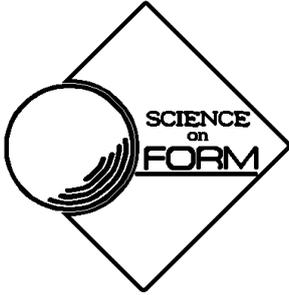


形の科学シンポジウム講演予稿集 Vol. 10 No. 2 (2025年11月)

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



第99回 形の科学シンポジウム 「動きをもたらすかたち」



個体の動きと細胞の動き：オオヒメグモの卵のう形成・胚発生・孵化（写真提供：藤原基洋博士）

会期：2025年11月29日(土)、30日(日)

会場：大阪大学 豊中キャンパス 全学教育推進機構

形の科学会

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

第99回 形の科学シンポジウム「動きをもたらすかたち」

【主催】形の科学会

【共催】大阪大学全学教育推進機構、学術変革領域研究(B)「植物スピニングラス」

【会期】2025年11月29日(土)、30日(日)

【会場】大阪大学 豊中キャンパス 全学教育推進機構 サイエンス・コモンズ ダイセルスタジオリーム560-0043 大阪府豊中市待兼山町1-16

【開催形式】対面とオンラインを併用

【代表世話人】北沢美帆 (大阪大学 全学教育推進機構)

E-mail: kitazawa.m.celas@osaka-u.ac.jp

【参加費】会員・非会員とも同額

対面参加： 一般4000円、学生1000円 (現地でのお支払い)

オンライン参加： 一般5000円、学生2000円 (振込でのお支払い)

【懇親会】11月29日18時半より石橋阪大前駅周辺で開催

【懇親会費】一般5000円、学生2000円

【WEBサイト】<https://katachi-jp.com/sympo99>

プログラム

(変更される場合があります)

点接触、無接触の考察～

三浦吉孝 (日産自動車) …………… 5

11月29日 (土)

9:30 受付

9:55 開会の辞

11:15-11:40 (25分間)

胸郭構造運動異常を説明する為の胸郭関節模型の開発

手嶋吉法 (千葉工業大学)、菊地五晃 (同)、後藤聡志 (同)、北岡裕子 (計算呼吸器学研究所) …………… 7

セッション1 形の科学一般

10:00-10:25 (25分間)

深成岩類の珪酸塩鉱物に記録されたマグマ分化末期の環境

川勝和哉 (姫路東高等学校) …………… 1

10:25-10:50 (25分間)

有限の対称性の近似と離散フーリエ解析

梶浦大起 (大阪商業大学) …………… 3

展示説明 (各5分間、質疑無し)

11:40-11:45 (5分間)

視覚障害者の為の解剖学模型の開発: 筋原線維模型、ネフロン模型、脳幹模型

印南竜大 (千葉工業大学)、寺口さやか (広島中央特別支援学校)、手嶋吉法 (千葉工業大学) …………… 9

10:50-11:15 (25分間)

星形多面体の3Dプリンタ模型 (第1報)～線接触、

11:45-11:50 (5分間)

2026年用の放散虫カレンダー

松岡篤 (新潟大学、千葉工業大学)、富田雄太

(イメージミッション木鏡社) …………… 11	14:55-15:05 (10 分間) 休憩
11:50-11:55 (5 分間)	【招待講演】
街区の空間利用効率に着目した道路網形態の定量的評価	15:05-15:55 (50 分間)
秋葉祐里 (山梨県富士山科学研究所)、佐藤太裕 (北海道大学) …………… 13	動く細胞のかたちとその数理的表現
	齊藤稔 (筑波大学) …………… 25
11:55-12:00 (5 分間)	15:55-16:05 (10 分間) 休憩
3D プリンタによる星形 12 面体・星形 20 面体模型の展示	<u>セッション 3 形と知</u>
三浦吉孝 (日産自動車) …………… 15	16:05-16:30 (25 分間)
12:00-13:15 (75 分間) 昼休憩	比率と数列による正三角形螺旋や正六角形模様
	中西真悟 (大阪工業大学) …………… 27
<u>セッション 2 メインテーマ「動きをもたらすかたち」</u>	16:30-16:55 (25 分間)
	アガペーの形と人の移ろい
13:15-13:40 (25 分間)	松下勝義 (広島大学) …………… 29
トポロジー最適化による微小血管網リモデリングメカニズムの解明	16:55-17:10 (15 分間)
土井仁智 (芝浦工業大学)、高嶋太陽 (同)、西方洸太郎 (同)、二井信行 (同) …………… 17	スマートセンサを用いたハーブサウナ浴の睡眠改善効果に関する予備的検討
13:40-14:05 (25 分間)	深見爽輝 (福井大学)、中山明峰 (めいほう睡眠めまいクリニック)、周景星 (小松貿易)、高田宗樹 (福井大学) …………… 31
クモの胚発生から節足動物の体軸形成の発生・進化過程を探る	17:10-17:25 (15 分間)
藤原基洋 (理化学研究所、JT 生命誌研究館)、秋山-小田康子 (JT 生命誌研究館、大阪医科薬科大学)、小田広樹 (JT 生命誌研究館、大阪大学) …………… 19	PoseNet を用いた映像ベース非接触呼吸モニタリングに関する基礎的検討
14:05-14:30 (25 分間)	三輪恭大 (福井大学)、西尾春哉 (同)、高田宗樹 (同) …………… 33
身近なクモの円網と螺旋形について	17:25-17:40 (15 分間)
海野啓明 (仙台高等専門学校名誉教授) …………… 21	分裂酵母 <i>Schizosaccharomyces pombe</i> における交配相手の非対称な認識精度機構は変動環境への適応から生ずる
14:30-14:55 (25 分間)	北條拓也 (東京大学、理化学研究所) …………… 35
アルキメデスの墓標 ※ 高次元版	18:30 懇親会 「海鮮炉ばた てんきゅう」
宮崎興二 (京都大学名誉教授) …………… 23	(講演会場から石橋阪大前駅方面へ徒歩 15 分)

11月30日(日)

セッション4 形の科学一般

9:00-9:25 (25分間)

ギーリス曲線の数理解析

松浦真也(愛媛大学) 37

9:25-9:50 (25分間)

置換パズルに関する研究: 最短コストの詳細

東汐夏(愛媛大学)、松浦真也(同) 39

9:50-10:15 (25分間)

アミノ酸分子がホモキラリティになる、大きな要因と考えられる、ウイルスカプシド構造の、ユニット折り紙シミュレーション

八十嶋章雄(SSDS Symmetric) 41

10:15-10:25 (10分間) 休憩

セッション5 形の科学一般

10:25-10:50 (25分間)

ジュラ・白亜系境界問題と放散虫の系統進化

松岡篤(新潟大学、千葉工業大学) 43

10:50-11:15 (25分間)

深層学習を用いた形態定量化手法: Morpho-VAE

堤真人(名古屋大学) 45

11:15-11:30 (15分間)

ハーブサウナ浴による睡眠-覚醒リズムの調整に関する基礎的研究

佐瀬空知(福井大学)、高田宗樹(同) .. 47

11:30-11:55 (25分間)

種内多型から解き明かすテントウムシの斑紋形成メカニズム

武田諒(広島大学) 49

11:55-13:25 (90分間) 昼休憩

セッション6 メインテーマ「動きをもたらすかたち」

【招待講演】

13:25-14:15 (50分間)

動きをもたらす「しかけ」のかたち

松村真宏(大阪大学) 51

14:15-14:40 (25分間)

理科の認知の発展を促すかたち

松浦執(東京学芸大学)、井戸季詠子(八王子市立いずみの森義務教育学校)、後藤勝洋(渋谷区立本町学園) 53

14:40-15:05 (25分間)

ピローボックスの体積最大化問題と等長変形

小磯深幸(九州大学) 55

15:05-15:15 (10分間) 休憩

セッション7 形の科学一般・Forum

15:15-15:40 (25分間)

仮想空間におけるジェスチャによる4次元物体操作システム

王逸飛(東京電機大学)、松浦昭洋(同)

..... 57

15:40-16:05 (25分間)

回転式開閉機構を有する簡易構造物に関する研究 --平板の枚数が偶数の場合--

小野聡子(近畿大学) 59

16:05-16:30 (25分間)

小脳顆粒細胞前駆細胞の増殖・分化・移動に伴う小脳形態形成のモデル化に向けて

二木啓(神戸市看護大学) 61

16:30-16:50 (20分間) *Forum

COVID-19患者数動態について数理モデルを用いた移動の効果に関する統計的解析

宮本望（関西学院大学）、昌子浩登（同）	63
------------------------------	----

16:50 開会の辞

【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

深成岩類の珪酸塩鉱物に記録されたマグマ分化末期の環境

川 勝 和 哉

兵庫県立姫路東高等学校（姫路市本町 68 番地 70）

kazuya-kawakatsu@hyogo-c.ed.jp

The environment at the final stage of magma differentiation recorded in the silicate minerals of plutonic rocks

Kazuya KAWAKATSU

Hyogo Prefectural Himejihigashi Senior High School

Abstract: In petrology, the process of magma differentiation is understood based on the shapes and compositions of minerals observed at present. The Oscillatory Zoned Structure discovered in amphiboles from plutonic rocks suggest that they may not preserve the conditions present during crystallization from magma. This structure indicates that once-crystallized minerals are secondarily replaced by hydrothermal solution formed under progressive oxidizing conditions.

Keywords: magma differentiation, Oscillatory Zoned Structure, hydrothermal solution, progressive oxidizing conditions

1. 研究の背景と目的

マグマ分化末期の環境の解明は基礎研究として重要であるが、マグマは開放系で分化するため全体像の解明は難しい。筆者はこれまで、マグマ分化末期の環境が記録されているとして、深成岩類の角閃石の波状累帯構造に着目して研究を行い、大東－横田花崗閃緑岩の角閃石から初めて波状累帯構造を発見した（[図1](#)）¹⁾。この構造は、マグマ分化末期のサブソリダス累進的酸化環境下で形成されたことを示した。その後、揖保川花崗閃緑岩や神戸花崗閃緑岩、さらには豪州 NSW 州南東部 Bingi Bingi Point 複合深成岩体閃緑岩の角閃石からも波状累帯構造を発見した（[図2](#)）。Bingi Bingi Point の閃緑岩には後から貫入したトータル岩マグマからの多量の熱水支脈と熱による反応縁がみられた。

本研究では、熱水残液が循環した（波状累帯構造が形成された）温度・圧力の推定を目的とした。雲仙普賢岳の噴火をはじめ、溶岩噴出の記録の解析から、マグマの脱ガスが噴火予知のポイントであることが指摘されている²⁾。マグマの脱ガスによる熱水残液循環の温

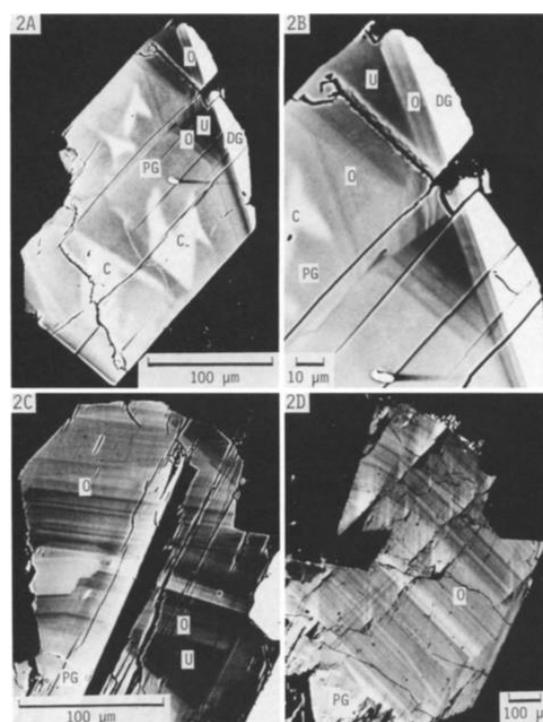


図1 大東－横田花崗閃緑岩の角閃石の波状累帯構造（反射電子線像）

度・圧力を推定できれば、噴火準備段階や噴火のダイナミクスを理解することができる。

2. 角閃石の分析結果

角閃石は自形～半自形で、多くの角閃石はコア部にパッチー累帯構造を、淡緑色リム部に波状累帯構造を発達させている (図3)。

角閃石の波状累帯構造の元素分析を行った結果、①波状累帯構造は、自形の黄鉄鉱やルチル、スフェーン、微細な磁鉄鉱とチタン鉄鉱と共存し、②酸化的環境下でみられる Edenite 型の組み合わせ置換が優勢である、③マグマの飽和・脱水を経験した角閃石の特徴である Al^{VI} が 0.6 以下である、④M1-M3 サイトの Fe^{3+} が、このサイトの $Na+Ti+Fe^{3+}$ の半分以上を占める、⑤ $Fe^{2+}/(Fe^{2+}+Mg)$ 値が 0.18~0.50 と低い、⑥ $Mg/(Mg+Fe_{total})$ 値がコア部から淡緑色リム部に向けて減少する、⑦コア部からリムに向かって $Fe^{2+}/(Fe^{2+}+Fe^{3+})$ が減少する、⑧淡緑色リム部の C1 が微量である。

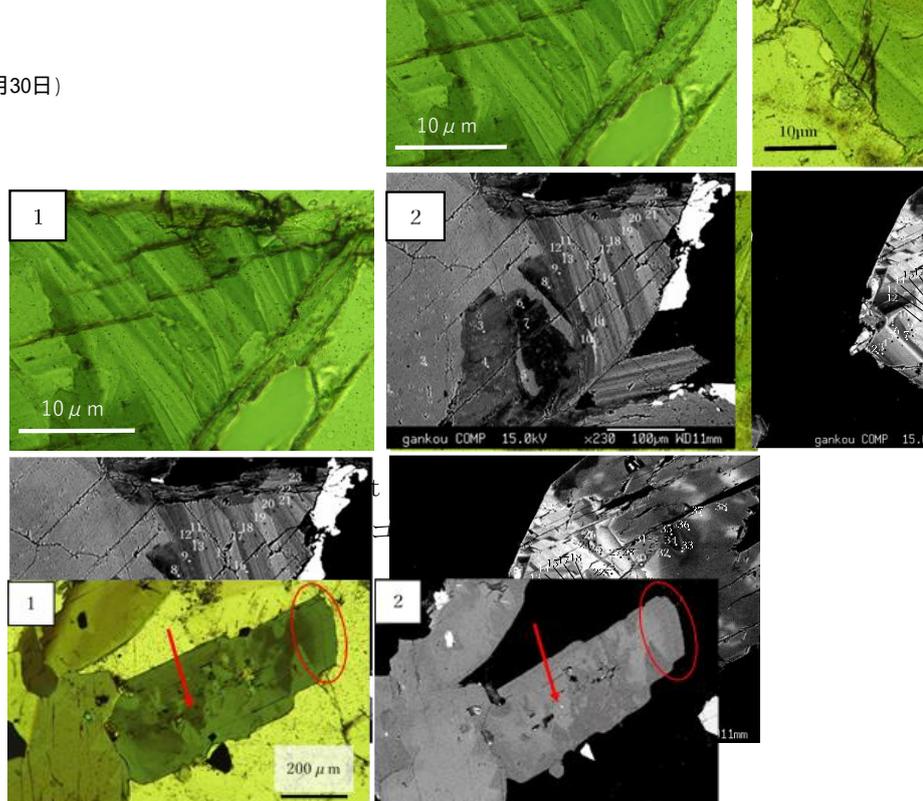


図3 パッチー (矢印) と波状累帯構造 (円内)
(1 : オープンニコル、2 : 反射電子線像)

3. 考察と展望

角閃石リム部の Ti による推定温度は、外縁部に向かって 640°C から 545°C まで次第に低下していく。角閃石の Al による推定圧力は、外縁部に向かって、1.7 kbar (1.7×10^6 hPa) から 1.0 kbar (1.0×10^6 hPa) へと低下する。波状累帯構造を発達させた角閃石のリム部と共存する斜長石とアルカリ長石の化学組成から平衡温度を求めると、1.0 kbar (1.0×10^6 hPa) 条件下で 400°C 以下、10 kbar (1.0×10^7 hPa) でも 500°C 以下を示した。これらはサブソリダス環境を示す。自形角閃石のリム部で共存する純度の高い黄鉄鉱と磁鉄鉱、チタン鉄鉱の鉱物組合せから、マグマ分化末期の酸素分圧およびイオウ分圧は、 $\log fO_2 = -19.5 \sim -19.0$ 、 $\log fS_2 = -3.5 \sim -2.5$ と推定される。

角閃石が自形であることから角閃石はマグマ分化過程早期から晶出しており、コア部にパッチー累帯構造が見られることからマグマ分化早期に急速に成長した。その後玄武岩マグマの混入による酸化剤の役割を果たす多量の H_2O や SO_2 の供給によってマグマは発泡し酸化が進行した。角閃石の波状累帯構造は熱水残液循環の指標となる可能性がある。

参考文献

- 1) K. Kawakatsu and Y. Yamaguchi, Successive zoning of amphiboles during progressive oxidation in the Daito-Yokota granitic complex, San-in belt, southwest Japan, *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 51(3), 535-540, 1987.
- 2) 山口佳昭・近藤均, 雲仙火山 1991 溶岩の石基ガラス中の隠微晶質鉱物, 日本火山学会講演予稿集, 1994.

有限の対称性の近似と離散フーリエ解析

梶浦 大起¹

¹大阪商業大学, 大阪府東大阪市御厨栄町 4-1-10

hkajiura@daishodai.ac.jp

Approximation of finite symmetries via discrete Fourier analysis

Hiroki Kajiura¹

¹Osaka University of Commerce, 4-1-10 Mikuriya Sakaemachi,
Higashiosaka-shi, Osaka

Abstract: We study approximation from a mathematical perspective. It appears in block designs, error-correcting codes, and quasi-Monte Carlo methods and is an important topic in both pure and applied mathematics. In this talk, we consider approximation problems that arise in analysis and combinatorics and quantify their quality via discrete Fourier analysis. We describe representations of “good approximations” as graph-theoretic or geometric configurations.

Keywords: finite group, difference set, harmonic analysis, association scheme

1. はじめに

我々は「近似」, すなわち部分的な構造であって, その全体と非常に「似ている」ものに興味がある。実際, 対象を調べる際に, 全体をくまなく調べ上げるには非常に時間やコストがかかる。そこで, 部分的な構造で「全体と非常に似ている」ものを選び出すことで計算や時間コストを減らそうという試みである。この問題意識は範囲も歴史も深く, 例えば以下のような問題たちがよく知られている:

問題 1 (ブロックデザイン[1]) n 種類の飲み物を飲み比べて意見をもらうアンケートを取りたい。 n が十分に大きいとき, 一人で飲み切るのは不可能なので n 種類の中からいくつかを飲んでもらうことになる。このとき, 色々な人にできる限り被りのない組み合わせで飲んでもらうことが重要である。そのような組み合わせの選び方で (一旦飲み合わせを無視して) 最良のものをブロックデザインと呼ぶ。

問題 2 (誤り訂正符号[1]) 有限集合 X の n 個の組 X^n の部分集合 C であって, 以下の条件を満たすものを d -free code と呼ぶ:

「相異なる任意の 2 元 $x, y \in C$ であって x と y が同じ座標で異なる値を取るのが d 以下」

特に $X = \{0, 1\}$ としたものは誤り訂正符号と呼ばれ, コンピュータ上の通信やデータの記録などの間違いを検知・修正するのに使われている。

問題 3 (準モンテカルロ法[3]) ある空間 X 上の函数のなす空間 \mathcal{H} に含まれる函数 f と有限部分集合 Y に対して積分誤差 $\text{Err}(f; Y)$ を以下で定める:

$$\text{Err}(f; Y) := \left| \int_X f(x) dx - \frac{1}{|Y|} \sum_{y \in Y} f(y) \right|$$

このとき、 Y をランダムに選ぶことで $O(1/\sqrt{|Y|})$ のオーダーで収束することが知られている。 \mathcal{H} を適切に設定してこれよりも早い速度で収束するような Y を構成するような分野を準モンテカルロ法 (QMC) と呼ぶ。例えば、 $X = [0, 1]^n$ で函数の空間を正規分布のなすような函数たちの族などに設定したものは、金融工学などへの応用を持つ。

このように、全体を近似する手法はあらゆる分野で用いられており、数学的にも古くから色々と調べられている。

2. 有限の対称性を用いて全体を近似する方法

ここでは、本発表における中心的な研究手法の紹介として、発表者等が[2]や[3]で導入した離散フーリエ解析を用いた対称性の近似度合いの分析手法について述べる。[3]は以下のような問題について考えている：

問：有限群 G の等質空間 X の部分集合 Y について、全体を近似している度合いを求める尺度 $D(Y)$ を作れ。

有限群とは、有限の対称性を集めたものであり、等質空間とは非常に対称性が高い図形やグラフのことを言う。[3]ではこのような問に対し、対称性によるフーリエ解析の理論を用いて QMC 的な意味付けによる尺度 $D(Y)$ を定義し、それが[2]で導入した等分布集合という概念と一致することを示した。

3. 本発表で報告する問題

本発表では、前節の先行研究をモチベーションから説明しながら、等分布集合における以下のふたつの問題について、考察した結果を報告する：

- **問 1：**様々な幾何学的な図形やグラフにおいて等分布集合を定義せよ。
- **問 2：**グラフ Y をひとつ与える。そのグラフが等分布集合となっているような図形やグラフを与えよ。

問 1 はシンプルな近似の問題である。逆に問 2 は近似の逆問題と言えるような問題であり、ある意味で「粗い形のものに対して、形状を保ったままより精密な形として記述する」といった問題のバリエーションと考えることもできる。また、これらの問題に対して、実際に図形やグラフを計算して得られた結果もいくつか紹介したい。

参考文献：

- [1] 坂内 英一, 坂内 悦子, 伊藤 達郎, 『代数的組合せ論入門』, 共立出版(2016).
- [2] H. Kajiura, M. Matsumoto, T. Okuda, *Non-existence and Construction of Pre-difference Sets, and Equi-Distributed Subsets in Association Schemes*, Grph. & Comb. 37(2021), 1531-1544.
- [3] H. Kajiura, M. Matsumoto, T. Okuda, *Approximation of integration over finite groups, difference sets and association schemes*, J. Alg. Comb. 58(2023), 1-23.
- [4] 鈴木 航介, 合田 隆, 『重点解説 モンテカルロ法と準モンテカルロ法』, サイエンス社(2025).

星形多面体の 3D プリントモデル (第 1 報) ～線接触、点接触、無接触の考察～

三浦 吉孝

日産自動車株式会社 神奈川県厚木市岡津古久 560-2

yoshi-miura@mail.nissan.o.co.jp

3D-Printed Models of Stellated Polyhedra (Part I) ～Considerations on Line, Point, and Non-Contact Conditions～

Yoshitaka Miura

Nissan Motor, 560-2 Okatsukoku, Atsugi, Kanagawa 243-0192, Japan

Abstract: There has been a long history of research on stellated polyhedra, and many 3D images have been published. While numerous beautiful paper craft models exist, examples of 3D-printed models are still limited. One of the challenges in designing stellated polyhedra is that their faces may be in line contact, point contact, or non-contact with each other. The design constraints also involve connecting shapes and ensuring sufficient strength while preserving the original geometric form. This paper presents a design methodology for creating 3D-printed models of stellated polyhedra based on previous fabrication approaches. This is the first report in the series.

Keywords: 3D-printed model, Stellated polyhedra, Icosahedra, Design, Contact condition

1. はじめに

星形多面体の研究には長い歴史^[1]があり 3D 画像も公開されている。一方、模型という観点から見ると美しいペーパークラフト^[2]は存在するものの、3D プリントによる模型事例は十分とは言えない。星形多面体の模型製作の難しさの一つは、面同士が線接触、点接触、無接触することである。設計制約には原形を維持した連結形状や強度の課題も現れる。本論では先行模型製作を参考に 3D プリント前提の設計手法を論議する。本報告は第 1 報である。

2. 星形多面体の3D プリント造形の難しさ

星形 20 面体はコクセターら^[3]によって 59 種類が提示されている。その中には図 1～図 3 に示すような線接触、点接触、無接触を含む星形があり、3D プリント造形が困難である。ここではオリジナル形状に対し最小限の変更を試みる。線接触の星形多面体に対しては角錐内側へ厚みを付与し、点接触には角錐間に微小な連結部を追加する手法を考案した。

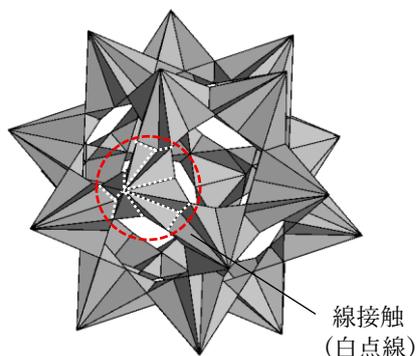


図 1 星形 20 面体 10 f_1

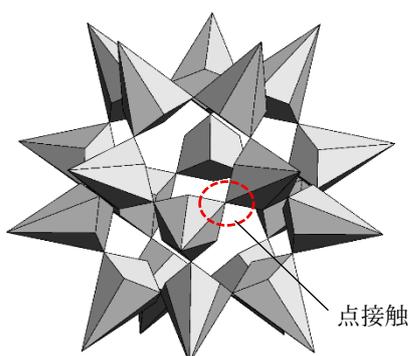


図 2 星形 20 面体 9 e_1

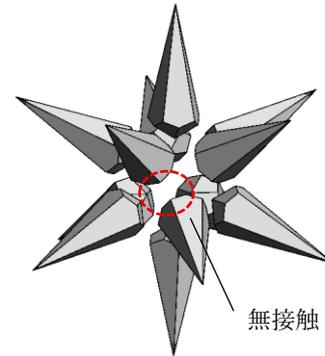


図 3 星形 20 面体 16 f_2

3. 星形多面体の3D プリント造形戦略

表1に、星形多面体の名称と諸量^[4]、点接触、線接触、無接触などを含む構造的特徴、および、それらに対応した設計手法を含む3D プリント造形戦略(部分)を示す。

表1 星形多面体諸量と3D プリント造形戦略(部分)

名称 歴史	クレネル番号	-	-	-	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	
	デュバル記号	-	-	-	B	C	D	E	F	G	H	e ₁	f ₁	g ₁	e ₁ f ₁ g ₁	f ₁ g ₁	e ₂	f ₂	g ₂	e ₂ f ₂ g ₂	e ₂ f ₂ g ₂	f ₂ g ₂		
	名称	小星形12 面体	大星形12 面体	大 12面体	3方6辺 20面体	5面,8面体 複合	-	-	-	大 20面体	完全 20面体	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	発見年	1619		1810	1900			1938	1924	1810	1900	1938		1924	1938	1924	1938		1924	1938				
	発見者	ケプラー		ポアンソ	ブルックナー			コクセター	ウィーラー	ポアンソ	ブルックナー	コクセター		ウィーラー	コクセター	ウィーラー	コクセター		ウィーラー	コクセター				
オリジナル	シュレーフリ,コクセター記号	[5/2,5]	[5/2,3]	[5,5/2]	-	[5(3,4)] 2(3,5)	-	-	-	(3,5/2)	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
	トポロジー	頂点数V	12	20	12	32	30	-	-	-	12	60	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
		辺数E	30	30	30	60	60	-	-	-	30	90	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
		面数F	12	12	12	20	40	-	-	-	20	20	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
		V-E+F=2	-6	2	-6	-8	10	-	-	-	2	-10	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	構造	星座図セル数	5	5	5	3	6	9	15	15	9	9	24	9	21	18	21	15	6	15	15	24	24	
		中実・空洞	中実	中実	中実	中実	中実	中実	中実	中実	中実	中実	空洞	空洞	空洞	空洞	空洞	空洞	空洞	空洞	空洞	空洞	空洞	空洞
無接触		-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	無接触	-	-	-	-	
点接触		-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	点接触2	-	点接触3	-	-	-	点接触2	-	点接触3	点接触2	点接触3	点接触3	
3Dプリンタ	設計手法	連結部追加	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	連結部	-	連結部	-	-	連結部	連結部	連結部	連結部	連結部	連結部	
		厚み追加	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	厚み	-	厚み	-	厚み	厚み	-	厚み	-	-	
	造形仕様	分割線	2	2	2	3	2	2	2	2	2	2	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	2	1
		谷線線	谷線線	谷線線	5角形 谷線線	谷線線 + 8面体正方形 谷線線	谷線線	谷線線	谷線線	谷線線	谷線線	谷線線	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	連結部	-
	先行 模型	三浦, 形の科学会 シンポジウム#99展示, 13個	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
Wenninger, Polyhedron Models, 20個		○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	

4. 星形多面体の3D プリント造形 実施例

図4、図5に、線接触、点接触の星形多面体の透視図と3D プリント模型写真^[5]を示す。オリジナル形状と区別のため、デュバル記号の後に printable の意味の-prt を付与した。

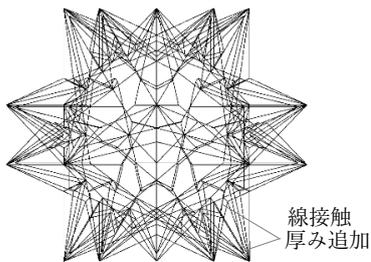


図4.1 星形20面体 10f₁-prt

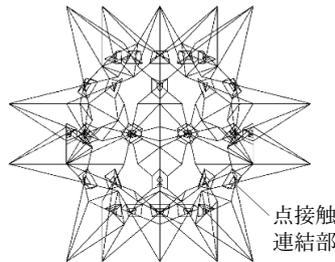


図4.2 星形20面体 9e₁-prt

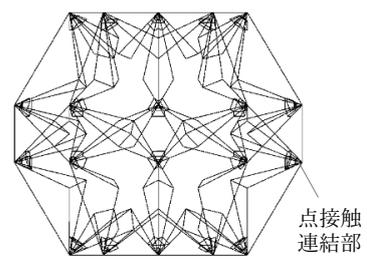


図4.3 星形20面体 11g₁-prt



図5.1 3D プリント模型 10f₁-prt



図5.2 3D プリント模型 9e₁-prt



図5.3 3D プリント模型 11g₁-prt

参考文献

- [1] P.R. Cromwell, *POLYHEDRA*, Cambridge University Press, 1997
- [2] M.J. Wenninger, *Polyhedron Models*, Cambridge University Press, 1971
- [3] H.S.M. Coxeter, et al. *Fifty-Nine Icosahedra*, University of Toronto press, 1938
- [4] 宮崎興二, 多面体百科, 丸善, 2016
- [5] 三浦吉孝, 星形多面体 3D プリント模型, <https://ameblo.jp/miura7110/>

胸郭構造運動異常を説明する為の胸郭関節模型の開発

手嶋吉法¹、菊地五晃²、後藤聡志²、北岡裕子³

千葉工業大学 工学部¹宇宙・半導体工学科、²機械電子創成工学科

〒275-0016 千葉県習志野市津田沼 2-17-1

³計算呼吸器学研究所 〒173-0001 東京都板橋区本町 6-3-406

An entity model of the human thoracic cage with movable joints for understanding abnormal respiratory motions due to the thoracic structural abnormalities

Y. TESHIMA^{1,*}, I. KIKUCHI¹, S. GOTOH¹, and H. KITAOKA²

¹Chiba Institute of Technology, ²Computational Respiratory Research Institute

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

Abstract: We have recently found that the pleuropulmonary fibroelastosis, a rare lung disease with severe respiratory failure, have joint abnormalities in the thoracic cage that is strongly related to thoracic respiratory motion disorder. Because conventional thoracic entity models have no movable joints and respective bones (the sternum, ribs, and thoracic vertebrae) are completely fixed. Therefore, we have developed an entity model of the human thoracic cage with movable joints which reproduces respiratory motion.

Keywords: respiratory motion, pleuropulmonary fibroelastosis, thoracic cage, thoracic joints, Tietze syndrome

1. はじめに

肺は心臓と同様、周期的に形を変えることで流体を輸送する臓器である。心臓は筋組織からなり、自律的に拡張収縮して血液を輸送するが、肺には筋組織はなく、肺を取り囲んでいる胸郭と横隔膜が動くことで肺内の空気が出入りする。したがって、胸郭もしくは横隔膜の運動が損なわれると呼吸機能が障害され、肺の構造も変化する。吸気による肺容積の増加の70-80%は横隔膜の収縮が担うので、横隔膜の運動障害は直ちに重篤な換気不全をもたらすが、胸郭の運動障害で損なわれる換気能力は1/4程度にとどまるので、長期間にわたって徐々に換気障害が進行すると推測される。

胸膜肺実質線維弾性症(pleuropulmonary fibroelastosis: 以下PPFE)は原因不明のまれな肺疾患で、両側上肺野が徐々に無気肺になり数年後には重症の呼吸不全に陥る。我々は近畿中央呼吸器センターのPPFE症例の吸気呼気CT画像を解析し、胸郭の諸関節の異常な石灰化と胸郭運動障害を呈する例が約半数存在することを見出した[1]。PPFEの主要な病因として胸郭の構造異常による呼吸運動異常が考えられた。しかし、呼吸器科医には胸郭の構造と運動に関する知識はほとんどない。また、既存の胸郭の実体モデルは各々の骨の結合は固定されて全く動かない。本稿では胸郭の構造と運動について解説し、我々が作成したモデルを供覧する。

2. 胸郭の構造と動き

胸郭は胸骨と肋骨、胸椎とこれらを結合する関節からなる(図1)。

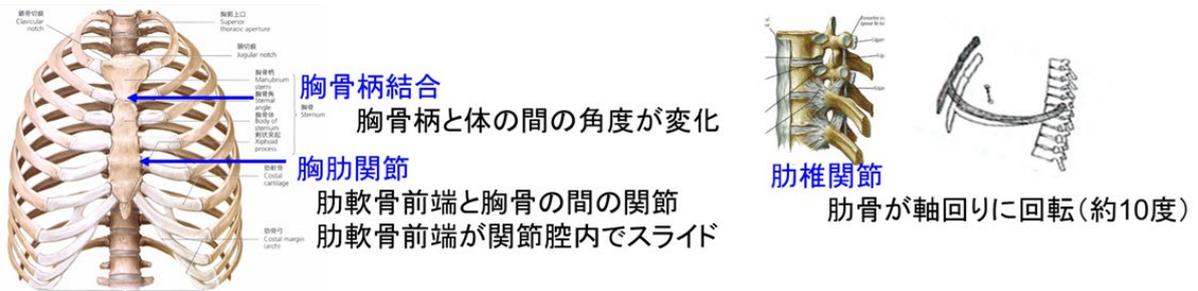


図1. 胸郭の構造と各々の骨を連結する関節

椎肋関節は、12 個の胸椎と 12 対の肋骨との間の関節で、各々の肋骨は肋骨頭と肋骨頸を結ぶ線を軸として回転運動をする[2]。胸肋関節は第1-7肋軟骨の前端と胸骨の肋骨切痕の間の関節である。第一関節は軟骨結合で、直接胸骨と結合しているが、第2-7関節は関節腔を有し、呼吸運動の際に肋骨の回転運動に対応して肋軟骨の前端が回転する[3]。胸骨柄結合は胸骨柄と胸骨体との間の線維軟骨結合で関節腔はないが、呼吸運動に応じて柄と体との角度(=胸骨角)が変化する[3]。これらの関節に異常があれば胸郭の運動に支障が生じる。

強直性脊椎炎にPPFEを合併することはよく知られており、椎肋関節が冒される。胸肋関節と胸骨柄結合を侵す疾患として Tietz 症候群が知られており、関節リウマチなどの付着部炎との関連が推測されている。

3. 胸郭構造運動模型の開発

以上の知見をもとに、正常な胸郭運動を明示する為の簡略化した胸郭関節模型を設計し、3Dプリンターで実体化した(図2)。

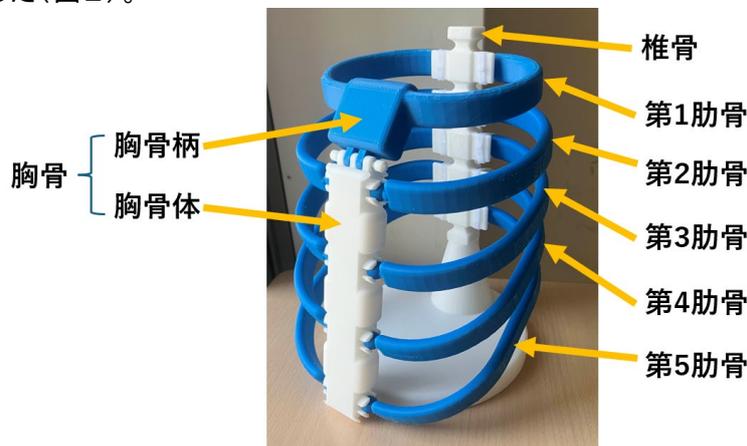


図2. 胸郭関節模型(2024年度版)

現在、正常な胸郭関節模型の改良版を作成中である。さらに今後は、関節部の運動を制限することにより、病的状態に対応した実体模型の開発に取り組む予定である。

謝辞: 臨床画像データをご提供頂いた(独)近畿中央呼吸器センター滝本宜之医師に感謝する。

参考文献

- [1] 滝本宜之、他. 第5回日本びまん性肺疾患研究会抄録集 2005: p60.
- [2] De Troyer, et al. Physiological Reviews 2005: 85, 717-56.
- [3] Beyer B et al. J Biomech 64; 32-40, 2017.

視覚障害者の為の解剖学模型の開発： 筋原線維模型、ネフロン模型、脳幹模型

印南竜大¹、寺口さやか²、手嶋吉法^{1*}、

¹千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

²広島県立広島中央特別支援学校 〒732-0009 広島県広島市東区戸坂千足二丁目 1 番 4 号

Development of anatomical models for the visually impaired: myofibril model, nephron model, and brainstem model

R. INNAMI¹, S. TERAGUCHI², Y. TESHIMA^{1*},

¹ Chiba Institute of Technology, ² Hiroshima Central Special Support School

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

Abstract: We have been developing tactile 3D teaching materials that are useful for the visually impaired when learning anatomy. This time, we developed a myofibril model, a nephron model, and a brainstem model.

Keywords: additive manufacturing, anatomical 3D model, simplified shape, tactile 3D model, tactile teaching material

1. はじめに

視覚特別支援学校の理療科においては、あん摩マッサージ指圧師や、はり師きゆう師を目指す生徒は、人体の構造と機能を理解するために解剖学を学ぶ必要がある。我々は、視覚障害者が触察で学ぶ為の立体模型の開発を行っている[1]。設計および造形する際、模型を適切なサイズで提供することと臓器の形状を適度に簡略化することが重要である。実物大の市販模型や解剖学の専門書を参考に、また理療科教員からの要望に沿って形状を簡略化し、卓上サイズの模型を開発した。

2. 筋原線維模型の開発

筋原線維とは、筋肉内にあるアクチンとミオシンを主成分とする筋収縮を行う為の蛋白質の束である。本研究では 2023 年度に開発された筋原線維模型[1]の改良を行った(図1)。ミオシンフィラメント(赤色)を2個増やし、土台を頑強にした。

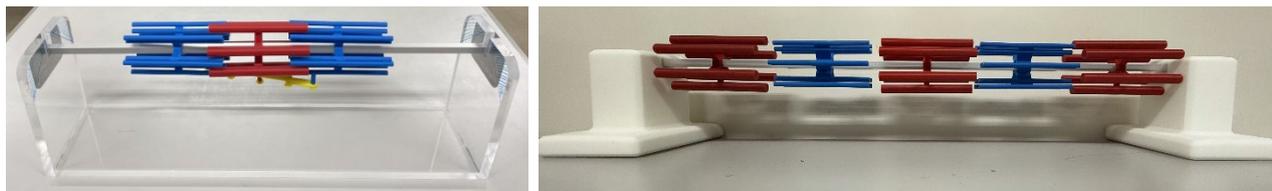


図1 筋原線維模型：(左) 改良前 (右) 改良後

3. ネフロン模型の開発

ネフロンとは、腎臓内部にあり血液から老廃物や余分な物質を取り除き、尿として排出する組織のことである。理療科教員からの改良要請を受けて、2023年度のネフロン模型の遠位尿細管と輸入細動脈の距離を近づける設計変更を行った(図2)。

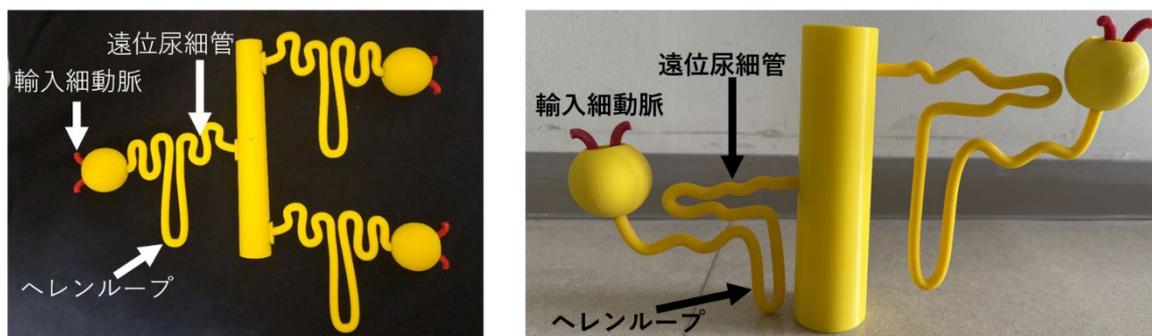


図2 ネフロン模型：(左) 改良前、(右) 改良後

4. 脳幹模型の開発

脳幹とは、大脳と脊髄をつなぐ、生命維持に不可欠な役割を担う脳の一部である。脳幹は、間脳、中脳、橋、延髄の4つから構成され、呼吸や心拍、血圧などの自律機能を制御する。理療科教員からの要望により、脳室を構成する側脳室、第三脳室、中脳水道、第四脳室が明確になるように簡略化をおこない、設計した(図3)。



図3 脳幹模型

(左) 脳室模型、(中央) 脳幹と脳室を組み合わせた様子、(右) 脳幹模型を分割した様子

5. まとめ

筋原線維模型の改良では、ミオシンフィラメントの個数を増やし、土台を頑強にした。ネフロン模型では、遠位尿細管と輸入細動脈の距離を近づける改良を行った。今回新たに開発した脳幹模型は、脳室と脳幹の各部位を簡略化して設計し、脳幹を分割可能な模型とした。

参考文献

- [1] 手嶋、篠田、川端、土居、寺口、視覚障害者が解剖学を学ぶ為の立体教材の開発、形の科学シンポジウム講演予稿集、第9巻2号(2024) pp. 7-8.

2026 年用の放散虫カレンダー

松岡 篤^{1,2}・富田 雄太³

¹新潟大学理学部/形の科学研究センター、新潟市西区五十嵐 2 の町 8050

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

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

³株式会社イメージミッション木鏡社、静岡市葵区水落町 9-10

2026 Calendar of Radiolaria

Atsushi MATSUOKA^{1,2} and Yuta TOMITA³

¹Faculty of Science, Niigata University, Niigata, 950-2181 Japan

²Chiba Institute of Technology, Narashino, Chiba, 275-0016 Japan

³Image Mission Inc., Shizuoka, 420-0831 Japan

Abstract: A radiolarian calendar for the year 2026 is prepared and is available for sale on line and at major museums in Japan. Radiolarian calendars are expected to enhance a degree of social recognition of radiolarians. The 2026 Calendar illustrates color images of 25 living radiolarian species collected from surface waters in the East China Sea off Okinawa.

Keywords: radiolaria, calendar, 2026, social recognition, Okinawa

はじめに

放散虫カレンダーは、2017年に開催された第15回国際放散虫研究集会（InterRad 15）を宣伝する目的で2017年用が試作され、その後、毎年、イメージミッション木鏡社により制作・販売されている[1]。2026年用の放散虫カレンダー（図1）について紹介する。

放散虫カレンダー

2026年用カレンダーには、沖縄近海の東シナ海から得られた放散虫生体のカラー画像が使用されている。扱われている25種はこの海域に多産する種であり、スプメラリア目13種とナセラリア目12種からなっている。既報のカタログ[2]に種名と殻の光学顕微鏡ならびに電子顕微鏡画像が掲載されており、顕微鏡観察の際の参考資料としても使用することができる。

文献

- [1] Ito, T., Matsuoka, A., Yokoyama, H., Kawashima, T., Kanchiku, T., Tomita, Y. and Maehata, N., *Forma*, 39(1), S15–S23, 2024.
- [2] Matsuoka, A., *Science Reports, Niigata University (Geology)*, 32, 57–90, 2017.



図 1. 東シナ海産の放散虫生体を用いた2026年用カレンダー。

街区の空間利用効率に着目した道路網形態の定量的評価

秋葉祐里¹, 佐藤太裕²

¹山梨県富士山科学研究所, 〒403-0005 山梨県富士吉田市上吉田字剣丸尾 5597-1

²北海道大学大学院工学研究院, 〒060-0813 北海道札幌市北区北 13 条西 8 丁目

¹akiyuri@mfri.pref.yamanashi.jp

Quantitative Evaluation of Street Pattern Morphology Based on the Spatial Utilization Efficiency of Urban Blocks

Yuri Akiba¹, Motohiro Sato²

¹Mount Fuji Research Institute, Yamanashi Prefectural Government, 5597-1 Kenmarubi, Kamiyoshida, Fujiyoshida, Yamanashi 403-0005, Japan

²Faculty of Engineering, Hokkaido University, Kita 13, Nishi 8, Kita-ku, Sapporo, Hokkaido 060-8628, Japan

Abstract: The morphology of street patterns arises from the complex interplay of multiple factors, including topography, climate, population density, and urban development history. To elucidate the dominant factors shaping these networks, we propose a spatial utilization efficiency index ψ that integrates the aspect ratio and area-weighted normalization of urban blocks. Using datasets from Shinjuku, Sapporo, and Fujiyoshida, we analyzed ψ distributions derived from QGIS and Python. The results reveal distinct regional patterns, providing insights into the underlying mechanisms that govern the evolution of street pattern morphology.

Keywords: Street pattern, Urban block, Spatial utilization efficiency, Aspect ratio

1. はじめに

道路網によって形成される網目構造はその街の骨格であり、その幾何学的な特徴は地形、交通需要、都市開発史など多様な要因の動的な相互作用を反映している。そのため道路網が示す幾何パターンを読み解くことで、道路網の構造形成メカニズムが理解できる可能性がある^[1]。従来研究では、道路網の連結性や経路代替性など流路機能に注目されたものが多い。しかし、道路を増やすほど土地は細分化され、街区（道路で囲まれた一区画）は小さくなり、細長く歪んだ形状も生じるため、街区の内部空間は利用しにくくなる。そのため、街区の形状と面積の双方を考慮した「空間の使いやすさ」を評価する指標が必要である。本研究では、街区の形状と面積に基づいて空間利用効率を定量化する新たな指標を提案し、異なる都市の比較分析を通じてその有効性を検証した。

2. 空間利用効率

街区は形状がいびつであるほど、また面積が小さいほど土地利用が制約される。既往研究では、街区の外接円面積に対する街区面積の比 **Shape factor** が用いられてきた^[2]が、これは円形に近い形を高く評価するため、本研究の目的には適さない。そこで本研究では、形状の細長さを評価できる指標として「アスペクト比」に着目した。街区を最小外接長方形で近似し、短辺／長辺の比をアスペクト比とした。この形状指標に対して、面積を対数正規化した重みを導入し、次式で表される空間利用効率指標 ψ を定義した。

$$\psi = \left(\frac{b}{a}\right) \times \frac{\ln A - \ln A_{\min}}{\ln A_{\max} - \ln A_{\min}}$$

ここで a は街区の長辺、 b は短辺、 A は街区面積、 A_{\min} 、 A_{\max} は解析対象内の最小・最大面積である。 ψ が大きいほど利用しやすい街区であることを意味する。今回は異なる地域間での比較を行うため、 ψ の値による絶対評価ができるように、 $A_{\min} = 10^2 \text{ m}^2$ 、 $A_{\max} = 10^5 \text{ m}^2$ で固定した。

3. 研究方法

対象地域は、都市規模や地形条件の異なる3地域（東京都新宿区周辺、北海道札幌市中央区、山梨県富士吉田市）とした。国土地理院の基盤地図情報から各地域で $10 \text{ km} \times 10 \text{ km}$ 範囲の道路ラインデータを取得し、地理情報システムのソフトウェア QGIS (ver. 3.40) でポリゴン化することで街区データを作成した。各街区の面積と頂点座標を出力し、Python によりアスペクト比の計算と面積の正規化を行い、空間利用効率 ψ を算出した。

4. 結果・考察

地域ごとに ψ 分布に顕著な差異がみられた。東京では 0.23 付近に明瞭な単峰性のピークが表れた。これは、小面積で細長い街区が多いことを示しており、道路網ネットワークが発達した都市の特徴である可能性が高い。札幌では 0.28 および 0.58 付近にピークが表れる二峰性を示した。このことは、街区面積が小さくなりやすく、アクセス面での利便性も兼ね備えた計画的な都市開発に起因するものと考えられる。富士吉田では裾が重い単峰性を示した。これは、山地に囲まれた地域特有の傾向だと考えることができる。これらの結果は、空間利用効率 ψ が都市形態の地域特性を定量的に表現できることを示唆している。

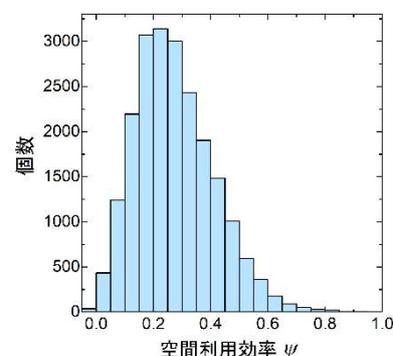


図 1. 東京都新宿区周辺の空間利用効率

5. まとめ

本研究では、街区形状と面積に基づいて空間利用効率を評価する指標 ψ を提案した。この指標は、従来のトポロジ的な解析では捉えにくい形態的特徴を捉えることを可能にしており、地域特性の比較や土地利用計画において新たな評価基準となり得る。今後は、空間利用効率 ψ と都市の発展段階や流路機能との相関関係を精査し、道路網形態の形成メカニズムの解明に向けて取り組んでいきたい。

謝辞

本研究は大林財団 2024 年度研究助成、JSPS 科研費 24K17370 の助成を受けたものです。

参考文献

- [1] Y. Akiba, S. Wang, M. Sato and H. Shima, “Impact of land-use difference on block-size distribution in Tokyo”, *J. Phys. Soc. Jpn* **92**, 104801, (2023).
- [2] S. Lämmer, B. Gehlsen and D. Helbing, “Scaling laws in the spatial structure of urban road networks”, *Physica A* **363**, 1, pp.89-95 (2006).

3D プリンタによる星形 12 面体・星形 20 面体 模型の展示

三浦 吉孝

日産自動車株式会社 神奈川県厚木市岡津古久 560-2

yoshi-miura@mail.nissan.o.co.jp

Exhibition of 3D-Printed Models of Stellated Dodecahedra and Icosahedra

Yoshitaka Miura

Nissan Motor, 560-2 Okatsukoku, Atsugi, Kanagawa 243-0192, Japan

Abstract: The study of stellated polyhedra has a long history, and many 3D images are widely available. Although elegant paper craft models have been created, examples of 3D-printed models remain limited. In this study, ten models of stellated dodecahedra and icosahedra are exhibited.

Keywords: 3D-printed model, Stellated polyhedra, Dodecahedra, Icosahedra

1. はじめに

星形多面体の研究には長い歴史があり 3D 画像も公開されている。一方、美しいペーパークラフト^[1]は存在するものの、3D プリンタ模型の事例は数少ない。ここでは星形 12 面体と星形 20 面体の模型、合計 10 点を展示する。今回は第 1 回目の展示である。

2. 3D プリンタによる星形多面体の模型

図 1～図 10 に、3D プリンタ造形の星形多面体の模型を示す。製作準備では小林・鈴木の凸多面体データ^[3]やコクセターの星座図^[2]に基づき各頂点座標を算出し造形データとした。鉛直自立しない星形には台座を設定した。3D プリンタ模型の設計的考察は別途報告^[4]する。

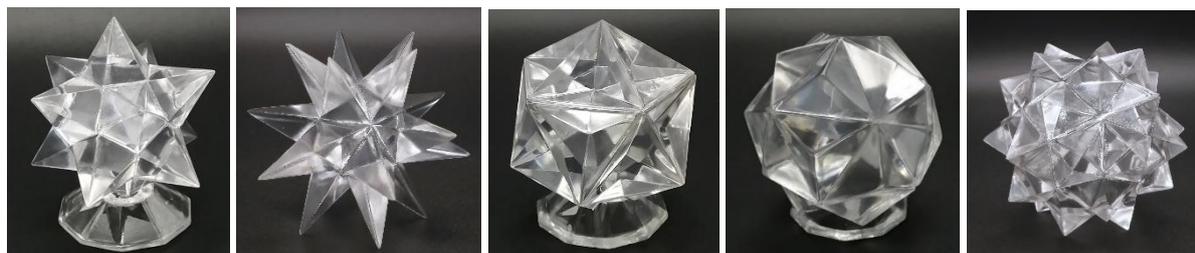


図 1 小星形 12 面体

図 2 大星形 12 面体

図 3 大 12 面体

図 4 星形 20 面体 2B

図 5 星形 20 面体 3C

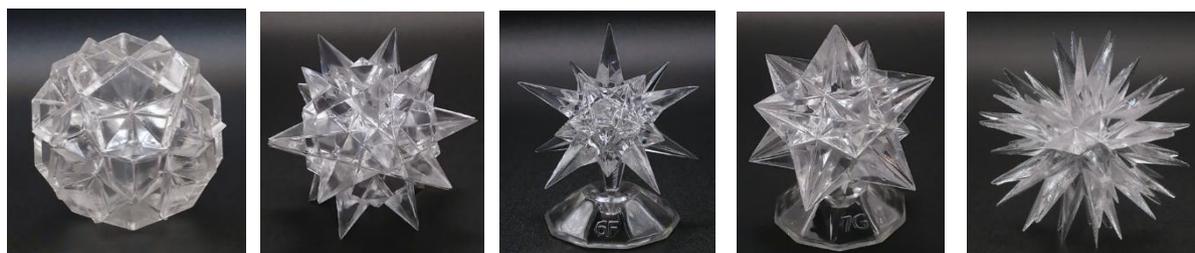


図 6 星形 20 面体 4D

図 7 星形 20 面体 5E

図 8 星形 20 面体 6F

図 9 星形 20 面体 7G

図 10 星形 20 面体 8H

参考文献

[1] M.J. Wenninger, *Polyhedron Models*, Cambridge University Press, 1971

[2] H.S.M. Coxeter, et al. *Fifty-Nine Icosahedra*, University of Toronto press, 1938

[3] 小林光夫, 鈴木卓治, 正多角形を面にもつすべての凸多面体の頂点座標の計算, 電気通信大学紀要, 1992

[4] 三浦吉孝, 星形多面体の 3D プリンタ模型 (第 1 報), 形の科学シンポジウム#99 予稿集, 2025

トポロジー最適化による微小血管網リモデリングメカニズムの解明

土井仁智¹, 高嶋太陽¹, 西方洸太郎², 二井信行²

¹ 芝浦工業大学大学院理工学研究科機械工学専攻, ² 芝浦工業大学工学部

〒135-8548 東京都江東区豊洲 3-7-5 芝浦工業大学

E-mail : aa20055@shibaura-it.ac.jp

Elucidation of Microvascular Network Remodelling Mechanisms through Topology Optimisation

Kimisato Doi¹, Taiyo Takashima¹, Kotaro Nishikata², Nobuyuki Futai²
Shibaura Institute of Technology, 3-7-5 Toyosu, Tokyo 135-8548, Japan

Abstract: Topology optimization of a cultured vascular network revealed a simplified structure minimizing energy dissipation. While differing from observed remodeling, the pruning of low-flow branches was reproduced, suggesting shared principles between biological adaptation and mathematical optimization.

Keywords: Spontaneous vascular network, Remodeling, Topology Optimization

1. 緒言

血管網は、生体組織への物質供給を担う重要な輸送ネットワークであり、環境や機械的刺激に応じて形態を最適化するリモデリングという過程を有する。この過程はランダムな変化ではなく、輸送コストの最小化^[1]や組織内への物質輸送の均一化^[2]といった、機能的目的に基づいて進行すると考えられている。しかし、微小血管網のリモデリングメカニズムは、依然として十分に解明されていない。本研究では、培養血管網の初期形態にトポロジー最適化^[3]を適用することで、輸送コストを指標とした最適ネットワーク形状を算出した。さらに、トポロジー最適化後の形態を実際のリモデリング後の血管網と比較し、輸送コストがどの程度血管リモデリングを説明するかを検証した。

2. 方法

Fig.1 に示す点字マイクロ流体駆動を備えた On-Chip Incubation デバイス^[4] を用いてヒト臍帯静脈内皮細胞(HUVEC)を培養し、Fig.1c に示す微小血管網を形成した。形成された血管網の位相差画像を撮影後、MATLAB(Math Works, USA)上でメッシュデータに変換した。その後、式(1)-(2)に示すように、Navier-Stokes 方程式を支配方程式とし、式(3)の散逸エネルギー J を最小化するようにトポロジー最適化を行った。数値計算には COMSOL Multiphysics(COMSOL Inc, Sweden)を用いた。

$$\rho \nabla \cdot \mathbf{u} = 0 \quad (1)$$

$$\rho(\mathbf{u} \cdot \nabla) \mathbf{u} = -\nabla p + \nabla \cdot \mu(\nabla \mathbf{u} + (\nabla \mathbf{u})^T) - \alpha(\gamma) \mathbf{u} \quad (2)$$

$$J = \int_{\Omega} 2\mu S : S + \alpha(\gamma)(\mathbf{u} \cdot \mathbf{u}) d\Omega \quad (3)$$

ただし、 \mathbf{u} , p はそれぞれ流速、圧力を示し、 ρ , μ , S , Ω は密度および粘度、ひずみ速度テンソル、計算領域を表す。加えて、 $\gamma(\mathbf{x}) \in [0,1]$ はトポロジー最適化における設計変数であり、

$\alpha(\gamma)$ は設計変数 $\gamma(x)$ に依存する抵抗係数を表す.

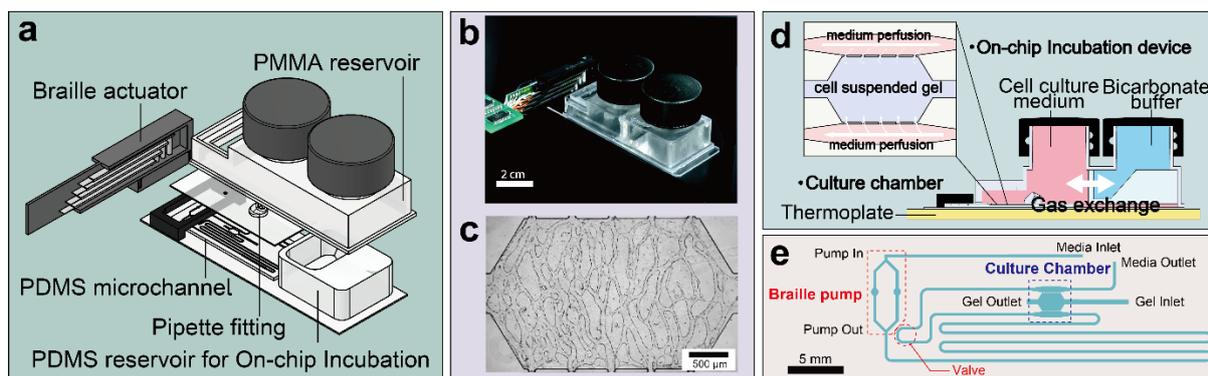


Fig.1 On-Chip Incubation デバイス. (a)マイクロ流体デバイスの構造. (b)点字セルが取り付けられたデバイスの外観. (c)培養血管網の位相差画像. (d) On-Chip Incubation の概要. (e)マイクロ流路のレイアウト.

3. 結果

培養された初期血管網の構造に対して、散逸エネルギーの最小化を目的としたトポロジー最適化を実施した. その過程において、流量が小さい細い分枝から順に消失していき、リモデリングにおける刈込現象に類似した挙動が確認された. 刈り込み現象は、局所的な血行力学的条件に応じた選択的な構造変化の一種であり、これが散逸エネルギーの最小化の観点で説明できると推測される. 一方、得られた最適構造は主幹の輸送路のみを残し、分枝構造が大幅に簡略化された形状であり、実際のリモデリング後構造と比べて著しく単純であった. これは、生体の血管構築が単なる輸送効率最適化だけでは説明できない可能性を示唆する.

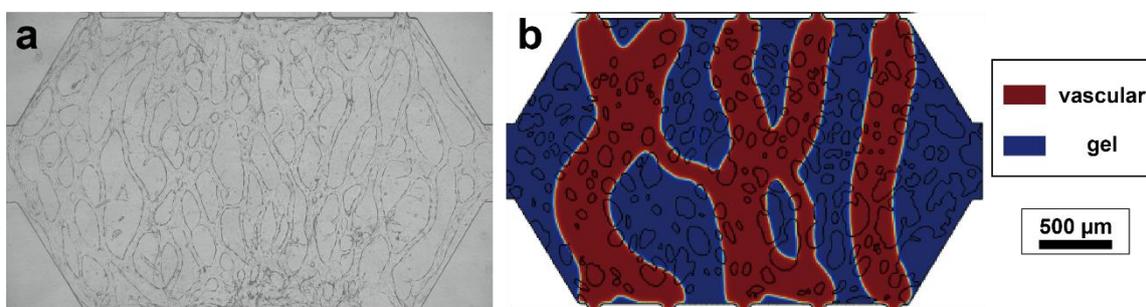


Fig.2 実際の血管網との比較. (a)35 日間培養した血管網の位相差画像. (b)トポロジー最適化の結果.

4. 結論

本研究では、実際の培養血管網から取得した画像ベースのジオメトリを用い、散逸エネルギー最小化を目的関数としたトポロジー最適化を実施した. 得られた血管網構造から、生体血管が輸送効率以外にも均一な栄養供給など複合的な要請を反映している可能性を示すことがわかった. 今後は、拡散均一性や物質消費反応を目的関数に組み込み、より生理学的に整合する構造の導出を目指す.

- [1] Chang, S.S. et al. J. Theor. Biol. 460, 20-26 (2019).
- [2] Gavrilchenko, T. and Katifori, E. Phys. Rev. Lett. 127, 7, 078101 (2021).
- [3] K. Oishi, T. Otani and S. Wada, 計算力学講演会講演論文集, 36, 0S-1815 (2023).
- [4] K. Nishikata et al. Micromachines, 16(1), 14 (2024).

クモの胚発生から節足動物の体軸形成の発生・進化過程を探る

藤原基洋^{1,2}、秋山-小田康子^{2,3}、小田広樹^{2,4}

¹理研・BDR、兵庫県神戸市中央区港島南町 2-2-3

²JT 生命誌、大阪府高槻市紫町 1-1

³大阪医科薬科大、大阪府高槻市大学町 2 番 7 号

⁴大阪大・院・理、大阪府豊中市待兼山町 1-1

¹ motohiro.fujiwara@riken.jp

Insights from Spider Embryogenesis to the Developmental and Evolutionary Mechanisms of Body Axis Formation in Arthropods

Motohiro Fujiwara^{1,2}, Akiyama-Oda Yasuko^{2,3}, Oda Hiroki^{2,4}

¹RIKEN・BDR、2-2-3 Minatojima Minamimachi, Chuo-ku, Kobe, Hyogo

²JT・BRH、1-1 Murasaki-cho, Takatsuki, Osaka

³OMPU、2-7 Daigaku-cho, Takatsuki, Osaka

⁴Osaka Uni・Grad・Sci、1-1 Machikaneyama-cho, Toyonaka, Osaka

Abstract: In multicellular organisms, the formation of the body axis is a crucial developmental process that establishes the anterior-posterior, left-right and dorsal-ventral axes. In arthropods, the early embryonic processes that lead to body axis segmentation have diversified, with differences observed at cellular and molecular levels among species. It is challenging to address how arthropod developmental diversity arose during evolutionary process due to the experimental and temporal constraints of evolution. To understand these processes in arthropods, we performed simulation analyses using a multicellular mathematical model based on spider embryogenesis. This model simulates the processes that form the body axis and the repetitive patterns that form the basis of 'arthropod-like' characteristics. This study is theoretical research that insights from spider embryogenesis to the developmental and evolutionary mechanisms of body axis formation in Arthropods.

Keywords: body axis formation, arthropod evolution, spider embryogenesis, mathematical model

生物のボディプランとなる体軸の形成

多細胞動物は 20 以上の門から成り、それぞれが異なる基本的なボディプランを持つ^[1]。ボディプランの形成は、細胞集団の増殖と分化や移動と再配置、細胞間の相互作用を通して達成されるが、これらはゲノム情報と細胞の力学的作用により制御されている^[2]。ゲノム情報は親から子へ受け継がれるが、世代を経るごとに変化しうるものであり、体軸の形成過程は、門の形質を崩すことなく多様化することができる^[3]。生物の進化の過程で、このような体軸形成過程の変化がどのように起こりうるかは、動物の多様性の起源を理解する基本的な問いである。

節足動物門の体軸の形成過程

節足動物門の動物(図1A)における初期胚発生は、体軸形成とその分節化によって特徴づけられる^[4]。これまでの発生生物学研究により、胚発生過程における遺伝子の発現パターンは保存されているにもかかわらず、体軸形成と分節化のプロセスとメカニズムは種によって大きく異なることが明らかになった^[5]。例えば、クモの初期の胚発生過程は、胚の形状の変化に種ごとに違いが見られる(図1B)。多くの場合、組織の形態形成ダイナミクスは遺伝子発現のパターン形成を伴っている^[6]。節足動物の胚における体軸の分節化に伴う空間的に周期的なしま模様形成は、動的な細胞場における遺伝子発現のパターン形成過程の代表的な例を示している。これらの研究では、周期的なしま模様を生み出すために様々な様式で振る舞う遺伝子発現の「波」が着目されている^[7]。

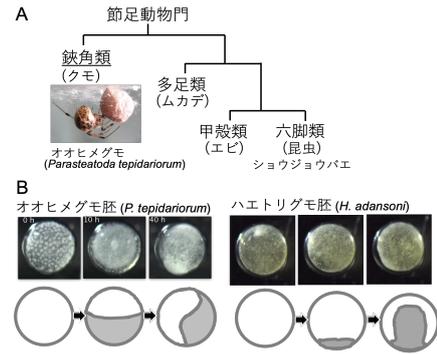


図1 A: 節足動物門の系統樹と B: クモの種による胚発生の違い Oda et al. (2000)

クモの初期の胚発生過程と「節足動物らしさ」を形成する数理モデル

クモは、節足動物の初期に枝分かれした鋏角類のグループに属し、進化的に重要な位置にある(図1A)。クモのグループの中で、オオヒメグモはモデル生物として、胚発生の研究に用いられている。オオヒメグモ(*P. tepidariorum*)胚の初期から中期にかけての多細胞構造の胚発生(図2A)と同時に、遺伝子発現のパターニングが起こる^[8](図2B)。数理モデルを使用して追求する価値のある重要な目標の1つは、活発な再配列をする細胞集団において、異なる遺伝子ネットワークによって制御される様々な遺伝子の発現パターン形成過程を再構築することである。そこで、胚を形成する個々の細胞において遺伝子発現に対応する複数の分子を持つ単純な遺伝的ネットワークを組み込んで、「節足動物らしさ」の基盤となる体軸と反復パターンを形成する数理モデルを構築した。この遺伝子発現のパターン形成と胚の発生過程を組み合わせたシステムを用いて、進化過程として親の胚でのシミュレーションの結果による細胞性質のパラメータを次世代に引き継がせる進化シミュレーションを行うことができる(図3)。このような数理モデルを活用し節足動物の初期の胚発生に見られる多様化の進化過程を理論生物学的に検証していく。

参考文献

- [1] Brusca and Brusca 2003 [2] Willmore 2012 [3] Forgacs and Newman 2005 [4] Galis et al. 2002 [5] Scholtz and Wolff 2013 [6] Peel et al. 2005 [7] Akiyama-Oda and Oda 2020 [8] Hemmi et al. 2018

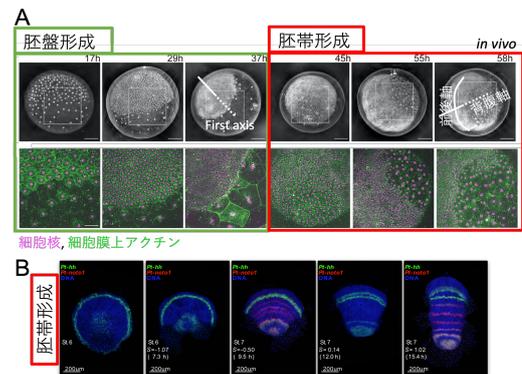


図2 オオヒメグモの初期の胚発生過程
A: 球状胚から胚盤形成を経て胚帯形成までの過程。
B: 胚帯形成過程での遺伝子発現パターンの形成。
Fujiwara et al. (2022), Hemmi et al. (2018)

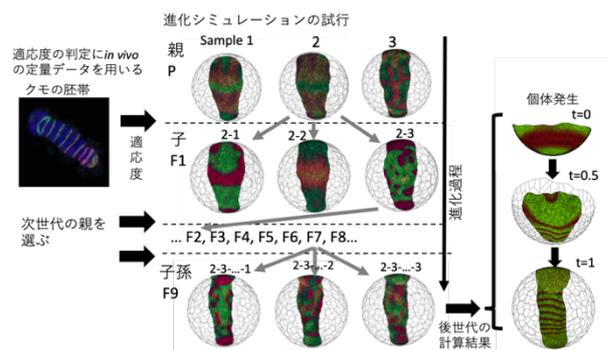


図3 数理モデルによる発生過程の進化シミュレーション
数理モデルでの胚発生の結果が親から子へ変異しつつ引き継がれ、一連の進化が起きる。

身近なクモの円網と螺旋形について

海野啓明

仙台高等専門学校 (名誉教授)

keimei.kaino@gmail.com

On Spider's Spiral Web and Its Spirals

KAINO, Keimei

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

Abstract: A young spider (*Neoscona nautical*) built a web under a lamp shade of a round fluorescent light in our living room this August. She weaved at night every two days and stayed the daytime hiding place of the lamp shade. Radii were distorted during her spinning the auxiliary spiral but became straight after completing the vicid spiral. Her web are represented by using Archimedean spiral.

Keywords: Archimedean spiral, Auxiliary spiral, *Neoscona nautical*, Radii, Vicid spiral.

1. はじめに

今年の5月初めに里山を歩くとゴヨウツツジの葉が展開せずに成長していた(図1)。このツツジは枝先に5枚の葉が輪生状につく。その「葉だたみ」は、葉が両側の縁を左右同じく裏側に巻き込み、5枚の葉がその中脈を合わせて芽の中に収まる。その葉だたみが展開していなかった。見ると図1のように細かい糸で上から下まで何回も巻かれて、中を開けると橙色の幼虫が入っていた。芽の段階で糸が巻かれたとすると、葉の成長と共に糸は数倍は伸びていると思われる。幼虫は不明なので、参考として図2のナガコガネグモの張力-伸び曲線を見ると、クモの糸の縦糸(放射糸)は力学的強度は強いが伸びは40%、横糸(粘着糸)は力学的強度は弱い190%まで伸びる[1]。ゴヨウツツジに巻かれていた糸は、クモの横糸の伸びの性質を持っていると思われる(図3参照[2])。これがクモの糸に興味を持つきっかけであった。朝の散歩で近くの草むらに行くとクモの不規則網に露がついて虹色に輝き(図4左)、山道や庭にはジョロウグモの網が見られる(図4右)。クモの生態についてはファーブル(1823-1915)の『昆虫記』[3](英訳は“The Life of Spider”(Project Gutenberg, 1912))の観察記録をはじめとした膨大な研究成果がある。本論は、仙台市の社会学級で企画された「大人の自由研究」のテーマとして発表した「身近なクモの網について」の内容からなる。



図1. ゴヨウツツジの巻かれた葉

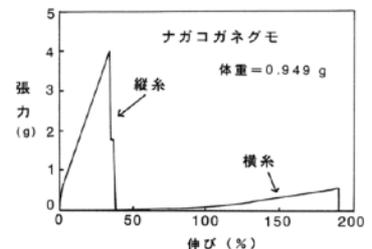


図2. ナガコガネグモの縦糸と横糸の張力-伸び曲線

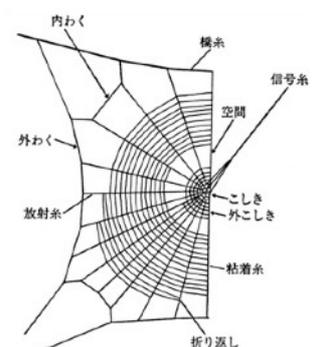


図3. 通常円網の構造[2]



図4. 不規則網とジョロウグモのひづめ形網 (一部)

の自由研究」のテーマとして発表した「身近なクモの網について」の内容からなる。

[1] 大崎茂芳：日本家政学会誌, 66 (2015) pp.521-528.

[2] 吉倉真：クモの不思議 (岩波書店, 1982) p.92.

[3] ファーブル, 奥本訳：ファーブル昆虫記 第9巻上 (集英社, 2014) pp.172-193.

2. オニグモの円網の作り方

オニグモの円網の構造の用語を図3に示す。円網の作り方について文献2の説明を引用する。
 「(1) まず、橋糸をかけてから、網作りにとりかかるが、ざっと放射糸をかけてから枠をつくり、あとで放射糸をふやしていく。放射糸をかけ終わると、網の骨組みができあがる。(2) クモはこしきを出発し、内から外へ、らせんを描きながら足場糸を一々放射糸にかけていく。この場合は決して折り返しはしない。枠までくるとクモはそこで一息いれる。(3) クモは先にかけて足場糸を逆にたどりながら粘着糸を放射糸に丹念にかける。その時には、用のなくなった足場糸を切っていく。網の下方でたびたび折り返しをやり、捕虫の範囲をひろげる。こしきの近くまで行くと、まだ粘着糸をかける空間(あきま)がかなりあるのに、そこをわたってこしきへ帰る。」(図解は文献4参照)。

今年8月7日にイエオニグモが現れて室内の蛍光灯に円網を作った。クモは日中は蛍光灯の傘に潜み、夕方になると出てきて2日おきに網を張り替えた。この時、放射糸と粘着糸を漉いてゴミを丸めて落とし、糸を食べてから新しく円網を張る。脱皮は8月15日と9月6日の2回あり、2回目の脱皮後に姿を消した。この間の円網の観察結果を図を用いて示す。

図5の写真は、放射糸をかけ終わってから、粘着糸を2本かけたところである。粘着糸は枠からかけられていて下方に折り返しが見られる。放射糸は直線状でなく少し伸びて歪んでいる。円網は垂直で、スイッチひもが外わくに利用されている。

図6の写真は、粘着糸をかけ終わり、クモはこしきに頭を下にして居るところ。足場糸は直線状になる。これは、粘着糸がかけられるときに足場糸が取り除かれるので、粘着糸の伸縮性により放射糸が縮むからであろう。また、図6に見える放射糸上の白い点々は、取り除かれた足場糸の跡である。放射糸は25本、粘着糸は66本であるので糸と糸の付着箇所は1650、これにこしきと折り返しの付着箇所を加えると約2000になる。

図7の写真は1回目の脱皮直後につけられた円網である。放射糸は約16本、粘着糸は32本で、通常の網より小さい。その前に2日間傘に潜んでおり、絶食と脱皮によりクモが体力を消耗したためであろう。なお抜け殻はゴミとして捨てられた。

図6の円網は楕円形であるがアルキメデスのらせん形で近似すると、円形蛍光灯の傘の半径は21cmで円網の半径は約6cmであるから粘着糸の総長は約12mになる。この近似では、円網は $r = a(\theta/360^\circ)$ と表される。ここに、 r は糸の半径、 a はらせんを一回転したときの半径の増分、 θ は糸の回転角(度)を表す。試みに、こしきと粘着糸では $a = 2$ 、足場糸では $a = 10$ 、円網の半径を50、こしきと足場糸は反時計回り、粘着糸では時計回りとした途中の円網を図8に示す。粘着糸と足場糸の交差は粘着糸の本数だけあることが分かる。なお、粘着糸の建設の終了条件、および粘着糸と外こしきの間の空間ができる理由は興味深い問題である。

【謝辞】昆虫学者の田中一裕先生と中田兼介先生から有益なコメントを頂きました。愛子小社会学級の澤村範子さんにも感謝します。

[4] 池田博明編：クモの巣と網の不思議，増補改訂版(夢工房，2013) pp.146-151.



図5. 足場糸に粘着糸をかけたところ



図6. 円網完成後こしきに居るところ



図7. 脱皮直後の円網

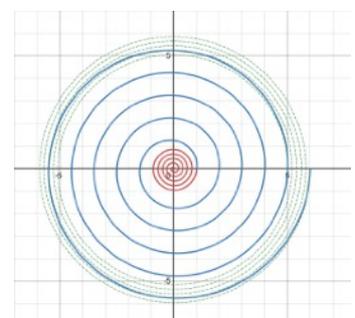


図8. 円網のモデル(粘着糸をかけている途中の結果)

アルキメデスの墓標 * 高次元版

宮崎興二 (京都大学/名誉)

miyazakii jok@gmail.com

Higher-dimensional gravestone of Archimedes

Koji MIYAZAKI (Kyoto University, honorary post)

Legend has it that a sphere inscribed in a cylinder of the same high was engraved on the lost gravestone of Archimedes. According to Archimedes, this was the most remarkable of all his many discoveries: the ratio of the surface areas of these two solids is 3:2 and the same is true about their volumes. If so, what happens between a n -dimensional cylinder and sphere? If n is the number of dimensions and π the circular constant, the above ratio becomes $a:b$ when n is odd and $a:b\pi$ when n is even - a and b being various integers, depending on the number of dimensions. Turns out, Archimedes' discovery is less remarkable for higher-dimensional people.

Keywords : Archimedes, Higher-dimensional sphere and cylinder

1. はじめに

古代ギリシャのアルキメデスは、科学や工学に関する数多くの発明や発見で知られている。それもあって、風呂桶に浸かったとき溢れた湯を見て浮力を発見し、今や形の科学の世界でもよく知られている「ユリーカ (分かったぞ) !」という言葉を叫んで真っ裸で大通りを走ったという逸話が生まれた。その話を思わせるアルキメデスの発見が、同じ高さを持つ円柱 (上下両底面を含む) と球があるとすると、その表面積の比も体積の比も 3 : 2 になる、という定理である。アルキメデス自身、その発見を自慢して、自らの墓石に、風呂桶のような円柱に太鼓腹のような球が内接する図を刻印するよう遺言したという (図 1)。

2. 3次元の円柱と球

3次元の墓標の定理の証明には正確な円周率 π が関係してくるが、その π を、アルキメデスは、円周の長さは円に内接ならびに外接する正 96 角形の辺長の間にあるとして、約 3.140845 と約 3.142857 の間にあると近似的に考えていた。上記の定理の場合、そのいかがわしい π が消えているのである。つまり、円あるいは球の半径を r とすると、

<円柱> 表面積 $(2\pi r \times 2r) + (\pi r^2 \times 2) = 6\pi r^2$ 、体積 $\pi r^2 \times 2r = 2\pi r^3$ 。

〈球〉 表面積 $4\pi r^2$ 、体積 $\frac{4}{3}\pi r^3$ 。

したがって、いずれにしても、**円柱：球=3:2**となる。

この問題を2次元で考えると、正方形とそれに内接する半径 r の円の問題となり、

〈正方形〉 周長 $4 \times 2r=8r$ 、面積 $(2r)^2=4r^2$ 。

〈円〉 周長 $2\pi r$ 、面積 πr^2 。

したがって、いずれにしても、**正方形：円=4:π**となる(図2)。

3. 4次元の超円柱と超球

3次元と2次元の墓石の定理を n 次元へ拡張すると、一般に、 n 次元柱の表面積は $(n-1)$ 次元球の体積 $\times 2$ + $\{(n-1)$ 次元球の表面積 $\times 2r\}$ 、体積は $(n-1)$ 次元球の体積 $\times 2r$ 。 n 次元球の表面積と体積は図3の通り、となる。たとえば4次元の場合は、

〈超円柱〉 表面積 $(4\pi r^2 \times 2r) + (2 \times \frac{4}{3}\pi r^3) = \frac{32}{3}\pi r^3$ 、体積 $2r \times \frac{4}{3}\pi r^3 = \frac{8}{3}\pi r^4$ 。

〈超球〉 表面積 $2\pi^2 r^3$ 、体積 $\frac{\pi^2}{2} r^4$ 。

したがって、いずれにしても、**超円柱：超球=16:3π**となる。

4. まとめ

同様の計算を5次元以上でも行い、2次元から7次元までをまとめて列記すると、

$$4 : \pi, 3 : 2, 16 : 3\pi, 15 : 8, 32 : 5\pi, 35 : 16$$

となる。つまり a と b を整数とするとき、超円柱と超球の表面積の比も体積の比も、3次元以上の奇数次元では $a:b$ 、2次元以上の偶数次元ではそれに π が加わって $a:b\pi$ となる。この高次元人ならすぐ分かる定理を知ったとしたら、アルキメデスは「超ユリーカ！」と叫んで天上の高次元の大通りを真っ裸で走るかも知れない。

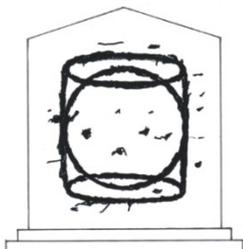


図1 アルキメデスの墓標想像図

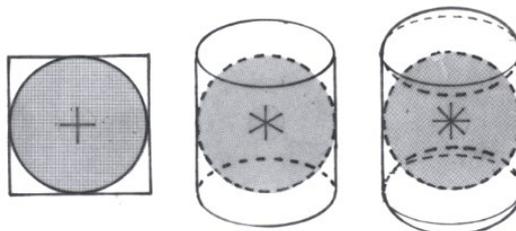


図2 左から、2次元平面で円を内接する正方形、3次元空間で球を内接する円柱、4次元空間で超球を内接する超円柱

n .	2.	3.	4.	5.	6.	7.
V_n	πa^2	$\frac{4}{3}\pi a^3$	$\frac{1}{2}\pi^2 a^4$	$\frac{8}{15}\pi^2 a^5$	$\frac{1}{6}\pi^3 a^6$	$\frac{16}{105}\pi^3 a^7$
S_n	$2\pi a$	$4\pi a^2$	$2\pi^2 a^3$	$\frac{8}{3}\pi^2 a^4$	$\pi^3 a^5$	$\frac{16}{15}\pi^3 a^6$

図3 半径 a の n 次元球の超体積 V_n と超表面積 S_n 。D. M. Y. Sommerville “An Introduction to the Geometry of N Dimensions” Dover, 1958, p. 137 より。

動く細胞のかたちとその数理的表現

齊藤 稔

筑波大学 生存ダイナミクス研究センター、茨城県つくば市天王台1丁目1-1
nensaito@tara.tsukuba.ac.jp

Mathematical modeling of cellular morphodynamics

Nen Saito

Life Science Center for Survival Dynamics, Tsukuba Advanced Research
Alliance (TARA), University of Tsukuba, Tsukuba, Japan

Abstract: Cell deformability can play a crucial role in several biological phenomena such as wound healing, cancer invasion or developmental processes. Simulation-based theoretical studies are essential for characterizing and understanding underlying mechanisms. In this talk, I will present a simulation framework that enables efficient modeling of freely deformable cells.

Keywords: mathematical modeling, active matter, jamming transition, multicellular dynamics, phase-field equation.

【背景と目的】

細胞の形状は、内在性の細胞骨格の作用により、あるいは細胞間の力学的相互作用を通じてしなやかに変形する。例えば細胞性粘菌のようなアメーバ細胞では、細胞の形状が絶えず変形しながら遊走性を示す。これは細胞前方部のアクチン重合と後方部のアクトミオシンフィラメントの収縮により膜変形が誘起されることで実現される。また組織中の細胞などの例では、力学的相互作用を通じて周りの細胞と押し合いへし合いし、個々の細胞の変形や細胞同士の配置換えが起こる。このようなプロセスは胚形成や癌浸潤などの重要な生物学的イベントと密接に関わっている。理論的な側面からこれらの現象を捉えるためには細胞の形状とそのダイナミクスを数理的に表現する手法が不可欠となる。

細胞膜、アクチン細胞骨格およびその制御因子は無数の分子から構成されており第一原理的な計算は事実上不可能である。こうしたマクロスケールの現象に迫るためには、現象を大胆に粗視化・抽象化する現象論的アプローチに依拠せざるを得ない。有効な近似の1つとして、細胞膜と細胞皮質をまとめて「細胞内外を分ける界面」であると粗視化してしまい、この界面の運動を記述するという方法が様々な数理モデルで広く用いられている。この界面を連続場の方程式から記述する方法論がフェイズフィールド法である。細胞内の生化学反応と同時にモデル化を行うことが容易であることから、一細胞の遊走運動の数理モデルとして研究されてきた。この手法では複雑な細胞形状の表現が可能である一方で、計算量が膨大であり多細胞動態の計算には向かないという欠点がある。

多細胞状況で最も広く用いられる手法はセルバーテックスモデルである。このモデルは隙間なく細胞が密集している状況で個々の細胞を単純な凸多角形（通常は3~9角形程度）と近似できる上皮細胞系のモデルとして用いられる。二つの細胞同士の接触面を直線であ

ると近似してしまうわけだ。こちらは数千数万のオーダーの細胞数を高速に計算できるが、表現できる細胞形状には限界があり、細胞間隙が無視できない状況や間葉系細胞などの表現には向かない。胚形成、癌浸潤、創傷治癒などの生命現象では上皮・間葉・アメーバ様細胞が入り混じった多細胞状況が存在し、これらを表現する新しい数理モデルが求められている。

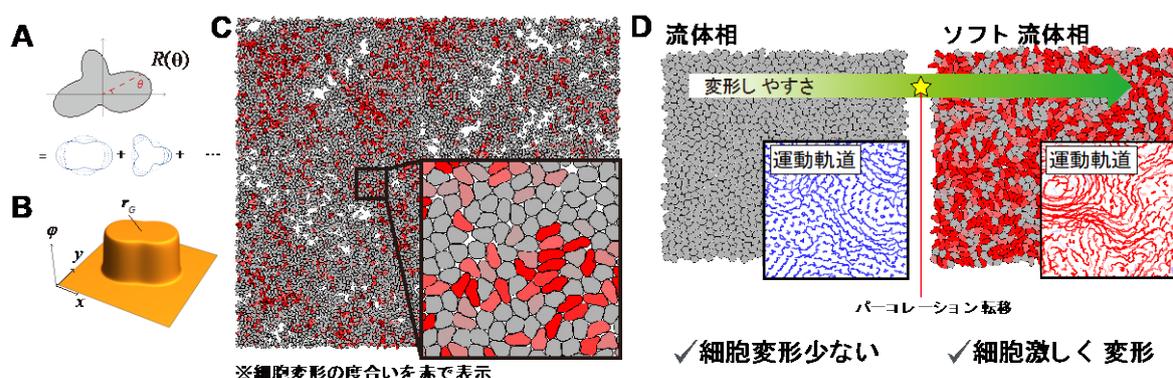
【提案モデルと結果】

講演ではまず単細胞の細胞運動の研究として、フェイズフィールド法を用いた数理モデルを紹介する。フェイズフィールド法により様々な二次元的な細胞形状を表現することが可能であり異なる細胞運動を統一的に記述することができる[1]。また三次元的な細胞動態の記述も可能である[2,3]。

次に多細胞動態の数理的記述について紹介する。我々は、個々の細胞の持つ二次元的な細胞形状を閉曲線であると捉え、この曲線をフーリエ基底で表現することで、多数の変形細胞の力学的相互作用を高速で計算できる枠組みを開発した[4]。細胞形状をフーリエモードの重ね合わせとして記述し、細胞運動を各フーリエ係数のダイナミクスとして記述することで 10^4 個程度の自由変形可能な細胞をシングル CPU で数値計算することが可能となる。上皮細胞を記述するセルバーテックスモデルとは異なり、単純な凸多角形以外の様々な形状や細胞間隙などを表現できるモデルになっている。このモデルを用いると、高密度の遊走細胞集団動態や、化学シグナルで集合する細胞、分裂する細胞集団などさまざまな多細胞動態の大規模シミュレーションを行うことが可能となる。提案手法を用いて、排除体積効果のみで相互作用する遊走性の高密度可変形細胞集団のシミュレーションを行った結果、高密度の細胞集団は質的に異なる二つの流動化状態を取りうるということが理論的に予測された。

【参考文献】

- [1] D. Imoto, et al., *PLoS comp. biol.* 17(8), e1009237. (2021)
- [2] N. Saito, S. Sawai, *iScience* 24(10) (2021)
- [3] G. Honda, et al, *P.N.A.S.* 118 (50), e2110281118 (2021)
- [4] N. Saito, S. Ishihara, *Science Advances* 10 (19), eadi8433 (2024)



比率と数列による正三角形螺旋や正六角形模様

中西真悟

大阪工業大学, 大阪市旭区大宮 5-16-1

shingo.nakanishi@oit.ac.jp

Equilateral triangle spirals and related forms of regular hexagons using designated ratios and sequences

Shingo Nakanishi

Osaka Institute of Technology, 5-16-1, Omiya, Asahi, Osaka

Abstract: This study shows single, double, and triple typed equilateral triangle spirals and these several forms of regular hexagons from the viewpoint of specific ratios and these related sequences.

Keywords: Metallic Ratio, Weighted Gibonacci Sequence, Plastic Ratio, Generalized Padovan Sequence

1. はじめに

題目の比率による正三角形螺旋図[1-4] (シングル型: プラスチック比, ダブル型: 貴金属比, トリプル型: 2) を紹介する. これらの比率に所縁のある数列による正三角形螺旋図[2-4] (シングル型: パドヴァン数列, ダブル型: k -ペル数列, トリプル型: 2 のべき乗) も紹介する. 以上の比と数列に関連する正三角形や正六角形を中心にいくつかの模様を紹介しながら形の特性をアルゴリズムとして楽しみたい.

2. 比や数列による正三角形螺旋図

数列の記法で上付きに初期設定値を全て表記し, 下付きに足し合わせる重みを表示するとパドヴァン数列と k -ペル数列 (フィボナッチ数列 ($k=1$)) の数列表記は次の通りとなる. パドヴァン数列:

$$P_{(1,1),0}^{(1,1,1)} = 1, \quad P_{(1,1),1}^{(1,1,1)} = 1, \quad P_{(1,1),2}^{(1,1,1)} = 1, \quad P_{(1,1),j}^{(1,1,1)} = 1 \cdot P_{(1,1),j-1}^{(1,1,1)} + 1 \cdot P_{(1,1),j-2}^{(1,1,1)} \quad (j \geq 3) \quad (1)$$

k -ペル数列 (フィボナッチ数列 ($k=1$)):

$$P_{(k,1),0}^{(0,1)} = 0, \quad P_{(k,1),1}^{(0,1)} = 1, \quad P_{(k,1),j}^{(0,1)} = k \cdot P_{(k,1),j-1}^{(0,1)} + 1 \cdot P_{(k,1),j-2}^{(0,1)} \quad (j \geq 2) \quad (2)$$

と 2 のべき乗が正三角形のシングル, ダブル, トリプル型の正三角形を構成する.

3. ワン・スキップ型数列として再表記

ワン・スキップ型フィボナッチ数列:

$$P_{(2,1),0}^{(1,1,2)} = 1, \quad P_{(2,1),1}^{(1,1,2)} = 1, \quad P_{(2,1),2}^{(1,1,2)} = 2, \quad P_{(2,1),j}^{(1,1,2)} = 2 \cdot P_{(2,1),j-1}^{(1,1,2)} + 1 \cdot P_{(2,1),j-2}^{(1,1,2)} \quad (j \geq 3) \quad (3)$$

ワン・スキップ型ヤコブスタール数列を基にした 2 のべき乗:

$$P_{(3,2),0}^{(1,2,4)} = 1, \quad P_{(3,2),1}^{(1,2,4)} = 2, \quad P_{(3,2),2}^{(1,2,4)} = 4, \quad P_{(3,2),j}^{(1,2,4)} = 3 \cdot P_{(3,2),j-1}^{(1,2,4)} + 2 \cdot P_{(3,2),j-2}^{(1,2,4)} \quad (j \geq 3) \quad (4)$$

と表記できる. 従って, 正三角形螺旋図の数列構成と一致する. さて, 正三角形螺旋図は正六角形とも相性が良いことと, 修正したパスカルの三角形に表示できる特徴とその数列の拡大率の収束値もまた比 (シングル型: プラスチック比, ダブル型: 貴金属比, トリプル型: 2) として正三角形を描けることが知られている. 次頁の図はその内の数列による正三角形螺旋図の例証で, 漢字の「人」の形が浮かび上がるようイメージして作画している.

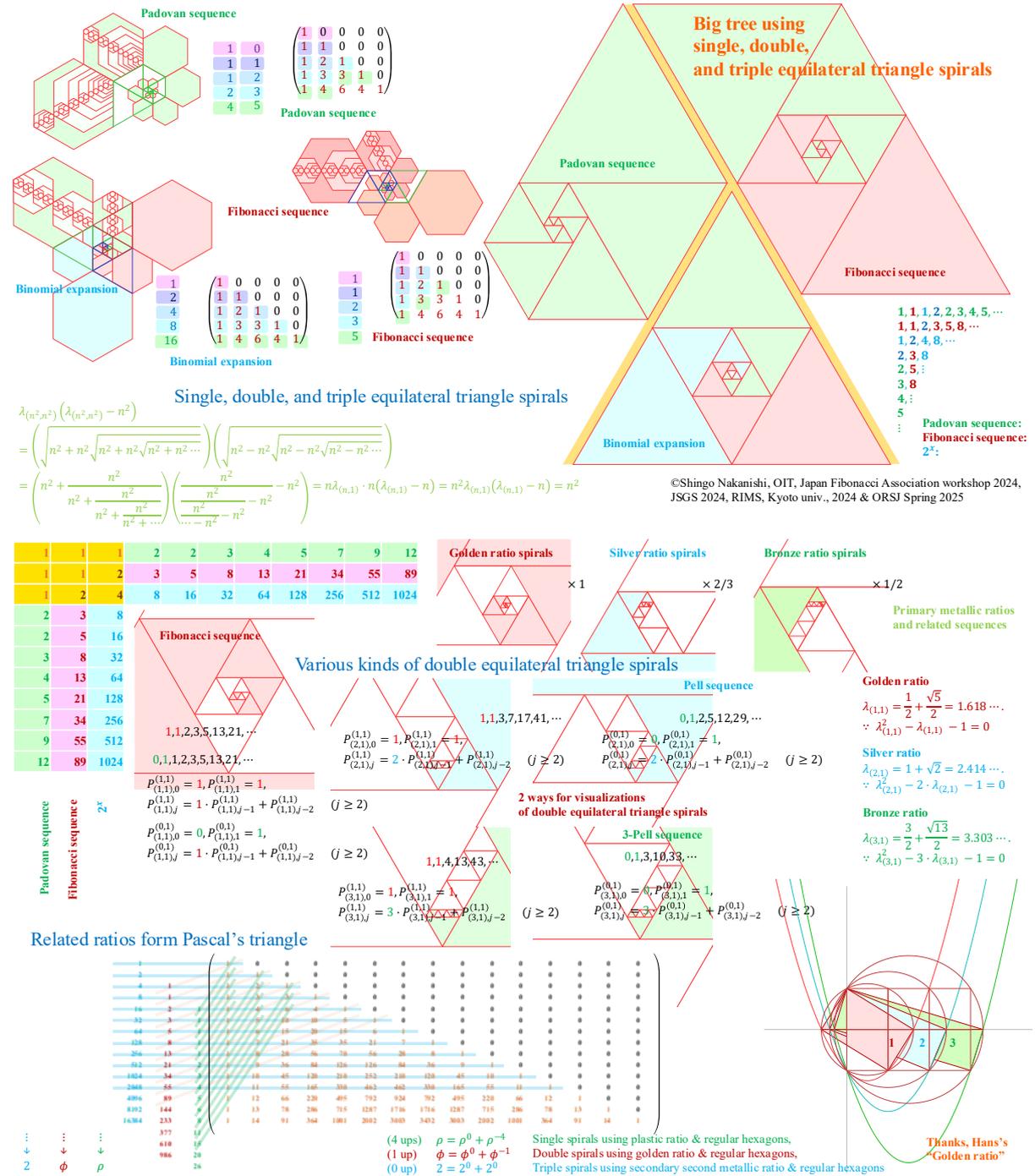


図 1 比や数列による正三角形螺旋図と正六角形螺旋図の例証図とその関連特性の紹介

参考文献

[1] Hans Walser, "The Golden Ratio: Geometric and Number Theoretical Considerations", Springer, (2024).
 [2] 中西真悟, "図余りと図足らずを許した正三角形を連ねた螺旋図(Gibonacci 数列と関連数列)" & "Ladder and Matrix calculations for various sequences", フィボナッチ協会研究集会, 講演資料と講演動画, (2024, 2025).
 [3] 中西真悟, "図余りや図足らずを認めた正三角形と正六角形の螺旋図", 日本図学会大会論文集, 161-166, (2024).
 [4] S. Nakanishi, "Modified calculations and visualizations for skipped, weighted, or right upward typed Gibonacci sequences using related Pascal triangles and these matrices", 京都大学数理解析研究所講究録, No.2304, pp. 114-126, (2025).

アガペーの形と人の移ろい

松下勝義

広島大学統合生命，鏡山1-3-1，東広島

E-mail:kmatsum@hiroshima-u.ac.jp

People Behavior under Agape Share

KAtsuyoshi Matsushita

Integr. Life Sci., Hiroshima Univ. Kagamiyama 1-3-1, Higashi-Hiroshima

Abstract: 発表内容の概要をここに数行で書く（原則英語）。

Keywords: 政府支出，通貨の理論，少子化

アガペーとは、神の無償の愛を指す。神は絶対的な権力のもとで人々の行動を導き、その根源的な基盤となる存在である。この考えを現代社会に当てはめれば、「神」に相当するのは政府であると考えられるだろう。では、政府が示す「無償の愛」は存在するのだろうか。政府は国民の行動を統制する手段として通貨を用いる。人々が政府の愛とみなすことができるものは、政府がもたらす通貨かもしれない。しかし、この通貨は本当に無償で提供されているのだろうか。当然のことながら、政府は国民に対して労働や財の提供といった見返りを求めている。そのような支配の形態は、果たして国民を健全な形で支配できているのだろうか。

本講演で論じたいのは、現代の通貨理論に基づいて国民の行動をどのように理解できるかという点である。特に焦点を当てるのは、政府による通貨支配の目標設定が適切に行われているかどうかである。1990年代にモズラーが登場し、通貨が政府の独占的な発行物であること、そして政府には二つの選択肢があることを示した[1]。以下はその抜粋である。

「How does the monopolist price his product? There are two options:

1. Set price, p , and let quantity, q , float, or
2. Set q and let p float.

The first option is generally preferred, with a gold standard or the proposed ELR program two examples of using the first option.]

日本語訳を行うと以下のようなになるだろう。

「独占者はどうその供給物の価格を設定するのでしょうか？2つの選択肢があります。

1. 価格 p を固定し、数量 q を浮動化する。
2. 数量 q を固定し、価格 p を浮動化する。

一般的には前者が適切であり、その例として金本位制や最後の雇手としての政府があります。」

この記述は、政府のような通貨の独占者には二つの選択肢があることを示している。失業が社会問題となっている場合、1の「価格を固定して数量を変動させる」選択肢が望ましい。しかし現実の政府は、予算を固定する2の選択肢を採ってしまっている。つまり、政府の「愛」である通貨の支出のあり方が、二つのうち不適切な方法を採用していること

を意味する。その不適切な選択の結果こそがむしろ失業なのである。

政府が通貨を支出する際、その見返りを労働として受け取る場合、最終的な目標は「失業が存在しない状態」となるべきである。価格 p を固定し、数量 q を変動させる政策を採れば、失業は解消され、この目標は達成される。重要なのは、その見返りが政府にとって直接的な利益である必要はないという点である。政府は、無償の愛として通貨を支払うことができる。ただし、その際に被雇用者の「時間」を価格 p で固定して購入しなければならない。

モズラーのこの指摘は、労働市場を部門別に分析することで多様な政策的示唆を導き出せる可能性を示している。たとえば、失業問題ではなく貧困問題にこの枠組みを適用したら、どのような結論が得られるだろうか。マルサスによれば、貧困は子どもを持つことの抑制要因となる[2]。すなわち、少子化の原因である。現状の貧困、すなわち子どもを持つことへの抑制が、通貨独占者である政府の「無償の愛」によって克服できる可能性があるかその援用を考える。

国民が子どもを育てることは、政府にとって直接的な見返りをもたらすものではない。しかし、政府は自身への見返りがなくとも、無償の愛として通貨を支出し、「時間」の価格 p を固定して提供することができる。この仕組みを少子化の抑制に活かせるのではないだろうか。その際政府にとっての目標設定は貧困の撲滅、すなわち少子化の抑制となる。

しかし、この議論はそう単純には進まない。マルサスが指摘しているように、その地域から貨幣を回収し、それを単に再分配するだけの救済策、たとえばイングランド救貧法におけるスピーナムランド制度のような仕組みでは、必ずしも効果が上がるとは限らない。なぜなら、貧困層が受け取った通貨を実際に子育てなどの生活改善に充てられるかどうかは、その地域の供給力に左右されるからである。もし供給力が不足していれば、需要の増加によって物価が上昇し、結果として貧困がかえって拡大する可能性すらある。本講演では、この問題を克服するための一つの試案を提示したい。

[1] W. Mosler, J. Post Keynes. Econ. **20**, (1997).

[2] T. R. Malthus, “An Essay on the Principle of Population” (1798).

スマートセンサを用いた ハーブサウナ浴の睡眠改善効果に関する予備的検討

深見爽輝^{1,2}, 中山明峰³, 周景星⁴, 高田宗樹²

¹福井大学大学院工学研究科知識社会基礎工学専攻,

〒910-8507 福井県福井市文京 3-9-1

²福井大学大学院工学研究科知能システム工学専攻,

〒910-8507 福井県福井市文京 3-9-1

³めいほう睡眠めまいクリニック, 〒453-0015 愛知県名古屋市中村区椿町 16-4

⁴小松貿易株式会社,

〒555-0034 大阪府大阪市西淀川区福町 2-9-16

takada@u-fukui.ac.jp

Preliminary Study on the Effects of Herbal Sauna Bathing on

Sleep Quality Using Smart Sensors

Sawaki Fukami^{1,2}, Akimine Nakayama³, Jingxing Zhou⁴, Hiroki Takada²

¹Department of Knowledge-Based Engineering, Graduate School of Engineering, University of Fukui, 3-9-1 Bunkyo, Fukui 910-8507, Japan

²Department of Intelligent Systems, Graduate School of Engineering, University of Fukui, 3-9-1 Bunkyo, Fukui 910-8507, Japan

³Meihou Sleep and Vertigo Clinic, 16-4 Tsubaki-cho, Nakamura-ku, Nagoya 453-0015, Japan

⁴Komatsu Trading Co., Ltd., 2-9-16 Fukumachi, Nishiyodogawa-ku, Osaka 555-0034, Japan

Abstract: In recent years, non-pharmacological interventions for improving sleep quality have gained increasing attention, especially among young adults experiencing difficulties in sleep onset. This study examined the effects of herbal sauna bathing on sleep using wearable smart sensors. Four healthy university students participated in a 10-day continuous monitoring protocol, with a 20-minute herbal sauna session conducted three hours before bedtime on the eighth day. Sleep parameters—including latency, duration, and efficiency—were measured using Apple Watch and iPhone, while subjective assessments employed the OSA Sleep Inventory (MA version) and the Karolinska Sleepiness Scale. By integrating thermal and aromatic stimuli, this study aims to explore both immediate and sustained (2–3 days) autonomic and circadian responses following herbal sauna exposure. The results may provide a foundation for quantifying relaxation-based sleep interventions using smart wearable technologies.

Keywords: smart sensor, herbal sauna, sleep quality, autonomic rhythm, circadian effect

1. はじめに

現代社会では睡眠不足や入眠困難が深刻な健康課題となっており、特に若年層では平均睡眠時間の短縮が進んでいる。こうした背景のもと、非薬理的なリラクゼーション法として

サウナや入浴が注目されている。先行研究では、就寝前の温熱刺激が末梢血管を拡張させ深部体温を低下させることで、入眠を促進することが示されている (Haghighyegh et al., 2019)⁽¹⁾。さらに、ハーブサウナは温熱刺激に加えて、ラベンダーやカモミールなどの芳香成分による嗅覚経路を介したリラクゼーション効果をもつとされる (Tabata et al., 2023; Nakashima et al., 2025)^(2,3)。筆者らは、ハーブサウナが温熱による自律神経調整と芳香による情動緊張緩和という二重の経路で作用する点に注目している。

2. 実験方法

本研究では、若年健常者(大学生)4名を対象に、10日間の連続睡眠モニタリングを実施した。1~7日目をコントロール期間、**8日目に就寝3時間前のハーブサウナ浴(20分間)**を導入し、9~10日目をフォローアップ期間とした。

睡眠時には Apple Watch (Apple Inc.) および iPhone を用いて三軸加速度、瞬時心拍、酸素飽和度、就寝・起床時刻を記録し、入眠潜時・睡眠時間・睡眠効率を算出した。主観評価には OSA 睡眠調査票 MA 版およびカロリンスカ眠気尺度を用いた。量的データには t 検定、主観評価には Wilcoxon 符号付順位和検定を適用した。

3. 研究の意義

本研究の特徴は、(1)若年健常者を対象とした1週間のコントロール付き介入設計と、(2)ハーブサウナの持続的効果(2~3日後までの自律神経・サーカディアンリズムへの影響)の検証にある。従来のサウナ研究は単回測定や高齢者対象が多く、大学生の日常環境下で連続10日間の介入と計測を行う点は新しい試みである。また、入浴当日だけでなく翌日以降の睡眠効率や自律神経活動への影響を検証することで、睡眠の恒常性や体内時計の安定化に関する新たな知見を得ることを目指す。スマートセンサを用いた本研究は、日常的リラクゼーション効果を客観的に評価する新たな枠組みを提供し、ハーブサウナの科学的根拠構築とデジタルヘルス応用の基盤となる。

4. 結果及び考察

詳細な結果は講演にて報告予定である。解析では、サウナ浴前後および翌日の睡眠効率、心拍変動、主観的眠気の変化を比較し、温熱・芳香刺激の短期的および持続的効果について検討する。

参考文献

1. Haghighyegh S, Khoshnevis S, Smolensky MH, Diller KR, Castriotta RJ. (2019). *Before-bedtime passive body heating by warm shower or bath to improve sleep: A systematic review and meta-analysis*. *Sleep Medicine Reviews*, 46, 124–135.
2. Tabata G, et al. (2023). *Skin hydration and HRV changes with herbal vs. non-herbal sauna*. *Katachi Schule Proceedings*, 2023, 8–9.
3. Nakashima D, Matsuura Y, Tsukamoto K, Hirata T, Takada H. (2025). *Effect of herbal sauna exposure on skin hydration, EEG α/β ratio, and HRV*. *Journal of the Society for the Science on Form (形の科学会誌)*, 39(2), 1–8.

PoseNet を用いた映像ベース非接触呼吸モニタリング

に関する基礎的検討

三輪恭大¹²、西尾春哉¹²、高田宗樹²

¹福井大学大学院工学研究科知識社会基礎工学専攻、
〒910-8507 福井県福井市文京 3-9-1

²福井大学大学院工学研究科知能システム工学専攻、
〒910-8507 福井県福井市文京 3-9-1

takada@u-fukui.ac.jp

Exploring Brainwave Patterns in Problem-Solving: Insights from Simplified EEG Devices and Gender Differences

Kyota Miwa¹², Shunya Nishio¹², Hiroki Takada²

¹Department of Knowledge-Based Engineering, Graduate School of Engineering,
University of Fukui, 3-9-1 Bunkyo, Fukui, Fukui 910-8507, Japan

²Department of Intelligent Systems, Graduate School of Engineering,
University of Fukui, 3-9-1 Bunkyo, Fukui, Fukui 910-8507, Japan

Abstract

In recent years, technologies for non-contact acquisition of biological respiratory information have attracted considerable attention. In particular, video-based respiration monitoring using general-purpose (RGB) cameras has been actively studied, as it enables estimation of respiratory rate without physical sensors—an approach with potential applications in healthcare, welfare, and sports.

Based on these previous studies, this research aims to evaluate the synchronization and accuracy between respiratory signals obtained from belt-type sensors and chest motion data extracted from video using joint position estimation by PoseNet. The purpose is to clarify the relationship between physical sensor data and video-derived motion features, providing a foundation for the development of non-contact respiration monitoring systems with high accuracy.

Keywords: PoseNet, Respiratory Monitoring, Video Analysis, Non-Contact Measurement, Machine Learning

Keywords: PoseNet, Respiratory Monitoring, Video Analysis, Non-Contact Measurement, Machine Learning

1. はじめに

近年、非接触で生体の呼吸情報を取得する技術が注目されている[1]。特に汎用カメラ (RGB カメラ) による呼吸モニタリングは、医療・福祉・スポーツ応用において、生体セ

ンサを装着せずに呼吸率を推定できる可能性があり、多くの研究が報告されている[2][3]。本研究では、これらの先行研究を踏まえ、Pose Net を用いた関節位置推定により得られる胸部運動データと、呼吸ベルトセンサで取得した呼吸波形信号との同期性と精度を評価する。これにより、映像ベース呼吸推定の信頼性を定量的に検討することを目的とする。

2. 実験方法

若年健常者 10 名 (21 ± 1.5 歳) を対象とした。被験者の呼吸運動を呼吸ベルトセンサおよび A/D コンバータ (T.K.K.5728a) で非侵襲的に計測し、同時に汎用カメラで胸部を撮影した。取得した呼吸波形データを PoseNet による関節推定結果 (特に胸郭領域の動き) と同期させ、体幹運動と呼吸信号の対応関係を解析した。動画から得られる胸部運動の時系列信号を主成分分析 (PCA) で特徴抽出し、呼吸波形の周期・振幅・変動係数との相関を比較した。

3. 結果及び考察

呼吸ベルトセンサの波形と PoseNet により推定された胸部運動の主成分との間に高い相関が認められた。これにより、汎用カメラ映像から得られる胸部運動データが呼吸周期の推定に有効である可能性が示唆された。今後は、深層学習を用いた非接触呼吸推定モデルの高精度化や、照明条件・姿勢変化に対するロバスト性の検証を進める予定である。



図1 使用する機器

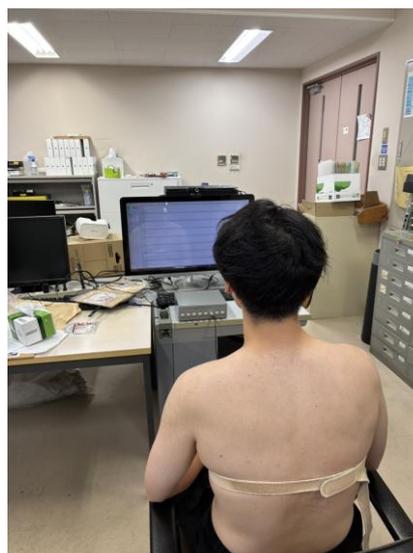


図2 計測の様子

参考文献

- [1] Srestha, S. D., et al. (2025). A systematic review of contactless respiratory rate measurement using RGB cameras. *Physiological Measurement*, 45, DOI:10.1088/1361-6579/adfc24.
- [2] Queiroz, L. (2020). Video-Based Breathing Rate Measurement. In *Proceedings of the IEEE International Conference on Systems, Man, and Cybernetics (SMC)*, 2020.
- [3] Romano, C., et al. (2021). Non-Contact Respiratory Monitoring Using an RGB Camera for Real-World Applications. *Sensors*, 21(15), 5126.

分裂酵母 *Schizosaccharomyces pombe* における
交配相手の非対称な認識精度機構は変動環境への適応から生ずる

北條拓也

東大院理/理研 BDR、兵庫県神戸市中央区港島南町 6-7-1
理化学研究所 神戸地区 融合連携イノベーション推進棟

Mail : hojo@ubi.s.u-tokyo.ac.jp

**Evolutionary Symmetry Breaking of Matching Strategies
via an Agent-Based Model**

Takuya Hojo

The Univ. of Tokyo/RIKEN BDR, 6-7-1 Minatojima Minamimachi, Chuo Ward, Kobe
City, Hyogo Prefecture RIKEN Kobe Campus, Integrated Innovation Building

Abstract : Many organisms engage in bilateral recognition between the mating types, enabling successful sexual reproduction and population increase. The eukaryotic fission yeast *S.pombe* possesses an asymmetric system for recognizing the opposite mating type, where one mating type recognizes the other strictly while another recognizes it ambiguously [Seike et al. 2019]. Furthermore, this system was evolutionarily conserved in other fission yeasts (e.g., *S.octosporus*, *S.japonicus*). However, **how this system arise and is conserved remains unclear**. Therefore, I attempted to resolve this question by performing evolutionary simulations using a mathematical model. This simulation revealed that environmental fluctuation leads to the emergence of the asymmetric system.

Keywords : Pre-reproductive isolation, Asymmetry recognition, Evolutionary Simulation

Background : Sexual reproduction requires the accurate recognition of conspecific mates. In the fission yeast *Schizosaccharomyces pombe*, this recognition is mediated by bidirectional pheromone–receptor interactions. Interestingly, one mating type exhibits strict recognition, whereas the other shows flexible recognition (Fig. 1). Although such asymmetric system has been proposed to facilitate sympatric speciation, its evolutionary origin and persistence remain poorly understood.

Method : To examine whether this asymmetric system can arise through evolution, I developed an individual-based evolutionary simulation. The probability of successful

reproduction between two individuals was defined as a function of the affinity between their pheromone and receptor values.

Result : In the absence of environmental perturbation, both mating types evolved toward symmetric and strict recognition. However, when external fluctuations such as temperature- or pH-dependent affinity changes were introduced, a transient asymmetry in recognition precision emerged (Fig. 2). Further analysis revealed that this asymmetric system tends to occur when the timescale of environmental fluctuation is slightly faster than that of mutational change.

Discussion : These results suggest that environmental fluctuations can induce transient asymmetric system in mating recognition. Consistent with this model, pH-dependent changes in pheromone–receptor affinity and fitness reversals have been experimentally demonstrated using pheromone variant libraries [Seike et al., 2025]. Nonetheless, in long-term simulations, asymmetry diminished as both sexes evolved stricter recognition. Similar transient asymmetry in sexual preference has been reported in *Drosophila* [Kaneshiro, 1976; Arnold et al., 1996]. Future work will explore the evolutionary conditions that allow the maintenance of such asymmetric recognition systems over extended timescales.

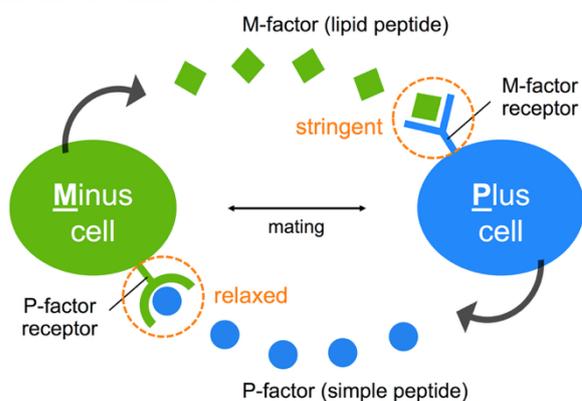


Fig.1 : An asymmetric system of pheromone recognition in fission yeast. [Seike et al. 2019]

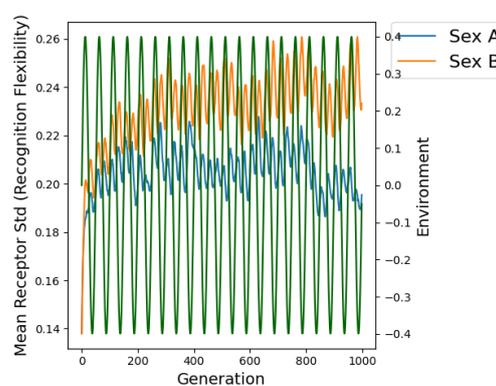


Fig.2 : An example of evolutionary simulation with environmental fluctuation.

Reference :

Seike, T., Shimoda, C., & Niki, H. (2019). Asymmetric diversification of mating pheromones in fission yeast. *PLOS Biology*, 17(1), <https://doi.org/10.1371/journal.pbio.3000101>

Seike, T., Sakata, N., Kotani, H., & Furusawa, C. (2025). Context-dependent activation and evolutionary buffering of a mating pheromone in fission yeast. *bioRxiv*. <https://doi.org/10.1101/2025.08.28.672862>

Kaneshiro, K. Y. (1976). Ethological isolation and phylogeny in the planitibia subgroup of Hawaiian *Drosophila*. *Evolution*, 30(4), 740–745. <https://doi.org/10.1111/j.1558-5646.1976.tb00954.x>

Arnold, S. J., Verrell, P. A., & Tilley, S. G. (1996). The evolution of asymmetry in sexual isolation: A model and a test case. *Evolution*, 50(3), 1024–1033. <https://doi.org/10.1111/j.1558-5646.1996.tb02343.x>

ギーリス曲線の数理解析

松浦真也

愛媛大学大学院理工学研究科、愛媛県松山市文京町 2-5

matsuura.masaya.mx@ehime-u.ac.jp

Mathematical Analysis of the Gielis Curves

Masaya Matsuura

Graduate School of Science and Engineering, Ehime University,

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

Abstract: We analyze mathematical curves known as superellipses and Gielis curves from mathematical perspectives such as curvature and center of gravity. Superellipses, also called Lamé curves, have three parameters and can represent shapes that lie between ellipses and rectangles. In contrast, Gielis curves, in the narrow sense, are planar curves with six parameters and can be regarded as a kind of generalization of superellipses. By varying these parameters, a wide range of shapes can be generated, including polygons, flowers, stars, and hearts. Because of their simplicity and their ability to represent diverse forms, these curves are often applied in product design.

Keywords: Gielis curves, superellipses, Lamé curves, curvature, product design

1. はじめに

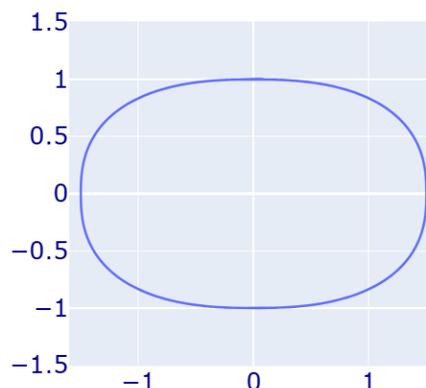
1900年代前半から中盤にかけて再開発が行われたスウェーデンの首都ストックホルムでは、街の中心部に位置するセルゲル広場 (Sergels Torg) の形に、スーパー楕円形が採用された。スーパー楕円は、数学的には次式で定義される xy 平面上の曲線であり、古くは1800年代に文献[4]で、フランスの数学者ガブリエル・ラメ (Gabriel Lamé; 1795-1870) により研究されたため、Lamé 曲線とも呼ばれている。

$$\left| \frac{x}{a} \right|^p + \left| \frac{y}{b} \right|^p = 1 \quad (a, b, p \text{ は正の定数})$$

スーパー楕円は、楕円と長方形の間近な形を表現可能で、セルゲル広場への活用をきっかけに、北欧をはじめ世界各国で、建築物やインテリアなど、様々なデザインに用いられるようになった。スーパー楕円については、米国の数学者マーティン・ガードナー (Martin Gardner; 1914-2010) による解説が有名であり、特に Scientific American 誌への連載内容をまと

めた[1]の文献は、参考文献として引用されることが多い。しかし、残念ながら、[1]におけるスーパー楕円に関する数学的な考察には、不正確な部分も含まれる。そこで、本講演

スーパー楕円



では、スーパー楕円や、それを一般化したギーリス曲線（スーパーフォーミュラ）について、ガードナーの着眼点を活かしつつ、数学的に精密な議論を試みる。

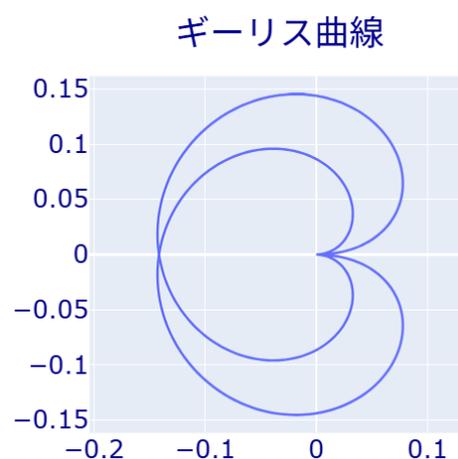
2. ギーリス曲線

スーパー楕円は、基本的には楕円と長方形（もしくは楕円と十字型）の中間的な形しか表現できない。そこで、ベルギーの植物学者・数学者・エンジニアであるヨハン・ギーリス（Johan Gielis; 1962-）は、もっといろいろな形を表現できるようにと、スーパー楕円を数学的に拡張し、文献[2]や[3]などにおいて、次式（極座標形式）で表現されるギーリス曲線（スーパーフォーミュラ）を提案した。

$$r = \left\{ \left| \frac{1}{a} \cos \frac{n\theta}{4} \right|^{p_1} + \left| \frac{1}{b} \sin \frac{n\theta}{4} \right|^{p_2} \right\}^{-\frac{1}{q}}$$

(a, b, n, p_1, p_2, q は正の定数)

ギーリス曲線は6つのパラメータを持ち、その値を変えることで、多角形、星形、花柄、ハート形など、多様な形を統一的な数式で表現することが可能である。このように、ギーリス曲線はスーパー楕円をはるかに凌ぐ表現力を有しているため、インテリア等のデザインに適していると考えられる。



3. 数理的解析

スーパー楕円やギーリス曲線をプロダクトデザインに活用する際、デザイン性と機能性の両面で重要な役割を果たすのが、曲線の曲率（カーブのきつさ）である。本講演では、スーパー楕円の最大曲率や、ギーリス曲線の頂点や辺における曲率について議論する。また、スーパー楕円やギーリス曲線を軸の周りに回転させてできる立体（回転体）に関し、重心と接地点の位置関係を調べ、回転体の安定性について考察する。

参考文献

- [1] M. Gardner, *Mathematical Carnival*, American Mathematical Society, 1975.
- [2] J. Gielis, *Wiskundige supervormen bij bamboes*, Newsletter of the Belgian Bamboo Society, 13, 20-26, 1996.
- [3] J. Gielis, *A generic geometric transformation that unifies a wide range of natural and abstract shapes*, *American Journal of Botany*, 90(3), 333-338, 2003.
- [4] G. Lamé, *Examen des différentes méthodes employées pour résoudre les problèmes de géométrie*, Paris, 1818.
- [5] M. Matsuura, *Asymptotic behaviour of the maximum curvature of Lamé curves*, *Journal for Geometry and Graphics*, 18(1), 45-59, 2014.
- [6] M. Matsuura, *Gielis' superformula and regular polygons*, *Journal of Geometry*, 106(2), 383-403, 2015.

置換パズルに関する研究：最短コストの詳細

東汐夏¹, 松浦真也²

愛媛大学大学院理工学研究科, 愛媛県松山市文京町 2-5

¹ m807002k@mails.cc.ehime-u.ac.jp

² matsuura.masaya.mx@ehime-u.ac.jp

A Study of Permutation Puzzles: Details of the Minimum Cost

¹Shioka Azuma, ²Masaya Matsuura

Graduate School of Science and Engineering, Ehime University,

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

Abstract: In this study, we investigate $2 \times n \times 1$ permutation puzzles inspired by the Rubik's Cube. We define basic operations, analyze the number of possible configurations and minimal solution costs, and generalize the cases to explore cost-related properties for deeper mathematical understanding.

Keywords: Rubik's Cube, $2 \times n \times 1$ permutation puzzle, the minimum cost, Number of horizontal rotations, Optimal upper limit

1. はじめに

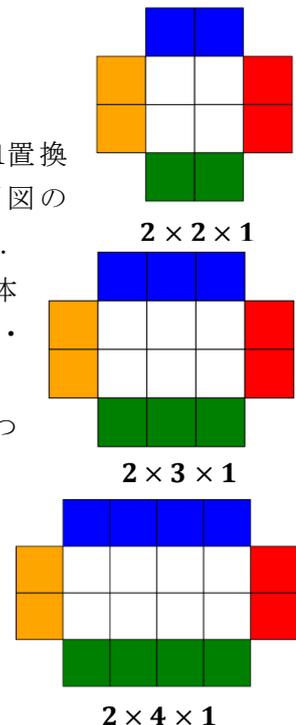
誰もが一度は遊んだことがあるルービックキューブ（メガハウス社の商標）は、多くの研究対象となっている。私はルービックキューブと類似した置換パズルに着目し、各パズルの操作を定義し、群論を用いて数学的に説明することを目標とする。その中でも特に、場合の数と最短コストに注目する。本発表では場合の数についての説明は省略し、最短コストおよび横回転数に関する考察を中心に述べる。

2. 置換パズル

私は現在 $2 \times n \times 1$ 置換パズルについて研究を行っている。 $2 \times n \times 1$ 置換パズルとは、右図に示すような構造を持つパズルであり、これは展開図の一部（背面）を取り除いたもので、正面から見た状態を示している。以降、 $2 \times n \times 1$ 置換パズルを $2n1$ パズルと表記する。これらは、4面体または3面体から構成され、ルービックキューブと同様に、白・黄・青・赤・緑・橙の6色を用いる。

それぞれのパズルごとに操作を定義し、場合の数や最短コストについて研究を行う。ここでは、 221 パズルの操作を紹介する。

- U : 221 パズルの上段を横に 180 度回転させる操作
- D : 221 パズルの下段を横に 180 度回転させる操作
- R : 221 パズルの右列を縦に 180 度回転させる操作
- L : 221 パズルの左列を縦に 180 度回転させる操作



3. 最短コスト

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

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

3.1. 横回転数と最適上限値

今回は、完成状態までの手順について調べることにし、中でも横回転数に注目する。2n1パズルにおいて、横回転はすべての列に影響を与えることがわかる。そのため、完成状態までの手順を求めるとき、なるべく横回転を減らすことは可能であることを調べることにした。まず、各状態から完成状態までの全手順を列挙し、横回転数を数えた結果、2n1パズル ($2 \leq n \leq 6$) において、横回転数の最大値は3回であることがわかった。ここでは、特に221パズルと231パズルの結果について述べる。

221パズルの横回転数の最大値は2回であり、これは最短コストが3手となる最長の状態で見られる。以下に3手の操作例を示す。

- ① 右上の4面体と左下の4面体を入れ替える操作

$$RDR = LUL = ULU = DRD$$

- ② 左上の4面体と右下の4面体を入れ替える操作

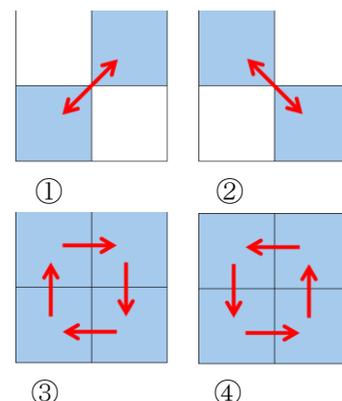
$$RUR = LDL = URU = DLD$$

- ③ すべての4面体を右回りに1つつずつ移動させる操作

$$LDR = RUL = ULD = DRU$$

- ④ すべての4面体を左回りに1つつずつ移動させる操作

$$LUR = RDL = URD = DLU$$



上記の結果から、いずれの状態においても横回転を1回に抑えることが可能であることが分かる。しかし、横回転数の上限値としては2回となる。ここで、横回転数を最小限に抑えたときの上限値を最適上限値と定義する。221パズルにおける最適上限値は1回である。

231パズルの全状態について同様の解析を行った結果、横回転数の最大値は3回であった。これは最短コスト6手の最長の状態および5手の一部の状態で現れる。231パズルにおける横回転数の最適上限値は3回となる。

参考文献

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

アミノ酸分子がホモキラリティになる、大きな要因と考えられる、 ウイルスカプシド構造の、ユニット折り紙シミュレーション

八十嶋章雄

SSDS Symmetric 福井県坂井市三国町殿島 2-19

Yaso0511@yahoo.co.jp

Unit origami simulation of the viral capsid structure, which is thought to be a major factor in the homochirality of amino acid molecules.

Akio Yasoshima

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

Abstract: When I exhibited I-gami's model works at the Crystallography Society, I learned about the relationship between the icosahedron structure and viruses. Using this as a hint, I created a structural model of a viral capsid and confirmed that the subunits that make up the viral capsid must be homochiral to maintain their shape. In other words, in order for a virus to maintain its existence, it needs an environment in which the amino acid molecules are homochiral.

Keywords: Unit origami. viral capsid homochiral

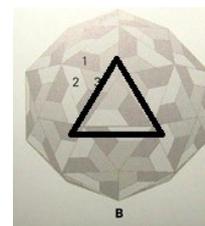
「結晶学会」で、アイガミの模型作品展示をさせていただいた折に、正二十面体構造とウイルスの関連を教えていただいた。これをヒントに、ウイルスカプシドの構造模型を製作したところ、ウイルスカプシドを構成するサブユニットが、形を維持するためにホモキラルである必要があることを確認した。つまり、ウイルスがその存在を維持するためには、アミノ酸分子がホモキラルである環境が必要なのである。

「モジュラー折り紙+キラリティ」というモデリングスキルでどのような構造を製作できるか？また、どのような応用例があるかを探索することが、この活動の目的である。

基本的にかかわりが想定できそうな分野の学会などに参加して、制作物を評価していただいたり、感想をいただいて、関連がありそうなトピックスを深堀するといったことを繰り返してきた。折り紙研究会で折りの左右が「キラリティ」であると指摘された。

その中で、正二十面体や正十二面体に関連のある構造から、「ウイルス」と何らかの関連を見出すことができるかもしれないという「ヒント」をいただいた。

そこで「ウイルス図鑑 101」という書籍を購入し、ビジュアルとして関連を示す画像を探したところ、右の画像を見つけた。(p185)ここで示される「模様」や「パターン」は、「モジュラー折り紙+キラリティ」のモジュールと同じ構造がないとできないものである(左画像)、ここで、「モジュラー折り紙+キラリティ」のモデリングスキルを使って「ウイルスカプシド」の模型製作が可能で



あることが予想された。

具体的なデータは、PDBJ (プロテインデータバンクジャパン) を参照した。もとよりシンプルなカプシド構造模型を目指していたので、最低限のデータがあればよかった。基本的な数理は「ゴールドバーグ多面体」の数理を使っている。T ナンバー3とか4レベルのシンプルな事例で試作したところ、滞りなく制作できた。乱暴な言い方をすれば、切頂二十面体の5回回転対称と6回回転対称の組み合わせでサブユニットを接続し、そこに、「自己組織化」が可能であるような条件を加味した。「自己組織化」が可能である条件を加味するとは、A というサブユニットと B というサブユニットが偶然出会って接合する場合に第3の「神の手」が必要でない機構を想定することを意味している。「神の手」が必要になると、「偶然」では、接合できなくなる。サブユニット A とサブユニット B が、偶然出会って接合できるためには、サブユニット A も B もその構成の中にすでに A と B を接合するモジュールを含んでいなければならない。カプシドを構成する約束事の中に、「すべてのモジュールのキラリティは同じである。」という事項が含まれる。ここでいう「モジュールのキラリティ」とは、中央の折り目が、斜め右上がり (A 折りと呼称) か、左上がり (B 折り) の違いである。(鏡対称)



Tomato bushy stunt virus の模型

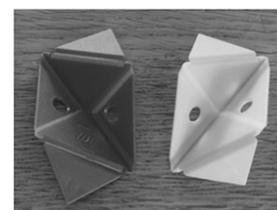
SP2 混成軌道の分子形で、閉じた球殻を構成するときには、すべてのモジュールのキラリティは同じになっていなければ、接合することができないという、約束事が存在する。

つまり、キラリティの異なるモジュールが混在していると、サイズに関わらず、そのモジュールの接合場所は適切に接合できず、カプシド構造にほつれが出来てしまう。

ウイルスは自身の存在を守るために、アミノ酸分子のキラリティを偏らせることが必要になる。つまり、正二十面体ウイルスが、一定期間存在し、一定範囲で感染を維持していれば、その環境では、アミノ酸分子のホモキラリティが保たれなければならないことが予想される。正二十面体ウイルスは、存在環境のアミノ酸分子に対してホモキラリティになるようなフィルターとして機能することが予想される。アミノ酸循環の中で、原子まで分解されなければキラリティはキャンセルにならないことを前提とする。

そもそも、物質が構成される時、特に単位となるようなサブユニットで組み合わせられる時、キラリティを視点として、L 体で構成されるか、D 体で構成されるか、交互に構成されるか、ランダムに構成されるかで、語られることはほとんどないよう見受けられる。

ウイルスカプシドを修飾する構造は逆のキラリティ (アミノ酸が L 体なら D 体) を示すが、これは、別の構造を接続するためにキラリティは反転されなければならないというここでのモデリングスキルの「原則」に合致する。また、分子が原子から合成される時に「ラセミ体」になることも、「初期モデル」合成でキラリティが 1/2 の確率であることと符合する。ウイルスの存在は、「ホモキラリティの起源」のひとつになりうるかもしれない。



使用しているモジュール B&A 折

<参考文献>

1. ウイルス図鑑 101 マリリン・J・ルーシク 2018 創元社
2. 今月の分子：正二十面体ウイルスの準対称性 PDBJ

ジュラ・白亜系境界問題と放散虫の系統進化

松岡 篤^{1,2}

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

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

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

Jurassic-Cretaceous boundary issue and radiolarian phylogeny

Atsushi MATSUOKA

Niigata University/Chiba Institute of Technology

Abstract: Despite being one of the most significant geological sequence boundaries in the Mesozoic Era, the Jurassic–Cretaceous boundary (JKB) remains undefined. It is the last “system” boundary in the geological time scale without a designated Global Boundary Stratotype Section and Point (GSSP). In 2020, the former Berriasian Working Group (BWG) proposed a GSSP candidate for the JKB, but it was not approved by the International Subcommittee on Cretaceous Stratigraphy. A new BWG was formed in February 2021 and has been conducting further considerations. The scope of the study has been expanded both upwards and downwards from the previously proposed JKB, rather than the nearby layers of the boundary so far. As of October 2025, the BWG is in the final stages of determining the primary marker for defining the JKB as well as the characterization of secondary markers. The author is one of the BWG members (ca. 20 in total) and is expected to review radiolarian biostratigraphy and to provide JKB related data from the Pacific and Asian regions. As a result of extensive review of radiolarian fossil records, several promising radiolarian bio-events as primary marker are identified. They include the evolutionary first appearance biohorizons of several radiolarian lineages. Their qualification as primary marker is discussed, introducing ongoing activities of the BWG.

Keywords: Jurassic–Cretaceous boundary, Global Boundary Stratotype Section and Point, Berriasian, radiolarian evolution, Pacific and Asian regions

1. はじめに

地質年代層序の系（時間単元の紀に対応する地層）の境界は、国際標準模式断面および地点 (GSSP)によって定義される。ジュラ・白亜系境界 (JKB) は、その定義のおおもととなる GSSP が決定していない古生代以降の系としては、最後に残った境界である。その決定に責任をもつのは国際層序委員会の下部組織である国際白亜系層序小委員会であり、実務を担うのはベリアシアン作業部会(BWG)である。ベリアシアン階は白亜系を構成する 12 階中の最下部にあたる。現在活動している BWG は 2021 年 2 月に結成され、JKB の策定のために活動を続けている。発表者は約 20 人の BWG の一員であり、地理的にはアジア・太平洋地域を、専門分野としては放散虫を担当している。

BWG による 2025 年 10 月までの 4 年半の活動は、各地域における JKB に関する研究状況について報告しあい、これまでの蓄積と到達点の現状を共有するとともに、各分野の層序研究の進展状況について、共通認識を深めることを中心に進められてきた。現時点は、それらが一通り終了

し、JKB の定義にまつわる第一次マーカーを定めるという新しい局面に入ったところにある。放散虫はあらゆる海域に生息する有殻の原生生物であり、化石記録が豊富に残されるとともに、進化速度が速いことから、地質年代を決定するための示準化石として利用されている。ベリアシアン作業部会の進行中の活動について紹介しつつ、放散虫の系統進化研究の実情について報告する。

2. ジュラ・白亜系境界と放散虫層序

JKB を含む層準の放散虫層序については、1970 年代後半から 1980 年代にかけて、北米、ヨーロッパ、日本で独立に研究が進められた。国際対比を念頭に置きながら統合した結果は、国際放散虫研究者協会ジュラ紀白亜紀検討グループ (INTERRAD JKWG) によって示された[1]。この研究では、JKB にかかわりをもつ放散虫種としては、150 種が取り上げられている。その中には、先祖-子孫の関係をもつ種も含まれている。客観的にかつ一義的な定義を可能とするマーカーとしては、祖先から子孫が分岐する生層準が相応しい。INTERRAD JKWG が扱った種の中からマーカーを探索するのが現実的なやり方といえる。

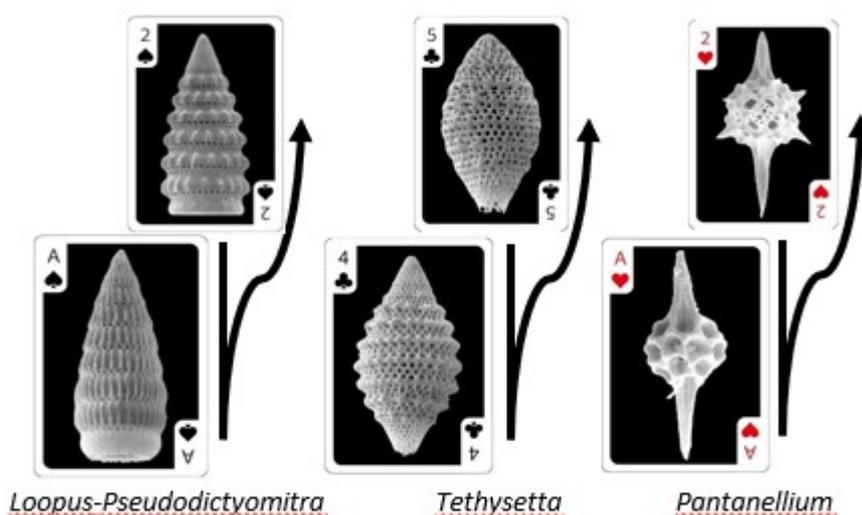


図 1 放散虫トランプとしても利用されている祖先-子孫関係にあるマリアナ群集の放散虫

3. ジュラ・白亜系境界付近の放散虫マーカー候補とその評価

JKB の近傍で祖先から子孫が分岐する種を含む属としては、*Loopus-Pseudodictyomitra*、*Tethysetta*、*Pantanellium*、*Eucyrtidiellum*、*Cinguloturris* などがある。これらの属は、マリアナ海溝産の保存良好な放散虫化石を素材として作成されたトランプ[2] [3]でも扱われている(図 1)。広範な放散虫データを検討した結果、以下の種、すなわち *Bistarcum irazuense* (Aita) 、*Cinguloturris cylindra* Kemkin & Rudenko、*Eucyrtidiellum pyramis* (Aita) 、*Hsuum feliformis* Jud、*Pantanellium berriasianum* Baumgartner、*Pseudoeucyrtis acus* Jud、*Vallupus japonicus* Kawabata などの進化的初出現層準は、第一次マーカーの候補とし有望であることが分かった。本発表では、これらの放散虫系統について、主要マーカーとしての適性について議論する。

文献

- [1] Baumgartner et al., Middle Jurassic to Early Cretaceous radiolarian biochronology of Tethys based on Unitary Associations. *Memoires de Geologie (Lausanne)*, 23, 1013–1048, 1995.
- [2] 松岡 篤, 放散虫トランプの遊び方・学び方. 第 87 回形の科学シンポジウム予稿集, 35–36, 2019.
- [3] 松岡 篤, マリアナ放散虫群集をめぐる物語. *大阪微化石研究会誌*, 特別号, 18, 134–158, 2025.

深層学習を用いた形態定量化手法: Morpho-VAE

堤 真人

名古屋大学大学院医学系研究科附属神経疾患・腫瘍分子医学研究センター

細胞情報統合解析部門データ駆動生物学研究室

愛知県名古屋市昭和区鶴舞町 65 番地 医系研究棟 2 号館 5 階

masa10223@nagoya-u.jp

A deep learning-based morphological quantification method: Morpho-VAE

Masato Tsutsumi

Laboratory of Data-driven Biology, Systems Biology,

Department of Integrative Cellular Informatics,

Center for Neurological Diseases and Cancer,

Graduate School of Medicine, Nagoya University.

Tsurumai 65, Nagoya, Aichi 466-8550,

Abstract: In this study, we developed a novel method called Morpho-VAE to quantify biological morphologies using Variational Autoencoder (VAE), a deep learning technique. The proposed method not only extracted anatomically reasonable features but also demonstrated excellent versatility by handling missing data, which conventional morphological quantification methods could not handle. This suggests that Morpho-VAE is a promising method that opens new possibilities for morphological analysis.

Keywords: Deep Learning, Variational Autoencoder, Morphometrics

Introduction

形態の多様性の要因を形態から読み解くためには、形態の分析が重要であり、それによって形態の変化を記述し、解釈することができる。しかしながら形態の違いを万人には正確に伝えるためには、定量的な指標で表現する必要性がある。Morphometrics は形態比較のために開発された定量的手法である。その中でも、特に計測対象のかたちを特定の点の集合に還元し、計測点同士の相対的な配置の情報を保持しながら解析を進める手法を Geometric Morphometrics (以下、GM) と呼ばれている。GM の解析は、計測対象の形態をそのまま使うのではなく、位置合わせなどの前処理を行う。そして、この前処理を経た形態データに対し、主成分分析 (PCA) などの次元削減手法を用いて「形態空間 (Morphospace)」を構築する。その形態空間では、各軸が形態の特徴量を表し、その軸に沿った形態の変化を見ることで、種などのグループを分ける特徴量を定量化することができる。

GM の代表的なアプローチの一つとしてランドマーク法が挙げられる。ランドマークは解剖学的並びに生物学的に定義でき、かつ対象間に対応可能なもので定義される。ランドマークの個数は位置については、解析する研究者によって定義されるため、異なる研究者間での解析結果を単純に比較することが困難であること [1]。系統的に離れた対象間では

ランドマーク法 が使えないこと [2]。さらに、欠損がある計測対象ではそもそも手法の適用が困難であるなどの問題点が挙げられていた。

Results

本研究では、これらの問題点を解決するために深層生成モデルの一つである、変分オートエンコーダ(以下、VAE)を改良した 深層学習モデル Morpho-VAE を提案する[3]。VAE は、入力データを低次元成分に圧縮するエンコーダ (Encoder)と、圧縮された低次元成分から元のデータと同じサイズに再構築するデコーダ(Decoder) から構成されている。さらに本研究では、低次元成分からラベルを推定する分類器を追加した (図 1)。この改良により、形態の特徴量を抽出し、それを用いて分類を行うことが可能となる。

今回発表者は、霊長目の下顎骨などを用いて本モデルの性能検証を行った。その結果、人工的に欠損を加えたデータに対しても、どのラベルに属しているのかを高い精度で分類だけでなく 欠損前のデータを復元することもできた (図 2 A)。また、本モデルは異なる科に属する霊長目を形態空間内で正しく分離できた (図 2 B) できただけでなく、その抽出した形態特徴量が解剖学的知見に則していることもわかった (図 2 C)。

本研究から従来の形態解析手法とは異なる、形態解析の新しい可能性を拓く有望な手法であることが示唆された。

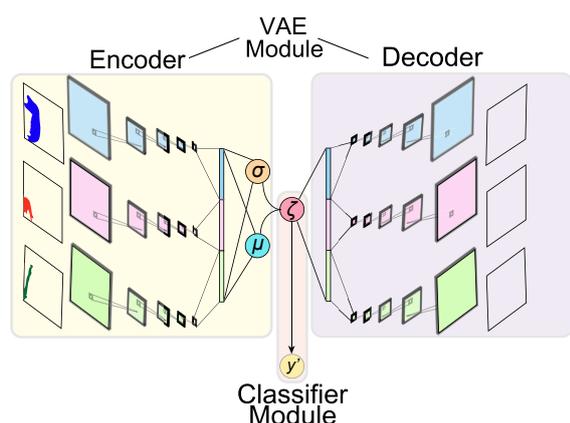


図 1. Morpho-VAE の構成図

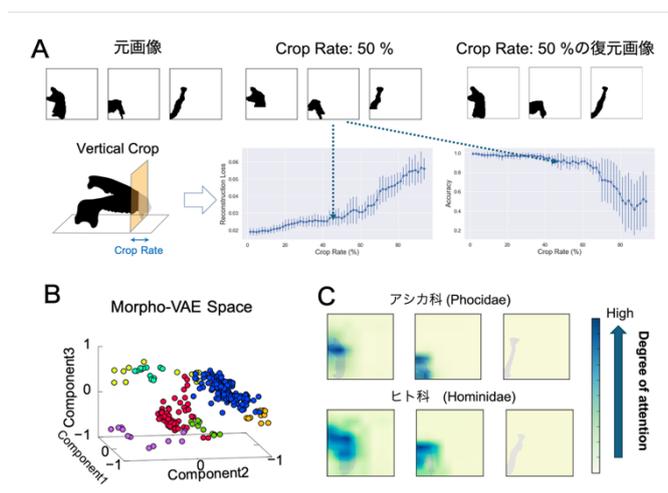


図 2. A. 人工的に欠損を加えたデータに対しても、復元するだけでなく高い精度で分類できた。B. 異なる科の形態を形態空間で分離した。C. Morpho-VAE が着目する部分は解剖学的知見に則している。

References:

1. Fruciano, C., Celik, M. A., Butler, K., Dooley T., Weisbecker V, Phillips MJ. Sharing is caring? Measurement error and the issues arising from combining 3D morphometric datasets. *Ecol Evol.* 7 (2017)
2. Adams, D. C., Rohlf, F. J., Slice, D. E. Geometric morphometrics: Ten years of progress following the ‘revolution.’ *Italian Journal of Zoology*, 71(1) (2004)
3. Tsutsumi, M., Saito, N., Koyabu, D., Furusawa, C. A deep learning approach for morpho- logical feature extraction based on variational auto-encoder: an application to mandible shape. *npj Syst Biol Appl.* 9 (2023).

ハーブサウナ浴による睡眠-覚醒リズムの調整に関する基礎的研究

佐瀬空知¹, 高田宗樹²

¹ 福井大学工学部機械・システム工学科, 〒910-8507 福井市文京 3 丁目 9-1

² 福井大学大学院工学研究科知識社会工学専攻, 〒910-8507 福井市文京 3 丁目 9-1

takada@g.u-fukui.ac.jp

Fundamental Study on the Regulation of Sleep–Wake Rhythms through Herbal Sauna Bathing

Soratomo Sase¹, Hiroki Takada²

¹Department of Mechanical and System Engineering (Robotics Course), Faculty of Engineering, University of Fukui, 3-9-1 Bunkyo, Fukui-city, Fukui 910-8507, Japan

²Department 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: This study investigated the effects of herbal sauna bathing on sleep and circadian rhythm regulation in six healthy young adults. Participants experienced three conditions: no sauna, sauna 12 hours before bedtime, and sauna 3 hours before bedtime. Sleep parameters were measured using Apple Watch and iPhone, and subjective sleep quality was evaluated using the OSA Sleep Inventory (MA version) and the Karolinska Sleepiness Scale.

Results showed that sauna bathing three hours before bedtime significantly improved sleep onset latency, total sleep time, and sleep efficiency, and tended to reduce daytime sleepiness. Sauna bathing 12 hours before bedtime also showed moderate improvement trends in subjective sleep quality.

These findings suggest that herbal sauna bathing, especially when performed three hours before sleep, may enhance sleep quality and promote circadian rhythm stabilization.

Keywords: Herbal sauna, Circadian rhythm, Sleep latency, Subjective sleep quality

1. はじめに

現代社会では夜間照明や電子機器の使用、シフト勤務の増加などにより、サーカディアンリズム(概日リズム)の乱れが顕著となっている¹⁾。このリズムの崩れは不眠、日中の眠気、集中力低下、さらには代謝・心血管疾患のリスク増大にも関与することが知られている²⁾。

一方、サウナ入浴は古くから温熱刺激による自律神経調整効果が知られ、リラクゼーションや血行促進をもたらす。近年、ハーブサウナ(Herbal Sauna)は温熱効果に加え、芳香成分による副交感神経賦活作用やストレス緩和効果が注目されている³⁾。

本研究では、ハーブサウナの入浴タイミングの違い(就寝約 3 時間前・12 時間前)が、睡眠およびサーカディアンリズムに及ぼす影響を検討することを目的とした。

2. 方法

若年健常者 6 名(21.33 ± 0.52 歳)を対象に、①ハーブサウナなし、②就寝約 12 時間前入浴、③就寝約 3 時間前入浴の 3 条件を設定した。各条件の順序はランダム化し、順序効果を排除した。ハーブサウナ入浴は各条件とも 20 分間実施した。

睡眠時には Apple Watch(Apple Inc.)および iPhone(Apple Inc.)を用いて睡眠データを記録し

た。Apple Watch では加速度センサーを用いて三軸加速度を測定し、iPhone では就寝時刻および起床時刻を記録した。これらのデータから入眠潜時、総睡眠時間、睡眠効率を算出した。総睡眠時間、睡眠効率については中途覚醒のデータを取得していないため、参考値として算出した。また、起床時には入眠潜時の主観評価と OSA 睡眠調査票 MA 版を用いて主観的に睡眠を評価し、日中にはカロリンスカ眠気尺度を用いて眠気を評価した。

入眠潜時、睡眠時間等の量的データについては、t 検定を行い、OSA 睡眠調査票 MA 版、カロリンスカ眠気尺度を用いた主観評価については、Wilcoxon の符号付順位和検定を行った。

3. 結果

就寝約 3 時間前のハーブサウナ入浴では、入眠潜時・総睡眠時間・睡眠効率の有意な改善が認められた ($p < 0.05$)。

また、日中の眠気スコアの低下傾向 ($p < 0.1$) がみられ、OSA 睡眠調査票では「疲労回復」「夢み」「睡眠時間」因子に改善傾向が確認された。

一方、12 時間前入浴では主観的指標の一部に改善傾向が見られたが、睡眠効率への直接的影響は限定的であった。

4. 考察

本研究の結果から、ハーブサウナ入浴は睡眠およびサーカディアンリズムの調整に有効である可能性が示唆された。特に就寝約 3 時間前に入浴では、深部体温の一時的上昇とその後の低下が自然な体温リズムと同調し、入眠促進および睡眠の質向上に寄与したと考えられる。

また、芳香成分のリラクゼーション作用が副交感神経活動を高め、疲労回復と睡眠満足度向上を支えた可能性がある。

今後は、2~3 日にわたる自律神経・体温リズムの変動(持続効果)をスマートセンサで定量的に評価し、ハーブサウナが生体リズム調整に与える長期的影響を検証する。

参考文献

- 1) ZAUCHA, Radoslaw, ANCZYK, Stanislaw, SILLDORFF, Julia, DUDEK, Marcin, GAJKIEWICZ, Magdalena, ZAJAC, Malgorzata, FURA, Tomasz, ISZCZUK, Oliwia and FELINSKA, Zuzanna: “The Impact of Modern Lifestyle on Circadian Rhythms: Implications for Mental and Physical Health”, *Quality in Sport*, 2024;19:53200, eISSN 2450-3118.
- 2) Zimmet P, Alberti KGMM, Stern N, Bilu C, El-Osta A, Einat H, Kronfeld-Schor N: “ The Circadian Syndrome: is the Metabolic Syndrome and much more!”, *J Intern Med*, 2019, Vol.286(2), pp.181-191.
- 3) Nakashima D, Matsuura Y, Tsukamoto K, Hirata T, Takada H: “ Effect of herbal sauna exposure on skin hydration, EEG α/β ratio, and HRV”, *Journal of the Society for the Science on Form*, 2025, Vol.39(2), pp.1-8.

種内多型から解き明かすテントウムシの斑紋形成メカニズム

武田 諒

広島大学 統合生命・数理生命プログラム 東広島市 鏡山 1-3-1

D245612@hiroshima-u.ac.jp

Deciphering the Mechanisms of Ladybird Pattern Formation Through Intraspecific Polymorphism

Ryo Takeda

Hiroshima Univ/Graduate School of Integrate Science for Life

Abstract: My study analyzed color-pattern polymorphisms in three ladybird species and demonstrated, for the first time, a conserved morphological feature in which pattern elements occupy mutually exclusive spatial domains across morphs. By extending the Turing model, we further showed that inhibitory interactions between multiple pattern-determining systems can generate the observed irregular spacing of spots. These findings provide insights into the genetic regulatory mechanisms that specify spot positions in ladybird beetles.

Keywords: Evo-Devo, theoretical biology, pattern formation, Turing model

昆虫は進化を経て多様な形態を獲得してきた。この多様な形態を生じさせる遺伝的制御はヒトを含む動物の形態進化を紐解く鍵となる。多様な形態の遺伝的制御を解き明かす上で形態の保存性が大きな手掛かりとなる例がある。例えば、鱗翅目タテハチョウ科の多様な翅模様はグランドプランと呼ばれる形態的保存性が存在し [Nijhout, 1991]、このグランドプランと相同的に発現している遺伝子:wntA が翅の模様領域を決定する。加えてこのwntA の濃度勾配の変化により模様の多様性が一部説明されることが示唆されている [Martin and Reed, 2014]。テントウムシ族(Coccinellini)もチョウ同様に多様な斑紋模様を示す。加えてテントウムシ族は種間の多様性に加え、少なくない種でこの模様の斑紋の色、配置に種内で離散的な多型を示す現象が知られている。例えばナミテントウ *Harmonia axyridis* では主に赤地一黒斑紋を持つ h 型、及び黒地一赤斑紋を持つ hA 型, hC 型, hSp 型の計 4 つの型を持つ [Dobzhansky, 1924]。(fig. 1, a-d)。

シロジュウシホシテントウ *Calvia quatuordecimguttata*(fig.1,e,f),ten-spotted-ladybeetle,*Adalia decempunctata*(fig.1,g,h)なども、斑紋の色と配置どちらも異なる型を同種内で示す(fig. 1 e,f)。一方でこれらのテントウムシの斑紋多様性を説明する形態的保存性、および遺伝的制御は不明である。

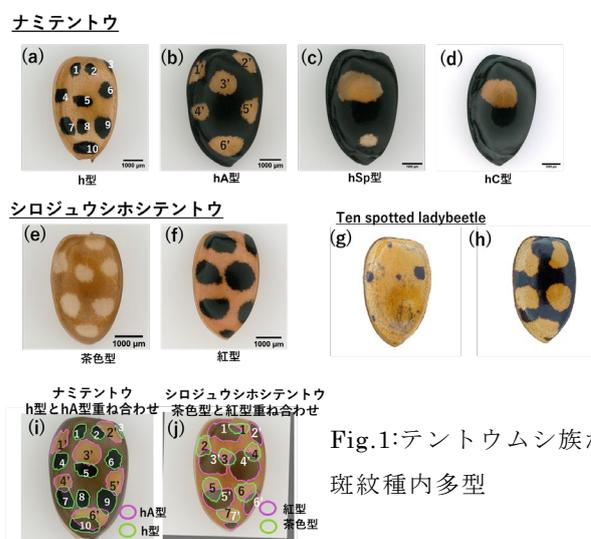


Fig.1:テントウムシ族が示す斑紋種内多型

テントウムシでは種間比較が不足していたため、従来研究は主にナミテントウの種内多型に注目し、斑紋位置の遺伝的制御の解明を進めてきた。ナミテントウの各型は1つの対立遺伝子により規定され [Tan and Li, 1934; 安谷, 1936; 駒井 1956]、この遺伝子は黒色前駆領域で発現する転写因子 *pnr* である [Ando et al., 2018; Gautier et al. 2018]。 *pnr* の上流には斑紋位置を制御する遺伝子ネットワークが存在すると考えられるが、実態は未解明のままである。さらに、*h* 型と *hA* 型の斑紋は互いに同所的に現れないという“斑紋空間排他性”が報告されている [Chino, 1918]。この特徴が他種でも保存されているかどうかは検討されてこなかった。

ナミテントウ型間で見られる斑紋の空間排他性がテントウムシ族で種を越えて保存されるなら、斑紋形成の遺伝的基盤を探る上で重要な手掛かりとなる。加えて斑紋位置を決定する遺伝子が特定されていなくとも、斑紋のような周期的パターンは Turing モデルで説明されることがある [Turing, 1952]。 *pnr* は一層の細胞層で発現し、そこで細胞間相互作用や拡散分子による相互作用が可能であるため、Turing モデルを適用できる条件を満たす。Turing モデルは斑紋形状や間隔の不均一性まで完全には説明できないが、複数のテントウムシ種で斑紋配置を再現できることが示されている [Liaw SS, 2001]。そこで本研究では、形態的保存性（斑紋空間排他性）に着目し、Turing モデルを用いて斑紋位置決定の遺伝的制御を推定することを目指した。

本研究では、3種の種内多型を示すテントウムシにおいて、斑紋の形態解析を通じて、型間の斑紋空間排他性を提示した。加えて、一部の型では斑紋の距離の不均一性が存在することを示した。一方で、turing モデルが再現する斑紋配置は、間隔が均一になるのが最安定であるため、型間の斑紋空間排他性を示す種の間隔が不均一な斑紋配置とは不整合である。上記の整合性検証のため、turing モデルによるテントウムシの斑紋の配置の再現可能性を検証した。その結果 turing system は一部の種の斑紋配置は再現されるが斑紋距離の不均一性を持つ種の斑紋配置は再現できなかった。これらの結果から、種内多型を示す種では複数の斑紋位置を決定する遺伝子モジュラリティがありのかつその間に抑制的制御がある可能性である。そこでこの可能性を検証するため、2つの turing system (system1, system2) と、system1, system2 の間で抑制する相互作用を仮定した。このモデルは、先ほど再現されなかった、斑紋距離の不均一性が強い配置を再現した。我々の研究はテントウムシの斑紋模様について形態的な保存性を初めて明示し、加えてそこから斑紋位置を決定する遺伝的制御の一部を予測するものである。

引用文献

- AndoToshiya. (2018). Repeated inversions within a pannier intron drive diversification of intraspecific colour patterns of ladybird beetles.
- Chino. (1918). Researches on the Variation of the Coccinellid (*Ptychanatis axyridis*, Pall.).
- DobzhanskyHT. (1924). Die geographische und individuelle Variabilität von *Harmonia axyridis* Pallas in ihren Wechselbeziehungen. 44.
- Frederik NijhoutH. (1991). The Development and Evolution of Butterfly Wing Patterns. Smithsonian Institution.
- GautierMathieu, YamaguchiJunichi, FoucaudJulien, LoiseauAnne, AussetAurélien, FaconBenoit, . . . Berges. (2018). The Genomic Basis of Color Pattern Polymorphism in the Harlequin Ladybird. 28(20).
- LiawSS, YangCC, LiuTR, HongTJ. (2001). Turing model for the patterns of lady beetles. 64(4).
- MartinArnaud, ReedDRobert. (2014). Wnt signaling underlies evolution and development of the butterfly wing pattern symmetry systems. 395(2).
- TanChia-Chen, LiJu-Chi. (1934). Inheritance of the Elytral Color Patterns of the Lady-Bird Beetle, *Harmonia axyridis* Pallas. 68(716).
- TuringMA. (1952). The chemical basis of morphogenesis. 52(1-2).
- 安谷星野. (1936). テントウムシ, *Harmonia axyridis* PALLAS の遺傳學的研究 (第二報). 12(6).
- 駒井 卓. (1956). Genetics of Ladybeetles. Elsevier

動きをもたらす「しかけ」のかたち

松村 真宏

大阪大学大学院経済学研究科、大阪府豊中市待兼山町 1-7

matumura@econ.osaka-u.ac.jp

The Forms of Shikake That Induce Human Action

Naohiro Matsumura

Graduate School of Economics, The University of Osaka, 1-7

Machikaneyama, Toyonaka, Osaka 560-0043 JAPAN

Abstract: People are often prompted to act by the “shape” of things. Behind such forms that bring about movement lie physical, psychological, and social mechanisms. This study introduces the framework of Shikakeology, a science of shaping behavior that seeks to trigger spontaneous behavioral change, and explores its connection with the science of form. In particular, it discusses, through real-world implementation cases, how not only physical shapes but also semantic and contextual forms can induce human behavior. By examining how form interacts with perception, memory, and social context to transform passive obligation into active engagement, this study aims to reveal how subtle changes in the environment can reshape human action itself.

Keywords: Shikakeology, behavioral change, active engagement

はじめに

人の行動は、しばしば形に導かれる。例えば、ゴミ箱の上にバスケットゴールを取り付けると、ゴミを捨てるという行為がシュートを決める遊びへと変わり、投げ入れたくなる。階段をピアノの鍵盤のようにデザインすると、一段上るごとに音が鳴り、昇降が音楽体験へと変わって人々が自ら階段を選ぶようになる。このように、かたちは単なる物理的構造ではなく、行動の意味を再構成し、自発的な行動を引き出す契機として働く。本稿では、行動を誘発するデザイン原理としての「仕掛け (Shikake)」に注目し、形がもたらす「動き」の生成メカニズムを探る。仕掛けとは、人の心と身体を動かす誘発装置であり、強制ではなく自発を促す点に特徴がある。

仕掛け学の枠組み

人の行動は、しばしば形に導かれる。しかし、その誘発は形の物理的な特性だけによって生じるのではない。仕掛け学が明らかにしようとするのは、形が人の過去の経験や記憶と結びつき、それが新たな意味づけを生み出し、行動の動機へと転化していくプロセスである。例えば、バスケットゴールの形は、過去にボールを投げ入れて遊んだ記憶を呼び起こし、「捨てる」という行為を「▽シュートする」という遊びへと再構成する。映画『ローマの休日』で知られる「真実の口」の造形は、その記憶とともに手を入れてみたくなる欲求

を喚起し、手指消毒という行動を促す。このように、形は過去と現在を媒介し、記憶に根ざした意味づけを通して新しい行動を生み出す仕掛けとして機能するのである。仕掛学は、この「形—記憶—意味—行動」という連鎖を明らかにし、それを活用して人の自発的な行動変容を引き出す設計原理を探究する学問である。



図1. 真実の口型手指消毒器



図2. バasketゴール付きゴミ箱

FORMA モデル：行動を誘発する「かたち」の4層プロセス

FORMA モデルは、形が人の行動を直接生み出すのではなく、人の記憶や意味づけとの相互作用を通じて行動が立ち上がるプロセスを4段階で説明する枠組みである。形は単なる外見ではなく、過去の経験と現在の状況を媒介し、新たな行動を生む装置として機能する。

- ① Form (形の知覚)：形はまず、線・曲面・色・大きさといった物理的特徴として感覚に捉えられる。例：バスケットゴールの円形や高さ、「真実の口」の口の穴。
- ② Recall (記憶の想起)：人はその形を見たとき、過去に経験した出来事や感情と無意識に結びつける。例：バスケットボールを投げた記憶、映画『ローマの休日』の名場面。
- ③ Meaning-making (意味の再構成)：対象の意味づけが変化する。「ゴミ箱」や「消毒装置」が「シュートするリング」や「手を入れて遊ぶ口」に再解釈される。
- ④ Action (行動の誘発)：再構成された意味が行動の動機となって現れる。義務感や指示によらず、「やってみたい」「つい手を伸ばす」という自発的な動きが生まれる。

FORMA モデルは、仕掛けが「形 → 記憶 → 意味 → 行動」という段階を経て働くことを示している。したがって、効果的な仕掛けを設計するには、形そのものだけでなく、人々がどのような記憶や文化的知識を持っているかを読み解き、それと結びつく形を意図的にデザインすることが重要となる。

形の科学との接点

形の科学が「構造・幾何・変形」といった形そのものの物理的・数学的性質を探究するのに対し、仕掛学は人の経験や記憶との結びつきを通して形が生み出す意味・文脈・行動に注目する。すなわち、形が“動きを生む”だけでなく、「動きたい」という心理を呼び覚ますプロセスに焦点を当てているのである。このとき形は単なる外形ではなく、過去の体験を想起させ、新たな意味づけを生み出す媒介装置として機能する。形の科学と仕掛学の統合は、こうした「形」と「記憶・行動」との相互作用を扱う新たな研究領域、すなわち「行動生成のかたち (form of behavior)」を切り拓く可能性を秘めている。

理科の認知の発展を促すかたち

松浦執¹, 井戸季詠子², 後藤勝洋³,

¹東京学芸大学教育学部、東京都小金井市貫井北町 4-1-1

²八王子市立いずみの森義務教育学校、東京都八王子市立子安町 2-18-1

³渋谷区立渋谷本町学園、東京都渋谷区本町 4-3-1

(連絡先アドレス) shum00@u-gakugei.ac.jp

Forms that Promote the Development of Scientific Cognition

Shu Matsuura¹, Kieko Ido², Katsuhiro Goto³,

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

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

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

Abstract: Science learning across school levels connects through fundamental concepts like force and energy. However, strengthening the connection to real-world experiences may sometimes be necessary for understanding. Several examples taught in schools are shown.

Keywords: Linkage of science concepts between school levels, Development of cognition.

1. 小・中・高校理科の連携

理科の学習はスパイラルアップと表現される。自然の事象を繰り返し取り上げ、理解を深化させる。小学校は体験中心、中学校では定義された物理量の関係を測定する、そして高校では数式を用いて自然を理解する。小学校では自然現象を日常語で体験するが、高校では数式が自然現象の原理を最も直接的に表現する言語（記号体系）であることを学ぶ。その過程で、学ぶ記号が溢れてくるので、直接・間接に実体験、あるいは近くで体感する体験を持ってない記号も増えてくる。できれば一つの体感・体験で複数種の問題を統合的に受容できると良いかもしれないのだが。

本講演の目的は、形が手がかりとなって連想的につながり得る主題と、体感をもとに想起して関連づける例などを挙げ、学び方としては関連性志向、教える側の理解としては専門校種の枠に限定されない認知を得る方法を模索することにある。

2. 力と重さ

小学校の物理分野は風とゴムで力を体感し、力を物の運動を変化させる作用として導入する。風力は扇風機で空気に非対称な運動量を与えることに始まるので、衝突により運動量を与える過程がすでに取り上げられていることになる。帆かけ車を風の力で加速する。車に積んだモーターでプロペラを回すプロペラカーでは、プロペラが風を起こす「反動」で車体が力を受ける。同じ教材が、中学では「作用・反作用」に置き換えられ、高校では

空気の粒子の流れの「運動量」の考察になる。モーターと帆を乗せることで、力から力の法則へと概念の展開を搭載できる教材となった。

重さについては5年生で、重力を復元力とする振り子が導入される。しかし並進運動ではなく回転運動の観察である。3年生でのゴムの力とほとんど関連づけられず、振り子の運動を特徴づける復元力に触れられない。重力加速度の異なる惑星地表面での運動の比較が教材化されれば関心が高まるのではないか。

一方、振り子の運動の振り子の長さ依存性は特に注目される。慣性モーメントは6年生のテコの原理に受け継がれる。テコの原理は小学校で初めて計算を伴う実験課題となる。しかも、重さに長さを掛け算するという直感的に理解し難い計算処理である。

しかしながら教材としては天秤なので、重りの位置を変えながら腕を上下することを繰り返せば、重りの重さは一定のままなのに、重りの手応えが違って感じられるから、重りの重さを何らか拡張した量に変換する必然性を体感することができる(図1)。

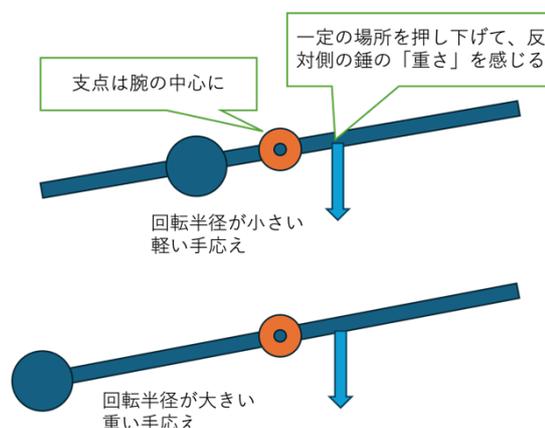


図1. 手応えで「重さ」を感じとる

逆に腕の長さを変えながら、固定した重りを持ち上げる運動をしてみれば、腕の長さの効果を手で感じ、振り子の運動を振り返ることができる。

テコが再び登場するのは中学理科の仕事の原理である。この場合、小学校では腕の長さに注目していたのが、鉛直方向に視線が移り、どれだけの高さを移動させるかという仕事の説明に用いられる。長さとの高さと高さの連結がなく、小学校のテコの学習の後半が機械としてのテコのはたらきでありながら、やや唐突感がある。小学校では仕事の概念が登場しないが、仕事の概念を導くための、より包括的な説明のストーリーが望まれる。

3. 逆らってする仕事

手回し発電機で発電すると、発電電流の大きさに比例した手応えが反力として知覚できる。力は2物体AB間で作用する。作用・反作用がAB間に存在する。力の第3法則によれば、作用・反作用は必ず存在するので、Aの力がBに仕事をする時、AはBからの反作用に逆らって仕事をしている。運動量やエネルギーの交換の際に「逆らう仕事」が起きる。この「逆らう」感覚、反力を感じることが、力の存在や、運動量やエネルギーの交換の実感を得る手立てになるのではないか。

ただし、円運動の軌道に直行する向心力、スケートボードなどでの垂直な壁に近似するバンクの傾斜面(すなわち運動の拘束条件となる束縛面の角度が鉛直である)からの垂直抗力は、物体の運動と垂直になるので、物体に仕事をしない。

4. おわりに

運動量やエネルギーなど基礎的な概念をおりに触れて知覚に結びつけることは重要だと思う。ニュートンの揺かごや振り子などは印象深い形を与える。反力は触覚に深い印象を残す。その感覚は知識の初歩段階から積極的に感じ取られることが望ましく思う。

ピローボックスの体積最大化問題と等長変形

小磯 深幸

九州大学マス・フォア・インダストリ研究所、福岡市西区元岡 744

koiso@imi.kyushu-u.ac.jp

Pillow boxes with maximal volumes and isometric deformations

Miyuki Koiso

Institute of Mathematics for Industry, Kyushu University, Motooka,
Nishi-ku, Fukuoka, 819-0395 Japan

Abstract: A pillow box is isometric to a double rectangle consisting of two copies of a rectangle. Pillow boxes are surfaces used for gift boxes, packaging, and even architectural applications. In this talk, first, for a given double rectangle, we give the existence, uniqueness, and the explicit representation of the pillow box enclosing the maximal volume. Next, if the crease pattern is allowed to change, there exist continuous isometric (that is, without stretching and contracting) deformations from a pillow box to a double rectangle. However, we show that any isometric deformation from a pillow box to a double rectangle preserving the crease pattern necessarily changes the topology of the pillow box.

Keywords: pillow box, isometric deformation, curved folding, maximal volume

1.はじめに

ピローボックスとは、同じサイズの2枚の長方形の紙の対応する辺をくっ付けて袋状にしたもの(二重長方形と呼ぶことにする)を伸び縮みさせることなく曲げたり折ったりすることにより作られる箱であり(図1)、枕を思わせるような形状のものである。ピローボックスは、保管に場所をとらず、素早く簡単に形作ることができることから、贈り物や商品の包装用の箱等として広く用いられ、建築への応用も期待される。与えられた長方形を用いて可能な限り体積が大きいピローボックスを作るという問題は、従来主として工学あるいは応用数学の観点から興味を持たれ、近似解の構成や数値計算の結果が知られていた。本講演では、体積最大解の存在、一意性、解の表示式を厳密に紹介する(定理1)。さらに、二重長方形からピローボックスに、伸び縮みさせないだけで無く、余分なシワや折り目を作ること無く連続的に変形することはできないということを示す(定理2)。

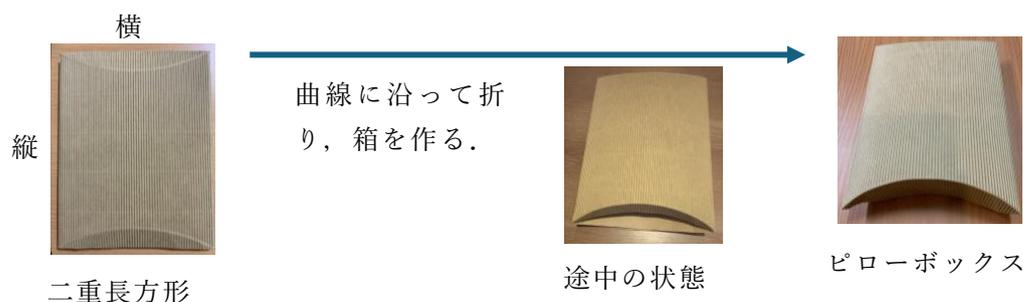


図1.二重長方形とピローボックス

2. ピローボックスの体積最大化問題

数学的には、ピローボックスは、二重長方形との間の1対1対応があり、その対応によりピローボックス上の任意の曲線と二重長方形上の対応する曲線の長さが同じであるものである(このようなピローボックスと二重長方形は互いに等長であると呼ばれる)。また、本研究では、図2のように、上下対称なものを考える。

定理1 ([1]). 任意の大きさの二重長方形を与えて縦横(たてよこ)を決めたとき、それと等長なピローボックスの中で体積最大のものがただ1つ存在する。そして、体積最大解を構成する柱面の底曲線(図2の Γ_0)は弾性曲線であり、楕円積分を用いて具体的に表示できる(講演の中で紹介する)。

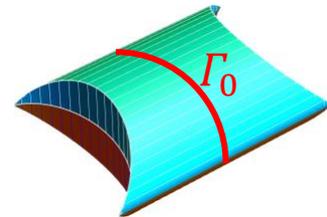


図2.ピローボックスと底曲線 Γ_0

3. 二重長方形からピローボックスへの等長変形

二重長方形からそれと等長なピローボックスへ、伸び縮みさせることなく連続的に変形する(連続等長変形と呼ぶ)ことが可能であろうか? 図3は、連続等長変形の例を示している。しかし、そこでは、折り位置(crease pattern と呼ばれる)が徐々に変化しており、実用上具合が悪い。[2]では、折り位置を変えない連続等長変形は不可能であることを証明した:

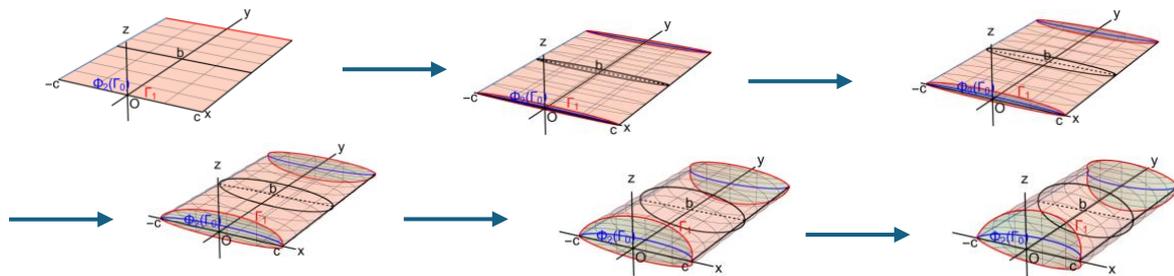


図3.二重長方形からピローボックスへの折り位置を変える連続等長変形

定理2 ([2]). ピローボックスの上半分(図4左図で上半空間 $\{z \geq 0\}$ に含まれる部分)を (x, y) 平面の長方形領域(図4右図)まで折り位置を変えず、二重長方形の縦の辺に対応する部分は (x, y) 平面上に留めながら連続的に等長変形すると、途中(図4中央)で必ず両端の曲線が下半空間 $\{z < 0\}$ にはみ出てしまう。

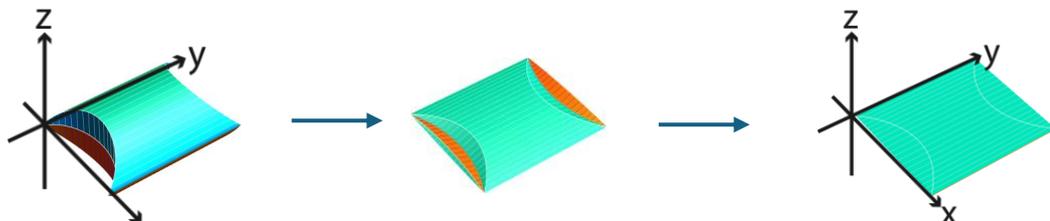


図4.ピローボックスから二重長方形への折り位置を変えない変形

参考文献 [1] 小磯深幸, 微分幾何を用いた問題解決 ---物体の測り方で見えるもの---, 数理科学 2022年9月号 No.711 (2022.9), pp.14--20.

[2] Atsufumi Honda and Miyuki Koiso: Isometric deformations of pillow boxes, arXiv:2509.02049

仮想空間におけるジェスチャによる4次元物体操作システム

王 逸飛¹ 松浦 昭洋²

^{1,2} 東京電機大学, 〒350-0394 埼玉県比企郡鳩山町石坂

E-mail: ¹24rmd08@ms.dendai.ac.jp, ²matsu@rd.dendai.ac.jp

A Gesture-Based Manipulation System of Four-Dimensional Objects in Virtual Space

Itsuhi Oh¹ Akihiro Matsuura²

^{1,2} Tokyo Denki University, Ishizaka, Hatoyama-machi, Hiki, 350-0394 Japan.

Abstract: We present a gesture-based VR system for manipulating four-dimensional solids with three-dimensional perspective view in the virtual space. We implemented basic operations such as translation, scaling of two types, and rotations in the four-dimensional space and confirmed their operability.

Keywords: Four-dimensional space, virtual space, perspective, gesture, manipulation, scaling, rotation

1. はじめに

ビッグデータ、クラウドコンピューティング等においては、多次元データの効率的な処理・分析・可視化等は重要な課題である。同時に、多次元立体やデータを人の直感的なインタラクションの対象とする試みも行われている。例えば、文献[1]では、4次元立体・データを複数の3次元部分空間に同時に投影して可視化し、HMD用コントローラを用いて操作するVRシステムが提案された。[2]では、N次元空間($N \geq 4$)の剛体を3次元の断面として可視化し、基本操作や物体の衝突判定が可能な対話的システムが提案された。[3]では、超立方体を3次元に透視投影し、4つ目の軸を回転不変面に含む回転を、手の平の開閉と手の前後運動を用いたジェスチャで操作する手法が提案された。[4]では、3次元に透視投影された4次元立体に対する平行移動、拡大縮小、回転のためのジェスチャを定め、超立方体、正5胞体等を用いて、それらのジェスチャによる直感的操作が実際に可能であることが示された。しかし、仮想空間に人が没入し、手によるジェスチャで4次元立体や点群データ操作可能な対話的システムは筆者らの知る限りなかった。そこで本発表では、[4]で設定された透視投影による3次元空間を仮想空間として、ユーザ自身本空間に没入し、[4]で定義されたジェスチャを踏襲した操作方法で、4次元立体や空間内の点群の平行移動、拡大縮小、一軸方向の伸縮、回転が可能なVRシステムを構築したので報告する。

2. 可視化とジェスチャ入力

2.1 可視化

4次元空間は直交する4軸(xyzw)をもつユークリッド空間とし、本空間の表示は $w=0$ のxyz空間に透視投影して行う。画面はヘッドマウントディスプレイ(Meta Quest 2、以下HMDと書く)に仮想空間として表示されることを想定した。本稿では、主に4次元正多胞体やランダム生成された4次元の点群の描画と手指のジェスチャによる基本操作(平行移動、拡大縮小、一軸方向の伸縮)を対象とした。

2.2 ジェスチャ入力

ジェスチャ入力は、[4]で提案されたWebカメラに対する手法を使用したHMDに適したものに調整した。

平行移動: [4]と同様、以下のように定めた。移動対象の立体に対し、右手の人差し指と親指の腹同士を合わせた状態で手をいずれかの方向に移動させると、立体もその方向に移動する。

拡大縮小: [4]と同様、以下のように定めた。対象の立体に対し、右手の中指と親指の腹同士を合わせた状態で手を身体方向(手前方向)に動かすと立体は(相似)縮小し、指を離すと縮小を停止する。逆に、手を身体から離れる方向に動かすと立体は(相似)拡大し、指を離すと拡大を停止する。

一軸方向の伸縮: 追加した操作とジェスチャである。対象の立体に対し、それぞれの手で人差し指と親指の腹同士を合わせ、顔の前で両手を近づけると設定した一軸方向にのみ縮小し、遠ざけると拡大する。

回転: 4次元の2タイプの回転(xyz空間内の回転とw軸を含む不変面をもつ回転)のうち、xyz空間内の回転は、[4]では右手の人差し指と中指を伸ばしたまま付けて回すように動かし行っていたが、HMDのカメラによるトラッキングの認識精度が低かったため、以下のジェスチャを用いた。左手の親指、人差し指、中指の腹を合わせ、回転させたい面で回す動作を行う。2軸からなる3通りの面において、両方向に回転

操作が可能であることを確認した。w 軸を含む回転不変面をもつ回転については、[4]と同様、以下のように定めた。右手の薬指と親指の腹を合わせた状態で手を身体方向に動かしながら最後に指を離す。逆回転は、同じ指の状態です手を逆方向に動かす。これにより、対象となる4次元立体において、例えば超立方体の場合、透視図の3次元空間で、外側の立方体に変形しながら縮小して内部に移動して小立方体となり、再びそれらの立方体が交代するように可視化される回転が可能となる。

3. 実装と実行例

本システムはゲームエンジン Unity 2022.3.20f1c1 上で C#言語を用いて実装した。本稿では、超立方体、正24胞体、200個のランダム生成した点からなる点群を例に、2章で定めたジェスチャにより3次元仮想空間内での立体の基本操作を確認した。図1に超立方体の操作例、正24胞体の頂点表示、超立方体の頂点とランダム生成された点群の表示例を示す。図2に2章で述べた基本操作を行う最中のジェスチャ例を示す。それぞれの操作がこれらのジェスチャにより実際に可能であることを確認した。

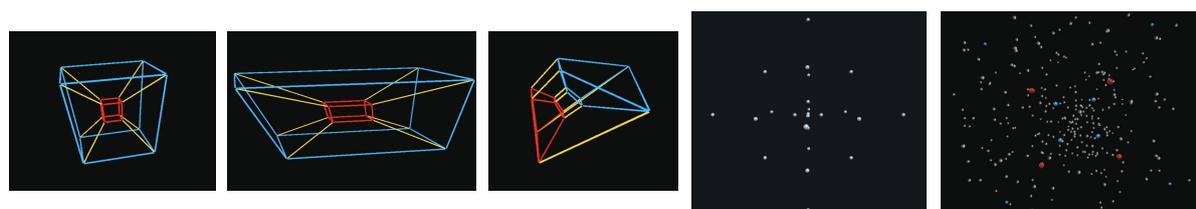


図1 (a) 超立方体 (b) 一軸方向に伸長した超直方体 (c) 回転途中の超立方体
(d) 正24胞体の頂点表示 (e) 超立方体の頂点とランダム生成した点群表示

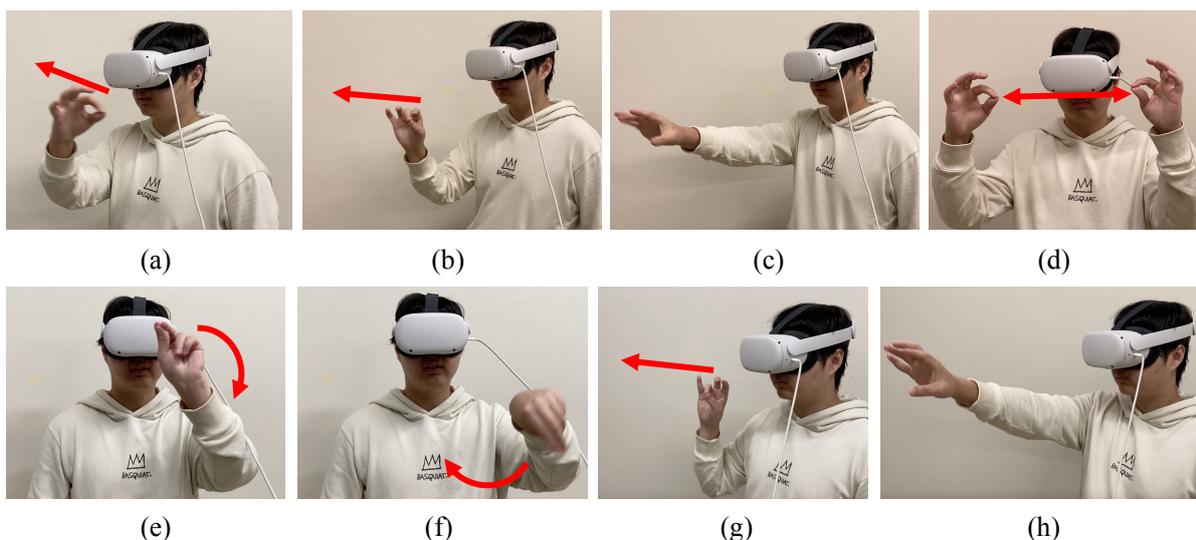


図2 (a) 平行移動 (b) 拡大操作前 (c) 拡大操作後 (d) 一軸方向の伸縮
(e) 平面内回転前 (f) 平面内回転中(時計回り) (g) w軸不変面・回転前 (h) w軸不変面・回転後

謝辞 本研究は、JSPS 科研費 24K15250 の助成を受けて行った。

参考文献

[1] K. Matsumoto, N. Ogawa, H. Inou, S. Kaji, Y. Ishii, M. Hirose, “Polyvision: 4D Space Manipulation through Multiple Projections,” SIGGRAPH Asia 2019 Emerging Technologies, pp. 36–37, 2019.
 [2] M. ten Bosch, “N-dimensional Rigid Body Dynamics,” ACM Transactions on Graphics (TOG), Vol. 39, Iss. 4, Article No. 55, pp. 55:1–55:6, 2020.
 [3] 福田健博, 松浦昭洋, “直感的な手の動きによる4次元超立方体の回転操作手法,” 映像表現・芸術科学フォーラム2021, 映情学技報, Vol. 45, pp. 13–16, 2021.
 [4] 王逸飛, 松浦昭洋, “4次元立体のジェスチャを用いた直感的操作の試み,” 第97回形の科学シンポジウム予稿集, pp. 47–48, 2024.

回転式開閉機構を有する簡易構造物に関する研究 — 平板の枚数が偶数の場合 —

小野聡子

近畿大学 産業理工学部 建築・デザイン学科

〒 820 - 8555 飯塚市柏の森 11 番 6 号

satoko@fuk.kindai.ac.jp

Study of a simple structure with a rotary opening and closing mechanism - In the case of an even number of flat plates -

Satoko ONO

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

Abstract : Regular ventilation of indoor spaces is essential to prevent the infection and spread of COVID-19. The objective of this study is to create a simple building that enables ventilation in a comfortable manner. This report presents the results of constructing a rotating opening mechanism composed of an even number of flat plates.

Keywords : simple structure, rotary opening and closing mechanism, iris diaphragm, even number of plates

1. 序

本研究では、カメラのレンズの絞りの 1 つである『虹彩絞り』を応用することにより、回転しながら開閉が可能である簡易な建築物を制作することを目的としている。本報告では、偶数の平板で構成される回転式開口機構の制作結果について報告する。

2. 制作方法

制作方法は、以下のとおりである。円の中心部分を平板の枚数で等分したのち、1 枚の平板の左右が同じ曲線となるように線をひく。つづいて、平板の固定点を中心として、可動点を通る曲線を作図する。それにそって軌道を設置することにより、各平板の制作は完了する。平板を設置する土台については、平板と同じ枚数で等分する。その後、平板の固定点および可動点を通る軌道にそって、接続用の穴を設置する。ガイドについては、平板の枚数だけ円を等分したのち、軌道にそって穴を設置する。最後に、これらのパーツを組み立てることにより、虹彩絞りによる回転式開閉機構の模型が完成する。

3. 制作結果およびその考察

制作した開閉式回転機構の模型を写真 1 から写真 4 に示す。写真 1 から写真 4 より、虹彩絞りを適用して偶数枚の平板による開閉式回転機構を制作することが可能となった。平板が 6 枚以下では、各平板に設置したガイドが不要となった。一方、開閉する際、土台作用する力により模型の一部が破損した。また、平板が 6 枚以下では、開いた場合に設置した平板が土台からはみ出した。

4. 結語

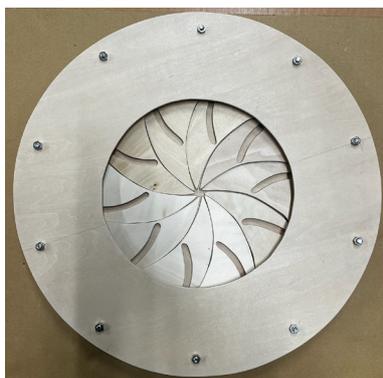
本論文では、細虹彩絞りを適用して偶数枚の平板による開閉式回転機構の模型を制作した。その結果、開閉式回転機構の模型を制作することができた。今後は、問題点を解決するとともに、平板が奇数枚の場合について、開閉式回転機構の模型を制作予定である。

【参考文献】

(1) 堀田楓, 小野聡子: 回転式開閉機構を有する簡易構造物のプロトタイプ試作, 形の科学会, 第 93 回シンポジウム, 福井大学&オンライン, 2022 年 11 月

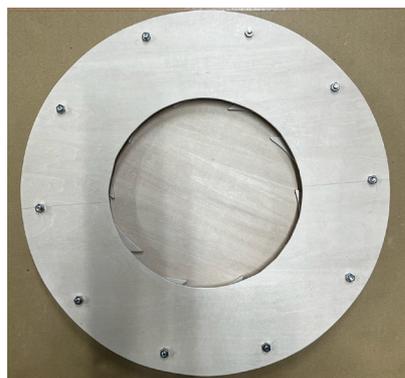


(a) 内部の構造

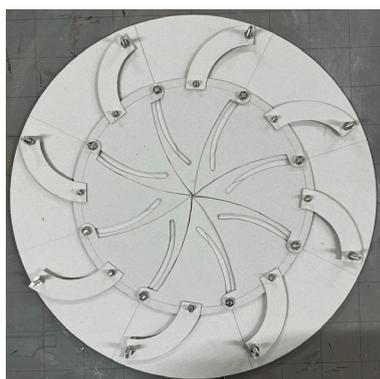


(b) 閉じた場合

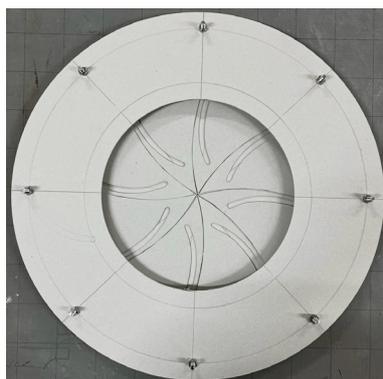
写真 1 羽根が 10 枚の場合



(c) 開いた場合

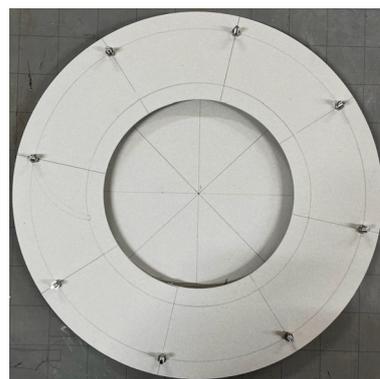


(a) 内部の構造

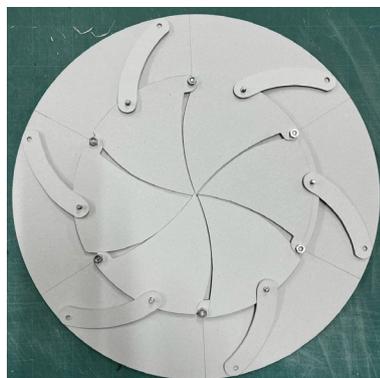


(b) 閉じた場合

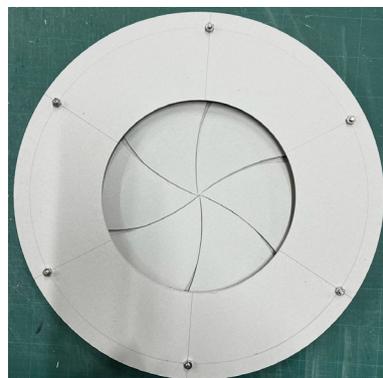
写真 2 羽根が 8 枚の場合



(c) 開いた場合

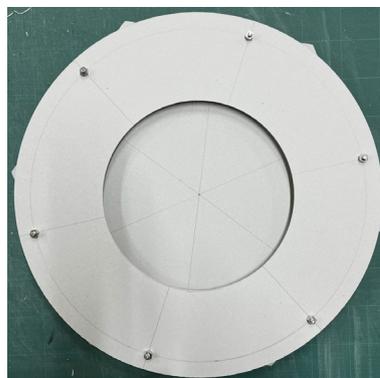


(a) 内部の構造



(b) 閉じた場合

写真 3 羽根が 6 枚の場合



(c) 開いた場合

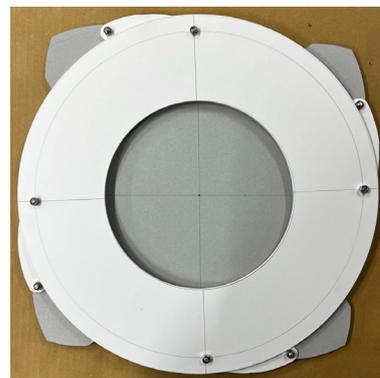


(a) 内部の構造



(b) 閉じた場合

写真 4 羽根が 4 枚の場合



(c) 開いた場合

小脳顆粒細胞前駆細胞の増殖・分化・移動に伴う小脳形態形成のモデル化に向けて

二木 啓

神戸市看護大学 専門基礎科学領域、〒651-2103 神戸市西区学園西町3-4

futatsugi@kobe-ccn.ac.jp

Preliminary Simulation of Cerebellar Morphogenesis by Quantitative Data of Proliferation and Differentiation of Granule Cell Precursors (GCPs)

Akira Futatsugi

Department of Basic Medical Science, Kobe City College of Nursing,
3-4 Gakuen-nishimachi, Nishi-ku, Hyogo, Kobe 651-2103

Abstract: Granule cell precursors (GCPs) of the cerebellum proliferate in the external granular layer (EGL), differentiate into granule cells and finally migrate to the internal granular layer (IGL). The kinetics of GCP proliferation and differentiation (i.e. cell cycle time and cell cycle quitting fraction) during development determine total number of granule cells. Because granule cells are the predominant cell type of the mature cerebellum, the number of granule cells produced is an important determinant of the size and morphogenesis of the cerebellum. In this study, I will present preliminary simulation of cerebellar morphogenesis based on GCP proliferation and differentiation data of my own and others.

Keywords: cerebellar morphogenesis, granule cell precursors (GCPs), proliferation and differentiation, simulation

はじめに：

小脳は協調運動や運動学習、また思考プロセスのパターン化などの機能を持つ脳の部位で、特徴的な層構造を持つとともに、他の脳部位に比べその形態形成に時間を要し、生後もしばらく神経細胞の産生と移動が続くことが知られている(図1)。小脳を構成する神経細胞のうち最も数が多く、小脳の大きさを決める主要な要因と考えられる顆粒細胞は、外顆粒層(EGL)の前駆細胞(GCP)から産み出される。GCPは最初、もっぱら増殖のみ行う細胞として菱脳唇から小脳皮質表面に移動してきてEGLを形成するが、その後、一部が顆粒細胞へと分化して内顆粒層(IGL)へと移動し、最終的にEGLは消失する(図2)。GCPが細胞周期のG1期からS期に進行して分裂し増殖するか、S期に入らず分化して顆粒細胞となって最終的にIGLに移動して他の神経細胞と神経回路を形成するかは二者択一である。GCPが増殖に向かう確率を p 、分化に向かう確率を q とすると、 $p+q=1$ であり、 p と q の値は発生段階に伴い変化する(はじめは $p=1, q=0$ 、最後には $p=0, q=1$ となり、やがて小脳の形態形成がほぼ終了する)。マウスやラットの小脳においては、EGLが形成され顆粒細胞への分化が始まるのは出生前後の時期であり、その後、離乳のタイミングである生後約3週にわたって顆粒細胞への分化、IGLへの移動と小脳の形態形成が進行する。今回の発表では、マウスの出生時を起点とし、生後3週間にわたる小脳顆粒細胞産生について、その間のGCPの細胞周期長や分化割合の定量的データをもとに、顆粒細胞数の増加プロセスをモデル化し、小脳形態形成のシミュレーションに向けての端緒としたい。

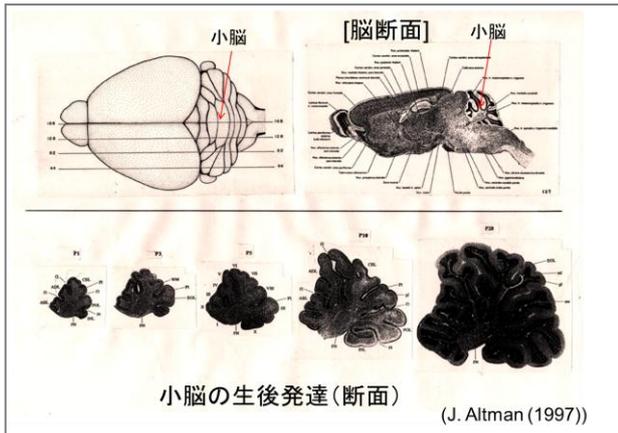


図1 ラット脳における小脳の位置と発達

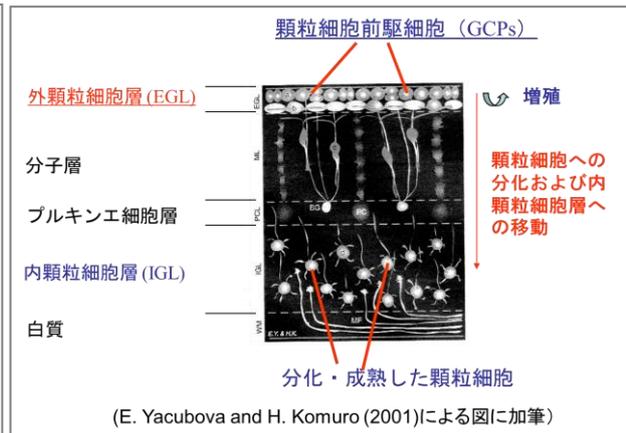


図2 小脳顆粒細胞の産生と移動

生後マウス小脳発達に伴う GCP の細胞周期長と顆粒細胞への分化割合データの取得：

マウス生後から約3週にかけての GCP の細胞周期長(時間)と分化割合の推移については、BrdU 細胞標識追跡法による二木のデータ ((1)および一部未発表データ含む)、藤田による報告(2)、Altman の文献(3)を参考にして試算した。それによると、細胞周期は生後10日までは29時間、その後急速に増加して生後16日では61時間に達し、分化割合(q 値)は生後10日までは0.5、その後増加して生後18日で1.0(全て分化)に達する。

シミュレーションによるマウス生後小脳における顆粒細胞数増加の推移：

出生時の小脳 EGL の GCP 数の相対値を1とし、これらの細胞が同期して増殖・分化のプロセスをたどると仮定し、その後の顆粒細胞産生数を上記データを用いて計算した。その結果、GCP の合計13回の細胞分裂と分化を通じて、生後3週の間には産生される累積の顆粒細胞数の相対値は6.4となり、このうち半数は生後9日までに産生されたものであった。

今後の課題と考察：

今回の予備的なシミュレーションに用いたデータは、小脳正中断切片の解析をもとにしたもので、小脳表面に垂直な方向のみの1次元の値である EGL 厚みの変化には2次元や3次元方向への成長が反映されていないため、増殖を低く見積もっていると考えられる。また、実際的小脳でみられる小葉構造の発達をどう扱い取り込むかなど、検討を要する課題は多い。また、今回のシミュレーションは GCP 細胞集団での細胞周期同期を想定した離散モデルであるので、より実態に近い連続モデルでのシミュレーションも行ってみたい。なお、発生過程で GCP の顆粒細胞への分化割合が高くなっていくことの要因の一部には、GCP 細胞周期がだんだん長くなり、G1 期の長さも長くなる可能性があると考えられる。また、異なる脊椎動物間では、大きな脳を持つ動物ほど GCP の細胞周期が長い一方で、発達に伴う q 値の上昇がゆるやかなため、最終的な顆粒細胞数は多くなると考えられ、進化形態学の観点からもそのメカニズムに興味を持たれる。

参考文献：

- (1) A. Futatsugi, E. Ebisui and K. Mikoshiba. J. Neurochem. 105, 1153-1164 (2008)
- (2) S. Fujita, M. Shimada and T. Nakamura. J. Comp. Neur. 128, 191-208 (1966)
- (3) J. Altman and S. Bayer. in Development of the cerebellar system. CRC Press (1997)

COVID-19 患者数動態について数理モデルを用いた 移動の効果に関する統計的解析

宮本望, 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 : hgf09258@kwansei.ac.jp

Analysis of COVID-19 Dynamics via an SIR-Based Metapopulation Models with Mobility Effects

Nozomi Miyamoto, Hiroto Shoji

Kwansei Gakuin University Graduate School, Science and Engineering

1 Gakuen Uegahara, Sanda, Hyogo 669-1330

Abstract: Infectious disease research has a long history, yielding many models for pandemic dynamics. COVID-19, transmitted person-to-person via coughs/droplets, spreads rapidly in Closed, Crowded, and Close-contact settings (Three Cs). This paper focuses on infected individual movement. Standard compartmental models (SIR, SEIR) show population state changes but omit basic human mobility. We propose a new model where each prefecture is a compartment. This model extends the SIR framework by adding inter-compartment movement, which we compare against real COVID-19 data. We develop three models with varying numbers of parameters (e.g., uniform vs. separate infection/movement rates per compartment). Parameters are fitted to data using Maximum Likelihood Estimation (MLE). Finally, we perform model selection using AIC, BIC, and AICc.

Keywords: COVID-19, SIR model, Epidemic Modelling, Nonlinear differential equations

1. はじめに

COVID-19 は感染拡大の要因の1つが人流にあるとされ緊急事態宣言など様々な感染拡大防止の対策がされてきた。そこで、病原体を所持している感染者の移動に着目し、数理的な解析を行うことでより効率的に感染拡大を抑制できるのではないかと考えた。本研究では、SIRモデルに感染率や移動のパラメータを分けたモデルを作成し、最尤法でCOVID-19の感染者数の実データにフィッティングすることでパラメータの比較を行う。

2. 関連研究と課題

SIRモデルやその拡張モデルは、感染症の動態を分析するために広く用いられてきた。古典的なモデルは時系列的な流行パターンをうまく記述するが、人口が均質であると仮定しており、空間的な構造を考慮していない。この限界に対処するため、研究者たちはメタ個体群モデルを開発したが、先行研究の大半は、全ての地域が等しく観察可能であるかのように扱っている。本研究は、感染者を実際のデータを用いてモデル化

する一方で、感受性人口をメタ個体群レベルで間接的に扱う。さらに、移動がないモデル、一様な移動性を持つモデル、および不均一な対称移動性を持つモデルを系統的に比較することで、異なる移動性の仮定が予測精度にどの程度影響するかを定量的に評価する。

3. 提案モデル

本研究では、SIR モデル[1]を離散化した式に、拡散係数 d^α の人口に依存しない Compartment の人の移動を考える。移動率を d^α として地域 α に地域 $\beta (\alpha \neq \beta)$ から人口の d^α 倍入る、同時に地域 α から人口の d^α 倍出ていく、という移動をモデル化した。

$$\begin{aligned} S_{t+1}^\alpha &= S_t^\alpha - \Delta t S_t^\alpha I_t^\alpha \\ I_{t+1}^\alpha &= I_t^\alpha + \Delta t \{ \sum_{\beta=1, \alpha \neq \beta}^5 d^\alpha (I_t^\beta - I_t^\alpha) + b^\alpha S_t^\alpha I_t^\alpha - \gamma I_t^\alpha \} \\ R_{t+1}^\alpha &= R_t^\alpha + \Delta t \gamma I_t^\alpha \end{aligned}$$

ここで、 S_t 、 I_t 、 R_t はそれぞれ時刻 t における感受性人口、感染人口、隔離人口を表す。 S_0 は正の実数パラメータとし、 b^α 、 γ 、 d^α はそれぞれ感染率、回復率・隔離率、拡散係数を表す。一般的に COVID-19 による感染は $\gamma=0.1$ 、 $\Delta t=1$ とする。

4. 実験方法

まず、全国の COVID-19 感染者数の日次推移データをもとに、各波の区切りとして患者数が最も少なくなった時期を特定し、その値を基準に第 1～第 5 波の期間を設定した。この期間において、図 1 のように (1) 東京、(2) 宮城、(3) 愛知、(4) 大阪、(5) 福岡 ($\alpha = 1, 2, 3, 4, 5$) の 5 都道府県の患者数動態について解析を行う。また、週ごとのばらつきを抑えるため、長さ 3 の単純移動平均でデータを平滑化して解析に用いた。最尤法を用いて b^α と d^α のパラメータ値の推定を行った。 S_0 は各都道府県の第 1-5 波の初日の人口の値を任意の定数で割り、 I_0 は移動を含める前に最尤法でパラメータフィッティングを行い、その尤度 L は次の①式を用いた。

ただし、 σ^2 は $(I_{\alpha i}^i - I_{\alpha i})$ の偏差の分散とする。また、モデルの比較には統計指標 AIC、BIC、AICc を用いた。

$$L = \prod_t \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma^2}} \exp\left(-\frac{(I_{\alpha,t}^i - I_{\alpha,t})^2}{2\sigma^2}\right), \quad \dots \textcircled{1}$$

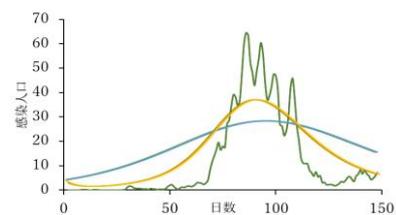


図 1: 第 1 波東京 (緑: 実データ 青: $d^\alpha=0.0$ 黄: d^α)

5. 結果・考察

b^α はすべての期間において其々 (都道府県ごとに別の値) が良いモデルとなった。 d^α に関しては、第 1、3 波では其々 (都道府県ごとに別の値)、第 2、4 波では一様 (すべての地域で同じ値)、第 5 波では移動なしモデルが良いモデルとなった。第 5 波で移動なしモデルが良くなったのは、どの都道府県でも感染者数が急激に増加しており、移動の影響が小さくなったためだと考えられる。

参考文献

[1] W. O. Kermack and A. G. McKendrick: Contributions to the mathematical theory of epidemics I, Proceedings of the Royal Society, 115A, 700/721 (1927).

研究を“カタチ”に 形の科学会機関誌での論文発表

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

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

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

奮ってご投稿ください。

英文誌【FORMA】

会員・非会員を問わず、投稿できます。

論文の категорияは、(1) Original paper, (2) Review, (3) Letter, (4) Forum です。

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

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

和文誌【形の科学会誌】

会員・非会員を問わず、投稿できます。

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

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

形の科学シンポジウムを開催しませんか？ シンポ代表世話人を募集します

近年、形の科学シンポジウムは、年に2回、開催されています（2000年度までは、3回ずつ開催されていました）。過去のシンポジウムの開催履歴は、以下のサイトをご覧ください。

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

シンポジウムの代表世話人は、形の科学会会員の中から選ばれます。

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

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

シンポジウム開催の観点から言えば、代表世話人を適切に選ぶことにより、多様なシンポジウムを開催することが可能となります。過去のシンポジウムの代表世話人は、事務局からの依頼で決まることが多かったのですが、立候補も歓迎します。我こそはと思う方は、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

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（簡条書きで各20字以内）：

備考（出張宛先, etc.）：

————— 切り取り線 —————

【形の科学会事務局】

〒150-8366 東京都渋谷区渋谷4-4-25

青山学院大学経営学部経営学科

塩澤 友規 宛

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

([at]を半角の@で置き換えてください)

形の科学シンポジウム講演予稿集 Vol. 10 No. 2 (2025年11月)

発行： 形の科学会

学会長： 海野 啓明

事務局長： 塩澤 友規
青山学院大学経営学部経営学科

予稿集編集事務局： 手嶋 吉法
〒275-0016 千葉県習志野市津田沼 2-17-1
千葉工業大学 工学部 宇宙・半導体工学科

TEL: 047-478-0645

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