離線であることを指摘している。等距離線とは非ユークリッド幾何に特有の曲線で、注目している測地線と等しい距離にある（しかし測地線ではない）曲線を言う。シュワルツ三角形 $\{8, 3, 2\}$ は $\{8, 3\}$ と呼ばれる3つの双曲正8角形がひとつの頂点を構成するタイリングを含んでいる。白い曲線はこのタイリングに現れるペトリ多角形の頂点をひとつおきに使用して描かれた等距離線（のひとつ）であった。

3. 球面への応用

本研究では「円の極限 III」に現れる白い曲線を球面でも描くことの可能性を検討した。基本的には、球面におけるシュワルツ三角形のうち正多角形のタイリングを含んでいるものについてエッシャーが選択したルールで等距離線を描けばよいはずである。

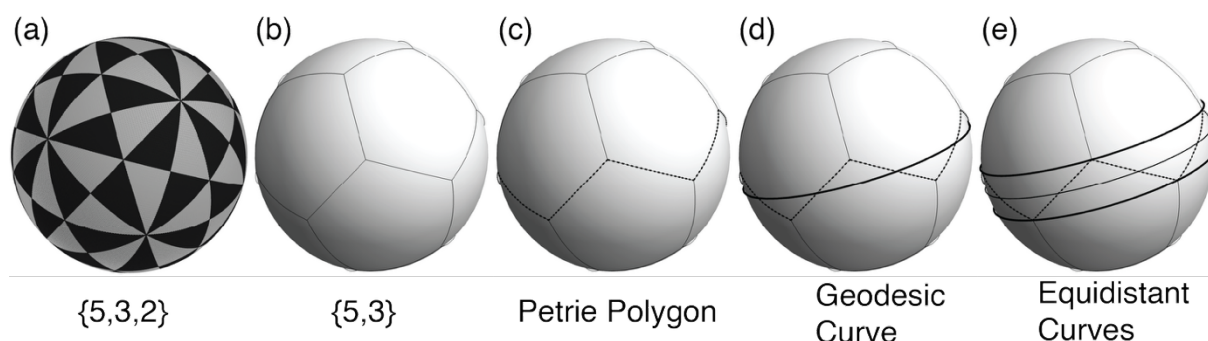


図 1: 白線に相当する等距離線を得る手順.

図 1 に球面のシュワルツ三角形 $\{5, 3, 2\}$ から白い曲線と同じ等距離線を描く方法を示した. (a) は $\{5, 3, 2\}$ のパターンを, (b) は $\{5, 3, 2\}$ が球面正十二面体つまりシュレーフリ記号 $\{5, 3\}$ を含んでいることをそれぞれ示している. (c) は $\{5, 3\}$ に現れるペトリ多角形の一例を破線で示している. 球面正多角形の辺を用いてジグザグに次の頂点を選んで一周するとペトリ多角形が得られる. (d) はペトリ多角形に対応する大円 (球面幾何における測地線) が 1 本だけ決定されること, (e) はペトリ多角形の頂点をひとつおきを選んで 2 本の等距離線 (球面多角形の場合は小円) が得られること, および, このふたつの小円はもとの大円から見て等距離にあることを表している.

図 2 に $\{4, 3, 2\}$ を用いて描いたパターン (左) と $\{5, 3, 2\}$ を用いて描いた二種類のパターン (中央と右) を 3 次元画像とステレオ投影の両方で示した. 後者の例からわかるように, 球面のシュワルツ三角形には双対なふたつの正多角形タイリングを含んでいる場合があるが, ペトリ多角形の選び方によって描き方は異なることになる. 同様のことが $\{4, 3, 2\}$ でも起きている. 「円の極限 III」では 2 本の等距離線から 1 本を選んでいるが, この球面パターンではその選択を行っていないことに注意してほしい.

文献

- [1] Coxeter, H. S. M. (1979). The non-Euclidean symmetry of Escher's picture 'Circle Limit III'. *Leonardo*, 19-25.
- [2] Coxeter, H. S. M. (1973). *Regular polytopes*. pp. 24-25, Dover Publications.

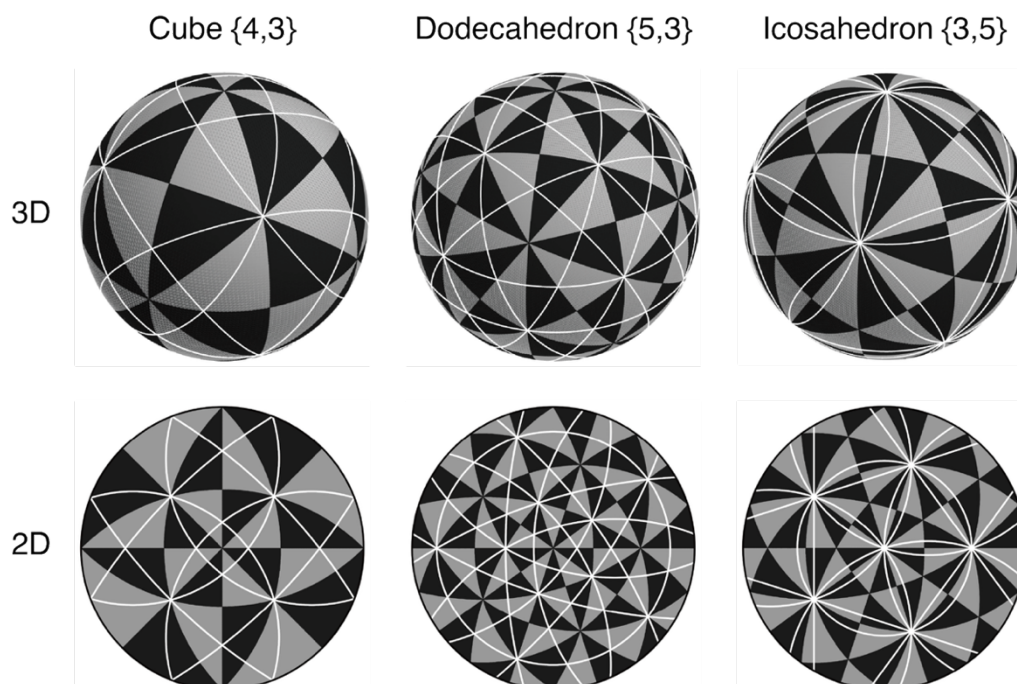


図 2: 球面上に描かれた測地線パターン. 上: 3D 画像, 下: 上半球面のステレオ投影.

車のフロントガラスの雪巻物

納口恭明、罇優子、和泉薫
Dr. ナダレンジャー、茨城県つくば市
nhg.yukigata@gmail.com

Snow Scroll on Car Windshields

Yasuaki Nohguchi, Yuko Motai, Kaoru Izumi
Dr. NADARENJA, Tsukuba-city

Abstract: We report on rolls of snow that form on car windshields.

Keywords: Snow roller, Snow scroll, Fold of gliding snow cover

1. まえがき

積雪は融解や変形、移動などの自然現象によって、さまざまな形を生み出す。まるで、人工的に作られたかのようにも見えるが、逆に、人為的に作ろうとしても、容易にはできない。雪国ではないが、筆者の住む茨城県のつくば市内でも、雪えくぼ、雪形、斑点ぬれ雪、雪まくり、雪しわ、雪ひも、氷紋などは、注意深く観察すれば、そのほとんどのものを確認することができる。ここでは、それらのうち、恵方巻のころ、車のフロントガラスにできた雪まくりのような巻物を、2024年と2025年の2冬季、直接、肉眼で観察したので、その正体について報告する。

2. 雪まくりのような雪の巻物の正体

みぞれで、1～2 cm 程度の湿雪で覆われた車のフロントガラスに、しばらくすると、雪まくりのような雪の巻物状のものが観察されることがある。積雪斜面上に形成される雪まくりは、何らかの理由で雪面に落下した小雪塊が核となって転動しながら下流の積雪を巻き込んでロール状になったものである。風の力で平地の積雪にできるものや、人力で雪を転がして作る雪だるまも動的な転動によって下流側の雪を巻きとって成長するという点で同じ仲間である。

これに対して、車のフロントガラスにできる雪の巻物は、まさに巻物のように細長く、小雪塊が転げ落ちるのをきっかけに形成されるとは思えない。また、本来は巻き取られてなくなっているはずの上流側の積雪が、残されていることもあり、雪まくりとは実は全く別のものと考えられる。通常、この種の雪の造形物は、出現した後に写真で記録されることが多く、その形成メカニズムを知ることは難しい。ただ、雪まくりの場合は動的な現象なので、斜面を転がり下りて出来上がる瞬間や、風で吹き飛ばされた雪の塊が転動して成長する場面を目撃することは容易で、著者も何度か目撃しているが、この雪の巻物はこれまで出来上がる場面を目撃したことがなかった。

しかし、2024年3月8日午前8時自宅前の自家用車のフロントガラス上で一部始終を目撃した(図1)。その正体は、積雪の静的な滑りでできた雪のしわが成長して巻物のように変形したものであり、動的に形成される雪まくりではなかった。また、雪まくりが下流側

の積雪層を巻き上げる 1 層巻きであるのに対して、この雪巻物は下流側の積雪層と、上流側の積雪層を同時に巻き取る 2 層巻きである（図 2）。

3. あとがき

雪がわずかでも降ることがあれば、この雪巻物はどこにでも出現しうる。したがって、まれにしか雪の降らないところにお住いの皆さまも、是非、注意深く観察していただければ恵方巻のころにも、雪の恵方巻にも遭遇できるはずである。



図 1 雪巻物の形成過程



図 2 十分に水を含んだ濡れタオルで雪巻物の形成過程を模擬的に表現

Mathematica の機械学習機能を用いた波動逆散乱問題の解析

植田 毅¹

¹ 東京慈恵会医科大学 学術情報センター、105-8461 東京都港区西新橋 3-25-8

¹tsuyoshi_ueta@jikei.ac.jp

Analysis of inverse scattering problem using machine learning functions of Mathematica

Tsuyoshi Ueta¹

¹The Jikei University School of Medicine, Academic Information Center, Tokyo 182-8570

Abstract: Analysis of inverse scattering problems has been actively conducting for the automated design of wave devices. When there is a scatterer in a system, the wave function of the reflected wave contains information on the scattering intensity and position. When a wave packet is incident, it has been possible to successfully identify the position of the scatterer using factors such as the wave arrival time, assuming there is only one scatterer. However, this has not been successful when there are multiple scatterers. In this study, we use machine learning to learn transmission spectra for various numbers and arrangements of scatterers in a one-dimensional steady-state problem, and attempt to estimate the number of scatterers and, based on that, the arrangement of the scatterers from the spectral shape alone.

Keywords: wave device, Mathematica, machine learning, inverse scattering problems, inverse scattering problems

建物のコンクリートの内部や人体の内部、地中の内部の構造を破壊することなく調べる、即ち、画像化するために、電磁波や超音波を用いたレーダー、超音波検査装置（エコー装置）、魚群探知、地中レーダーや地震波トモグラフィが用いられています。他方、人体の断層画像を得るために X 線 CT が用いられています。X 線 CT は内部を構成する物質の X 線の吸収率の差を利用しているが、前者は射出した波の反射を利用している。対象に対してパルス波を発射し、反射波を観測するまでの時間と方向、振幅から散乱体の位置、特性を特定している。

近年では、2次元スカラー波動問題、2次元弾性波動問題において境界要素法を用いた数値解析により得られた波形データを機械学習させ、円筒形の散乱体の位置、大きさを推定している。また、クラックが存在する2次元無限スカラー波動場において時間域境界要素法を用いて数値的に得られた波形データを学習させ、材料内部のクラックの位置、角度、長さの推定が行われている。

しかし、これまでの研究では対象領域内に含まれる散乱体やクラックの数は高々3個までの系を取り扱っている。本研究では、より多くの散乱体を含む場合にその個数や位置を機械学習を用いて推定できるのかを考える。半導体やフォトニック結晶においては通常測定されるのはコンダクタンスのスペクトルや透過スペクトルである。そこで、1次元スカラー波動場の同種の点状散乱体が複数系に含まれる場合の定常散乱問題において、同じ散乱強度の δ 関数型散乱ポテンシャルが複数個（1~16個をランダムに配置）ある場合の

透過スペクトルを積分方程式法で求め、そのグラフを画像として機械学習させ、サンプルの透過スペクトルから散乱体の個数を確率で推定させる。その際、透過率は系全体の並進に対して不変であるから、最も左にある散乱体の座標を原点として、その自由度を排除する。散乱能 $Vd = 3$ の散乱体が存在する範囲を $[0, 5d]$ として、波数 $kd = 1 \sim 4$ の範囲の透過スペクトルを散乱体数が $1 \sim 17$ 個の場合に 600 (本予稿に示す結果は 300) 計算する。そのグラフを画像として教師データとして、Mathematica version 14.2 の NetChain 関数で設定した 4 層のニューラルネットに、NetTrain 関数を用いて機械学習させる。図 1 に透過スペクトルの例を示す。

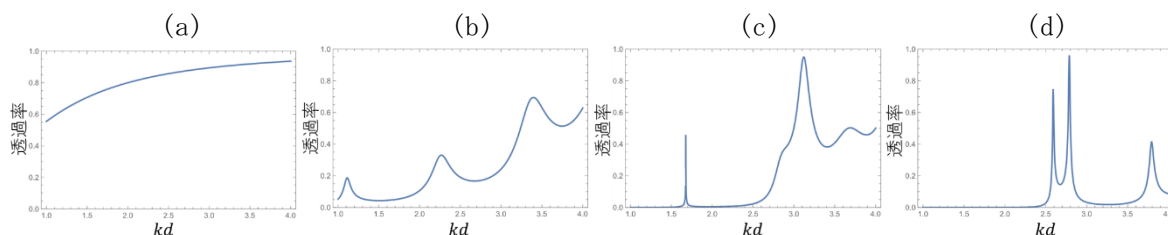


図 1 散乱体が 1 個 (a)、5 個 (b)、10 個 (c)、16 個 (d) の場合の透過スペクトルの例

ここでは、1~15 個の散乱体がある場合の教師データを FeatureSpacePlot 関数を用いて特徴量プロットしたものを図 2(a)に示す。散乱体数が 1, 2, 15 は特徴的なクラスターを作っており、他の散乱体数の場合とは区別がつけられるように思われる。

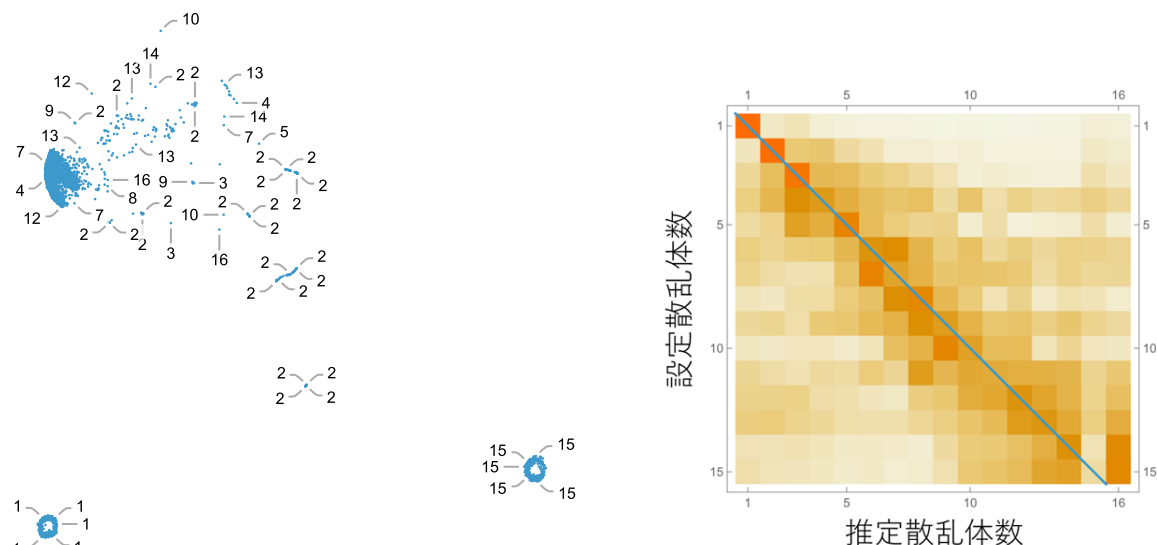


図 2 教師データの特徴量空間プロット (a), 各散乱体数における推定散乱体数の確率 (b)

図 2(b)に、散乱体の数を 1~15 個に設定した場合に 2 種のサンプルデータについて推定される散乱体数の確率を濃淡図として示す。概ね、散乱体数が少ない場合には最大確率は正しい個数の場合になっている。クラックの位置、向きなどの推定には 10000~20000 の教師データを用いているため、300 程度の教師データ数でこのような推定結果が得られるのは優秀な結果と考えられる、教師データ数を増やすことによりより高精度化できると期待できる。しかし、散乱体の位置推定は意味のある結果は得られなかった。これは、透過率は系の左右反転に対しても不変であるため、個数の推定は可能でも位置の推定は難しいためと考えられる。自由度を絞る対策が必要と考えられる。

また、現在、スペクトルは波数 $kd = 1 \sim 4$ の範囲としているが、より大きな波数の範囲とした場合の効果も考慮する必要があるかもしれない。

細胞の増殖および細胞の消滅を応用したトラス構造物の形態創生に関する研究 ——塑性座屈を考慮した場合——

小野聡子

近畿大学 産業理工学部 建築・デザイン学科

〒 820 - 8555 飯塚市柏の森 11 番 6 号

satoko@fuk.kindai.ac.jp

Study on Computer Morphogenesis of Truss Structures by Applying Cell Growth and Cell Division - Results of Consider Plastic Buckling -

ONO Satoko

KINDAI University, 11 - 6 Kayanomori, Iizuka City, Fukuoka, 820 - 8555

Abstract : This study aims to apply the characteristics of plant cells to the computer morphogenesis of truss structures. This paper describes the results of a study on the optimization of member cross-sections by considering plastic buckling of the members.

Keywords : computer morphogenesis, truss structures, cell growth, cell division, strain energy, plastic buckling

1. 序

本研究では、細胞の発生や成長などの細胞の性質を応用することにより、建築構造物の形態創生を目的としている。本研究における形態創生手法により、各種条件のもと形態創生を試みたところ、トラス構造物の形態創生は可能であった。一方、使用している部材断面の最適化については未検証である。そこで、本論文では、部材の塑性座屈の考慮することにより、部材断面の最適化を試みた結果について報告する。

2. 解析モデル

本研究で使用するスプリングネットワークモデルを図 1 に示す。本研究では、スプリングネットワークモデルにおける粒子部分およびスプリング部分を、トラス構造におけるノードおよび部材として、それぞれ表現している。

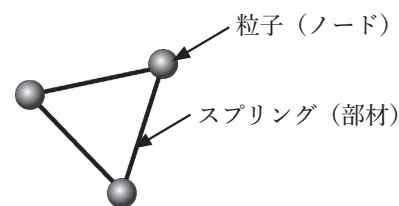


図1 スプリングネットワークモデル

3. 形態創生方法

本論文で考えている形態創生方法は、下記のとおりである。下記を組み合わせることにより、トラス構造物を形態創生する。

3.1 初期形態の創生方法

初期形態では、7 個の初期粒子から外側粒子が増殖を繰り返すことにより初期形態を創生する。

3.2 初期形態創生後の形態創生方法

初期形態におけるすべてのノードに荷重を作用させて、各部材におけるひずみエネルギーを算出する。ひずみエネルギーが 1.0×10^{-9} ($kN \cdot m$) 以下の部材は消滅させる。あわせて、各部材における細長比を算定した結果、弾性域の部材については、その部材長さおよび断面半径を乱数により変化させる。そして、変化後の部材長さが限界細長比以内であれば、部材長さおよび断面半径を更新する。同様に、ひずみエネルギーが 5.0×10^{-7} ($kN \cdot m$) より大きい部材は、部

材長さおよび断面半径を乱数により変化させる。また、部材断面の最適化のため、ひずみエネルギーが 5.0×10^{-7} ($kN \cdot m$) 以下の部材については、部材半径を 1.0 (cm) 縮小する。

4. 目的関数および収束条件

本研究における目的関数は総ひずみエネルギーであり、目的関数を最小化することにより、トラス構造物の形態を創生する。

5. 解析パラメータ

解析パラメータは、最大粒子数 (50, 100, 150, 200 (個)), 初期部材長さ (50, 75, 100, 125 (cm)), および、作用させる荷重 (自重, 自重+屋根荷重, 自重+屋根荷重+積雪荷重) の 3 つである。

6. 形態創生結果およびその考察

解析により得られた結果を図 2 および図 3 に示す。図 2 および図 3 の縦軸は総ひずみエネルギーの減少率である。図 2 の横軸は更新回数で、図 3 の横軸は総重量の増加率である。図 2 より、更新回数が 100 回以上の場合、総ひずみエネルギーの減少率は約 90 (%) 以上であるが、更新回数が 100 回未満かつ初期部材長さが 50 (cm) の場合には、総ひずみエネルギーの減少率が 35 ~ 90 (%) とばらついている。図 4 より、総重量の増加率は 5 ~ 40 (%) 程度であり、総重量の増加率が高いほど総ひずみエネルギーの減少率も高い傾向にあった。

解析により得られた形態創生結果の一例を図 4 に示す。図 4 (b) より、形態を創生する過程において部材断面に変化を生じておらず、部材の伸縮により総ひずみエネルギーが減少していることがわかる。断面断面に変化が生じていないため、総重量の変化は微小である (図 4 (a) ①)。図 4 (b) の形態を創生する過程において、総重量は約 16 (%) 増加するものの (図 4 (a) ②), 総ひずみエネルギーは約 12 (%) 減少していることがわかる (図 4 (a) ③)。これより、部材断面の変化あるいは部材の伸縮により、総ひずみエネルギーが減少していることを確認できた。

7. 結論

本論文では、細胞の性質および塑性座屈を考慮して部材断面を変化させた結果、総ひずみエネルギーを減少させることができた。一方、塑性座屈を考慮したことにより、総重量が増加してしまった。今後は、総重量を抑制しながら、総ひずみエネルギーを更に減少させる予定である。

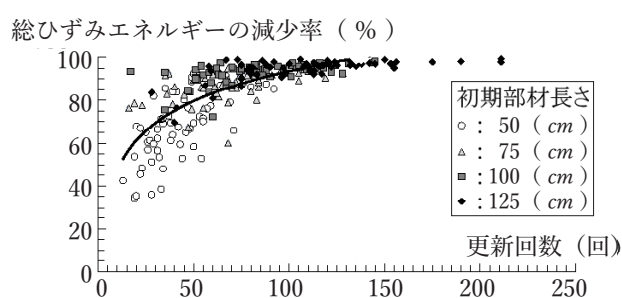


図 2 総ひずみエネルギーの減少率—更新回数関係

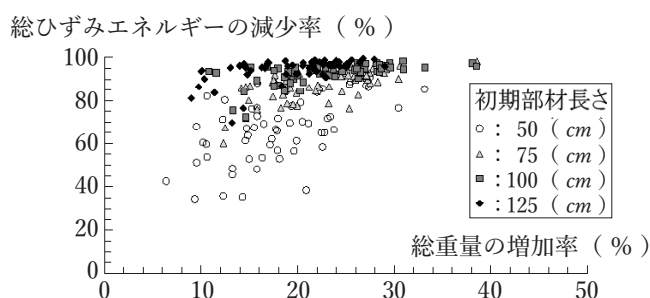
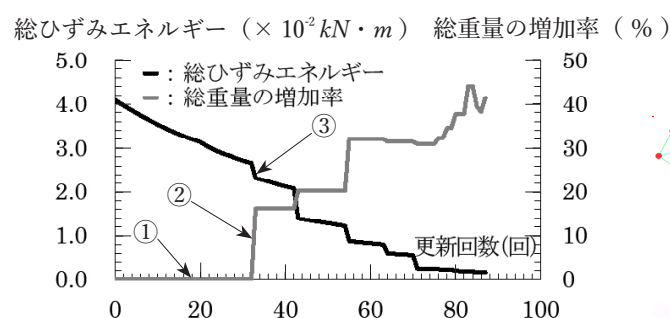
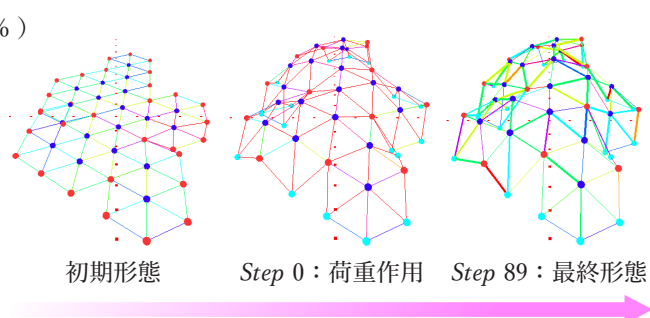


図 3 総ひずみエネルギーの減少率—総重量の増加率関係



(a) 総ひずみエネルギーおよび総重量—更新回数関係



(b) 形態の更新状況

図 4 形態創生結果の一例 (最大粒子数 : 50 (個) ・ 初期部材長さ : 75 (cm) ・ 自重+屋根荷重+積雪荷重の場合)

シェルピンスキー四面体プロジェクションマッピング 2

出原立子、石川元、平坂希心

金沢工業大学 石川県野々市市扇ヶ丘 7-1

izuhara@neptune.kanazawa-it.ac.jp

Projection Mapping onto a Sierpinski Tetrahedron 2.

Ritsuko Izuhara, Hajime Ishikawa, Kishin Hirasaka

Kanazawa Institute of Technology, 7-1 Ogigaoka Nonoichi-shi Ishikawa

Abstract: The Sierpinski tetrahedron is a polyhedron with fractal structure of a regular tetrahedra. This polyhedron appears as squares when viewed from directions orthogonal to each face of a cube, since it fits within a cube. We created an exhibition environment in which the Sierpinski tetrahedron is suspended in midair and projectors are installed above and below it to project images. Then, we created digital animation for this projection mapping environment. Finally, we conducted two exhibitions of our works in which visitors can experience projection mapping of the Sierpinski tetrahedron by walking around it.

Keywords: Sierpinski tetrahedron, projection mapping, exhibition

1. はじめに

シェルピンスキー四面体とは、正四面体のフラクタル構造をなした多面体である[1]。立木秀樹氏はシェルピンスキー四面体が立方体に収まることに着目し、これに対し3本の直行軸方向からの射影が正方形になることから、イマジナリーキューブと名付けた[2]。この特性を活かすと、イマジナリーキューブに対して一対の相対する方向からプロジェクタで映像を投影することでシェルピンスキー四面体の全てにイメージを描出することができ、且つイマジナリーキューブの別の相対する方向から見ると、投影方向から見た場合とは異なるイメージが見える。そこで、筆者らの先行研究においてシェルピンスキー四面体に対するプロジェクションマッピング（以下、PMと記す）の制作を試みた[3]。その際、シェルピンスキー四面体に対して左右に設置したプロジェクタから映像投影し、前後方向から鑑賞する作品制作を試みた（図1）。しかし、この方法では作品展示鑑賞の際、シェルピンスキー四面体を周囲からみるためにはプロジェクタが設置されているため鑑賞の妨げになっていた。

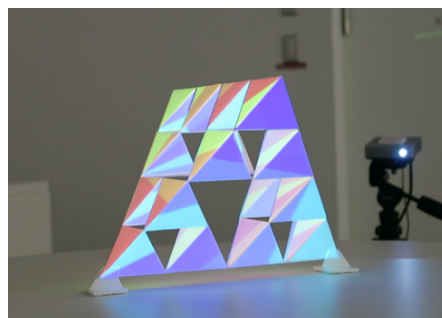


図1 シェルピンスキー四面体 PM 事例

そこで本研究では、上下方向からプロジェクタ投影できる環境を構築し、上下から映像を投影し、左右・前後の周囲 360 度から PM を鑑賞できる展示方法と映像制作方法の構築し作品制作を試み、実際にギャラリーと屋外のライトアップイベントにて展示発表を行った。

2. シェルピンスキー四面体 PM の展示環境構築と映像投影方法

16 個の正四面体で構成されるシェルピンスキー四面体に対して上下に設置するプロジェクタから映像投影し、左右・前後方向から鑑賞される場合、投影映像と鑑賞映像の関係は図 2 に示す通りとなる。すなわち、上下から各面に投影される映像は、左右・前後方向から見ると不連続で且つ向きも異なる位置に配置されてしまう。この関係を前提として、どの方向から見ても破綻しない映像を制作しなければならない。細かい描写や具象的なイメージをどの位置からみても破綻なく見せる映像を制作するのはかなり難解であることから、色彩構成を主として変化するアニメーションが適していると考えた。

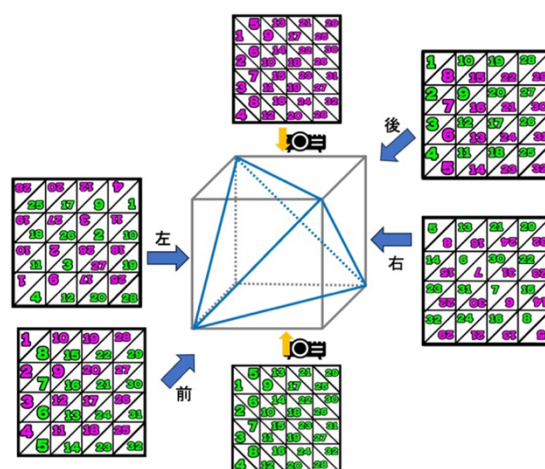


図 2 シェルピンスキー四面体に対する映像投影と鑑賞イメージの関係

3. シェルピンスキー四面体 PM 作品制作と展示

投影映像と鑑賞者の視点から映像の位置関係を考慮し、またシェルピンスキー四面体の表裏の関係を活かして、補色による色彩表現と規則性のあるモーションによる表現を中心にして、音楽に合わせて変化する映像を制作した。作品展示のための筐体として、図 3 に示す円柱形の展示物をオリジナルで制作した。この筐体は高さ 1700mm、直径 800mm の円柱形で、上下の円柱形 BOX の中にプロジェクタがそれぞれ設置されており、下には映像投影を行うノート PC も格納されている。中央部分にはテグスで引っ張るようにシェルピンスキー四面体をぶら下げ、中央に浮いているように見せている。これによって、鑑賞者は周囲を歩きながら様々な角度から鑑賞することができるようにした。



図 3 360度方向から鑑賞できる PM 展示

作品展示は、2024 年 10 月 13 から 15 日に金沢市中心市街地で開催された「金澤月見光路 2024」のライトアップイベントにおいて屋外展示した。さらに、2024 年 10 月 22 日から 30 日に金沢工業大学ライブラリーセンター 1 階ギャラリーにて開催された「光とジオメトリ展」において屋内展示を行った。

参考文献

- [1] 宮崎興二, “多面体百科”, 丸善出版, pp. 223-224 (2016).
- [2] 立木秀樹, “フラクタル・イマジナリーキューブの影”, 形の科学シンポジウム講演予稿集, Vol. 8, No. 1, p. 30 (2023).
- [3] 出原立子, “シェルピンスキー四面体プロジェクションマッピング”, 形の科学会講演予稿集, Vol. 9, No. 1, pp. 57-58 (2024).

折り紙 - 裏と表の話

前川淳

日本折紙学会 113 - 0001東京都 文京区白山1-33-8-216

maekawa@origami.gr.jp

Origami - Some Topics about the Front and Back of Paper

MAEKAWA Jun

Japan Origami Academic Society, Bukyo-ku Hakusan 1-33-8-216 Tokyo 113-0001 Japan

Abstract: This presentation will overview the issues of front and back of paper in origami designs, through topics such as the flat folding theorems, one-sidedness of the base foldings, and iso-area foldings.

Keywords: origami, flat folding, iso-area folding, one-sidedness

1. 平坦折りと片面性

平坦に折りたたまれた紙についての折り目には、幾何学的に明快な特徴がある。よく知られたものは、以下のふたつの定理である。

(p) 1点に集まる山折り線と谷折り線の数の差は2である。

(q) 1点に集まる線のつくる角度をひとつごとに符号を変えた和はゼロである。

一般に、(p)は前川定理、(q)は川崎定理と呼ばれる。(p)からは、一点に集まる線の数は偶数であることが導かれる。すべての点が偶数の線からなる地図は2色で塗り分けが可能であることが知られているが、折り紙の「地図」が2色であることは、紙の裏と表に対応している。それは、平坦になった状態で裏と表のどちらが上を向いているかを示している(図1)。

なお、(p)と(q)の定理は、紙の周囲、たとえば、図1の点AやBでは成立していない。点Aでは、角を構成する線の間が3つなので「線のつくる角度ひとつごとに符号を変える」ということができず、点Bは折り目の数がそもそも偶数ではない。これは、平面の定義が無限に広がるものであるのに対して、図のような折り目が有限に切り取られた範囲のものであるためだ。しかし、ここに、伏見康治が提案した「片面性」という概念を加えると、その適用の範囲が拡張できる。

片面性というのは、多くの折り紙のモデル、とくに基本形と呼ばれる折り畳み構造において、紙の片面のみが外側に現れる特徴を示す概念である。これは、単に片面だけが見えるというのでは

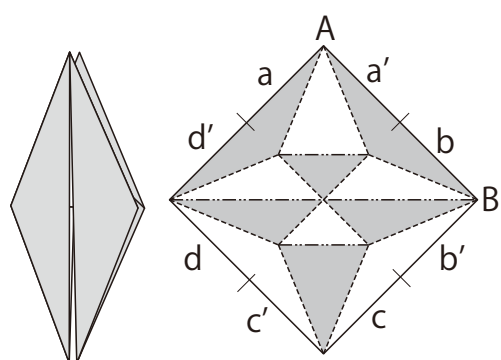


図1：折鶴の基本形とその展開図の色分け。
点線が谷折り線を鎖線が山折り線を表す。

はなく、もとの正方形等のかたちの周囲の辺が、いわば縫合されて、片面が外側に、もう片面が内側になり、平面が(体積は持たない)球やトーラスと同相となることを示している。図1にあげた折鶴の基本形は、その典型的な例のひとつである。

ここであらためて点Aについて考えると、これは辺aと辺a'が縫合した錐面を折り畳んだものとみなすことができる。すると、縫合した線は消え、この頂点でもふたつの定理が成立するようになる。また、辺bと辺b'が縫合された場合、縫合線が折り目となって、やはり上記の定理が成立する。

このように、片面性という概念を加えると、平面の折り畳みが、錐面や柱面の折り畳みにも拡張されることになる。なお、個々の頂点が折り畳み可能であることがわかって、こうした頂点を多数集めた展開図全体が折り畳み可能かについては、複雑性に関わる問題となることが知られており、これもまた興味深い課題である。

3. 表裏同等折り

上に、紙の裏と表がの内と外に変形する片面性という概念を示したが、それとはまったくべつに、紙の裏と表をまったく同等に扱った折り紙の作品群がある。川崎敏和によって実例とともに示された「表裏同等折り」というものである。図2に、前川による一例を示す。中央部に穴があるかたちの用紙を用いて立方体を構成するもので、裏表の色の違う紙でつくると、できあがった立方体は、色が等分に配置されたものになる。中央に穴があるのは、立体化したさい穴の4辺が平面ではない「ねじれ正方形」となり、その面が歪むため、穴を開けてしまったほうが明快になるからだが、穴の部分を双曲放物面の近似曲面になる折り目にとすると、また面白い造形になる。

ここで興味深いのはその対称性である。このような表裏同等折りの作品は、点群の用語でいう、回反対称となっている(図3)。

4. まとめ

一枚の紙の裏と表への注目は、折り紙作品に対する、重要な幾何学的な視点のひとつとなる。

ひろく折り紙に使用される紙は、裏と表が異なる色となっている。これを用いて作品に模様を表現する技法もあり、「インサイドアウト技法」と呼ばれている。インサイドアウト技法のほとんどは試行錯誤に基づくもので、設計技法においてそれを論理的に見込むのは簡単ではない。そうした設計技法がどのようなかたちで可能なのかも、また研究課題となる。片面性や平坦折り、表裏同等折りに関しても、まだ調べ尽くされているとは言えず、折り紙における裏と表の問題には、まだまだ研究や創作の鉤脈が眠っている。

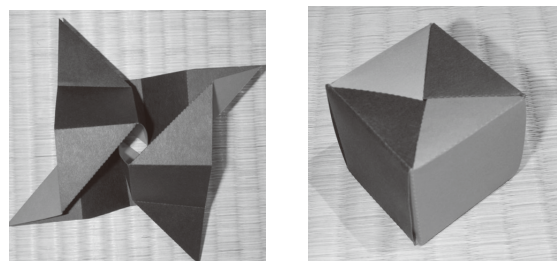
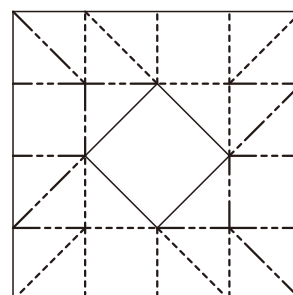


図2：表裏同等折りの一例
(穴のある包み紙)

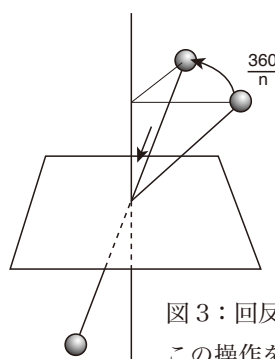


図3：回反操作：回転＋反転：
この操作を行っても変わらない
対称性を回反対象という。

References:

- 伏見康治・伏見満枝『折り紙の幾何学-増補新版』日本評論社(1984)
 Kunihiro Kasahara, Toshie Takahama 『Origami for the Connoisseur』(1987)
 前川淳『本格折り紙』日貿出版社(2007)
 岡村 昌夫、三浦 公亮『折り紙の事典』朝倉書店(2025)

科学折り紙で立体の鏡像体を作る

石原 正三

イスタ科学折り紙研究室、東京都世田谷区上用賀 1-1-2, N202

Shozo8961@gmail.com

Creating a mirror image of a solid object with Science Origami

Shozo Ishihara

Lab. of Science Origami, The interdisciplinary Institute of Science,
Technology and Art (ISTA)、

N202, 1-1-2, Kamiyoga, Setagaya, Tokyo 158-0098, JAPAN

Abstract: By making use of Science Origami, the way how to create a 3D model of two mirror-image solids, enantiomers, is shown. By changing the chirality of the unit-origami to make a chiral structure that has neither a mirror plane nor a center of symmetry, the mirror image of the other structure can be created automatically. It should be noted that Science Origami is a common method for creating chiral structures.

Keywords: Science Origami, enantiomers, mirror plane, center of symmetry, chirality of the unit-origami

科学折り紙と鏡像体との出会い

折り紙の多面体（主として、正四面体と正八面体）の骨格構造（スケルトン）を接続して、結晶の立体構造を表現する結晶構造モデル：結晶の折り紙モデル^[1]（結晶構造モデル：特許第 2790247 号）を考案し、X 線結晶構造解析のデータ（最隣接原子間の結合距離と結合角： b_1 , b_2 , ϕ ）とユニットを作るための長方形の折り紙のサイズ（ a , l , c ）を関係づけて、科学折り紙の基礎理論が定式化されました。（図 1）

その後、折り紙の色の組み合わせにより、アミノ酸やタンパク質などのキラルな分子構造の折り紙モデル^[2]（分子構造モデル：特許第 3668070 号）を考案しましたが、更に、科学折り紙の定式化を利用して、鏡像体の折り紙モデルの制作にチャレンジしました。最初に挑戦したのは、Paul Schatz（以降、PS と略記）のカライドサイクルでした^[2]。（図 2）

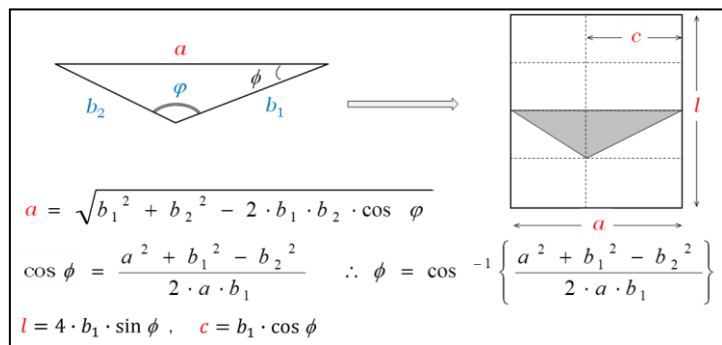


図 1 科学折り紙の定式化



図 2 Paul Schatz (PS) カライドサイクル；[2]より転載

ユニット折り紙のキラリティ

立体がキラルかアキラルかは、その立体が鏡面と対称心の2つの対象要素を持つか持たないかによって決まります。そして、その立体を科学折り紙の手法(図1に示された三角形のユニット)で制作する場合、ユニットのキラリティと立体のキラリティとはどのような関係にあるかを考えます。

なお、従来のユニット折り紙は対称性の良い、つまり、鏡面や対称心を持つ立体を制作することが多く、ユニットのキラリティとユニットを組み合わせて作られた立体のキラリティの関係を考える必要はありませんでした。

科学折り紙で使用する三角形のユニット(図1参照)は、のりしろとポケットの配置によって4種類に分類されます。(図3(a)-(d))

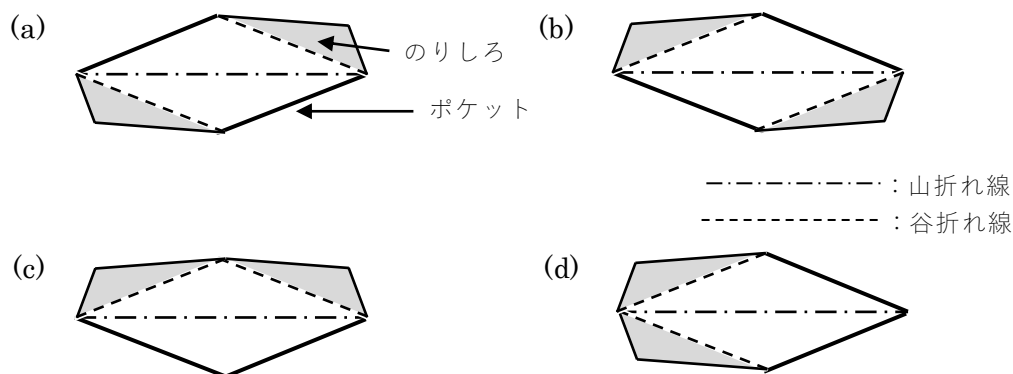


図3 4種類のユニット折り紙：(a)と(b)はキラル、(c)と(d)はアキラル

PS 鏡像体

図2に示したPSカライドサイクルは、キラルな四面体の3組の鏡像体(PS鏡像体)から構成されています。図4(a)に示した四面体の骨格構造(スケルトン)は、図1に示した関係式から求めた6枚のユニット折り紙(図4(b))で、図3(a)で示したキラリティー(右上と左下がのりしろ)のユニット折り紙で組み立てられています。そして、鏡像関係にあるもう一方の四面体は、図4(b)の6枚と同じサイズの折り紙を用いて、単に、キラリティーを図3(b)のように変えるだけで簡単に得ることが出来ます。

鏡の国のアリスが、鏡の国で図4(b)の6枚のユニット折り紙を用いて図4(a)の四面体を鏡の世界で作ると考えれば、鏡像関係にある四面体を得られることが分かるのではないのでしょうか。

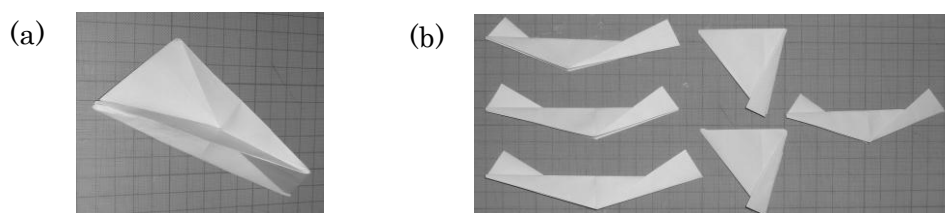


図4 PS四面体と6枚のユニット折り紙

おわりに

科学折り紙の定式化(図1)に基づき、3次元立体の鏡像体を簡便に得ることが出来る。

参考文献

- [1] 石原正三, 「折り紙で作る結晶構造モデル」, 個体物理, **31** (1996), pp. 73-81
- [2] 石原正三, 「Paul Schatz 立体の折り紙モデルー鏡像体の立体構造モデルを表現する科学折り紙ー」, 第83回形と科学シンポジウム「伝統の形と形の科学」, 2017, pp. 67-68,

4次元折り紙の性質

—正四面体の折りたたみ、4次元正多胞体のリングの皮むき展開—

海野啓明

仙台高等専門学校 (名誉教授)

keimei.kaino@gmail.com

Some Examples of Four-Dimensional Origami

—Folding Tetrahedron and Apple-Peel Foldout of 4D Regular Polytopes—

KAINO, Keimei

National Institute of Technology, Sendai College, Aobaku, Sendai,989-3128

Abstract: To produce a four-dimensional (4-D) origami, we fold a solid material along flat planes in a 4-D space. A 4-D space has a fourth axis perpendicular to a three-dimensional (3-D) space. First, a regular tetrahedron is folded flat by using bisector of dihedrals. It is shown that it cannot be folded flat continuously from the original state to the flattened state. Secondly, 4-D regular polytopes are developed into the 3-D space. As an apple-peel foldout (AF) of a regular polyhedron has an S-shaped figure in a plane, an AF of the regular polytope is shown to have a central-symmetric AF in the 3-D space.

Keywords: Tetrahedron, Incenter theorem, Four-dimensional regular polytopes, Apple-peel foldout.

1. はじめに

伝承折り鶴の折り図を見ると、正方形は4つの合同な直角二等辺三角形に分割され、各々の三角形は角二等分折りされている。ここで、三角形のこれらの折り線は一点I(内心)で会してる、すなわち「三角形の内心の定理」を利用している(図1)。逆に、三角形の3辺をピッタリそろえて折ると、平坦に折ることができることから、図2のように定点Oから放射状に出る4本の折り線OA,OB,OC,OA*を使って平面を平坦に折るとき、

$$\angle AOB + \angle COA^* = \angle BOA^* + \angle AOC = 180^\circ$$

の関係が成り立つ。これは「伏見の定理」とよばれる[1]。

折り紙はXY平面上においた紙をZ軸方向に折るので3次元折り紙と呼ぶならば、4次元折り紙とは3次元空間においた立体の折り紙を第4の直交軸、U軸を利用して折るものになる(図3)。図4に3次元空間(U=0超平面)に置いた直方体を折り面で2分割し、一方を180°折る過程を示す。折りたたまれた結果は表裏がなければ折り面による鏡映変換とみなせる。

[1] 伏見, 伏見:『折り紙の幾何学』, 日本評論社, 1979.

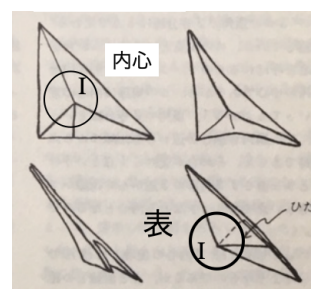


図1. 三角形の内心の定理[1]

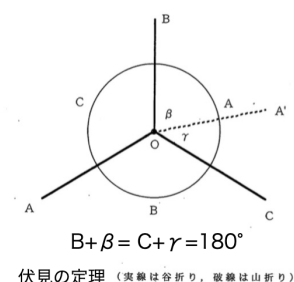


図2. 伏見の定理

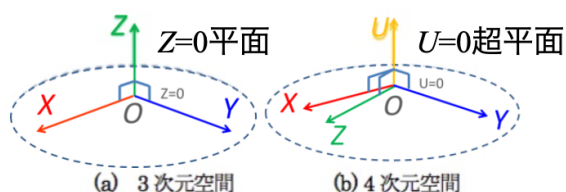


図3. 3次元空間と4次元空間

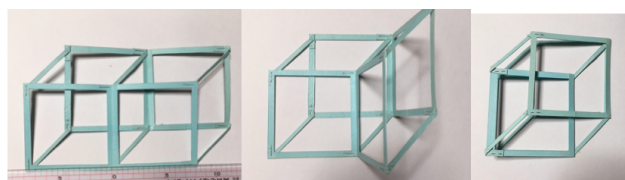


図4. 直方体を平坦に折りたたむ模型

2. 正四面体の折りたたみ

三角形の4次元空間における対応物は四面体である。三角形の角2等分折りと同様に、四面体を稜角2等分面折りすると、6枚の稜角2等分面は1点、内心Oで会するが、これは「四面体の内心の定理」の折り紙による証明である(図5)。実際に中空の四面体ABCDを作り、底面BCDの3辺から側面を底面に押し付けながら折ると、点Pなどの3枚の側面の中心は底面の中心Qにピッタリ重なる(図6)。正四面体を折りたたんだ結果は、図7に示された内心Oを頂点とする四面体OBCDとなる。この内部には分割された小四面体が折りたたまれて入っているが、それらが底面に重なる様子は図6左図が参考になる。上の折り方によれば、折り面 $\triangle ODB$ により点Aは点Cに、折り面 $\triangle OCD$ により点Mは点Nに、折り面 $\triangle OBC$ により点Pは点Qに重なるが、辺の長さ一定の条件で連続に折りたたむことは難しい[2]。

[2] K.Kaino: "Statistical and Condensed Matter Physics", Nova Science, 101 (2007).

3. 4次元正多胞体のリングの皮むき展開

正多面体の展開図は色々あるがリングの皮をむくように展開するとほぼ一意でS字形になる(図8)。この展開図は立体の組み立てがきれいに仕上がるので、市販の玩具『皮むき多面体』に利用されている。リングを皮幅一定で細くしてむくとその形は図9になる。これを理想化すると点対称のS字形の「リングの皮むき曲線」になり、その中央部はオイラー螺旋となる。

4次元正多胞体は6種類あるので、これらをリングの皮むき展開する。まず、4次元標準正多面体(正5胞体, 正8胞体, 正16胞体)の皮むき展開図が中心対称性をもつように展開すると図10のようになる。正8胞体(超立方体)の展開図に立方体の皮むき展開図が見られるのは、正8胞体の直投影図である胞心図が立方体であるためである。そこで、正多胞体の皮むき展開図を求める手順は、(i) 直投影図(点心図と胞心図胞)と(ii) 胞の中心分布図を参照して、(iii) 中心対称性をもつS字型の展開図を探すことになる。なお、ゾムツールなどのモデルがあると良い。正24胞体では、その点心図(菱形12面体)における胞の中心分布図を参照すると展開図は図11になる。正120胞体, 正600胞体の場合も同様である[3]。

[3] 海野啓明: 4次元正多面体の皮むき展開図, 数学セミナー, 36 (2021.09).

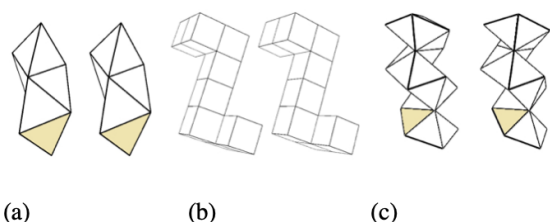


図10. 正5, 8, 16胞体の皮むき展開図 (立体視図)

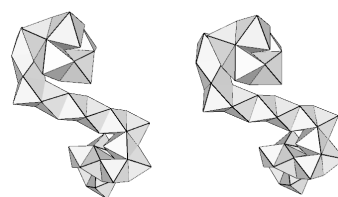


図11. 正24胞体の皮むき展開図 (立体視図)

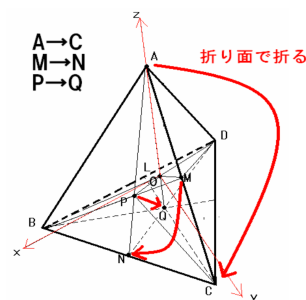


図5. 正四面体の折り面

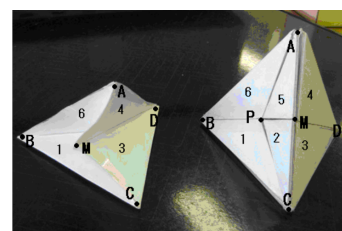


図6. 正四面体の平坦折りの模型

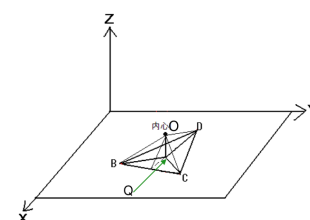


図7. 正四面体の平坦折りと内心

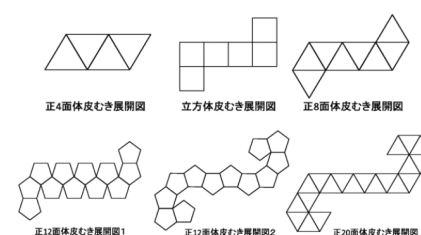


図8. 正多面体の皮むき展開図

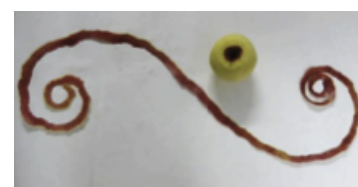


図9. リングの皮むき展開曲線

バッタ目の腸内に共生する *Unguispora* 属真菌は 腸内付着に特化した固有の形態を示す

李知彦¹、出川洋介

筑波大学山岳科学センター、386-2204 長野県上田市菅平高原 1278-294

¹ri.tomohiko.sg@alumni.tsukuba.ac.jp

***Unguispora* as a gut-symbiotic fungus associated with Orthoptera exhibits unique morphology which specifies to attach to the host gut.**

Tomohiko Ri¹ and Yousuke Degawa

Mountain Science Center, University of Tsukuba, 1278-294 Sugadaira-kogen, Ueda,
Nagano, 386-2204, Japan

Abstract: Morphology of fungal spores is assumed to affect their dispersion and establishment. Nevertheless, the forms are hardly given any clear interpretation of their functions. We described a new genus as *Unguispora* recently, which lives within gut of crickets or camel crickets and on their feces. This genus has claw-like ornamentation (“claws”) on its spores, and the claws function to attach to the host gut by pinching hairs born on the surface of host gut. In this presentation, we will report on the morphology, mechanism of attachment to the host gut, and morphological diversity of the claws.

Keywords: attachment structure, electron microscopy image, gut symbiosis, insects, morphogenesis

1. はじめに

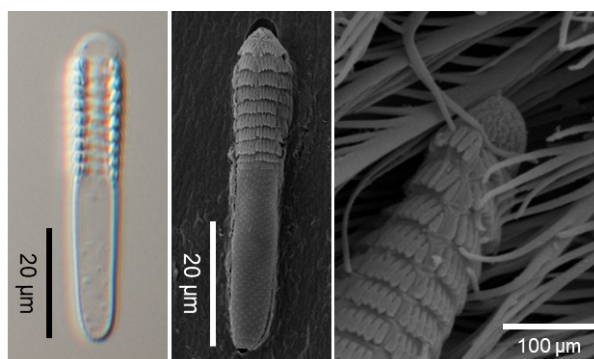
カビやキノコとして一般的に知られる真菌類は孢子によって移動分散する。多くの真菌類の孢子は運動能力を持たないが、様々な形状や表面修飾を持つことが知られている。このような孢子の形態は、真菌類が自身の生存に適した環境へと分散し、定着するために重要な機能を果たしていると考えられている。しかし、孢子の形態に明確な機能の解釈が与えられている例はこれまでほとんど無い。これに対して、発表者らは新属 *Unguispora* を記載し、本属の孢子の表面にある鉤爪様構造（爪）が宿主腸内への付着のために機能することを明らかにした^[1]。ここでは、本属の爪の形態及び付着メカニズムの詳細やその形態的多様性について報告する。

2. *Unguispora rhabdophoridarum*^[1]の腸内付着構造

カマドウマを宿主とする腸内菌 *U. rhabdophoridarum* の円柱形の孢子表面の上部には爪が縦に 9-10 段、円柱を囲むよう横に 6 列に並んでいる（図 1）。本種は、宿主の消化管の中でも前腸にある前胃と呼ばれる器官に特異的に付着する。カマドウマの前胃にはクチクラが発達しており、内部表面に毛が密生している。本種の孢子はこの毛を爪で挟むことで付着する様子が観察された（図 1）。また、本属は他の近縁な腸内菌とは付着部位と付着構造が異なる。爪は真菌類の中でも本属にのみ見られる固有の形態学的特徴であり、宿主腸

内に付着するために特殊化したものだと考えられる。講演では、さらに本属の微細構造などについて説明する。

図1 *U. raphidophoridarum* の孢子（左：光学顕微鏡、中央：走査型電子顕微鏡）と孢子が宿主腸内に付着する様子（右）



3. *Unguispora grylli*^[2]の腸内付着構造

コオロギを宿主とする腸内菌 *U. grylli* は *U. raphidophoridarum* と同様に前胃に付着するが、爪の形態が異なる。*U. grylli* の孢子表面の上部には爪が縦5段、横6列に並んでおり、さらに宿主腸内で孢子の形態に変化が生じる（図2）。宿主腸内では孢子上部が爪のみを残して消失し、爪自体も中央が空洞化した栓抜き状構造が縦に連なった形状へと変化する。*U. grylli* と *U. raphidophoridarum* とでは宿主腸内での爪の形状が異なるものの、基本的な付着は同様で、爪が毛を挟むことで付着する。講演ではこれらに加え、形態変化のメカニズムや形態による付着機能の違いなどを説明する。

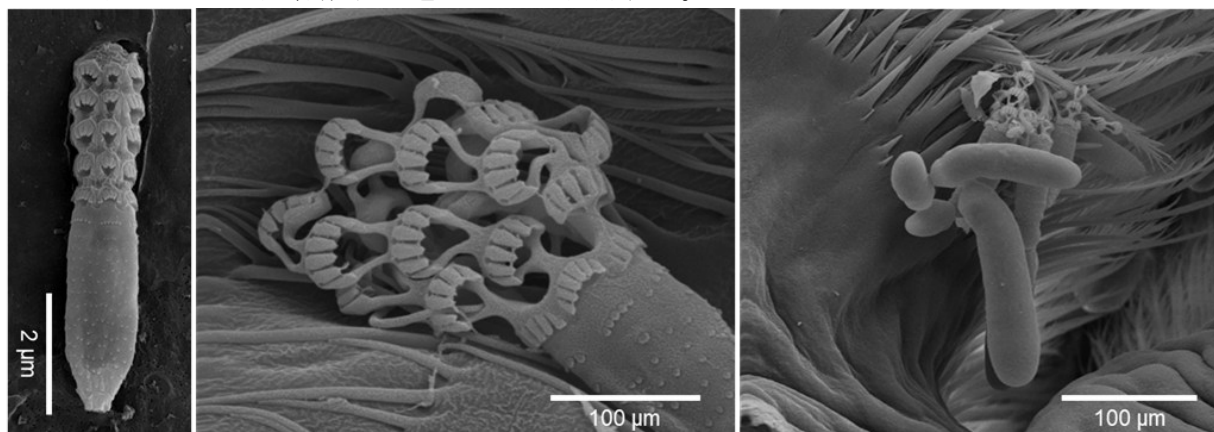


図2 *U. grylli* の孢子（左）、宿主腸内での *U. grylli* の孢子上部（中央）、*U. grylli* の孢子が宿主腸内に付着する様子（右）

4. おわりに

生物はそれぞれの生存や繁殖の最適化の結果、様々に形態を進化させてきたが、その中でも *Unguispora* 属の爪は極端な事例である。そのため将来的には、本菌の形態形成のメカニズムやそのメカニズムの進化原理の解明が期待される。

謝辞 本研究は JSPS 科研費 24KJ0485 の助成を受けて行った。

参考文献

- [1] Ri, T., Suyama, M., Takashima, Y., Seto, K., & Degawa, Y. (2022). A new genus *Unguispora* in Kickxellales shows an intermediate lifestyle between saprobic and gut-inhabiting fungi. *Mycologia*, 114(6), 934–946.
- [2] Ri, T. & Degawa, Y. (2025). *Unguispora grylli*, a new species of amphibious fungi associated with crickets (Gryllidae), transforms attachment structures of sporangiola in the host gut. *Mycoscience*, 66(3).

タイ文字の特性に着想を得た字形と筆記具持ち方指導の検討

杓名健一郎¹, クナッジ・ソムチャナキット¹, パッチャラポーン・ニラウボル¹,
チャイヨット・ロンデック¹, 高田宗樹²

¹タクシン大学人文社会学部, ²福井大学大学院工学研究科

kenichiro.k@tsu.ac.th

Exploring Japanese Handwriting Instruction and Pen Grip Methods in Light of Thai Script Features

Kenichiro Kutsuna¹, Kunaj Somchanakit¹,
Patcharaporn Nilaubol¹, Chaiyot Rongdech¹, Hiroki Takada²

¹Faculty of Humanities and Social Sciences, Thaksin University, Songkhla 90000, Thailand

²Graduate School of Engineering, Fukui University, Fukui 910-8507, Japan

Abstract: This study explores the physical mechanisms of handwriting based on the characteristics of Thai script. Drawing from experiences in Japanese language education in Thailand, it suggests that frequent misspellings may stem from writing Thai characters in small sizes. Analysis shows that holding the pen short and nearly vertical improves stability for writing small, curved, and push-based strokes common in Thai. These findings offer insights into effective handwriting instruction and suggest revisiting pen-holding techniques in both Japanese language education for non-native learners and native calligraphy practices.

Keywords: Character instruction, writing pressure, penmanship, Japanese language education, educational technology

1, はじめに

これまで我々はタイの日本語教育の現場での体験を通して、「日本語の文字の習得時に発生する誤字の原因は、タイ文字筆記時に文字が小さいことによる」との仮説を訴えていた。本論はタイ文字の特性によって引き起こされた筆記メカニズムについての物理的な考察から着想を得て、外国人に対する日本語教育、また日本の国語および国語科書写に応用できる文字指導についての新しい施策について検討するものである。

2, 日本語教育における文字学習の現状

外国人に対する日本語教育の現場では、文字を学ぶ機会こそあるものの、「望ましい字形」の指導は十分に行われていない。特に初学者にとっては、学習初期にひらがな 46 文字を習得するだけでも大きな負担となることが指摘されており^{*1}。学習への抵抗感を軽減するため、初期段階でローマ字を用いるケースも少なくない^{*2}。一方、筆者らはタイにおいて、日本の国語科書写教育に準じた字形指導を試みたが、時間の経過とともにその定着が乏しいことが判明した。そこで、タイ文字・漢字かな・アルファベットの 3 種類について筆圧や字形の特徴を比較調査したところ、最終的に学習者は母語であるタイ文字に近い筆記傾向を示すことが明らかとなった^{*3}。特に、タイ文字には「押して書く線」が多く、日本語の「引く線」主体の字形とは異なっており、ペンの持ち方も日本と傾向が異なる。これにより、母語の筆記における筆圧や運筆のクセが第二言語の文字学習にも影響を及ぼすことが示唆され、従来の書写的な字形指導の限界が明らかとなった。日本の書写指導に置き換えてみると、主にノート書字という速書き中心の児童・生徒に対し、いわゆる「よそ行きな文字」の指導では十分な効果が得られないことを意味する。書字要素をメタ認知的に捉え、母語の筆記習慣と切り離して学ぶ必要があろう。

日本における文字教育・書写指導で毛筆を用いる理由は、文字を大きく書かせることで筆使いから字形要素への意識を高め、構造理解を促すためである。外国人が小さな文字で漢字やひらがなを学ぶ場合、文字を誤って学びやすいのは必然である。よってこうした文字の縮小傾向の発生メカニズム解明は、文字学習における重要な課題である。

3, 文字の大きさと筆圧の関係

手の力は、紙に対して垂直にかかる成分 $F_N = F \cos \theta$ (筆圧の源) と、紙に対して並行にかかる成分 $F_T = F \sin \theta$ (摩擦の原因) に分かれる。筆圧 P は、力を「ペン先と紙が接触する面積」 A (ペン先の接触面積は、鉛筆やシャープペンシルなどにおいて常に変化するが、一定とみなす) で割ったものであるから

$$P = \frac{F_N}{A} = \frac{F \cos \theta}{A}$$

$\theta = 0$ でペンが垂直に立つとき、 $\cos 0 = 1$ なので

$$P_{max} = \frac{F}{A}$$

となり、手の力が全て筆圧として紙に伝わる。

ペンを角度 θ 傾けると $\cos \theta < 1$ となり、同じ手の力 F でも紙に伝わる法線成分は減少する。例えば、 $\theta = 60^\circ \Rightarrow F_N = F \cos 60^\circ = 0.5F$ であり、筆圧は垂直時の半分になってしまう。すなわち、ペンを垂直に立てると $\theta = 0$ となり、手の力 F がそのまま筆圧 P に変わる。そしてペンを傾けるほど $\cos \theta$ が小さくなり、筆圧も低下してしまう。従って、ペンを立てるほど手の力を最大限に筆圧に変換できることが、以下より明らかである。

$$P = \frac{F \cos \theta}{A}$$

日本の文字は引いて書く線がほとんどであるのに対し、タイ文字は押して書く線が多いことから μ をペン先と紙の摩擦係数と置くと

$$F_{f,max} = \mu F_N = \mu F \cos \theta$$

となり、ペンを垂直に近づけ θ を小さくすると、筆圧 F_N と摩擦力限界 $F_{f,max}$ の両方が増大し、ペンで押して書く際の安定性が向上する。また、ペンを長く持つと、握り位置からペン先までの距離 (レバーアーム) を L としたとき、手首や指の微小な動きがトルクとして増幅されやすく不安定になる。 τ をペン先まわりの回転トルクとすると $\tau = F \times L$ となり、ペンを短く持つことで L が小さくなり、同じ力 F をかけても余分な回転トルク τ が減少し、真っ直ぐかつ細かい動きがしやすくなる。つまり、タイ文字のように細かく曲線やフックの多い「押して書く」線では、余計な回転を抑えてペン先を安定制御することが重要となる。また、握り位置がペン先に近いほど慣性モーメントも小さくなる。

以上の物理的メカニズムから、タイ文字の筆圧を強めつつ、押しながら書く多彩なストロークには「ペンを短く持ち垂直に近く立てる持ち方」が最適であることが分かった。

4, タイ文字の傾向から学ぶ字形と筆記具持ち方指導

以上から、筆圧を高め、筆先の繊細な動きを重視して書字する場合、必然的に文字は小さくなる傾向がある。この点は、日本の書写指導において筆圧の強調が行われる中、多くの児童・生徒がペンを強く握り込むような姿勢で書いているという先行研究の指摘とも合致する。前述の通り、文字を小さく書くことは誤字の発生と関連しており、筆圧に依存しない書字指導のあり方が改めて求められている。筆圧を必要としない筆記具、例えばボールペンや水性ペン、さらにはタブレット端末 (iPad 等) などの活用も視野に入れた指導法の検討が必要であろう。

References

- [1] Sato, Ryota (2016). "Learning a Language of Two Alphabets: Practical Approaches in Hiragana and Katakana Acquisition for Beginner Learners of Japanese Language." *Investigación y Desarrollo*, 11(1), 74–83.
- [2] Mardani, Desak Made Sri et al. (2024). "Second Language Learning Strategy for Young Learners: Learning Hiragana as A Process in Japanese Language Acquisition." *Eralingua: Jurnal Pendidikan Bahasa Asing dan Sastra*, 8(1), April 2024.
- [3] 杓名健一郎, 本田容子, 高田宗樹; 文字学習時の脳内イメージ解像度; 形の科学シンポジウム講演予稿集, Vol.7 No.2, pp.47-48, 形の科学会, 2022.11

研究を“カタチ”に 形の科学会機関誌での論文発表

この度は、形の科学シンポジウムにご参加いただきまして、ありがとうございました。

形の科学会の機関誌として、英文誌【FORMA】と和文誌【形の科学会誌】がございます。

<https://katachi-jp.com/gakkaishi>

奮ってご投稿ください。

英文誌【FORMA】

会員・非会員を問わず、投稿できます。

論文のカテゴリーは、(1) Original paper, (2) Review, (3) Letter, (4) Forum です。

投稿規定の詳細は、下記サイトの“Call for Papers to FORMA”をご覧ください。

<https://forma.katachi-jp.com/call.html>

和文誌【形の科学会誌】

会員・非会員を問わず、投稿できます。

原著論文(original paper)、解説論文(review paper)、速報(rapid communications)、論説(commentary)、講座(単発および連載)、エッセイ、交流、ニュースなどを掲載します。投稿規定の詳細は、下記サイトをご覧ください。

<https://katachi-jp.com/paperkitei>

形の科学シンポジウムを開催しませんか？

シンポ代表世話人を募集します

近年、形の科学シンポジウムは、年に2回、開催されています（2000年度までは、3回ずつ開催されていました）。過去のシンポジウムの開催履歴は、以下のサイトでご覧いただけます。

<https://katachi-jp.com/symposium>

シンポジウムの代表世話人は、形の科学会会員の中から選ばれます。

代表世話人は、シンポジウムの メインテーマの設定 や 招待講演者の人選 をほぼ自由におこなうことができます。その他、そのシンポジウムならではの企画 を立てていただくことも可能です（過去には、遠足や見学を含んだシンポジウムもありました）。

形の科学会は、会員数としては小規模な学会ですが、会員の皆様のご専門分野は非常に広い分野に広がっております。このような多様な会員を有する学会は他にはあまり無く、本学会の長所であると考えております。

シンポジウム開催の観点から言えば、代表世話人を適切に選ぶことにより、多様なシンポジウムを開催することが可能となります。過去のシンポジウムの代表世話人は、事務局からの依頼で決まることが多かったのですが、立候補も歓迎します。我こそはという方は、下記までご連絡ください。（諸事情により、立候補して頂いてもご希望に沿えない場合もございますので、予めご了承ください。）

【お問い合わせ先】

形の科学会事務局・シンポジウム開催支援担当

手嶋吉法（千葉工業大学）

yoshinori.teshima@it-chiba.ac.jp

形の科学会 入会方法

入会資格は、形の科学研究に興味を持っていることです。

入会案内の詳細は、右記サイトにあります。 <https://katachi-jp.com/nyukaiannai>

《インターネットによる入会手続き》

右記サイトにて必要事項をご入力ください。 <https://katachi-jp.com/nyukaimoushikomi>

《E-mail による入会手続き》

必要事項（切り取り線で挟んだ部分）を記入し、形の科学会事務局宛にお送り下さい。

《郵送による入会手続き》

必要事項（切り取り線で挟んだ部分）を紙に記入し、形の科学会事務局宛にお送り下さい。

————— 切り取り線 —————

会員登録カード （記入日： 年 月 日）

氏名： 氏名フリガナ：

生年月日： 年 月 日

連絡先選択：勤務先・自宅・出張先（一つだけ残す）

勤務先名称：

勤務先郵便番号：〒

勤務先住所：

勤務先電話： 勤務先 FAX：

勤務先 Email：

自宅郵便番号：〒

自宅住所：

自宅電話： 自宅 FAX：

自宅 Email：

主要活動分野（20 字以内）：

形関連の興味（箇条書きで各 20 字以内）：

備考（出張宛先, etc.）：

————— 切り取り線 —————

【形の科学会事務局】

〒150-8366 東京都渋谷区渋谷4-4-25

青山学院大学経営学部経営学科

塩澤 友規 宛

E-mail: shiozawa[at]busi.aoyama.ac.jp

（[at]を半角の@で置き換えてください）

形の科学シンポジウム講演予稿集 Vol. 10 No. 1 (2025年6月)

発行： 形の科学会

学会長： 海野 啓明

事務局長： 塩澤 友規
青山学院大学経営学部経営学科

講演予稿集編集事務局： 手嶋 吉法
〒275-0016 千葉県習志野市津田沼 2-17-1
千葉工業大学 工学部 宇宙・半導体工学科
TEL: 047-478-0645
E-mail: yoshinori.teshima@it-chiba.ac.jp