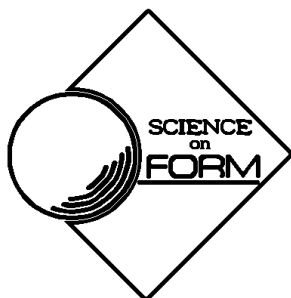


形の科学シンポジウム講演予稿集 Vol. 9 No. 1 (2024年6月)

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



# 第96回 形の科学シンポジウム

## 「形態と機能とその解析」



会場：関西学院大学 西宮上ヶ原キャンパス

会期：2024年6月22日(土), 23日(日), 24日(月)

形の科学会

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

# 第 96 回 形の科学シンポジウム「形態と機能とその解析」

【主催】形の科学会 【協賛】関西学院大学数理センター

【会期】2024 年 6 月 22 日(土), 23 日(日), 24 日(月)

【会場】関西学院大学 上ヶ原キャンパス B 号館 202, 関西学院会館 翼の間

【代表世話人】昌子 浩登 〒669-1330 兵庫県三田市学園上ヶ原 1 番

関西学院大学 理学部数理科学科

TEL: 079-565-8918 E-mail: shoji@kwansei.ac.jp

【参加費】会員・非会員ともに一般 5000 円、学生 2000 円

【懇親会】2024 年 6 月 22 日(土) 18:00 より 関西学院会館 翼の間

【懇親会費】一般 5000 円、学生 3000 円

【WEB サイト】<https://katachi-jp.com/sympo96> (プログラムの最新版と予稿集のカラー閲覧はこちらで)

## プログラム

(変更される場合があります)

### 6 月 22 日 (土)

9:00- 受付

10:00-10:05 開会の辞

#### セッション 1 形態と機能とその解析

座長：昌子浩登

10:05-10:30 (25min)

等方型ミツバチ営巣モデルと異方的な巣の形成

陰山真矢(岡山理科大学)、秋山拓海(関西学院大学)、井上純平(同)、大崎浩一(同) … 1

10:30-10:45 (15min)

ミツバチ営巣に学ぶ形作り

小川亮(山口大学)、鳴海孝之(同) …… 3

10:45-11:10 (25min)

アリヅカムシ亜科の自然史(コウチュウ目:ハネカクシ科)

井上翔太(東京都立大学) …… 5

休憩 11:10-11:25

招待講演 座長：昌子浩登

11:25-12:15 (50min)

ミツバチ属とクロスズメバチ属の巣作りの収斂進化

佐賀達矢(神戸大学) …… 7

12:15-13:40 昼食休憩(運営委員会)

#### セッション 2 形の科学一般

座長：陰山真矢

13:40-14:05 (25min)

解の形状を用いたある走化性方程式系における解の爆発に関する研究

田中悠也(関西学院大学) …… 9

14:05-14:20 (15min)

BZ 反応の数理モデルを用いた領域変化における整流作用について

村上智哉(関西学院大学)、昌子浩登(同) 11

14:20-14:45 (25min)

関節点軌道に関する機械学習のデータ拡張とフレームデータの関係について

深見爽輝(福井大学)、高田宗樹(同) … 13

展示説明

(プレゼン時間 5 分、質疑無し)

14:45-14:50 (5min)

木造継手の立体教材の開発 IV

山田祐資 (千葉工業大学)、手嶋吉法 (同)

..... 15

14:50-14:55 (5min)

外形が立方体の回転式 3D ジグソーパズルの開発 III

齋藤玖恩 (千葉工業大学)、池上祐司 (理化学研究所)、山澤建二 (同)、手嶋吉法 (千葉工業大学) ..... 17

14:55-15:10 休憩

セッション 3 形の科学一般

座長：手嶋吉法

15:10-15:35 (25min)

X 線動力学回折におけるラウエとブラッグケースの分散面の形効果

根岸利一郎 (科学リテラシー研究所) ... 19

15:35-16:00 (25min)

量子時空の形

佐藤勇貴 (福井大学) ..... 21

16:00-16:25 (25min)

天体観測に基づくカッシーニの世界地図(1696)

杉本剛 (神奈川大学) ..... 23

16:25-16:35 休憩

16:35-17:35 総会

18:00-20:00 懇親会

於 関西学院会館 翼の間

**6 月 23 日 (日)**

9:00- 受付

セッション 4 形態と機能とその解析

座長：昌子浩登

9:30-9:55 (25min)

空圧駆動に基づく幾何学形状可変性グリッパーやリング構造の構築

遠藤洋史 (富山県立大学)、本多佑希 (同)、守川和馬 (同) ..... 25

9:55-10:20 (25min)

ペースト状人工骨の数理 ～材料特性が導く形態と機能, その予測へ～

市田優 (関西学院大学) ..... 27

10:20-10:45 (25min)

円筒試験片の実験モード解析

長尾祐太 (千葉工業大学)、手嶋吉法 (同)

..... 29

10:45-11:00 休憩

セッション 5 形の科学一般

座長：岸本直子

11:00-11:25 (25min)

折り紙における不動点とその軌跡

海野啓明 (仙台高等専門学校名誉教授)

..... 31

11:25-11:50 (25min)

人工知能による情報が欠如したデータからの CT 画像の再現

植田毅 (東京慈恵会医科大学) ..... 33

12:50-13:20 昼食休憩

セッション6 形態と機能とその解析

座長：昌子浩登

13:20-13:35 (15min)

細胞列モデルによるがん発生パターンの数理解析

佐野英輝(関西学院大学)、昌子浩登(同)

..... 35

13:35-14:00 (25min)

消化管 大腸ループの形成

本多久夫(神戸大学、理化学研究所) ... 37

セッション7 Forum

座長：植田毅

14:00-14:20 (20min)

深層学習を用いた病理画像変換の開発

脇谷昌汰(関西学院大学)、昌子浩登(同) 39

14:20-14:40 (20min)

肝臓内の毛細血管ネットワーク構造の3次元可視化アルゴリズム

荒木聡一郎(関西学院大学)、巳波弘佳(同)、昌子浩登(同) ..... 41

14:40-14:50 休憩

招待講演 座長：昌子浩登

14:50-15:40 (50min)

トポロジー最適化の方法論と応用

野村勝也(関西学院大学) ..... 43

15:40-15:50 休憩

セッション8 形の科学一般

座長：岸本直子

15:50-16:15 (25min)

七久保の道穴(群馬県下仁田町)の洞床堆積物から産した陸産貝類遺骸群集

増山慈(富山大学)、柏木健司(同) 45

16:15-16:40 (25min)

放散虫 Pantanellium 属の外殻構造の1D・2D表現方法

吉野隆(東洋大学)、松岡篤(新潟大学)、木元克典(JAMSTEC)、岸本直子(関西学院大学)・ 47

16:40-17:05 (25min)

佐渡産の沢根ダンゴ石

松岡篤(新潟大学) ..... 49

17:05-17:30 (25min)

大径化した原木の建築構造材への利活用に関する研究(その4)仮設建築物の施工および見学者に対するアンケート結果

小野聡子(近畿大学)、加藤憲司((株)HKS 環境建築)、杉村泰司((株)杉村構造設計)、荒木光子(ローカルズ 55) ..... 51

6月24日(月)

9:00- 受付

セッション9 形と知

座長：昌子浩登

9:30-9:55 (25min)

ゲノム距離  $d_G$ : 形の簡約化

西垣 功一(埼玉大学名誉教授)、濱野圭一(GenoLife 研究会) ..... 53

9:55-10:20 (25min)

羊蹄山と富士山の形状比較

山口喜博(形の科学会 会長) ..... 55

10:20-10:45 (25min)

シャルピンスキー四面体プロジェクションマッピング

出原立子(金沢工業大学) ..... 57

10:45-11:00 休憩

セッション10 形の科学一般

座長：山口喜博

11:00-11:15 (15min)

フラクタル次元を用いた肝臓形態比較とそのメカニズム推測

小山紗歩（関西学院大学）、昌子浩登（同） 59

11:15-11:40 (25min)

盆栽の造形美の科学 -自動撮影による 3D 化と骨格検出および Horton 則を活用した樹形分析-

内海忍（九州大学）、石井友一朗（神戸大学）、小山賢晋（九州大学）、丈野仁寿（同）、進聡一郎（同）、岡田憲（同）、石丸大晟（同）、松岡伸龍（熊本大学）、田中聡至、阿部太一（福岡大学） 61

11:40-12:05 (25min)

Horton 則を活用した系統樹の幾何学的特徴の解析法による進化現象の特性の調査

石井友一朗（神戸大学）…………… 63

閉会の辞

**【事務局より】**

論文投稿案内 (Call for Papers)…………… 65

シンポジウム世話人の募集…………… 66

入会案内…………… 67

## 等方型ミツバチ営巣モデルと異方的な巣の形成

陰山真矢<sup>\*1</sup>, 秋山拓海<sup>\*2</sup>, 井上純平<sup>\*2</sup>, 大崎浩一<sup>\*3</sup>

<sup>\*1</sup> 岡山理科大学理学部, 岡山県岡山市北区理大町 1-1

m-kageyama@ous.ac.jp

<sup>\*2</sup> 関西学院大学大学院理工学研究科, 兵庫県三田市学園上ヶ原 1

<sup>\*3</sup> 関西学院大学理学部, 兵庫県三田市学園上ヶ原 1

## Isotropic bee comb construction model and formation of the anisotropic comb

Maya Kageyama<sup>\*1</sup>, Takumi Akiyama, Junpei Inoue and Koichi Osaki

<sup>\*1</sup> Faculty of Science, Okayama University of Science, 1-1 Ridaicho, Kita-ku, Okayama-shi, Okayama

**Abstract:** Škarka-Deneubourg-Belić introduced a mathematical model describing the interaction between two differently oriented bees and wax to reproduce the process of the comb construction. We consider an isotropic bee comb construction model that removes the anisotropic component, that is, the direction of the bee in the model. In this presentation, the stability of the solutions to this model and some numerical results will be presented.

**Keywords:** Social insect, Beehive construction, Anisotropic construction, Partial differential equation, Pattern formation

### 1. ミツバチの営巣と数理モデル

ミツバチは数千から数万匹にも及ぶ巨大な社会性を持った集団(コロニー)を作ることが知られている。ミツバチのコロニーは、木の洞や民家の床下といった隙間に巣を作り、その巣は、ミツバチ自身の腹部にあるワックス腺と呼ばれる器官から分泌されるミツロウを唾



図1. 巣箱の天井に作られたコーム(大崎研究室撮影). それぞれのコームはほぼ平行かつ等距離に並んでいる.

液と混ぜて繋ぎ合わせていくことで作られる。巣の中は図 1 のように複数の薄い板状の巣(コーム)がほぼ一定の間隔で並ぶ構造となっている。コロニー内のミツバチたちが統率者を持たずに、どのようにして異方的な巣を造っているのかについては明らかとなっていない。Škarka-Deneubourg-Belić[1]は、異方的なコームが作られるメカニズムを調べるために、2種のミツバチとミツロウの相互作用を記述した次のような数理モデルを導入した。

$$\frac{\partial u}{\partial t} = a\Delta u - \chi u \frac{\partial^2 w}{\partial x^2} + buv(u - v) + c - \mu u, \quad (x, y, t) \in \Omega \times (0, \infty),$$

$$\frac{\partial v}{\partial t} = a\Delta v - \chi v \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} + buv(v - u) + c - \mu v, \quad (x, y, t) \in \Omega \times (0, \infty),$$

$$\frac{\partial w}{\partial t} = d(u + v)\Delta w + fu + fv - gw, \quad (x, y, t) \in \Omega \times (0, \infty).$$

ここで、 $\Omega$ は2次元長方形領域とし、未知変数  $u(x, y, t)$  は  $xOz$  平面に平行なミツバチの密度、 $v(x, y, t)$  は  $yOz$  平面に平行なミツバチの密度、 $w(x, y, t)$  はミツロウの密度を表している。このモデルの特徴は、それぞれ直交する方向にコームを伸ばそうとする2種のミツバチの競争によって、コームが作られる方向が選択され、平行かつ一定距離に並ぶ巣の成長を再現しようとした点である。

## 2. 等方型ミツバチ営巣モデル

営巣過程初期においては、テトラポッドのような形のミツロウ塊を作ることが分かっており(Narumi-Uemichi-Honda-Osaki[2])、コームに異方性が現れる前に、等方的と見られる営巣段階があると考えられる。このことから本研究では、Škarka-Deneubourg-Belićモデルをもとに、ミツバチがミツロウに等方的に誘引されるとい誘引項を導入し、ミツバチ間の方向選択のための競争を取り除いた等方型ミツバチ営巣モデルを提案する。

## 3. 数値計算結果

等方型ミツバチ営巣モデルに対して、数値シミュレーションを行った。これにより、ミツバチがミツロウに引き寄せられる度合を表すパラメータ  $\chi$  を調整することで、主に一方向が選択される異方的なミツロウパターンが現れることが分かった(図2)。

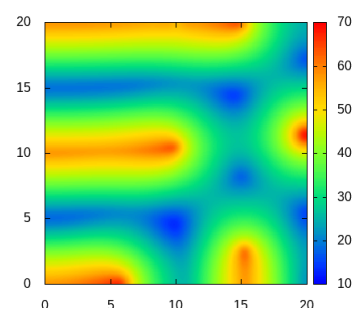


図2. ミツロウ  $w$  の分布.

## 参考文献

- [1] Škarka, Deneubourg, and Belić, Mathematical model of building behavior of *Apis mellifera*, J. theor. Biol., 1990, 147, 1-16.
- [2] Narumi, Uemichi, Honda, and Osaki, Self-organization at the first stage of honeycomb construction: Analysis of an attachment-excavation model, PLoS ONE, 2018, 13(10): e0205353.

## ミツバチ営巣に学ぶ形作り

小川 亮, 鳴海 孝之\*

山口大学 創成科学研究科, 山口県宇部市常盤台 2 丁目 16-1

\* tnarumi@yamaguchi-u.ac.jp

### Learning from honeybee nest construction

Ryo Ogawa, Takayuki Narumi

Graduate School of Sciences and Technology for Innovation Yamaguchi Univ.,  
Tokiwadai 2-16-1 Ube Yamaguchi

**Abstract:** We address how honeybees construct their combs in a regular pattern. The mechanism behind the cell's regular arrangement, particularly during the vertical extension, is poorly understood. This research aims to explain the overall nesting behavior by extending a mathematical model for the initial construction process. In addition, we conduct experiments with 3D-printed foundations to observe how honeybees build combs in various shapes.

**Keywords:** pattern formation, self-organization, mathematical model, 3D printer

背景: ミツバチが作るハニカム構造は古くから人類を魅了してきたが、営巣メカニズムは完全には解明されていない。営巣に関する先行研究では巣枠がどのように六角形に形成されるかが主な焦点となっているが、そもそも巣穴が規則的に並ぶメカニズムが明らかになっていない。脳が小さく寿命が短いミツバチが指示役なしに巣作りをしていることから、営巣ルールはそれほど複雑ではない可能性が高い。

目的: 鳴海らは自己組織化の概念に基づき、営巣初期過程で天井面に巣穴を規則的に作る行動ルールを提案した[1]。しかし、巣が鉛直方向に伸びる営巣中期過程以降で巣穴が規則的に並ぶメカニズムは解明されていない。本研究では、初期営巣過程のモデルを基にした数理モデルの作成を通じ、営巣全過程で巣穴が規則的に並ぶメカニズムの解明を目指す。

方法: 初期営巣過程の数理モデルを拡張し、鉛直方向に伸びる巣に対応する数理モデルを作成した。具体的な行動ルールを提案することで、営巣メカニズムの解明を目指す。また、行動ルールの仮説を立てるために実際のミツバチの群れに対して 3D プリンターで作成した様々な形状の巣礎を用いた実験を行い、巣礎形状に応じた営巣の様子を観察している。

発表では、研究の現状として巣穴が規則的に並ぶメカニズムに関連する行動ルールについて報告し、生物がつくる形について議論したい。

#### Reference:

[1] "Self-organization at the first stage of honeycomb construction: Analysis of an attachment-excavation model," Takayuki Narumi, Kenta Uemichi, Hisao Honda, Koichi Osaki: *PLoS ONE* **13**, e0205353 (2018).



## アリヅカムシ亜科の自然史 (コウチュウ目 : ハネカクシ科)

井上翔太

東京都立大学 大学教育センター、東京都八王子市南大沢 1-1 南大沢キャンパス 91 年館

shota666.shigure@gmail.com

### Taxonomy, phylogeny and ecology of the subfamily Pselaphinae (Coleoptera: Staphylinidae)

Shota Inoue

Tokyo Metropolitan University, University Education Center; The 1991 Hall, 1-1  
Minami-Osawa, Hachioji, Tokyo, 192-0397 Japan

**Abstract:** The subfamily Pselaphinae, called ant-loving beetles, containing ca. 10,500 species from worldwide, and ca. 370 species are known from Japan. The members of the pselaphine rove beetles mainly inhabited in the leaf litters, decayed wood, ant-nest and termite nest. However, their taxonomy, phylogeny and ecology are poorly studied. In this study, I reported the results regarding the species diversity, morphologies, and immature stages which I have studied. Also, reported the result of study that evolution of myrmecophily and termitophily focusing on the genus *Tmesiphorus* and allied genera.

**Keywords:** Staphylinidae, myrmecophily, termitophily, taxonomy, phylogeny, ecology, larvar morphology

#### はじめに

コウチュウ目は既知の生物種数の 1/4 を占める巨大な分類群であり、そのなかでもハネカクシ科はゾウムシ上科と並び膨大な種数（既知種数約 6 万種）を含むコウチュウ目最大の分類群として知られる。ハネカクシ科は短い鞘翅や柔軟に可動する扁平な腹部を有しており、これら形態はほかの甲虫が進出できないような様々な微環境への進出を促したとされる。一方、ハネカクシ科アリヅカムシ亜科は他のハネカクシとは異なり、露出する腹部自体を硬化させている。この頑強な腹部は鞘翅のように繁殖器官の保護として機能したことで種多様化したのではないかと考えられている<sup>[1]</sup>。また一方で、アリヅカムシ亜科には、生活史の一部もしくは全てをアリやシロアリの社会に依存する好蟻性種・好白蟻性種を多く抱える一群でもある。アリヅカムシ亜科の強固な腹部はアリやシロアリの攻撃に対する物理的防御として機能したことで、多様なアリ種・シロアリ種コロニーへの適応を促したとされる。好蟻・好白蟻性種の多くが寄主アリやシロアリとの接触を回避する行動戦略を示すが、一部の系統では寄主との複雑な社会的相互作用を示す。また、アリヅカムシ亜科は形態的に非常に多様な一群であることも知られ、特に雄の触角には著しい形態的な多様性が見られる。上述のように、アリヅカムシ亜科には他の昆虫には見られない興味深い“形”を進化させているが、そのメカニズムは未解明である。その要因として、アリヅカムシ亜科は分類学

的・系統的・生態学的研究が大幅に遅れており、社会性昆虫との生物間相互作用を解明する研究へ発展させる基盤が整っていないことが挙げられる。そのため、演者は上記問題点の解決を主眼においたアリヅカムシ亜科の自然史解明に取り組んできた。本報告では演者がこれまで解明してきたアリヅカムシ亜科の分類学的・系統的・生態学的研究な成果を報告する。



図. 好蟻性アリヅカムシ. エグリチイロアリヅカムシ (左). オオヒゲカタアリヅカムシ (右)

### 好蟻性種の進化

ヒゲカタアリヅカムシ属は好蟻性種と好白蟻性種の両方を含む分類群であり、アリヅカムシ亜科の寄生進化機構を解明するのに最適な分類群である。しかし、近縁属との識別に問題があること、系統関係が明らかでないなどの問題を抱えている。本研究では、形態の再検討とともに分子情報を用いた系統解析を行った。その結果、ヒゲカタ属とその近縁属は二つのクレードに分かれ、それぞれ強く支持された。また、好白蟻性シロアリヒゲカタアリヅカムシ属は共生生活に伴い形態が変化したヒゲカタ属の一種とみなすのが妥当であると判明した。さらに好蟻性と好白蟻性は朽木や樹皮に選好する種から進化していることが分かった。朽木や樹皮への環境選好性がアリやシロアリとの遭遇頻度増加を促し、この系統における好蟻性と好白蟻性の進化につながったことを示唆している。

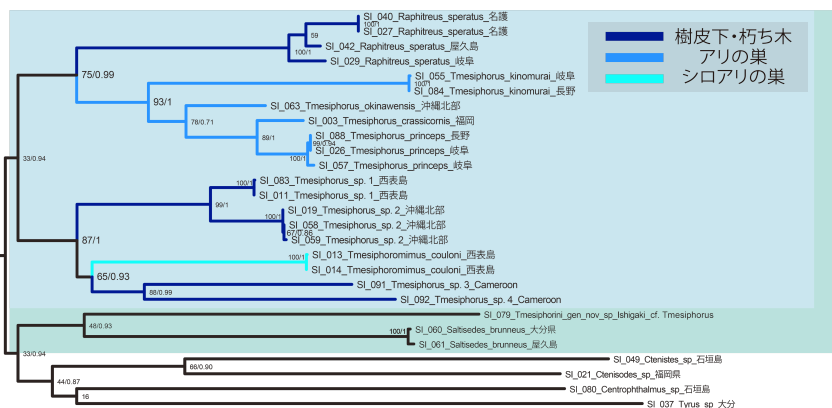


図. ヒゲカタアリヅカムシ属とその近縁属の系統関係 (最尤法)

[1] Parker, J. (2016) Emergence of a superradiation: pselaphine rove beetles in mid-Cretaceous amber from Myanmar and their evolutionary implications: Cretaceous Pselaphinae. Systematic Entomology 41, 541–566. <https://doi.org/10.1111/syen.12173>

## ミツバチ属とクロスズメバチ属の巣作りの収斂進化

佐賀達矢

神戸大学大学院人間発達環境学研究科、兵庫県神戸市灘区鶴甲 3-11

tatsuya.saga@people.kobe-u.ac.jp

## Convergent Evolution in Nest Building among Honeybees (*Apis*) and Social Wasps (*Vespula*)

Tatsuya Saga

Kobe University Graduate School of Human Development and Environment, 3-11  
Tsurukabuto, Nada-ku, Kobe, Hyogo, Japan.

**Abstract:** Smith et al.'s 2023 studied the nest-building behaviors of honeybees and social wasps, which have different evolutionary origins. The research focuses on how these species overcome geometric challenges through variations in cell sizes within their combs. Honeybees and social wasps, known for their hexagonal cell structures, face issues when aligning cells of two different sizes side by side in a comb—a problem rooted in tiling geometry. To address this, both species integrate pairs of pentagonal and heptagonal cells, or alternatively, intermediate-sized hexagonal cells, particularly in the transition areas from smaller to larger cells within the comb. These findings highlight the complexity and ingenuity of nest architecture in these social insects. By understanding these adaptations, the study enhances our appreciation of the evolutionary pressures and ecological demands shaping the behavior and physical structures of honeybees and wasps. The incorporation of variously shaped cells to form a cohesive and functional nest structure is a remarkable example of natural engineering.

**Keywords:** Nest structure, Convergent evolution, Honeybee, Social wasp, Geometric challenges

### ミツバチとスズメバチの巣作りの起源は異なる

ミツバチとスズメバチの共通祖先は1億7900万年前に分岐し、その後、それぞれの系統で群れも巣も作らない単独性の蜂として独自に進化を続けた。その後これらの系統から個体が群れて巣を作る種が独立に進化してきた (Peters et al. 2017)。そのため、一言に蜂の巣と言っても、ミツバチとスズメバチの巣作りの起源は異なり、巣の材料と構造には違いがある。ミツバチの巣(部屋)は働き蜂が分泌する蠟から作られ、幼虫を育てたり、蜜や花粉を貯蔵したりする。これらの部屋からなる巣板は、部屋の開口部が水平方向を向くよう縦に配置される。一方、スズメバチの巣(部屋)は植物繊維と働き蜂の唾液を混ぜたもので作られ、一部の種は巣板を球状の外被で覆う。スズメバチは蜜や花粉は集めないため、部屋は幼虫の養育だけに使われ、開口部が下を向くよう横方向に積み重ねられる。このようにミツバチとスズメバチの巣には多くの異なる点があるが、正六角形の部屋を作るという共通点もある。正六角形は一面に敷き詰め可能で、正多角形の中では与えられた周囲長に対して最大面積を提供し、構造の強度も高い。ミツバチとスズメバチの巣作りの起源は異なるが、互いに空間と材料を効率的に使うことができる部屋の形に進化している。

## 部屋の構造と建築上の問題点

ミツバチ属には、小さな部屋で働き蜂を、大きな部屋でオスを育てる種がいる。また、クロスズメバチ属の蜂は小さな部屋で働き蜂とオスを、大きな部屋で女王蜂を育てる。両属共に小さな部屋から作り始め、巣が大きくなると繁殖虫であるオスや女王蜂用の大きな部屋を作る。ミツバチ属でもクロスズメバチ属も小さな部屋と大きい部屋が一枚の巣板上に作られることもある。一方、異なる2つの大きさの正六角形の部屋を一面に並べようとすると、規則正しく並べられず、隙間が生じることが幾何学的に予測される。

## 巣作り上のズレ解消方法の発見

筆者らは小さい部屋から大きい部屋に移行する部分（移行部）に隙間が生じるという予想に基づき、ミツバチ属ではクロコミツバチ *Apis andreniformis*、コミツバチ *A. florea*、セイヨウミツバチ *A. mellifera* の3種で、クロスズメバチ属ではシダクロスズメバチ *Vespula shidai*、キオビクロスズメバチ *V. vulgaris*、*V. flavopilosa*、*V. maculifrons* の4種の移行部を詳細に観察した。その結果、上記のミツバチとクロスズメバチの全種で、移行部に五角形と七角形のペアが作られていた。また、大小の部屋の大きさの比率は種ごとで異なり、その比率が大きくなるほど移行部での非六角形の部屋の割合が高かった。さらに、大小の部屋の大きさの比率が小さい場合には、移行部に中間の大きさの六角形を作っていた。

## 幾何学的な予測と検証

ドロネー三角形分割を用いる幾何学的な方法を用いて2種類の大きさの部屋からなる巣板の最適な構造（部屋の並べ方）を調べた。その結果、ミツバチとクロスズメバチの巣では、移行部に実際の蜂の巣で見られた五角形と七角形の部屋のペアを追加すること、あるいは、中間の大きさの部屋を作ることによって隙間が解消されることが示された。さらに、筆者らは、大小の部屋の比率と移行部の長さから各種の巣ごとに最適な非六角形の割合を予測するモデルを作り、実際の各巣の非六角形の割合との関係を調べた。その結果、そのモデルにより、実際に非六角形の部屋を作る割合について92%を説明できた。本研究により、ミツバチ属とクロスズメバチ属の働き蜂には、異なる大きさの正六角形の部屋を一枚の巣板に作る際に隙間を生じさせない幾何学的に最適な巣作り行動が収斂進化していることが示された。

## 引用文献

Peters, R. S., Krogmann, L., Mayer, C., Donath, A., Gunkel, S., Meusemann, K., ... & Niehuis, O. (2017). Evolutionary history of the Hymenoptera. *Current Biology*, 27(7), 1013-1018.

Smith, M. L., Loope, K. J., Chuttong, B., Dobelmann, J., Makinson, J. C., Saga, T., Petersen K. H., Napp, N. (2023). Honeybees and social wasps reach convergent architectural solutions to nest-building problems. *PLoS Biology*, 21(7), e3002211.

# 解の形状を用いたある走化性方程式系における 解の爆発に関する研究

田中 悠也

関西学院大学 理学部 数理科学科、〒669-1330 兵庫県三田市学園上ヶ原 1  
yuya.tns.6308@gmail.com

## Study on blow-up of solutions for chemotaxis systems by profiles of solutions

Yuya Tanaka

Department of Mathematical Science, Kwansai Gakuin University,  
1 Gaguken Uegahara, Sanda, Hyogo 669-1330

**Abstract:** In this talk we consider blow-up solutions for chemotaxis systems with logistic source by using profiles of solutions. For a minimal chemotaxis system with logistic source, Winkler [5] showed finite-time blow-up by deriving a profile of solutions. Our purpose is to obtain results on finite-time blow-up for a quasilinear chemotaxis system with logistic source by using corresponding profiles. Moreover, we give a result on blow-up of solutions for Lotka-Volterra systems with chemotaxis terms.

**Keywords:** chemotaxis; blow-up; profile

### 1. 序

走化性方程式系とは、細胞性粘菌が自身から生成される化学物質に引き寄せられること（走化性）で起こる集中現象（図 1）を記述した数理モデルであり、1970 年に Keller と Segel によって提唱された([1])。この走化性方程式系の研究において、その生物の密度の最大値が時間とともに大きくなることを、数学的に解の爆発として特徴付けている。一方、時間がいくら経っても生物の密度の最大値がある値を超えないことを、解の有界性として特徴づけており、解の爆発と有界性に関する研究が多く行われている。本研究では特に、生物の増殖・死滅も考慮した、ロジスティック項をもつ走化性方程式系における解の爆発を考察した。

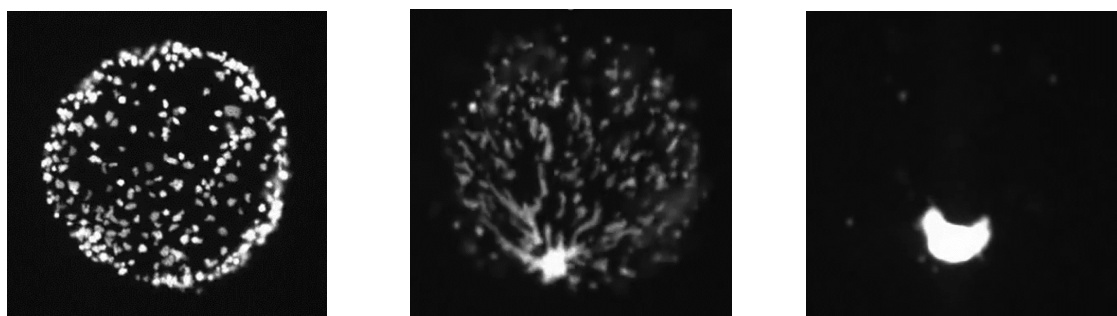


図 1. 細胞性粘菌が集まる様子

## 2. ロジスティック項をもつ走化性方程式系における解の爆発

走化性の影響の強弱及び生物の増殖と死滅を考慮した次のロジスティック項をもつ走化性方程式系を、初期条件及び斉次 Neumann 境界条件のもとで考える。

$$\begin{cases} u_t = \Delta u - \chi \nabla \cdot (u(u+1)^{\alpha-1} \nabla v) + \lambda u - \mu u^\kappa, & x \in B_R(0), t > 0, \\ \mathbf{0} = \Delta v - v + u, & x \in B_R(0), t > 0. \end{cases}$$

なお、 $B_R(0)$  は原点を中心とする半径  $R$  の開球、 $\chi, \alpha, \lambda, \mu > 0$ ,  $\kappa > 1$  は定数であり、 $u, v$  はそれぞれ位置  $x$ , 時刻  $t$  における生物の密度、化学物質の濃度を表している。

上記の方程式系には減衰項  $-\mu u^\kappa$  が含まれていることから、通常よりも解の爆発は起こりにくい状況と考えられる。しかし  $\alpha = 1$  のとき、Winkler [4] は解のプロファイルを導出し、有限時刻で爆発する解の存在を示した。本研究では、解の爆発がさらに起こりにくいと考えられる走化性の弱い場合 ( $0 < \alpha < 1$ ) を考え、対応する解のプロファイル (図 2) を導出して、有限時刻で爆発する解の存在を示した ([3])。

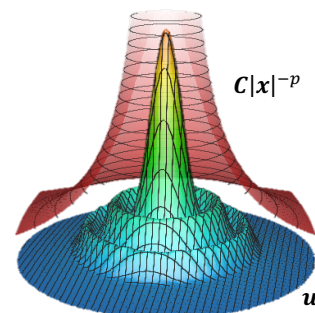


図 2. 解のプロファイル  $u \leq C|x|^{-p}$  ( $\exists C, p > 0$ )

さらに、2 種間の生物の競争を記述した Lotka-Volterra 競合モデルに走化性項を追加した次の方程式系を、初期条件及び斉次 Neumann 境界条件のもとで考える。

$$\begin{cases} u_t = \Delta u - \chi_1 \nabla \cdot (u \nabla w) + \mu_1 u (1 - u^{\kappa_1-1} - a_1 v^{\lambda_1-1}), & x \in B_R(0), t > 0, \\ v_t = \Delta v - \chi_2 \nabla \cdot (v \nabla w) + \mu_2 v (1 - a_2 u^{\lambda_2-1} - v^{\kappa_2-1}), & x \in B_R(0), t > 0, \\ \mathbf{0} = \Delta w - w + u + v, & x \in B_R(0), t > 0. \end{cases}$$

ここで、 $\chi_1, \chi_2, \mu_1, \mu_2, a_1, a_2 > 0$ ,  $\kappa_1, \kappa_2, \lambda_1, \lambda_2 > 1$  は定数であり、 $u, v$  は 2 種の生物の密度、 $w$  は化学物質の濃度を表している。この問題に関しては、これまで解の有界性や定数定常解の安定性に関する結果しか得られていなかった。そこで本研究では [3] の手法をもとに、本問題に対しても解のプロファイルを導出し、新たに解の爆発の結果を得た ([2])。本講演ではこれらの成果について報告する。また、関連する結果についても紹介する。

## 参考文献

- [1] E. F. Keller, L. A. Segel, *Initiation of slime mold aggregation viewed as an instability*, J. Theoret. Biol., **26** (1970), 399-415.
- [2] M. Mizukami, Y. Tanaka, T. Yokota, *Can chemotactic effects lead to blow-up or not in two-species chemotaxis-competition models?*, Z. Angew. Math. Phys., **73** (2022), Paper No. 239, 25.
- [3] Y. Tanaka, *Blow-up in a quasilinear parabolic-elliptic Keller-Segel system with logistic source*, Nonlinear Anal. Real World Appl., **63** (2022), Paper No. 103396, 29.
- [4] M. Winkler, *Finite-time blow-up in low-dimensional Keller-Segel systems with logistic-type superlinear degradation*, Z. Angew. Math. Phys., **69** (2018), Paper No. 69, 40.

## BZ 反応の数理モデルを用いた領域変化における整流作用について

村上智哉, 昌子浩登

関西学院大学大学院 理工学研究科数理科学専攻

〒669-1330 兵庫県三田市学園上ヶ原1番

E-mail アドレス : [hdm02288@kwansei.ac.jp](mailto:hdm02288@kwansei.ac.jp)

### A Self-organized Rectification Using Pattern Formation in a Reaction-diffusion system for BZ Reaction

Tomoya Murakami, Hiroto Shoji

Kwansei Gakuin University Graduate School, Science and Engineering

1 Gakuen Uegahara, Sanda, Hyogo 669-1330

**Abstract:** The mathematical model of the BZ reaction has been utilized in the development of computational algorithms. Here, we focus on the area where the signal propagates to transform the spiral pattern to the target pattern, i.e, rectifying the patterns. By changing parameters of shape of area, it became possible to correct the signal's shape from spiral to target patterns. This analysis can help rectifying the propagating waves in medias.

**Keywords:** finite element method, arithmetic algorithm, mathematic model.

#### 1. はじめに

Belousov-Zhabotinsky (BZ) 反応は, 物質濃度が周期的に変化し, その振動の波が空間的に伝搬する化学反応で, 次のような活性化抑制化因子系の反応拡散モデルとして表せることが知られている [1].

$$\partial u / \partial t = D_u \nabla^2 u + u(1-u)(u-\alpha) - v$$

$$\partial v / \partial t = D_v \nabla^2 v + \varepsilon(u - \gamma v)$$

これまで, このモデルの特徴を活用し, 有用で応用可能な演算アルゴリズムの開発が行われてきた [1]. その開発の中でターゲットパターンがノイズによってスパイラルパターンに変化してしまうことがあるため, 領域の形状を変化させることによって, スパイラルパターンからターゲットパターンに修正できるアルゴリズムの開発 (整流作用) の一助になることを望む. 本研究では特に, スパイラルを狭める高さ  $h$ , 穴幅  $w$ , スパイラルの回転周期  $k$  の 3 つの変数に着目し, それぞれの変数と整流作用の関係性について考察する.

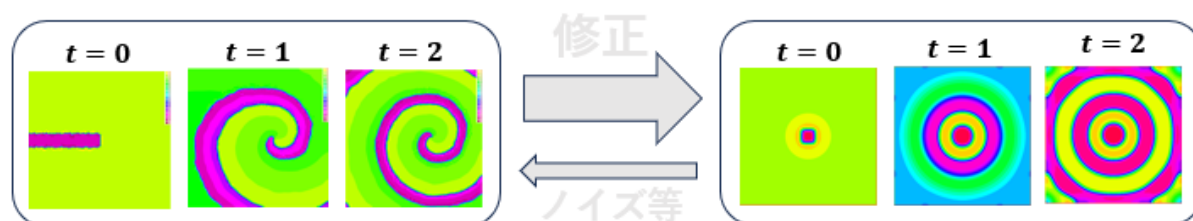


図 1 : FreeFEM++ [2] による信号の 1 秒毎の時間発展, 左: スパイラルパターン, 右: ターゲットパターン.

## 2. ターゲットパターンへ変換する領域設定

BZ 反応で自発的に形成されるスパイラルパターンからターゲットパターンへの変換を行うため, 図2のように, スパイラルを徐々に狭めるように領域を設定する. ただし, 領域  $\Omega = [0,10] \times [0,10]$  において,  $5 \leq x \leq 10$  の領域の形状は変えないものとする.

スパイラルの始点 ( $t = 0$ ) の座標を  $\{(x_0, y_0); 0 \leq x < 1, 4.5 < y_0 < 5.5\}$ , スパイラルパターンからターゲットパターンに変換される穴幅を  $w$ ,  $A_1$  の  $y$  座標を  $h$  とし,  $D_u$  の  $D_v$  に関するスカラー数を  $k$  とする.  $k$  はスパイラルの回転周期を変更する際に用いる. また, 各時間についても触れておく. スパイラルパターンからターゲットパターンに変換する時間を  $t_1$ ,  $A_2$  にターゲットが達する時間を  $t_2$ ,  $A_3$  にターゲットが達する時間を  $t_3$  とおく.

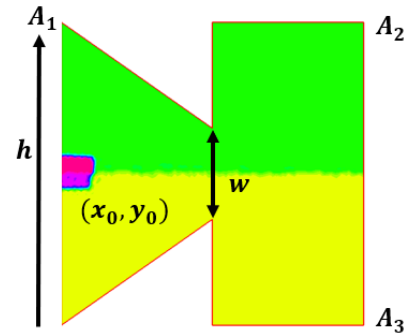


図2 設定した領域形状。

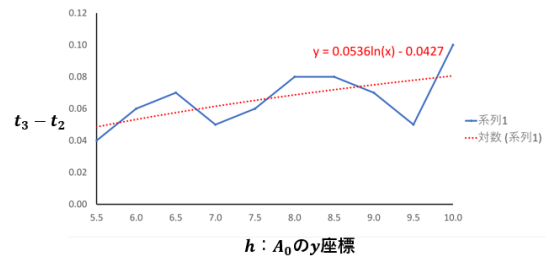
## 3. $h, w, k$ と整流作用との関係性

スパイラルパターンをターゲットパターンに変化させ, ターゲットが点  $A_2, A_3$  の 2 点に同着する ( $t_2$  と  $t_3$  の時間差を最小にする) 領域とスパイラルの設定を以下の①~③に分けて実験した.

### ① $h$ (スパイラルを狭める高さ) と整流作用の関係性について

$w = 1, k = 0.5$  で固定し,  $h$  を  $5.5 \leq h \leq 10$  の範囲でターゲットパターンへの変化の関係性を考察する.

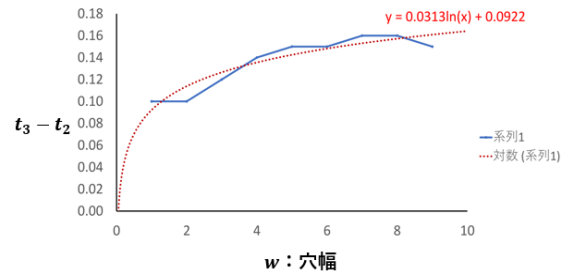
右図より,  $\text{Min}|t_3 - t_2|$  となる  $h$  は  $h = 5.5$  であり, 狭める角度が緩やかなほど  $t_3 - t_2$  の値は小さくなる可能性が高いことが分かる.



### ② $w$ (穴幅) と整流作用の関係性

$h = 10, k = 0.5$  で固定し, 穴幅  $w$  を  $1 \leq w \leq 9$  の範囲でターゲットパターンへの変化の関係性を考察する.

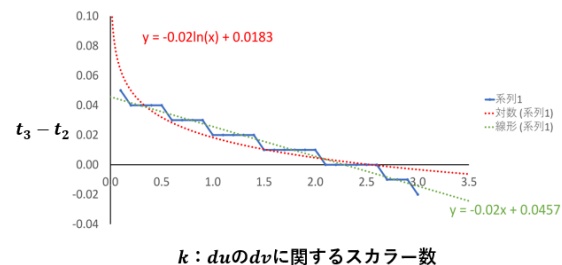
右図より,  $\text{Min}|t_3 - t_2|$  となる  $w$  は  $w = 1$  であり, 穴幅が狭いほど  $t_3 - t_2$  の値は小さくなる可能性が高いことが分かる.



### ③ $k$ (スパイラルの回転周期) と整流作用の関係性

①, ②の結果から,  $h = 5.5, w = 1$  のとき,  $dv = k du$  が成り立ち  $t_2$  と  $t_3$  の時間差が最小になる  $k$  を,  $k \geq 0.1$  の範囲で探す.

$\text{Min}|t_3 - t_2|$  となる  $k$  は  $k = 2.1$  であり, 回転率が高いほど  $t_3 - t_2$  の値は小さくなるが, 高すぎると,  $t_3 < t_2$  となる可能性が高いことが分かる.



## 参考文献

- [1] 鈴野浩大, 可視化技術としての反応拡散系, RIMS 研究集会報告集 1937, p142-148, (2015)
- [2] 大塚厚二・高石武史, 有限要素法で学ぶ現象と数理-FreeFem++ 数理思考プログラマー



## 関節点軌道に関する機械学習のデータ拡張と

### フレームデータの関係について

深見爽輝<sup>1</sup>、高田宗樹<sup>1</sup>

<sup>1</sup>福井大学院工学研究科知識社会工学専攻, 〒福井市文京 3 丁目 9-1

[mf240360@g.u-fukui.ac.jp](mailto:mf240360@g.u-fukui.ac.jp)

## Relationship between data augmentation for joint trajectory and frame data in machine learning

Fukami Sawaki<sup>1</sup>, Hiroki Tkada<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Department of Fundamental Engineering for Knowledge-Based Society, Graduate School of Engineering, University of Fukui, 3-9-1 Bunkyo, Fukui-city, Fukui 910-8507, Japan

**Abstract:** In recent years, the increasing workload on rehabilitation therapists has become a significant issue, and using head-mounted displays (HMDs) for rehabilitation offers promising effective treatment and reduced therapist burden. Combining virtual reality(VR) with treadmills has shown improvements in muscle strength and alleviation of phantom limb pain. Convolutional neural networks (CNNs) are widely used in medical image recognition. Previous research visualized joint movement trajectory data during VR viewing using HMDs into images and achieved high classification accuracy using CNNs. However, further investigation is needed on the impact of different datasets and affine transformation parameters on classification accuracy. This study explores the potential for improving image classification accuracy by adjusting the data length of joint movement frames and affine transformation parameters.

**Keywords:** virtual reality (VR), treadmill, head-mounted display (HMD), data length, convolutional neural network(CNN), data augmentation(DA)

### 1. はじめに

近年、理学療法士への人的負担の増加や治療費の高騰などの問題が顕在化しており、これらの問題に対し HMD を用いたリハビリテーション実現により、効果的な治療が可能である。また、療法士への負担軽減が期待される<sup>[1]</sup>。これらの技術は医療現場においても応用が進んでいる。特に仮想現実とトレッドミルを組み合わせた治療法においては、先行研究によりその有用性が報告されており、VR リハビリテーションで筋力改善、幻肢痛が緩和したことが確認された<sup>[2]</sup>。

さらに、医療画像の識別などにおいては、畳み込みニューラルネットワーク (CNN) を使用した深層学習が多く用いられることが多くなっている<sup>[3]</sup>。

先行研究では、HMD を用いて動的な VR 映像と静的な VR 映像を視認させた際の身体の各関節の移動軌跡フレームデータを 0 秒、100 秒、210 秒から始まる 3 つの区間でデータ長 40 秒の長さで画像化し、その画像が動的な映像を視認している際の画像であるかを

判別する CNN を構築した<sup>[4]</sup>。そこでは、高い判別精度で判別できたが、実用化のためには他の仕様のデータセットで、画像が動的な映像を視認している際の画像であるかを判別する精度について検討を行う必要がある。また、他の先行研究では、アフィン変換を行う際の拡大・縮小、回転、平行移動の各パラメータ値を最適な値に設定し DA 際の判別精度についても、正答率の変化が確認され、関節点ごとに最適なパラメータ値があることが示唆された<sup>[5]</sup>。

そこで本研究では、各関節点の移動軌跡フレームデータを画像化する際のデータ長と、アフィン変換の際のパラメータ値を最適な値に設定することにより、画像判別の精度が向上する可能性を模索した。

## 2. 実験方法

本研究は、若年健常者 8 人(22.7±0.8 歳)を対象にして、実験を行った。一人称視点の静止画と 3 km/h、5 km/h、8 km/h でそれぞれ歩行する際の映像を、非透過型 HMD を装着し視認させた状態で、トレッドミル上を 5 km/h の速度で 300 秒間歩行させた<sup>[6]</sup>。トレッドミル上の被験者を、Web カメラを用いて撮影を行い、被験者の身体の 17 箇所的位置情報の推定が可能な PoseNet を用いて関節点の位置情報の推定を行った。

## 3. 解析方法

被験者ごとに PoseNet から出力された各関節のデータを 1 つのデータにつき 0 秒、100 秒、210 秒から始まる 3 つの区間で抽出し、それぞれ 5、10、20、60 の 4 種類のデータ長で抽出したのちに、ピクセル画像化を行った<sup>[7]</sup>。次に、8 人被験者データうち 6 人のデータを学習用データ、2 人のデータをテスト用データに分類した<sup>[8]</sup>。その後、本研究では視認映像が静的な VR 映像と動的な VR 映像を視認している際の各関節点フレームデータを判別するため、各被験者が静止画を視聴した場合と、歩行動画を視聴した場合のデータでラベル付けをして二値分類を行った。最後にテスト用データを認識させ、拡大・縮小、回転、平行移動のパラメータ値を任意の値に設定し、CNN を用いて正答率を算出する。

## 4. 結果及び考察

結果及び考察の詳細は講演にて発表する。

### 参考文献

- [1] 真鍋敦, 弓仲康史, 長谷川信, 和田直樹. “ヘッドマウントディスプレイ(HMD)を用いた仮想現実フィードバックリハビリアシストシステムの開発”. 電子情報通信学会, pp.24, (2018).
- [2] 金指佳希.“理学療法臨床実験における VR 活用”.リハビリテーション・エンジニアリング, Vol.37 No.3, pp.133-136, (2022).
- [3] 大江和彦. “これからの医療における AI の活用と課題”. 医薬品情報学, 19 巻, 3 号, pp.N1-N3, (2017).
- [4] 菅井洋成, 平田隆幸, 高田宗樹. “モーションキャプチャーと機械学習を用いた VR 映像視認中の歩行者における判別分析に関する研究”, 生体医工シンポジウム抄録集, PP.151, (2023).
- [5] 池田尚俊, “関節点移動フレームの機械学習におけるデータ拡張に関する研究”. 福井大学, (2023)
- [6] 高田宗樹, 宮尾克, 塩澤友規, 高田真澄, 伊藤菊男.“AR を利用した感覚不一致を軽減させるトレーニングシステムの開発およびその評価”. デサントスポーツ科学, 第 43 巻, pp.62-70, (2022). DOI [https://doi.org/10.57488/descente.43.0\\_62](https://doi.org/10.57488/descente.43.0_62)
- [7] 深見爽輝, “関節点移動フレームの機械学習におけるデータ仕様に関する研究”, 福井大学, (2023)
- [8] 菅井洋成. “モーションキャプチャーを用いた VR 視聴における感覚不一致軽減に関する研究”. 福井大学, (2023)

## 木造継手の立体教材の開発 IV

山田祐資、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 to learn wooden joints IV

Yusuke YAMADA & 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 67 kinds of 3D models for traditional wooden joint. In this study, we generated 3D shape data for 27 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

#### 研究背景と目的

継手と仕口はネジや釘を使わずに部材を接合する方法で、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方法またはその接合部を継手と呼び、異なる方向に継ぐ方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、紙面上の図だけで理解するのは困難である。また、伝統的な木造技法をデジタルデータとして保存することには意義がある。そこで本研究では、CADソフトを使用して継手と仕口を設計した後、3Dプリンタを使用して実体化模型を作製し、立体教材として活用する。

これまでに我々の研究グループは、67種類の継手または仕口を設計し、立体模型を作製してきた[2][3][4]。本研究では、それら(67種類)以外の継手または仕口を選定し、設計および立体模型の作製を行った。

#### 継手と仕口の模型作製の手順

文献[1]の図を参考にして、3D-CAD(Fusion360)を使用し、細部まで意識しながら設計した。立体教材を手にとって操作する際の安全性を考慮し、角部の面取りを行った。

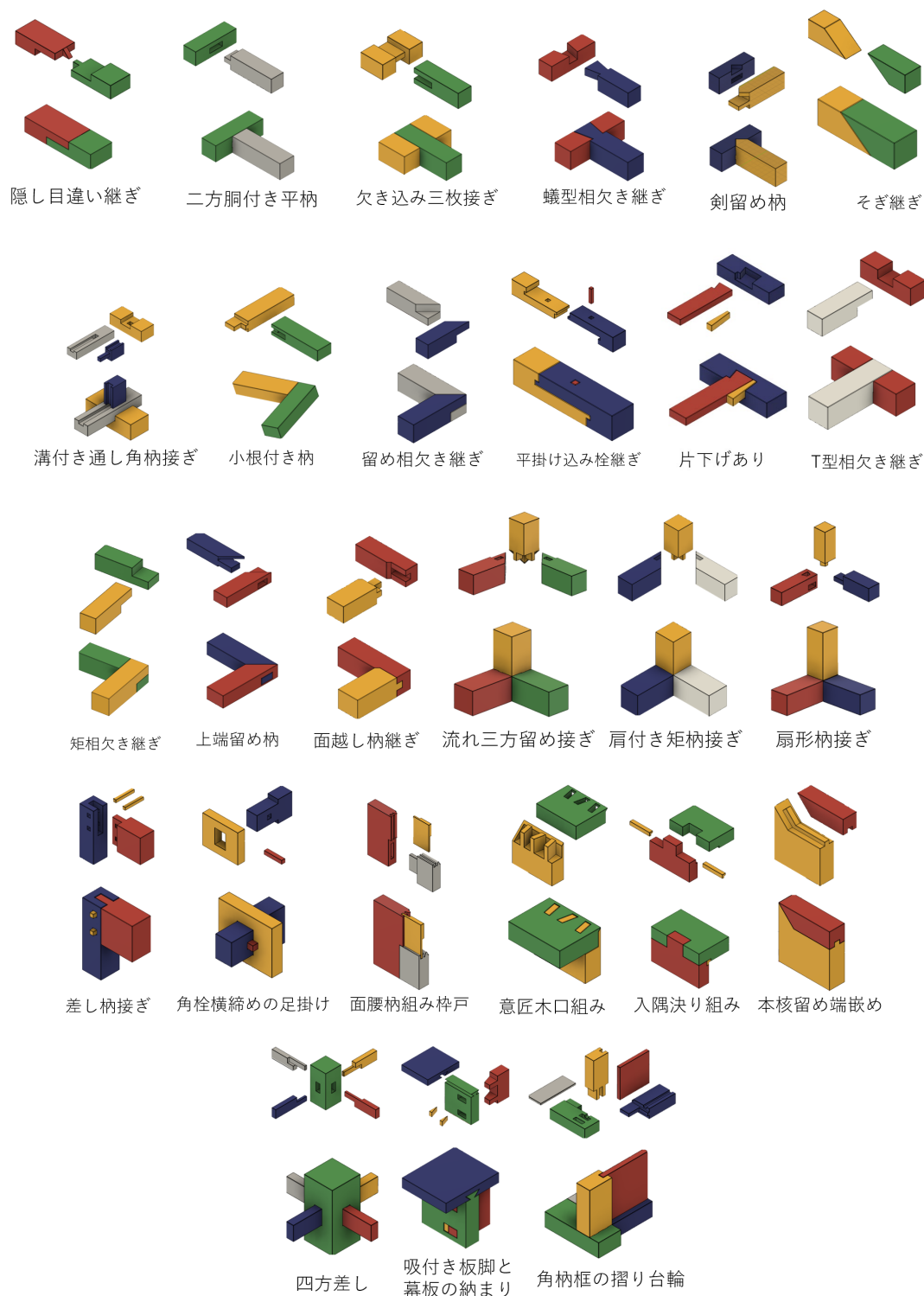
設計した形状データを3Dプリンタ(AFINIA H+1)で造形した。立体模型に使用したフィラメントはABS、積層ピッチは0.2 mm、密度は20%とした。

#### アニメーションの作成

アニメーションはFusion360のアニメーション機能を用いて作成した。これにより、継手や仕口の嵌め方、外し方が分かりやすくなった。

#### まとめ

本研究では合計27種類(継手3種類、仕口24種類)の設計を行い、立体模型を作製した。



### 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.

## 外形が立方体の回転式 3D ジグソーパズルの開発 III

齋藤玖恩<sup>1</sup>, 池上祐司<sup>2</sup>, 山澤建二<sup>2</sup>, 手嶋吉法<sup>1</sup>

<sup>1</sup>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

<sup>2</sup>理化学研究所 〒351-0198 埼玉県和光市広沢 2-1

## Development of a turn-style 3D jigsaw puzzle with cubic outer shape III

Kuon SAITO<sup>1</sup>, Yuji IKEGAMI<sup>2</sup>, Kenji YAMAZAWA<sup>2</sup> and Yoshinori TESHIMA<sup>1\*</sup>

<sup>1</sup>Department of Innovative Mechanical and Electronics Engineering, Faculty of Engineering, Chiba Institute of Technology, 2-17-1 Tsudanuma, Narashino, Chiba, 275-0016 Japan

<sup>2</sup>RIKEN, 2-1 Hirosawa, Wako, Saitama, 351-0198 Japan

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

**Abstract:** In previous study, we had developed a rotating 3D jigsaw puzzle with a cubic piece shape moving along a circular tenon, up to a size of  $3 \times 3 \times 3$ . In this study, we have successfully developed several rotating 3D jigsaw puzzles with a size of  $4 \times 4 \times 4$ , which has concentric triple circular tenons.

**Keywords:** 3D jigsaw puzzle, circular tenon, 3D printing,

### はじめに

2000年に池上によって開発された池上式 3D ジグソーパズル[1]は、ピース形状が立方体になっており、直線的なほぞに沿って動かすことで、ピースの脱着が可能になっている(図 1(左))。その後、円形のほぞに沿って動かすことでピースの脱着を行うことができる回転式 3D ジグソーパズルが開発された。図 1(中央)に 1 稜 2 分割の回転式 3D ジグソーパズル[2]、図 1(右)に 1 稜 3 分割の回転式 3D ジグソーパズル[3]を示す。本研究では、1 稜 4 分割の 3D ジグソーパズルの開発を行う。

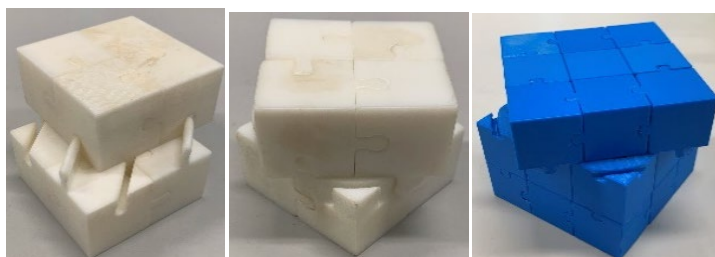


図 1 (左)1 稜 2 分割の直線スライド式 3D ジグソーパズル  
(中央) 1 稜 2 分割の回転式 3D ジグソーパズル[2]  
(右) 1 稜 3 分割の回転式 3D ジグソーパズル[3]

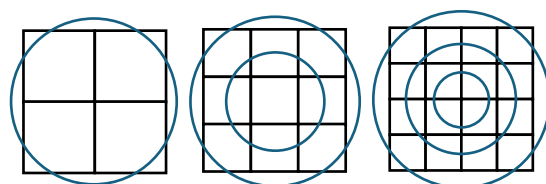


図 2 (左)1 稜 2 分割の円軌道[2]、  
(中央) 1 稜 3 分割の円軌道[3]、  
(右) 1 稜 4 分割の円軌道

### 1 稜 4 分割の回転式 3D ジグソーパズルの設計

回転式 3D ジグソーパズルでは、上段と下段を結合するために、接合面に全てのピースを通るような円軌道のほぞと溝が設けられている。図 2(左)に示すように 1 稜 2 分割で

の円軌道は1つであった。図2(中央)に示すように1稜3分割での円軌道は2つの同心円であった。2つの同心円の円軌道で1稜4分割の設計を行うと、円軌道が全てのピースを通らず、ほぞや溝が無いピースが生じてしまう為、ピース間の結合ができない。そこで本研究では、図2(右)に示すように3つの同心円の円軌道を用いることにより、この問題を解決した。

### 3種類の1稜4分割の回転式3Dジグソーパズル

本研究では1稜4分割の回転式3Dジグソーパズルを3種類開発した。最初に開発したタイプAは1稜3分割[3]を基に設計したものである(図3(左))。タイプBはタイプAを改良し、90度以上の回転を抑制したものである(図3(中央))。タイプCはタイプAを改良し、空隙を減らしたものである(図3(右))。



図3 (左)タイプA、(中央)タイプB、(右)タイプC

ほぞや溝をつけていない基準となる立方体の空隙率を0%とし、それぞれの体積と空隙率を表1にまとめた。

表1 1稜4分割の回転式3Dジグソーパズルの空隙率の比較

	体積(mm <sup>3</sup> )	空隙(mm <sup>3</sup> )	空隙率(%)
基準となる立方体	512000	0	0
タイプA	488886	23114	4.51
タイプB	468700	36200	7.17
タイプC	499542	12457	2.43

### まとめ

本研究では1稜4分割の回転式3Dジグソーパズルを3種類(タイプA、タイプB、タイプC)開発した。パズル内部に存在していた空隙を半減させることに成功した。

### 参考文献

- [1] Watanabe, Y., Ikegami, Y., Yamazawa, K., & Murakami, Y., World of Scientific Puzzle Art Using Layer Manufacturing, Forma, 21, 37-48 (2006).
- [2] 加藤、宮本、池上、山澤、手嶋、外形が立方体の回転式3Dジグソーパズルの開発、形の科学シンポジウム講演予稿集, Vol. 6, No. 1, pp. 1-2. (2021年6月)
- [3] 大山、池上、山澤、手嶋、外形が立方体の回転式3Dジグソーパズルの開発II、形の科学シンポジウム講演予稿集, Vol. 8, No. 1, pp. 31-32. (2023年6月)

# X線動力学回折におけるラウエとブラッグケースの分散面の形効果

根岸利一郎

科学リテラシー研究所, 366-0052 深谷市上柴町西 6-15-7

rikuway.negishi@gmail.com

## The effect of shapes on dispersion surfaces in cases of Laue and Bragg X-ray dynamical diffractions.

Riichirou Negishi

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

**Abstract:** Through the Laue and Bragg X-ray dynamical diffractions, the shape of dispersion surface appears similarly in both resonant scattering and asymmetric diffraction. The effects of X-ray diffraction can be understood by shapes of the dispersion surface.

**Keywords:** asymmetric diffraction, dispersion surface, Laue and Bragg cases, resonant scattering, X-ray dynamical diffractions

完全に近い結晶の多重散乱を対象とする X 線動力学回折理論には逆格子空間（波数空間）で議論するエwald-ラウエ流理論<sup>1)</sup>と実空間で議論する高木-トウパンの理論<sup>2)</sup>がある。この報告では結晶内電子密度の周期性と波数を扱うエwald-ラウエ流で議論する。目的は①連なりらせん数決定におけるフーリエ変換での波数空間と実空間の関連性を確認することと②共鳴散乱を伴う X 線動力学回折での分散面の有用性を示すことです。

### 1. なぜ分散面か

入射波に対して回折波が1つあって、1種類の格子面だけが回折に関わり、実験条件を満たした多くの実験結果を説明できる2波近似とその説明に都合の良い逆格子空間の分散面を扱う。

図1(a)(b)はエwaldの提唱した作図法で回折条件が満たされた場合を示す。このときエwald球上に逆格子点 H と逆格子原点 O がのる。実空間での回折は波数空間では方位が保存される。

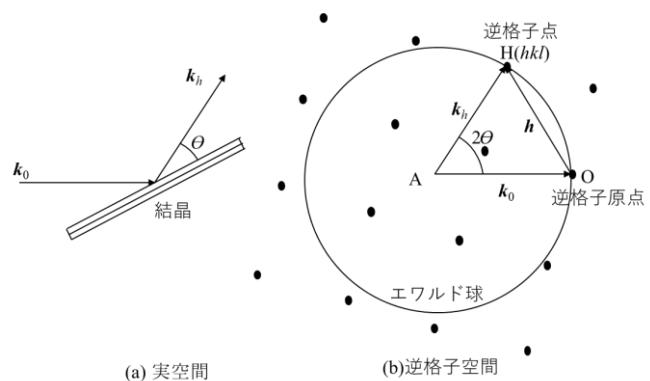


図1. 回折条件を満たしたときの実空間と逆格子空間の様子

### 2. 吸収を考慮した分散面と回折

多くの分散面は結晶による X 線吸収の少ない領域で検討されてきた<sup>3)</sup>が、吸収が支配的領域での分散面は吸収の少ない領域のそれとは大きく異なる<sup>4)</sup>。図2は対称回折で,(a)はラウエの場合(逆格子点透過側, 以後LC)の吸収が支配的なき、(b)は吸収がほとんどないときの分散面を示す。実線が実数部、破線が虚数部を、 $w$ はブラッグ角からのはずれを示す。(c)は吸収が少ないときのブラッグの場合(逆格子点入射側, 以後BC)の分散面で(a)と良く似ている。発散点  $A^{(1)}$ ,  $A^{(2)}$ から逆格子点への矢印が波の方位を、 $A'$ の軸からの距離が吸収への依存性を示す。

この分散面の形が回折強度曲線に反映する。例として閃亜鉛鉱構造の GaAs の 200 回折を利用したとき、X 線のエネルギーが 11343eV で共鳴散乱による吸収が非常に強くなり、その LC の回折強度曲線が図3(a)となり、吸収のほとんどない 10364eV のときの曲線が(b)となる。(c)は吸収がほとんどないときの BC の曲線を示す。(a)と(c)は X 線の吸収が全く異なるにもかかわらず

らず似た分散面の形を反映して回折波の強度曲線も似ている。

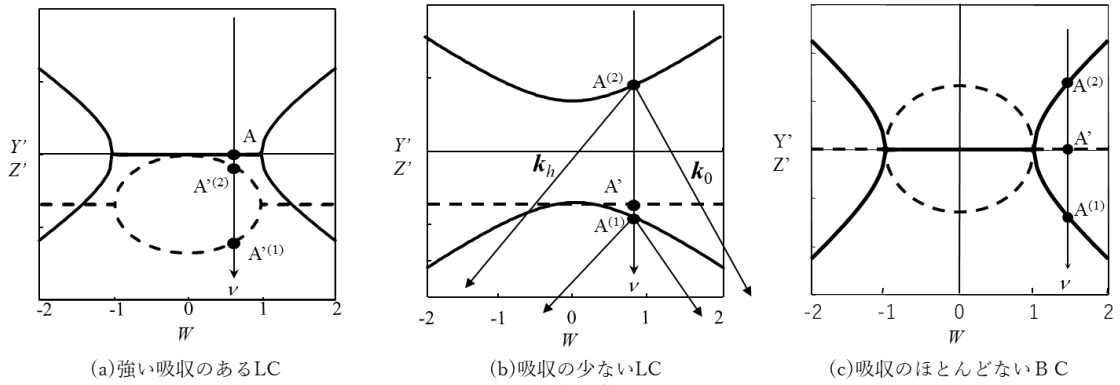


図2. ラウエとブラッグの場合の特徴的な対称回折の分散面

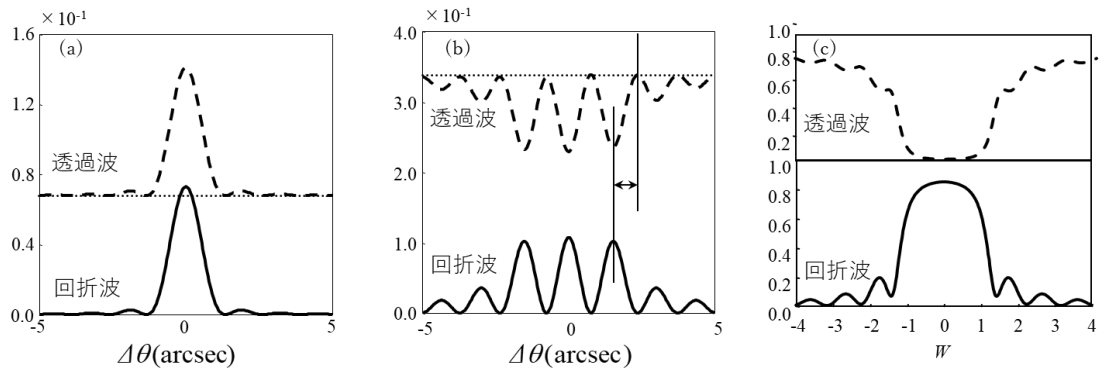


図3. 図2の分散面それぞれに対応する回折強度曲線

### 3. 非対称回折の分散面

図4は吸収のある非対称回折の分散面であり、(a)は非対称因子  $a=5$  のLC、(b)が  $a=0.2$  のBCを示す。 $a$ は格子面と結晶面の傾きの程度を示す因子。両者は似た形を示し、それは回折強度曲線に反映される。非対称回折での分散面については坂<sup>5)</sup>が実数部を検討している。

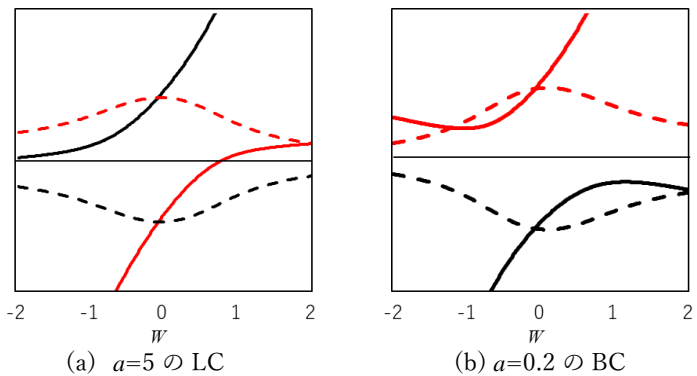


図4. 吸収の少ない非対称回折での分散面

### 4. まとめ

逆格子空間での分散面の形は回折強度曲線の全体イメージと実空間での回折の理解に役立つ。当日は非対称回折の実現できる条件などの検討結果も議論する。

### 文献

- 1) Ewald, Paul Peter (1917); Ann. Phys. **359**, 519.  
Laue, Max von (1931); Ergebnisse der Exakt Naturwiss. **10**, 133.
- 2) 沖津康平 (2023); 東京学芸大学での「物理数学」講義録にある解説,  
<http://www.webpark1275.sakura.ne.jp/DynamicalTheory/>
- 3) Authier, André(2001); “Dynamical Theory of X-ray Diffraction”, Oxford University Press.  
菊田惺志 (2011); 「X線散乱と放射光科学」基礎編, 東京大学出版会.
- 4) Negishi, Riichirou(1998); Thesis, University of Tokyo.
- 5) Saka, Takashi(2018); Acta Cryst. **A74**, 586.



## 量子時空の形

佐藤勇貴

福井大学学術研究院工学系部門 知能システム工学講座, 〒910-8507 福井県福井市文京 3-9-1

名古屋大学 理学部物理学教室, 〒464-8602 愛知県名古屋市千種区不老町

yukisato@u-fukui.ac.jp

ysato@th.phys.nagoya-u.ac.jp

## Forms of quantum spacetime

Yuki Sato

Department of Human and Artificial Intelligent Systems, Graduate School of Engineering,

University of Fukui, 3-9-1 Bunkyo, Fukui-shi, Fukui 910-8507, Japan

Department of Physics, Nagoya University, Chikusaku, Nagoya 464-8602, Japan

**Abstract:** According to Einstein's general theory of relativity, spacetime is a dynamical entity and changes its form. In this talk I wish to introduce various interesting forms of spacetime induced in particular by effects of quantum mechanics, share some ideas in this field and discuss possible future directions.

**Keywords:** dynamical triangulations, fractals, wormholes, self-organization, quantum criticality

### 1. 導入

現代物理学における時間と空間はそれぞれ異なる独立した存在ではなく、混ざり合い変化し得る存在である。そのためそれらをまとめて時空と呼称し、時空の取り得る形状について盛んに議論がなされている。ブラックホールと呼ばれる特異な時空構造はその一例であり、その劇的な形状の変化は極めて高密度に圧縮された物質により引き起こされる。このように時空形状は、時空に存在する様々な物質やエネルギーにより変化するというのが時空の理論である一般相対性理論の主張である。

一方で物質は本質的には量子力学と呼ばれる一般相対性理論とは異なる理論で正確に記述できることが知られている。そのため時空も量子力学的効果を受け、一般相対性理論では記述できない形状を示すことが予想される。しかし、一般相対性理論と量子力学を両立させた理論は未完成であり、そのため量子力学的効果を受けた時空である量子時空の形を議論することは困難である。ただ候補となる理論がいくつか存在し、各々の妥当性について理論研究がなされている。講演者は候補の内、時空を単体で離散化する手法である力学的単体分割を用いて量子時空の形やその性質について研究を行っている。

## 2. 力学的単体分割

力学的単体分割は自己組織化により量子時空を生成する理論であり、特にモンテカルロ法を用いた数値計算による研究が盛んになされている。特に因果律を取り入れた最新の研究成果は[1]にまとめられている。

時空の次元を4次元から2次元に落とし簡略化した力学的単体分割のモデルは、多くの場合モンテカルロ法に頼らずに解析計算が可能であり、厳密な議論を展開することが出来る。講演者は共同研究者と共にこの2次元力学的単体分割によって生成される様々な量子時空の形状を研究してきた。本講演では特に、量子力学的にワームホールと呼ばれる時空構造の生成を許した場合に何が起こるか[2],[3]、時空（正確には空間）の量子力学的効果を利用した量子臨界現象[4],[5]などについて時空の形に注目して紹介する。

## 5. 今後の発展

量子時空を記述する理論の候補が様々存在する中で、そのいくつかの理論に共通した量子時空の性質が存在する。特に形に関する性質を挙げると、量子時空はフラクタルと呼ばれる複雑な形状をとることが知られている（例えば[6],[7]）。この点に注目し、今後の発展について議論する。

## 参考文献

- [1] J. Ambjørn, R. Loll, “Causal Dynamical Triangulations: Gateway to Nonperturbative Quantum Gravity,” arXiv:2401.09399 [hep-th].
- [2] J. Ambjørn, Y. Sato, Y. Watabiki, “Wormholes, a fluctuating cosmological constant and the Coleman mechanism,” Phys. Lett. B 815 (2021).
- [3] J. Ambjørn, Y. Hiraga, Y. Ito, Y. Sato, “Wormholes in 2d Horřava-Lifshitz quantum gravity,” Phys. Lett. B 816 (2021).
- [4] Y. Sato, T. Tanaka, “Criticality at absolute zero from Ising model on two-dimensional dynamical triangulations,” Phys. Rev. D 98 (2018).
- [5] J. Ambjørn, Y. Sato, T. Tanaka, “Towards elucidation of zero-temperature criticality of the Ising model on 2D dynamical triangulations,” Phys. Rev. D 101 (2020).
- [6] J. Ambjørn, J. Jurkiewicz, R. Loll, “The Spectral Dimension of the Universe is Scale Dependent,” Phys. Rev. Lett. 95 (2005).
- [7] O. Lauscher, M. Reuter, “Fractal spacetime structure in asymptotically safe gravity,” JHEP, Vol 2005, JHEP10(2005).

## 天体観測に基づくカッシーニの世界地図(1696)

杉本 剛

神奈川大学、横浜市神奈川区六角橋 3-27-1

sugimt01@kanagawa-u.ac.jp

### Astronomical-Observation Based Cassini's Map of the World (1696)

Takeshi Sugimoto

Kanagawa University, 3-27-1 Rokkakubashi, Kanagawa Ward, Yokohama

**Abstract:** Italian astronomer Giovanni Domenico Cassini aka Jean-Dominique Cassini is the first director and founder of the Paris Observatory. Cassini was not only an astronomy but a surveyor. He had drawn a single-lobe planisphere of the world on the floor of the Paris observatory. That is his answer to the longitude problem. He made use of eclipses about satellites of Jupiter. He had raised his offspring in astronomy and land survey as well as G. Delisle in cartography.

**Keywords:** Era of Exploration, Cartography, Longitude Problem, Azimuthal Equidistant Projection, Satellites of Jupiter

#### 1. いとぐち

初代パリ天文台長 Geovanni Domenico Cassini aka Jean-Dominique Cassini (1625-1712)は、イタリア人だ。ポローニャ共和国のイエズス会コレジオで教育を受けたが、会士ではない。フランス国王ルイ十四世と財相 J. B. コルベールのときにセットアップが始まり、設立のため初代台長としてカッシーニに白羽の矢が当たった。彼は、1669 年にポローニャを発ち、1671 年に天文台を立ち上げた。彼の息子・孫・曾孫までの 4 代続けて台長を一族で務めた。

#### 2. 経度決定問題下の測量学

##### 2.1 木星の衛星食による経度決定法の推進

大航海時代に、経度の決定は未解決の大問題だった。精度の良い船酔いしない時計があれば解決するのだが、それは 18 世紀後半まで待たねばならない難題だった。

木星の衛星食を時計代わりに使って経度を計ろうというのは、衛星を発見した G. ガリレイのアイデアだが、ケプラーの三法則を信じないガリレイに明日はない。カッシーニはポローニャを発つ前年には、精度の良い木星の衛星食予報を発表できるまでになっていた。後は、あちこちの天文家有志を募って、あちこちの経度を割り出すだけだ。

##### 2.2 ひとまるの世界地図で経度は一目瞭然

国連の旗に使われている Azimuthal Equidistant Projection (正距方位図法) を使えば、世界地図をひとまるで描ける。大カッシーニは、1679 年から 1690 年にかけて精査した経度の値に基づき、天文台 3 階床に直径 7.2m の世界地図を描いた。摩耗が進んだので、息子の Jacques (1677-1756) が 22inch 四方の縮図を描き起こし、地図師の J.B. Nolin (c1657-1708) が銅板に削り出した(Fig. 1)。このノラン、後に大カッシーニ周辺で悶着を起こす。

##### 2.3 弟子の育成と知己の間での知的財産権争い

大カッシーニが、愛息を天文学者に育てたのと言うまでもないが、孫の顔を見ることはかなわなかった。1690 年代に、独習の若い地図師 Guillaume Delisle (1675-1726) に世界の地



Figure 1. Cassini's World Map of Single-Lobed Planisphere  
The map is designed by azimuthal equidistant projection (1696).

図情報を授けたのは大カッシーニだ。後に、科学アカデミー会員、王室第一地理師となる。カッシーニならではのイエズス会情報、R. ダドレイの伊文「海の神秘」、初代平戸オランダ商館長 F. カロンの仏訳「日本大王国志」などで極東情報を大カッシーニはドリルに授けた。

残念なことに、大カッシーニ知己のドリルとノランの間に世界地図の著作権問題が起こる。ドリルが首相のために作った世界地図手稿(1699)を、ノランが剽窃して印刷公表した(1700)という。ドリルは急遽自作を印刷公表する(1700)とともに科学アカデミーの学術誌で公開質問を開始した。後に、法廷闘争にまで発展し、6年もかかったが、ドリルの主張は認められた。地図情報は、まだまだ機密なのであった。

### 3. むすび

Figure 2 にカッシーニ一族によるフランス全土図を示す。主だったフランス各所の経度計測を済ませた大カッシーニは、局所を三角測量で調べて地図を作成していく。初代 Jean-Dominique(1625-1712)→Jacque(1677-1756)→César-François(1714-1784)→二代目 J-D(1748-1845)と4代が力を合わせて、フランス全土の地図を作成した。1750年に最初の地図が印刷公表され、182枚すべてが揃ったのは1815年のことだ。天文学者の所為でフランスは小さくなったと王が嘆いたという(笑)。

イエズス会のコレジオで学問を修め、異国の地で近代天文学の礎(天文台)を築き、木星の衛星食をツールに経度問題を解き、世界地図からフランス全土図までを展開したカッシーニは偉人だ。

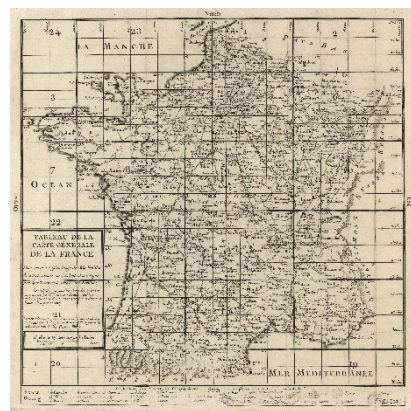


Figure 2. Map of France

## 空圧駆動に基づく幾何学形状可変性グリッパーやリング構造の構築

○遠藤 洋史<sup>1,2</sup>・本多 佑希<sup>2</sup>・守川 和馬<sup>2</sup>

富山県立大学工学部<sup>1</sup>，大学院工学研究科<sup>2</sup>・〒939-0398 富山県射水市黒河  
5180

endo@pu-toyama.ac.jp

### Geometric Pneumatic Deformation of Kirigami-shaped Soft Gripper and Ring-shaped Auxetic Structures

Hiroshi ENDO, Yuki HONDA, Kazuma MORIKAWA

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

**Abstract:** The fabrication of shape-changing structures has been positioned as a core seed for future technologies that will contribute to the development of aeronautics and minimally invasive surgery. In particular, the use of soft gels and elastomers can be expected to enable rapid and diverse shape deformation. Furthermore, it is possible to dynamically control the deformation from a two-dimensional sheet to a three-dimensional structure by introducing air. It has been reported that, for example, a camouflage structure by pneumatic control inspired by the skin deformation of an octopus, and a Gaussian surface that can be freely deformed by devising a flow pattern. In this study, we fabricated a structure with auxetic ring structural deformation and soft gripper using a 3D printer and investigated the mechanical 3D deformation.

**Keywords:** Soft robot, Soft gripper, Kirigami, Auxetic structure, Pneumatic control

【緒言】ゲルやエラストマーといった柔らかい高分子材料を採用したソフトロボットは、小型・軽量・静音であることなど様々な利点を有している。ソフトロボットの駆動源は様々提案されているが、近年では空気圧で駆動するバイオメタリック系構造体が注目されている。従来のロボットのモーターが金属製に制限されているのに対し、柔らかいロボットには強度と柔軟性を兼ね備えることができる。

この柔軟構造で構成されたソフトロボットの一種としてソフトグリッパーやソフトハンドが注目されている。対象物の把持や搬送を行う産業用ロボットの先端部(エンドエフェクタ)はグリッパーと呼ばれ、複数搭載することにより多様な作業を行うことで知られている。ソフトグリッパーには接触面積や力学特性に加え、高い曲率で大きく変形することも重要となる。また Kirigami(切り紙)構造は、材料の力学的特性を大きく変化させ柔軟な変形を与える幾何学ツールとして注目されており、再構成可能な構造部材となり得る。

一方、Auxetic 構造とは負のポアソン比を有しており、一方向に伸長・圧縮させると、それに起因して内部構造が変形することで直交方向にも拡大・圧縮される構造のことを指す。当研究室でもこれまでに、Auxetic 構造を外骨格様のアーマードと見立て、ベローズ型チューブ周囲に一体化したシリンダー設計を行い、空圧駆動による変形特性と歩行性能を検討してきた[1]。

上記を踏まえ、本発表では、(1) 切り紙グリッパー：アームを取って拘束する発想のもと、ベローズ由来の一次元構造に限定されたアクチュエータ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(物体把持)の検証を概説する. また(2) **Auxetic リング構造**: ベローズチューブ周囲に Auxetic 構造をリング状に配置し, スポーク様にチューブ両端に固定した. 空気注入に伴うチューブの一次元拡張に同期したリング変形挙動を検証することにより, 形状可変性を有する次世代タイヤホイール設計に向けた指針を概説する.

【切り紙グリッパー設計】 構造体作製には光造形(SLA)方式の 3D プリンタを使用した. またレジンには Elastic 50A を使用した. 本レジンはショアデュロメータ 50A の硬度をもつアクリレート系素材であり, ヤング率に換算すると PDMS と同等の約 2.2 MPa である. これまでのアームは全て半ベローズアームを採用していた. 天板の形状に加え, より湾曲性の高いアーム自身の改良も必要となる. そこで矩形アーム体に替えて動作検証を行った. 期待通りに, より湾曲することが確認された. 半ベローズアームの場合では, 空気注入に伴い蛇腹三角部が直線的に変形する. 一方, 矩形アームの場合では矩形間隔があるために, 膨潤して変形する余裕があることに起因していると考えられる.

新たに 4 本のアームから成る矩形アーム体を作製した (Fig.1 (a)). 矩形アーム 1 本の全長は 58 mm, 幅が 8 mm で縦横 5 mm×4 mm, 肉厚 1mm の矩形が並んでいる. V 字型天板は全ての辺が屈曲している設計とした. また V 字角度は 120 度に設定した. この V 字型天板に, さらにエコフレックスから成る切り紙天板を接着した (Fig.1 (b)). 切り紙天板体は軽量のサンプル蓋程度であれば把持できることが確認された.

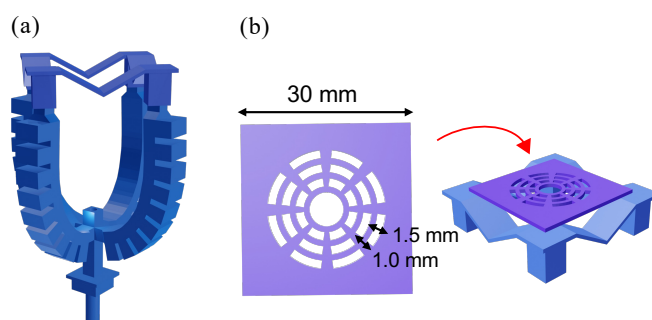


Fig.1 Schematic illustration of (a) bellows-typed and (b) rectangular-typed 3-armed structure with V frame.

【Auxetic リング構造設計】 Auxetic リング体の単位セル, 側面図, 正面図, そして全体像を Fig.2 に示す. 単位セル構造にはリエントラントハニカム構造(縦横: 8.0 mm×8.0 mm, 幅: 2.0 mm)を採用し, 空気注入用の中央ベローズチューブ周囲に 8 個配置した 8 面体構造とした. ベローズ長: 27 mm, 直径: 4.5 mm を基準とし, 長さや直径を適宜変え, 流速 4 L/min にて空気注入に伴う変形挙動を観察した. 併せて四角リング体(セル構造が 8.0 mm×8.0 mm の正方形)や並列体からも比較した. 空気注入-吸引により, 初期状態の 8 面体から 16 面体へ構造変換されていることが確認された.

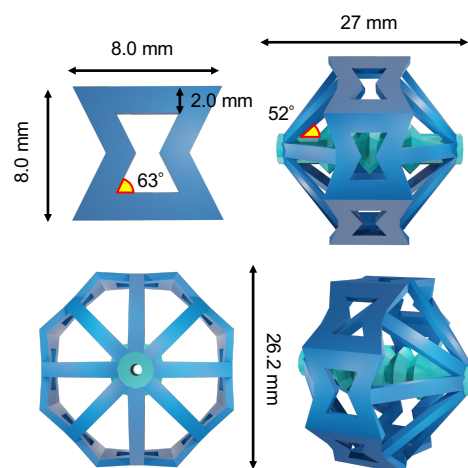


Fig.2 Schematic illustration of 8×8 auxetic ring structures.

#### 【参考文献】

[1] 遠藤洋史「Auxetic構造を取り入れたソフトロボティクス設計」第94回形の科学シンポジウム講演予稿集, pp.49-50(2023).

【謝辞】 本研究の一部は JSPS 科研費(23H01700, 23K26393)からの援助により実施した.

## ペースト状人工骨の数理 ～材料特性が導く形態と機能, その予測へ～

市田 優

関西学院大学理学部数理科学科, 兵庫県三田市学園上ヶ原 1 番

ichidayu@kwansei.ac.jp

## Mathematical model of paste-like artificial bone ～Form, Function and Prediction of the Material Properties～

Yu ICHIDA

Kwansei Gakuin University, 1 Gakuen Uegahara, Sanda, Hyogo, Japan

**Abstract:** Calcium-phosphate cement (CPC) pastes are widely used as bone fillers due to their biocompatible. However, the potential for fractures due to the formation of voids and cracks in the CPC, called “fragmentation”, reduces the biomechanical strength of CPCs. There is need to develop CPC pastes that demonstrate the non-fragmentation performance. Aizawa and his group [1] previously developed a novel CPC using IP6 as a chelating agent. It shows non-fragmentation when IP6 is present and fragmentation in the case of water (without IP6). Why is it non-fragmentation in IP6? What is the mechanism? It is not solved in biomaterials. Therefore, we aim to solve these questions from the perspective of mathematical modeling. In this talk, we report our mathematical model and its simulation.

**Keywords:** injectable calcium-phosphate cement, mathematical model

### 1. はじめに

本講演では、ペースト状人工骨の材料特性（ここでは non-fragmentation 性能に焦点をあてる）とペーストの硬化挙動に関する 1 つの示唆を数学の視点から報告する。これは先行研究[1]で得られた結果を動機として、現象を数式で表現した数理モデル（ここでは反応拡散方程式と呼ばれる微分方程式の一種）と呼ばれるものを[1]とは異なる視点での追加実験結果と整合するように構築して数値シミュレーションを行ったことで得られる。本講演では、研究の背景、数理モデル、数値シミュレーション結果、数理との融合から導かれる材料特性の形態と機能に関する新たな示唆を報告するとともに、予測と制御という観点から新たな材料開発への期待についても報告したい。本講演は、相澤守氏（明治大学応用化学科）とその学生、矢崎成俊氏（明治大学数学科）、坂元孝志氏（明治大学数学科）との共同研究[2]に基づく。

### 2. 研究の背景

リン酸カルシウムセメント (CPC) ペーストは骨補填剤に使用されており、患者の低侵襲治療を実現する人工骨として期待されている。患者に注入可能な CPC ペーストについて、最終的に求められる材料特性（例えば、硬化時間・強度など）をどのように持たせ、そして

どれだけ有するか評価することが重要な課題とされている。ここでは、求められる性能の1つである non-fragmentation 能に着目する。先行研究[1]に則って、a)固まった後に CPC が塊とならないこと、b)固まっている最中に CPC に亀裂や空隙が発生すること、を fragmentation と本研究では定義し、この対のことを non-fragmentation と呼ぶことにする。先行研究[1]においてイノシトールリン酸（以下、IP6）をキレート剤として用いた新たな CPC ペーストの開発と non-fragmentation 能を非破壊的に評価する方法を確立しており、IP6 を十分に含むペーストは non-fragmentation 能を示し、逆にそれを含まない water タイプでは fragmentation を示すことが報告されている。

### 3. 問題設定

この結果より、材料開発の観点から IP6 が優れていることがわかるが、根本的な問題として「なぜ IP6 を十分に含む方のみ non-fragmentation を有するのか」という疑問が生じる。この疑問に答えることは硬化の過程で IP6 を含めたことで何が起きているのかを明らかにすることに対応する。しかしながら、現状実験的に明らかにすることが難しいとされている。そこで、数学の視点・数学の言葉によって、この問題の解決を与えることが本研究の動機である。ここでいう数学の言葉が数理モデルであり、その解析と結果の検証というステップを踏むことに対応する。本研究では、ペーストの硬化に対応する原理や法則から数理モデルを導出することが困難であるため、現象論的な議論から数理モデルとして反応拡散方程式をベースとして方程式系を立式する。そして、その妥当性を与えるべく、バイオマテリアル分野と協働して数理モデル構築のための新たな追加実験を行っている。

### 4. おわりに

本研究で構築した数理モデルはシンプルなアレン・カーン方程式と呼ばれる反応拡散方程式の中でも典型的な方程式をベースとしたものである。しかし、上記で述べたような追加実験から導かれる時間依存する拡散係数の存在など、数学の新規理論展開を促すような特徴をも持つものである。複雑な現象から本質を抜き出し、シンプルな方程式に特徴的な項を加えることで複雑な現象の豊かさを表現することは上記の疑問に答えるだけではなく、新規材料開発を促すものとなる。本研究における数理モデルの詳細とそのシミュレーション結果、上記の疑問への1つの答えについては講演時に述べる。

#### 【参考文献】

- [1] K. Nagata, K. Fujioka, T. Konishi, M. Honda, M. Nagaya, H. Nagashima, and M. Aizawa, *J. Ceram. Soc. Jpn.*, 125, 1–6 (2017).
- [2] Y. Ichida, R. Yamada, S. Kato, Y. Kamaya, M. Kosuge, M. Aizawa, T. Sakamoto, S. Yazaki, A simple mathematical model for evaluation of non-fragmentation property of injectable calcium-phosphate cement, in preparation.



## 円筒試験片の実験モード解析

長尾祐太\*<sup>1</sup>、手嶋吉法\*<sup>2</sup>

千葉工業大学大学院工学研究科機械電子創成工学専攻、〒275-0016 千葉県習志野市津田沼 2-17-1

\*<sup>1</sup>s20A2098TY@s.chibakoudai.jp

\*<sup>2</sup>yoshinori.teshima@it-chiba.ac.jp

### Experimental mode analysis for the cylindrical specimens

Yuta NAGAO and Yoshinori TESHIMA

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

**Abstract:** We have investigated the vibration characteristics of cylindrical specimens. The investigation method is as follows. We conducted a vibration experiment for cylindrical specimens, and then used MEscope for experimental mode analysis of the data obtained from the experiment. In MEscope, we calculated the eigenfrequencies and visualized the deformed shape of each eigenmode. There were two eigenmodes which could not be visualized by using MEscope. A simulation by Ansys Mechanical suggested that the eigenmodes were a torsion mode and a stretch mode.

**Keywords:** cylindrical specimen, experimental mode analysis, bending mode, torsion mode, stretch mode

### 1. はじめに

近年、機械構造は複雑化し、高機能化している。回転運動や往復運動を伴う機械も多く、そのような製品では振動による疲労や破壊などの問題に対処する必要がある。中でも、円筒は機械部品の形状として頻繁に使用されるため、振動特性の詳細な把握が必要である。そこで我々の研究グループでは、円筒形状の振動特性[1]について実験モード解析(MEscopeを利用)およびシミュレーション解析(Ansys Mechanicalを利用)によって調査を行っている。

### 2. 実験方法

全長 700 mm のアルミ製円筒試験片上に 21 箇所に加振点を定め、インパルスハンマで打撃することで生じた振動を計測した。

### 3. 実験結果

加振実験から得られたデータに対して実験モード解析を行い、周波数応答関数のグラフ(図 1)を得た。グラフにおいてピークが現れている箇所は、円筒試験片の固有振動数(共振周波数)を示している。また、物体のモード(変形形状)を動画により確認した(図 2)。図 1 の 4 つのピーク(367 Hz, 994

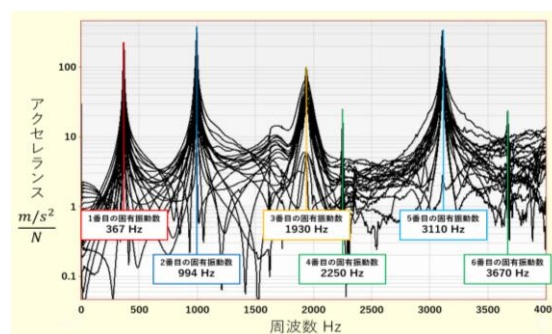


図 1 周波数応答関数のグラフ(中実丸棒 φ40)

Hz, 1930 Hz, 3110 Hz)で曲げモードが確認された。非曲げモード(図3および図4)については、どのようなモードであるのかMEscopeの動画では特定できなかった。

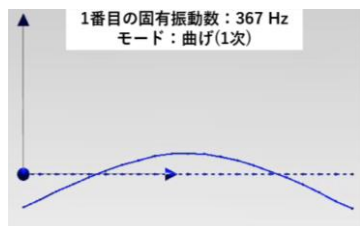


図2 曲げモード (367 Hz)

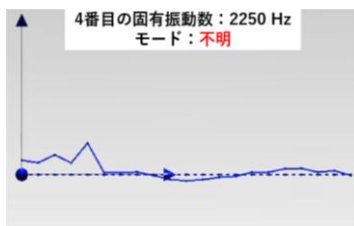


図3 非曲げモード (2250 Hz)

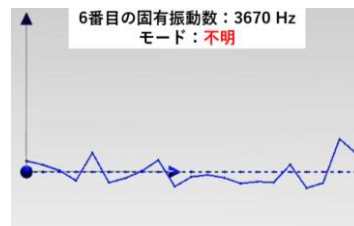


図4 非曲げモード (3670 Hz)

#### 4. シミュレーション解析

次に、Ansys Mechanicalを使用したシミュレーション解析を行ったところ、曲げモード(図5)に加え、ねじれモード(図6)と伸縮モード(図7)が確認された。

実験結果とシミュレーション結果を対応させると、両者の固有振動数は近い値となっていた(表1)。したがって、実験における4番目の固有振動数のモードはねじれ、6番目の固有振動数のモードは伸縮であると推測できる。

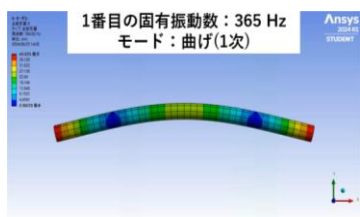


図5 曲げモード (365 Hz)

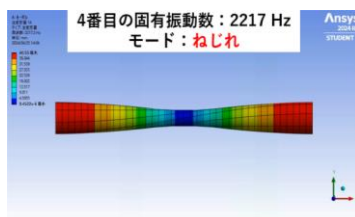


図6 ねじれモード (2217 Hz)

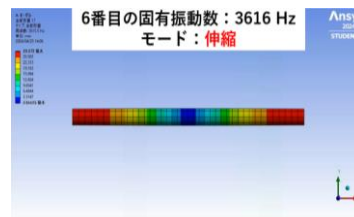


図7 伸縮モード (3616 Hz)

表1 実験とシミュレーションにおける固有振動数[Hz]とモード(中実丸棒 φ40)

固有振動数 解析ソフト	1番目	2番目	3番目	4番目	5番目	6番目
MEscope (実験) モード	367 曲げ(1次)	994 曲げ(2次)	1930 曲げ(3次)	2250 不明	3110 曲げ(4次)	3670 不明
Ansys Mechanical (シミュレーション) モード	365 曲げ(1次)	990 曲げ(2次)	1900 曲げ(3次)	2217 ねじれ	3058 曲げ(4次)	3616 伸縮

#### 5. まとめ

円筒試験片に対する加振実験およびMEscopeを用いた実験モード解析を行い、円筒試験片の固有振動数および、各固有振動数におけるモードの可視化を行った。実験で特定できなかった非曲げモードは、シミュレーション解析の結果から、ねじれモードと伸縮モードであると考えられる。

#### 参考文献

[1] 田口悠樹, 手嶋吉法、「仕切りを有する円筒形状試験片の周波数応答関数について」、形の科学シンポジウム講演予稿集 Vol. 7 No. 1 (2022年6月) p. 54-55

# 折り紙における不動点とその軌跡

海野啓明

仙台高等専門学校 (名誉教授)

keimei.kaino@gmail.com

## Fixed point of Origami and its locus during Origami folding

KAINO, Keimei

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

**Abstract:** Brouwer’s fixed point theorem says that “Take two pieces of paper, scrunch one up and place it beneath the original, so that no part extends beyond, then at least one point in the scrunched-up paper is directly below its original position”. [1] Taken two pieces of origami paper, we can find a fixed point in a paper randomly placed on the original paper by Nishiyama’s theorem. We will observe how the fixed point moves in the original paper during folding the other paper under the condition that no part extends beyond.

**Keywords:** Origami, fixed point, locus.

### 1. はじめに

「ブラウアーの不動点定理によれば、幾何学形状に、適切な条件での変形である限りどのような変形を行なっても、少なくとも1点だけは移動しない」(図1)と文献1の「不動点定理」の項目に書かれている。WIKIPEDIAの項目<<Brouwer fixed-point theorem>>の”Intuitive approach”の節にBrouwerが観察した例としてコーヒーカップの砂糖を混ぜて溶かす例が挙げられ、続く節には紙を丸めてから平面状にする例と紐を折りたたんでから直線状にする例が挙げられている [2]。これらの例では不動点があることは直観的に明らかのようなのであるが、実際に折り紙を用いて確かめることは教育的にも意味がある。2枚の折り紙を用いて、一方を机の上に固定し、他方を回転してから2枚重ねた時に不動点を見つける問題は、西山による作図法によって簡単に解かれる(図2) [3]。また、折る途中では紙を机の上から持ち上げるので、これを机の上に投影したものを考えればアフィン変換における不動点を見つける問題になるが、この場合の作図法も知られている。はじめに紐を折る場合を調べ、次に折り紙を折る場合を調べる。

### 2. 紐と折り紙の折りたたみの線形変換の性質

(i) 折りたたみの過程では対象物を引き裂いたり互いに交差させない。(ii) 2個の物のうち一方は固定し、他方は変換後に2個を重ねる時に、固定した物からはみ出させない。これらは、写像  $f$  が線形で連続であり、固定した領域を  $D$  として  $f(D) \subset D$  と表される [2]。

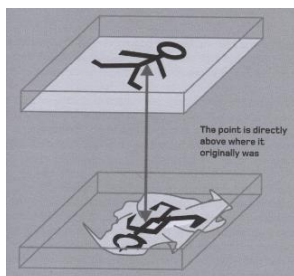
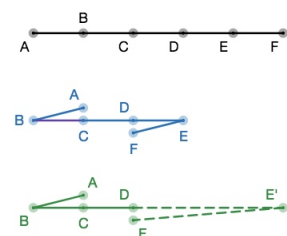


図1 不動点定理[1]

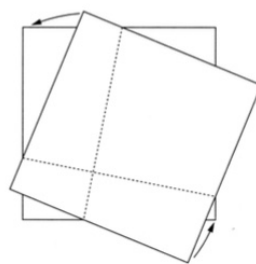


図2 2直線の交点としての不動点[3]

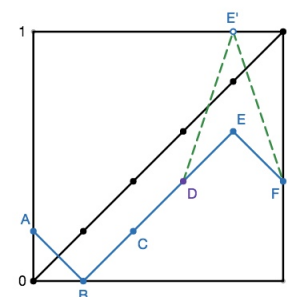


図3 紐の折りたたみと不動点

### 3. 紐の折りたたみと不動点

単位長さの紐を2本とり、一方の紐を直線状に置き(図3一番上の紐), 他方の紐を折りたたむ(図3上から2番, 3番目の紐). 簡単のため紐を5つの等しい長さの辺に分け, 各辺は変形せずに, 辺同士をつなぐ節点で曲がるものとする. 図3上から2番目のように, 節点BとEで紐を折りたたむ時, 写像  $f$  は下の図の実線で表される. 写像の傾きは1か-1となるので,  $f(x) = x$  の交点, すなわち不動点は1個しかない. ここで, 上から3番目のように, 節点DとFを固定したまま, Eを右端まで伸ばすならば, 写像は波線のように変わるので不動点は3個生じる.

### 4. 折り紙の折りたたみと不動点の軌跡

表裏がある2枚の折り紙を, 共に表を上にして机の上に重ねて置き, 一方を固定して, 他方を変換(回転, 鏡映, 並進)する. **性質:** (1) 折り紙を折り線を使って平らに折りたたむとき表と裏が入れ替わるが, これは鏡映変換とみなせる. (2) 折りたたんだ時に重なり順序が生じる. (3) 不動点を持つ等長変換は回転か鏡映であり, 不動点を持たない等長変換は並進か並進鏡映である [5]. **不動点の軌跡:** (I) 正方形ABCDを回転したものをA'B'C'D'とする(図4参照). 簡単のため, 点B'とC'はそれぞれ辺ABとBC上にあるとする. このとき不動点は直線PQとRSの交点Oとなる[3]. (II) 辺A'D'とB'C'の中点をそれぞれMとNとする. 折り線MNによりA'B'C'D'をブック折りして, C'D'MNをB'A'MNにぴったり重ねるとき, 不動点Oは消滅する. 点D'とC'はそれぞれD''とC''に移るとする. ここで, 正方形A'B'C'D'を軸MNにより180°回転(鏡映)したものをA''B''C''D'''とすると, この回転の過程で不動点Oが直線OS上でO\*を通り左方に限りなく移動する. (III) ABCDの領域からはみ出した部分EFMA'とEFMD''を折り線EFで折り曲げてEFN C''の上に重ねるとき, 不動点O'''は図4の2本の点線の交点としてEFM'D'''の中に生じる.

2と3の実験により, 元の領域をDとし, 折り紙の写像を  $f$  とするとき  $f(D) \subset D$  ならば不動点が1個あること, 紙の伸びを考慮すると不動点が複数個生じることが確かめられた.

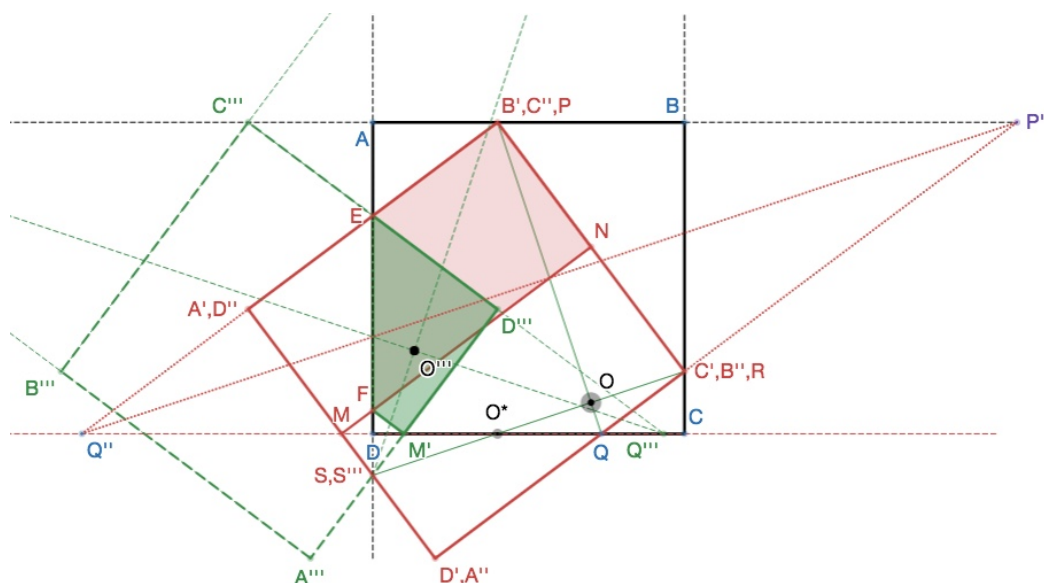


図4 折り紙の不動点O, O\*とO''' : OはPQとRSの交点. O'''は2本の点線P''Q''とR''S''の交点.

[1] P.グレンディンニング, 見てわかる数学入門ショートストーリー200, 丸善出版(2024), p.162.

[2] [https://en.wikipedia.org/wiki/Brouwer\\_fixed-point\\_theorem](https://en.wikipedia.org/wiki/Brouwer_fixed-point_theorem)

[3] 西山豊, 数学セミナー, 2002, Vol.41, pp.14-17.

[4] H.S.M.コクセター, 幾何学入門上, 筑摩書房(2009), pp.105-106.

## 人工知能による情報が欠如したデータからの CT 画像の再現

植田 毅

東京慈恵会医科大学 物理学研究室、182-8570 東京都調布市国領町 8-3-1

tsuyoshi\_ueta@jikei.ac.jp

### Machine-learning Reproduction of CT Images from Information-deficient Data

Tsuyoshi Ueta

The Jikei University School of Medicine, Division of Physics, Chofu, Tokyo 182-8570

**Abstract:** The radiation dose from a CT scan is approximately 5-30mSv per examination, which is much higher than the approximately 0.06mSv from a chest X-ray. Many beams are irradiated to make the image high-definition. To reduce the dose, we consider reducing the number of beams to obtain images with sufficient resolution. In the present study, we consider to what extent the internal absorption distribution can be reproduced only from vertical and horizontal beam transmittance data. This problem is an ill-posed problem. By employing some machine learning functions in Mathematica, we predict the internal absorption distribution and seek the optimal function and method for that purpose. These results are also compared with those obtained by traditional optimization methods based on the Monte Carlo method.

**Keywords:** Machine-learning, X-ray computed tomography, CT scanner, ill-posed problem

X線の発見により、医療は目覚ましい発展を遂げました。健康診断では胸部X線検査を行い、めまいや頭部の打撲、捻挫骨折の疑いがある場合にはX線CT検査が行われます。今や、X線CT検査は日本人の我々にとって、欧米に比べ非常に身近な検査となっています。実際、X線CTの装置は全世界(OECD)の約30%が日本にあり、100万人あたりの台数は107台で2位のオーストラリアの56台の倍近くになっています(OECD health care activities 2019)。ただし、1000人あたりの撮影回数は176回でOECDの中で6番目であり(OECDの平均は140回)、無暗に撮影しているわけではありません。しかしながら、CT検査による被曝量は、1回あたり5~30mSv程度で、胸部X線撮影の0.06mSv程度に比べると被曝量は格段に大きいと言わざるを得ません。画像を高精細化するためには多方向から数多くのビームを照射する必要があります。さらに、一般に線量が増えると画質はよくなる。

他方、2021年、nature communication誌に通常のMRIの1/100程度の磁場でシールドが必要ないMRIの開発が掲載されました。この機器ではAIを用いて画像を構成しています。

そこで、線量を減少させるため、Mathematicaの機械学習機能を用いて、ビームの照射方向を減らしたデータすなわち、縦横のビームの透過率データのみから内部の吸収率の分布がどの程度再現されるのか、いくつかの方法を用いて検証します。AI機能の性能を評価するため、モンテカルロ法による最適化により再現した画像と比較を行います。機械学習機能については、Predict、NetTrainを用い、PredictのMethodはLinearRegression、NearestNeighbors、RandomForest、NeuralNetwork、GaussianProcess、GradientBoostedTrees(gbt)、Automatic(auto)を用いて、結果を比較する。

元画像は2次元の正方形の画像とする。ランダムな位置に複数のガウス関数の和で

$n \times n$  ( $n$ は自然数)の実数値タイルパターンとして発生させる(画像  $O$ )。その画像から縦 $n$ 本、横 $n$ 本のビームの透過率を計算し、元の画像を推定させるための元データ(OD)とする。機械学習では教師あり学習とし、学習用データは元画像と同じ数、振幅のガウス関数の中心座標、分散を乱数で決定し、画像を生成する(画像  $T$ )。その画像から縦 $n$ 本、横 $n$ 本のビームの透過率を計算し、教師データ(TD)を生成する。画像  $O, T$ は $n \times n$ の実数値の行列、透過率データ OD, TD は $2n$ の実数値ベクトルである。推定された画像(画像  $P$ )は、画像データを $n \times n$ の実数値ベクトルに変換し、 $P$ から $O$ を引いたベクトルのノルムを $n$ で割ったものにより評価する。また、推定画像  $P$ から求めた透過率データ(PD)が元データをどの程度再現しているかを、PDベクトルからODベクトルを引いたものの内積を $2n$ で割ったものの平方根で評価する。

学習データの数依存性、Methodによる違い(図 1)、ビームの本数 $n$ による再現性の変化(図 2)、推定コマンドによる違いを調べ、モンテカルロ法の結果との比較を行った。また、推定画像  $P$ と元画像  $O$ との比較を Mathematica の特徴量空間プロット機能でも比較した。その結果、現状ではモンテカルロ法に依る最適化が最も有効である(図 3)ことが分かった。NetTrainを用いた方法は計算は速いが再現性は非常によくなく、Predictを用いる場合、Methodはgbtが最適であると言える(図 1, 3)。gbtでは、 $n = 4, 12$ については、教師データ数に対して推定画像と元画像との距離が単調に小さくなっているが $n = 30$ では、教師データ数が500以上では推定能力の限界に達していることが分かる(図 2)。

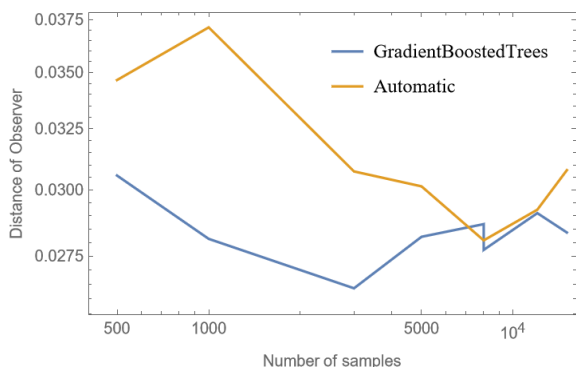


図 1 画像距離の教師データ依存性( $n = 30$ )

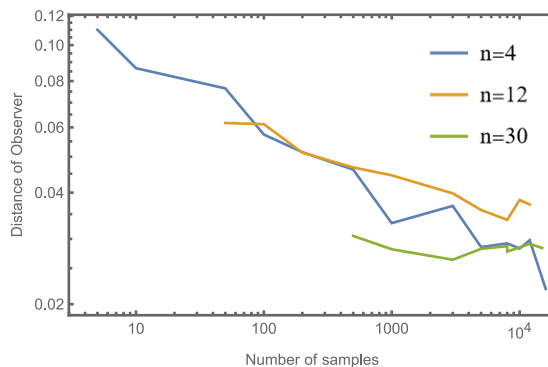


図 2 画像距離の教師データ依存性(gbt)

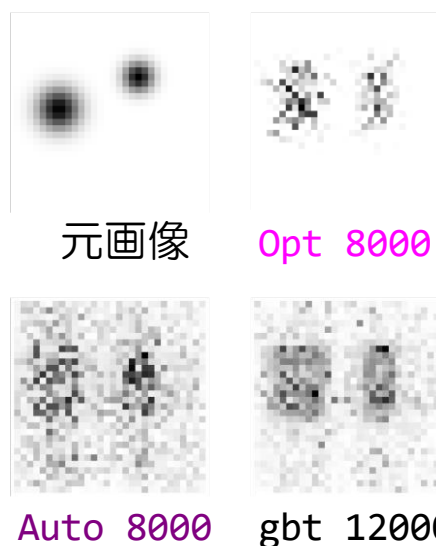
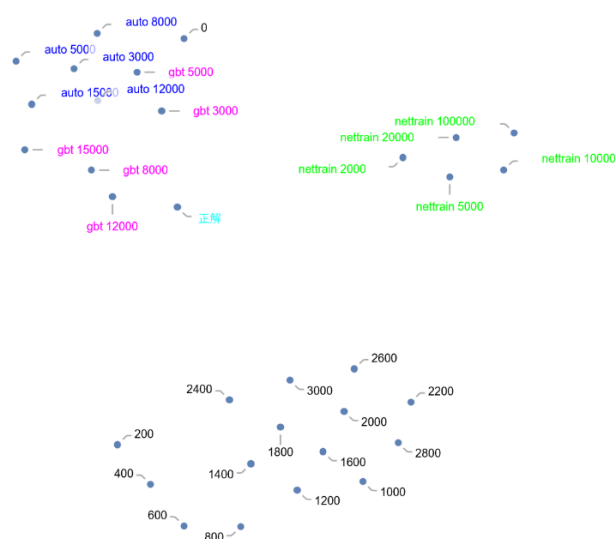


図 3 Predict 関数(method:auto, gbt)、NetTrain 関数とモンテカルロ法(ループの回数で表示)によりさまざまな教師データ数で推定した画像の特徴量空間プロット。右図、Opt8000はモンテカルロ法8000ステップでの推定画像、Auto 8000, gbt 12000はそれぞれ、12000の教師データを用いてMethodをAutomatic, GradientBoostedTreesとしたときの推定画像。

## 細胞列モデルによるがん発生パターンの数理解析

佐野英輝

関西学院大学大学院理工学研究科、兵庫県三田市学園上ヶ原 1

ixn07282@kwansei.ac.jp

### Mathematical Analysis of Cancer Developmental Patterns using Cell Linear Models

Eiki Sano

Kwansei Gakuin University, Gakuenuegahara 1, Sanda City, Hyogo Prefecture

**Abstract:** Cancer has been the leading cause of death among Japanese people for about 40 years, and it is known that detecting cancer is difficult. Cancer cells are reproduced by mutation for some reasons. However, it is not clear where cancer cells are reproduced. In this study, we analyze where cancer cells tend to be reproduced by comparing computer simulation and image analysis of the stained images of a rat liver. We apply three cell linear pattern models that take migration and cell cancelation into account.

**Keywords:** Cancer, Cell Linear Model

#### 1. はじめに

がんは細胞が正常に分裂しなかったがん細胞が蓄積されることで発生する悪性新生物の1つである。厚生労働省[1]が行っている統計では、1950年にがんが日本人の死因の上位5位に入るようになってから、がんによる死亡者数は増加の一途をたどっており、2022年には1950年の死亡者数の6倍以上にあたる38万人[2]を超えている。がんを発生させる原因として、飲酒・喫煙をはじめとした生活習慣によるものもあれば、B型・C型肝炎ウイルスをはじめとした感染症が媒介して発生するものもある。多くの発生要因を持つがんに対して私にできることはないかと考え、がんに対する数理モデルを用いた研究を始めた。

#### 2. 方法

##### (1) 細胞移動モデルの基本事項・およびシミュレーション条件

本研究では、細胞の状態に応じて正常な細胞・前がん病変・がん細胞の3つの状態に分け、1直線上に並んだ細胞集団において細胞の分裂と変異に関する確率過程の1つであるリニア過程を用い、細胞の移動に関する以下の3つのモデルを用いた。

A. 細胞変異モデル    B. リニア過程    C. 移動を含めたリニア過程

##### (2) シミュレーションを用いた手順

細胞が1ステップおきに移動・変異するものとして、2688回(24時間×7日×16週)の時間ステップを1回のシミュレーションとし、2688の時間ステップがそれぞれの細胞が占める割合を記録する。この操作を50回繰り返し、がん細胞が8割を超える確率を求める。

### (3) 画像解析

アザン染色されたラットの肝臓片のプレパラートを用いて図1のように得られた画像のうち、繊維化が起こり、青く染色された部分の割合を計算した。

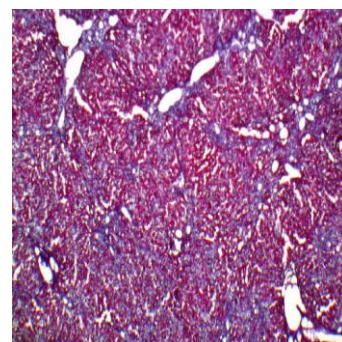


図1 アザン染色された画像

## 4. 結果

### (1) 画像分析の手法と結果

図1と同様の画像を250枚用いて、青の割合を計算した。250枚の画像のうち、繊維化した部分が占める割合の平均は0.383、繊維化した部分が8割以上を占めていた画像の割合は0.004と求められた。

### (2) シミュレーションとの比較

肝臓の損傷後、繊維化現象が起こり、重度の癒痕は肝硬変そして肝癌へ繋がる。このことから、一種のがん化現象と捉えて、2の(2)で行ったシミュレーションの結果と画像分析の結果を比較した。モデルA・B・Cでの近い値は、それぞれ表のとおりとなった。

表1 がん病変・がん細胞に変異する確率

	がん病変に変異する確率	がん病変かがん細胞に変異する確率
モデルA	0.00～0.60	0.00～0.60
モデルB	0.00(0.00～1.00)	0.00(0.00～1.00)
モデルC	0.00	0.00

( )は一方の確率が0.00のときにとり得る値の範囲である。

## 5. まとめ

本研究を通して2つのことがわかった。1つめは、250枚の画像のうち、繊維化した部分が8割以上を占めていた画像の割合0.004と3つのモデルのがん細胞に変異する確率を比較すると、モデルBおよびCの値に近いことがわかった。

また、表1の値から、モデルAと比較してモデルBおよびCを用いたときのがん病変に変異する確率およびがん病変かがん細胞に変異する確率は低い値をとっていることがわかる。このことから、細胞の移動によって、がんの発生を抑制することができると考えられる。今後は、細胞の移動の速度ががんの発生に与える影響および時間の経過におけるがん細胞の発生・消滅過程について、細胞死を含めて調べていきたい。

## 6. 参考文献

[1]厚生労働省 (n. d.) 「第7表 死因順位 (第5位まで) 別にみた死亡数・死亡率 (人口10万対) の年次推移」 2024年2月22日閲覧

<https://www.mhlw.go.jp/toukei/saikin/hw/jinkou/suii09/deth7.html>

[2]がん情報サービス「最新がん統計」 2024年5月21日閲覧

[https://ganjoho.jp/reg\\_stat/statistics/stat/summary.html](https://ganjoho.jp/reg_stat/statistics/stat/summary.html)



## 消化管 大腸ループの形成

本多久夫

神戸大学大学院医学研究科 (神戸市中央区楠町 7-5-1)

理化学研究所 生命機能科学研究センター (神戸市中央区港島南町 2-2-3)

hihonda@hyogo-dai.ac.jp

### Loop formation of the large intestine

Hisao HONDA

Kobe University Graduate School of Medicine (Kusunoki-cho, Kobe, Japan);

RIKEN BDR (Minatojima-minami-cho, Kobe, Japan)

**Abstract:** The large intestine forms a large-scale loop. Using a ribbon model the mechanism of the loop formation is inferred to be transition between twisting and looping, and confirmed by a mathematical model - vertex dynamics.

**Keywords:** large intestine; loop formation; mathematical model; vertex dynamics

ヒトの大腸は結腸と直腸から成るが、この肛門に続く長いチューブは大規模なループを形成する。このループ形成、特にその巻き方向の決め方をリボンで作った模型と数理モデルを使って考察する。

消化管は発生過程のはじめは、図1 a に示すようにほぼ直線状であるが、伸長してループを形成しながら小腸にあたる部分が激しく屈曲する。小腸より下方の大腸部分 (黒線

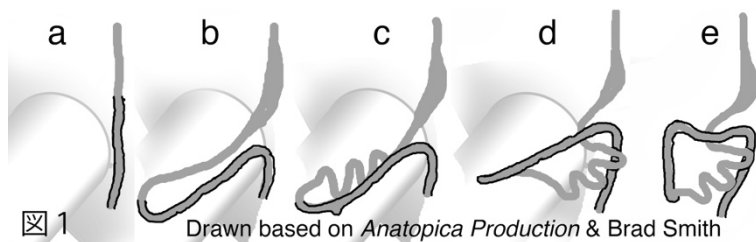


図1

Drawn based on *Anatopica Production & Brad Smith*

で示す) は先ずは腹から見て手前に配置し、大きくループして肛門に続く。ループの方向は必ず右巻き (時計針の動きの方向) であるが、この理由を調べる。

図2 はリボンで作った模型である。リボンの上端を固定し下端を長軸の周りに  $360^\circ$  ねじったものを、ねじれは変えないまま上端と下端を互いに近づけると、リボンはループする。このループの回転軸は、リボンの元の長軸方向に直角である。

**シミュレーションの結果** 側面が多角形細胞で敷詰まったチューブを発生初期の消化管とする (図3 a)。このチューブが長軸周りにねじれるとき、このねじれがチューブのループに変換されるかどうかを調べる。ねじれたチューブは一方の端を固定し他方の端を、幾何学を使って  $360^\circ$  回転させて作った (図3 b)。この回転によって生じるねじれにより、個々の多角形は元の多角形に比して歪んでいる。多角形の歪みから生じる辺長の弾性エネルギーは  $(e_i - e_{oi})^2$ 、多角形の面積の弾性エネルギーは  $(s_j - s_{oj})^2$  である ( $i, j$  はそれぞれ辺と面積の番号。  $e, s$  はそれぞれ多角形辺長と面積。  $o$  は歪み前の値を示す)。Vertex dynamics<sup>(註)</sup> を使いポテンシャル・エ

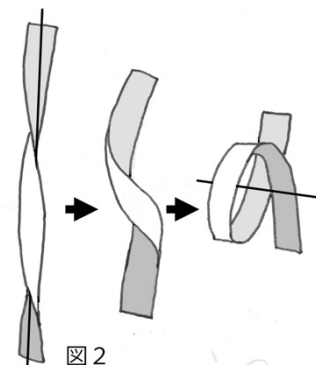
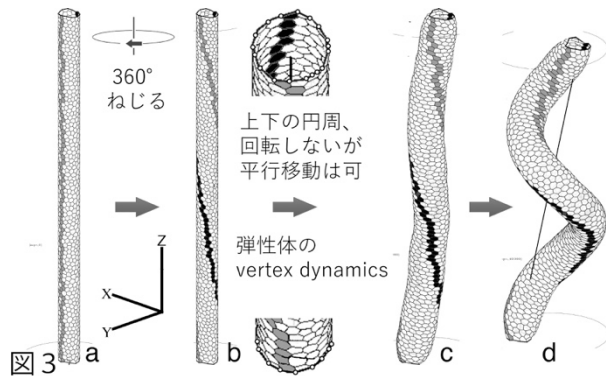


図2

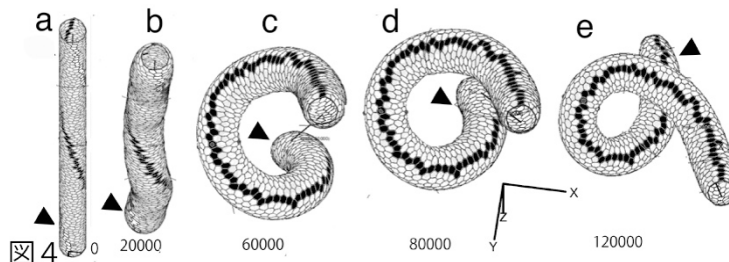
エネルギーの小さな形を求める。ただし、上下端は歪み解消のため回転しようとしているがこれを止めながら、上端下端間の距離を強制的に縮めていく。図3のcとdは計算ステップ数がそれぞれ20000と40000の時の形である。チューブはループし始めている。シミュレーションをさらにすすめたときの経過を図4に示す。ただし視点は図3



の視点と違って下方である。マークした細胞列からわかる様にチューブのねじれは解消されている。矢じりは小腸附近を示す。図4eは図1eに対応することがわかる。

**議論** この研究ははじめの大腸チューブのねじれは何が原因かは不明のまま進めた。ショウジョウバエの消化管である後腸は軸の周りにねじれていることが知られている(Taniguchi et al. 2011)。またマウスについてであるが消化管の胃についてもねじれが知られている(Welsh et al. 2013)。消化管ではないが初期胚の心臓チューブにもねじれがあり、これは心臓を構成

している心筋細胞のキラルな性質によると考えてよいデータを我々は得ている(本多 2021; Honda 2021)。大腸チューブについてもこれに類する理由でねじれている可能性が高いと考えられる。



**文献**

- 本多久夫 2024 『DNA からの形づくり-情報伝達・力の局在・数理モデル』 共立出版
- Honda, H. and Nagai, T. 2022 “Mathematical models of cell-based morphogenesis” Springer
- 本多久夫 2021 初期胚心臓の左巻きらせんループは心筋細胞の異方的変形で生じる。第91回形の科学シンポジウム (online 福井大学 2021.11/13)
- Honda, H. 2021 Left-handed cardiac looping by cell chirality is mediated by position-specific convergent extensions. *Biophys. J* 120, 5371-5383
- Welsh, I. C. et al. 2013 Integration of left-right Pitx2 transcription and Wnt signaling drives asymmetric gut morphogenesis via Daam2. *Dev Cell* 26, 629-644
- Taniguchi et al. 2011 Chirality in planar cell shape contributes to left-right asymmetric epithelial morphogenesis. *Science* 333, 339-341

**註) Vertex dynamics**

物体の形を多角形や多面体の集団とみなし、そのすべての頂点の座標を以下に示す連立偏微分方程式によって求めることで、形の形成を調べる数理モデルである。

$$\eta \frac{d\mathbf{r}_i(t)}{dt} = -\partial U(t)/\partial \mathbf{r}_i$$

この方程式により、頂点  $i$  の位置  $\mathbf{r}_i(t)$  が時刻  $t$  とともに動く様子を計算する ( $\eta$  は頂点の動きにかかる粘性の定数)。頂点  $i$  はポテンシャル  $U(t)$  が小さくなるように動く。ポテンシャルには本文で述べた弾性エネルギーが含まれているから弾性体の歪みが小さい形を求めていることになる(Honda and Nagai 2022; 本多 2024)。

## 深層学習を用いた病理画像変換の開発

脇谷昌汰、昌子浩登

関西学院大学大学院 理工学研究科 数理科学専攻

〒669-1330 兵庫県三田市学園上ヶ原1番

E-mail アドレス : [hqn00290@kwansei.ac.jp](mailto:hqn00290@kwansei.ac.jp)

### Appliation of CycleGAN for Cellular Diagnosis Fibrotic liver

Shota Wakitani, Hiroto Shoji

Kwansei Gakuin University Graduate School, Science and Engineering

1 Gakuen Uegahara, Sanda, Hyogo 669-1330

**Abstract:** When performing pathological diagnosis, special stains are applied to extract the diseased area. However, these stains are complicated and time-consuming. In this study, to overcome these points, we developed a disease-specific virtual staining method using CycleGAN, a type of image generation AI. Using Rat liver, the developed network transformed simple Hematoxylin & Eosin stains to the staining images for disease determination quicker than doing it in an experiment. The generated images were then evaluated using mathematical indices.

**Keywords:** Mathematical index, image analysis, image generation AI, diagnostic estimation

#### 1. はじめに

疾患判定時、疾患部分を抽出する特殊な染色を行い、その結果から判定者が判定を行う[1]。しかし、これらの染色は複雑かつ多くの時間を必要とする事などから、近年は数理的手法を用いた手法開発が増加している。そこで本研究では、ラットの肝疾患（脂肪肝）を対象に、簡易にかつ素早く疾患判定用の染色像を得るために画像生成 AI の一種である CycleGAN [2]を用いて、疾患特有の仮想染色を行った。そして、仮想染色像を数理指標により評価を行い、染色に費やす時間や診断の正確さの観点から、構築した手法の比較検討の結果を紹介する。

#### 2. 本研究で開発した手法について

疾患判定時、従来手法では Azan 染色と言われる特殊な染色を施すが、染色に多くの時間がかかり、緊急時には対応できないということや染色過程でヒューマンエラーが発生することなどの欠点が挙げられる。これらの欠点を軽減するため、本研究では、ラットの肝疾患（脂肪肝）を対象に、HE 染色という簡易な染色を施した後、画像生成 AI である CycleGAN [2]を用い、仮想 Azan 染色像を得る手法を開発した。狙いとしては、HE 染色に費やす時間と仮想 Azan 染色に費やす時間を Azan 染色に費やす時間より短縮させ、精度を向上させる事である。

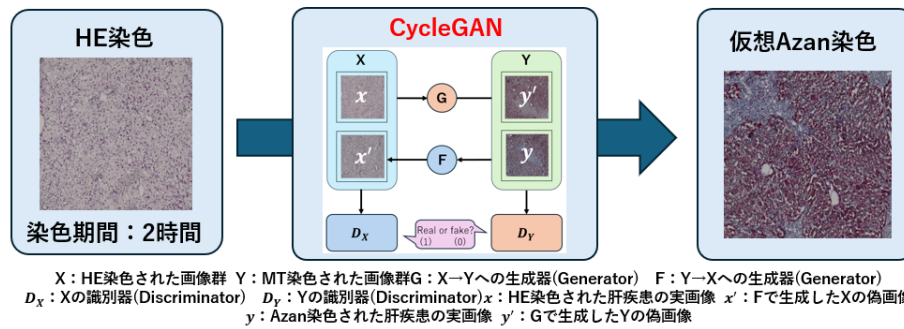


図1 本研究で提案した仮想染色の手法

### 3. 実験方法

#### I 学習

HE染色した像とAzan染色した像を学習データとし、学習回数を変化させて学習を行う。そして、テストデータとして準備したHE染色像をCycleGANで仮想Azan染色像に変換する。

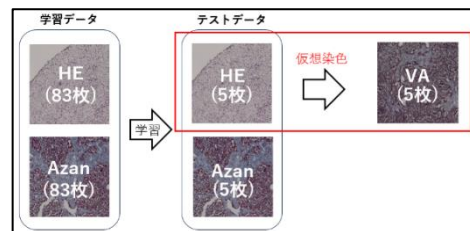


図2 CycleGANでの学習

#### II 画像精度の評価

本研究でHE像から作成した仮想Azan染色像とHE染色後撮像した同じサンプルにさらにAzan染色を行い、得た画像と比較し、共通部分を評価する指数であるDice係数とJaccard係数を用いて評価する事で、学習回数を変化させた際の画像精度の変化を見る。また、最適な学習回数において、学習データの数を変化させた際の画像精度の変化を見る。

### 4. 結果

仮想Azan染色像の1枚について、学習回数、サンプル数を変化させたときのそれぞれの係数の変化を図3、図4に載せた。図3も含めて他のサンプルにおいても、学習回数が50回を超えた時より各係数の値に変化が少なくなり、学習回数が50回の時より下がる場合がしばしばあった。また、50回の学習回数の際の仮想Azan染色像を作成するのに、3時間程度であった。実際にAzan染色を行い、像を得るよりも十分早く像が得られる。また、図4より学習回数を50回に設定し、学習データ数を変化させた際の精度変化を見ると、83枚以降より低下していった。

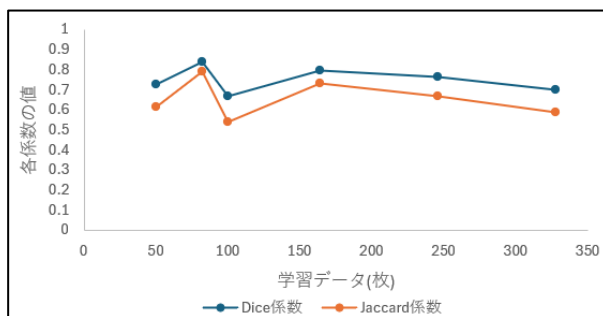


図3 各学習回数におけるDice・Jaccard係数

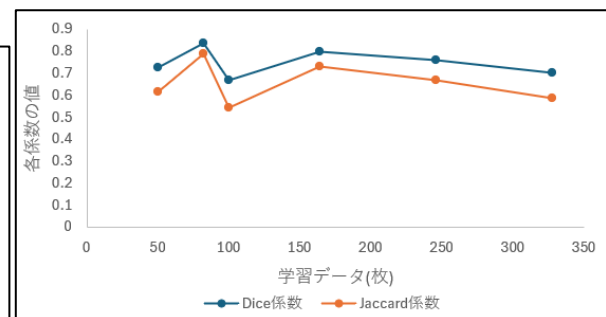


図4 学習回数50回に固定した際の各学習データにおけるDice・Jaccard係数

### 5. 参考文献

- [1] S. Sherlock, J. Dooley, Diseases of the Liver and Biliary System, Wiley-Blackwell (2002).
- [2] J.Y. Zhu *et al.* arXiv:1703.10593 (2017).

## 肝臓内の毛細血管ネットワーク構造の3次元可視化アルゴリズム

荒木聡一郎<sup>1</sup>, 巳波弘佳<sup>1</sup>, 昌子浩登<sup>2</sup>

<sup>1</sup>関西学院大学大学院 理工学研究科 情報科学専攻

〒669-1330 兵庫県三田市学園上ヶ原 1 番

<sup>2</sup>関西学院大学大学院 理工学研究科 数理科学専攻

〒669-1330 兵庫県三田市学園上ヶ原 1 番

{soichiroaraki, miwa, shoji}@kwansei.ac.jp

### Algorithm for Visualization of 3D Skeletonized Capillary Network in Liver

Soichiro Araki<sup>1</sup>, Hiroyoshi Miwa<sup>1</sup>, Hiroto Shoji<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Graduate School of Science and Technology, Kwansei Gakuin University

1 Gakuen Uegahara, Sanda-shi, Hyogo, 669-1330 Japan

<sup>2</sup>Graduate School of Science and Technology, Kwansei Gakuin University

1 Gakuen Uegahara, Sanda-shi, Hyogo, 669-1330 Japan

**Abstract:** The identification of the actual capillary network in the liver is significant in medical science because it enables us to understand how the liver grows and develops its internal complexity. The capillaries in the liver form a characteristic 3D network; however, the mechanism is not yet fully understood. To elucidate this mechanism, identifying the actual capillary network in the liver is necessary. In previous research, a skeletonized capillary network in a very localized area has been observed manually. This is because a significant amount of time and effort is needed to visualize the 3D capillary network over a wide area. In this paper, we design an algorithm for visualizing a 3D skeletonized capillary network across a wide area of the liver and implement the algorithm.

**Keywords:** Capillary, Liver, Visualizing, 3D skeletonized capillary network

#### 1. はじめに

肝臓内の毛細血管の3次元ネットワーク構造の把握は、肝臓の成長過程や非常に複雑な構造となっている肝臓内部の形成過程の解明に繋がることから、基礎医学の分野において非常に重要な課題の1つとなっている[1]。肝臓の毛細血管は、2次元のネットワークではなく、曲がりくねって太さも不均一な洞窟状の3次元特有の配置をしており、大量の血液に対して肝臓が効率的に作用するために何かしら効率的な配置となっている可能性がある。

従来は、肝臓の断層画像から専門家が視認しながら毛細血管の部分を手作業で抽出・重ね合わせることで毛細血管の3次元ネットワーク構造の可視化を行っていた。しかし、組織の切り出しや血管等の染色、断層画像の撮影には専門家による緻密な手作業が必要であり、極めて膨大な時間と作業量を伴うことから、肝臓内の広い領域における3次元ネットワーク構造の可視化やその構造の性質の定量的な調査も行われていない。

本稿では、肝臓内の広い領域における毛細血管の3次元ネットワーク構造の可視化を目的とし、そのためのアルゴリズムの設計と実装を行う。

## 2. 入力データ

本稿で使用した肝臓組織の断層撮影図を図1に示す。撮影対象は、x軸に1905.498 $\mu\text{m}$ 、y軸に2540.664 $\mu\text{m}$ 、z軸に10 $\mu\text{m}$ の大きさのもので、これを肝臓片とする。さらに、肝臓片を15個に分割したものをブロック、肝臓片をz軸方向に30個に分割したものをシート、シートを15個に分割したものをスライスとする。このスライスが1回の撮影範囲である。

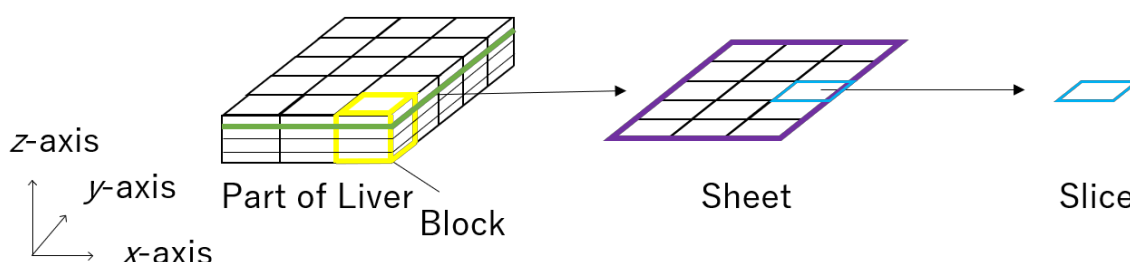


図1 肝臓組織の断層撮影図

## 3. 肝臓の毛細血管ネットワーク構造抽出法

断層画像からネットワーク構造を抽出する手順を図2に示す。肝細胞配列の生物学的制約により毛細血管の構造が細胞間の間隙であることに着目し、画像処理を用いて細胞及び胆管を除去することで、毛細血管のみを抽出する。この処理を2次元画像に対して行い、層状に積み重ねることで3次元形状を復元する。得られた3次元形状は複雑な形状をしているが、3次元細線化処理[2]を施すことでネットワーク構造を抽出する。この一連の処理により、効率よくネットワーク構造を取り出せるようになった。

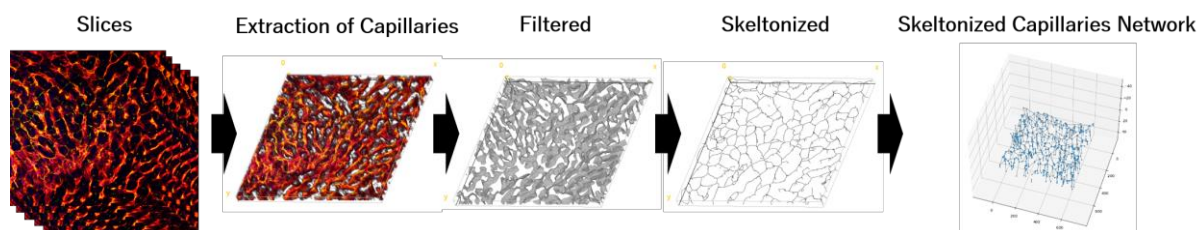


図2 ネットワーク構造抽出手順

## 4. まとめ

本稿では、肝臓の断層画像群から毛細血管を自動的に取り出し、3次元ネットワーク構造を生成するアルゴリズムを設計した。それにより、肝臓内部の広い領域における毛細血管の3次元ネットワーク構造を可視化することができた。

### 参考文献

- [1] Hiroto Shoji, "A Reaction-diffusion Algorithm for Segmentation of Confocal Laser Scanning Microscope Images," *Forma*, Vol. 31, No. 1, pp. 23-25, 2016.
- [2] Ta-Chin Lee, Rangasami L. Kashyap, Chong-Nam Chu, "Building Skeleton Models via 3-D Medial Surface/Axis Thinning Algorithms," *CVGIP: Graphical Models and Image Processing*, Vol. 56, No. 6, pp. 462-478, Nov., 1994.

## トポロジー最適化の方法論と応用

野村勝也

関西学院大学工学部、兵庫県三田市学園上ヶ原 1

katsuya.nomura@kwansei.ac.jp

### Topology Optimization Methodology and Applications

Katsuya Nomura

School of Engineering, Kwansei Gakuin University,

1 Gakuen Uegahara, Sanda, Hyogo 669-1330 Japan

**Abstract:** Shape is a crucial factor in determining function and properties. Physical laws connect these aspects, often through mathematical models described as partial differential equations. In computer simulations, these models transform structural input information into performance output information. Topology optimization refines structural input based on performance output while obeying mathematical models. Advances in manufacturing technologies like 3D printing have brought significant attention to topology optimization. It is also being integrated with machine learning and applied to multidisciplinary problems. This talk will explain the methodology of topology optimization, its connection to machine learning, and its potential applications in engineering and science.

**Keywords:** Topology optimization, computer simulation, machine learning, multidisciplinary problems.

形状は、その機能や性質を決定づける重要な要素である。雪の結晶や様々な雲などの自然の形状は物理法則に従って定まり、翼を広げて飛ぶ飛行機や魚の骨に似た形状のテレビアンテナなどの人工物は物理法則を考慮して設計される。そして物理法則は、流体の場合ナビエ・ストークス方程式、電磁気の場合マクスウェル方程式というように、偏微分方程式で表されることが多い。この方程式をコンピュータを活用して解くことで、与えられた構造からその機能や性質を導き出すことが可能である。このコンピュータシミュレーションは、物理法則を数理モデルとして表し、構造という入力情報から性能という出力情報を得る方法だと解釈できる。

しかし、構造から性能を把握できたとしても、逆に性能を向上させる構造を創出するのは容易ではない。このため、製品設計では試行錯誤のプロセスが不可欠であったが、ここで構造最適化が重要な役割を果たす。構造最適化では構造をあらゆる設計変数を導入し、性能が向上するように設計変数を調整することで、よりよい構造をコンピュータで導出する。これは物理法則に則りつつ、性能という出力情報をもとに構造という入力情報を調整する方法と捉えられる。特にトポロジー最適化<sup>[1]</sup>は高い設計自由度をもち、10億を超える設計変数での最適化事例も報告されている<sup>[2]</sup>。

近年、機械学習の進展が目覚ましい。そのうち画像認識に代表される教師あり学習では

推論と学習の二つのフェーズがある。推論は知能モデルを用いて有用な情報を得るプロセスであり、学習は知能モデル自体を作成するプロセスである。ここで推論は画像などの入力情報を知能モデルに入れることで情報を入力することから、構造を数理モデルに入れて性能を求めるシミュレーションに対応付けられる。また学習はビッグデータという入出力情報をもとに知能モデルのパラメータを最適化するため、多数の設計変数を最適化するトポロジー最適化と関連づけて解釈できる。そして近年では機械学習を応用したトポロジー最適化の方法の研究もさかんである<sup>[3]</sup>。

しかしながら、トポロジー最適化で導出された構造が実際に製造可能であるとは限らない。製造とは、材料をもとに所望の構造を現実化するプロセスであり、実現可能な構造とそうでない構造が存在する。そこで、設計変数への処理や制約条件を追加することで、実現可能な構造に絞り込む方法が提案されている<sup>[4,5]</sup>。一方で、3Dプリンタに代表される製造技術の革新によって、かつては実現不可能だった構造が製造可能になることもある。

さらにトポロジー最適化は構造設計分野を中心に研究が進んできたが、その適用範囲を徐々に拡大しており、熱、流体、電磁波など、多様な物理問題に対しても応用が進んでいる。近年では電気回路<sup>[6]</sup>や半導体デバイス<sup>[7]</sup>などの設計にも適用され始めている。

加えて、トポロジー最適化によって導出された構造が骨やくちばし、木の根やサンゴなどの有機物の構造と類似していることが指摘されている。これは、自然界における形状の進化と物理法則にもとづく最適設計との間に深い関連性があることを示唆し、形状が生まれる根本的な理由をトポロジー最適化で解明するための試みも行われている<sup>[8]</sup>。

本講演では、これらの話題を広範囲にわたって紹介し、トポロジー最適化の方法論の解釈とその応用の可能性について、筆者自身の考えや研究結果を踏まえつつ論じる。

## 参考文献

- [1] M. P. Bendsoe and O. Sigmund, *Topology Optimization: Theory, Methods, and Applications*, Springer, 2013.
- [2] N. Aage et al., Giga-voxel Computational Morphogenesis for Structural Design, *Nature*, Vol. 550, No. 7674, 2017.
- [3] S. Yamasaki et al., Data-driven topology design using a deep generative model, *Structural and Multidisciplinary Optimization*, Vol. 64, No. 3, 2021.
- [4] A. Kawamoto et al., Heaviside projection based topology optimization by a PDE-filtered scalar function, *Structural and Multidisciplinary Optimization*, Vol. 44, 2011.
- [5] 山田ら, 幾何学的特徴量に対する偏微分方程式系に基づく幾何学的特徴制約付きトポロジー最適化, *日本機械学会論文集*, Vol. 85, No. 877, 2019.
- [6] K. Nomura et al., Topology Optimization of Conductors in Electrical Circuit, *Structural and Multidisciplinary Optimization*, Vol. 59, No. 6, 2019.
- [7] K. Nomura et al., Doping Profile Optimization for Power Devices Using Topology Optimization, *IEEE Transactions on Electron Devices*, vol. 65, No. 9, 2018.
- [8] M. Sakashita et al., Three-dimensional Topology Optimization Model to Simulate the External Shapes of Bone, *PLoS Computational Biology*, Vol. 17, No. 6, 2021.



## 七久保の道穴 (群馬県下仁田町) の洞床堆積物から 産した陸産貝類遺骸群集

増山 慈<sup>1)</sup>・柏木健司<sup>1)</sup>

<sup>1)</sup> 富山大学大学院(修士課程)理工学研究科理工学専攻 〒930-0885 富山県富山市五福 3190

<sup>2)</sup> 富山大学大学院理工学研究科 〒930-0885 富山県富山市五福 3190

<sup>1)</sup> m23c1332@u-toyama.ac.jp

<sup>2)</sup> kasiwagi@sci.u-toyama.ac.jp

### Land snail remain assemblages recovered from cave floor sediments within Nanakubo-no-michiana Cave in Shimonita Town, Gunma Prefecture, Japan

Masuyama, C.<sup>1)</sup> and Kashiwagi, K.<sup>2)</sup>

<sup>1)</sup> Graduate School of Science and Engineering, University of Toyama: 3190 Gofuku, Toyama 930-8555, Japan

<sup>2)</sup> Graduate School of Science and Engineering, University of Toyama: 3190 Gofuku, Toyama 930-8555, Japan

**Abstract:** Mixed assemblages of cave-dwelling and surface-dwelling land snails were collected from cave floor sediments of Nanakubo-no-michiana Cave. The empty shells of surface-dwelling species including shallow subterranean environments for their habitats were introduced into the cave interior through narrow fissures, and mixed with those of cave-dwelling species. Among the surface-dwelling species, the morphological characteristics of *Hawaiia* aff. *minuscula* were examined. As a result, umbilical diameter (or umbilical diameter /shell diameter ratio), number of whorls, and relative height of spires are important for species identification as well as for understanding its growth stages.

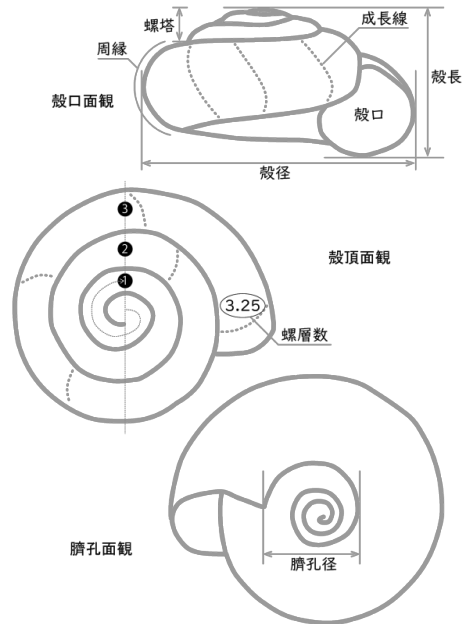
**Keywords:** cave, land snail, umbilicus, spire, specific identification

横穴型鍾乳洞である七久保の道穴 (群馬県下仁田町) の洞床堆積物から、小型哺乳類遺骸・化石群集に共産する、計377個体の微小陸産貝類遺骸を採集した。微小陸産貝類遺骸群集は暫定的に8科9属17種からなり、真洞窟性種のホラアナゴマオカチグサ近似種 *Cavernacmella* aff. *kuzuensis* が最も多産し(約28%)、地表性種のヒメコハクガイ近似種 *Hawaiia* aff. *minuscula* (約22%)、ケシガイ類 *Carychium* spp. (約21%; 3種)、シタラ科未定種 *Euconulidae* gen. et sp. indet. (約18%; 8種±) が引き続いた。得られた陸産貝類の外形は、大まかに縦に長い形と横に広がる形に二分できる。高さ方向の殻長と横方向の殻径は、四個体を除き約3 mmに満たない(殻長と殻径の平均値は、それぞれ1327  $\mu\text{m}$ と1286  $\mu\text{m}$ )。殻サイズの大きい四個体のうち、三個体のオカチョウジガイ類(アフリカマイマイ科)の最大値は殻長で約7.2 mm、一個体のシタラ科未定種は殻径で約4.5 mmである。

陸産貝類遺骸群集は、真洞窟性種と地表性種の混在群集からなる。同様の群集は群馬県上野村の仏穴の洞床堆積物からも報告された(柏木ほか、2024; 群馬県立自然史博物館研究報告)。このような混在群集の形成機構として、真洞窟性種が生息する洞窟環境下の地下空間に、地表に通じる狭い裂罅を通じて、地表性の陸産貝類の死殻が導入されたと考えられる。七久保の道穴と仏穴ともに、陸産貝類遺骸群集の多様性は必ずしも高くない。洞内と地表をつなぐ裂罅は、地表付近で厚く堆積する岩礫の間隙や、岩盤表層の開口亀裂帯に



■ 図1 ヒメコハクガイ近似種 *Hawaiiia* aff. *minuscula* (Binney) の成長過程。



■ 図2 陸産貝類殻の形質用語。

連続していたと想定できる。浅層地下環境を生息場を含む陸産貝類種が、選択的に洞窟内に導入され、真洞窟性種の死殻と混在したと判断した。

地表性種で多産したヒメコハクガイ近似種(■ 図1)は、ヒメコハクガイ *Hawaiiia minuscula* Binneyに形質が類似する。ヒメコハクガイは、20世紀前半に北米から日本に導入された外来種である。一方で在来の*Hawaiiia*属の化石ないし死殻が、洞窟堆積物や砂丘堆積物から知られてきた(例えば、Kano, 1996; ユリヤガイ)。七久保の道穴のヒメコハクガイ近似種は、絶滅小型哺乳類化石を含む洞窟堆積物から産したことで、標高720mの山岳地に洞窟が位置することから、在来種であると判断して問題ない。本種は、小さな螺塔を持つ平板状の外形で、球形の殻口と開いた臍孔を持つことで、共産する他の陸産貝類種とは容易に識別できる。さらに、殻径が約923–2563  $\mu\text{m}$ と様々な成長段階の個体が得られた(■ 図1)。一方、殻口は厚肥ないし反転せず、螺層の周縁も滑らかに弧を描くことから、成殻か否かの判断は殻の相対的な大きさに依存していた。そこで殻長、殻径、臍孔径、螺層数を計測ないし計数し、成長過程における殻の形質変化を検討した(■ 図2)。殻径–臍孔径相関図は、殻径1800  $\mu\text{m}$ 付近を境に、殻径の増加に対する臍孔径の増加量が増えることを示す。臍孔径/殻径比は、殻径1800  $\mu\text{m}$ 付近より小さい個体で0.27–0.30を、大きい個体で0.31–0.38を示し、殻径1800  $\mu\text{m}$ 付近より大型の殻で、臍孔が殻径に対して相対的に広くなることを示す。殻の螺管径の増加が一定と仮定すると、臍孔径の増加は螺管の巻きが緩くなることで説明できる。また、螺層数の増加と殻径の増加は正の相関を示す。以上から、殻径1800  $\mu\text{m}$ 付近を境に幼殻–亜成殻から成殻へ変化すると、我々は判断している。

在来種のヒメコハクガイ近似種は、外来種のヒメコハクガイと殻の形質で酷似するものの、相対的により広い臍孔を持つ点で区別できる。この相違は成殻で適用できる。ヒメコハクガイ近似種の幼殻–亜成殻は、成殻よりやや小さい臍孔径/殻径比を持ち、それはヒメコハクガイの形質に共通する。ただし、成殻のそれよりも明らかに低い螺塔は、幼殻–亜成殻の段階を示す指標となる。総合的に、ヒメコハクガイ近似種の種同定において、臍孔径(ないし臍孔径/殻径比)、螺層数、および螺塔の相対的な高さが、外部形質として有効であると結論付けられる。

## 放散虫 *PantaneUium* 属の外殻構造の 1D・2D 表現方法

吉野隆<sup>1)</sup>, 松岡篤<sup>2)</sup>, 木元克典<sup>3)</sup>, 岸本直子<sup>4)</sup>

1) 東洋大学, 2) 新潟大学, 3) JAMSTEC, 4) 関西学院大学

1) tyoshino@toyo.jp

### The 1D and 2D Representation Methods for Cortical Shell Structures of Radiolarian Genus *PantaneUium*

T. Yoshino<sup>1)</sup>, A. Matsuoka<sup>2)</sup>, K. Kimoto<sup>3)</sup>, N. Kishimoto<sup>4)</sup>

1) Toyo Univ., 2) Niigata Univ., 3) JAMSTEC, 4) Kwansei Gakuin Univ.

**Abstract:** We propose two representation methods for the cortical shell structures of the radiolarian genus *PantaneUium*. The methods enable us to compare the geometrical features of the cortical shells.

**Keywords:** *PantaneUium*, radiolarians, skeletal structures, representation

#### 1. はじめに

発表者らはこれまで放散虫の骨格構造の形の科学について検討してきた。特に、中生代の放散虫 *PantaneUium* はその構造が特徴的かつ比較的単純であるために積極的に扱ってきた。本研究では以下に示す方法を 59 個体に適用した結果について報告する。

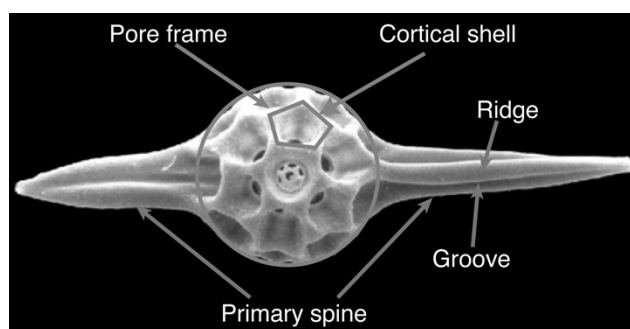


Fig. 1: *PantaneUium* 属に用いられる用語

#### 2. 方法

*PantaneUium* 属の骨格構造例を Fig.1 に示す。本研究で行いたいのは cortical shell の形状と primary spines の位置を平面グラフや数字の並び (1D 配列と呼ぶ) として表現することである。平面グラフの作成には同心円状のグリッドを導入する。一方の primary spine の位置を中央に他方の primary spine の位置をグリッドの外周上に置く平面グラフを、中心となる primary spine ごとに 2 種類描く。さらに、2 種類の平面グラフをもとにして Manolopoulos et al. (1991) の方法で 1D 配列を作る。これらを数値とみなして値が小さい方を選び、これを構造を表す 1D 配列とする。詳細は講演で述べる。

#### 3. 結果

新たに取得した 59 個体について上記の方法を適用し、全ての個体について平面グラフと 1D 配列を得た。すなわち、*PantaneUium* 属 59 個体の骨格構造を数値の並びとして表現することに成功した。得られた 59 個体は 22 孔から 38 孔まで多岐にわたるが、一例として 27 孔の結果を Fig.2 に示す。図は、9 個体が同じ殻孔数であり、そのうち 2 個体が幾何学的に同一であり、2 個体が鏡映対称な関係にあることを示している。

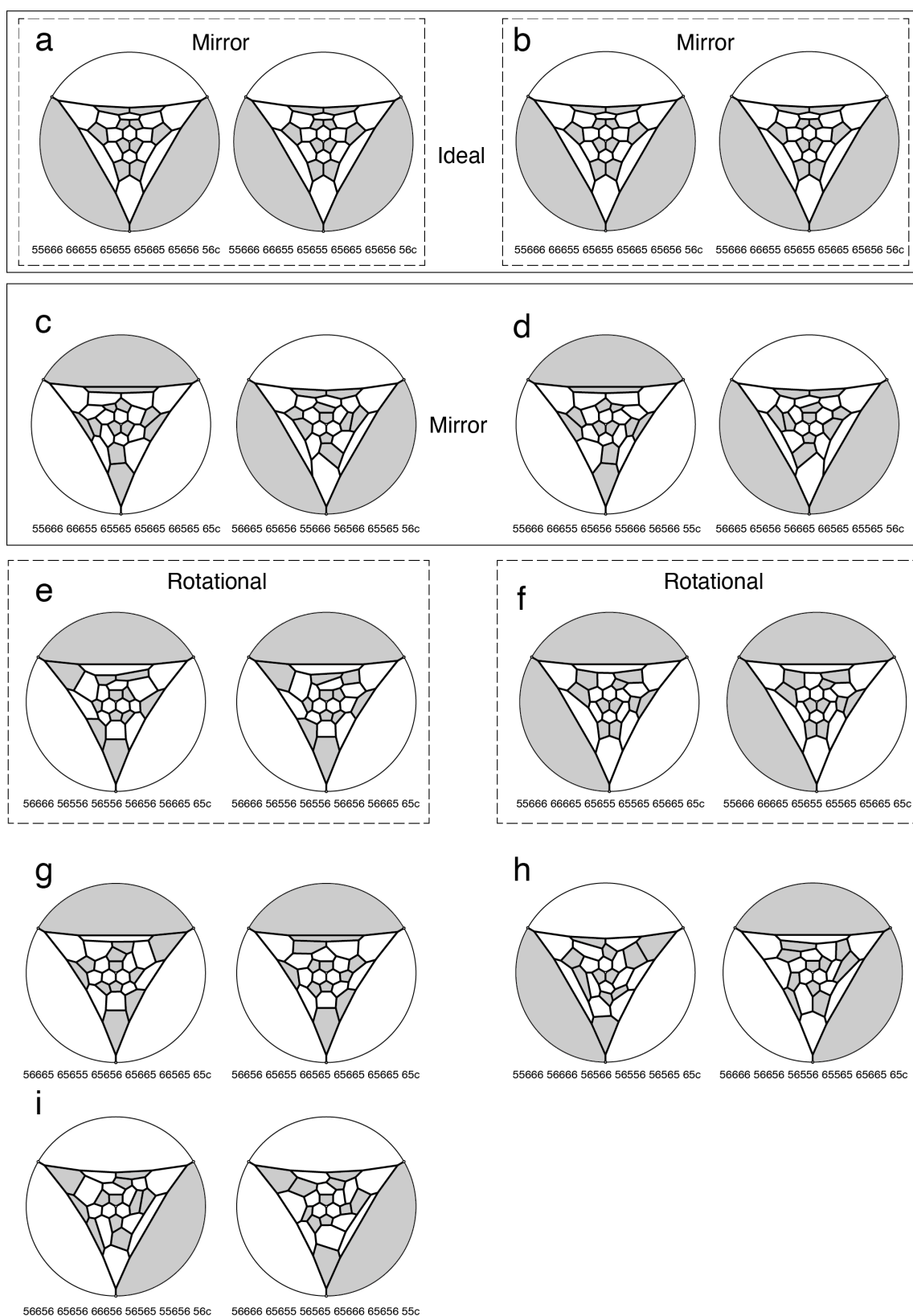


Fig. 2: 27 孔をもつ 9 個体の平面グラフ表示と対応する 1D 表現.

### 文献

Manolopoulos, D. E., May, J. C., & Down, S. E. (1991). Theoretical studies of the fullerenes: C<sub>34</sub> to C<sub>70</sub>. *Chemical Physics Letters*, 181(2-3), 105-111.

## 佐渡産の沢根ダンゴ石

松岡 篤

新潟大学, 950-2181 新潟市西区五十嵐 2 の町 8050

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

### Sawane Dango Stones from Sado Island, Niigata Prefecture

Atsushi MATSUOKA

Niigata University

**Abstract:** Sawane Dango is one of sweets produced on Sado Island, Niigata Prefecture. It is composed of mashed red bean inside with dark brown in color and a thin layer of soft rice cake. Pebbles similar to Sawane Dango in appearance are found on Sawane Beach. We name this kind of pebbles "Sawane Dango Stones". These stones come from biogenic siliceous mudstone of the Tsurushi Formation accumulated on the sea floor of the Japan Sea in the Middle Miocene. The entire formational processes from its deposition to the present occurrence of Sawane Dango Stone is outlined. In addition, the future of the stones is discussed in the framework of geological setting of Sado Island.

**Keywords:** Sado, Sawane Dango, Tsurushi Formation, Middle Miocene, Cenozoic

#### 1. はじめに

沢根だんごは、佐渡で作られる菓子のひとつである。この菓子は、真野湾の北に面する佐渡市佐和田地区沢根にある2つの菓子製造店によって製造・販売されている。その形状は俵型であり、一口サイズの大きさである。このだんごの表面は餅で、中にはこし餡が入っている。表面の白色と、餡のこげ茶色のコントラストが鮮やかである。

佐和田地区沢根の砂礫からなる浜には、沢根だんごによく似た小石が落ちている。俵型の形状をもち、表面が白く中が黒色に近いこげ茶色をしているところが、沢根だんごにそっくりである。この小石を沢根ダンゴ石と呼ぶことにする。



図 1 佐渡市沢根産の沢根ダンゴ石。

本報告では、沢根ダンゴ石について肉眼ならびに顕微鏡観察の結果を紹介する。また、この石のもととなる地層の形成から現在にいたる過程について考察する。さらに、地質プロセスを踏まえた沢根ダンゴ石の将来についても展望する。

#### 2. 沢根ダンゴ石

沢根の海岸で採取した沢根ダンゴ石を図 1 に示す。沢根ダンゴ石の特徴をもつ小石を並べてある。割って内部の状態がわかる石も示されている。表面は白い。割ると中はこげ茶色である。

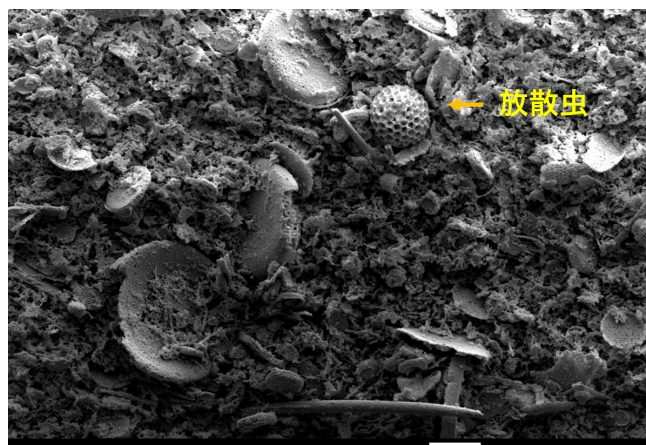


図 2 沢根ダンゴ石の電子顕微鏡写真。スケールは、0.1 mm.

沢根ダンゴ石の肉眼観察の結果を以下に記述する。表面は白色でざらざらした質感がある。割れた標本の内側は、濃いこげ茶色を呈する。破断面はガラス様の光沢をもち、鋭利で貝殻状の断口を示す。表面の白色部と内部のこげ茶色の部分の境界は明瞭である。白色を呈する表層部の厚さは一つの標本の中では一定である。標本によってその厚さに違いがある。外見上は沢根ダンゴ石の特徴をもつが、中心まで完全に白くなっている標本もある。最も沢根だんごに似るのは、表層部の厚さが実際のだんごの餅表皮の厚さに相当するものである。

### 3. 電子顕微鏡観察

沢根ダンゴ石が何から構成されているのかを明らかにするため、表面を5%のフッ化水素酸(HF)でエッチングを行い、乾燥した表面に金蒸着を施して走査型電子顕微鏡で観察を行った。エッチング面の顕微鏡写真を図2に示す。レリーフとして浮き上がっている様子が観察されるのは、珪藻、放散虫およびカイメンの骨針の化石である。それらはいずれも、二酸化ケイ素からなる微化石である。量的には珪藻が最も多く、全体の9割以上を占める。放散虫の殻とカイメンの骨針は、合わせても1割未満である。これらの微化石の基質を構成するのも微細な微化石の破片である。岩石片ならびに石英や長石のような鉱物粒子は認められない。

### 4. 沢根ダンゴ石の形成

沢根ダンゴ石の観察から、この石は海洋生物の殻や骨格からなる堆積岩であることがわかる。その起源は、沢根海岸の北方に分布する新生代第三紀中新世中期の珪質泥岩(鶴子[つるし]層)である。この地層は、3億年におよぶ佐渡の地史の中では、比較的最近の海の時代[1]に形成された。地表に露出する鶴子層の珪質泥岩が沢根ダンゴ石になるまでの全過程について考えてみよう。

地表での風化により、鶴子層の珪質泥岩は地山から岩片となって崩落する。珪質泥岩の岩片は、真野湾に向けて南に流下する質場川によって海まで運ばれる。海岸にもたらされた珪質泥岩は、海での波浪により砂礫浜で転がされる。この運動により角が取れ俵型の形状へと成形される。こげ茶色だった珪質泥岩は、表面からの風化により白色へと変化する。白色部は時間とともに厚くなり、長期間にわたり風化作用を受けると中心まで白色になる。沢根ダンゴ石は物理的に円磨され、化学的に風化しつつある途中段階の珪質泥岩ということになる。丸くなり表層だけが白色の状態にある珪質泥岩が、薄皮のある沢根だんごに最も似た状態といえる。

### 5. おわりに

佐渡の陸域に分布する海の時代の地層は、削剥され続けるとやがて全てが失われる運命にある。砂礫浜でダンゴ石という状態で発見されるのは、地質時間としては短い。今が食べ頃である。

### 文献

- [1] 「よくわかる佐渡ジオパーク」佐渡ジオパーク協議会 編、文一総合出版、171p。(2022)

# 大径化した原木の建築構造材への利活用に関する研究 (その4)仮設建築物の施工および見学者に対するアンケート結果

小野聡子\*1, 加藤憲司\*2, 杉村泰司\*3, 荒木光子\*4

\*1 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

\*2 株式会社HKS環境建築事務所 〒824-0722 福岡県田川郡添田町大字落合1937番地の1

\*3 株式会社杉村構造設計 〒810-0004 福岡市中央区渡辺通5-23-2号東急ドエルアルス天神504

\*4 ローカルズ55有限責任事業組合 〒824-0602 福岡県田川郡添田町大字添田1025-1  
satoko@fuk.kindai.ac.jp

## Study on Utilization of Large-Diameter Logs for Structural Timber Part4. Temporary building construction and results of questionnaire for visitors

ONO Satoko, KATO Kenji, SUGIMURA Yasushi and ARAKI Mitsuko

**Abstract** : This research aims to design and construct non-residential buildings using large-diameter timbers as structural members in order to promote the use and expansion of large-diameter timbers. This paper reports on the results of the construction of a temporary structure using large-diameter logs. In addition, the results of a questionnaire administered to visitors who observed the construction are also reported.

**Keywords** : large diameter logs, thick wood plank, construction of temporary structures, questionnaire for visitors

### 1. 序

既報(その1)から(その3)につづき、本報では大径化した原木の利活用について報告する。本論文では、大径木を使用した仮設構造物を施工した結果について報告する。あわせて、施工状況の見学者に実施したアンケート結果について報告する。

### 2. 大径木を使用した仮設構造物の施工



写真 1 仮設建築物の施工状況

2022年11月10日(木)から2022年11月11日(金)にかけて、大径木を使用した仮設構造物を地場大工により施工した。場所は、添田木材有限会社本社(田川郡添田町大字添田1009の1)である。その施工状況の一部を写真1に示す。施工状況の見学会を開催したために2日間で施工したが、2日間あれば時間的には十分であった。また、地場大工でも問題なく施工可能であった。

### 3. 見学会参加者に対するアンケート実施およびその結果

前述の仮設構造物の施工見学会への参加者に対して、大径木に関するアンケートを実施した。実施したアンケートを図1に、そのアンケート結果を図2に示す。アンケート回答者は19名であり、約半数である10名が公務員であった。それ以外の参加者については、建築関係者が多かった。回答者の多くは、福岡県添田町に近い地域からの参加者であった。

設問【1】については、参加者に対するアンケートであるため、『①とても興味がある』が突出して多かった。設問【2】については、『①構造材として使用』が、設問【3】については、『③人材育成が必要である』が最も多かった。設問【4】については、回答がわかれたが、『②店舗に利用する』が最も多かった。設問【5】については、専門的な意見から一般的な感想まで様々な回答があったが、『大径木の利用促進』、『(施工法が簡単なことから)本研究で考えた構法普及』、『福岡県添田町の地域発展』などが記載されており、本事業に対する期待が読み取れる記述が多かった。

ご来場様アンケート

このたびは、実証モデル施工見学会にお越しいただきありがとうございました。今後の参考にさせていただきますので、ぜひお声をお聞かせください。

お名前	ご職業
住所	連絡先

**【1】 実証モデルは、厚板・層積工法と、10Mスパンのトラスを使用しています**  
 ① とても興味がある    ② 興味はない    ③ どちらかと言えば興味がある

**【2】 今後、大径木の原木は増えると思われませんが、教えてください**  
 ① 構造材として使用    ② 造作材として使用(役物など)  
 ③ 厚板・枠材として使用    ④ その他( )

**【3】 木造建築の地元大工さんの後継者について、教えてください**  
 ① 後継者がいる    ② 後継者はいない    ③ 人材育成が必要である  
 ④ その他( )

**【4】 非住宅建築について、教えてください**  
 ① 倉庫に利用する    ② 店舗に利用する    ③ 公共施設等に利用する  
 ④ その他( )

**【5】 お気づきのこと、ご自由にお聞かせください**

ご協力ありがとうございました。

図1 アンケート用紙

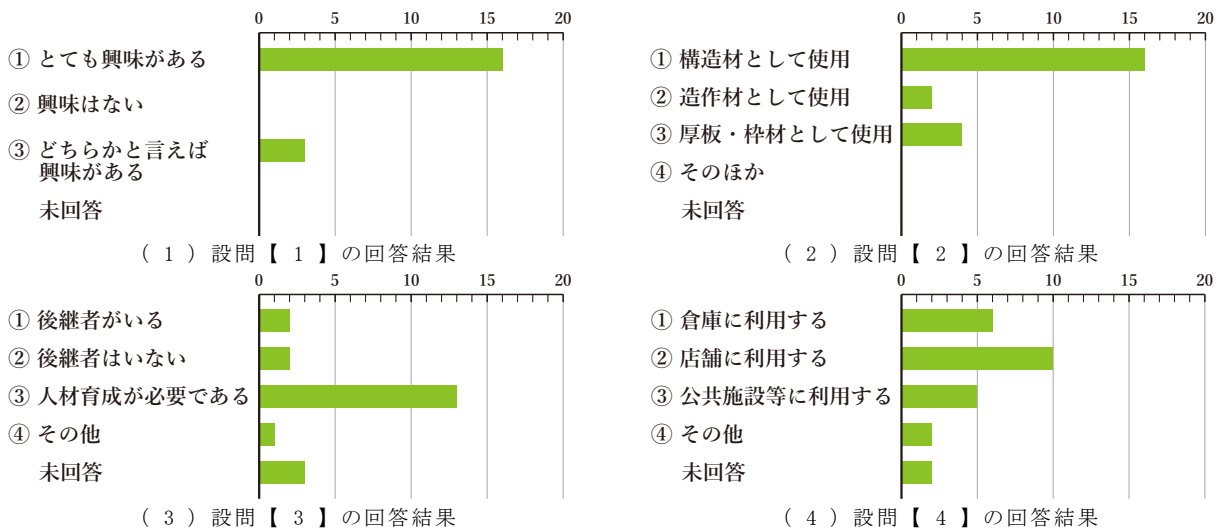


図2 アンケート結果

### 5. 結語

本論文では、大径木を利用した仮設建築物を設計・施工した結果について述べた。あわせて、来場者に対するアンケート結果について述べた。今後は、大径木による非住宅建築物の設計・施工を目指して、研究を進める予定である。

#### 【謝辞】

本研究は、林野庁：『令和3年度林業成長産業化総合対策補助金(木材産業・木造建築活性化対策のうちの都市の木造化促進総合対策事業及びCLT・LVL等の建築物への利用環境整備事業)』の助成金(『大径化した原木等を活かした利用の拡大事業』・代表：荒木光子)により実施しました。ここに記して、深甚の意を述べます。



図2 建設予定の建築物(イメージ図)



## ゲノム距離 $d_G$ : 形の簡約化

<sup>1</sup>西垣 功一、<sup>2</sup>濱野 圭一

<sup>1</sup>埼玉大学 (名誉教授), <sup>2</sup>GenoLife 研究会  
338-8570 埼玉県さいたま市桜区下大久保 255  
cochangreen2@yahoo.co.jp

## Genome distance $d_G$ : Reduction of Katachi

Koichi Nishigaki, Keiichi Hamano

Saitama University Emeritus Professor, GenoLife Research Group

**Abstract: A practical measure for the genome difference is introduced as genome distance  $d_G$ . This parameter situates in the downstream of Nei's genetic distance which was defined for measuring the difference between genes. Genome distance is far more practical and more universal than the genetic distance and enables us easily to map a genome (i.e., organism) on the genome sequence space. It also has a significance of reducing a substance (Katachi)-directing genome to a single code.**

**Keywords: genome distance, genetic distance, genome sequence space, classification, Species-identification,**

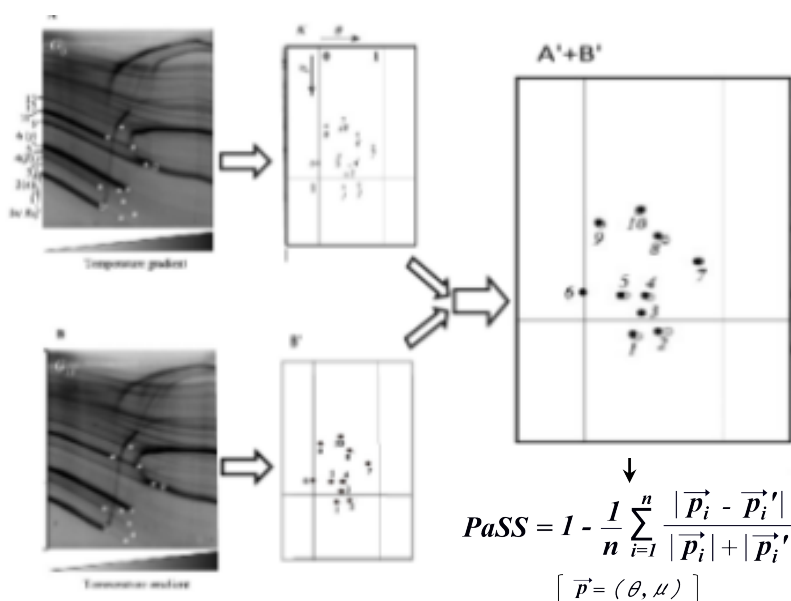
はじめに

生物の近縁性を定量的に評価する研究は DNA シーケンサー出現以前の 1970 年代の Nei (根井) の **遺伝的距離** が嚆矢である。先行したタンパク質アミノ酸配列解析を元に行われた。すなわち、タンパク質のアミノ酸配列を生物間で比べ、変異の量から生物の遠近性を計る。後に同じ原理で DNA 比較が行われるようになった。実は DNA 塩基配列決定法(1975 年)の前から RNA の配列決定法は確立しており、様々な生物のリボソーム RNA の配列情報が集められていた。その頃から Woese らはリボソーム RNA を用いた生物の進化系統樹を作成するなど、遺伝子による生物の分類・同定に成功してきた (RDP プロジェクト)<sup>1)</sup>。しかし、近縁性の高い生物間では特定の遺伝子配列に違いがみられないことが多く、複数の遺伝子を用いて差異を見出す必要性が生じ、**MLST** (多遺伝子領域配列タイピング) が開拓されてきた。それは原理は単純であっても実践には労を要した。生物で共通する 10 種近い遺伝子を集めるための PCR プライマーの設計が容易ではなく実践も手が掛かった。2007 年に出現した NGS (次世代シーケンサー) はこの問題の解決に強力に貢献し、DNA バーコーディング活動が立ち上げられるに至っている<sup>2)</sup>。それは生物を網羅的にゲノムシーケンシングして SNP (点置換多型情報) を取り出しバーコード状に視覚化するものである。従来の MLST に比べて整然として強力であるが操作や計算にコストがかかるものとなっている。

筆者らはこの代替として**スピード (GP) 法**を提唱・実践してきた<sup>3)</sup>。そのスピード (=種同定点) から生物間のゲノム距離が求められ生物一般の分類・同定に利用できる。既にその実践例は本学会でも紹介してきたが、今回はゲノム距離の持つ普遍的な意味を考察する。

## ゲノム距離 $d_G$ の定義

ゲノム距離 $d_G$ はゲノムプロファイリング (GP)法において生成されるスピド (spiddos)から Fig.1 に示すようにして与えられる。従って非デカルト座標的距離である。



## ゲノム距離およびスピドの普遍的意義

ここで実践的に求められたスピドとそれから誘導されたゲノム距離（これを特に $d_G$ と称する）とは元の生物（ゲノム）から再現的かつ一義的に求められるという重要な特性を有している。すなわち生物（ゲノム）を簡約して得られる自己同

定コード (ID) という意味を持つ  
「マイナンバーコード」とは全く

$$d_G = 1 - PaSS$$

ている [ 適当につけられた'異なる ]。この性質から、迅速

に生物の同定や分類が可能となるばかりでなく、それらは生物のゲノム配列空間（データベース）にユニークに位置づけられることを意味している。このことは未知の生物のスピドをゲノム配列空間へ投影すれば、他のスピドとの間でゲノム距離探索（「隣人探し」）して、近傍ゲノム（隣人）がわかれば、その属性から未知の生物の属性を推定することが可能となる。留意すべきは、ゲノム配列空間に含まれるデータ数（要素数）が少なくてもラフではあるが、必ず隣人は見つかるということである。これまでの経験から、生物界全体についてスピドデータがおおよそ数 100 データベース化されれば、任意の未知ゲノムについて生物分類（すなわち、界・門・綱・目・科のどれに属するかを判別すること）は可能と示唆されている。講演ではゲノム距離の意義と用途を発展させる。

## 参考文献

1. Woese CR. Bacterial evolution. *Microbiol Rev.* 1987;**51**(2):221-271.
2. Antil S, et al. *Mol Biol Rep.* 2023;**50**(1):761-775.
3. Watanabe T. et al. *Genome Biol.* 2002;**3**(2):ESEARCH0010

# 羊蹄山と富士山の形状比較

山口喜博<sup>\*1</sup>

## Shape comparison of Mt.Yotei and Mt.Fuji

Yoshihiro Yamaguchi

The shape of Mt.Yotei is approximately represented by the exponential function  $h(x) = A \exp(-\alpha x)$  where  $x$  is the transverse distance from the top of the mountain and  $h(x)$  the height above sea level. In order to determine  $x$  and  $h(x)$ , we use the map published by the Geographical Survey Institute. For 144 directions, the coefficients  $\alpha_k (0 \leq k < 144)$  are obtained. The coefficients for Mt.Fuji are also determined. Let  $\gamma_k = 2|\alpha_k - \alpha_{k+72}| / (\alpha_k + \alpha_{k+72}) (0 \leq k < 72)$  be the ratio to express asymmetry. The maximum value of  $\gamma_k$  for Mt.Yotei is 0.14 and that for Mt.Fuji is 0.38.

2013年9月1日から3日まで北海道科学大学芦原ニセコ山荘に滞在した際に、山荘の周辺から羊蹄山をじっくり観察することができた。羊蹄山は成層火山であるため形状は富士山に似ている。富士山のスロープの減少の仕方が指数関数で記述できることを思い出した [1]。後日、国土地理院の地図 [2] を利用してスロープの減少の仕方を調べた。電子国土 Web の「ツール」に断面図を描く機能がある。描かれた断面のデータを csv ファイルとして保存できる。csv ファイルから、始点 (頂上) からの距離  $x(km)$  と標高  $h(x)(m)$  を読みだして、北より 2.5 度刻みで 144 方向における指数関数的減少  $h(x) = A \exp(-\alpha_k x)$  の係数  $\alpha_k (0 \leq k < 144)$  を決定した。羊蹄山の場合、標高約 1750m から約 750m までの間のデータを利用し、富士山の場合、標高約 3700m から約 1700m までの間のデータを利用した。図 1 に計算結果を示した。羊蹄山と富士山のスロープの減少の仕方が指数関数で近似できることが確認できた。

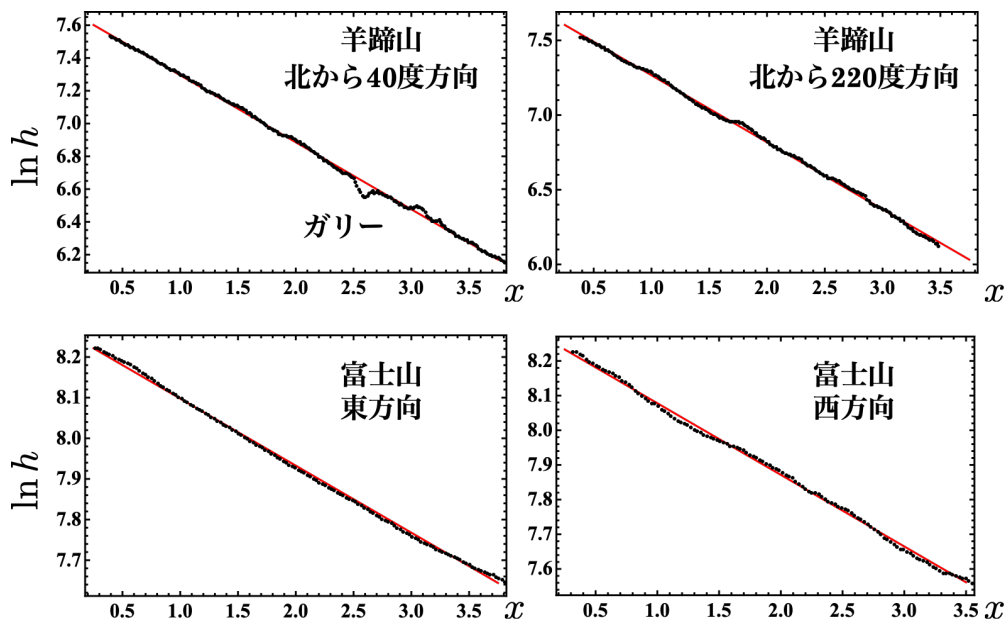


図 1 羊蹄山と富士山における位置  $x(km)$  と  $\ln h(x)$  の関係. ガリー：雨裂

\*1 〒290-0073 千葉県市原市国分寺台中央 2-4-14. メール：chaosfractal@icloud.com

座標  $x$  の依存性を排除するために、非対称比  $\gamma_k$  を導入した.

$$\gamma_k = \frac{|\alpha_k - \alpha_{k+72}|}{(\alpha_k + \alpha_{k+72})/2} (0 \leq k < 72).$$

非対称比を利用すると羊蹄山と富士山の形状を比較できる (図 2). 羊蹄山の場合, 比  $\gamma_k$  はほとんどの方向で 10% 未満である. この程度の差は, 羊蹄山の写真を見ても左右の対称性の違いは気にならない [3]. 深田久弥は日本百名山 [4] で羊蹄山を「古来蝦夷富士と呼ばれただけあって, その整正な山容はどこから眺めても形を崩さない」と称賛している. これは筆者が得た結果と対応している.

非対称比の方向依存性より, 富士山は見る方向で見え方が著しく変わることが分かる. 南東 (北西) から南西 (北東) に至る間の変化は非常に激しい. 非対称比を B スプライン曲線で補間した結果も図示してある. 西伊豆の大瀬崎から見た場合の非対称比は 36% もある. ここで撮影された富士山の写真を見ると「富士山が西に傾いている」ように見える [5].

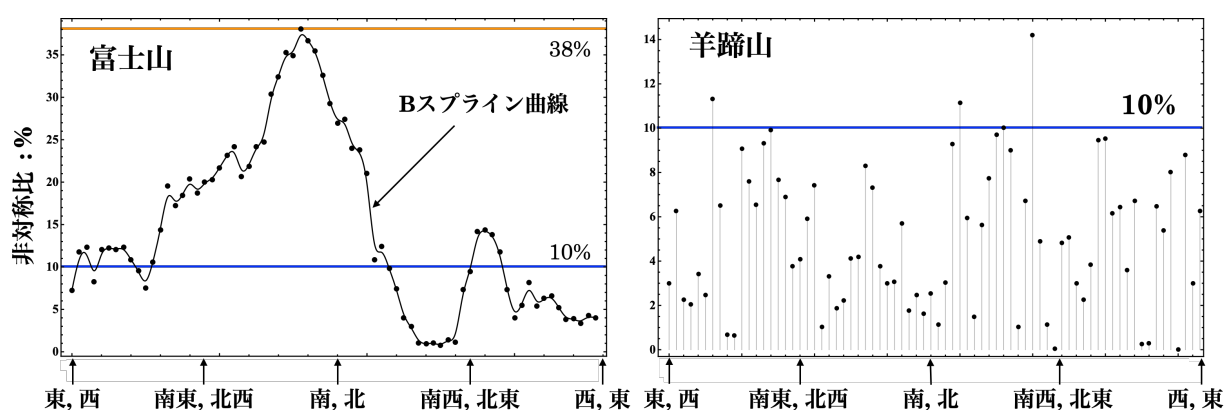


図 2 非対称比. 図における「東」は東から見た場合の非対称比. この値は西から見ても同じである.

補足. 筆者はナウマンの論文 [6] の日本語訳を読んで「富士山の形状が指数関数的に減少すること」を最初に発見し報告したのはミルンであることを知った. 志賀重昂が日本風景論 [7] の中で, ミルンの英文を誤訳し指数関数的減少性を剽窃したことが論文 [8] で指摘されている. 今日でも剽窃は行われている [9]. 参考資料.

- [1] J. Milne, On the form of volcanoes, Geological Magazine, Vol.5 (1878). pp.337-345. The volcanoes of Japan, Trans. Seis. Soc. Japan, Vol.9 (1886). pp.1-184.
- [2] 国土地理院. <https://maps.gsi.go.jp>
- [3] 羊蹄山の写真. <https://www.town.kutchan.hokkaido.jp/tourism/yoteizan/>
- [4] 深田久弥, 日本百名山 (新潮社, 初版 1964 年. 新潮文庫, 2003 年). 後方羊蹄山 (シリベシ).
- [5] 富士山の写真. <https://numazukanko.jp/spot/10009>
- [6] E. ナウマン著「富士山」(翻訳: 山田直利, 矢島道子). ミュンヘン地理学協会の年報に発表された論文 Fujisan (1888 年) の全訳. GSJ 地質ニュース Vol. 2 No. 10(2013 年 10 月) pp.293-314. [https://www.gsj.jp/data/gcn/gsj\\_cn\\_vol2.no10.pdf](https://www.gsj.jp/data/gcn/gsj_cn_vol2.no10.pdf)
- [7] 志賀重昂, 日本風景論 (政教社, 初版 1894 年. 講談社学術文庫, 2014 年).
- [8] 中嶋文雄, 米地文夫, 志賀重昂「日本風景論」の剽窃性の数学的検証. 岩手大学教育学部研究年報 第 71 巻 (2012) pp.53-55. <https://doi.org/10.15113/00011311>
- [9] 桜井進, 「富士山は数学的に美しい」. 季刊誌コトバ (集英社), 第 18 号 (2015). pp.96-99.

# シェルピンスキー四面体プロジェクションマッピング

出原 立子

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.

Ritsuko Izuhara

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

**Abstract:** As a polyhedral version of the Sierpinski gasket with fractal structure, there is a Sierpinski tetrahedron constructed from regular tetrahedra. This polyhedron appears as squares when viewed from directions orthogonal to each face of a cube, since it fits within a cube. Therefore, we set up an environment with two projectors placed in the positive and negative directions of the x-axis to project images, and created a piece for viewers to experience Sierpinski tetrahedron projection mapping by walking around the surroundings.

**Keywords:** Sierpinski tetrahedron, projection mapping

### 1. はじめに

フラクタル構造を有するシェルピンスキーのガスケットの多面体版として、正四面体で構成されたシェルピンスキー四面体がある[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から、これを三つの直行する方向からの射影で正方形になることを指摘し、イマジナリーキューブと名付けた[2]。この性質から、立木氏は正方形の写真を切ったものを、シェルピンスキー四面体のある一方向から正方形にみえる面に貼り、またその真反対の方向から見える正方形の面に別の正方形画像を切り張りして、表と裏面で異なる正方形イメージが見えるシェルピンスキー四面体オブジェを制作した[3]。この作品事例を元にして、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について立木氏より提案され、作品制作を行うことになった。

### 2. シェルピンスキー四面体プロジェクションマッピング制作方法

今回、16個の正四面体を用意し図1のように構成したシェルピンスキー四面体を制作した。これが立方体に収められていると仮定して、立方体の各面に対し直行する方向から

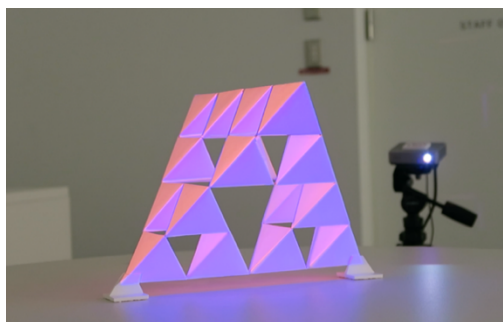


図1 シェルピンスキー四面体モデル

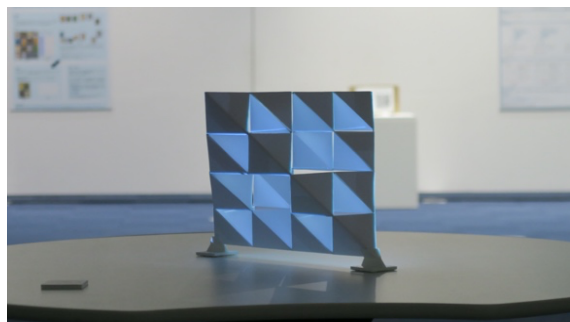


図2 正方形に見えるシーン

見ると正方形に見える(図 2)。そこで、図 3 に示すように 2 台のプロジェクタを x 軸のプラスとマイナス方向に配置し映像を投影する環境を構築し、鑑賞者は周囲を回ってシェルピンスキー四面体投影マッピングを見てもらうことにした。

この環境において、2 台のプロジェクタ其々から互い違いの関係になる 2 色のイメージを投影すると、z 軸のプラスとマイナス方向から見た時、其々 1 色の正方形のイメージが見える。

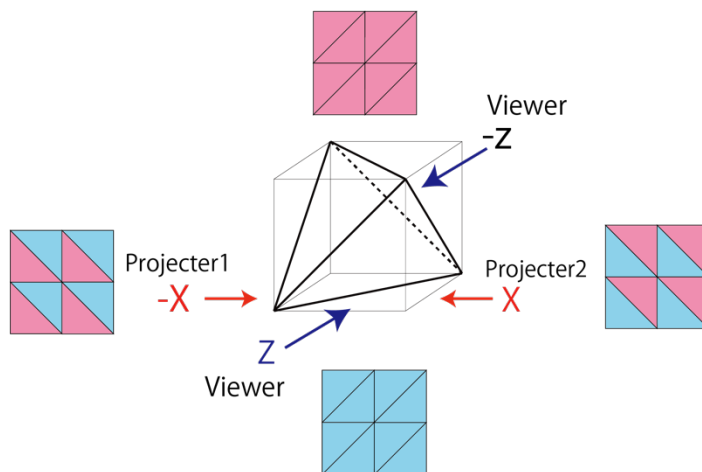


図 3 プロジェクタと視点の位置と投影映像の見え方

### 3. シェルピンスキー四面体投影マッピング作品

この特徴を活かして投影する映像(モーショングラフィックス)を制作した。映像は複数のテーマで構成し、その一つは z 軸の両端方向それぞれから見ると少しずつ色が変わっていき、両端の色は補色どうしになるように構成された映像である。また、個々の正四面体の正三角形の面の形状を活かした表現や輪郭線を活かした表現などのモーショングラフィックスを制作した(図 4)。

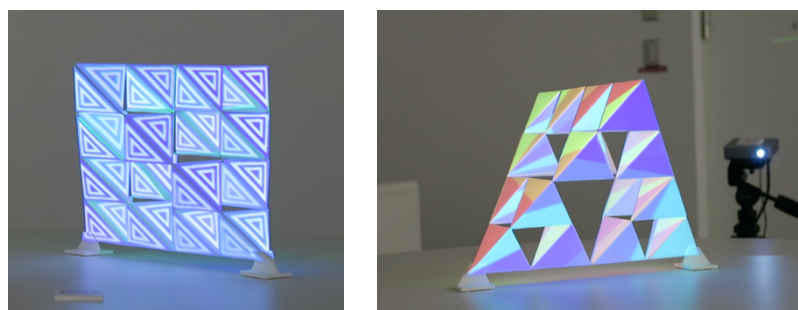


図 4 プロジェクションマッピングイメージ

#### 謝辞

シェルピンスキー四面体に 2 次元映像をマッピングさせる奥深い題材を提供頂きました、立木秀樹先生に感謝いたします。また、本作品制作に興味を持ち取り組んでくれた出原研究室の松田健次、松田健太、石川元、平坂希心、西本稜を評したいと存じます。

#### 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] 立木秀樹, “シェルピンスキー四面体に絵を貼ると立木秀樹...”, <https://www.i.h.kyoto-u.ac.jp/users/tsuiki/sierpinski/sier-rev.pdf> (2024 年 5 月 23 日参照)

## フラクタル次元を用いた肝臓形態比較とそのメカニズム推測

小山紗歩

関西学院大学大学院、〒669-1330 兵庫県三田市学園上ヶ原 1 番

hxx43766@kwansei.ac.jp

### The Comparison of Liver Morphology by Fractal Dimension, and the Analysis of their Mechanism

Koyama Saho

Kwansei Gakuin graduate school, 1 Gakuenuegahara, Sanda, Hyogo 669-1330

**Abstract:** There are lots of fractal objects in the earth. In the previous research, we estimated the morphology of rat liver have fractal nature. In this paper, we compared with liver morphology in four species by using fractal dimensions. We confirmed the difference in fractal dimensions among the species. Furthermore, we investigated the factors contributing to these differences by using Diffusion Limited Aggregation model and phase field model.

**Keywords:** fractal, liver, DLA model, phase field model, evolution

#### 1. はじめに

生物の体の中には肝臓など多くの器官が存在する。進化を通して生物は個体の大きさを変えたり、環境に対応したりしてきた。先行研究でラットの肝臓の構造に着目すると、ある程度規則的な構造をみることが出来た。そこから、進化による構造の変化が存在し、数学的な観点から形態進化の推測を行うことができるのではないかと考え、フラクタルの概念を用い研究することにした。

#### 2. フラクタルとは

フラクタルとは、図形を分解したときに全体が再現される自己相似性という性質を有する構造である。が、複数段階での自己相似性が観測されるものが、近似的な意味合いも含めてフラクタルと呼ばれている[1]。自然界にもフラクタルが見られることが報告されており、フラクタルの考え方や数理を用いてさらに有益な情報を得られる。人体の呼吸器、血管系、神経系の構造においても、フラクタルが見られ[1]、限られた範囲の中に、生命機能を効率的に発揮するのに必要な各種ネットワーク（血管、神経等）ができるだけ多く、合理的かつ効率的に配置されるようになっている。また、フラクタル次元とは、フラクタルの概念で用いられる指標で、パターンの粗密や入り込み具合の程度の差を定量化して数値で表したものである。

#### 3. 実験と結果

鰯(魚類)、鶏(鳥類)、ラット(哺乳類)、豚(哺乳類)の肝臓片を採取し、12  $\mu\text{m}$ の凍結切片を作成し、組織染色(ヘマトキシリン-エオジン染色)を行った。顕微鏡システム BZ-X810 を用い、肝細胞の蛍光像と組織染色像を合わせた像を取得した。得られた像の画像解析により肝細胞部分と血管部分の像を抽出し、それらのフラクタル次元を計測した。それぞれの種

で 14 サンプルを用い、比較した。その結果が図 1, 2 である。統計検定を行うことを通して、パターンの数理指標としてフラクタル次元を用いれば種間の違いを確認出来た。

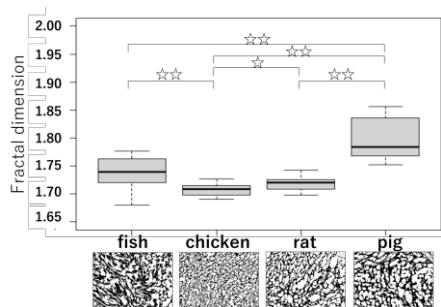


図 1: フラクタル次元の比較(細胞)  
(マンホイットニーの U 検定  
一☆: 5%有意 ☆☆: 1%有意)

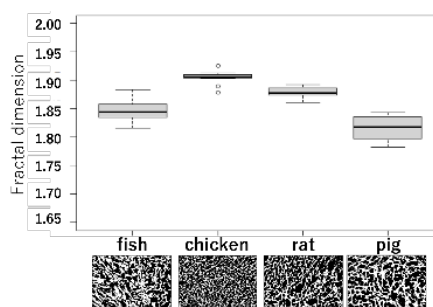


図 2: フラクタル次元の比較(血管)  
(マンホイットニーの U 検定において  
全ての組で 1%有意であった。)

#### 4. 数値計算

先で得た違いを生み出すメカニズムを考えるため、Diffusion Limited Aggregation (DLA) モデル [1] を基にして、多角形の頂点から細胞が生成される [2] という肝臓の生成過程を模したモデルを作成し、その解析を行った。元来の DLA モデルは、無限遠方から放出された 1 種のブラウン粒子が、中心のクラスターに接触するとすぐに固定される。対して、作成モデルでは現実に近づけるために、次の 2 つのパラメータを導入した。1 つ目は、2 種のブラウン粒子を導入し、毛細血管の割合を  $k$  (肝細胞の割合を  $1-k$ ) として設定した。2 つ目は、粒子の解離率を考えた。DLA モデルでは、クラスターに接触後すぐに固定されるが、ブラウン粒子がクラスターに接触しても運動を続ける割合を  $p$  ( $1-p$  で固定される) として設定した。これにより得たパターンの細胞部分と血管部分それぞれのフラクタル次元と、観察で得られたフラクタル次元の範囲を比較した。その結果、豚に関してはおおよそ適切に数値計算できていると考えられるが、鰯、鶏、ラットに関しては少し解離していると考えられる結果が得られた。これより、種間の違いは細胞と血管の割合の違いによるものと推測された。

さらに、3 次元構造から得られる結果と DLA モデルとは異なる細胞の数値計算に頻繁に使用されるフェーズフィールドモデルを用いた解析の結果から考察する。

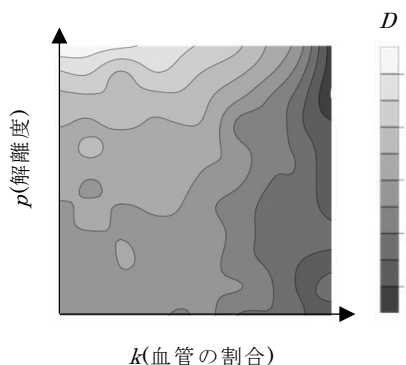


図 3: シミュレーションで得られる細胞パターンのフラクタル次元のノードプロット

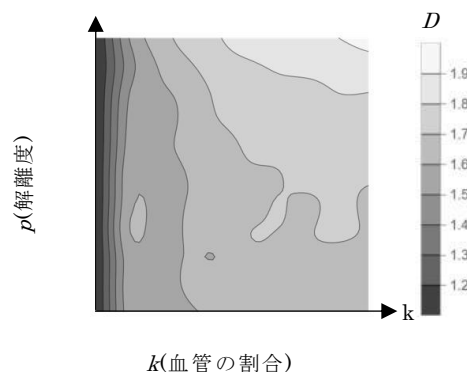


図 4: シミュレーションで得られる血管パターンのフラクタル次元のノードプロット

#### 参考文献

- [1] 松下貢 フラクタルの物理 (I) 基礎編 裳華房 2002
- [2] L.P. Gartner, J.L. Hiatt, Color Textbook of Histology, 2nd ed. 2001



## 盆栽の造形美の科学

### —自動撮影による 3D 化と骨格検出および Horton 則を活用した樹形分析—

内海忍<sup>\*1,†</sup>, 石井友一朗<sup>\*2</sup>, 小山賢晋<sup>\*3</sup>, 丈野仁寿<sup>\*4</sup>, 進聡一郎<sup>\*4</sup>, 岡田憲<sup>\*4</sup>,  
石丸大晟<sup>\*4</sup>, 松岡伸龍<sup>\*5</sup>, 田中聡至<sup>\*6</sup>, 阿部太一<sup>\*7</sup>

\*1 九州大学大学院総合理工学府 〒816-8580 福岡県春日市春日公園 6-1, \*2 神戸大学  
大学院理学研究科, \*3 九州大学大学院工学府, \*4 九州大学 工学部, \*5 熊本大学  
大学院自然科学部, \*6 independent researcher, \*7 福岡大学 大学院商学研究科

† utsumi.shinobu.787@s.kyushu-u.ac.jp

## The Science of Geometric Beauty of BONSAI

### —3D reconstruction and skeleton detection specialized in bonsai and tree structure analysis using Horton's Law—

Shinobu UTSUMI<sup>\*1,†</sup>, Yuichiro ISHII<sup>\*2</sup>, Kenshin KOYAMA<sup>\*3</sup>, Hitoshi JONO<sup>\*4</sup>, Soichiro SHIN<sup>\*4</sup>,  
Ken OKADA<sup>\*4</sup>, Taisei ISHIMARU<sup>\*4</sup>, Shinryu MATSUOKA<sup>\*5</sup>, Satoshi TANAKA<sup>\*6</sup>, Taichi ABE<sup>\*7</sup>

\*1 Interdisciplinary Graduate School of Engineering Sciences, Kyushu University, 〒816-8580,  
Kasuga-koen 6-1, Kasuga-city, Fukuoka, Japan, \*2 Kobe University, \*3,4 Kyushu University, \*5  
Kumamoto University, \*6 independent researcher, \*7 Fukuoka University

**Abstract:** We have recently launched a unique scientific project relating to bonsai, namely the BONSAIENACE project, which aims to expand the possibilities of bonsai culture by combining Japanese tradition and state-of-the-art technology. The project consists of the following four subclasses: (i) Reconstructing the 3D model of bonsai utilizing photogrammetric techniques, (ii) Developing the algorithm to detect the skeleton structure of bonsai, (iii) Quantifying and comparing the geometric information of the variety of bonsais using the original methods inspired by Horton's Law, and (iv) Developing the suggestion system of pruning and wire-working based on the tree structure analysis. Here, we summarize our recent activities and share further ideas.

**Keywords:** bonsai, 3D modeling, skeleton detection, morphological analysis, aesthetic

#### (1) 緒言

我々は盆栽の形の美を科学するプロジェクト—BONSAIENACE—を現在進めており[1], 伝統文化と最新テクノロジーの掛け合わせによる盆栽の魅力の拡張を目指している。具体的には (i)自動撮影による 3D 育成記録, (ii)盆栽特化の骨格検出アルゴリズム, (iii)独自の分析手法を用いた形の美の科学, (iv)剪定・針金掛けの科学的サジェストの 4 項目をそれぞれ開発・研究中である。本講演ではプロジェクトの概要および開発中のデバイスやアルゴリズム, 盆栽の樹形の解析手法を紹介する。

#### (2) 盆栽の 3D モデリング

盆栽の記録において, 現時点で最も用いられている手法は写真である。一方で, 盆栽の世界には「名木に裏表なし」という言葉もあり, 二次元の記録媒体である写真では盆栽の美しさを伝えきれない可能性がある。また盆栽取引では裏からの見た目・傷によって価値が大きく変動するため, 全方向からの正確な情報が必要となる。我々は, 三次元の構造体である盆栽を三次元のまま記録可能にするため, 3D Gaussian Splatting (3GS)[2]を用いた盆栽の 3D 化を考えた。3GS では三次元再構成のためにあらゆる方向から撮影した数百枚程

度の写真が必要となるが、手作業では手ブレや写り込みによって3D化精度の低下が懸念される。そこで、撮影を自動化するデバイスの開発にも注力してきた。図1に示す自動撮影デバイスでは盆栽を乗せている黒皿の下部が360°回転しながら、アーム先端に取り付けたカメラで撮影を行う。また、アームは弧を描きながら上下するため、異なる高さからでも常に中心を向いて、かつ、等しい距離からの撮影が可能である。



図1. 自動撮影デバイス

### (3) 盆栽の造形美への科学的アプローチ

どのような盆栽を人は美しいと思うのか。また、美しい盆栽とそうでない盆栽の違いは一体どこに表れるのか。一般に盆栽の美しさは根の張り方や幹肌の表情など幾つもの要素の総体として評価されるが、とりわけ盆栽全体の印象を大きく左右する「樹形」に関して、盆栽の3Dデータ化と適切な分析手法による定量的評価を行うことで、盆栽の美に関するこれらの問いにアプローチしようと考えている。図2には現時点で想定している盆栽3Dデータから樹形情報抽出までの流れを示した。まず、3GSで点群データに再構成した盆栽3Dモデル(図2a)から樹形に関する部分をクラスタリングで抜き出し(図2b)、分岐点と枝を点と線で結んだ「骨格」を作成する(図2c)。そして、骨格の3次元座標と枝の接続情報のデータを用いて、盆栽の構造的な情報を数値的に表現する(図2d)。樹形の評価指標には分岐情報、枝長さ情報、枝垂れ角度、枝間角度の4つを採用し、主枝と側枝の関係性を考慮して樹形を定量化するため、Hortonの法則[3]の考え方を活用した樹形解析手法を検討している。このうち分岐情報について、樹形の美しさの程度の異なる2種の盆栽に対して予備解析を実施したところ、分岐の自己相似性の高さに差があるという結果を得た。現時点では限られたサンプル数での解析結果であるため、これが盆栽の美として一般的な特徴であると断定できないが、種々の盆栽を解析して美しい盆栽の樹形の共通点を明らかにしたいと考えている。このように、これまで感覚に委ねられてきた盆栽の美に対して科学的にアプローチしていく。

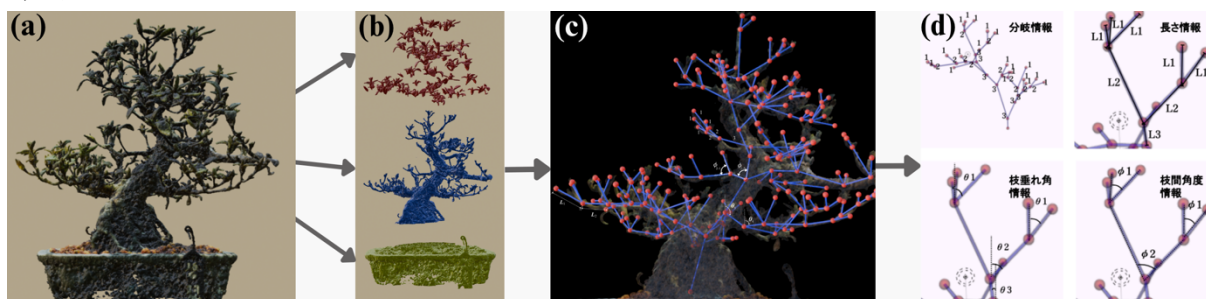


図2. 樹形解析手法の概念図。(a)実物の盆栽から作成した3Dモデル、(b)クラスタリングを用いた樹形部の抽出、(c)骨格検出、(d)4つの評価指標(分岐・長さ・枝垂れ角度・枝間角度)の測り方。

### (4) 結言

本プロジェクトでは、盆栽の3D化と骨格検出アルゴリズムの開発、およびHorton則を活用した樹形解析による盆栽の形の美の解明を進めている。しかし、盆栽によっては上記4種の指標では形状の美しさを十分に評価できない可能性もある。例えば幹の太さやうねりといった形状が特徴的な樹形の場合には、それらに関する指標も導入する必要があるだろう。BONSAIENCEでは多角的に盆栽の形を定量化し、盆栽の美しさの秘密に迫る。

本プロジェクトの社会実装への展開は講演にて紹介する。

参考文献 [1] <https://bonsaience.jp> [2] B. Kerbl, G. et. al., *ACM TOG*, vol. 42, no. 4, 2023. [3] Horton, R.E., *Geol Soc Am Bull*, 1945. 56(3): p. 275-370.

謝辞 本プロジェクトは、福岡未踏的人材発掘・育成コンソーシアムの支援を受けたものです。

## Horton 則を活用した系統樹の幾何学的特徴の解析法による 進化現象の特性の調査

石井友一郎

神戸大学 大学院理学研究科惑星学専攻 〒657-8501 神戸市灘区六甲台町 1-1

E-mail: 201s451s@stu.kobe-u.ac.jp

## Investigation of evolutionary phenomena through analysis of geometric characteristics of phylogenetic trees using Horton's law

Yuichiro ISHII

Department of Planetology, Graduate School of Science, Kobe University

1-1, Rokkodai-cho, Nada-ku, Kobe, 657-8501, Japan

**Abstract:** The branching patterns of phylogenetic trees represent the pathways of evolution. In this study, Horton's law and the bifurcation ratio ( $R_b$ ) were utilized as tools to quantify the topological properties of phylogenetic trees. Analysis of phylogenetic trees revealed three patterns of tree shape changes associated with evolution: (1) the maximum order ( $n$ ) remains constant and  $R_b$  increases, (2)  $n$  remains constant and  $R_b$  decreases, and (3)  $n$  increases by one and  $R_b$  decreases. An increase in the bifurcation ratio is interpreted as a state where well-evolved taxa coexist with those that have not evolved as much. A decrease in the bifurcation ratio is interpreted as a state where all taxa are experiencing evolution to a similar extent.

**Keywords:** phylogenetic trees, Horton's law, topology, evolution, branching objects

### (1) はじめに

系統樹は複雑な進化現象を、現生の分類群の1つが2つになる2分岐という位相的制約の下で表現したものといえる。その幾何学的特徴について、例えば枝数の変化は分類群数の変化を、枝の長さは存続期間や遺伝的距離を、枝の繋がり方は進化・多様化のパターンを表している。特に枝の繋がり方(位相的特徴)は進化の道筋を示すだけでなく、生物分類の際の判断材料の一つとして考慮されることもあるため[1]、重要な情報であるといえる。

一方で系統樹は複雑な図形であり、形の特徴をどのように定量化するのかが問題となる。Ishii(2023)[2]は Horton の法則[3]を活用して系統樹の位相的特徴の定量化を行い、分岐比( $R_b$ )、1次の枝の数( $N(1)$ )、最大次数( $n$ )を用いて系統樹の位相的特徴を議論した。本講演では文献[2]に基づいて系統樹の位相的特徴の定量化手法を紹介する。また、分岐比の値やその変化をどのように解釈するか、実際の系統樹の解析結果を示しながら議論する。

### (2) Horton の第一法則を用いた系統樹の位相的特徴の定量化

定量化の手順は①枝への次数付け、②分岐比  $R_b$  の計算の2つからなる。①の次数付けには Strahler(1952)[4]の方法を採用した。②の分岐比  $R_b$  の計算は、次数  $j$  と  $j+1$  の枝数  $N(j)$  と  $N(j+1)$  の比  $N(j)/N(j+1)$  の平均として以下の式によって計算した。

$$R_b = \frac{1}{n-1} \sum_{j=1}^{n-1} \frac{N(j)}{N(j+1)}$$

本研究は、Horton 則の考え方および法則成立を調査する手法を、系統樹の位相的特徴を定量化する方法として適用・発展させるものである。そのため Horton 則成立の可否によらず分岐比を求める。また Horton 則が成立しておらず枝数の比が次数  $j$  によって異なっていたとしても、それ自体も形の特徴であると考え、これを枝数の比の標準偏差で表す。

### (3) 系統樹を Horton 則の視点から見る

Horton 則の視点では、系統樹は図 1 のような階段状の樹形が基本形だと考えられる。これは最大次数が 2 の系統樹で、単系統群かつ単一の階段形状となっている系統樹に相当する。階段を作る枝の数が分岐比に相当する。複雑な系統樹(図 2)は複数の階段形状が階層構造になっていると考えられる。このとき分岐比は系統樹全体として平均的にどのような階段形状の階層構造になっているかを表す。また枝数の比の標準偏差は階層間で階段形状がどの程度異なっているかを表す。

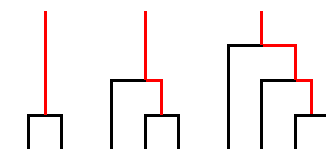


図 1 最大次数が 2 の系統樹の例。分岐比は左から 2, 3, 4 である。

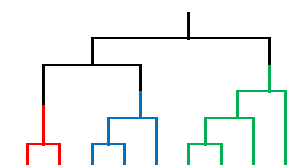


図 2 最大次数が 3 の系統樹の例。複数の階段形状の階層構造となっている。

### (4) 系統樹の位相的特徴の変化と進化

図 3 は哺乳綱(Mammalia)に含まれる科(family)[5]の系統樹、図 4 は進化に伴う系統樹の位相的特徴の変化を約 180 万年ごと解析してプロットしたものである。位相的特徴の変化パターンとして、枝の数が増えて樹形が変化するとき(1)  $n$  は変化せず  $R_b$  が増加する、(2)  $n$  は変化せず  $R_b$  が減少する、(3)  $n$  が 1 増加して  $R_b$  が減少する、の 3 つが観察された。

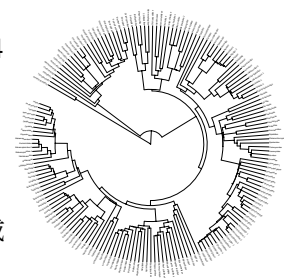


図 3 哺乳綱の科の系統樹([5]のデータから作成)

$R_b$  と樹形と進化の関係を考える。 $R_b$  の増加は、階段の段数が多くなったような非対称な樹形に近づく変化となる。これは、系統樹の中に進化を多く経験している分類群とそうでない分類群とが混在する、偏った進化が起こっている状態だと解釈できる。 $R_b$  の減少は、トーナメント図のような対称な樹形に近づく変化となる。これは、系統樹の中の分類群はどれも同程度進化を経験するような、均等な進化が起こっている状態だと解釈できる。

講演では他の分類群の系統樹や人工分岐図の位相的特徴も議論する。

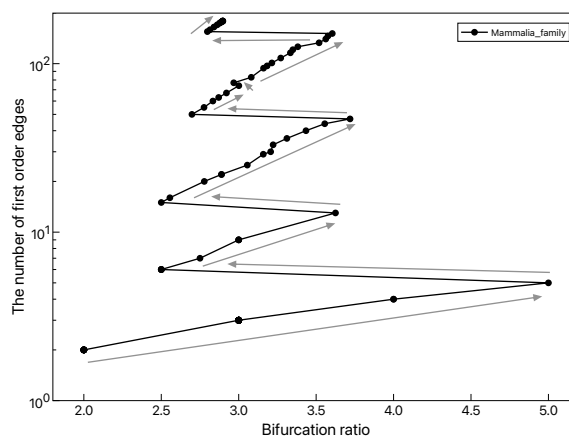


図 4 哺乳綱の科の系統樹の約 180 万年ごとの位相的特徴の変化

**参考文献, 注釈** [1]例えば International Code of Zoological Nomenclature Fourth Edition, ICZN はタクソンへの命名規約であるが、タクソンは共有派生形質を有する単系統群であるべきとの意見がある。どこまでが単系統群かは系統樹の樹形を見ることでも判断できる。[2] Ishii, Y., *J Theor Biol*, 2023. 562: 111419. [3] Horton, R.E., *Geol Soc Am Bull*, 1945. 56(3): p. 275-370. [4] Strahler, A.N., *Geol Soc Am Bull*, 1952. 63(11): p. 1117-1142. [5] Kumar, S., et al., 2022. TimeTree 5: An Expanded Resource for Species Divergence Times. *Molecular Biology and Evolution*, DOI: 10.1093/molbev/msac174.

**謝辞** 本研究は、JST 次世代研究者挑戦的研究プログラム JPMJSP2148 の支援を受けたものです。

# 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。

<http://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。

<http://www.scipress.org/journals/forma/>

## 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)、討論(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。

<http://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。 <http://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出来ます。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。我こそはと思う方は、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](mailto:yoshinori.teshima@it-chiba.ac.jp)

# 形の科学会 入会方法

入会資格は、形の科学的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。 <http://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。 <http://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. 9 No. 1 (2024年6月)

発行： 形の科学会

会長： 山口 喜博

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機械電子創成工学科  
TEL: 047-478-0645 FAX: 047-478-0575  
E-mail: yoshinori.teshima@it-chiba.ac.jp