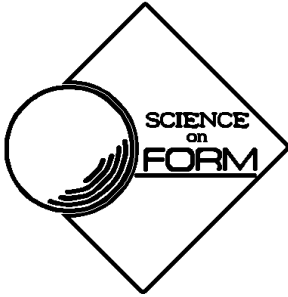


形の科学シンポジウム講演予稿集 Vol. 11 No. 1 (2026年6月)

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



# 第100回 形の科学シンポジウム

## 「異分野協働が生み出す形, 異分野協働を生み出す形」



上段左：児玉幸子《Planet No.3》, 上段右：岡本健太郎《Corazón》

下段：福岡タワーのピクセルアニメイルミネーション

会期：2026年6月6日(土)、7日(日)、8日(月)

会場：九州大学西新プラザ

形の科学会

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

# 第100回形の科学シンポジウムの開催を祝して

海野啓明, 形の科学会会長

kaino@katachi-jp.com

## Greetings for the 100<sup>th</sup> Symposium of the Society for Science on Form, Japan

**KAINO, Keimei**

President, the Society for Science on Form, Japan

この度、第100回形の科学シンポジウムが九州大学で開催されることになりました。メインテーマ「異分野協働が生み出す形、異分野協働を生み出す形」にもとづいて招待講演3件があり、メインテーマ・「形の科学一般」・「形と知」に関する講演28件、および展示11件が予定されています。特に今回は、ベルギーからJohan Gielis先生を招き、“Universal Natural Shapes – new models for the sciences”の題で講演があります。この記念すべきシンポジウムの開催にあたり、代表世話人の小磯深幸先生はじめ組織委員会の皆様のご尽力に感謝申し上げます。

形の科学会は1984年に「ステレオロジー」と「形の物理学」の二つのグループが合流し、1985年に形の科学会が創設されました。それと同時に1985年と1988年には形の科学国際シンポジウムが開催され、さらに1994年と1996年にはKATACHI U SYMMETRYの国際シンポジウムが筑波大学で開催され、学際的な協働研究のよい機会となりました。国内シンポジウムは1984年から始まり、第1回から第15回までは「形の科学一般」のテーマで開催され、その後は形に関係する多様なテーマのもとにシンポジウムが企画され、40年間にわたり研究成果が発表され蓄積されてきました。形の科学会は和文誌と英文誌FORMAを発行していますが、シンポジウムではForumのセッションを設け、そこで発表された論文を掲載しています。

また適宜FORMAの特集号を企画して論文発表の機会を設けています。

形の科学シンポジウムの特色は、シンポジウムのメインテーマおよび「形の科学一般」等の講演に加え、ジュニアコーナーでは小学生・中学生・高校生による講演もあります。講演は異なる分野の人にも配慮されていて、持ち時間が長く、質問もできるだけ記録しています。形の科学会の創設者の一人、小川泰先生の言葉を引用すれば、形の科学シンポジウムは「自由な発想をする若い人にとっても口を挟みやすい場であり、専門分野には疎くても、形についての予備知識には、さほどの違いがないし、似たような形は、他の分野でも現れる。その意味でも、分野間に立ちほだかる壁を破る可能性は多分にある」と言えます[1]。

シンポジウムの講演予稿集は会場で配布され、学会のHPから閲覧できます。予稿集の表紙に掲載された画像を図1と図2に示します。最後に、形の科学会を創設された先生方の著書を紹介します。どの本を開いても形の科学の面白さがわかると思います。

今後も形の科学会と形の科学シンポジウムをよろしく願い申し上げます。

- [1] 小川泰『かたち探検隊』（岩波書店、2002）。
- [2] 高木隆司『かたちの探究』（ダイヤモンド社、1978）。
- [3] 宮崎興二『多面体と建築』（彰国社、1979）。
- [4] 本多久夫『DNAからの形づくり』（共立出版、2024）。



図1 第95回シンポジウムの予稿集の表紙：放散虫の殻をドーム状の天井に映し出したもの（岸本直子氏）

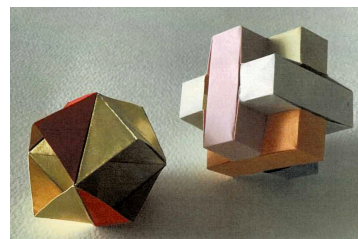


図2 第98回シンポジウムの予稿集の表紙：表裏同等1枚折り菌部星、6枚組19キューブ（前川淳氏）



## 第 100 回 形の科学シンポジウム

### 「異分野協働が生み出す形, 異分野協働を生み出す形」

【主催】形の科学会 ならびに 九州大学マス・フォア・インダストリ研究所

【会期】2026年6月6日(土)、7日(日)、8日(月)

【会場】九州大学西新プラザ 〒814-0002 福岡市早良区西新 2-16-23

<講演会場> 大会議室 AB (西新プラザ 2階)

<展示会場> 展示コーナー (西新プラザ 1階)

【開催形式】対面

【代表世話人】小磯深幸 (九州大学マス・フォア・インダストリ研究所)

E-mail: [koiso\[at\]imi.kyushu-u.ac.jp](mailto:koiso[at]imi.kyushu-u.ac.jp) ([at]を@で置き換えてください)

【組織委員会】小磯深幸 (九州大学)、手嶋吉法 (千葉工業大学)、和田健吾 (株式会社エルム)、  
小野聡子 (近畿大学)、北沢美帆 (大阪大学)、軸丸芳揮 (東洋大学)

【参加費】会員・非会員とも同額

一般 5000 円、学生 2000 円 (ただし、形の科学会シニア会員は 2000 円)

【懇親会】6月6日(土)18時半頃より九州大学西新プラザ 1F で開催

【懇親会費】一般 5000 円、学生 2000 円 (5月27日までにお申し込みください)

【WEB サイト】<https://katachi-jp.com/sympo100>

### プログラム

10:45-11:00 休憩

## 6月6日(土)

9:20 受付

9:50 開会の辞

### Session 1: 形の科学一般

9:55-10:20

川崎の折り鶴変形理論とその4次元折り紙への  
拡張について

海野啓明 (仙台高等専門学校名誉教授) … 1

10:20-10:45

星形多面体の3Dプリンタ模型(第2報) —線接  
触・点接触とキラリティの考察—

三浦吉孝 (日産自動車) …… 3

### Session 2: メインテーマ「異分野協働が生み出 す形, 異分野協働を生み出す形」

11:00-11:25

多様な派生正多角形螺旋の考案

中西真悟 (大阪工業大学) …… 5

11:25-11:50

芸術と工学・科学的手法による英彦山修験道文化  
の再興

知足美加子 (九州大学) …… 7

11:50-13:10 昼食休憩 (80分)

(12:00-13:00 運営委員会)

Session 3: メインテーマ「異分野協働が生み出す形, 異分野協働を生み出す形」

13:10-14:00 【招待講演】

自然界に存在する形と磁性流体アート

児玉幸子 (電気通信大学) ..... 9

14:00-14:15 休憩

14:15-15:05 【招待講演】

Universal Natural Shapes - new models for the sciences

Johan Gielis (University of Antwerp)

..... 15

15:05-15:20 休憩

Session 4: 形の科学一般/メインテーマ

15:20-15:45

ギーリス曲線の幾何的特性に関する考察

松浦真也 (愛媛大学) ..... 17

15:45-16:10

葉序に由来する充填理論と形の自己組織化

富安亮子 (九州大学) ..... 19

Session 5: 展示説明 (各5分間、質疑無し)

16:10-16:15

想いをかたちに そして世界へ 繋がる技術

和田健吾 (株式会社エルム) ..... 21

16:15-16:20

曲線のベックルンド変換と半離散ガウス曲率負一定曲面への応用

島田祥吾 (徳島大学)、安本真士 (同) .. 22

16:20-16:25

離散極小曲面のダルブー変換

竹下朔磨 (徳島大学)、安本真士 (同) .. 23

16:25-16:30

正多角形の封筒の小谷の蟻の問題

植田彩加 (龍谷大学)、山岸義和 (同) ..... 24

16:30-16:35

Applications and Ecological Evaluation of EEG-Based Neuro-Biofeedback

Hikaru Miyagi, Hiroki Takada (University of Fukui) ..... 25

16:35-16:40

Effects of Gaussian-filtered visual stimuli on visual acuity and electroencephalographic activity

Munetoki Tokunaga, Hiroki Takada (University of Fukui) ..... 26

16:40-16:45

朝倉三連水車の〈用の美〉と持続する形

石上洋明 (福岡教育大学)、馬江陵 (九州大学)、孫逸達 (九州大学)、井上朝雄 (九州大学)、堤亮一 (協和防災) ..... 27

16:45-16:50

目で見る数学とアートの世界

岡本健太郎 (和から株式会社) ..... (45)

16:50-16:55

3Dプリンタによる星形20面体模型の展示 (第2報)

三浦吉孝 (日産自動車) ..... 28

16:55-17:00

視覚障害者が触って学ぶ為の眼球模型の作製

佐藤伶 (千葉工業大学)、寺口さやか (広島県立広島中央特別支援学校)、手嶋吉法 (千葉工業大学) ..... 29

Session 14: 形の科学一般

13:00-13:05 (15分間)

木造継手およびMethods in 3D 体教材の開発(第6報)

Emble 林秀都(千葉工業大学), Log 手嶋吉浩(同)

Analysis..... 31

Fumitaka Ishiwata, Hiroki Takada

(Unoversity of Fuku) ター... 展示閲覧... 69

17:05-17:55 形の科学会総会(会員のみ)

13:55-14:10 (15分間)

脳組織の病態メカニクスを解明に向けた画像解析

丸藤 健(大阪大学), 新井 浩(同)

対島陸太(関西学院大学), 昌子浩登(同)

## 6月7日(日)

9:15 受付

Session 6: メインテーマ「異分野協働が生み出す形, 異分野協働を生み出す形」

9:30-9:55

実車の形状分析に由来する曲線族とその対称性に基づく「美的曲線」の幾何学

熊谷駿(八戸工業大学), 梶原健司(九州大学マクス・フォア・インダストリ研究所)..... 33

9:55-10:20

Shape generation with orientation-based area distribution

Yoshiki Jikumaru (Toyo University), Kentaro Hayakawa (Nihon University), Kazuki Hayashi (Kyoto University), Miyuki Koiso (Kyushu University), Shun Kumagai (Hachinohe Institute of Technology)..... 35

10:20-10:35 休憩

Session 7: 形の科学一般

10:35-11:00

城郭石垣の設計法に基づき厳密に定式化された

反り曲線がオーバーハングしない条件

鈴木利友(武庫川女子大学)..... 37

11:00-11:25

数理的な外挿による3D幾何模様デザインと安心感創出のための触感印象分析

山田香織(大阪公立大学), 永井雅文(同)

..... 39

Session 8: 形と知

11:25-11:40 (15分間)

オートエンコーダを用いた多チャンネル胃電図における空間的クラスタリング特性

今井駿介(三重大学), 木下史也(同)..... 41

11:40-12:05

GP法は「Bio-Hash」関数:ゲノムの指紋を創る

西垣功一(京都府立医科大学), 濱野圭一(スピド合同会社)..... 43

12:05-13:30 昼食休憩(85分)

Session 9: メインテーマ「異分野協働が生み出す形, 異分野協働を生み出す形」

13:30-14:20【招待講演】

目で見える数学とアートの世界

岡本健太郎(和から株式会社)..... 45

14:20-14:30 休憩

Session 10: メインテーマ「異分野協働が生み出す形, 異分野協働を生み出す形」

14:30-14:55

シェルピンスキーのカーペットを適用した木製建具に関する基礎的研究

小野聡子(近畿大学)..... 47

14:55-15:20

曲線折り構造による仮設建築物の構築方法  
横須賀洋平 (鹿児島大学) ..... 49

15:20-15:45

正規・非正規な配置の特異な一般化ミウラ折りの  
建築設計への応用  
田川浩之 (武庫川女子大学) ..... 51

15:45-16:00 休憩

Session 11: 形の科学一般

16:00-16:25

超立方体と統計物理学  
堀池由朗 (名古屋大学) ..... 53

16:25-16:50

セパタクロボールの構造の一般化について  
松田能文 (青山学院大学) ..... 81

16:50-17:15

四国西予ジオパークの遍路道とジュラ紀付加体  
(斗賀野層群)見学ツアー  
松岡篤 (新潟大学、千葉工業大学)、榊山匠 (四  
国西予ジオパーク推進協議会、四国西予ジオミ  
ュージウム)、高橋司 (同) ..... 55

17:15-18:00 ポスター・展示閲覧

## 6月8日 (月)

9:15 受付

Session 12: 形の科学一般

9:30-9:55

曲面の貼り合わせに伴う可展面の特異点の幾何  
学  
李俊臻 (神戸大学) ..... 57

9:55-10:20

正 20 面体の小谷の蟻の問題  
野川颯馬 (龍谷大学)、山岸義和 (同) .. 59

10:20-10:45

準結晶の模型であるとする、内部構造の中に正  
10 角形を発見した。  
八十嶋章雄 (SSDS Symmetric) ..... 61

10:45-11:00 休憩

Session 13: 形の科学一般

11:00-11:25

ケプラー問題の解空間  
杉本剛 ..... 63

11:25-11:50

Goldman 括弧積を用いたループの分離判定法  
和久田葵 (東京大学) ..... 65

11:50-12:15

こどもと Ai で創る新しいおもちゃ (第二報)  
八坂青志 (京都総合科学研究所) ..... 67

12:15-13:40 昼食休憩 (85分)

Session 14: 形の科学一般

13:40-13:55 (15分間)

Evaluation of Methods for Determining the  
Embedding Delay  $\tau$  in Biological Time-Series  
Analysis

Fumitaka Ishiwata, Hiroki Takada  
(University of Fukui) ..... 69

13:55-14:10 (15分間)

肝組織の病態メカニズム解明に向けた画像解析  
と疾患動態モデルの統合

対島陸太 (関西学院大学)、昌子浩登 (同)  
..... 71

14:10-14:25 (15分間)

ラット脂肪肝における線維化領域の2D・3D解析  
と成長ダイナミクスの比較解析

近藤あげは (関西学院大学)、昌子浩登 (同)  
..... 73

14:25-14:50

大腸の大規模ループの巻きはミクロスコピック  
な細胞の性質で可変

本多久夫 (神戸大学、理化学研究所) ..... 75

14:50-14:55 閉会の辞

【事務局より】

Symmetry Festival 2027 (国際会議の予告)

..... 77

論文投稿案内 (Call for Papers) ..... 78

シンポジウム世話人の募集 ..... 79

入会案内 ..... 80

# 川崎の折り鶴変形理論とその4次元折り紙への拡張について

海野啓明

仙台高等専門学校名誉教授

keimei.kaino@gmail.com

## Kawasaki's theory of Origami crane variation and its extension to Four-Dimensional Origami

KAINO, Keimei

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

**Abstract:** Dr.Toshikazu Kawasaki (1955-2026), a origami theorist, who was known for “Kawasaki’s rose” discovered theorems of flat Origami and Origami crane variation. A regular tetrahedron is folded flat by using bisector of dihedrals but it cannot be folded flat continuously. As expected from Kawasaki’s theory, a kite-like octahedron of four-fold symmetry has three bird-center curves and a bird-base center where three bird-center curves cross. It is noted that bird-centers curve are hyperbola.

**Keywords:** Kawasaki’s rose, theory of Origami crane variation, kite-like octahedron, bird-center curve.

### 1. はじめに

今年の3月に「カワサキ・ローズ」で有名な折り紙作家の川崎敏和さんが亡くなられた[1]. 川崎さんは九州大学出身で、折り鶴変形理論で学位を取得された数学者である. 伏見康治・満江著『折り紙の幾何学』(日本評論社, 1979)の変形鶴を受けて川崎さんは折り鶴変形理論を発表した[2]. その成果と作品は『バラと折り紙と数学と』(森北出版, 1998)に紹介されている. また, 川崎さんは平坦折り紙の研究を2次元球面や3次元空間等に拡張している[3].

私の地域の折り紙のイベントでは「カワサキの一分ローズ」をよく紹介する. ねじり折りを立体化するところが手品のようで人気がある(図1). 折り鶴の背中にバラの花を咲かせた作品もあり, 川崎ローズの広がりを感じさせる(図2, 折り紙探偵団, 194号, 2022, p.24). 九州大学理学部のエントランスホールにはカワサキ・ローズが飾られているとのこと.

私は川崎さんの折り鶴変形理論を立体の折り紙(以後4次元折り紙とよぶ)に適用することを試みたがまだ中途である. それを紹介して川崎さんを偲びたい.(以後敬称を省く)

[1] [https://origami.jp/m\\_kawasaki/](https://origami.jp/m_kawasaki/)

[2] 佐世保高専研究報告, 32号, 1996, 29.

[3] Proceedings of the 1st-International Meeting of ORIGAMI SCIENCE and TECHNOLOGY, 1989, 131.

### 2. 折り鶴変形理論について

伝承折り鶴は羽ばたくが飛ぶことはできないので, 伏見夫妻は飛ぶ折り鶴を折るために図3上段のように正方形をはた形に変形し, 下段左のように三内心の定理により鶴心Oを求めて変形鶴を折った(伏見変形). 前川淳は正方形から独自の変形により飛ぶ折り鶴を折り, J.Justinは折り



図1. 川崎の一分ローズ 図2. バラの折り鶴

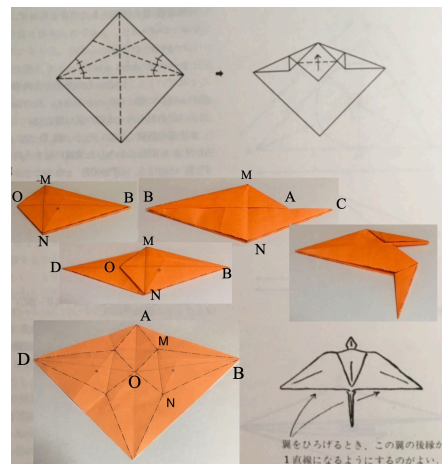


図3. 伏見変形の折り方; 上段ははた形, 下段左は三内心の定理  $MN \perp OB$  が成立.

紙をはた形を含む**内心四辺形**に拡げて羽ばたく鶴を折った。川崎はこれらの変形を統一的に説明する**折り鶴変形理論**を考えた[2]。この理論を簡単に紹介する。折り紙では四辺形の角を二等分することが多い。「四辺形が4つの頂点の角を二等分折りして平坦にたためるための必要十分条件は、四辺形が内接円をもつことである。」このような四辺形を**内心四辺形**という。内心四辺形の4つの性質を述べる。

性質1 (向かい合う辺の和) 内心四辺形ABCDの4辺の長さの間に、

$$AB + CD = BC + DA. \quad (1).$$

の関係式が成り立つ。

内心四辺形ABCDにおいて、内部の一点をXとすると、

$$AX - CX = AB - CB = AD - CD. \quad (2).$$

を満たす点Xの軌跡はAとCを焦点としBとDを通る双曲線となる。これを**対鶴曲線**、その曲線上の任意の点を**鶴の中心**とよぶ(図4)。

性質2 (対鶴曲線と鶴心) 内心四辺形には2本の対鶴曲線があり、それらは1点で交わる。この交点を**鶴心**とよぶ。

性質3 (内心四辺形の2辺併合) 2つの内心四辺形を2辺がぴったり重なるように貼り合わせると、新たに大きい内心四辺形ができる。

貼り合わせた2辺の両端を焦点とする2本の対鶴曲線は同じ曲線である。

性質4 (内心四辺形の2分割) 内心四辺形は、向かい合う2頂点と、それを焦点にもつ対鶴曲線上の1点を線分で結ぶと、2つの内心四辺形に分割できる。

### 3. 4回対称はた形八面体における対鶴曲線と三内心の定理

平面は折り線により3次元の中で折るので、これを3次元折り紙とよぶならば、立体の折り紙は折り面により4次元空間の中で折るので**4次元折り紙**といえる。4次元の折り紙では立方体ではなく正八面体を用いる。例えば、宮崎は正八面体から4次元熨斗を折っている[4]。

(1) (四面体の稜角二等分折り) 伝承折り紙が角二等分折りにより平坦に折りたためるのは三角形の内心の定理による。四面体でも内心の定理が成り立つので**稜角二等分折り**により平坦に折りたためる。しかし、体積一定の条件で連続的に折るのは難しい[5]。

(2) (4回対称はた形八面体の性質) [6] 内接球をもつ八面体を**内心八面体**とよぶ。内心八面体には三対の向かい合う頂点を結ぶ3本の対鶴曲線がある。図5(a)に示す4回対称はた形八面体を考える。(i)この八面体には3本の**対鶴曲線**がある。対鶴曲線ACは対称軸のx軸である。対鶴曲線BDの求め方：図5の八面体は適当な点Xにより二つの内心八面体BAECFXとDAEFCXに分割できるので、点Xの描く曲線が対鶴曲線BDとなる。対鶴曲線EFも同様である。この二本は**双曲線**となるが、その焦点はA,Cではない。(ii)上の三本の対鶴曲線は1点で交わるので、4回対称はた形八面体には**鶴心**がある。鶴心Pは四角錐EABCDの内接球と底面ABCDとの接点になるので、この四角錐を稜角二等分折りすると分かる(図5(b))。 (iii) (四面体の三内心の定理) 四面体EABCを鶴心Pにより二つの四面体EABPとEBCPに分割し、それぞれの内心をMとNとすると  $MN \perp \triangle BEP$  が成り立つ。

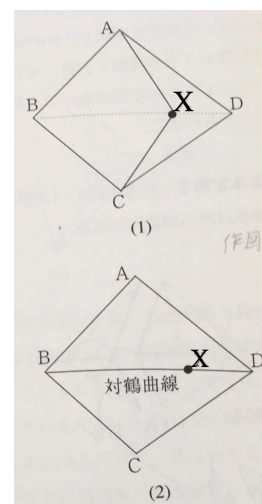


図4. 内心四辺形と対鶴曲線

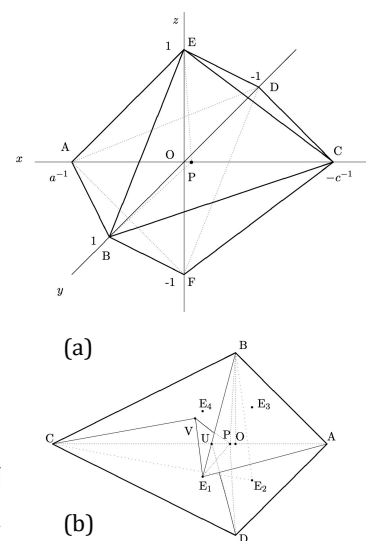


図5. (a) 4回対称はた形八面体, (b) 四角錐の稜角二等分折りと鶴心P

[4] Proceedings of the 2nd International Meeting of Origami Science and Scientific Origami, 1994, 51.

[5] "Statistical and Condensed Matter Physics", Nova Science, 2007, 101.

[6] 日本数学教育学会高専・大学部門論文誌, **15(1)**, 2008, 17; **16(1)**, 2009, 1; **18(1)**, 2011, 13.

# 星形多面体の 3D プリントモデル (第 2 報)

## —線接触・点接触とキラリティの考察—

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 II): Considerations on Line and Point Contact in Relation to Chirality

Yoshitaka Miura

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

**Abstract:** In stellated polyhedra, edge- and vertex-based connections of certain constituent elements are among their geometrical features. However, in the fabrication of physical models using 3D printing, line contact and point contact present significant challenges. These contact conditions are closely related to the emergence of chirality in stellated polyhedra. This paper describes the fabrication of chiral stellated polyhedra and discusses the relationship between line contact, point contact, and chirality.

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

### 1. はじめに

星形多面体において、一部のモデルに見られる辺接続および頂点接続は、幾何学的特徴の一つである<sup>[1][2]</sup>。一方、3D プリントを用いた模型製作においては、線接触および点接触への対応が重要な課題となる<sup>[3]</sup>。これらの接触形態は、星形多面体のキラリティと密接に関係している。本報では、キラリティを有する星形多面体の模型製作について述べた後、線接触・点接触とキラリティとの関係について考察する。

### 2. 星形 20 面体の3D プリント造形戦略

表 1 に、星形 20 面体の名称と諸量、キラリティの有無と左右性、線接触・点接触を含む構造的特徴、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。No.33 以降の細字プレーン体は右手系キラルを、細字イタリック体は左手系キラルを表す。

表 1 星形 20 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		No. 9 - 39																																		
	右手系	左手系	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36	37	38	39				
名称	デュバル記号		U <sub>1</sub>	U <sub>2</sub>	U <sub>3</sub>	U <sub>4</sub>	U <sub>5</sub>	U <sub>6</sub>	U <sub>7</sub>	U <sub>8</sub>	U <sub>9</sub>	U <sub>10</sub>	U <sub>11</sub>	U <sub>12</sub>	U <sub>13</sub>	U <sub>14</sub>	U <sub>15</sub>	U <sub>16</sub>	U <sub>17</sub>	U <sub>18</sub>	U <sub>19</sub>	U <sub>20</sub>	U <sub>21</sub>	U <sub>22</sub>	U <sub>23</sub>	U <sub>24</sub>	U <sub>25</sub>	U <sub>26</sub>	U <sub>27</sub>	U <sub>28</sub>	U <sub>29</sub>	U <sub>30</sub>	U <sub>31</sub>	U <sub>32</sub>	U <sub>33</sub>		
	セル番号		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33		
発現年	デュバル記号																																				
	セル番号																																				
発現者	デュバル記号																																				
	セル番号																																				
トポロジー	名称																																				
	発現年																																				
構造	発現者																																				
	シュレーフリ, コクセター記号																																				
3Dプリント	頂点数V																																				
	辺数E																																				
設計手法	面数F																																				
	V-E+F=2																																				
造形仕様	星形セル数																																				
	中実・空洞																																				
先行機	無接触																																				
	点接触																																				
造形仕様	線接触																																				
	設計手法																																				
造形仕様	連結部追加																																				
	厚み追加																																				
造形仕様	分割数																																				
	分割線																																				
先行機	三浦, 形の科学誌, 展示, 予稿, 2021-2026																																				
	Wenninger, Polyhedron Models, 1971																																				
先行機	Cooper et al., Fifty-Nine Icosahedra 3rd rev ed., 2011																																				

### 3. 星形 20 面体キラルモデルの 3D プリント造形 実施例

図1～図6に、キラルモデル No.33、No.34、No.45 の右手系と左手系について、星形図(a)、立体図(b)、立体線図(c)、模型写真(d)を示す。赤色面は第①面を、数字はセル番号、白点線は線接触、緑丸は点接触を示す。名称には printable の意味の「-prt」を付与した。

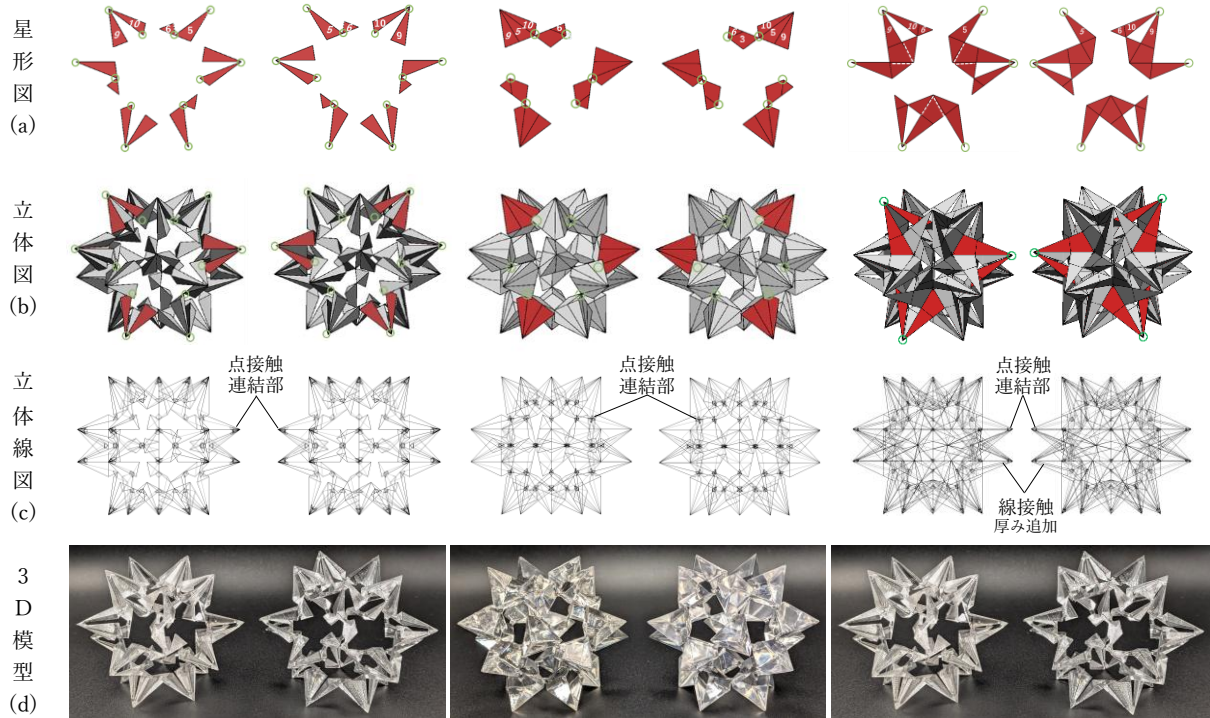


図1 No.33  $f_1(L)$ -prt 図2 No.33  $f_1(R)$ -prt 図3 No.34  $e_1f_1(L)$ -prt 図4 No.34  $e_1f_1(R)$ -prt 図5 No.45  $f_2g_2(L)$ -prt 図6 No.45  $f_2g_2(R)$ -prt

### 4. 線接触・点接触とキラリティの考察

表2に、星形 20 面体 59 種における線接触・点接触の分類数を示す。鏡映およびキラルのいずれも、空洞モデルにおいて線接触・点接触が 80%前後であり、さらに空洞かつキラルの点接触は 62%と高率である(表中※印)。次に、デュバル記号が同じ  $f_1$  である鏡映とキラルの星形図を考察する。図7の鏡映 No.10  $f_1$  は、セル群 5,6,9,10 の両側が採用され、線接触(白線)が 18 本/面となる。図8のキラル No.33  $f_1$  は、セル群が左右一方に半減となり、点接触(緑丸)が 12 点/面となる。

表2 星形 20 面体 59 種における線接触・点接触分類

分類	鏡映 Reflection 32種							
	個数B	比率 =B/32	接触形態	個数ΣC	比率 =ΣC/B	個数C	比率 =C/B	
中実 Solid	18	56%	線接触L	0	0%	0	0%	
			点接触P			0	0%	
			線接触L & 点接触P			0	0%	
空洞 Hollow	12	38%	線接触L	10	※83%	3	25%	
			点接触P			5	42%	
			線接触L & 点接触P			2	17%	
中実 & 空洞	2	6%	線接触L	2	100%	0	0%	
			点接触P			2	100%	
			線接触L & 点接触P			0	0%	

分類	キラル Chiral 27種							
	個数D	比率 =D/27	接触形態	個数ΣE	比率 =ΣE/D	個数E	比率 =E/D	
中実 Solid	7	26%	線接触L	0	0%	0	0%	
			点接触P			0	0%	
			線接触L & 点接触P			0	0%	
空洞 Hollow	13	48%	線接触L	10	※77%	0	0%	
			点接触P			8	※62%	
			線接触L & 点接触P			2	15%	
中実 & 空洞	7	26%	線接触L	3	43%	0	0%	
			点接触P			3	43%	
			線接触L & 点接触P			0	0%	

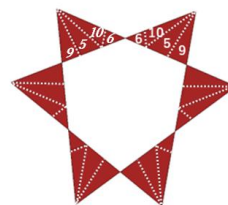


図7 鏡映 No.10  $f_1$

$f_1$ セル 5,6,9,10 は左右両側が採用され、接する辺は線接触(白線)となる。

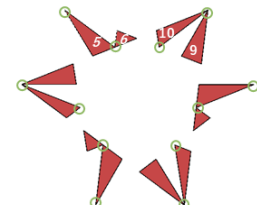


図8 キラル No.33  $f_1(R)$

$f_1$ セル 5,6,9,10 は左右一方が採用され、頂点で接して点接触(緑丸)となる。

### 参考文献

- [1] Coxeter, Du Val, Flather and Petrie, *The Fifty-Nine Icosahedra*, 3rd revised ed., Tarquin, 2011
- [2] Coxeter, *Regular Polytopes*, 一松信, 岡田好一, 日野雅之, 宮崎興二 訳, 『正多胞体』, 丸善, 2022
- [3] 三浦吉孝, 星形多面体の 3D プリント模型 (第 1 報), 形の科学シンポジウム予稿集#99, 2025

# 多様な派生正多角形螺旋の考案

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

## Various derived regular polygonal spirals

Shingo Nakanishi

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

**Abstract:** This study displays mainly various derived regular polygonal spirals. One of them can be shown several spirals by combinational shapes. Some of others are related to derived equiangular spirals. We focus on various types of regular polygonal spirals using several specific numbers.

**Keywords:** Doubling Ratio, Golden Ratio, Silver Ratio, Bronze Ratio, Plastic Ratio, Super-Golden Ratio, Garsia numbers

**1. Introduction** We can deal with several types of equiangular spirals using similar metallic ratios such as golden ratio, silver ratio, and so on using the designated polygons. We can show the constructed combinations and curves for the other types of regular polygonal spirals.

**2. Equiangular spirals on the regular polygons** The golden ratio spirals,  $g_k(x)$ , on the regular decagon [1,2] and the silver ratio spirals,  $s_k(x)$ , on the regular octagon are illustrated in Fig. 1. Single and double octagon spirals are also displayed in Fig. 1. As visualizing double spirals with Fibonacci and Lucas sequences, there are two equilateral and hexagonal spirals shown on the right side in Fig. 1

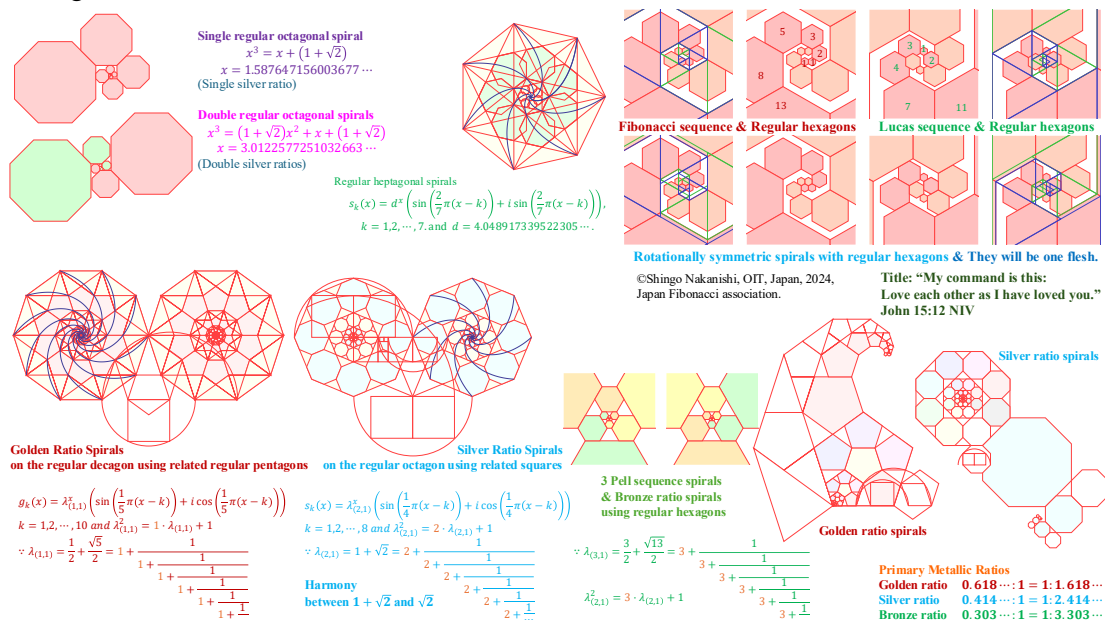


Fig. 1 Several illustrative regular polygonal spirals.

**3. Constructed combinations and shapes for the polygonal spirals** There are various three types of single, double, triple equilateral spirals [4,7] and interesting regular hexagonal spirals in Fig. 2 [3-7]. One of them brings us super-golden ratio spirals in Fig. 2 [5,7] using Garsia numbers.

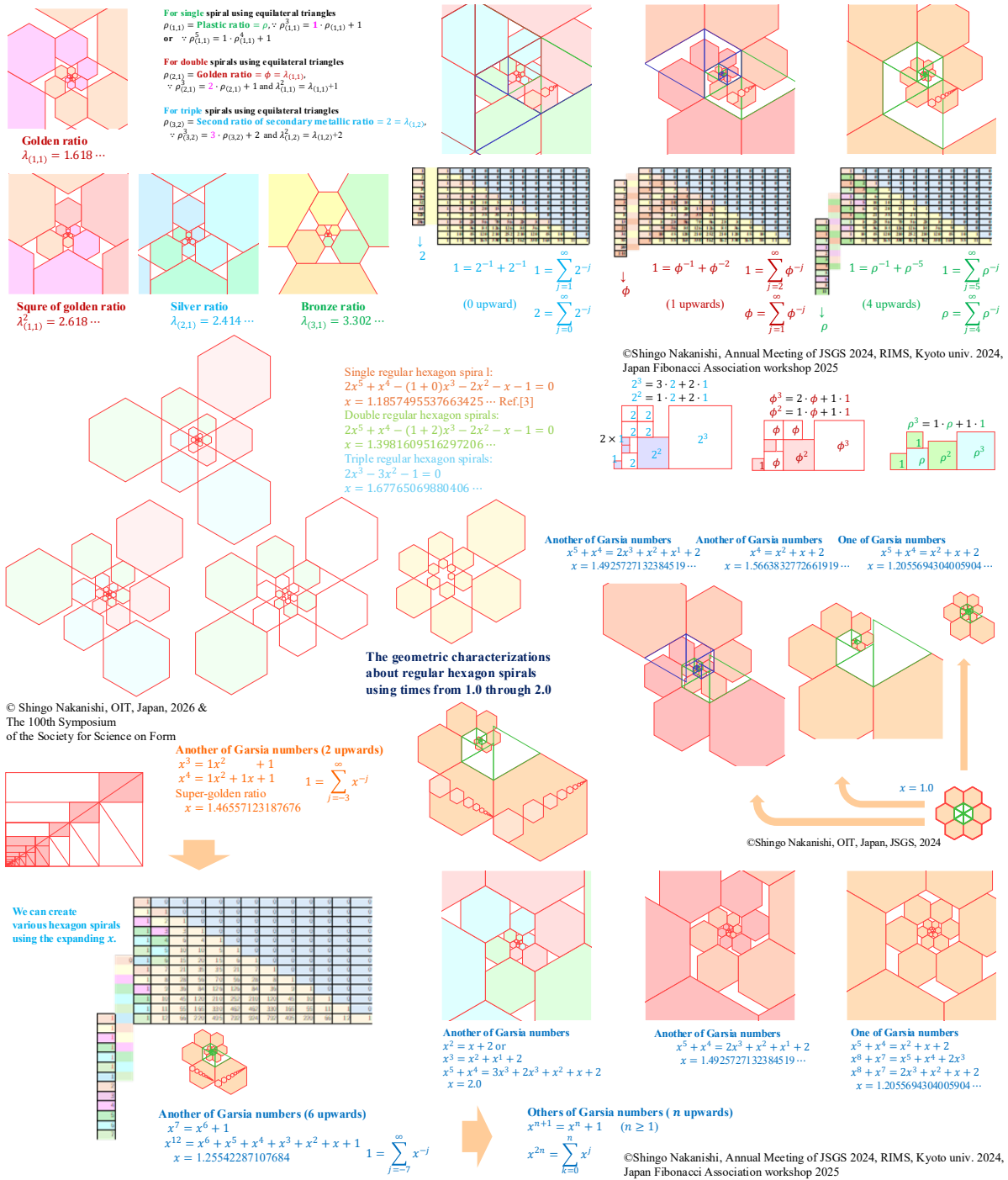


Fig. 2 Various illustrative regular hexagonal spirals.

References

[1] Hans Walser, "The Golden Ratio: Geometric and Number Theoretical Considerations", Springer, (2024).  
 [2] Hans Walser, "Spirals, Helical Lines, and Spiral-Like Figures: Mathematical Playfulness in Two and Three Dimensions", Springer, (2024).  
 [3] "Spiral Tilings and Integer Sequences", Math Pages, Geometry, <https://www.mathpages.com/home/kmath153/kmath153.htm>, (Access date: April 8,2026).  
 [4] Robert W. Fathauer, "Logarithmic Spiral Tilings of Triangles", <https://archive.bridgesmathart.org/2021/bridges2021-55.pdf>, (Access date: April 8,2026).  
 [5] 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).  
 [6] S. Nakanishi, "Modified calculations and visualizations for skipped, weighted, or right upward typed Gibonacci sequences using related Pascal triangles and these matrices", RIMS, Kyoto University, No.2304, pp. 114-126, <https://www.kurims.kyoto-u.ac.jp/~kyodo/kokyuroku/contents/pdf/2304-13.pdf>, (Access date: April 8,2026).  
 [7] S. Nakanishi's website, <https://www.oit.ac.jp/personal/shingo.nakanishi/english/index.html>, (Access date: May 3,2026).

# 芸術と工学・科学的手法による英彦山<sup>ひこさん</sup>修験道文化の再興

知足美加子<sup>ともたり</sup>

九州大学 芸術工学研究院 (福岡市南区塩原 4-9-1)

tomotari@design.kyushu-u.ac.jp

## Revitalizing the Shugendo Culture of Mt. Hiko Through Art, Engineering, and Scientific Methods

Mikako Tomotari

Kyushu University, Faculty of Design

**Abstract:** Due to the destruction of Buddhist artifacts, the Shugendō tradition has nearly been lost. Therefore, this study restored and analyzed the destroyed cultural properties by combining 3D data with artistic techniques. Furthermore, based on an investigation of sacred tree worship using DNA analysis, wooden Buddhist statues were created to contribute to the revival of the cultural value of Shugendō of Mt.Hiko.

**Keywords:** Shugendo, Restoration, Art, 3D Data, Forest Culture

### 研究背景と目的

英彦山<sup>ひこさん</sup> (福岡県) は三大修験山の一つだが、明治維新の神仏分離令 (1868 年) と修験宗廃止令 (1872 年)、廃仏毀釈<sup>はいぶつきしゃく</sup>により仏教遺物の殆どが破壊されている。口伝伝承を旨とする修験道文化において文献資料は乏しい。そこで本研究は英彦山修験道美術に着目し、破壊された文化財の復原を通して修験道文化と仏教、神道等の宗教的表象の関係を探る。3D データと芸術技法を組み合わせた復原、および DNA 分析による霊木信仰の調査に基づき、英彦山修験道の文化的価値を再興する。

### 今熊野窟磨崖石仏《阿弥陀三尊像》<sup>あみださんぞんざう</sup>の復原

英彦山今熊野窟 (通称梵字が岩) には「嘉禎三年銘磨崖石仏」(図 1) と「月輪大梵字」が造形されている。これらは像名・像主・願文・制作年 (1237 年) を有する全国でも唯一の磨崖石仏である<sup>1</sup>。碑文には、阿弥陀三尊が彫刻されたことが記されているが、三尊の内の一尊しか岩壁に残されていない。そこで本研究は、磨崖石仏と崩落した岩盤群を 3D データ化することによって、崩落以前の全体像を再構成し、阿弥陀三尊の存在を実証する。そのためにまず、磨崖石仏とその周辺部分、約 20m 下方にある覆屋内の観音菩薩像<sup>かんのん</sup>を 3D 計測し、縮小した岩盤群を立体プリンターで出力した (図 2)。その結果、勢至菩薩像<sup>せいし</sup>と手前に崩落した岩盤の線刻形状が繋がるのがわかった。阿弥陀三尊の主尊は「岩壁の曲がり角にあたる部分」を利用して彫刻され、三尊<sup>さんぞん</sup>の仏像が放射線状に広がるようにレイアウトされたと推測される。また、勢至



(図 1) 《今熊野窟磨崖石仏》1237 年  
(図 2) 「阿弥陀三尊像想定模型」

によって、崩落以前の全体像を再構成し、阿弥陀三尊の存在を実証する。そのためにまず、磨崖石仏とその周辺部分、約 20m 下方にある覆屋内の観音菩薩像<sup>かんのん</sup>を 3D 計測し、縮小した岩盤群を立体プリンターで出力した (図 2)。その結果、勢至菩薩像<sup>せいし</sup>と手前に崩落した岩盤の線刻形状が繋がるのがわかった。阿弥陀三尊の主尊は「岩壁の曲がり角にあたる部分」を利用して彫刻され、三尊<sup>さんぞん</sup>の仏像が放射線状に広がるようにレイアウトされたと推測される。また、勢至

菩薩像手前の崩落岩盤に阿弥陀仏が彫刻されていたことが明らかになった<sup>2</sup>。

### 《彦山三所権現御正体》の復原

国指定文化財《彦山<sup>3</sup>三所権現御正体》(図3)について、非接触3Dスキャナを用いた分析により欠損部分の宗教的要因を調べた。その結果、仏教の意匠である「光背」や「蓮華」と、神道の「神像」が混淆した「神仏習合<sup>しゅうごう</sup>」の表象が意図的に省かれたことがわかった。御正体は廃仏毀釈<sup>いざなぎのみこと</sup>を免れるため、約120年間別々の場所に隠されていた。伊弉諾尊像は光背を排除され、神像として山頂の「上宮」に置かれた。伊邪那美尊像は、神仏習合の意匠だった神像は破壊され、神道の鏡として「下宮」に置かれた<sup>あめのおしほみみのみこと</sup>。天忍穗耳尊像は、僧形仏像としての破壊を免れるため「奉幣殿」宝物庫に隠されていた<sup>ほうへいでん</sup>。失われた伊邪那美命像は、江戸期の《彦山垂迹曼荼羅<sup>すいじやくまんだら</sup>》と他二軀の3Dデータより創造的に復原した。



(図3)《彦山三所権現御正体》鎌倉期



(図4) 知足美加子《彦山三所権現御正体復原》2016年

奉幣殿再建 400 年を期に英彦山修験道再興の機運が高まり、復原された《彦山三所権現御正体》(図4)は新たな英彦山神宮御神軀となっている。

### 英彦山霊木信仰と《鬼杉不動三尊像》の制作

英彦山修験道は霊木を神仏として崇敬し、特にスギを中心とした森林環境を護持してきた。南岳には樹齢約1300年の国指定天然記念物「鬼杉」(図5)が存在する。1600年に徳川家康の裁許のもと、山中の竹木持ち出しを禁じる法が決している。森林遺伝育種学専門の渡辺敦史<sup>5</sup>は霊木のDNA分析を行い、鬼杉群が氷期以前の天然スギの子孫であり、修験者が挿し木によってスギの血統を継続させた可能性を示した。これらの修験道思想と科学的根拠に基づき、霊木を用いた不動明王像(図6)を制作することになった。1991年の台風により落下した鬼杉の枝(径70cm)を素材とし、不動明王《鬼杉不動三尊像》を制作した。不動明王は修験者を護り導く存在である。



(図5)「鬼杉」(図6)《鬼杉不動三尊像》2025年  
樹齢約1300年

修験者にとってスギは「自然界の諸要素」を結ぶ信仰上の象徴である。スギの挿し木技法は修行で獲得する「擬死再生」の概念を具現化・涵養してきた。また、天と地をつなぐ柱という「神道」の概念と、成仏のプロセス(発心・修行・菩提・涅槃)という「仏教」の概念をつなぐメタファーとして機能する。現在、《鬼杉不動三尊像》は英彦山神宮下宮の信仰対象となり、参拝者増加に貢献している。

(本研究は JSPS 科研費 JP25580044,JP16K02314,JP24K00031 の助成を受けている)

<sup>1</sup> 八尋和泉「今熊野窟嘉禎三年銘磨崖仏」『英彦山修験道館展示資料』1987年 p.33

<sup>2</sup> 拙稿「3Dデータ化による修験道美術の再現-英彦山今熊野窟を中心に-」『山岳修験 54』2014年 pp.76-92

<sup>3</sup> 英彦山は「日子山」と呼ばれていたが、弘仁10年(819)に嵯峨天皇の詔によって「彦山」に改められ、享保14年(1729)に霊元法皇の院宣により「英彦山」となった。

<sup>4</sup> 拙稿「廃仏毀釈の影響を受けた英彦山修験道美術における復元的考察-豪潮宝篋印塔、三所権現御正体、不動明王立像-」『山岳修験 62』2018年 pp.49-67

<sup>5</sup> 渡辺敦史「霧島神宮スギ御神木と英彦山神宮に残るスギ古木群の由来からみたスギ植栽に対する思想の相違」『山岳修験 74』2024年 pp.73-88

## 自然界に存在する形と磁性流体アート

児玉幸子

電気通信大学、東京都調布市調布ヶ丘 1-5-1

sachiko.kodama@uec.ac.jp

## Forms Found in Nature and Ferrofluid Art

Sachiko Kodama

The University of Electro-Communications

**Abstract:** Magnetic fluid artworks reveal forms commonly found in nature, such as circles, hexagons, spheres, spindle shapes, stripes, spikes, cells, and labyrinthine patterns. The author, a creator of ferrofluid art, further considers the spiral to be one of the fundamental forms underlying the emergence of life in nature. In natural environments, transformations of form often occur over long periods of time. In ferrofluid art, however, such transformations emerge rapidly through the dynamic balance among magnetic force, surface tension, and gravity. In addition to the intrinsic properties of the material, the artist can intentionally control magnetic forces to generate morphological changes within extremely short time scales. This presentation positions ferrofluids as a medium situated between inorganic and organic matter, and discusses symmetry in nature and art, as well as the role of electromagnetism in living systems. The presentation also introduces a series of ferrofluid sculptures and artworks created within the ferrofluid art project, including works that combine ferrofluids with a variety of other materials and technologies.

**Keywords:** ferrofluid art, ferrofluid sculpture, forms in nature, electromagnetism and life

### 1 自然界に存在する形と磁性流体アート

自然を眺めていると、入り組んだ形や模様や、光のうつりゆくさまに魅了されます。そして植物や動物、人間もまた自然の一部として、複雑で有機的な形を持つ生命体として生きており、その姿にも魅入られることがあります。過去には、芸術で自然を模倣することが多く行われていましたが、テクノロジーが高度に発達した現代では、人工物である「磁性流体」を使って、有機的な形を発生させ、変化させるアートの世界を探求しています。

磁性流体とは、磁力に反応する液体です。直径が 10nm 程度の磁性超微粒子と、主成分である水、有機溶剤または油等の液体(分散媒)、そしてその粒子に吸着して粒子を液体中(分散媒)に安定に分散させるための界面活性剤の3成分によるコロイド溶液です。

磁性流体は、残留磁化、ヒステリシスといった特性を持ちません。磁性流体は磁界が 0 の時は磁性の無い液体ですが、磁界を作用させると磁化します。磁界を取り除くと、磁化は再び消滅します。このような磁氣的性質を超常磁性と呼びます。磁性流体中の磁性粒子は極めて小さく、直径は 10nm ほどで、界面活性剤層の相互反発力等により、凝集したり、重力によって沈降したりせずに、安定な分散状態を保つコロイド溶液であり続けます。

磁性流体を用いる作品制作を進める中で、磁性流体の現象として自然界に存在する基本的な形が、条件を整えることで創発的に発生することを観察してきました。ここでは、磁性流体アートの作品中に作ることができる形として、円(球)、紡錘形、六角形、縞、トゲ、細胞(セル)模様、迷路模様、そして螺旋(らせん)を挙げます。六角形、球、トゲ、縞は、自然のさまざまな

場所で、見つけることができます。ハチの巣、卵や魚の目玉。植物のトゲ。海の中の生き物、美しい毛皮を持つ動物。そして螺旋の形は、巻貝、竜巻、銀河、遺伝子にも見い出されます。これらの形を、磁性流体アートでも見い出すことができ、アーティストが動かすことができるのです。

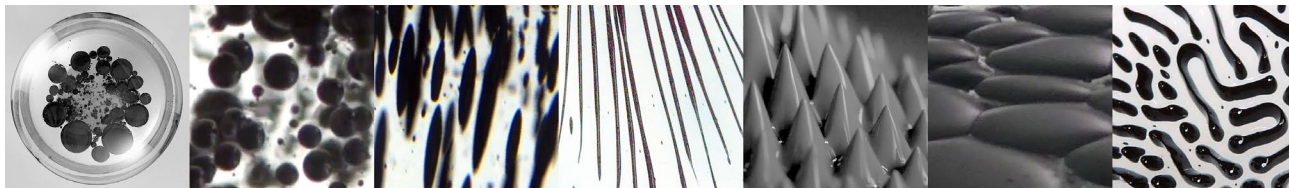


図1 磁性流体アートに見い出される形（左から、円、球、紡錘体、縞、トゲ、セル、迷路）  
（磁性流体アートの実験および完成した作品を被写体にして撮影）

## 2 無機物と有機物の間のメディアとしての磁性流体

磁性流体アートで用いられる磁性流体は、マグネタイト（酸化鉄）の超微粒子が界面活性剤でコーティングされ、合成炭化水素油に分散したものです。このような素材が、自然界の有機的な形、細胞や迷路模様のような形を形成することをどのように捉えればよいでしょうか。オパーリンは、『生命の起源と生化学』[1]の中で、生物界と無生物界の違いを考察しています。生物にあって無生物にないもの。それは「特別な形態あるいは構造」と、「自分自身をつくりだす代謝能力と刺激に対応する能力」であると述べています。そして特別な構造として「コロイド」に着目し、コロイドが、細胞の原形質をつくり、生命に直結すると主張しました。オパーリンが提案したこの「化学進化説（スープ説）」において最も注目したのは、コアセルベートと呼ばれるコロイド粒子が集まって形成された液体状の微小な塊で、タンパク質や核酸などの高分子化合物、異符号の電荷を持つコロイド粒子、異なる符号の電荷を持つ高分子電解質が、電気的な引力によって互いに引き合い、周囲の水分子を排除して凝集する過程に注目していました。コアセルベートが周囲の環境から有機物を取り込み、成長・分裂する能力を持っており、これが原始的な細胞（生命の祖先）になったと考えたのです。

磁性流体は、コロイドではありますが、タンパク質やでんぷんなどの天然高分子の「親水コロイド」とは違い、粒子は疎水性です。酸化鉄などの強磁性超微粒子を、界面活性剤でコーティングすることで、水、炭化水素油、エステル系油、フッ素系油などのベース液（分散媒）に均一に分散するように人工的に作られたコロイド溶液です。それは、生物の体を作り上げるタンパク質のような有機物ではなく、酸化鉄やフェライトなど無機物と、有機物（界面活性剤、イソパラフィンなどベース液）を人工的に組み合わせた物質であることがわかります。そのことを踏まえると、磁性流体は、無機物と有機物の間にあるメディアと言えるのではないのでしょうか。

そして磁性流体は、生物のような代謝能力はありませんが、磁力という刺激に反応し、特別な構造を作り出し、動かすことができる性質があります。私は、作品において、球、紡錘形、トゲ、細胞模様、迷路模様などを、磁力をコントロールすることで1秒かからないほどの短い間に作り出し、変化させられることを見てきました。自然の中に存在するこれらの形状やパターンは、形ができるまで長くかかることが多く、短い間に人為的に形状にインタラクションを起こすことは容易ではありません。

## 3 電磁気の対称性と生物の形に与える影響、磁性流体アートとの関係

磁性流体に現れる対照的で有機的な形や模様は、自然界の生命現象からはかけ離れた、無関係な出来事ことなのではないでしょうか？むしろ、電磁気の物理現象が、生命の形を作る上で、何か大きな影響を及ぼしてきたことへのヒント、オルガノン[2]なのではないかと、考えをめぐらせています。（芸術作品がオルガノンになるという考え方は、筑波大学で美学・芸術学を教えて頂いた、形の科学会の会員だった増成隆士先生の書籍から学んだことです。）

重力について言えば、地球上の自然の中で、ほとんどの生物が、重力の影響を強く受けて形態を発達させています。私達は、重力に抗って上へと立ち上がる姿に、生命的な力強さを感じます。それでは、生物の体の垂直方向の造形ではなく、水平方向への対称性は、何に由来するのでしょうか。

自然の中で正確な対称性を持つものの代表格として、電磁気の法則を挙げることができるでしょう。電子が流れるコイルの内側には磁場が生まれ、コイルの銅線の中を電子が流れる方向によって、磁場の方向が逆転します。磁石をコイルの内側で動かすと、電流が流れます。マクスウェルの電磁法則は「空間の領域において、磁場/電場が時間的に変化するときには、電場/磁場が誘導される。誘導される電場/磁場の大きさは、磁場/電場の変化の割合に比例し、その方向は、磁場/電場の変化に対して直角である」ことが、その対称性を説明しています。

電磁力は、生命において、時間と空間のスケールが異なるレベルで作用しているようです。ナノスケールでは、DNA、RNA など遺伝子において、電磁気学的な性質が変化を生み出していることが研究されています。渡り鳥や海洋生物の移動では、地磁気によって圧力を感じる生物の体内の細胞の機能により、移動の方向や周期が決まることが研究されてきました。太陽から降り注ぐ電磁波のエネルギーが、生命の成長、破壊にも、大きな影響を与えていることも重要です。電磁石を用いて変動する磁場を発生させ、磁性流体で生き物のように見える形やパターン、動きを作り出す磁性流体アートは、地球上の生命現象と直接結びつく訳ではありませんが、電磁力の作用を有機的な形で示す点で共通しています。そして、生命の発生パターンとして知られる反応拡散方程式が当てはまる現象と、磁性流体アートに似たパターンが出現することも興味深いことです。

#### 4 磁性流体のアートプロジェクトと磁性流体彫刻

磁性流体アートのプロジェクトを 2000 年頃に初めて、これまで様々な作品を作ってきました。筑波大学の大学院生時代、竹野美奈子が磁性流体の形について形の科学シンポジウムで考察した研究[3]が、私が磁性流体のアートプロジェクトを始めたきっかけでした。生命や宇宙への関心と芸術制作への熱意がまぜこぜになった子供時代を過ごした私は、物理学科を卒業後、大学院で芸術を学んでいました。その院生時代に、一時期、ルームメイトだったのが竹野です。彼女とは科学と芸術について様々な議論をしました。磁力を用いるアーティストとして有名な Takis が、磁性流体と 1 つの電磁石を使った実験的な作品を作っており[4]、この Takis の作品から発展させ、竹野は、2 つの細長い電磁石を用いて反発する磁場の間で、1 つの電磁石では作り出せない磁性流体の形を発表しました。

私はと言えば、磁性流体の金属のように反射するマテリアルの視覚的特質にも強い魅力を感じつつ、磁性流体に磁場をかけると生まれる創発的な形やパターンを動かすこと、まるで生きているような印象を受けるインタラクションを作り出すことに面白さを感じました。一つの電磁石を部屋のような空間に組み込み、皿の中の磁性流体が人の声に応じて動く《脈動する》シリーズ、6 つの電磁石を立体的に構成して、それらの間で、磁性流体の有機的な 3 次元形状が音声に対してダイナミックに変化する《突き出す、流れる(Protrude, Flow)》[5]、小型電磁石を平面に敷き詰めて波のようなパターンを発生させる《波と雲丹》等を発表しました。2004 年には、強磁性体である鉄を彫刻し、表面に磁性流体のトゲを流動させる磁性流体彫刻の初期の作品《呼吸するカオス》を映像とインスタレーションとして UCLA のギャラリーなどで発表し、《モルフォタワー》シリーズ[6][7]へと展開しました。

磁性流体のアートプロジェクトは、その後、透明なガラス容器の中に磁性流体と、磁性流体と交じり合わない液体（フッ素化合物など）を封入して、ガラスの中で形状がゆっくりと変化していく《静物》、《惑星》、《リボーム》のシリーズ、蛍光磁性流体を使った作品を被写体として制作された映像《重力の庭》[8]等へと展開していきました。

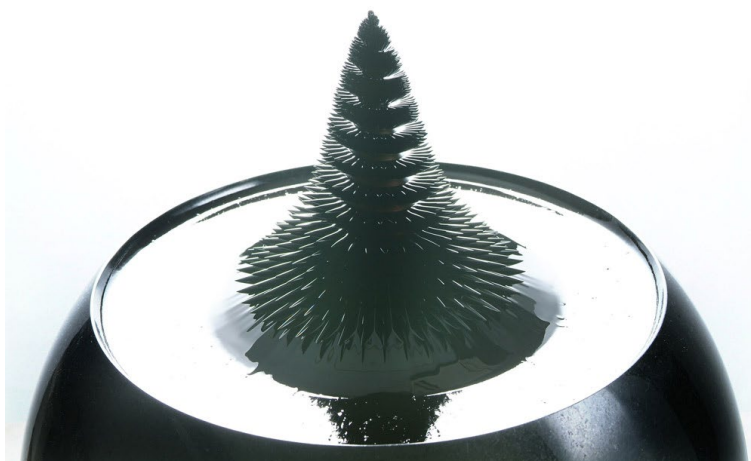


図2 児玉幸子《モルフォタワー(Morpho Tower)》2006年制作 (ArtFutura 所蔵)  
螺旋形の鉄の表面を磁性流体の棘(スパイク)が回転しながら上昇・下降する磁性流体彫刻

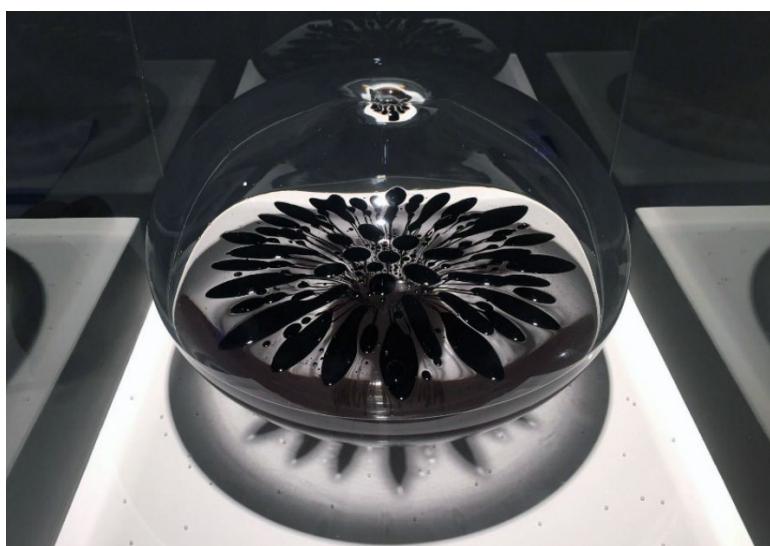


図3 児玉幸子《リボーム (Ribome)》  
文化庁メディア芸術祭 20周年企画展「変える力」(2016年)アーツ千代田 3331にて撮影

磁性流体彫刻では、磁力をかけると、鉄の表面に付着した磁性流体から、小さな粒々が出てきます。磁場が弱い時は、表面張力と重力が勝っており、磁性流体の大きなトゲは出現しません。しかし、磁場がある一定の強さを超えた瞬間、磁力が表面張力と重力の合計を上回り、液体表面のわずかな揺らぎが磁力によって増幅され、一気に、大きく目立つ「トゲ」が突き出してきます。突起は複数になり、彫刻の強い磁力を発生している部分に並びます。このような突起が出現する現象は、磁性流体のスパイク現象 (Rosensweig instability) として知られています。[9] 《モルフォタワー/二つの立てる渦》という作品では、二つの「モルフォタワー」が金色の皿の上に突き出しており、その表面で、磁性流体のトゲが右回りと左周りに回転します。2本の鉄製のタワーには、反対方向の向きで螺旋形の溝が刻まれているため、不安定性から出現する磁性流体のトゲを、それぞれ逆の方向へと誘導するしくみになっています。

《脈動する一壁に耳あり(移送空間)》という作品では、去年、生成 AI (ChatGPT) によるインタラクション手法を導入しました。耳のオブジェに向かって観客が話しかけた言葉の感情に応じるように、皿の中の磁性流体が動くようになりました。

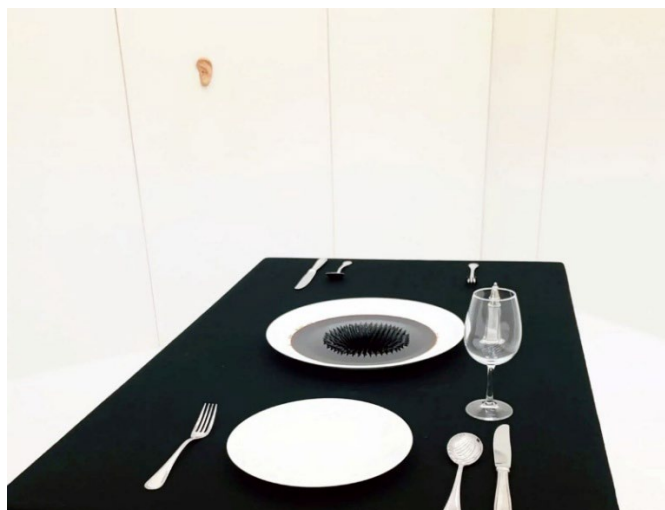


図3 《脈動する一壁に耳あり(移送空間)》(児玉幸子、竹野美奈子、2007年)

都城市立美術館収蔵作品展 夏休み企画〈入門〉アートの疑問「くらべる美術」(2025年)で撮影

## 5 おわりに

地球の磁場(地磁気)は、地球中心部にある液体金属(主成分は鉄)の対流運動によって電流が生まれ、磁力が発生する「ダイナモ効果」によって生まれているそうです。宇宙空間では、生命にとって危険な、太陽のコロナから放出される高温のプラズマである太陽風が吹き曝し、地球上の生命は、地球の磁場によって守られています[10]。遺伝子から宇宙空間まで、電磁気の現象が生命に与える影響は、恩恵を得る方向と破壊的な方向の両面で大きいことがわかります。

磁性流体アートを見ることによって、これらの物理的な力への好奇心が掻き立てられ、自然界で形が発生するしくみや、生命に見られるのさまざまな形や対称性の不思議さに対する探求心が深まることを願い、これからも、芸術と科学技術が結びついて生まれるメディアアートの開拓と創造活動を続けていきます。

### 【参考資料】

- [1]オパーリン『生命の起源と生化学』岩波新書, 1956.
- [2]増成隆士『思考の視覚を見る-マグリットのモチーフによる変奏』勁草書房, 1983.
- [3]Minako Takeno, *Appearance of Magnetism 3 - Shape using magnetic fluid*, (This work was awarded as the Best Artwork of "Katashi U Symmetry" Conference (Univ. of Tsukuba, Japan, 1999). <https://www.mi.sanu.ac.rs/vismath/takeno/index.html>)
- [4]Takis は 1968 年から 1969 年において MIT の CAVS(Center for Advanced Visual Studies)に滞在し、磁性流体を用いる作品を制作した。
- [5]Sachiko Kodama, Minako Takeno, *Protrude, Flow*, SIGGRAPH'01 Art Gallery, 2001.
- [6]児玉幸子, 磁性流体彫刻, 日本 VR 学会第 10 回大会(東京大学), 2005.9.
- [7]Sachiko Kodama, *Morpho Tower*, SIGGRAPH 2006 Art Gallery, 2006.
- [8]児玉幸子《重力の庭》, 2021. <https://vimeo.com/1091848625>
- [9]R. E. Rosensweig, *Ferrohydrodynamics*, Cambridge University Press, 1985.
- [10]児玉幸子《太陽との邂逅》(インスタレーションおよび映像), 2023 つくば美術館 協力: JAXA, 篠原育教授、鳥海森准教授. <https://www.youtube.com/watch?v=4FloczLnI9w>
- [11]高輪ゲートウェイシティ, Mon Takanawa「ぐるぐる展-進化しつづける人類の物語」で《モルフォタワー/二つの立てる渦》を展示中(2026年3月28日~2026年9月23日)
- [12]北九州市科学館スペース LABO で《Ribome》(2022年)を常設展示中. <https://www.totalmedia.co.jp/info/interview-0003-kitakyushushi-spacelabo/>



# Universal Natural Shapes - new models for the sciences

Johan Gielis

## Generalized Conic Sections

The Superformula, introduced in 2003, is a generalization of Lamé curves (superellipses), and of conic sections. It is a single compact formula capable of describing an astonishing variety of natural and abstract shapes.

While the Superformula has its origins in the description of botanical shapes, it is a fundamental equation that can be applied in many areas. The past two decades have seen it used in a variety of papers, books, theses and patents, in the fields of mathematics, physics, biology, technology and education<sup>1</sup>. Citations in education, psychology and cognitive science papers indicate the application of the Superformula in these less obvious fields, showing how it can change our perception of shapes based on similarity rather than differences.

Systematic empirical validation has demonstrated that the Superformula accurately models an extensive range of biological forms using only a small number of parameters. More than 50,000 biological specimens - including leaves, seeds, flowers, starfish, tree rings, petioles, diatoms, eggs, and the apical meristems of both roots and shoots of plants - have been successfully fitted. The original idea of using Lamé curves to model square bamboo stems has been corroborated using over 1400 stem sections of *Chimonobambusa quadrangularis* (Gielis et al. 2021). Starfish and stem sections of *Philodendron melinonii* and rhubarb illustrate how small parameter variations reproduce the observed morphological transitions in plant organs. However, in many cases, only two to three parameters are needed to accurately describe many natural shapes, their development, and the main functional characteristics of all the specimens analysed.

## Technological applications

The parametric flexibility of the Superformula has enabled concrete engineering advances, for example in CAD design (Beirinckx, 2023). Over 100 papers have been published in the field of antenna and waveguide designs, with multifold improvements in efficiency, fractional bandwidth, directivity, beam shaping, and sidelobe control, even with reduction in size and volume. Applications include WiFi, IoT, and 5G and 6G. (see [www.antennacompany.com](http://www.antennacompany.com) which I co-founded). Other fields where the Superformula led to various improvements include antenna measurement technology, gear design, lasers, topology optimisation and game design.

---

<sup>1</sup> <https://researchoutreach.org/articles/superellipses-superformula-impact-gielis-transformations/>

## Results in geometry

From the start, the Superformula attracted the interest of geometers and applied mathematicians. It inspired mathematicians to generalize methods for solving boundary value problems, for generalizing minimal and constant mean curvature surfaces (Koiso and Palmer, 2008), to model seismic wave propagation (Yajima et al., 2009), and to study some geometrical properties (Matsuura, 2015). The idea of stretchable radii, the hallmark of the Superformula, was codified by defining the inner and vector products (Parlak & Özdemir, 2025).

Recently, a unified superelliptic framework has been developed (Özdemir et al., 2026) providing all the necessary tools for differential geometers. The framework defines superelliptic inner and cross products, a star derivative, and a complete superelliptic Frenet frame for curves and surfaces generated by the Superformula. Curvature, torsion, and intrinsic metrics are thereby expressed rigorously for the entire family of Gielis transformations.

One major result is that even highly singular or non-convex Superformula shapes reduce, within their internal non-Euclidean metric, to the geometry of a circle. This internal equivalence supplies a regulatory layer that eliminates the geometric effects of singularities while preserving external morphology, enabling consistent treatment of many complex forms. These advances supply exact analytical foundations for variational problems, boundary-value computations, and numerical simulations involving natural shapes. It can be concluded that the Superformula has matured from a descriptive observation into a multiply validated powerful new model for the sciences, and has already become part of the history of geometry (Verstraelen, 2014)

## References

- Gielis, J., Shi, P., Beirinckx, B., Caratelli, D., & Ricci, P. E. (2021). Lamé-Gielis curves in biology and geometry. In *Proceedings of RIGA, Bucharest, Romania*.
- Beirinckx, B. (2023). From superellipses to superformula and technology. In *1st Intern. Symp. on Square Bamboos and the Geometree (ISSBG 2022)*. Athena Publishing.
- Matsuura, M. (2015). Gielis' superformula and regular polygons. *J. of Geometry*, 106(2), 383
- Koiso, M., & Palmer, B. (2008). Equilibria for anisotropic surface energies and the Gielis formula. *Forma (Japanese Society for Science of Form)*.
- Yajima, T., & Nagahama, H. (2009). Finsler geometry of seismic ray path in anisotropic media. *Proc. Roy Soc A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, 465(2106), 1763.
- Parlak, E., & Özdemir, Z. (2025). Superelliptic motion and superelliptic quaternions via Gielis formula. *Physica Scripta*, 100(9), 095212.
- Özdemir, Z., Parlak, E., & Gielis, J. (2026). A unified superelliptic framework for the differential geometry of Gielis transformations. *Axioms*, 15(5), 325.
- Verstraelen, L. (2014). A concise mini history of geometry. *Kragujevac Journal of Mathematics*, 38(1), 5-21.

## ギーリス曲線の幾何的特性に関する考察

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

### Remarks on the Geometric Properties of Gielis Curves

Masaya Matsuura

Graduate School of Science and Engineering, Ehime University,

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

**Abstract:** We consider Gielis curves (supershapes), which generalize Lamé curves (superellipses). Lamé curves are plane curves that have been widely used in product design. They enable shapes that lie between ellipses and rectangles. On the other hand, Gielis curves, invented by Johan Gielis, can represent even wider variety of shapes, such as polygons, star shapes, floral patterns, and heart shapes, within a unified mathematical framework. In particular, they can generate a rich variety of shapes in which curves and straight lines coexist. In this talk, focusing on this feature, we analyze Gielis curves from the viewpoint of the harmony between curves and straight lines, with particular attention to geometric properties such as curvature.

**Keywords:** Gielis curves, supershapes, Lamé curves, superellipses, curvature

#### 1. はじめに

本講演では、ラメ曲線（スーパー楕円）の拡張であるギーリス曲線（スーパーシェイプ）について考察する。とりわけ、「曲線と直線の調和」という観点から、曲率等の幾何的な特性に着目して分析する。ラメ曲線は、スウェーデンの首都ストックホルムの再開発で活用されたのを機に、建築物やプロダクトデザインに広く用いられてきた。数学的には次式で定義される  $xy$  平面上の曲線で、楕円と長方形の中間的な形を表現可能である [3]。

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

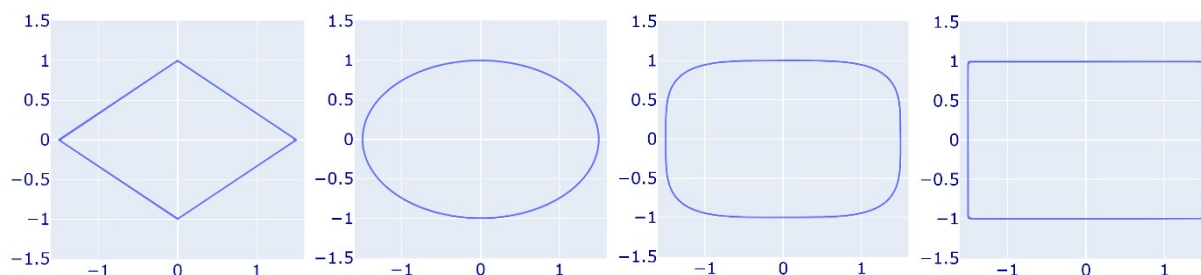
一方、ヨハン・ギーリス (Johan Gielis; 1962-) により考案されたギーリス曲線は、次式で与えられ、楕円と長方形の中間的な形に限らず、多角形、星形、花柄、ハート形など、多様な形を統一的な数式で表現することが可能である [1, 2]。

$$r = \left\{ \left| \frac{1}{a} \cos \frac{n\theta}{4} \right|^{p_1} + \left| \frac{1}{b} \sin \frac{n\theta}{4} \right|^{p_2} \right\}^{-\frac{1}{q}} \quad (a, b, n, p_1, p_2, q \text{ は正の定数})$$

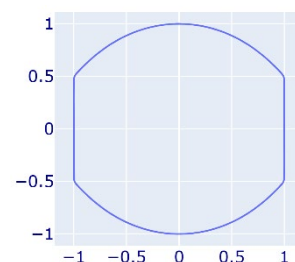
もっと一般の形のギーリス曲線や3次元曲面への拡張なども考案されているが、本講演では、数理的な解析が容易になるよう、上の形に限って考察する。

## 2. 曲線と直線の調和

ラメ曲線はパラメータ  $a, b, p$  の値を変えることで、曲線的な図形である楕円と、直線的な図形であるひし形や長方形との中間的な形を表現することができる (下図)。

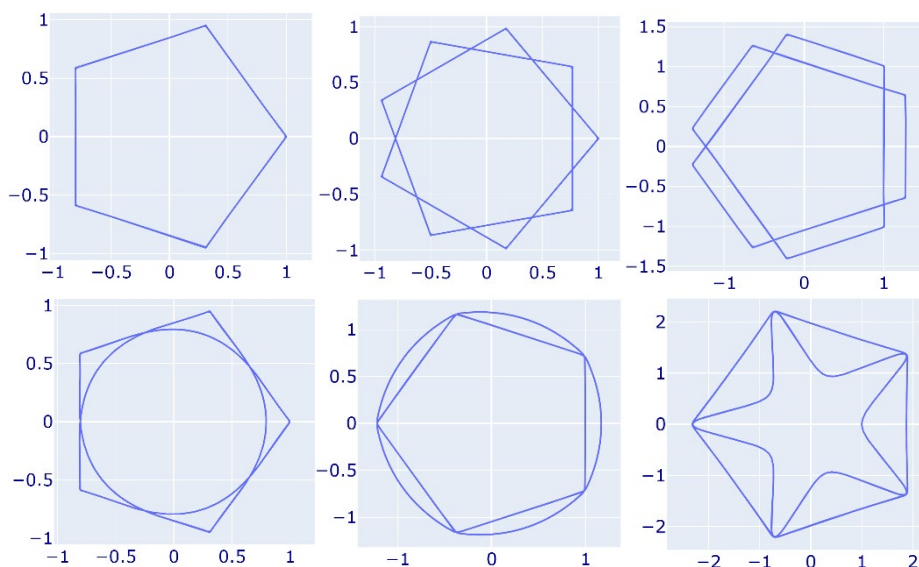


しかし、曲線と直線が同時に存在し、互いに調和した形を表現することはできない。これに対し、ギーリス曲線では、パラメータ  $a, b, n, p_1, p_2, q$  の値を調節することで、右図のように、曲線(水平方向に伸びた線)と直線(鉛直方向に伸びた線)が組み合わさったような形も、一つの式で統一的に表現可能である。



## 3. 幾何的な考察

本講演では、ギーリス曲線で表現可能な形のうち、直線的な形(右図上段)、および曲線と直線とが共存する形(同下段)について、[4][5]と同様の手法で、曲率等の幾何的な特性を分析する。



## 参考文献

- [1] J. Gielis, Wiskundige supervormen bij bamboes, Newsletter of the Belgian Bamboo Society, 13, 20-26, 1996.
- [2] 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.
- [3] G. Lamé, Examen des différentes méthodes employées pour résoudre les problèmes de geometrie, Paris, 1818.
- [4] M. Matsuura, Asymptotic behaviour of the maximum curvature of Lamé curves, Journal for Geometry and Graphics, 18(1), 45-59, 2014.
- [5] M. Matsuura, Gielis' superformula and regular polygons, Journal of Geometry, 106(2), 383-403, 2015.

## 葉序に由来する充填理論と形の自己組織化

富安 亮子

九州大学, 福岡市西区元岡 744 ウェスト 1 号館

tomiyasu.ryoko.446@m.kyushu-u.ac.jp

### Packing Theory Derived from Phyllotaxis and Geometric Self-Organization of Forms

Ryoko Oishi-Tomiyasu

Kyushu University, 744, Motooka, Nishi-ku, Fukuoka, Japan

#### Abstract:

Phyllotactic patterns observed in plants, such as the Vogel spiral generated by the golden-angle method, exhibit highly efficient quasi-periodic arrangements despite their simple generative rules. Building on this classical construction, we develop a new theoretical framework for point packing generation based on number theory and differential geometry, which produces aperiodic point configurations on surfaces and higher-dimensional manifolds, including Euclidean spaces.

Within this generalized framework, classical golden-angle constructions, and circle packing or mesh generation based on quasi-conformal mappings, can be understood as manifestations of a common underlying principle. We further discuss deformations that preserve or improve packing density, providing a mathematical perspective on the geometric self-organization of forms.

**Keywords:** phyllotaxis, aperiodic packing, lattice reduction, geometry of numbers, discrete geometry

#### 1 背景

ひまわり頭部や松ぼっくりなどに見られる2重らせんパターンの数理モデルとして知られる黄金角の方法は、黄金比を $\gamma$ としたとき $2\pi/(1+\gamma) \approx 137.5^\circ$ 回転ごとに新しい点座標が生成される、といった単純な生成規則にもかかわらず、高い充填効率と準周期的な配置を与えることができ、回転体上の点群生成などにも用いられている[1]。その一般次元への拡張は、近年 open problem として挙げられている[2, 3]。他方、曲面上のサークルパッキングは、平面上の六方格子を等角写像により引き戻すことに該当し、微分幾何・幾何離散・メッシュ生成といった様々な分野に関わる。しかし3次元以上のリーマン多様体がそのような等温座標系を持つことを要請することは、多様体に強い制約を課す。

#### 2 一般化

[4]では数論と幾何学に基づく新しいパッキングの理論的枠組みを構築した。我々のアプローチでは、葉序パターン生成は以下の手続きとして解釈される。直交する $n$ -フレーム場を多様体 $M$ 上に導入し、 $n$ -フレームの直交性および $n$ -フレームが定める領域の体積を保つ変形を介して、 $M$ から同次元ユークリッド空間への写像を構成できれば、その写像を用いて空間内の格子 $L$ の点座標を多様体へ引き戻すことで葉序パターンが得られる。

**Q1:** この方法により一般曲面や、ユークリッド空間を含む高次元多様体上に点集合を生成するとき、一様性すなわち充填密度の意味で最適な格子はどのようなものか？

この問いを考えるにあたり、通常、葉序の議論に使用される連分数を用いた解釈を、格子理論を用いて拡張することは極めて有用である。

格子とは、1次独立な  $n$  個の  $n$  次元ベクトル  $b_1, \dots, b_n$  の整数係数線形和  $m_1b_1 + \dots + m_nb_n$  で書ける点集合を指す。  $b_1, \dots, b_n$  が入っている  $\mathbb{R}^n$  の標準基底  $e_1, \dots, e_n$  を辺に持つ立方体を、体積を変えず長さだけ変えるような変形を行うことは、行列式 1 の実数値対角行列  $D$  をかける変換を行うことと一致する。

[4]で示したように、Q1を最も一般的（よって最も簡単）な設定で考えると、解くべき問題は以下のQ2と一致する。

**Q2:** あらゆる行列式 1 の実数値対角行列  $D$  をかけたときに、  $Db_1, \dots, Db_n$  がなす格子に現れ得るすべての格子点間距離を、最も大きな値で下からおさることができる  $b_1, \dots, b_n$  はどのようなものか？

さらに、Q2は product of linear forms として（特に  $n=2$  ではマルコフ理論）知られる問題と同値であることから黄金角の方法の一般化が得られる。図1, 2に計算結果を示す。

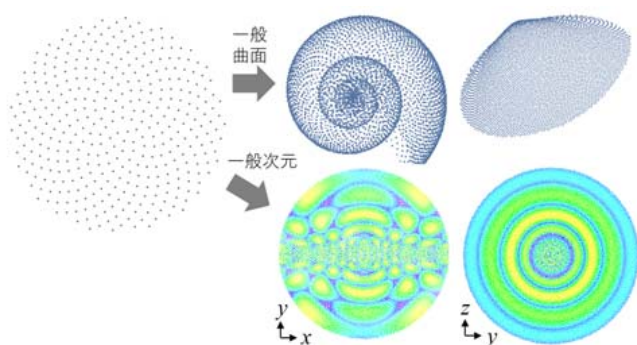


図 1 研究概要

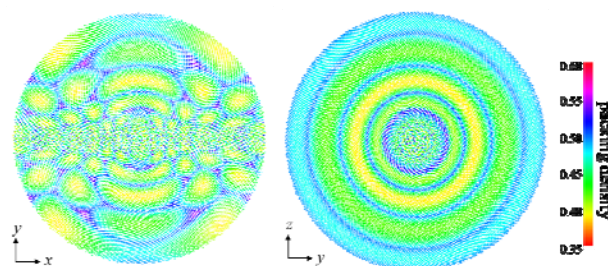


図 2 3次元球体における生成点群の断面図。  
局所充填密度で点群を着色。

## 謝辞

本研究は JST 創発的支援事業 (JPMJFR2132), JSPS KAKENHI (19K03628) の支援を受けた。加えて九州大学 SENTAN-Q 研修プログラムの支援により、2020 年度の 1 年間、博士課程学生の S. E. Graiff Zurita が RA として参画し、ともに研究を実施した。

## 参考文献

- [1] A. Lodkin. Multidimensional generalization of phyllotaxis. *Cybernetics and Physics*, 8(3):153-160, 2019.
- [2] Shigeki Akiyama. Spiral Delone sets and three distance theorem. *Nonlinearity*, 33(5):2533-2540, 2020.
- [3] D. P. Hardin, T. Michaels, and E. B. Saff. A comparison of popular point configurations on  $S^2$ , *Dolomites Research Notes on Approximation*, 9:16-49, 2016.
- [4] S. E. Graiff Zurita & R. Oishi-Tomiyasu, *Constructive Approximation* 60(3), p. 515--545 (2024).
- [5] H. Davenport, On the Product of Three Homogeneous Linear Forms (II), *Proc. Lond. Math. Soc.*, s2-44 (1938), 412-431.



## 曲線のベックルンド変換と半離散ガウス曲率負一定曲面への応用

島田 祥吾<sup>1</sup>, 安本 真士<sup>1</sup>

<sup>1</sup>徳島大学大学院創成科学研究科, 〒770-8506 徳島市南常三島町2丁目1番地

\*yasumoto.masashi@tokushima-u.ac.jp

### Bäcklund transformations for curves, and their application to semi-discrete K-surfaces

Shogo Shimada, Masashi Yasumoto

Graduate School of Science and Technology for Innovation  
Tokushima University, 2-1 Minamijosanjima, Tokushima, 770-8506, Japan

**Abstract:** We introduce Bäcklund transformations for curves with constant torsion. It is shown that two types of semi-discrete integrable equations arise from these transformations, generalizing those obtained by Calini and Ivey [1]. Furthermore, we show that semi-discrete surfaces with constant negative Gaussian curvature can be obtained by applying iterated Bäcklund transformations.

**Keywords:** differential geometry, transformation, semi-discrete surface

#### 1. はじめに

本ポスターでは、振率が(0でない)一定の曲線に着目する。 $\gamma(s)$ を弧長パラメータ表示された、振率 $\tau$ が0でない一定の曲線とする。 $\theta$ を $\theta \neq n\pi$  ( $n \in \mathbb{Z}$ )をみたす定数とし、以下の条件をみたす曲線 $\hat{\gamma}(s)$ を $\gamma(s)$ のベックルンド変換という。

$$\hat{\gamma}(s) = \gamma(s) + \tau^{-1} \sin \theta \{ \cos \phi(s) \gamma'(s) + \sin \phi(s) n(s) \}$$
 $n(s)$ を $\gamma(s)$ の主法線ベクトル,  $\phi(s)$ を実数値関数とする。ここで、 $|\gamma'(s)| = 1$ という条件を課すと、次が得られる。

**命題**  $\gamma(s)$ を振率 $\tau$ が一定の曲線とする。このとき $\gamma(s)$ のベックルンド変換 $\hat{\gamma}(s)$ の振率もまた $\tau$ で一定となる。

上記の命題より、ベックルンド変換は、振率一定曲線の弧長と振率を保つ離散時間発展とみなせる。これは Calini, Ivey [1] の結果の一般化となっている。

#### 2. ベックルンド変換と半離散可積分方程式

ベックルンド変換を構成するには、関数 $\phi(s)$ を求めればよい。 $\kappa(s), \hat{\kappa}(s)$ を $\gamma(s), \hat{\gamma}(s)$ の曲率とし、関数 $\psi(s), \hat{\psi}(s)$ を $\psi'(s) = \kappa(s), \hat{\psi}'(s) = \hat{\kappa}(s)$ と定めると、 $\phi(s)$ は $\psi(s), \hat{\psi}(s)$ を用いて表される。ここで、 $\psi(s), \hat{\psi}(s)$ は以下のいずれかの条件をみたす。

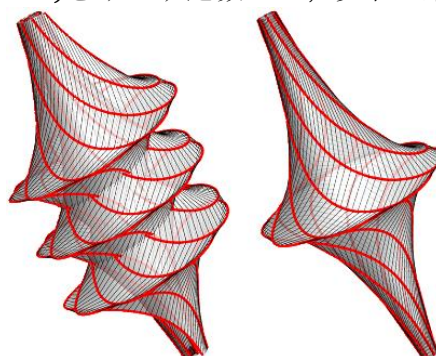
$$\hat{\psi}'(s) - \psi'(s) = 2\tau \tan \frac{\theta}{2} \sin \frac{\hat{\psi}(s) + \psi(s)}{2}, \hat{\psi}'(s) + \psi'(s) = 2\tau \cot \frac{\theta}{2} \sin \frac{\hat{\psi}(s) - \psi(s)}{2}$$

いずれかの方程式を解き、ベックルンド変換を繰り返し施すことで曲線列が得られる。これを半離散曲面とみなすことで、Wallner [2] の意味での半離散ガウス曲率負一定曲面が構成できる。詳細はポスターにて紹介する。

#### 参考文献

[1] A. Calini and T. Ivey, Bäcklund transformations and knots of constant torsion, *J. Knot Theory Ramifications* **7** (1998), no.6, 719-746.

[2] J. Wallner, On the semidiscrete differential geometry of A-surfaces and K-surfaces, *J. Geometry* **103** (2012), 161-176.



## 離散極小曲面のダルブー変換

竹下 朔磨<sup>1\*</sup>, 安本 真士<sup>1</sup>

<sup>1</sup>徳島大学大学院創成科学研究科, 〒770-8506 徳島市南常三島町2丁目1番地

\*c61210537008@tokushima-u.ac.jp

### Discrete minimal Darboux transformations

Sakuma Takeshita, Masashi Yasumoto

Graduate School of Science and Technology for Innovation

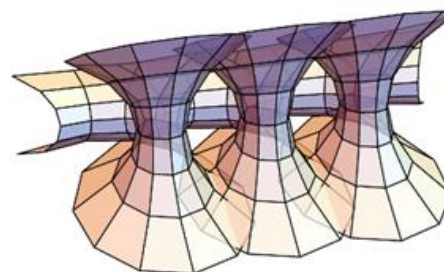
Tokushima University, 2-1 Minamijosanjima, Tokushima, 770-8506, Japan

**Abstract:** Using a quaternionic calculus, we introduce the permutability of transformations for discrete isothermic surfaces. As an application, it is shown that the corresponding discrete Gauss maps of a pair of discrete minimal surfaces related by Darboux transformations satisfy certain difference equation. Furthermore, by applying the higher dimensional permutability, we obtain a superposition principle for discrete minimal surfaces.

**Keywords:** differential geometry, transformation, discrete surface

#### 1. はじめに

離散双等温曲面と呼ばれる離散平均曲率一定曲面や離散極小曲面を含む離散曲面のクラスに着目する. 本ポスターでは, 離散双等温曲面に対するクリストッフェル変換, グルサー変換, ダルブー変換と呼ばれる曲率条件を保つ変換の対称性と, これから得られる性質を紹介する. 右図は離散懸垂面にグルサー変換を施したものである.



#### 2. 極小曲面のダルブー変換と重ね合わせ

本章では離散双等温曲面に作用する変換の対称性について紹介する. 離散双等温曲面を  $f$ , メビウス変換を  $\mu$ ,  $f$  のクリストッフェル変換を  $f^*$ , グルサー変換を  $G_\mu(f)$ , ダルブー変換を  $D_{t_i}(f) = f^i (i = 1, 2)$  とする. このとき右図の対称性が成り立つ. 特に, 離散極小曲面の場合に対して以下を得る.

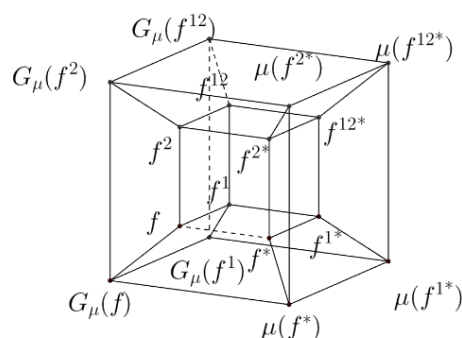
- 2つの離散極小曲面間のダルブー変換の構成
- 離散極小曲面の重ね合わせ

連続の場合, 対称性の一部は[2]で与えられている. 本結果はこの結果の離散化及び高次元版である.

さらに, 極小曲面の重ね合わせは[1]で紹介されているが, 連続的な場合も我々の結果を応用することで極めて簡単に示すことができる. 詳細はポスターにて紹介する.

#### 参考文献

- [1] A.V. Corro W. Ferreira, and K. Tenenblat, Minimal surfaces obtained by Ribaucour transformations, *Geom. Dedicata* **96** (2003), 117-150.  
 [2] U. Hertrich-Jeromin and A. Honda, Minimal Darboux transformations. *Beitr. Algebra Geom.* **58** (2017), 81-91.



## 正多角形の封筒の小谷の蟻の問題

植田彩加, 山岸義和

龍谷大学, 大津市瀬田大江町横谷 1-5

y25m004@mail.ryukoku.ac.jp

## Kotani's Ant Problem of regular polygonal envelope

Sayaka Ueda, Yoshikazu Yamagishi

Ryukoku University, 1-5 Yokotani, Seta Oe-cho, Otsu, Shiga

**Abstract:** We study the limit sets of the farthest point map on the doubly covered regular hexagon, pentagon and square. For the hexagon and the square, the limit set is the union of the main diagonals. For the pentagon, the limit set has a positive measure.

**Keywords:** regular polygon, farthest point, Voronoi tessellation, Delaunay triangulation, doubly covered polygon

### 1. はじめに

小谷の蟻の問題とは、 $1 \times 1 \times 2$  の直方体上で、頂点から最も遠い点はどこかというパズル問題である[1]。この問題を拡張し、正多角形二面体上の最遠点写像およびその極限集合について考えた。先行研究では、正五角形二面体の場合について報告した[2]。正多角形二面体とは、正多角形の形をした封筒のようなものである。

### 2. 最遠点写像の極限集合

正三角形、正方形、正五角形、正六角形について、その二面体上の最遠点写像の極限集合を下図に示す。正三角形の場合は頂点および重心、正方形と正六角形の場合は対角線となる。正五角形の場合は面積が正であるが、図形全体ではない。

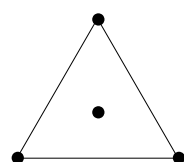


図1 正三角形

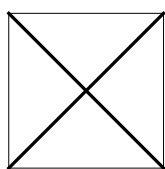


図2 正方形

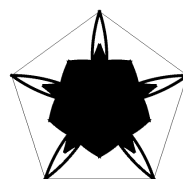


図3 正五角形

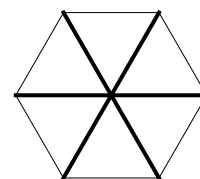


図4 正六角形

### 3. 参考文献

[1] 小谷善行(2014), 数学パズルチャレンジ超問 120, 株式会社ニュートンプレス.

[2] 植田彩加, 山岸義和, 「正五角形二面体の最遠点写像」, 2025年9月2日, 日本応用数学会, 東京理科大学.

## Applications and Ecological Evaluation of EEG-Based Neuro-Biofeedback

Hikaru Miyagi<sup>1</sup>, Hiroki Takada<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Department of Intelligent Systems, Graduate School of Engineering, University of Fukui, 3-9-1 Bunkyo, Fukui 910-8507, Japan

*mj260308@g.u-fukui.ac.jp*

**Abstract:** A neuro-biofeedback system was developed that modulates dynamic visual patterns generated by the Boids flocking model and the Gray–Scott reaction–diffusion model according to the EEG alpha/beta ratio. Physiological responses were evaluated using electrocardiography (ECG) and heart rate variability (HRV) indices. Significant increases in  $\Delta HF$  were observed particularly at cycle 3, suggesting intermittent parasympathetic activation.

**Keywords:** ECG, HRV, Gray–Scott model, Boids model, EEG, Neuro-Biofeedback

### 1. Introduction

The concept of inducing mental relaxation through skeletal muscle release originates with Jacobson’s Progressive Relaxation [1]. Previous studies have demonstrated relaxation effects using muscle, HRV, and EEG biofeedback [2–5]. However, the temporal structure of relaxation onset during intermittent neuro-biofeedback remains unclear. This study developed an EEG-based neuro-biofeedback system that modulated Boids and Gray–Scott visual dynamics according to the alpha/beta ratio and evaluated autonomic responses using HRV indices.

### 2. Methods

Eight healthy adults participated. The protocol comprised a pre-rest period (1 min, eyes open), a task-type neuro-biofeedback session (5 min, five alternating 30-second Focus/Relax cycles), and a post-rest period (1 min eyes open). During the task phase, the EEG alpha/beta ratio modulated two visual stimuli: (i) the Boids flocking model and (ii) the Gray–Scott reaction–diffusion model. ECG and EEG were recorded throughout (Fig. 1).

### 3. Analysis

PSD of RR intervals was computed using the maximum entropy method (MEM, AR order = 31). LF (0.04–0.15 Hz) and HF (0.15–0.4 Hz) components were extracted. The HF ratio per cycle ( $\Delta HF = HF_{relax} / HF_{focus}$ ) was calculated;  $\Delta HF > 1$  was defined as the responder criterion for parasympathetic dominance [6].

### 4. Results and Discussion

MEM analysis revealed low-frequency spectral peaks associated with the task cycles, indicating periodic oscillations in cardiac rhythm induced by intermittent feedback. Individual  $\Delta HF$  trajectories (N = 8) showed that the responder count peaked at cycle 3 (7/8 participants) with the highest median  $\Delta HF$ . Wilcoxon signed-rank tests confirmed  $\Delta HF$  significantly exceeded 1 at cycles 1 and 3 ( $p < 0.05$ ), verifying parasympathetic dominance during Relax phases. A sharp RR-interval prolongation from Focus3 to Relax3 was also observed. These findings suggest intermittent parasympathetic activation, with enhanced responses at cycle 3 possibly reflecting biofeedback learning effects. Future work will examine phase-dependent stimulus timing effects.

### Experimental Protocol

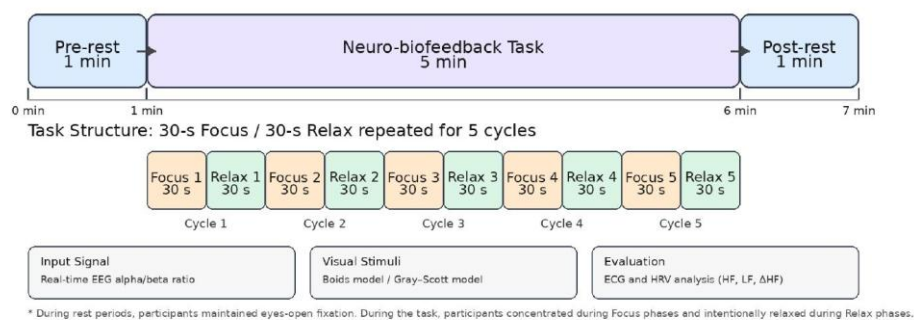


Fig.1

### References

- [1] Jacobson E. Progressive Relaxation (2nd ed.). Univ. of Chicago Press; 1938.
- [2] Conrad A, Roth WT. J Anxiety Disord. 2007;21(3):243–264.
- [3] Prinsloo GE, et al. Appl Psychophysiol Biofeedback. 2013;38(1):45–56.
- [4] Schumann A, et al. Front Neurosci. 2021;15:691988.
- [5] Gruzelier JH. Neurosci Biobehav Rev. 2014;44:124–141.
- [6] Task Force of the European Society of Cardiology and the North American Society of Pacing and Electrophysiology. Eur Heart J. 1996;17(3):354–381.

## Effects of Gaussian-filtered visual stimuli on visual acuity and electroencephalographic activity

Munetoki Tokunaga<sup>1</sup>, Hiroki Takada<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Department of Intelligent Systems, Graduate School of Engineering, University of Fukui, 3-9-1 Bunkyo, Fukui, Fukui 910-8507, Japan

mf260227@g.u-fukui.ac.jp

**Abstract:** This study investigated the effects of dynamic visual stimulation using Gaussian-filtered videos on visual acuity and brain activity, focusing on its potential for amblyopia recovery. Landscape videos were progressively transformed from blurred to clear images to encourage neural plasticity through active recognition. Visual acuity and EEG were measured before and after the task; specifically, the EEG analysis focused on identifying characteristic changes in brain wave patterns induced by the de-blurring stimuli. These measurements were conducted using a portable EEG device to evaluate the immediate neural impact of the training.

**Keywords:** amblyopia, perceptual learning, Gaussian-filtered video, visual acuity, EEG

### 1. Introduction

Perceptual learning has attracted attention as a treatment for amblyopia[1][2]. However, effective visual stimulus conditions for inducing neural plasticity remain unclear. In this study, we investigated the effects of Gaussian-filtered dynamic visual stimuli on visual acuity and EEG activity.

### 2. Methods

Eight participants ( $21.8 \pm 1.3$  years) viewed Gaussian-filtered videos while EEG was recorded using a portable two-electrode device (600 Hz). Visual acuity was measured before and after the task. The experimental protocol is shown in Fig. 1.

①Pre-measurements	②Visuospatial Training	③Post-measurements
Visual acuity test Resting-state EEG recording	Normal video viewing (EEG recording) Viewing Gaussian-filtered video(EEG recording)	Visual acuity test

**Fig. 1** experimental protocol

### 3. Analysis

Visual acuity before and after the experiment was statistically compared using the Wilcoxon signed-rank test, which is a non-parametric method suitable for paired samples. A significance level of  $p < 0.05$  was adopted. EEG signals were analyzed using FFT, and spectral power changes in each frequency band were compared across conditions.

### 4. Results and Discussion

Visual acuity improved in 6 of 8 participants, although no significant difference was observed ( $p=0.08$ ). EEG analysis showed increased beta- and gamma-band activity during Gaussian-filtered video viewing, suggesting enhanced visual cortical activity.

### References

- [1] Rodán A, et al. An updated review about perceptual learning as a treatment for amblyopia. *J Optom.* 2022;15(1):3-34.
- [2] Li RW, et al. Video game play induces plasticity in the visual system of adults with amblyopia. *PLoS Biol.* 2011;9(8):e1001135.

## 朝倉三連水車の〈用の美〉と持続する形

石上洋明<sup>1</sup>, 馬江陵<sup>2</sup>, 孫逸達<sup>2</sup>, 井上朝雄<sup>3</sup>, 堤亮一<sup>4</sup>

<sup>1</sup>福岡教育大学教育学部, 福岡県宗像市赤間文教町1-1

<sup>2</sup>九州大学大学院芸術工学府芸術工学専攻, 福岡県福岡市南区塩原4-9-1

<sup>3</sup>九州大学芸術工学研究院, 福岡県福岡市南区塩原4-9-1

<sup>4</sup>有限会社協和防災, 福岡県福岡市東区土井3丁目 22 番 14 号

<sup>1</sup>ishigami-y@fukuoka-edu.ac.jp

## The Beauty of Use and Enduring Form of the Asakura Triple Water Wheels

Yomei Ishigami<sup>1</sup>, Ma Jiangling<sup>2</sup>, Sun Yida<sup>2</sup>, Tomo Inoue<sup>3</sup>, Ryoichi Tsutsumi<sup>4</sup>

<sup>1</sup> Faculty of Education, University of Teacher Education Fukuoka, 1-1 Akamabunkyo-machi, Munakata, Fukuoka, JAPAN

<sup>2</sup>Department of Design, Graduate School of Design, Kyushu University, 4-9-1 Shiobaru, Minamiku, Fukuoka, JAPAN

<sup>3</sup>Faculty of Design, Kyushu University, 4-9-1 Shiobaru, Minamiku, Fukuoka, JAPAN

<sup>4</sup>KYOWA BOUSAI Co., Ltd. 3-22-14 Doi, Higashiku, Fukuoka, JAPAN

**Abstract:** This work presents a 1/10 scale wooden model of the Asakura Triple Water Wheels, based on precise 3D measurements of the original structure. The model demonstrates that the form of the water wheels is sustained by structural rationality that supports efficient material use, ease of repair, and long-term operation through practical use. Understood through the Japanese craft concept of *the Beauty of Use*, this work functions not only as an analysis of enduring form but also as an archive for transferring structural knowledge to future generations.

**Keywords:** Beauty of Use; Craft; Water Wheel; Sustainability; Structural Form

### 作品概要（模型制作による構造考察）

本作品は、朝倉三連水車の構造を踏襲した 1/10 スケールの木製模型である。直径 40cm, 奥行 14cm の模型は、檜・朴・檜・竹・真鍮を用いて制作した。制作にあたっては、実物水車を正確に 3D 計測したデータを基に構造を解析し、実物が備える構造および造形的な特徴を可能な限り忠実に再現している。

制作過程を通して、水車の形態が水利機能のみならず、材料の節約、加工や修理の容易さ、反復的な製作を可能にする構造的合理性と密接に結びついて成立していることが確認された。これらの特徴は、装飾性を目的としたものではなく、使用と継続を前提とする中で必然的に導かれたものであり、日本の工芸における〈用の美〉の考え方と深く関わっている。本作品は、持続性の高い形を可視化するとともに、朝倉三連水車が長年の使用を通して育んできた価値を未来へとつなぐためのアーカイブとして制作されたものである。

### 参考文献

[1] 平岡昭利, 九州水車風土記, 古今書院, 1992

[2] 流域文化復興支援「MILL」, <https://mill-triple.com> (2026年4月16日参照)

\* 本研究は JSPS 科研費 JP24K00031 (代表:知足美加子) の助成を受けたものです。

## 3D プリントによる星形 20 面体模型の展示 (第 2 報)

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 Icosahedra (Part II)

Yoshitaka Miura

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

**Abstract:** In the fabrication of 3D-printed stellated icosahedron models, line contact, point contact, and non-contact regions are major challenges as described in the previous report. This report exhibits 14 models: 8 reflection models of No.12 to No.19 and 6 chiral models, left and right, of No.33, 34, and 45.

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

#### 1. はじめに

3D プリントによる模型製作においては、線接触・点接触・無接触が重要な課題となる。前報<sup>[3]</sup>では星形 20 面体 No.2~No.11 を展示した。本報告では No.12~No.19 の鏡像モデル 8 点とキラルモデル No.33、No.34、No.45 の左右モデル計 6 点、合計 14 点を展示する。

#### 2. 3D プリントによる星形多面体の模型

図 1~図 8 に 3D プリント造形の星形 20 面体の模型写真を示す。線接触・点接触・無接触の部位に微小連結体を付与した。コクセタラ<sup>[1][2]</sup>のオリジナル形状と区別のためデュバル記号の後に printable を意味する -prt を付与した。鉛直自立しないモデルには台座を設けた。

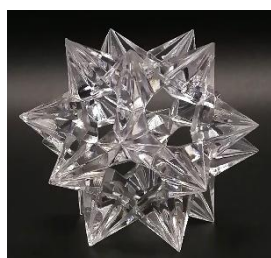


図 1 No.12  $e_1f_1$  -prt 線接触



図 2 No.13  $e_1f_1g_1$  面接触



図 3 No.14  $f_1g_1$  -prt 線接触



図 4 No.15  $e_2$  -prt 線・点接触



図 5 No.16  $f_2$  -prt 無接触



図 6 No.17  $g_2$  -prt 線・点接触



図 7 No.18  $e_2f_2$  -prt 点接触



図 8 No.19  $e_2f_2g_2$  -prt 点接触

#### 参考文献

[1] Coxeter, Du Val, Flather and Petrie, *The Fifty-Nine Icosahedra*, 3rd revised ed., Tarquin, 2011

[2] Wenninger, *Polyhedron Models*, Cambridge University Press, 1971

[3] 三浦吉孝, 3D プリントによる星形 12 面体・星形 20 面体 模型の展示, 形の科学シンポジウム予稿集#99, 2025

## 視覚障害者が触って学ぶ為の眼球模型の作製

佐藤 侑<sup>1</sup>, 寺口 さやか<sup>2</sup>, 手嶋 吉法<sup>1\*</sup>,

<sup>1</sup>千葉工業大学工学部機械電子創成工学科 〒275-0016 千葉県習志野市津田沼 2-17-1

<sup>2</sup>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 an eyeball model for tactile learning for the visually impaired.

Rei SATOH<sup>1</sup>, Sayaka TERAGUCHI<sup>2</sup>, Yoshinori TESHIMA<sup>1\*</sup>,

<sup>1</sup> Chiba Institute of Technology, <sup>2</sup> Hiroshima Central Special Support School

\*yoshinori.teshima@chibatech.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 an eyeball model. The model has a three-layer structure, allowing visually impaired individuals to peel off the layers from the outside inward to observe the internal structure.

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

#### 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解剖学模型の開発を行っている[1][2]。本研究では、広島中央特別支援学校からの依頼を受け、視覚障害者が触察で構造を理解できる眼球模型を作製した。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対象物の形状を適度に簡略化することが重要である。市販の眼球模型や解剖学の専門書[3]を参考にして模型を開発した。

#### 2. 模型の開発

眼球は、視覚を成立させるための器官であり、強膜・脈絡膜・網膜からなる三層構造を基本としている(図1)[3]。それら三層構造を表現するとともに、角膜・虹彩・毛様体・水晶体、視神経乳頭、黄斑中心窩、視神経といった主要構造を表現した。依頼元で作製された眼球模型と市販品の眼球模型を参考にし、また依頼元からこれら二つの模型に関する問題点を挙げてもらい、それらを改善するように本研究における眼球模型を設計した。主な問題点としては、依頼元で作製された眼球模型では層と層の間に不要な隙間が生じていた事、強膜部分を外すと内部パーツが落下する点などがあった。また、市販品の模型に関してはパーツ間の空隙が小さく扱いづらい事、また脈絡膜と網膜が一体化しており、分離出来ない等の問題があった。

試作した眼球模型(バージョン1)に対して、依頼元からの改良コメントを反映させて改良を行った。これを繰り返し、最終的にバージョン3を作製した。バージョン3の模型を図2に示す。

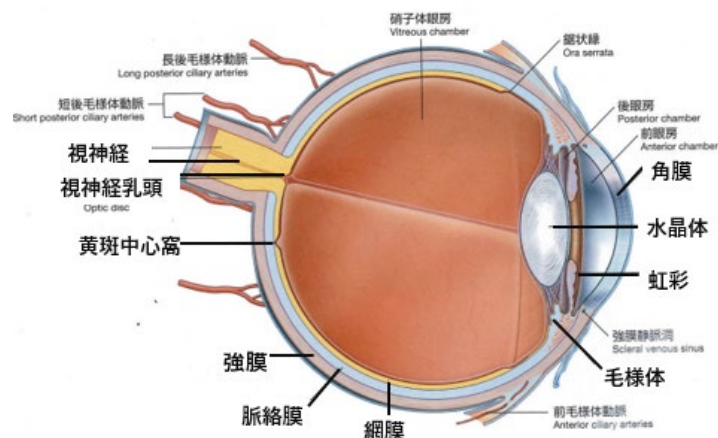


図1 眼球の構造[3]

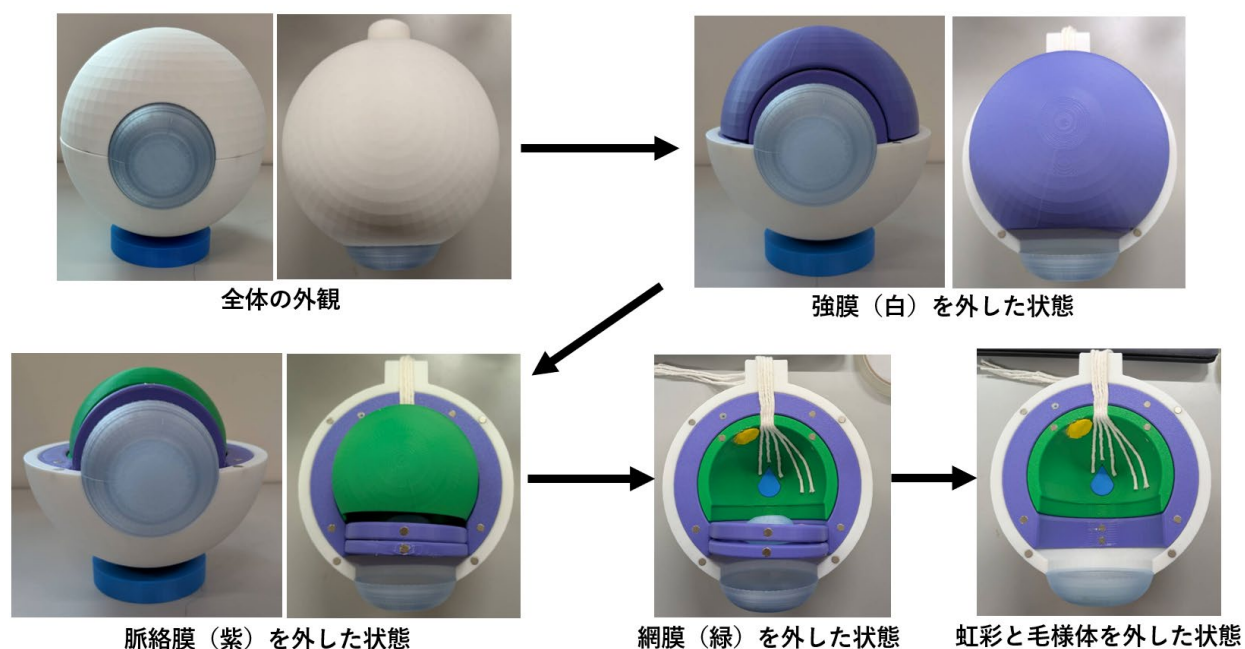


図2 本研究で作製した眼球模型 (バージョン3)

### 3. まとめ

視覚障害者が眼球の構造を触察で学ぶ為の模型を作製した。従来模型(市販模型や依頼元の自作模型)の課題を解消したが、模型の評価(被験者による有効度調査)は今後の課題である。

**謝辞** 本研究は JSPS 科研費 24H00162 の助成を受けている。

### 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 Vol. 9, No. 2, (2024) pp. 7-8.
- [2] 印南、寺口、手嶋、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、形の科学シンポジウム講演予稿集 Vol. 10, No. 2, (2025) pp.9-10.
- [3] グレイ解剖学 第4版 (2019)

## 木造継手の立体教材の開発 (第6報)

小林秀都<sup>1</sup>、手嶋吉法<sup>1,2</sup>

千葉工業大学 工学部<sup>1</sup>機械電子創成工学科、<sup>2</sup>宇宙・半導体工学科

〒275-0016 千葉県習志野市津田沼 2-17-1

### Development of three-dimensional teaching materials to learn wooden joints VI

Shuuto KOBAYASHI & Yoshinori TESHIMA\*

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

\*yoshinori.teshima@chibatech.ac.jp

**Abstract.** In previous study, we had developed 135 kinds of 3D models for traditional wooden joint. In this study, we generated 3D shape data for 40 kinds of traditional wooden joint, by utilizing a 3D CAD software. They were materialized as small models by a 3D printer. In addition, we have created animations to help learner understand the behavior of each wooden joint.

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

#### 1. 研究背景と目的

継手および仕口の固定では木栓や楔などに木材を用い、金物類は使わないのが原則である。この工法により、部分的に取り外して健全な部材と交換する修理手法が可能になり、木造建築の寿命を長く保持することができる[1]。

継手と仕口には様々な種類があり、複雑な構造を持つものもあるため、立体教材を提供する意義は高い。また、伝統的な継手と仕口をデジタルデータとして保存することにも意義がある。本研究では、3D-CAD (Autodesk Inventor)を使用して継手と仕口を設計した後、3D プリンタ (Bambu Lab A1)を使用して立体模型を作製し、立体教材として活用する。また、継手や仕口の嵌め方、外し方を分かりやすくするため、3D-CAD でアニメーションを作成する。

我々の研究グループでは、これまでに合計 135 種類の継手または仕口の形状データを設計し、実体模型を作製した[2][3][4][5][6]。本研究では過去に設計されていない継手や仕口を選定し、設計および立体模型の作製を行った。

#### 2. 立体模型作製手順

##### 2.1 継手と仕口の設計

木造継手と仕口の文献[1]の図を参考にして、3D-CAD を使用し、これまでに 40 種類の設計を行った。設計データの例として四方松皮を図1の上段、雇い竿柄継を図2の上段、二枚柄の住吉案を図3の上段に示す。立体教材として手に取って操作する際の安全性を考慮し、角部に面取りを施した。

##### 2.2 3D プリンタによる造形

設計した形状データを 3D プリンタで造形を行った。立体模型に使用したフィラメントの材質

は ABS、積層ピッチは 0.15mm、造形密度は 20%とした。これまでに造形した立体模型を図 1 から図 3 の下段に示す。

### 3. アニメーションの作成

継手や仕口の嵌め方、外し方を理解しやすくするため、3D-CAD のアニメーション機能を用いて、アニメーションを作成した。

### 4. まとめ

本研究では合計 40 種類（継手 30 種類、仕口 10 種類）の設計を行い、全ての立体模型の実体化とアニメーション作成を行った。

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

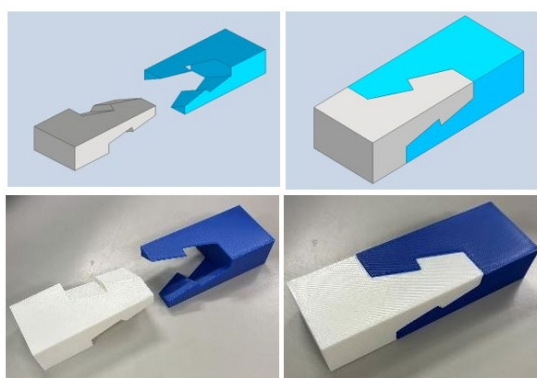


図 1 四方松皮の設計データ（上段）  
および立体模型（下段）

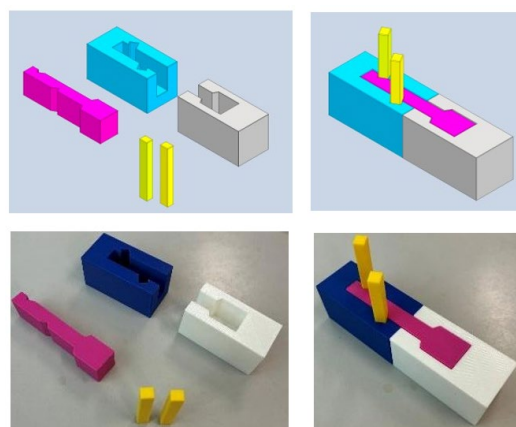


図 2 雇い竿柄継の設計データ（上段）  
および立体模型（下段）

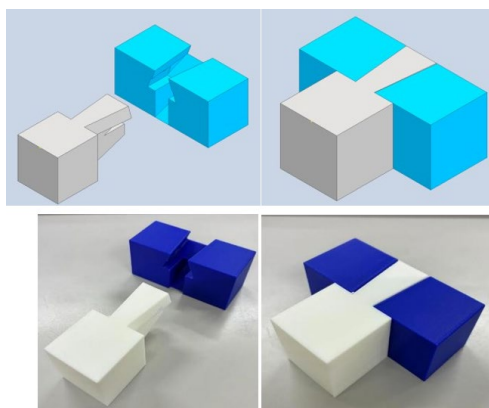


図 3 二枚ほぞの住吉案の設計データ（上段）  
および立体模型（下段）

### 参考文献

- [1] 文化財建造物伝統技法集成：継手及び仕口／文化財建造物保存技術協会編(2000)
- [2] 大和田、手嶋、木造継手のデジタル化と模型製作、形の科学シンポ講演予稿集, 5-1 (2020) pp. 1-2.
- [3] 麻生、手嶋、木造継手の立体教材の開発 II、形の科学シンポ講演予稿集, 7-2 (2022) pp. 24-25.
- [4] 長谷川、手嶋、木造継手の立体教材の開発 III、形の科学シンポ講演予稿集, 8-1 (2023) pp. 35-36.
- [5] 山田、手嶋、木造継手の立体教材の開発 IV、形の科学シンポ講演予稿集, 9-1 (2024) pp. 15-16.
- [6] 原嶋、手嶋、木造継手の立体教材の開発 V、形の科学シンポ講演予稿集, 10-1 (2025) pp. 17-18.

# 実車の形状分析に由来する曲線族とその対称性に基づく 「美的曲線」の幾何学

熊谷駿<sup>\*1</sup>, 梶原健司<sup>\*2</sup>

<sup>\*1</sup> 八戸工業大学工学部, 〒031-8501 青森県八戸市大字妙字大開 88-1

<sup>\*2</sup> 九州大学マス・フォア・インダストリ研究所, 〒819-0395 福岡県福岡市西区元岡 744

E-mail: <sup>\*1</sup>[s-kumagai@hi-tech.ac.jp](mailto:s-kumagai@hi-tech.ac.jp) / <sup>\*2</sup>[kaji@imi.kyushu-u.ac.jp](mailto:kaji@imi.kyushu-u.ac.jp)

## Geometry of “aesthetic curves” based on a symmetry of a class of curves originated from shape analysis of actual cars

Shun Kumagai<sup>\*1</sup>, Kenji Kajiwara<sup>\*2</sup>

<sup>\*1</sup>Faculty of Engineering, Hachinohe Institute of Technology, 88-1 Myo Ohbiraki, Hachinohe, Aomori, 031-8501, Japan

<sup>\*2</sup>Institute of Mathematics for Industry, Kyushu University, 774 Motooka, Nishi-ku, Fukuoka, 819-0395, Japan

**Abstract:** The Log-Aesthetic Curve (LAC) is a class of curves proposed by Harada et al. (1995) based on the analysis of keyline curves in actual car shapes and formalized by Miura (2006). In this talk, we will introduce how the symmetry “self-affinity” characterizing LAC is extended to include conic sections and the resulting development of a new geometry of “aesthetic curves.” The extended symmetry is considered in the context of similarity geometry and equiaffine geometry, which will be unified in Möbius geometry.

**Keywords:** 幾何学的形状生成, 対数型美的曲線, 対称性, メビウス幾何, 形状評価

### 1. 対数型美的曲線

対数型美的曲線 (LAC) とは, そのユークリッド曲率  $\rho$  が弧長径数  $s$  の一次関数の冪  $\rho(s) = (ks + l)^\alpha$ , または指数関数  $\rho(s) = e^{ks+l}$  ( $\alpha = 0$  とみなす) で表される曲線クラスを指し, 対数螺旋, クロノイド, 円の伸開線 などの典型的な螺旋を含む. LAC はその 曲率対数グラフ

$(X, Y) = (\log(\rho), \log|\rho/\rho_s|)$  が傾き  $\alpha$  の直線であることで特徴付けられる.

原田ら [1] は実車のキーライン形状から抽出された曲線の観察に基づき, 離散的曲率対数グラフが直線で近似される 曲線を分析に参照する形状要素として提案した. さらに, 原田ら [2] は工業製品, 工芸品, 自然構造物といった実形状の分析に基づき, パラメータ  $\alpha$  を用いて記述さ

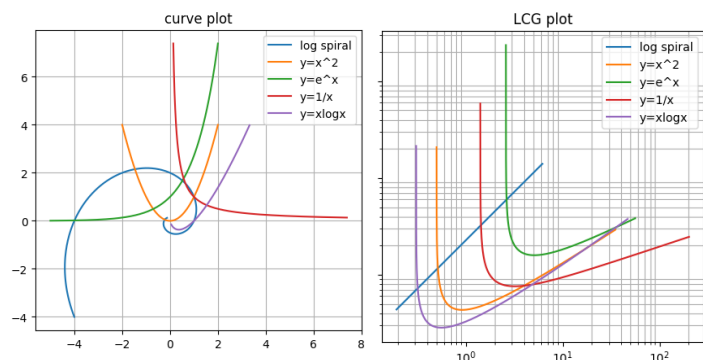


図 1. 自己アフィン性をもつ曲線. 図 2. 図 1 の曲線の曲率対数グラフ. 対数螺旋(青)は  $\alpha=1$  の LAC である. 対数螺旋(青)の場合は傾き 1 の直線.

れる 5 つの形状要素パターンの分類と、これが熟練 CAD 技術者による形状の感性分類(視覚言語)に対応する傾向が認められる聞き取り調査結果が得られたことを報告している。

## 2. 自己アフィン性

曲線の曲率対数グラフが直線であることはその三浦の自己アフィン性 [3]  $\rho(t + \Delta t) = e^{\Delta t} \rho(t)$ ,  $ds(t + \Delta t) = e^{\Delta t} ds(t)$  として定式化され、その解析解として LAC が特徴付けられる [4]。一方で、初期の議論 [1] で検討されていた原田型自己アフィン性  $\gamma(t + \Delta t) = F(\Delta t)\gamma(t)$  ( $\gamma(t)$  は径数曲線,  $F(\Delta t)$  はアフィン変換の一径数族) は放物線をはじめとする円錐曲線や、冪・指数・対数関数および  $y = x \log x$  のグラフ、対数螺旋 (図 1) のそれぞれのアフィン変換からなる曲線クラス (SAAC) を特徴付ける [4, 5, 6]。アフィン変換前の基本的な曲線はすべて、曲率対数グラフが漸近的に直線である部分曲線をもつ (図 2) が、この性質はアフィン変換のもとで不変でない (図 3)。

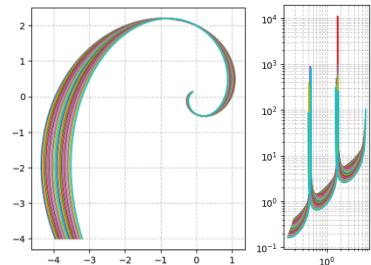


図 3. 対数螺旋の一径数アフィン変換族の像と、その曲率対数グラフ。

## 3. メビウス幾何で統合される美的曲線の幾何学

ユークリッド幾何は回転と平行移動からなる変換全体の運動群の作用で不変な対象(曲線の同値類や曲率)を扱う枠組みである。その拡大幾何として、相似幾何は相似変換全体の群、等積幾何は面積を保つアフィン変換(等積変換)全体の群でそれぞれ不変な対象を扱う。井ノ口ら [7] は相似幾何の曲線の滑らかな時間発展(に付随する可積分系)において LAC が形状不変曲線であることを示した。一方、等積幾何においても形状不変曲線の非自明な例が SAAC の中に存在することが分かっている。

メビウス幾何は  $f(z) = \frac{az+b}{cz+d}$ ,  $\begin{pmatrix} a & b \\ c & d \end{pmatrix} \in \text{SL}(2, \mathbb{C})$  の形の変換(メビウス変換)全体の群の作用で不変な対象を扱う枠組みである。一般に、ここで考える曲線は  $c(t) = [c_1(t), c_2(t)] \in \mathbb{C}P^1$  の形の射影曲線である。なお、相似変換はメビウス変換に含まれるが、等積変換はそうではない。

**定義** 曲線  $\gamma(t): I \rightarrow \mathbb{C}$  が射影的原田型自己アフィン性をもつとは、射影曲線  $c_\gamma(t) := [\dot{\gamma}(t), \ddot{\gamma}(t)]: I \rightarrow \mathbb{C}P^1$  に対して  $c(t + \Delta t) = F(\Delta t)c(t)$  ( $F(\Delta t)$  は射影座標  $\mathbb{C}P^1$  に作用するメビウス変換の一径数族) が成り立つことをいう。

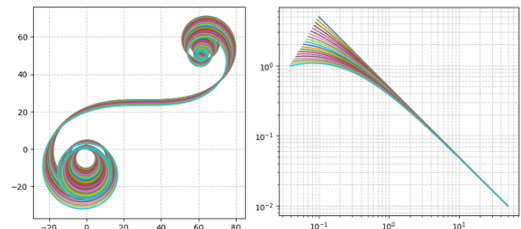


図 4. クロソイド曲線の自己アフィン性を保つ一径数変換族の像と、その曲率対数グラフ。

**主結果** LAC, SAAC それぞれの、任意のアフィン変換は、射影的原田型自己アフィン性をもつ。

逆に、LAC, SAAC から自己アフィン性を保った変換により新たな形状要素が構成できる (図 4)。LAC と SAAC が共通の群作用の一径数族で不変であるという本結果は、これらの「美的曲線」が Klein-Lie [7] の“W-curve”の中で統合される枠組みを持つことを示唆する。

## 4. 参考文献

- [1] 原田利宣, 森典彦, 杉山和雄, デザイン学研究, vol. 42, No. 3, 1995.
- [2] 原田利宣, デザイン学研究, vol. 55, No. 2, 2008.
- [3] 三浦憲二郎, 精密工学会誌 Vol. 72, No. 7, 2006.
- [4] S. Kumagai and K. Kajiwara, Jpn. J. Ind. Appl. Math., 42(5) 1811-1833, 2025.
- [5] W. Blaschke, *Differentialgeometrie II*, Springer, 1923.
- [6] S. Kumagai and K. Kajiwara, arXiv:2505.20713, 2025.
- [7] F. Klein and S. Lie, Math. Ann., Band 4, S., 50-84, 1871.

## Shape generation with orientation-based area distribution

Yoshiki Jikumaru<sup>1</sup>, Kentaro Hayakawa<sup>2</sup>, Kazuki Hayashi<sup>3</sup>, Miyuki Koiso<sup>4</sup>,  
Shun Kumagai<sup>5</sup>

<sup>1</sup>Toyo University, 1-7-11 Akabanedai, Kita-ku, Tokyo, 115-8650,  
jikumaru@toyo.jp

<sup>2</sup>Nihon University, 1-2-1 Izumi-cho, Narashino, Chiba, 275-8575,  
hayakawa.kentaro@nihon-u.ac.jp

<sup>3</sup>Kyoto University, Katsura, Nishikyo-ku, Kyoto, 615-8540,  
hayashi.kazuki@archi.kyoto-u.ac.jp

<sup>4</sup>Kyushu University, 744 Motooka, Nishi-ku, Fukuoka, 819-0395,  
koiso@imi.kyushu-u.ac.jp

<sup>5</sup>Hachinohe Institute of Technology, 88-1 Myo Ohbiraki, Hachinohe, Aomori, 031-8501,  
s-kumagai@hi-tech.ac.jp

**Abstract:** In this talk, we present the shape generation method for discrete surfaces based on the flow defined by the anisotropic energy which controls the area distribution of the surface. The energy density is parametrically determined by using so-called Gielis' superformula. Some numerical examples generated from the given boundary planar curves, which are not limited to graph surfaces with convex boundaries, are shown. The examples indicate the new condition for the existence of CAMC surfaces.

**Keywords:** Form-finding, Architectural geometry, Constant anisotropic mean curvature (CAMC) surfaces, Anisotropic mean curvature flow, Energy minimization.

### 1. Mathematical formulation

A geometric realization of an abstract simplicial surface in  $\mathbb{R}^3$  with non-degenerate triangles is called a discrete surface, denoted by  $M$ . For a positive-valued smooth function  $\gamma: S^2 \rightarrow \mathbb{R}_{>0}$ , we define the anisotropic energy and the (algebraic) volume of a discrete surface  $M$  as follows

$$\mathcal{F}_\gamma(M) = \sum_T \gamma(N_T) \text{Area}(T), \quad \text{Vol}(M) = \frac{1}{6} \sum_{T=(p,q,r)} \det(p, q, r).$$

Here,  $T$  is a triangle in the discrete surface  $M$ ,  $N = N_T$  is the unit normal and  $\text{Area}(T)$  is the area of  $T$ . Their energy gradients are given as follows:

$$\nabla \mathcal{F}_\gamma(p) = \frac{1}{2} \sum_{T=(p,q,r) \in \text{star}(p)} \xi(N_T) \times (r - q), \quad \nabla \text{Vol}(p) = \frac{1}{6} \sum_{T=(p,q,r) \in \text{star}(p)} q \times r.$$

Here,  $\xi: S^2 \rightarrow \mathbb{R}^3$  is called the Cahn-Hoffman map defined by

$$\xi(N) = D\gamma|_N + \gamma(N)N, \quad N \in S^2,$$

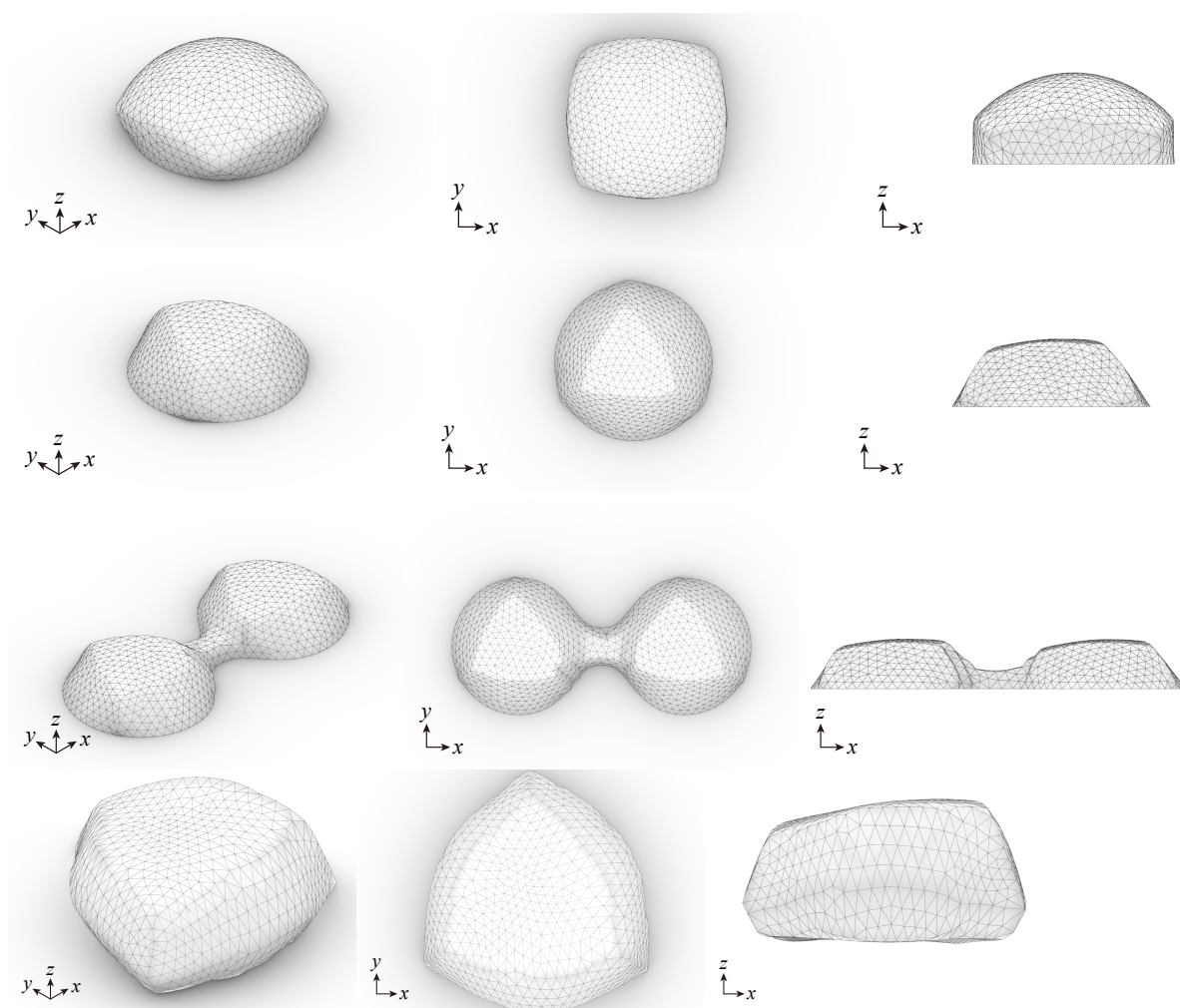
where  $D\gamma|_N$  denotes the gradient of  $\gamma$  on  $S^2$  at  $N$ . A discrete surface  $M$  has constant anisotropic mean curvature (CAMC) if there exists a constant  $\Lambda$  such that

$$\nabla \mathcal{F}_\gamma(p) + 2\Delta \nabla \text{Vol}(p) = 0,$$

holds for any interior vertex  $p$ . Such a discrete surface is referred to as the discrete CAMC- $\Lambda$  surface. Our shape generation method is obtained by combining the energy minimization process with the above-mentioned gradient introducing the and some regularization method. Moreover, by using the Gielis' superformula, we introduce user-controllable parameters into the energy density function

## 2. Examples

Examples of shapes obtained using our method are shown below. Further details will be provided during the presentation.



### References:

- [1] M. Koiso, B. Palmer, Equilibria for anisotropic surface energies and the gielis formula, *Forma* **23** (2008) 1-8.
- [2] J. Gielis, A generic geometric transformation that unifies a wide range of natural and abstract shapes, *American Journal of Botany* **90** (3) (2003).
- [3] Y. Jikumaru, Geometry of equilibrium curves and surfaces for discrete anisotropic energy, *JSIAM Letters* **14** (2022) 57-60.

# 城郭石垣の設計法に基づき厳密に定式化された反り曲線が オーバーハングしない条件

鈴木利友

武庫川女子大学建築学部, 663-8121 兵庫県西宮市戸崎町1-13

ttsuzuki@mukogawa-u.ac.jp

## Non-Overhang Conditions for Warping Curves Derived from Exact Formulations of Design Methods for *Ishigaki* (Stone Walls) in Japanese Castles

Toshitomo Suzuki

Mukogawa Women's University, 1-13 Tozaki-cho, Nishinomiya, Hyogo, 663-8121, Japan

**Abstract:** This study focuses on three design methods for *ishigaki* (stone walls) used in Japanese castles and clarifies the conditions under which the warping curves derived from exact formalizations of these design methods do not result in overhangs. The results show that, for two of these design methods, treating  $n$  as a finite constant leads to less stringent conditions for preventing overhangs. This approach increases design flexibility when applied to *ishigaki* and retaining walls.

**Keywords:** overhang, initial gradient, lower-third average gradient, finite constant, digamma function

### 序

日本国内に残存する城郭では、勾配が不均一な、反りをもつ石垣が多くみられる。美しさと構造的合理性を兼ね備えた石垣や擁壁等を設計する上で、城郭石垣の反り曲線の性質の解明は有効である。この反り曲線の設計法を記述した文書としては『後藤家文書(もんじょ)』<sup>1)2)</sup>『石塙書(せきしょうしょ)』<sup>2)</sup>『石垣秘伝之書』<sup>2)3)</sup>が知られている。『後藤家文書』に基づく設計法は、断面の上3分の2を $n$ 等分、『石塙書』『石垣秘伝之書』は断面全体を $n+1$ 等分し、下から順に作図することにより断面形状を決定する。従来の研究では $n \rightarrow \infty$ として反り曲線の数式を導出してきた<sup>4)5)6)7)8)</sup>が、いずれの設計法に基づく場合も、パラメータの選び方により上部がせり出すオーバーハングが生じうる。しかし石垣の反り曲線においてオーバーハングは望ましくなく、オーバーハングしない条件は重要である。

発表者はこれまで、 $n$ を有限の定数として扱う厳密な定式化により3種類の反り曲線の数式を導出するとともに、過去に彦根城の石垣で行った写真測量の結果との比較も行ってきた<sup>9)10)11)</sup>。本発表では、厳密な定式化により得られた反り曲線がオーバーハングしない条件を明らかにし、比較、考察を行う。

### 1. 反り曲線の数式と、オーバーハングしない条件の導出結果

各設計法の概要と、 $n$ が有限の場合の反り曲線の数式、オーバーハングしない条件の導出結果、両者を $n \rightarrow \infty$ とした場合の結果を表1に示す。 $n \rightarrow \infty$ の場合の結果は、これまでの研究<sup>4)5)6)7)8)</sup>で導出されたものと一致する。

### 2. 反り曲線がオーバーハングしない条件の比較

各設計法に基づく反り曲線がオーバーハングしないような初期勾配 $g$ 、下3分の1勾配 $g_t$ の条件を、 $\frac{gd}{h}$ と $\frac{g_t d}{h}$ の下限で比較した結果を図1に示す。図1の横軸は、石垣全体を何等分したかを示す分割数 $m$ とした。『後藤家文書』は、石垣の高さを上から $m = \frac{3}{2}n$ 分割しているとみなした。『石塙書』『石垣秘伝之書』は $m = n+1$ である。

初期勾配と下3分の1勾配が等しい『後藤家文書』では、 $\frac{gd}{h}$ および $\frac{g_t d}{h}$ の下限値は $\frac{2}{3}$ 以下となり、 $n$ が小さいほど条件が緩くなる。一方『石塙書』の初期勾配については、 $\frac{gd}{h}$ の下限値が $\frac{2}{3}$ 以上となり、 $n$ が大きいほど条件が緩くなる。下3分の1勾配については、 $\frac{g_t d}{h}$ の下限値が $\frac{9}{13}$ であり、 $n$ によらず変化しない。『石垣秘伝之書』に基づく反り曲線は、 $n \rightarrow \infty$ の場合、たとえ微小ではあっても必ずオーバーハングすることが知られているが<sup>7)8)</sup>、 $\frac{gd}{h}$ および $\frac{g_t d}{h}$ の下限値が0.85以上となる整数 $n$ の最小値はそれぞれ155, 51である。したがってこれより $n$ を小さくすれば、オーバーハングしない曲線が生成可能である。

### 結語

厳密に定式化された反り曲線がオーバーハングしない条件を比較、考察した結果、以下のことが明らかになった。

- (1) 『後藤家文書』に基づく反り曲線は、 $n$ を有限の定数とすると、オーバーハングしない条件が緩くなる。石垣や擁壁への応用を念頭においた場合、設計の自由度が上がる。
- (2) 『石塙書』に基づく反り曲線は、 $n$ を有限の定数としても、オーバーハングしない条件は緩くならない。なお下3分の1勾配 $g_t$ をパラメータにとると、 $n$ に依存しない数式になる。

表1 各設計法の概要と,  $n$ が有限の場合の反り曲線の数式, オーバーハングしない条件の導出結果

後藤家文書 唯一一人伝(1冊本)	石塙書	石垣秘伝之書
後藤彦三郎(加賀藩)が1825年までに著した設計法 <sup>1)2)</sup>	湯浅家(岩国藩)が1755年までに著した勾配の値 <sup>2)</sup> をもとに, 西田一彦 <sup>6)</sup> が2003年に提案した設計法	野口宮秀(熊本藩)が1680年, 北川作兵衛(同)が1743年までに著した設計法 <sup>2)3)</sup>
設計法( $n=4$ の場合の図)	設計法( $n=4$ の場合の図)	設計法( $n=4$ の場合の図)
青線: 点D, E <sub>0</sub> , ..., E <sub>n-1</sub> , Oを通る反り曲線 $g = g_c$ : 初期勾配 (DE <sub>0</sub> の傾きの逆数)	緑線: 点D, E <sub>0</sub> , ..., E <sub>n-1</sub> , Oを通る反り曲線 $g$ : 初期勾配 (DE <sub>0</sub> の傾きの逆数) $g_t$ : 下3分の1勾配 (DTの傾きの逆数)	赤線: 点D, E <sub>0</sub> , ..., E <sub>n-1</sub> , Oを通る反り曲線 $g$ : 初期勾配 (DE <sub>0</sub> の傾きの逆数) $g_t$ : 下3分の1勾配 (DTの傾きの逆数)
$0 \leq x \leq \frac{2}{3}h$ における反り曲線の数式 $y = \frac{9a}{4h^2} \left(1 - \frac{1}{n+1}\right) x^2 + \frac{1}{h} \left[ b - 3a \left\{ 1 - \frac{1}{2(n+1)} \right\} \right] x$ $= \frac{9}{4h} \left(1 - \frac{1}{n+1}\right) \left(\frac{1}{g} - \frac{d}{h}\right) x^2 - \frac{1}{g} \left[ 2 - \frac{3}{2(n+1)} \right] - \frac{3d}{h} \left\{ 1 - \frac{1}{2(n+1)} \right\} x$ $y = \frac{9}{4h} \left(1 - \frac{1}{n+1}\right) \left(\frac{1}{g_t} - \frac{d}{h}\right) x^2 - \frac{1}{g_t} \left[ 2 - \frac{3}{2(n+1)} \right] - \frac{3d}{h} \left\{ 1 - \frac{1}{2(n+1)} \right\} x$	$0 \leq x \leq h$ における反り曲線の数式 $y = -\frac{a}{h^2} \left(1 + \frac{1}{n(n+2)}\right) (x^3 - 3x^2) + \frac{1}{h} \left[ b - a \left\{ 3 + \frac{2}{n(n+2)} \right\} \right] x$ $= -\frac{1}{h^2} \left(1 + \frac{1}{n(n+2)}\right) \left(\frac{1}{g} - \frac{d}{h}\right) (x^3 - 3hx^2) - \left[ 2 \left\{ 1 + \frac{1}{n(n+2)} \right\} - \frac{d}{h} \left\{ 3 + \frac{2}{n(n+2)} \right\} \right] x$ $y = -\frac{9}{8h^2} \left(\frac{1}{g_t} - \frac{d}{h}\right) (x^3 - 3hx^2) - \frac{1}{4} \left(\frac{9}{g_t} - \frac{13d}{h}\right) x$	$0 \leq x \leq h$ における反り曲線の数式 $y = \frac{b}{h} x - \frac{a}{h} \left(1 + \frac{1}{n}\right) x \left\{ \psi(n+1) - \psi\left(\frac{n+1}{h}x + 1\right) + 1 \right\}$ $= \frac{x}{g} - \left(\frac{1}{g} - \frac{d}{h}\right) \left(1 + \frac{1}{n}\right) x \left\{ \psi(n+1) - \psi\left(\frac{n+1}{h}x + 1\right) + 1 \right\}$ $y = \frac{d}{h} x - \frac{\left(\frac{1}{g_t} - \frac{d}{h}\right) x \left[ \left(1 + \frac{1}{n}\right) \left\{ \psi(n+1) - \psi\left(\frac{n+1}{h}x + 1\right) + 1 \right\} + \frac{1}{n} \right]}{2 \left[ \left(1 + \frac{1}{n}\right) \left\{ \psi(n+1) - \psi\left(\frac{2n+5}{3}\right) + 1 \right\} + \frac{1}{n} \right]}$
$n \rightarrow \infty$ の場合 $y = \frac{9}{4h} \left(\frac{1}{g} - \frac{d}{h}\right) x^2 - \left(\frac{2}{g} - \frac{3d}{h}\right) x$ $= \frac{9}{4h} \left(\frac{1}{g_t} - \frac{d}{h}\right) x^2 - \left(\frac{2}{g_t} - \frac{3d}{h}\right) x$	$n \rightarrow \infty$ の場合 $y = -\frac{1}{h^2} \left(\frac{1}{g} - \frac{d}{h}\right) (x^3 - 3hx^2) - \left(\frac{2}{g} - \frac{3d}{h}\right) x$ $= -\frac{9}{8h^2} \left(\frac{1}{g_t} - \frac{d}{h}\right) (x^3 - 3hx^2) - \frac{1}{4} \left(\frac{9}{g_t} - \frac{13d}{h}\right) x$	$n \rightarrow \infty$ の場合 $y = \frac{d}{h} x + \left(\frac{1}{g} - \frac{d}{h}\right) x \log \frac{x}{h}$ $= \frac{d}{h} x + \frac{1}{2 \log \left(\frac{3}{2}\right)} x \log \frac{x}{h}$
オーバーハングしない条件 $\frac{(4n+1)h}{3(2n+1)d} \leq g = g_c < \frac{h}{d}$	オーバーハングしない条件 $\frac{2(n+1)^2 h}{(3n^2+6n+2)d} \leq g < \frac{h}{d}$ $\frac{9h}{13d} \leq g_t < \frac{h}{d}$	オーバーハングしない条件 $\left[ 1 - \frac{1}{\left(1 + \frac{1}{n}\right) \left\{ \psi(n+1) - \psi(1) + 1 \right\} + 1} \right] \frac{h}{d} \leq g < \frac{h}{d}$ $\frac{\left[ (n+1) \left\{ 3\psi(n+1) - \psi(1) + 1 \right\} + 1 \right] h}{\left[ (n+1) \left\{ 3\psi(n+1) - \psi(1) - 2\psi\left(\frac{2n+5}{3}\right) + 3 \right\} + 3 \right] d} \leq g_t < \frac{h}{d}$
$n \rightarrow \infty$ の場合 $\frac{2h}{3d} \leq g = g_c < \frac{h}{d}$	$n \rightarrow \infty$ の場合 $\frac{2h}{3d} \leq g < \frac{h}{d}$ $\frac{9h}{13d} \leq g_t < \frac{h}{d}$	$n \rightarrow \infty$ の場合 条件をみたら $g, g_t$ は存在しない。

(3) 『石垣秘伝之書』に基づく反り曲線は,  $n \rightarrow \infty$  とすると必ずオーバーハングするが,  $n$ を有限の定数とするとオーバーハングしない曲線が生成可能になる。

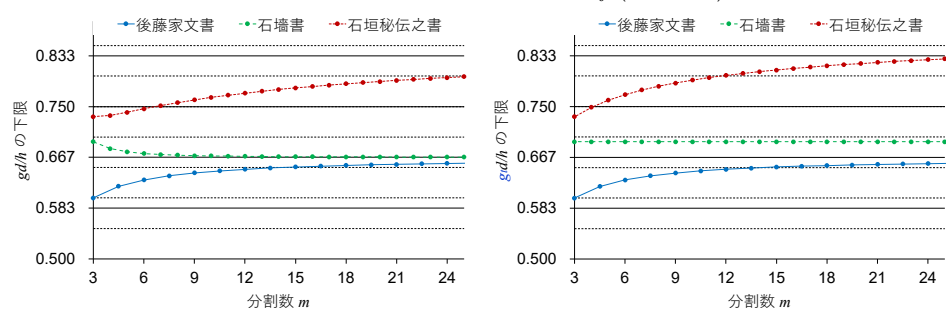


図1 各設計法に基づき厳密に定式化された反り曲線がオーバーハングしない条件

後藤家文書は  $m = \frac{3}{2}n$ , 石塙書, 石垣秘伝之書は  $m = n + 1$

謝辞

JSPS 科研費 JP23K11753, JST CREST JPMJCR1911 の支援を受けた。

参考文献

- 1) 金沢大学法文学部日本海文化研究室編: 金沢城郭史料 一加賀藩穴生方後藤家文書, 石川県図書館協会, 1976.12
- 2) 石川県金沢城調査研究所編: 金沢城石垣構築技術史料II, pp.11-36,153-173, 石川県金沢城調査研究所, 2011.3
- 3) 文化財環境整備研究所編: 佐敷花岡城跡保存整備工事報告書 第二版, pp.142-156, 芦北町, 2001.3
- 4) 柳井 浩: 石垣の曲線 一様式の数理-, オペレーションズリサーチ, Vol.33, No.6, pp.281-286, 1988.6
- 5) 森本浩行, 西田一彦, 西形達明, 玉野富雄: 城郭石垣の隅部形状とその数値評価法, 土木学会論文集, No.666, pp.159-168, 2000.12
- 6) 西田一彦, 西形達明, 玉野富雄, 森本浩行: 城郭石垣断面形の設計法とその数式表示に関する考察, 土木学会論文集, No.750, pp.89-98, 2003.12
- 7) 藤井 幸一: 熊本城の石垣曲線と数学, ある数理科学者の履歴, pp.15-30, 横浜国立大学学術研究会, 2018.3
- 8) Suzuki, T., Ogata, Y., Yoshida, A., Umezaki, C., Tagawa, H., & Yoneda, K., Redefinitions of Mathematical Formulae for Warping Curves Based on Three Design Methods of *Ishigaki* (Stone Walls) at Japanese Castles and Comparison with Photogrammetric Results of Edges of *Ishigaki* at Hikone Castle, Intercultural Understanding, Vol.11, pp.20-29, 2022.3
- 9) 鈴木利友: 城郭石垣の設計法に基づき厳密に定式化された放物線, 2024 年度精密工学会秋季大会学術講演会講演論文集, pp.67-68, 2024.9
- 10) 鈴木利友: 城郭石垣の設計法に基づく反り曲線における調和数とディガンマ関数, 日本応用数学会 2025 年度年会講演予稿集, 2G-2-1, 2025.9
- 11) 鈴木利友: 城郭石垣の設計法に基づく曲線の設計 一厳密に定式化された反り曲線とその評価-, 日本建築学会大会建築デザイン発表梗概集(九州), pp.492-493, 2025.9

## 数理的外挿による 3D 幾何模様デザインと 安心感創出のための触感印象分析

山田香織、永井雅丈

大阪公立大学大学院、大阪府堺市中区学園町 1-1

kyama@omu.ac.jp

### **Designing 3D geometrical shapes through mathematical extrapolation and tactile impression analysis to create comforting experiences**

Kaori Yamada, Masatomo Nagai

Osaka Metropolitan University, 1-1 Gakuen-cho, Nakaku, Sakai, Osaka

**Abstract:** This study explores the relationship between human creativity, computational technology, and affective design. As product differentiation based on functionality alone becomes increasingly difficult, emotional values such as reassurance have gained importance in product design. In particular, tactile impressions strongly influence users' feelings of comfort and trust. By generating diverse 3D geometric patterns and analyzing their tactile impressions, this study aims to clarify the relationship between shape and tactile perception and to provide design guidelines for products that evoke reassurance.

**Keywords:** Computational Design, Affect, Tactile Impression, 3D Geometry shapes, Reassurance

#### 1. はじめに

近年、設計分野においては人間の創造的思考とテクノロジーの関係性が重要なテーマとなっている。設計における創造性向上の方法は、人間自身の創造的思考能力を高める方法と、AIなどの技術によって設計者の活動を支援する方法に大別される。特に近年はAI技術の発展により、後者のアプローチが急速に進展している [1]。人間の創造性は本来、経験や知識に依存するが、コンピュータによる支援を組み合わせることで、人間単独では到達し得なかった発想を生み出し、思考を拡張できる可能性がある。さらに、人間の能力をシステムに取り込み分析・学習させることで、新たな知見が生成され、それが再び人間にフィードバックされることで思考空間が拡張される枠組みが成立する。

一方、製品開発の観点では、市場に同種製品が多数存在するようになり、機能や性能といった客観的指標のみでは差別化が困難となっている。そのため、使用時に得られる印象や感情といった主観的価値、すなわち感性価値が製品の魅力を左右する重要な要素として注目されている [2]。特に「安心感」は、製品に対する信頼性や受容性に影響を与える重要な感性的評価であり、その形成には触覚が深く関与している。触覚は「柔らかい／硬い」「滑らか／粗い」など複数の次元から構成され、これらの触感特性は「心地よさ」や「安心感」といった高次の感性評価と密接に結びついている。しかし、「安心感」や「高級感」といった感性表現は主観的で曖昧であるため、設計へ応用するには刺激と印象の関係を整理し構造化する必要がある。

そこで本研究では、コンピュータを活用した分析的アプローチによって、人間の感性理

解を拡張し、安心感に関連する触感印象の要因を整理することを目的とする。そして、この両者を組み合わせて、三次元形状と触覚的印象の関係性を解明し、最終的には安心感を生み出す感性価値の創出に寄与する設計指針の獲得を目指す。

## 2. 数的外挿による三次元幾何模様生成

三次元幾何模様へ焦点を絞り、計算機の手助けを得ることで人間のイメージ能力を拡張し新しい形状を生成する可能性を探った [3]。具体的には、まず被験者に頭の中で形状をイメージさせ、スケッチさせる。次に自らの興味に従って計算機上に表現しデザインさせる。そして一旦制作された幾何模様のパラメータを実験者が操作し、数的外挿を加えた。生成された三次元幾何模様の一列を図1に示す。被験者に最終的に生成された形状を評価させたところ、数的外挿を加えることで、人が頭の中で容易には作り出せないが興味を惹かれるような複雑な幾何模様が生成され、新規性や多様性を持つ形状デザインを可能にし、設計空間の拡張に寄与する可能性が示された。

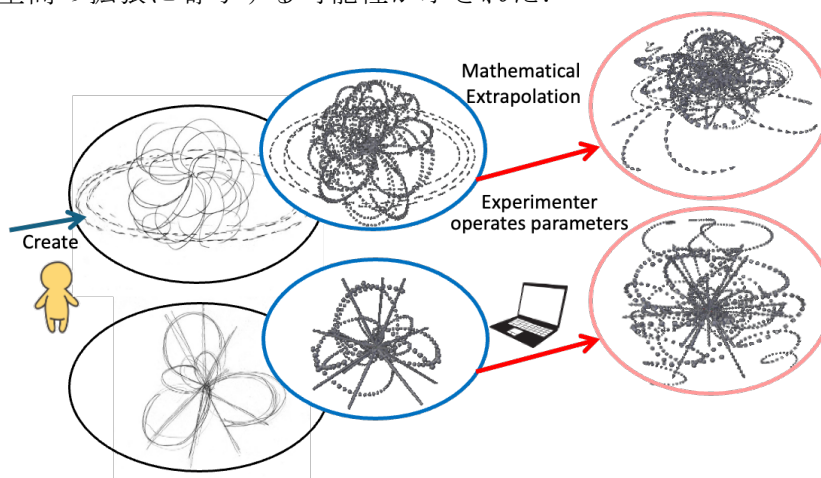


図1：生成した三次元幾何模様例

## 3. 安心感に寄与する触感印象の分析

次に、触感印象を定量的に評価・分析し、安心感を構成する触感印象の構造を明らかにする（感性分析の側面）ことを試みている。具体的には、触感の異なる複数のスクイーズを対象として、SD法による主観評価データに対して主成分分析を行い、安心感につながる要因を探った。これにより、対象としたスクイーズの触感印象は、表面性状、変形特性、量感、温度感といった複数の触感要因によって構成されていることが明らかとなった。

## 4. まとめ

本研究では、三次元形状と触覚的印象の関係性を解明し、安心感を生み出す感性価値の創出に寄与する設計指針の獲得を目指している。今後は、触感印象評価により得られた安心感の要因を三次元幾何模様のデザインに反映させ、感性価値としての安心感を創出する触感と形状設計の知見獲得を試みていく。

## 参考文献

- [1] Corsini, Lucia & Moultrie, James. (2017). An exploratory study into the impact of new digital design and manufacturing tools on the design process. Apollo - University of Cambridge Repository. <https://doi.org/10.17863/CAM.37987>.
- [2] 経済産業省、「感性価値創造イニシアティブ」2007.3
- [3] 山田 香織, 伊藤 慎二郎, 田浦 俊春, 数的外挿による形状イメージ能力の拡張, デザイン学研究, 65巻, 2号, p. 2\_51-2\_56, 2018. [https://doi.org/10.11247/jssdj.65.2\\_51](https://doi.org/10.11247/jssdj.65.2_51)

# オートエンコーダを用いた多チャンネル胃電図における 空間的クラスタリング特性

今井 駿介<sup>†</sup>, 木下 史也

三重大学大学院工学研究科電子情報工学専攻 〒514-8507 三重県津市栗真町屋町 1577

E-mail: 426M601@m.mie-u.ac.jp

## Spatial Clustering Characteristics in Multichannel Electrogastrography Using Autoencoder

Shunsuke Imai<sup>†</sup>, Fumiya Kinoshita

Division of Electronic and Information Engineering, Graduate School of Engineering, Mie University

**Abstract:** This study investigated spatial clustering characteristics of multichannel electrogastrography (EGG) using a convolutional autoencoder. EGG signals from 15 healthy subjects were recorded using 30 abdominal electrodes. After preprocessing, latent features were extracted from EGG time-series data and analyzed using k-means clustering. The results showed that spatially adjacent electrodes tended to be classified into the same cluster, particularly on the anterior abdomen. These findings suggest that the learned latent representations preserve the spatial continuity and signal characteristics of gastric electrical activity, demonstrating the potential usefulness of autoencoder-based analysis for multichannel EGG.

**Keywords:** Electrogastrography, Autoencoder, Latent Feature Extraction, Spatial Clustering

### 1. はじめに

近年、生活様式の変化に伴い、「慢性的な胃の不調」が深刻な社会問題と化している。中でも機能性ディスペプシアは、器質的異常がないにもかかわらず慢性的な胃の不快感を呈する疾患であり、その診断は問診に依存する[1]。しかし、問診による診断は患者の主観に左右されるため、より簡易で客観的な評価手法の確立が重要である。ここで、消化管運動機能検査の一つに、胃腸の電気活動を体表面から測定する胃電図がある[2]。胃電図は、腹壁表面に電極を貼付するだけで測定可能なため、非侵襲かつ低拘束に胃腸活動を把握できる。一方、胃電図は信号振幅が微弱なため、ノイズの影響を受けやすく、臨床応用は限定的である。そこで、本研究では胃電図の多チャンネル計測にオートエンコーダを組み合わせることで、胃電図の潜在特徴解析と電極配置最適化に関する検討を行った。

### 2. 方法

#### 2.1 実験方法

被験者は、健康な若年男性 15 名とした。測定機器には、イーストメディック社製の DC デジタル多用途脳波アンプ Neuro-DCamp 36 を使用した。本実験では胃電図計測における最適な電極配置を検討するため、電極は腹部を前後左右から取り囲む形で 30 カ所に貼付した。胃電図の計測条件は低域遮断フィルタ 0.01 Hz、高域遮断フィルタ 0.2 Hz とし、単極誘導 30 本、双極誘導 101 本の時系列データを記録した。測定姿勢は、背もたれを使用しない椅子での安静座位とし、時間分解能 250 Hz で 30 分間の胃電図時系列を記録した。

## 2.2 時系列データの前処理方法

取得した胃電図時系列に対し、通過帯域 0.015-0.15 Hz のバンドパスフィルタを適用し、250 Hz で取得した時系列データはさらに 10 Hz にリサンプリングした。次に、リサンプリング後の各時系列データに対し、それぞれの平均と標準偏差を算出し、標準化処理を実施した。その後、すべての時系列に対し、5 分間(10 Hz×300 秒 = 3,000 点)の時間窓を 2 分 30 秒間(10 Hz×150 秒 = 1,500 点)間隔で分割することで、1 本の時系列あたり、11 本の分割時系列を取得した。以上の処理により、全体で計 23,580 本の学習データを作成した。

## 2.3 学習モデルの構築

前処理を施した学習データを用いて、畳み込みオートエンコーダによる学習モデルの構築をした。本実験で使用するモデルは 3 層の 1 次元畳み込みオートエンコーダを採用し、入力は長さ 3,000 点の時系列データである。各畳み込み層のフィルタ数はそれぞれ 8, 16, 32 とし、カーネルサイズはすべて 10 とした。活性化関数には ReLU 関数を使用し、各層ではストライド付き畳み込みを行うことにより段階的に潜在表現への圧縮を行った。デコーダでは転置畳み込み(Conv1DTranspose)を用いることで時系列長を復元し、入力データと同じ長さの信号を再構成する構造とした。学習は TensorFlow を用いて実装し、最適化アルゴリズムには Adam, 損失関数には MSE を使用した。以上の処理により、エンコーダから得られる潜在表現は、長さ 3,000 点の入力に対し、最終的には  $5 \times 32 = 160$  次元の潜在ベクトルとして表現された。

## 3. 結果・考察

単極誘導で取得した 4,950 本の時系列データを学習済みオートエンコーダに入力し、各時系列に対応する 160 次元の潜在ベクトルを取得した。チャンネルごとに 15 名分の潜在ベクトルを平均することで、各チャンネルに対する 160 次元の特徴ベクトルを算出した。得られた特徴ベクトルに対して k-means 法を適用した結果、クラスタ数を変更した場合でも、空間的に近接する電極が同一クラスタに分類される傾向が確認された。特に前面電極では、上下方向に隣接する電極同士が類似したクラスタに分類される傾向がみられた。これらの結果より、胃の電気活動は体表面上に空間的連続性をもって分布している可能性が示された。また、近接電極間で同一クラスタが形成されたことから、オートエンコーダによる潜在表現が空間構造を保持していることが示唆される。さらに、被験者間で平均化を行った後も安定したクラスタ構造が得られたことから、個体差を超えた共通の空間的特徴が存在する可能性が考えられる。一方、空間的に近接していても異なるクラスタに分類される電極も確認された。これらの領域では、胃や腸由来信号が弱い、あるいは筋電図などのアーチファクトの影響を強く受けている可能性がある。さらに、クラスタ数の増加に伴い、単純な空間的位置関係のみでは説明できないクラスタ構造も確認された。このことから、潜在表現には電極位置だけでなく、信号成分の違いも反映されていると考えられる。

## 参考文献

- [1] 日本消化器病学会, “患者さんとご家族のための機能性ディスペプシアガイド 2023”, 日本消化器病学会, 2023.
- [2] W.C. Alvarez, “The electrogastrogram and what it shows”, Journal of the American Medical Association, Vol. 78, No. 15, pp.1116-1119, 1922.

## GP 法は「Bio-Hash」関数：ゲノムの指紋を創る

西垣 功一<sup>1</sup>、濱野 圭一<sup>2</sup>

<sup>1</sup>京都府立医科大学（客員教授）、<sup>2</sup>スピード合同会社

<sup>1</sup>〒602-8566 京都市上京区河原町通広小路上る梶井町 465

<sup>1</sup>cochangreen2@yahoo.co.jp

### The GP method is a “Bio-Hash function” : It generates the fingerprint of genomes.

Koichi Nishigaki<sup>1</sup>、Keiichi Hamano<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Kyoto Pref. Univ. Med. (VP) <sup>2</sup>Spiddos LLC.

<sup>1</sup>Kamigyō-ku, Kawaramachidōri-Hirokoji-Agaru Kajii-Cho

**Abstract:** A Bio-Hash function can transform a large amount of information, such as a genome sequence, into a compact representation through molecular computation, which is a non-mathematical computational procedure. Spiddos, the Bio-Hash value obtained from a genome using GP (a type of Bio-Hash function), exhibits essential characteristics including many-to-one correspondence, irreversibility, manageable output size, and functionality as an index. This talk discusses the less-recognized Bio-Hash function GP and its potential role in the future development of molecular computation.

**Keywords:** Hash function, genome profiling(GP), genome information, spiddos, molecular calculation

#### 1. はじめに

Hash 関数は多量のビット列を不可逆的に Hash 値（短い固定値）に変換するが、その過程は再現的・一義的である。このために、決済や暗号資産の運用に広く用いられ、インターネット時代の基盤技術となっている。

一方、21 世紀になって大量のゲノム情報を取得できるようになり、医学・生物学分野における GWAS（全ゲノム関連解析）や CRISPR 摂動解析や微生物生態学分野でのメタゲノム解析を始め、古生物学など様々な分野で革新的成果を挙げ続けている。これらはゲノム DNA の塩基配列情報をバイオインフォマティクスにより解析する標準法と言える。

他方、ゲノム情報からシーケンシングせずに、「分子計算」により Hash 値を求める Bio-Hash 関数（法）を開発し実用化してきた。その技術が GP(Genome Profiling)法であり、スピード（species identification dots）がその Hash 値である。

これまで、GP 法に関して Bio-Hash という観点ではほとんど議論してこなかったが、その観点は広義の分子計算と関連付けるものであり、正面から議論することでこの分野を広げ活性化し、発展につなげる意義があると考えられる。

#### 2. Hash と Bio-Hash

文書、音声、画像などすべての情報は 0/1 のデジタル文字列として表される。Hash 関数

の1つであるSHA-256ではそれらの文字列を256ビットのブロックとし、それぞれのブロックを8つのワード(64ビット)に分けた上で、一定の手順で何度も混ぜる・ずらす・加えるを繰り返し、最後に256ビットのHash値(=指紋)を作るアルゴリズムである。ここで得られたHash値から逆変換して元の情報を復元することはできない(不可逆性)し、異なる情報から得られたHash値どうしは通常、同一にはならない(衝突耐性)。無論、再現性もある(偽造の判別が可能に)。GP法という一種の分子計算[正確には“メタ”分子計算]によってスピードをえる方式(文献1)は、Hash関数のようにコンピュータには依存しない点で全く異なるが、全体のプロセスや実効性においては表1に示される通り、相似性が高い。

	Hash関数	Bio-Hash関数*
原理	チューリング計算	メタ分子計算
具体例	SHA-256	GP法
入力	任意の長さのビット列	ゲノムDNA(大小不問)
計算過程	混合・間引き操作(ビット回転・シフト・XOR・加算など)	競合的複製反応と温度勾配ゲル電気泳動(TGGE)法による分子識別
出力	16進数64文字: (256ビット)	スピード(約10点) (~200ビット)
変換	多対一写像	多対一写像
精度	原理から、 $\epsilon = 0$	S/N比=55±10
一義性	実質的に十分	実質的に十分
再現性	あり	あり
衝突耐性	(衝突は)極めて稀	(衝突は)極めて稀
アバランシュ効果 <sup>&amp;</sup>	厳格アバランシュ基準 (SAC)	PCRプライマーの1塩基の違いで劇的変化
類似用途	認証、DB検索キー	生物同定、DBインデックス
独自用途	ブロックチェーン	生物分類、変異原検出

\* バイオ分子を用いた分子計算、<sup>&</sup>1文字の変化で結果が大きく変わる効果

### 3. GP法のHash値=スピードの偉力

2種の生物A, Bのスピード点集合を

$$P_A = \{P_1^{(A)}, \dots, P_m^{(A)}\}, P_B = \{P_1^{(B)}, \dots, P_n^{(B)}\} \quad (n \geq m)$$

とする。P<sub>B</sub>からm点を選ぶ任意の部分集合をc(|c|=m)とし、その要素を{Q<sub>1</sub>, ..., Q<sub>m</sub>}と書く。置換(対応付け)σ ∈ S<sub>m</sub>に対し準ゲノム距離を

$$d_{G,c} = \min_{\sigma \in S_m} \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m \frac{\| \vec{P}_i^{(A)} - \vec{Q}_{\sigma(i)} \|}{\| \vec{P}_i^{(A)} \| + \| \vec{Q}_{\sigma(i)} \|}$$

と定義し、ゲノム距離を

$$d_G = \min_c d_{G,c}$$

とする。このゲノム距離を用いることで、あらゆる生物の分類が一義的に実行可能であり、C.リンネ以来の古典的生物分類と対応性が良い(文献2)。また、Hash値が元の情報の“指紋”であるように、スピードもゲノムの指紋として生物の同定に用いられる。さらに、コンパクトな情報としてゲノムデータベースの“インデックス”として使える。要は、Bio-Hashも計算(この場合は“メタ”分子計算)によって膨大な元情報をコンパクトな文字列に変換しうることである。

### 文献

1. Naimuddin, M. et al. Species-identification dots: a potent tool for developing genome microbiology. *Gene*, **261**: 243-250 (2000)
2. Nishigaki, K. Discoveries by the genome profiling, symbolic powers of non-next generation sequencing methods. *Brief. Funct. Genomics*, **23**(6):775-797 (2024)

## 目で見える数学とアートの世界

岡本健太郎

和から株式会社

〒150-8510 東京都渋谷区渋谷2丁目21-1 8階 Creative Lounge MOV

E-mail : k.okamoto@imakarasuugaku.co

## The World of Visual Math Art

Kentaro Okamoto

Wakara Inc.

Creative Lounge MOV 8F, 2-21-1 Shibuya, Shibuya-ku, Tokyo, 150-8510,  
Japan

**Abstract:** This presentation explores the intersection of mathematics and art, introducing various artistic expressions such as string mandalas, geometric shapes generated by complex equations, and patterns based on matrices. Furthermore, we discuss "multi-layered Kirie" (paper-cutting art) and propose a novel mathematical theorem inspired by the practical efficiency of paper-cutting algorithms. Specifically, we investigate the minimum total rotation angle required to cut out a polygon, proving that for any polygon, this angle is strictly less than 180 degrees.

**Keywords:** Mathematical Art, Kirie, String Mandala, Minimum Cut Rotation Angle, Coprime Graph

### 1. はじめに

歴史上、数多くの芸術家が最先端の数学をアートに積極的に取り入れてきた。例えば、レオナルド・ダ・ヴィンチは黄金比を用いて比率に関する「美しさ」を研究し、マウリッツ・エッシャーは非ユークリッド幾何学やトポロジーを取り入れただまし絵やテセレーション作品を生み出した。また、サルバドール・ダリは4次元立方体やカタストロフィー理論に美しさを見出し、自身の作品に反映させている。本発表では、計算や数式から入るのではなく、「美しさ」から数学に興味を持ってもらうことを目的とし、背後に潜む数学的な構造をアートという切り口から考察する。

### 2. 数学を用いたアート表現

本節では、数学的構造を用いた具体的なアートの作成例をいくつか紹介する。第一に「糸掛け曼荼羅」である。これは釘が等間隔に配置された板に一定のルールで糸をかける幾何学的アートであり、数学的には等差数列を法(mod)で考えたものの視覚化と捉えることができる。素数を用いたり、乱数によるランダムウォークを取り入れたりすることで、多彩な模様が生成される。第二に「数式と形」のアプローチとして、複素数を用いた方程式からの図形生成が挙げられる。例えば、 $z_1^n + z_2^m = 1$ のような方程式から、複雑で美しい曲面や立体構造を導き出すことが可能である。第三に「行列と配色」による模様の作成

である。行列の各成分に色を対応させることで、フラクタル構造のようなパターンを得ることができる。互いに素であるかを判定する条件 ( $\gcd(i, j) = 1$ ) を用いた Coprime Graph では、特定の色の割合が  $\zeta(2)^{-1}$  に漸近するといった数学的性質も視覚的に表現できる。

### 3. 立体切り絵とその構造

切り絵とは、不要な部分を切り抜いて絵を描く手法であり、下絵はすべて繋がっている（弧状連結である）必要がある。この手法を発展させた「立体切り絵」は、専用の立体額を用いて何層もの構造を重ねる独自の表現スタイルである。単なる平面の切り抜きにとどまらず、多層構造にすることでトーラス ( $T^2$ ) やその断面としての  $T^2$  のような位相幾何学的な広がりを持たせることができ、多層構造ならではの面白さが生まれる。

### 4. 切り絵から着想を得た数学的定理

アートの制作プロセス自体が、新たな数学的考察を生むことがある。切り絵の制作において「カットを行うとき、図案を回転させるのは面倒である」という実用上の問題がある。平行移動はコストがゼロであると考えた場合、図案を切り抜くために必要な「合計の回転角度」を最小化する効率の良いカットアルゴリズムが求められる。この問題を数学的に定式化し、多角形を切り抜くための「最小カット回転数」について考察した。正多角形の場合、以下の法則が成り立つ。

- 正  $2n$  角形の最小カット回転数は  $(n-1)/n \times 180^\circ$
- 正  $2n+1$  角形の最小カット回転数は  $2n/(2n+1) \times 180^\circ$

これらを踏まえ、一般の多角形における最小カット回転数について直線を跨ぐなす角の最大値を評価することで、「一般の多角形の最小カット回転数は  $180^\circ$  未満である」という性質を導き出した。

### 5. おわりに

本発表では、歴史的な背景から糸掛け曼荼羅、複素数や行列を用いたジェネラティブなデザイン、そして立体切り絵に至るまで、数学とアートの融合について解説した。さらに、切り絵の制作における「図案の回転」という物理的な制約が、「最小カット回転数」という純粋な幾何学の定理へと結実した事例を示した。アートを通じた直感的な美しさの追求が、数学的探求への強力な動機付けとなることを提示したい。

### 参考文献

- [1] 岡本健太郎, 『アートで魅せる数学の世界』, 技術評論社, 2021.
- [2] 岡本健太郎, 『切り絵アートで魅せる現代数学の世界』, 技術評論社, 2025.
- [3] 岡本健太郎, 「直感幾何学 2026」講演資料, 2026.

# シェルピンスキーのカーペットを適用した木製建具に関する基礎的研究

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

## Fundamental Study on Wooden Joinery Applying Sierpinski Carpets

Satoko ONO

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

**Abstract** : The objective of this study is to develop wooden building components (wooden joinery) that contribute to improving the structural strength of buildings. To this end, we created aesthetically pleasing wooden components by applying a geometric pattern known as the “Sierpinski carpet” to them. This paper presents the results of static cyclic loading tests (full-scale experiments) conducted to assess the seismic resistance of the wooden components developed in this study.

**Keywords** : improved seismic resistance, wooden joinery, Geometric patterns Sierpinski carpet, full-scale experiments

### 1. 序

日本は地震大国であり、耐震壁や筋かいなどにより建築物の耐力を向上させている。一方、障子や襖などの建具は耐震性に乏しく、雑壁としての扱いにもならない。しかし、これらの建具について、構面のデザインや建具の設置方法などを工夫することより、耐震性に寄与できるのではないかと考えた。そこで、『シェルピンスキーのカーペット』という幾何学的模様を建具に適用することにより、デザイン性のある木製建具を製作した。本論文では、本研究で考えている木製建具における地震時の耐力を把握するため、静的繰返し載荷実験（実大実験）によりに検証した結果について述べる。

### 2. 試験体

本研究で制作した試験体を図1に示す。本研究では、水平力に対する荷重分散効果を期待して、フラクタル幾何学模様的一种である『シェルピンスキーのカーペット』を建具のパネルに適用した。試験体は、幅：900（mm）×高さ：1800（mm）×厚さ：30（mm）であり、一般的に普及している障子の寸法を参考に設計・制作した。試験体のフレーム部分にはスギ材を、パネル部分には厚さ：4（mm）のシナ合板を用いた。なお、各部材はダボにより接合している。

### 3. 実験方法

本研究における実大実験は、福岡県農林業総合試験場資源活用研究センター（久留米市）で実施した。本実大実験は、層間変形角を漸増させる正負繰返し載荷実験である。載荷プログラムは、 $\pm 1/450$ （0.0022）（rad）、 $\pm 1/300$ （0.0033）（rad）、 $\pm 1/200$ （0.0050）（rad）、 $\pm 1/150$ （0.0067）（rad）、 $\pm 1/100$

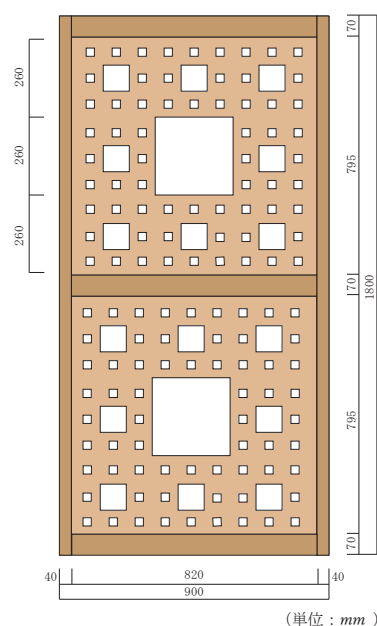


図1 試験体

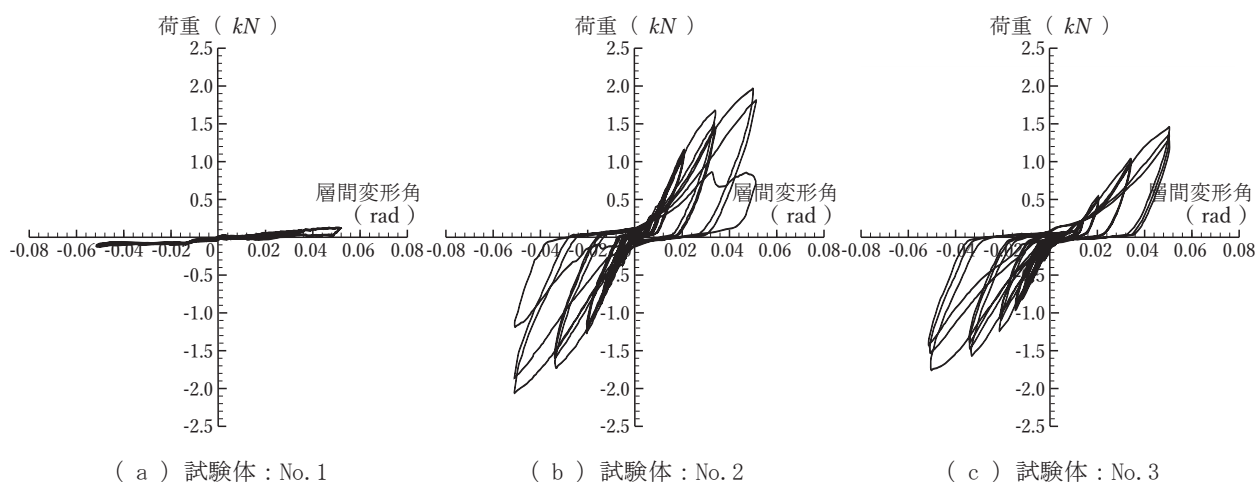


図 2 荷重-層間変形角関係

(0.0100) (rad),  $\pm 1/75$  (0.0133) (rad),  $\pm 1/50$  (0.0200) (rad),  $\pm 1/30$  (0.0333) (rad),  $\pm 1/20$  (0.0500) (rad)であり、各層間変形角を3回ずつ繰返した。それ以降については、層間変形角が $1/15$  (rad)に達する、あるいは、最大荷重より約80(%)低下するまで載荷した。なお、本実験では、押しを正加力としている。

#### 4. 実験結果およびその考察

本実大実験により得られた荷重-層間変形角関係を図2に示す。図2の縦軸は荷重(kN)であり、横軸は層間変形角(rad)である。

図2(a)は、試験体:No.1の結果であるが、明確な最大耐力を確認できず、低耐力で実験を終了した。この要因として、試験体の下部と載荷装置との固定が不十分であったことが挙げられる。そのため、載荷時に試験体がロッキング現象を発生して、試験体に水平力が十分伝達されなかったのではないかと考えている。一方、このロッキング現象をうまく利用して、制震部材として利用可能であると考えている。図2(b)および図2(c)は、試験体:No.2および試験体:No.3の結果であるが、両試験体の下部を載荷装置に固定したため、最大耐力が1.5~2.0(kN)ほど上昇した。試験体:No.2は、全体崩壊に至らなかったものの、フレーム間あるいはフレームとパネルの接合部に局所的な損傷が生じた。試験体:No.3は、載荷にともなってパネル部分がフレームから外れたのち、フレームの接合部において損傷が確認された。すべての試験体において、『シェルピンスキーのカーペット』を適用したパネル部分に損傷は確認できず、損傷はフレームの接合部に集中していた。

以上より、本試験体の耐力は、幾何学模様を適用したパネル部分ではなく、フレームの接合部および試験体の支持状態の影響を大きく受けることがわかった。

#### 5. 結語

本論文では、『シェルピンスキーのカーペット』という幾何学模様を適用した木製建具に対して正負繰返し載荷実験を実施した。その結果、すべての試験体において、パネル部分にほとんど損傷が生じず、耐力低下はフレームの接合部に起因していた。今後は、試験体におけるフレームの接合部などについて、詳細なディテールを再検討する予定である。

#### 【参考文献】

- (1) 植村光太郎, 谷口与史也, 井口晃浩, 山本大輔, 池見大祐: 建具を用いた既存木造住宅の開口部補強に関する実大実験研究, 日本建築学会構造系論文集, 第82巻, 第741号, pp.1525~1533, 2017年11月

## 曲線折り構造による仮設建築物の構築方法

横須賀 洋平

鹿児島大学, 〒890-0065 鹿児島市郡元 1 丁目 21-24

yokosuka@aae.kagoshima-u.ac.jp

### Method for Constructing Temporary Structures Using a Curved Folding Structure

Yohei Yokosuka

Kagoshima University, 1-21-40, Korimoto, Kagoshima city, 890-0065, Japan

**Abstract:** Temporary structures that utilize curved folding which allow flat panels to be instantly assembled into three-dimensional structures are particularly useful, because temporary housing must be provided rapidly in large quantities following a disaster. In this presentation, I will discuss the potential for constructing pillow-box-type curved folding structures that can be applied to building construction.

**Keywords:** Temporary structures, Curved Folding, Rigid Folding, Pillow-box-type

#### 1. はじめに

災害発生時における仮設住宅の供給は、建設・輸送・設営に時間を要するため、発災直後において避難所の過密化や劣悪な居住環境が生じやすい。特に高齢者を中心とした被災者に対しては、迅速かつ適切な住環境提供が求められている。仮設住宅は大量の住宅を迅速に供給する必要があるため、即時に平板を立体構造物に展開する事が可能な曲線折りを利用した仮設構造物が有用である。本稿では、仮設構造物のモデルとその構築方法を示す。

#### 2. 曲線折りと剛体折り

曲線折りは、曲線状の折れ線をクリーズ、曲面を構成する直線をルーリングと呼び、曲線で折ることにより曲面形状を形成することが可能である。一般に、曲線折りの変形過程で弾性変形が生じないで剛体で変形する条件は知られておらず、限定的な条件のみ解が知られている。小磯らは、連続曲面の場合にルーリングが平行なときに1自由度で変形したときの等長変形(剛体折り)の解が存在することを示した<sup>1)</sup>。曲線折りは、建築構造における展開構造の分野で盛んに研究されおり、実物への応用が期待されている。しかし、厚みを持つ構造物を対象とすると極端に製作が困難になる。

本稿で採用する形状は、文献3)に示すピローボックスの最大体積解による曲面形状を基に、建築計画性能と構造性能を持つ多目的最適化によって得られた形状を用いる。図1-4に複数のパネルから構成される離散曲面による構造物の設計例を示す。図5に曲線折り構造の実大実験モデルの写真を示す。1自由度ではあるが弾性変形を含むため、揚重に工夫が必要となる。

#### 3. クレーンによる構築方法

曲線折り構造の揚重には、人力による揚重する方法とクレーンによる揚重する方法がある。本稿では、クレーンによる揚重方法を模型実験で検討した結果を述べる。クレーンに

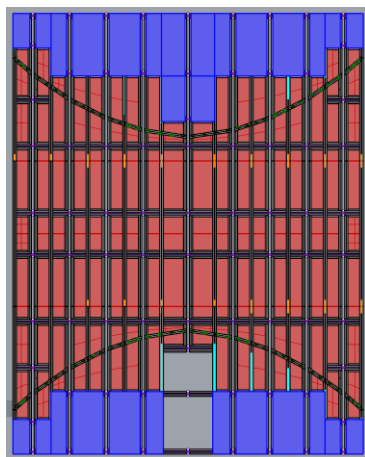


図 1. 平面図 (揚重前)

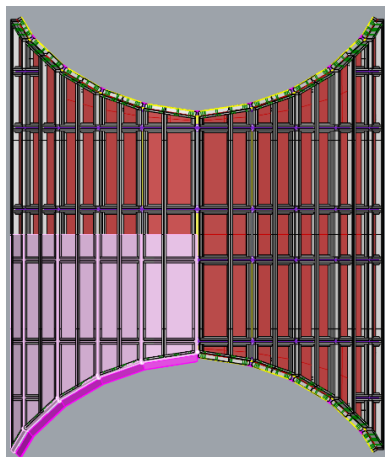


図 2. 平面図 (揚重後)

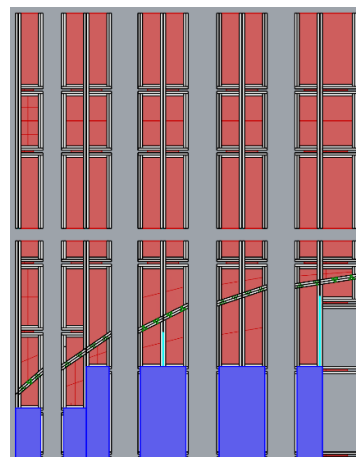


図 3. 分解状態

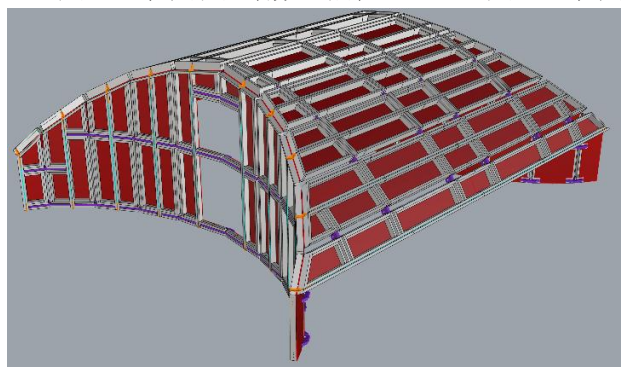


図 4. 鳥瞰図

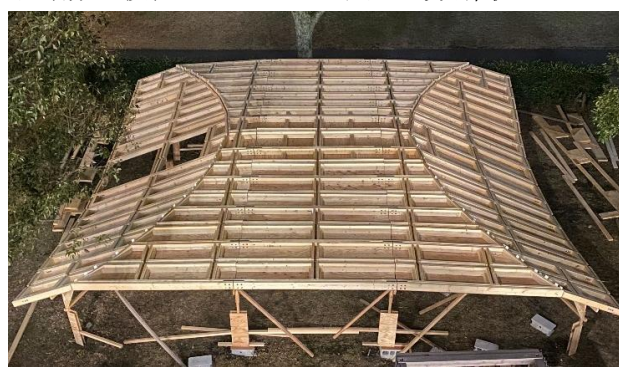


図 5. 実大実験モデル

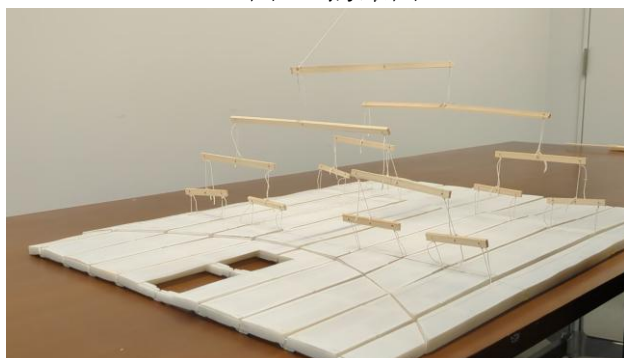


図 6. クレーンによる揚重

よる揚重は、全体の重量を一点から複数の吊り点に分散させる必要がある。しかし、曲線折りは形状の変化に伴い、各点の相対位置が変化するためその形状に追従する必要がある。そこで、トーナメント式に吊り点を設定する。模型実験の結果より、揚重は可能ではあるが、最終形状が正確に設計図どおりに変形するためには、施工時解析を導入し、吊り材の長さを適切に決定する必要がある。

#### 参考文献

1. 小磯深幸, 奥田健斗, ピロー型ボックスの体積最大解の存在と一意性, 日本応用数学会年会講演予稿集, ROMBUNNO.B3-1-4, 2022
2. 横須賀洋平, 熊谷 駿, 小磯 深幸:ピローボックスの曲線折り形状による仮設構造物の多目的最適化, 日本応用数学会 2024 年度年会, 2024 年 9 月
3. 横須賀洋平, 日吉雄大, 中村達哉: 曲線折り形状による仮設構造物の設計と 3D プリントリング模型日本建築学会九州支部研究報告, 第 65 号, 2026 年 3 月, pp.225-228

# 正規・非正規な配置の特異な一般化ミウラ折りの建築設計への応用

田川 浩之

武庫川女子大学建築学部、兵庫県西宮市戸崎町 1-13 上甲子園キャンパス

tagawa@mukogawa-u.ac.jp

## Application of Singular Generalized Miura-ori with Canonical and Non-canonical Arrangements to Architectural Design

Hiroyuki Tagawa

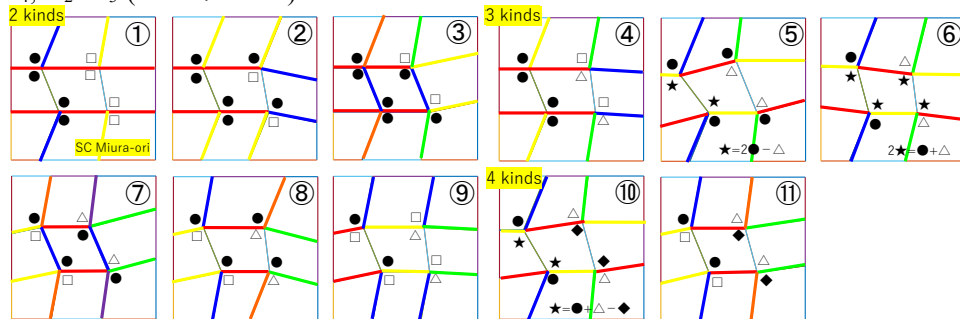
Mukogawa Women's University, 1-13 Tozaki-cho Nishinomiya Hyogo

**Abstract:** A total of 26 patterns of singular generalized Miura-ori in canonical arrangements, including arc- and spiral-shaped variations, is identified. In contrast, there are 17 patterns of singular generalized Miura-ori in non-canonical arrangements. These are derived by applying a dual operation to Unit 2 and Unit 3 of the canonical arrangement, which entails swapping the included and opposite angles. Within these 17 patterns, 11 can form a closed tower configuration.

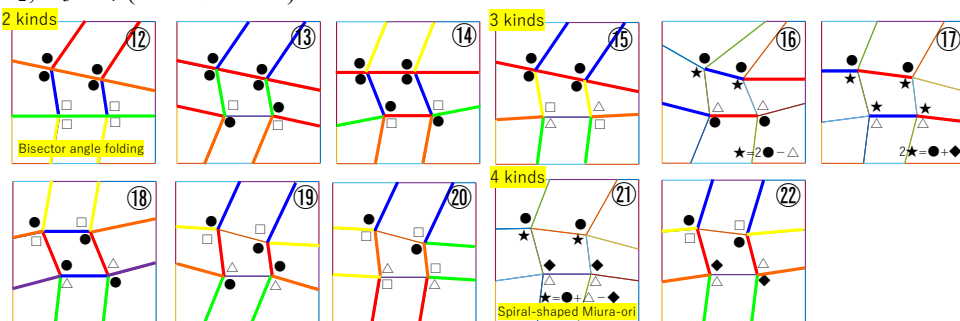
**Keywords:** Rigid-origami, Singular Generalized Miura-ori, Architectural Design

### 1. 正規な配置の特異な一般化ミウラ折り

[A]  $K_1=K_4, K_2=K_3$  (11 パターン)



[B]  $K_1=K_2, K_3=K_4$  (11 パターン)



[C]  $K_1=K_2=K_3=K_4$  (4 パターン)

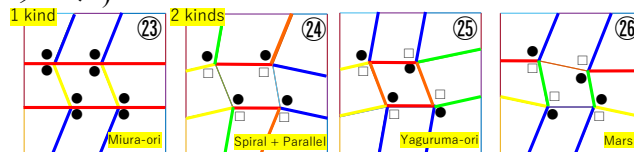


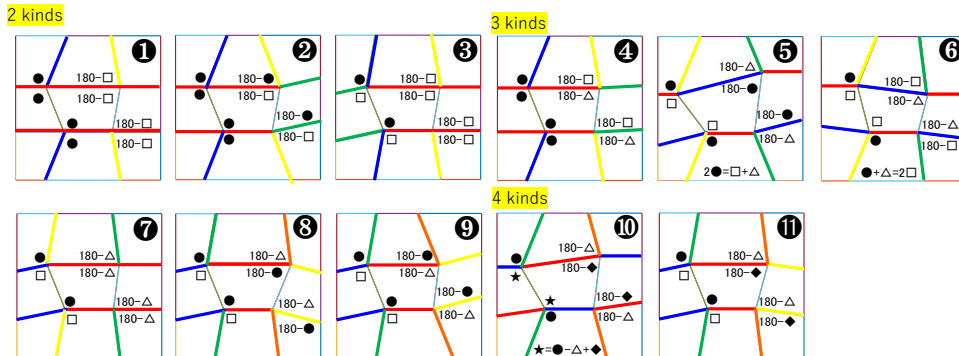
図 1: 正規な配置の特異な一般化ミウラ折り (全 26 パターン)

2. 非正規な配置の特異な一般化ミウラ折り

[双対なパターン]

①↔① ②↔② ④↔④ ⑦↔⑧ ⑧↔⑨ ⑩↔⑩ ⑪↔⑪ ⑲↔⑲ ⑳↔⑳ ㉑↔㉑ ㉒↔㉒ ㉓↔㉓

[A]  $K_1=K_4, K_2=K_3$  (11パターン)



[B]  $K_1=K_2, K_3=K_4$  (2パターン)

[C]  $K_1=K_2=K_3=K_4$  (4パターン)

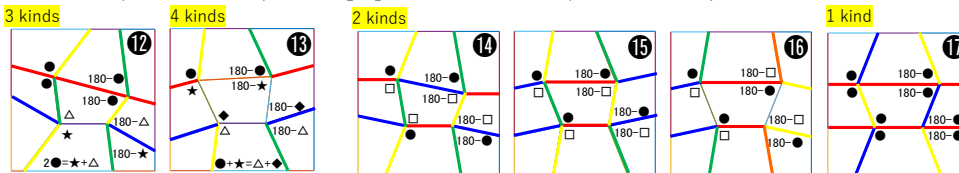


図 2: 非正規な配置の特異な一般化ミウラ折り (全 17 パターン)

3. 非正規な配置の特異な一般化ミウラ折りの閉じた塔形状

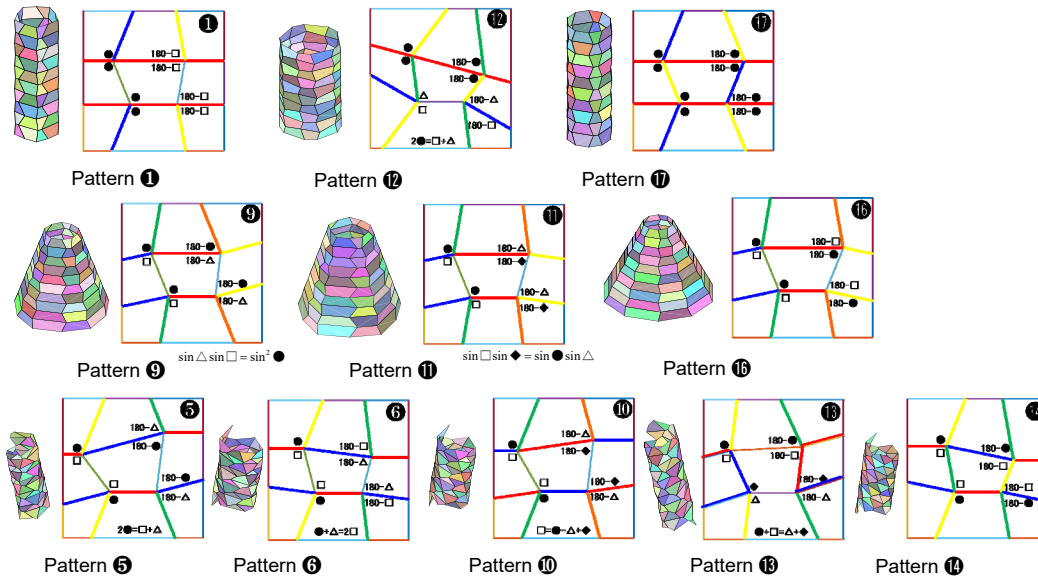


図 3: 非正規な配置の特異な一般化ミウラ折りでの閉じた塔形状 (全 11 パターン)

4. 建築設計への応用

特異な一般化ミウラ折りの幾何学パターンを応用した建築設計を提案した。

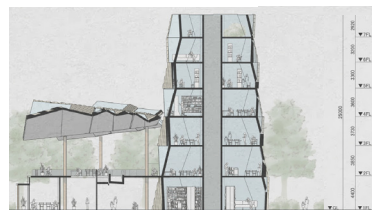
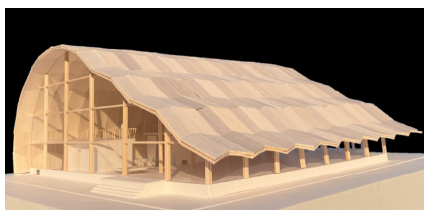


図 4: ミウラ折り(㉓)+砂時計パターン(㉑)

図 5: 円弧状ミウラ折り(㉑)+閉じた塔(㉒)

参考文献 H. Tagawa, S. Suzuki, R. Kokawa, “Morphogenesis of closed tower by singular generalized Miura-ori with non-canonical arrangements,” *Proceedings of IASS-IWSS 2026*, Turin, Italy, 2026.

# 超立方体と統計物理学

堀池由朗

名古屋大学大学院工学研究科応用物理学専攻 〒464-8601 名古屋市千種区不老町

yoshi.h@nagoya-u.jp

## Hypercubes and statistical physics

Yoshiaki Horiike

Department of Applied Physics, Nagoya University, Furo-cho, Chikusa-ku, Nagoya, 464-8601, Japan

**Abstract:** Hypercubic representation of state space and state transition diagram has been applied in an increasing number of research on many-body systems, ranging from physics to biology. Although projections of hypercubes are vital to comprehend the state spaces of many-body systems, projecting hypercubes is, in general, difficult. Here, we introduce a method for projecting hypercubes using principal component analysis (PCA). We find that projecting hypercubes via PCA is unsupervised, interpretable, and reproducible. Owing to its linearity, we analytically characterize projection quality via inner-product error between the original and projected space. As applications, we analyze the nonequilibrium dynamics of three systems through probability fluxes on hypercubic state space: relaxational dynamics of spin ice, thermal/quantum annealing dynamics of the Ising spin system, and the human brain fMRI signal. With visualizations of probability fluxes by our suggestion, we find that the probability fluxes exhibit non-trivial patterns as pathways or cycles. Those patterns reflect the underlying interaction networks among the elements of the many-body systems. Projecting hypercubes using PCA reveals the hidden pattern of statistical physics of the many-body problem.

**Keywords:** many-body problem/physics, nonequilibrium dynamics, Ising spin systems, brain dynamics/networks, thermal/quantum annealing

### 1. 背景

超立方体とは、三次元空間での立方体を高次元空間に一般化した高次元多面体（または超多面体）である。超立方体の頂点は、 $N$ 次元空間の座標を用いて表すことができるため、 $N$ 個の二値変数で指定できる。また、超立方体の辺は $N$ 個の二値変数のうち一つだけ異なる頂点間にひかれる。超立方体を含む超多面体の基本的な性質は、Coxeterによってまとめられている[1,2]。

超立方体の射影は、物理学・生物学における多体問題、すなわち、多数の構成要素からなる系の振る舞いの解明において広範に活用されてきた。これは、系の構成要素の状態が二値変数で指定できるならば、系全体の状態が超立方体の頂点に対応し、状態遷移が超立方体の辺に対応するからである。高次元空間をそのまま可視化することはできないので、超立方体の射影を用いることで、系の状態空間の直感的な把握が可能となる。しかし、超立方体の射影に関する先行研究では、比較的低次元の超立方体の射影を作ることですら“disappointingly difficult”と評されており[3]、一般に超立方体を射影することは難しい。これは、非線形な射影方法では、損失関数のハイパーパラメータの調整が高次元になるにつれて難しかったり、結果として得られた射影の解釈が難しかったりするからである。

### 2. 主成分分析を用いた超立方体の正射影の提案

上述の難点を鑑み、我々は、超立方体の頂点間の内積誤差に注目した[4]。平均二乗内積誤差の最小化による次元削減は古典的多次元尺度構成法 (classical multidimensional scaling, classical MDS) に該当し、古典的 MDS は主成分分析 (principal component analysis, PCA) と等価であることが知られている。従来の PCA の解釈に比べて、内積誤差による解釈は、どの頂点ペア間から射影の誤差が生じるかが明らかにできるうえ、頂点ペア間の誤差を射影された図から視覚的に推測することができる。我々は、線形性を活かし、内積誤差の観点から PCA によって射影された超立方体の数学的性質を解析した[4]。数値計算および解析的評価の結果から、PCA は

超立方体状態空間における分極した分布を効果的に捉えることが明らかになった。この性質により、射影後の超立方体頂点分布の漸近的挙動や射影の誤差評価が可能となり、射影空間における PCA の性能を特徴づけることができる。

### 3. 多体系の統計物理学への応用

我々は提案手法を用いて統計物理学の問題である多体系の非平衡ダイナミクスの分析に取り組んだ。3つの Ising スピン系に対して、超立方体状態空間の可視化および、超立方体状態間の確率流の可視化を行った。1つ目はスピンアイスと呼ばれる人工古典多体系である。この系は実験的に実現可能であり、スピンの反転ダイナミクスが観測されている[5]。我々は、マスター方程式に従う確率分布の時間発展を数値計算により求めることで、緩和ダイナミクスの確率流を可視化した[4]。その結果、おおむね確率流の経路は平均場理論による予想に従うが、スピン間相互作用に起因する相関したスピン反転ダイナミクスより非自明な経路が存在することが明らかになった。2つ目の例として、Ising スピン系に対する熱・量子アニーリングにおける緩和ダイナミクスを検討した[6]。相互作用ネットワーク構造に応じて、熱アニーリングでは確率流に定性的な変化があるのに対し、量子アニーリングではほとんど違いがないことが明らかになった。3つ目の例として、ヒト脳 fMRI データより、脳ダイナミクス及び脳ネットワークの推定を行った[7]。シグナルを処理して二値化し、それらの二値状態間の同時遷移確率を推定した。確率流を可視化すると、タスクに応じて脳ダイナミクスが特徴的な閉路 (cycle) を示すことが明らかになった。さらに、推定した脳ネットワークより、そのような閉路が相互作用ネットワークの反対称成分の微小な違いから生じることが分かった。

### 4. 結論と展望

超立方体による状態空間の表現は多体問題に対し有用だが、Feynman が指摘している[8]ように、人間の脳でそれを想像することは難しい。我々は、PCA を用いた超立方体の射影法を提案した。これにより、自動、かつ再現可能、かつ解釈可能な超立方体の射影が実現する。我々は Ising スピン系の非平衡ダイナミクスを提案手法に基づき解析した。その結果、相互作用ネットワーク構造に起因する構成要素間の相関したダイナミクスが非自明な経路を超立方体状態空間中で示すことを明らかにした。この結果は、PCA を用いた超立方体の射影法が、従来取り組むのが難しかった多体系の統計物理学、特に非平衡ダイナミクスに有効であることを示唆する。

Coxeter は著書[1]で超多面体の可視化は心理・芸術的な利点があると指摘していた。我々は、統計物理学の問題を例に新たな利点、つまり、二値データの解釈をそのデータから得られる射影によって行うことができることを示しつつある。Anscombe の例[9]が示すように、データに隠されたパターンは統計量でなくグラフ、つまりデータ可視化によって明らかになる。今後、我々の提案手法により様々な分野での新たな発見が生まれることを願う。

[1] H. S. M. Coxeter, *Regular Polytopes*, 3d ed (Dover Publications, New York, 1973).

[2] H.S.M.コクセター著、一松信監訳「正多胞体－高次元正多面体原論」(数学クラシックス 31、丸善出版、2022)

[3] G. Abramson and D. H. Zanette, Two-dimensional projections of a hypercube, *Phys. Rev. E* 67, 057101 (2003).

[4] Y. Horiike and S. Fujishiro, Orthogonal projections of hypercubes, *Phys. Rev. E* 112, 045304 (2025).

[5] A. Farhan, P. M. Derlet, A. Kleibert, A. Balan, R. V. Chopdekar, M. Wyss, L. Anghinolfi, F. Nolting, and L. J. Heyderman, Exploring hyper-cubic energy landscapes in thermally active finite artificial spin-ice systems, *Nat. Phys.* 9, 375 (2013).

[6] Y. Horiike and Y. Kawaguchi, Distinguishing Thermal versus Quantum Annealing Using Probability-Flux Signatures across Interaction Networks, arXiv:2511.16457.

[7] Y. Horiike and S. Fujishiro, Distinct Weak Asymmetric Interactions Shape Human Brain Functions as Probability Fluxes, arXiv:2508.20961.

[8] R. P. Feynman, A. J. G. Hey, and R. W. Allen, *Feynman Lectures on Computation* (Addison-Wesley, Reading, Mass, 1996).

[9] F. J. Anscombe, *Graphs in Statistical Analysis*, *Am. Stat.* 27, 17 (1973).

## 四国西予ジオパークの遍路道とジュラ紀付加体(斗賀野層群)見学ツアー

松岡 篤<sup>1,2</sup>・榊山 匠<sup>3,4</sup>・高橋 司<sup>3,4</sup>

<sup>1</sup>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

<sup>2</sup>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](mailto:amatsuoka@geo.sc.niigata-u.ac.jp)

<sup>3</sup>四国西予ジオパーク推進協議会, 797-1717 愛媛県西予市城川町下相 945 番地

<sup>4</sup>四国西予ジオミュージアム, 797-1717 愛媛県西予市城川町下相 945 番地

### Shikoku Pilgrimage Route in the Shikoku Seiyō Geopark, Ehime Prefecture and GeoTour on the Togano Group, Jurassic accretionary complex

Atsushi MATSUOKA, Takumi SAKAKIYAMA, Tsukasa TAKAHASHI

<sup>1</sup>Niigata University/<sup>2</sup>Chiba Institute of Technology

<sup>3</sup>Shikoku Seiyō Geopark Promotion Council/<sup>4</sup>Shikoku Seiyō Geo Museum

**Abstract:** The Shikoku Seiyō Geopark is one of Japanese geoparks and is assigned to the entire area of Seiyō City, Ehime Prefecture. The Shikoku Pilgrimage Route runs the western part of the geopark, passing through the Uwa district. The Meiseki-Ji Temple, No. 43 of the Pilgrimage Route, is located within the Uwa district. A small-scale pilgrimage route was set up in the district about 200 years ago. Geologically, the area is occupied by a Jurassic accretionary complex called the Togano Group. A geo-tour enjoying the group is planned in the route.

**Keywords:** Shikoku Seiyō Geopark, Shikoku Pilgrimage Route, geo-tour, Togano Group, Jurassic accretionary complex

#### 1. はじめに

四国西予ジオパークは愛媛県南西部の西予市全域が対象地域である。この地域は、大部分が秩父累帯に帰属する地質体からなる。その中でも斗賀野層群は、最も広く分布する地質体である。本層群の模式地は高知県西部にあるが[1], 西予市にはその西方延長が露出している。斗賀野層群は、遠洋域で堆積したチャートの上に陸源砕屑物である砂岩が覆うという地層の積み重なり(層序)で特徴づけられる。斗賀野層群は、この一連の層序が断層により繰り返して重なる地質体で、中生代ジュラ紀にアジア大陸東縁での海洋プレートの沈み込みにより形成された[2]。地質構造や年代極性をもつ特徴から海溝での剥ぎ取り付加作用により形成されたと考えられている。

四国遍路は四国4県に点在する弘法大師ゆかりの霊場を周回する巡礼である。遍路道の全長は1400 kmにも及び、八十八箇所の札所が設けられている。巡礼の歩行者のために道標や案内板が整備されているルートも多い。最近では、日本人だけではなく、海外からの巡礼者も増えている。四国西予ジオパークには地域内の西部を南北に遍路道が通り、宇和地区内には第四十三番札所の明石寺(めいせきじ)がある。明石寺周辺の地質を観察するジオツアーについて紹介する。

#### 2. 坪ヶ谷新四国八十八箇所巡りとジオツアーの設定

明石寺周辺には斗賀野層群の構成岩類が露出し、遍路道を歩きながら岩相の変化や地層の積み

重なりを追うことができる。明石寺を含む西予市宇和町卯之町市街地の東方には、坪ヶ谷新四国八十八箇所巡りの山道が約200年前に整備され、第一番から第八十八番の札所が設置されている。この山道を100回巡ることは、四国遍路を1回巡るのと同等であるとされる。なお、明石寺はこの八十八箇所巡りでも第四十三番に位置づけられている。坪ヶ谷新四国八十八箇所巡りの山道に沿って石仏群が配置されている。卯之町の光教寺境内には第一番霊山寺と彫られた石柱が設置されている。ここを始点とし、時計回りが順打ちとなるように八十八の石仏群が坪ヶ谷を囲む山域を巡る山道に配置されている。それぞれの石仏群の近傍には寺の名称が刻まれた石柱が立てられている。寺の番号と名称の関係は、四国八十八カ所札所と同一である。第九番法輪寺にみられるチャートの例を図1に示す。

### 3. ルートへのアクセスとジオツアーの特徴

光教寺へは、JR 予讃線卯之町駅から旧宇和島街道を通り、徒歩10分程で到達することができる。旧街道周辺には、国の重要伝統的建造物群保存地区の選定された町並みが広がる。それらの建造物の石垣には、斗賀野層群の主要な構成岩類であるチャートが用いられている。地質観察と町並み見学の両方を行うと、地質と人の生活の繋がりも理解することができる。このような観点からも、明石寺周辺の遍路道は四国西予ジオパークに広く分布する斗賀野層群の観察に適したルートであるといえる。



図1. 坪ヶ谷新四国八十八箇所巡りの第九番法輪寺にみられるチャート。層状をなし、褶曲している。

### 4. おわりに

卯之町ジオツアーによる街並み見学と地質観察を通じて、街並みの風景と地質には密接な関係があることの気づきを促すと期待される。また、斗賀野層群の特徴であるチャートから珪質泥岩をへて砂岩へいたる地層の変化を自分の足を使って確認する経験からは、付加体という地質体が身近に存在することが理解されるであろう。西南日本の太平洋側では、現在、南海トラフに沿ってフィリピン海プレートの沈み込みが進行中で、南海トラフの北側では付加体が形成されつつある。近い将来に発生する南海トラフ地震は、この海洋プレートの沈み込みに起因する自然現象である。海域の地下で起こる地震により、大規模な津波が発生することも予測されている。身近に付加体があるという認識は、地域住民が地震防災の意識を高める上でも有効であると考えられる。

### 文献

- [1] 松岡 篤, 1984. 秩父累帯南帯の斗賀野層群. 地質学雑誌, **90**, 455-477.
- [2] Matsuoka, A., 1992. Jurassic–Early Cretaceous tectonic evolution of the Southern Chichibu Terrane, southwest Japan. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, **96**, 71–88.

## 曲面の貼り合わせに伴う可展面の特異点の幾何学

李俊臻

神戸大学大学院理学研究科、兵庫県神戸市灘区

[wayne990203@outlook.com](mailto:wayne990203@outlook.com)

### Geometry of Singularities of Developable Surfaces Arising from Gluing Two Surfaces

Junzhen Li

Graduate School of Science, Kobe University, Kobe 657-8501, Japan

**Abstract:** In this talk, we study the geometry arising from gluing two smooth surfaces along a curve, called the gluing locus. In particular, we focus on singularities appearing in developable surfaces constructed along the curve. By introducing a Frenet - Serret type moving frame along the gluing locus, we define invariants describing the geometry of the curve and construct associated developable surfaces. These surfaces are frontals and exhibit singularities such as cuspidal edges and swallowtails. We provide criteria for these singularities in terms of the invariants and investigate how the angle between the unit normal vectors of the two surfaces affects the geometric properties of the resulting developable surfaces.

**Keywords:** Developable surfaces, singularities, gluing of surfaces, cuspidal edge, swallowtail

#### 1. Introduction

Developable surfaces and their singularities, such as cuspidal edges and swallowtails, have been extensively studied in the context of frontal geometry. However, when two smooth surfaces are glued along a curve, the resulting geometric structures have not been fully understood. In this talk, we investigate the geometry of the developable surfaces constructed along the gluing locus and analyze the singular phenomena of that surfaces. More concretely, let  $\tilde{\gamma}(t)$  be a curve on a frontal, and consider a Frenet-Serret type frame consisting of three orthonormal vector fields along the curve. We define three invariants which describe how the frame evolves along the curve by the Frenet-Serret type formula. Using this frame, and following [2], we consider a height function along the curve, and we define two types of developable surfaces as the discriminant set of the height function. By the construction, these surfaces are envelopes of families of planes determined by the normal and binormal directions. These developable surfaces are frontals and naturally reflect the geometry of the curve. See [1] for developable surfaces along a curve from the view point of the curved foldings. This talk is based on the preprint [3].

## 2. Main Results

We describe the geometric properties of the developable surfaces in terms of the invariants associated with the moving frame. In particular, the type of the surface is completely characterized by certain functions derived from these invariants.

When one of these functions vanishes identically, then the developable surface is cylindrical. If this function does not vanish but another function vanishes, then the developable surface is conical. In the remaining cases, singularities appear along a distinguished curve on the surface. Furthermore, we obtain explicit criteria for the appearance of typical singularities of frontals: a cuspidal edge occurs when a certain function is nonzero, and a swallowtail occurs when this function vanishes but its derivative does not.

## 3. Application to Gluing two frontals

We apply these results to the gluing of two frontals along a common curve. Each surface induces a moving frame and corresponding invariants along the curve. The relationship between the two frames is described by a rotation, which corresponds to the angle between the unit normal vectors of the two surfaces. We show that the geometric type of the associated developable surfaces depends not only on the invariants but also on this angle. In particular, the angle between the normals plays a crucial role in determining the type of singularity that appears.

## References

- [1] A. Honda, K. Naokawa, K. Saji, M. Umehara and K. Yamada, Curved foldings with common creases and crease patterns, *Adv. in Appl. Math.* 121 (2020), 102083, 10 pp.
- [2] S. Izumiya and S. Otani, Flat approximations of surfaces along curves. *Demonstr. Math.* 48 (2015), no. 2, 217--241.
- [3] J. Li, Geometry on the Gluing Locus of Two Surfaces, arXiv:2506.01397.

## 正 20 面体の小谷の蟻の問題

野川颯馬、山岸義和

龍谷大学 (〒520-2194 滋賀県大津市瀬田大江町横谷 1-5)

[y26m005@mail.ryukoku.ac.jp](mailto:y26m005@mail.ryukoku.ac.jp), [yg@rins.ryukoku.ac.jp](mailto:yg@rins.ryukoku.ac.jp)

### The farthest point map on the regular icosahedron

Soma Nogawa, Yoshikazu Yamagishi

Ryukoku University (Seta, Otsu 520-2194, Japan)

**Abstract:** The farthest point map on the regular icosahedron is a piecewise rational map, obtained by using the star unfolding and the Voronoi tessellation. Its limit set is a 1-dimensional graph.

**Keywords:** farthest point, star unfolding, Voronoi tessellation, limit set, intrinsic radius.

#### 1. はじめに

三辺の長さが  $1 \times 1 \times 2$  の直方体の表面上を蟻が歩くことを考える。任意の目的地まで最短経路で歩くとして、頂点から最も遠い点はどこか。この「小谷の蟻の問題」の正解は、反対側の頂点ではなく、正方形の面の中央に  $1/4$  だけ寄った点となる ([1], [2])。

一般の凸多面体の表面  $M$  上で、2 点を結ぶ最短経路の長さとして距離  $d$  を定義する (内在的距離と呼ぶ)。  $M$  上の点  $p$  からこの距離で最も遠い点 (の集合) を  $f(p)$  とする。  $f$  は多価写像である。もし  $M$  が球面であれば  $f$  は一価写像で、  $f(p)$  は  $p$  の対蹠点であり  $f(f(p)) = p$  が成立つ。球面以外でもこのような性質をもつ曲面 (Steinhaus 曲面という) が存在することは知られている。凸多面体の表面は Steinhaus 曲面でないので、最遠点の最遠点は元の点に戻らないことが多く、最遠点写像の極限集合が問題となる ([3])。

ここでは正 20 面体の表面を  $M$  とする。他の 4 つの正多面体の最遠点写像については既に公開されている ([4])。  $M$  上の点  $p$  (起点と呼ぶ) の最遠点は、まず  $p$  による星展開を求め、次にボロノイ分割する手順を踏むことにより決定される。星展開とは、通常の展開図のように辺に沿って切り開くのではなく、正 20 面体  $M$  の 12 個の頂点から  $p$  への最短経路を引き、この最短経路に沿って  $M$  を切り開いた展開図のことである。展開図の上に  $p$  のコピー (母点と呼ぶ) が 12 個あるので、この 12 個の母点によって展開図をボロノイ分割する。ボロノイ分割とは、どの母点が最も近いかによって平面を区分けした「なわばり図」である。ボロノイ領域の境界は一次元グラフの形をしており、そのノード (ボロノイ点と呼ぶ) が最遠点の候補である。最遠点にならないボロノイ点を見分けるためにドロネー三角形分割を考える。3 つの母点を頂点とする、ある三角形がドロネー三角形であるとは、その外接円の内部に他の母点が入らないときをいう。ボロノイ点は、ドロネー三角形の外心である。もしドロネー三角形  $\Delta$  が鈍角三角形で、外心  $q$  が  $\Delta$  の外部にあるときは、  $q$  のそばにもっと遠い点があるので  $q$  は最遠点とならない。正 20 面体の場合、この判別基準により、最遠点の候補となるボロノイ点は 2 つに絞られる。この 2 点のうち  $p$  からの距

離が遠いほう( $q$ とする)が最遠点である。 $p$ が正20面体の頂点に近づくときは最遠点 $q$ も頂点に近づく。 $p$ が面の中央に近づくときは $q$ も面の中央に近づく。最遠点写像の極限集合 $L$ は図1(c)のようになる。 $p$ が $L$ 上にあるとき $q$ は $p$ の対蹠点である。

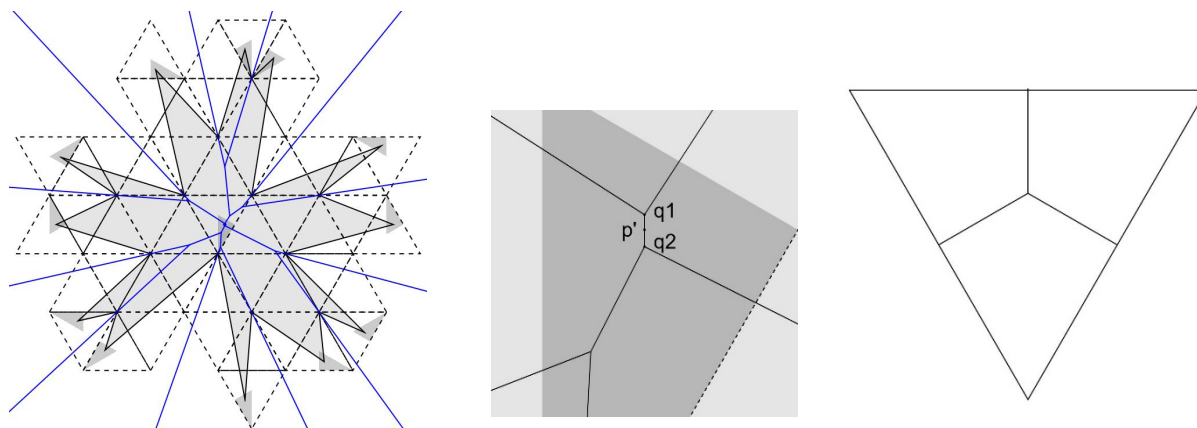


図1(a) (b) (c)  
 (a)正20面体の星展開とボロノイ分割。(b) ボロノイ分割の拡大図。 $p'$ は起点 $p$ の対蹠点。 $q_1, q_2$ のうち遠い方が最遠点 $q$ となる。(c) 各面上の最遠点の極限集合 $L$ 。

参考文献

[1] 小谷善行「数学パズルチャレンジ超問120」ニュートン別冊, 2014.  
 [2] M. Gardner, The ant on a  $1 \times 1 \times 2$ , Math Horizons 3(3), (1996), 8-9.  
 [3] J. Rouyer, Steinhaus conditions for convex polyhedra, in: Convexity and discrete geometry including graph theory, K. Adiprasito et al. (eds), Springer Proceedings in Mathematics and Statistics 148 (2016) 77-84.  
 [4] R. E. Schwartz, The farthest point map on the regular octahedron, Experimental Mathematics 31(4), (2022), 1086-1097.

準結晶の模型であると考え、内部構造の中に正 10 角形を発見した。

八十嶋章雄

SSDS Symmetric 福井県坂井市三国町殿島 2-19

yas0511@yahoo.co.jp

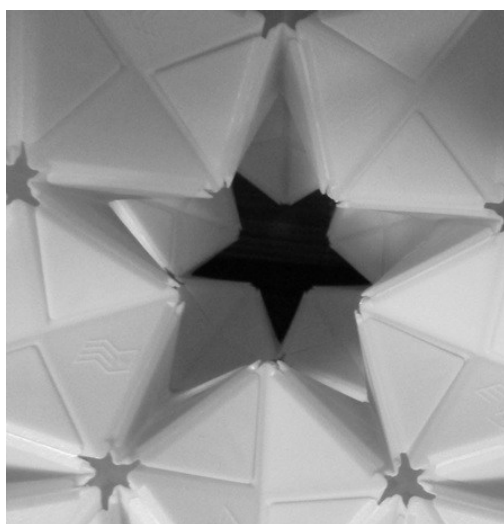
We discovered a regular decagon in the internal structure, which we believe to be a model of a quasicrystal.

Akio Yasoshima

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

**Abstract:** While observing a structure that I believe represents the central motif of a quasicrystal, I discovered a regular decagon within its internal structure. Why is a "regular decagon" "visible" in this location? Because the geometric structure of this object contains the properties of a "sphere." The "star shape" that can be recognized as part of the internal structure of this central motif (quasicrystal model) can be observed in 12 places, since a regular dodecahedron is the basic structure. The "star shape" (shape of the gap) visible in the center closest to the viewer appears as an "inverted star shape" when the sphere rotates 180 degrees to the opposite side. When you superimpose the inverted star shape on the opposite side, rotated 180 degrees, in your brain, you get a "regular decagon."

**Keywords:** Unit origami. Quasicrystal, regular decagon

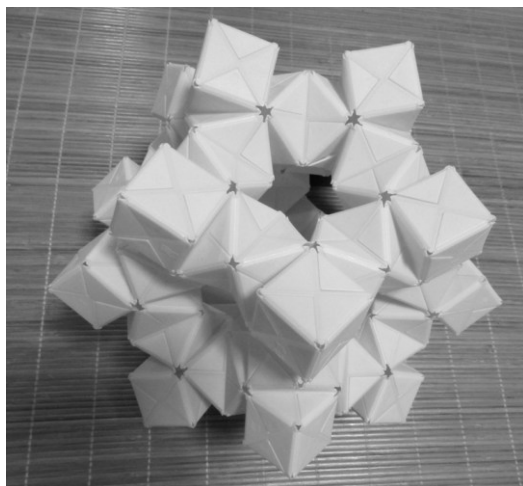


<写真1>奥に見える暗い星形は向こう正面の内部構造である。180度回転した後の像なので、倒立している。手前のやや暗い星形は同じ5回回転対称軸に載る、近い側の内部構造である。合同なので大きさは同じである。十分遠くから見て、脳内で合成すれば、正10角形になる

準結晶のセンターモチーフを表現していると考えている構造物を観察しているときに、その内部構造の中に正 10 角形を発見した。

なぜこの場所に「正 10 角形」が「見える」か？それは、この構造物が持つ幾何学な構造の中に「球」としての性質が含まれているからだ。このセンターモチーフ（準結晶模型）の内部構造として認識できる「星形」は、正 12 面体が基本構造であるので、12 か所で観察できる。一番手前の中央に見える「星形」（隙間の形）は、球がぐるりと 180 度回転して反対側に回った時には、手前にあった星形の隙間は、「倒立した星形」に見える。これが発見の中身である。

並進対称性で埋め尽くされたイメージ空間の中では、球の中心を原点として展開される思考は展開しにくいのではないかと思われる。



<写真 2>準結晶模型として制作している構造物の中で、繰り返し現れる「センターモチーフ」となる構造を5回回転対称軸からやや外れた角度で撮影した画像

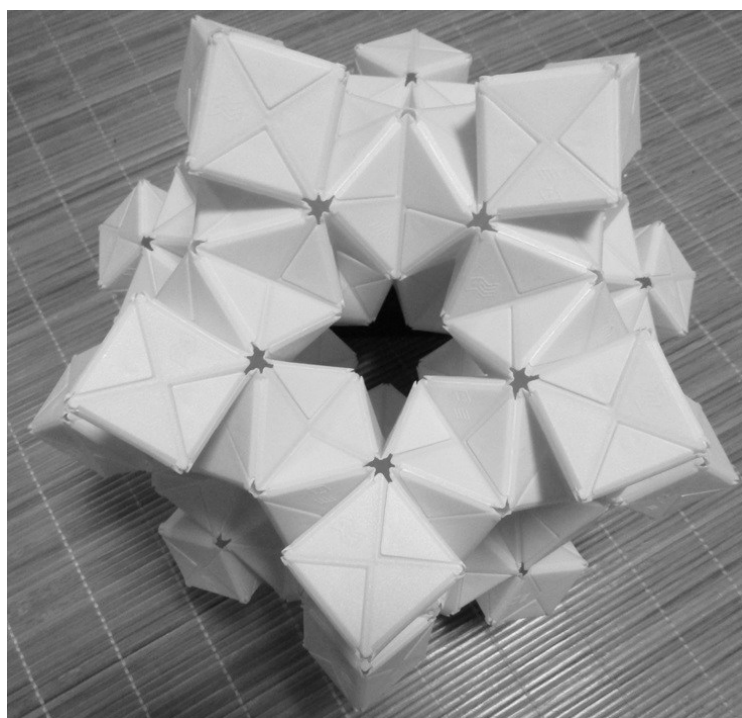
て正三角錐にすると、正4面体は正六面体(立方体)になる。これが、アイガミによる、分子模型作りの出発点だ。このやり方で模型を作ると、正12面体の構造の外側に構造ができる。内部に星形の隅間ができる。ここで初めて、正10角形構造の可視化が起こる。

準結晶研究では、基本構造は「正20面体」である。しかし私たちが提案している準結晶模型では、基本の立体は「正12面体」である。対称の軸は5回3回2回回転対称で、同じで、双対の関係にあるので、特に取り上げなくてもいいようなものだが、正4面体を正6面体で表現することがベースとする幾何学を「内部構造」が表現可能になるものにしていくのかもしれない。

手前の星形の隙間と、180度回転した向こう正面の倒立した星形の隙間を、自分の脳の中で重ね合わせると、「正10角形」ができる。これと同じことが、結晶研究の中でも起こったのではないかと、というのが今回の提案である。える。

原子配列の秩序について、秩序がないとされるアモルファスでさえ、図示するときは原子同士を線でつなぐのに、なぜ準結晶では球殻の結合が表現されることが少ないのか?それは、内部の構造が表現できない幾何学を使っているからではないだろうか?

アイガミで分子構造を表現するときは、正4面体は、立方体で表現される。これは3次元から次元を一つ上げていると説明されている。正4面体の正三角形の面の、中点を引っ張り上げ



<写真 3>5回回転対称軸方向から撮影した、センターモチーフの全体像。これを手前に十分引いて星形の大きさが同じになれば正10角形に見える。

<参考文献>

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

# ケプラー問題の<sup>かたち</sup>解空間

杉本 剛

本朝数理家@水磨坊

## The Solution Space in the Kepler Problems

Takeshi Sugimoto

Applied Mathematician in the Watermill Cabinet

**Abstract:** The direct Kepler problem, which Newton solved for the first time in the human history, is the task to induce physics behind Kepler's first and second laws. Newton broke through the problem by use of classical geometry and novel limiting operations. Today by use of vector analysis a new passage of the solution starts from Kepler's first law, by way of conservation of the kinematics on the orbits, and arrives at the inverse-square law of gravitation as well as Kepler's second law at the same time. Kepler's first law is revealed essential to generate everything. The inverse Kepler problem is the task to look for the loci of the solution to the inverse-square law of the gravitation. This was solved in an incomplete manner by Jakob Hermann. This problem is also rewritten by use of the vector analysis. The structure of the solution space in the direct and inverse Kepler problems is shown. Kepler's third law, derivative in its nature, is also confirmed within the same formalism.

**keywords:** the Conic Sections, the Inverse Square Law of Gravitation, Kepler's Laws

### 1. いとぐち

Tycho Brahe (1546-1601)の助手として働き、Tycho の死後は、天の観測データを受け継いだのが Johannes Kepler (1571-1630)である。Kepler は太陽系の惑星の運行の法則性を(最終的には)みつつの法則にまとめた。

第一法則：惑星の軌道は、太陽を一つの焦点に置く楕円である。

第二法則：惑星の面積速度は一定である。

第三法則：T を公転周期、a を楕円軌道の長径とすると、「 $T/a^3=$ 普遍定数」となる。

Kepler の死後、「楕円軌道の背景にある物理法則を導く問題」をケプラー順問題、「その物理法則に立脚して、楕円軌道がその解になること」を示す問題をケプラー逆問題と称した。まずはケプラー順問題を解くのが急務だった。これは Isaac Newton (1642-1727)が解いて、略称 Principia (初版 1687 年)にまとめた。Newton は同書の中で、逆問題も解いたと言っているが、結果は正しくなかった。逆問題はベルヌーイ学派の Jakob Hermann(1678-1733)によって 1710 年になされた。

本研究は、万有引力の法則の近似解であるケプラー問題を、ベクトル解析の技法を用いて書き直していく試みである。円錐曲線軌道から出発して、微分を繰り返してゆけば、引力の逆二乗則および面積速度一定という結論が得られる。逆二乗則から出発して、積分を繰り返せば、円錐曲線軌道が得られる。ただし、その道のりは自明ではなく険しい。

### 2. 解空間の見える化

次ページの Fig. 1 に示す。解説は口頭発表に譲る。



## Goldman括弧積を用いたループの分離判定法

和久田葵

東京大学大学院数理科学研究科  
〒153-8914 東京都目黒区駒場3-8-1  
aoichan19991226@g.ecc.u-tokyo.ac.jp

### Separability criteria for loops via the Goldman bracket

Aoi Wakuda

Graduate School of Mathematical Sciences, The University of Tokyo  
3-8-1 Komaba, Meguro-ku, Tokyo 153-8914, Japan

**Abstract:** Let  $\Sigma$  be an oriented surface, and let  $\pi$  denote the set of free homotopy classes of loops on  $\Sigma$ . Goldman introduced a Lie bracket on the vector space generated by  $\pi$ , called the Goldman bracket, which encodes intersection information of loops. Goldman proved that if one of two loop classes is simple, then the vanishing of the Goldman bracket is equivalent to the existence of disjoint representatives. However, Chas showed that this equivalence does not hold in general. In this talk, we provide algebraic criteria using the Goldman bracket to determine whether two free homotopy classes of loops admit disjoint representatives without assuming simplicity. Our method uses powers of loops and hyperbolic geometric arguments. As an application, we determine the center of the Goldman Lie algebra of a pair of pants.

**Keywords:** Goldman bracket, free homotopy class, separability, hyperbolic geometry, Lie algebra

#### 1. Introduction

Let  $\Sigma$  be a connected oriented surface, and let the set of free homotopy classes of loops on  $\Sigma$  be denoted by  $\pi$ .

Goldman introduced a Lie bracket on the vector space generated by  $\pi$ , called the Goldman bracket, which reflects the intersection behavior of loops.

If one of two loop classes is represented by a simple closed curve, Goldman proved that the vanishing of the Goldman bracket is equivalent to the existence of disjoint representatives.

However, this equivalence does not hold in general without the simplicity assumption. This motivates the problem of finding algebraic criteria for separability of arbitrary loops.

#### 2. Main Result and Application

We study Goldman brackets involving powers of loops.

Our main result shows that for arbitrary loop classes, the vanishing of brackets of suitable powers determines whether the two classes admit disjoint representatives.

Thus, separability can be detected algebraically without assuming simplicity.

The proof uses hyperbolic geometry and geodesic representatives of loops.

As an application, we determine the center of the Goldman Lie algebra of a pair of pants.

We prove that it is generated by the null-homotopic loop and loops winding around a single boundary component.

This extends previous work of Kabiraj and gives a concrete example of how separability criteria describe algebraic structures of loop algebras.

#### References

- [1] W. M. Goldman,  
Invariant functions on Lie groups and Hamiltonian flows of surface group representations,  
*Inventiones Mathematicae*, Vol. 85 (1986), pp. 263-302.
  
- [2] M. Chas,  
The Goldman bracket determines intersection numbers for surfaces and orbifolds,  
*Duke Mathematical Journal*, Vol. 150 (2009), pp. 519-560.
  
- [3] A. Kabiraj,  
The center of the Goldman Lie algebra of surfaces,  
*Algebraic & Geometric Topology*, Vol. 16 (2016), pp. 301-327.

## こどもと Ai で創る新しいおもちゃ (第二報)

八坂 青志

一般社団法人 京都総合科学研究所

〒600-8427 京都市下京区松原通烏丸西入ル玉津島町 294 コモンルーム四条烏丸 2F

Seiji.Yasaka@mac.com

### The Toys Created by Children and Ai

Seiji.Yasaka

Kyoto Institute of General Science.Inc

294 Tamatushima-cyo, Shimogyo-ku, Kyoto,Japan

**Abstract :** In my presentation at the 94th Symposium on the Science of Shape in 2023\*1, I quoted Dr. Alan Kay\*2, stating that "current PC technology has not yet implemented anything truly new." As a challenge to create something "new," I conceived of a concept for generative AI (Chat-GPT) and block toys created by children, the most innocent beings. This report details the first stage of research conducted in a virtual space, and I am pleased to report that we have made some progress. The ultimate goal of this research is to provide a new means of communication that conveys the "feelings" within one's heart by thinking about shapes.

**Keywords:** # Generative-Ai , # Children# NewTypeToy , # Beyond The Comon Messaging

#### 1. 前提

目標を達成するためのこの研究成果の前提を以下のように考えた。

- ・子供が形、機能(動作、ふるまい)を、画像、ことば等でAiに伝え Aiがおもちゃの形を導出する。
- ・生成できるおもちゃの範囲は汎用とし、特定の形(ガンダム、大阪城 etc)専用としない。
- ・おもちゃは、決まった形(正四面体)のブロックの組立とし3Dプリンタ成型組立方式にしない
- ・おもちゃの組立ては人間(こども)の組立、自動組み立て機の両方ができるようにする。
- ・おもちゃの生成は、生成過程を組立スクリプトとして記録し、時空を超えて再生できるようにする。

#### 2. プロジェクトステップ

私たちはプロジェクトを進める研究プロジェクトフェーズを以下のように考えている。

Phase0 コンピュータ上の仮想空間でのシュミレーション

コンピュータ上の仮想空間における Ai によるモデル(おもちゃ)の生成。

Phase1 実空間における形のあるブロックおもちゃの生成

実空間における実ブロックおもちゃの設計と設計図に基づく手動組立ての実現

Phase2 動くおもちゃと自動組立ての実現

駆動モデル、機能付加モデル(動くおもちゃ、機能するおもちゃ)の生成

スクリプトを介しての自動組み立て機の作成

Phase3 反応するおもちゃとリモート再生機能の実現

機能部品の追加開発による機能付加と自動生成メカニズムに基づくリモート生成機

未来 Phase 生成 Ai の機能の拡大により以下の事項も適時検討する

- ・おもちゃ機能とVR空間、MR空間との融合
- ・子供 Ai おもちゃの商品化に向けての対応・改良

#### 3. 研究実証環境

研究実証環境 • Ai環境 ChatGPT3.0 Python3.10

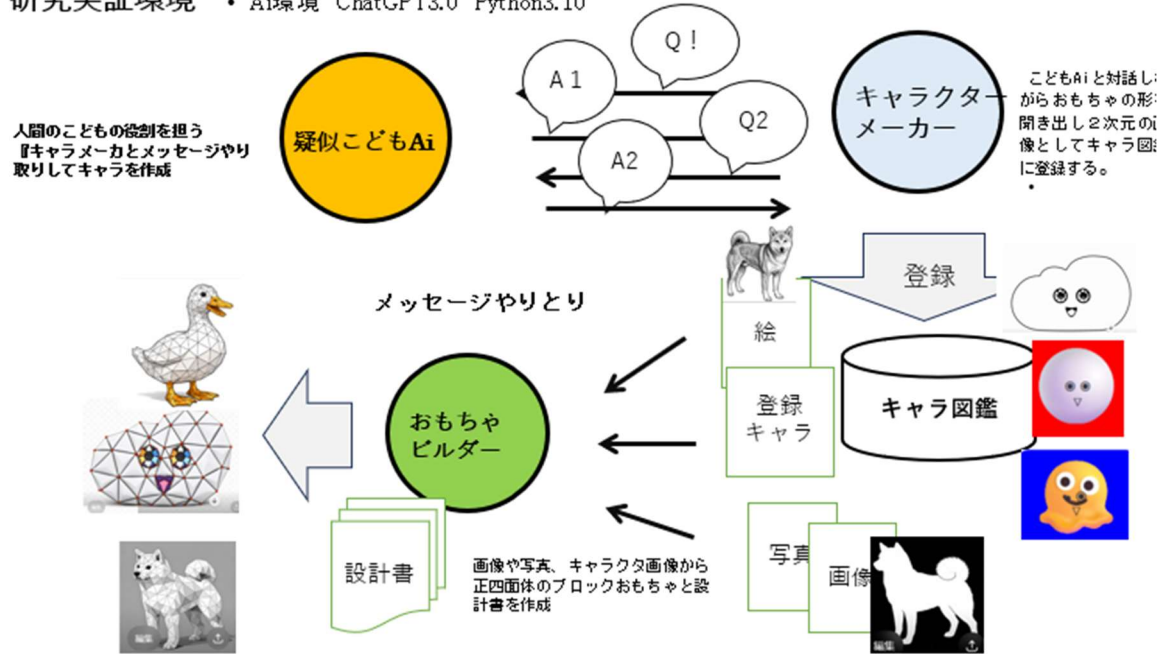


図1 研究環境と手順

#### 4. 研究環境・結果

・現段階での問題点・課題

- おもちゃの解像度(ブロックの数)とおもちゃの大きさと組立ての難易度調整
- 駆動おもちゃのバランスと駆動動力の検討
- 機能(ふるまい)の定義と能動機能部品の設計・開発、集積度 UP
- 簡易ロボティックスの機能設計とメカニズム部品ブロックへの内臓
- 自律機能の設計、部品への組込
- Aiの生成するおもちゃの形、機能の教育的効果の『答え』の組込
- 自動組み立て機(組み立てドーム)の縮小化(玉手箱化)
- 商品化・一般化にあたり、Aiの著作権、肖像権、教育性、倫理性の考慮

#### 5. まとめ

今回の報告は、おもちゃの形を仮想空間で表現することができるようになったにすぎないが我々の最終目標は以下のことを可能とすることである。

- おもちゃの形や機能を自分の思う通りに自由にブロックを組み立て生成できる
  - 生成したブロックおもちゃを時空を超えて再成できる。
- これにより、自分の思いを他の人々に(また将来の自分に)思いを伝えることができる。
- 文字、言葉、絵画、ジェスチャ、音楽によらない新しいコミュニケーション手段とすることができる。

※1 第94回形の科学シンポジウム セッション4「子供とAIが作るおもちゃ」の構想

※2【DiTTへのメッセージ】アラン・ケイ Alan Kay (2010, 7, 27)

・一般社団法人デジタル教科書教材協議会(現:一般社団法人超教育協会)HPより

## Evaluation of Methods for Determining the Embedding Delay $\tau$ in Biological Time-Series Analysis

Fumitaka Ishiwata, Hiroki Takada

Graduate School of Engineering, University of Fukui, 3-9-1 Bunkyo, Fukui 910-8507, Japan  
mf250045@g.u-fukui.ac.jp

**Abstract:** This study investigates the impact of simulator sickness on the dynamic stability of biological signals during VR immersion. We evaluated three methods for determining embedding delay—Autocorrelation Function (ACF), Average Mutual Information (AMI), and Translation Error (TE)—to identify the optimal phase-space reconstruction for center of pressure (COP) and gaze dynamics. Experimental results revealed a negative correlation ( $r = -0.195$ ) between the Largest Lyapunov Exponent (LLE) and SSQ scores, suggesting that a loss of adaptive fluctuation in gaze and postural control is a key indicator of simulator sickness.

**Keywords:** Nonlinear time-series analysis; Embedding delay  $\tau$ ; Phase-space reconstruction; Postural control; Oculomotor dynamics

### 1. Introduction

The objective of this study is to clarify how simulator sickness induced by VR video viewing affects phase-space reconstruction of biological signals. We focus on two physiologically distinct signals—gaze dynamics and center of pressure (COP)—and compare three methods for determining the embedding delay  $\tau$ : the Autocorrelation Function (ACF) [1], Average Mutual Information (AMI) [2], and Translation Error (TE) [3]. We examine how the degree of sickness alters the deterministic structure estimated from each signal type.

### 2. Methods

Thirty participants underwent the following protocol. Baseline COP was measured for 60 s (Pre). Participants then viewed driving videos four times (20 s each) via a head-mounted display (HMD) and a large-screen display (LSD), with gaze recorded by an eye tracker. COP was re-measured after all viewing sessions (Post). Subjective sickness was assessed using the Simulator Sickness Questionnaire (SSQ) before and after exposure. Embedding delay  $\tau$  was estimated from each time series using ACF, AMI, and TE. The LLE was computed using the Rosenstein algorithm [4], with surrogate analysis applied to test for deterministic nonlinearity.

### 3. Results

Figure 1 shows the distributions of the estimated time delay ( $\tau$ ) for both center of pressure (COP) under open-eyes condition (left) and gaze signals (right). For COP, the autocorrelation function (ACF) yielded large  $\tau$  values ( $\sim 100$  samples), the average mutual information (AMI) produced moderate values ( $\sim 15$ – $20$  samples), and the translation error (TE) collapsed near zero, indicating difficulty in resolving a meaningful decorrelation lag in this low-frequency postural signal. In contrast, for gaze signals, TE yielded stable non-zero estimates, demonstrating a clear interaction between estimation method and signal characteristics. Figure 2 presents LLE distributions and surrogate Z-scores; most values remained below the 95% significance threshold ( $Z = 2.0$ ), indicating weak determinism in COP under VR exposure. Figure 3 demonstrates a negative correlation ( $r = -0.195$ ) between LLE and SSQ total score for both Gaze and COP at the Post condition.

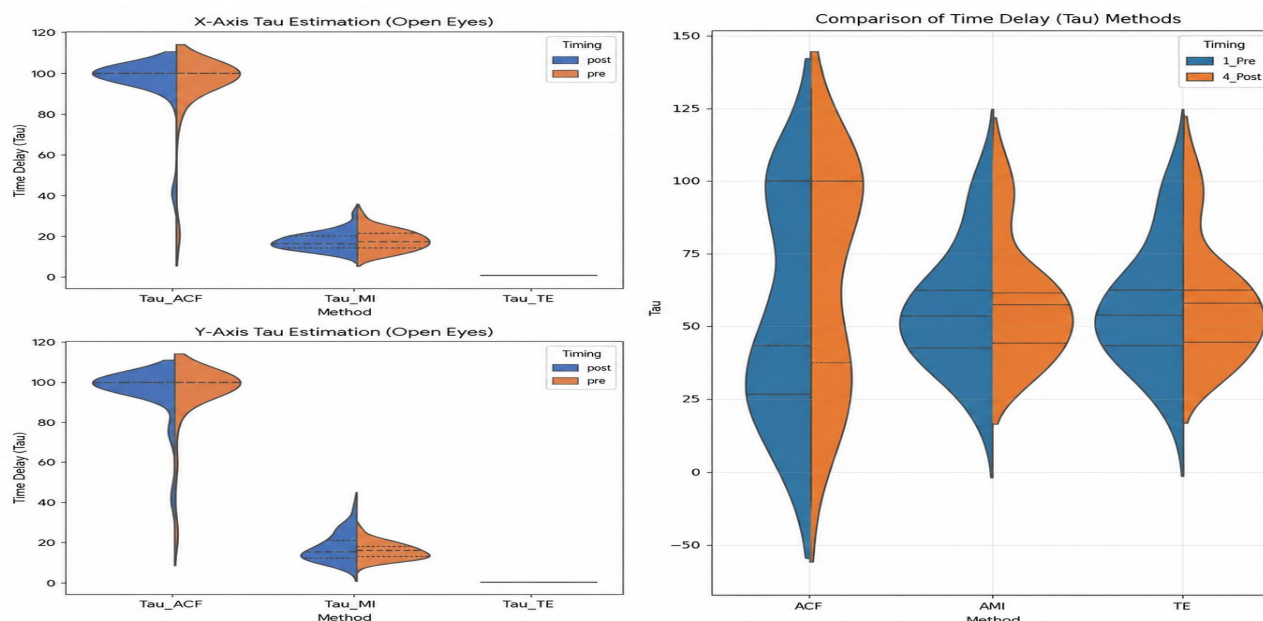


Figure 1. Comparison of Time Delay ( $\tau$ ) Estimation Methods Using Autocorrelation, Mutual Information, and Translation Error: Center of Pressure (COP) under Open-Eyes Condition (Left) and Gaze Signals (Right)

#### 4. Discussion

The contrast between COP and gaze in TE performance highlights signal-specific method dependence. TE relies on nonlinear predictability and is sensitive to the time-series length; the low sampling rate of COP lacks sufficient temporal resolution for TE to detect a meaningful decorrelation lag, whereas gaze dynamics provide adequate frequency content. AMI outperformed ACF for gaze owing to its sensitivity to nonlinear dependencies [2]. The negative LLE–SSQ relationship is consistent with the loss-of-complexity hypothesis [5]: sickness suppresses the healthy adaptive variability inherent in biological control systems. These findings indicate that appropriate selection of the state-space reconstruction method is essential for the objective evaluation of simulator sickness.

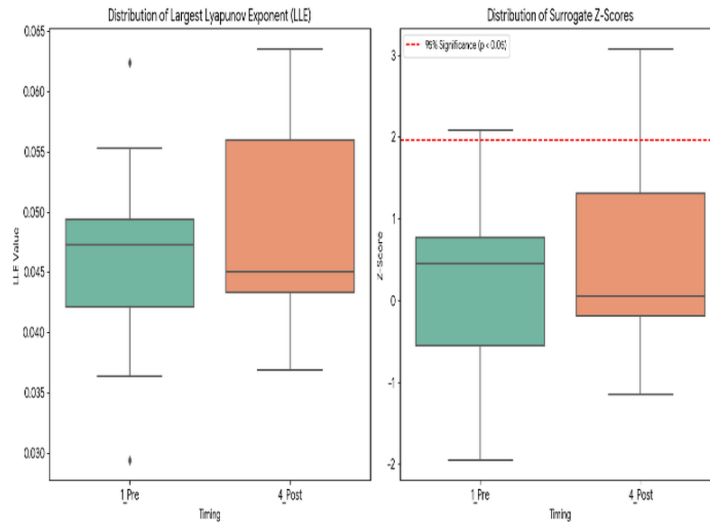


Figure 2. LLE distribution and surrogate Z-scores for Gaze (Pre/Post). Dashed line: 95% significance threshold ( $Z = 2.0$ ).

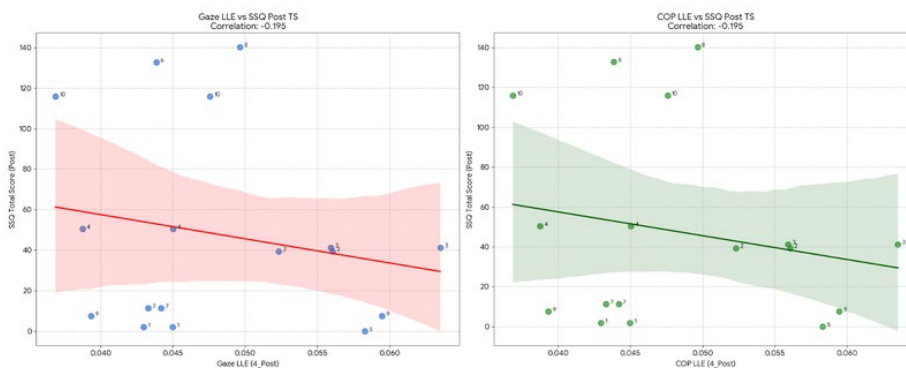


Figure 3. Scatter plots of LLE vs. SSQ total score for Gaze (left) and COP (right) at Post condition ( $r = -0.195$ ).

#### 5. Conclusion

The choice of embedding delay method critically affects phase-space reconstruction quality in biological signals. AMI and TE are preferable for fast signals such as gaze, while ACF provides a stable conservative estimate for slow postural data. The observed decrease in LLE with increasing sickness supports the hypothesis that VR-induced simulator sickness impairs adaptive complexity in both gaze and postural control systems.

#### References

- [1] Fraser, A. M., & Swinney, H. L. (1986). Independent coordinates for strange attractors from mutual information. *Physical Review A*, 33(2), 1134–1140.
- [2] Cao, L., Mees, A., & Judd, K. (1998). Dynamics from multivariate time series. *Physica D*, 121(1–2), 75–88.
- [3] Takens, F. (1981). Detecting strange attractors in turbulence. *Lecture Notes in Mathematics*, 898, 366–381. Springer.
- [4] Rosenstein, M. T., Collins, J. J., & De Luca, C. J. (1993). A practical method for calculating largest Lyapunov exponents from small data sets. *Physica D*, 65(1–2), 117–134.
- [5] Lipsitz, L. A., & Goldberger, A. L. (1992). Loss of complexity and aging. *JAMA*, 267(13), 1806–1809.
- [6] Kennel, M. B., Brown, R., & Abarbanel, H. D. I. (1992). Determining embedding dimension for phase-space reconstruction. *Physical Review A*, 45(6), 3403–3411.

## 肝組織の病態メカニズム解明に向けた画像解析と疾患動態モデルの統合

対島 陸太<sup>1,#</sup>, 昌子 浩登<sup>1</sup>

<sup>1</sup> 関西学院大学大学院理工学研究科数理科学専攻, 三田市学園 2-1

# hcc57499@kwansei.ac.jp

## Integrating Image Analysis and Mathematical Modeling to Elucidate Liver Pathogenesis

Rikuta Tsushima<sup>1</sup>, Hiroto Shoji<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Kwansei Gakuin University, Gakuen, Sanda, 699-1330, Japan

**Abstract:** Liver diseases often progress through morphological changes in tissue; therefore, accurately quantifying these changes is essential for understanding the underlying pathology. This study proposes a novel method to extract subtle morphological changes in liver tissue from stained images and to quantitatively evaluate the degree of disease progression. Furthermore, based on the acquired data, we compared and validated existing models of morphological transformation from a mathematical perspective, aiming to elucidate the mechanisms underlying disease progression and to explore the potential for predicting future disease states.

**Keywords:** Liver Diseases, Image Analysis, Mathematical Modeling

### 1. はじめに

慢性肝疾患は、持続的な炎症を起点として線維化が進行し、最終的に肝硬変等の重篤な病態へと至る。その過程において、活動性炎症から混在期を経て線維化維持期へと至る時空間的な病態を遷移する[1]が、病理画像の目視による進展度の定量評価は主観的な判断を排除できず、高分解能な解析には限界がある。そこで本研究では深層学習ネットワークの一種であるU-Netを用いたセグメンテーションにより炎症・線維化領域を個別に抽出した。これらを組織の「状態」として定義・定量化することで、疾患進展プロセスを客観的に評価する手法を構築するとともに、数理モデルを通じてその進展メカニズムの解明を計算科学的に解明することを目的とする。

### 2. 研究方法

肝疾患モデルラットの肝臓切片(0, 4, 8, 12, 16週負荷)に対し、炎症評価用のHE染色を行い画像を得た後、続いて線維化評価用のAzan染色を施して得た画像を再度取得した。各画像から対象領域を抽出するため、U-Netによるセグメンテーションを行った。標本上の特徴点を基準とした幾何学的変換による位置合わせ(Resistration)を実施し、炎症と線維の各ドメインにおける空間情報を抽出した。独立に算出された推論結果を統合アルゴリズムにより合成し、組織状態を炎症状態、線維化あるいは混在状態などの多値化することで、画素レベルでの微細な進展度評価を実施した。

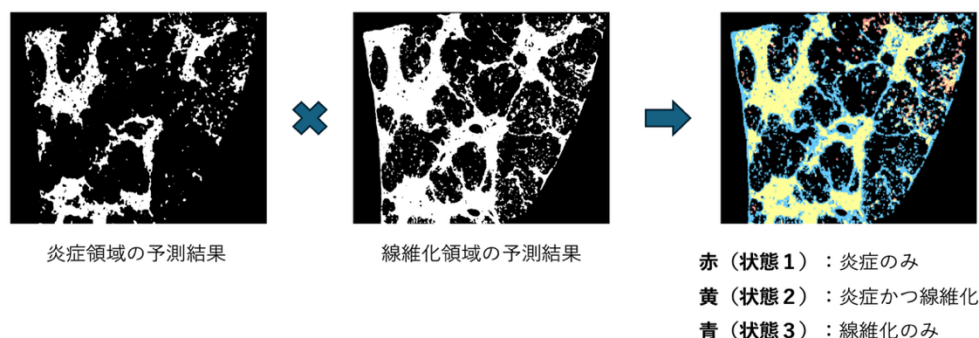


図1: 3状態の分類手法

[2]の方法に習って, U-Net によるセグメンテーションから得られた各負荷期間における炎症領域および線維化領域の面積, ならびに定義した組織状態の占有率を観測データとして扱い, 疾患の動態を記述する数理モデル(常微分方程式)の最適化を行なった. 具体的には, これら時系列データに対し, 疾患動態を記述する数理モデルを適用し, 最尤推定法を用いてモデルパラメータの最適化を実施した. これにより, 画像解析に基づく幾何学的情報を, 時間発展を伴う動的な数値データとして数理モデルへ内包(integrate)させる解析手法を構築した.

### 3. 動態解析とモデル選択

画像解析により得た各領域の面積推移(図2)および3状態の面積占有率を時系列データとして用い, 疾患進行の動態解析を行なった. 炎症・線維化の相互作用を数学的に記述するために, 2変数および3変数の常微分方程式系からなる複数のモデルを構築し, 実データへの適合をフィッティングを実施した. 最尤法によるパラメータ推定に加え, 赤池情報量規準(AIC)に基づくモデル選択を行うことで, 観測データの推移を最も適切に説明し得るモデル構造および相互作用機構を統計的に同定した. 本解析により, 炎症から線維化維持期へ至る病態遷移プロセスの定量的評価を実施した.

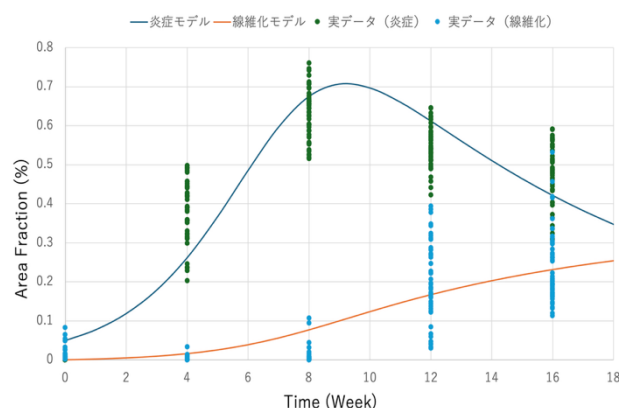


図2: 炎症・線維化領域の推移(モデルと実データ)

### 4. 考察

本検討は現在解析の途上にあるが, 画像解析による定量値と数理モデルを統合した解析系を構築した. 実データへの適合は概ね良好であり, 今後はAICによるモデル選択の結果に基づき, 病態遷移を記述する最適なモデル構造や各パラメータの生物学的妥当性について, 当日の発表にて詳細に議論を行いたい.

### 参考文献

- [1] A. Sanyal *et al.*, *Zakim & Boyer's Hepatology: A Textbook of Liver Disease*, 17th-ed. Elsevier, (2018).
- [2] M. Hashizume ed. *Multidisciplinary Computational Anatomy*, Springer, (2020).

## ラット脂肪肝における線維化領域の 2D・3D 解析と

### 成長ダイナミクスの比較解析

近藤 あげは<sup>1,#</sup>, 昌子 浩登<sup>1</sup>

<sup>1</sup> 関西学院大学大学院理工学研究科数理科学専攻, 三田市学園 2-1

# god58496@kwansei.ac.jp

## A Comparative Analysis of Two- and Three-Dimensional Characterization of Fibrotic Regions and Their Growth Dynamics in Rat Fatty Liver

Ageha Kondo<sup>1</sup>, Hiroto Shoji<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Kwansei Gakuin University, Gakuen, Sanda, 699-1330, Japan

**Abstract:** The liver is composed of hepatic lobules as its basic structural unit. To analyze liver fibrosis at the lobular scale, approximately 100 serial sections with a thickness of 10  $\mu\text{m}$  are required, which imposes a substantial burden in terms of slide preparation, imaging, and image analysis. Therefore, it is necessary to examine whether a reduced number of histological images can be used as a substitute. In this study, 2D and 3D data were compared using statistical methods. Furthermore, Physics-Informed Neural Networks (PINN), which incorporate both data and physical laws during learning, were used to estimate the growth dynamics of fibrotic regions.

**Keywords:** 2D/3D data analysis, image analysis, PINN

### 1. はじめに

肝臓のミクロ構造において、血管系を中心としたネットワークは三次元的に構成されている。そのため、肝臓の形態変化を調べるためには、三次元的な観察と解析が必要である。基本単位である肝小葉はおよそ  $1\text{mm}^3$  の大きさをもつため、三次元構造を考えるには、10  $\mu\text{m}$  厚の連続切片であれば、約 100 枚作製する必要がある。しかし、多数の切片の取得および解析は、実験的にも計算的にも大きな負担となる。したがって、これまで従来広く用いられてきた切片画像に帰結二次元データからどの程度本質的な情報を抽出できるかを検討することが重要である。

### 2. 方法

高脂肪高コレステロール食を継続的に 0 週、4 週、8 週、12 週、16 週投与した脂肪肝ラットモデルを 2 個体ずつ作製し、1 個体につき 5 か所ずつ肝臓の一部を採取した。肝臓の切片の作成・染色方法は[2]に記載された方法に従った。

線維化領域の抽出には、画像セグメンテーションのネットワークの一種である U-net を用いた。3D データは連続切片 100 枚として構成し、2D データは 3D データ

100枚のうちからランダムに数枚抽出したものとした。2D および 3D データそれぞれについて統計量の計算を行い、比較を行った。

線維化領域の成長ダイナミクスの推定には、データと物理法則の両方に適合するよう学習するニューラルネットワークである Physics-Informed Neural Networks (PINN) を用いた。PINN には物理損失とデータ損失の和として定義される全体損失があり、これが最小となるように学習する。PINN に組み込む物理法則は、一般化ロジスティックモデル、ゴンペルツモデル、フォン・ベルタランフィモデルの3つを用いた。

### 3. 結果と考察

各継続投与期間の 3D データについて、2 個体・各個体 5 か所の計 10 か所それぞれで、連続 100 枚の切片から算出した平均値の平均および分散を表 1 に示す。講演では、2D データのサンプリング条件を変えた場合を比較し、3D データをどの程度正確に復元できるかを、誤差や不確実性も含めて議論する。また、疾患領域の時間的成長を考慮した微分方程式モデルへの適合性についても評価した。PINN による解析結果は図 1 に示す通りである。全体損失は、どちらも一般化ロジスティックモデルが最小となった。さらに、一部の条件では 3D データより 2D データの方が全体損失が小さくなる場合もあった。その他の詳細は講演にて報告する。

表 1: 各継続投与期間の 3D データ (10 サンプル) における平均値の平均および分散

	0 週	4 週	8 週	12 週	16 週
平均 (%)	0.358698	0.644683	6.297691	17.11005	25.18375
分散	0.072771	0.394625	6.297691	60.09408	49.29351

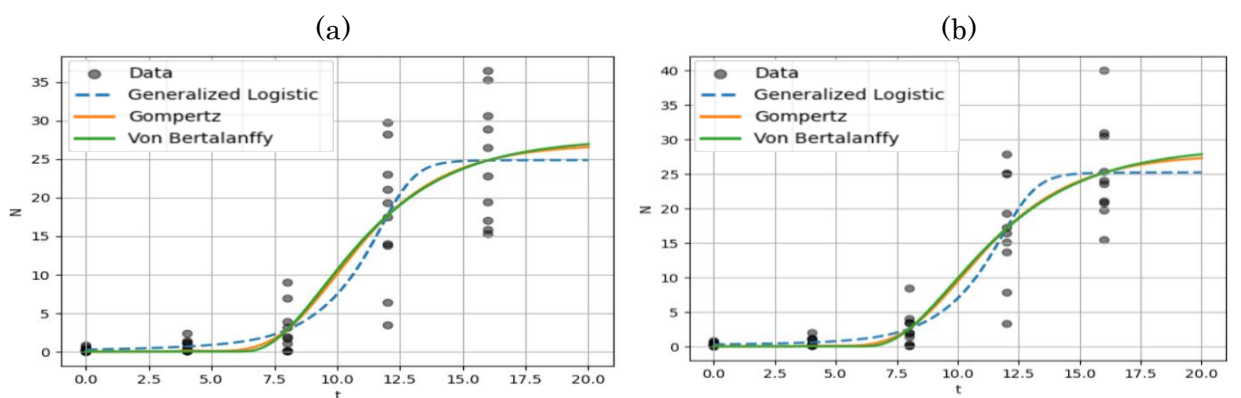


図 1: PINN による解析結果 (a) 2D (ランダムに 1 枚抽出) (b) 3D

### 参考文献

[1] 上田 稜真・昌子 浩登. 染色像の立体構築像による肝疾患の線維化領域の定量的評価. 形の科学シンポジウム講演予稿集, 10(1), p31-32(2025)

## 大腸の大規模ループの巻きはミクロスコピックな細胞の性質でできる

本多久夫

hihonda@hyogo-dai.ac.jp

神戸大学大学院医学研究科 (神戸市中央区楠町 7-5-1)

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

The handedness of the large intestinal loop is defined by its microscopic cellular properties

Hisao HONDA

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

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

**Abstract:** The large intestine forms a loop that extends throughout the body cavity. Despite its large-scale size, it is neatly arranged in the form of a left-handed helix. We are wondering whether the morphogenesis of such a structure could be understood based on microscopic cells. Recently, it was revealed that the twisting of the tube can be understood through the anisotropy of its constituent cells. Additionally, we know that twisting and looping belong to the same topology and can easily convert into each other via “twist-to-loop conversion”. So, using a mathematical model (vertex dynamics), we examined and confirmed that a long twisting tube representing the large intestine would convert into a loop easily without any biological assistance.

**Keywords:** large intestine, twist, loop, helix

大腸のループ形成については一昨年に報告したが (本多 2021)、その後、より実際に近いシミュレーション結果を得たので再度報告する。

形態形成は遺伝情報に基づいて行われていると考えられている。その道筋を明確にしたい。DNA 情報によってタンパク質ができて多くの機能が発現し、これによる細胞の形態や行動が明らかにされつつある (本多 2024)。多細胞体の形態形成を、その構成単位である細胞に基づいて理解したいのだが (Honda & Nagai 2022)、大腸の形態の場合、体内に大きく広がったこの巨大な構造体をはたしてミクロな細胞の性質によって理解できるだろうか、ここには何か別の原理が働いているのではないかとの思いが生じる。この疑問について形態のサイズは問題にしないで、ループの巻き方向に注目して調べた結果を述べる。

【ねじれ-ループ転換】とよぶべき変形があることに気がついた (Honda 2021)。生物関連とはかぎらない物体でだが、細長い物を長軸まわりにねじると容易にヘリックスループに変る (図 1)。ここでは一つひとつの構成単位が 3D 的なものも含めた小さな変形をすることで転換を起こしている。

そこで消化管に似せたまっすぐで長い円柱型チューブをつくり、数理モデル(vertex dynamics)を使って【ねじれ-ループ転換】が起こりうるものかどうか

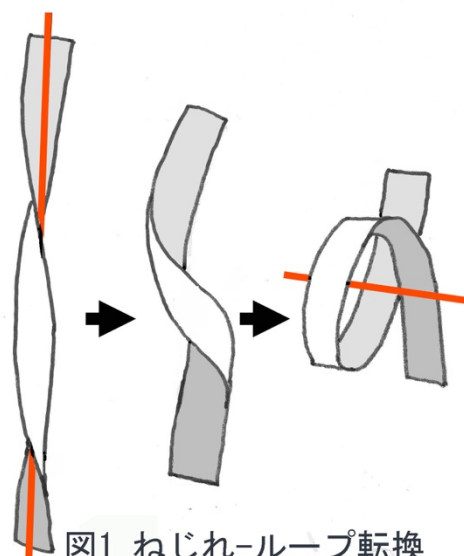


図1 ねじれ-ループ転換

調べた。チューブの側面は、多角形により隙間も重なりもなくおおわれている(図2  $t=0$ )。ここに多角形の右斜めの辺だけ強く収縮するという異方性を仮定すると、チューブ側面は円柱軸のまわりに左巻きにねじれる。このとき、辺の異方性を仮定しながら図2 ( $t=100$ ) に示すように、チューブの上

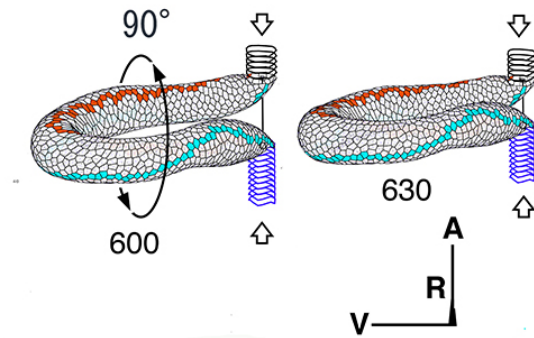
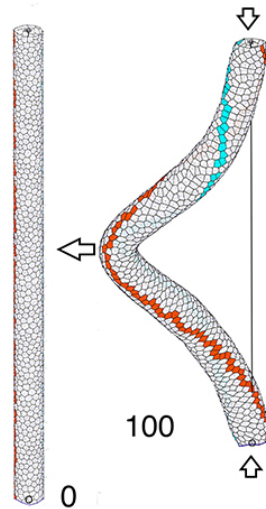


図2 ヘアピン形成

下端を互いに近づけると、チューブは屈曲しこれが進んでヘアピン構造をつくるようになる( $t=600$ )。このヘアピンは腹側から見て、ヘアピン軸まわりに  $90^\circ$  逆時計回りに回転している。この回転は実際の体腔内の腸管の観察と一致している。

この後、ヘアピン構造の anterior (口につながる) 半分は激しく屈曲して小腸になる。他方、posterior (肛門につながる) 半分は図3に示すように、ループ形成が進み左巻きらせんループになり( $t=500$ )、この後、らせんループは前額面(frontal plane)に展開する(図3  $t=900$ )。この前額面に展開する左巻きらせんループは実際の観察と一致している。

以上の結果から細胞のようなマイクロなものの性質がチューブにねじれを生じ、このねじれが非生物学的世界でも見られる立体的幾何学的変形を経て、巨大な物体のループに反映する道筋があることがわかった。

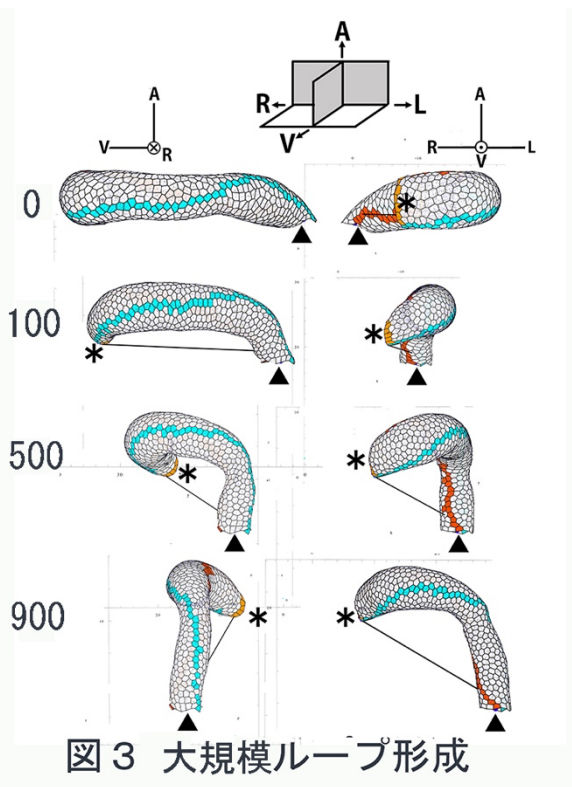


図3 大規模ループ形成

[図中の記号: A, anterior; V, ventral; R, right; L, left. \*, ▲, 位置のアイデンティフィケーション. 数字はシミュレーション時間  $t$  を示す]

文献

- 本多久夫2024『DNA からの形づくり-情報伝達・力の局在・数理モデル』共立出版
- Honda, H. and Nagai, T. 2022 “Mathematical models of cell-based morphogenesis” Springer
- 本多久夫2021 消化管 大腸ループの形成 第96 回形の科学シンポジウム (関西学院大学 2024.6/23)
- Honda, H. 2021 Left-handed cardiac looping by cell chirality is mediated by position-specific convergent extensions. *Biophys. J* 120, 5371-5383

# Symmetry Festival 2027

**Dates: Summer 2027** (possibly the last week of July or the first week of August)

**Venue: Tokyo or its surrounding area**

Organizer: The International Symmetry Association

Co-organizer: Society for Science on Form, Japan (形の科学会)

The World's Largest Interdisciplinary Festival in Symmetry Studies:  
Celebrating Science, Culture, and Art

(Reference)

Symmetry Festival 2024 – Pisa

<https://festival.symmetry.hu/>

# 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)、論説(commentary)、講座(単発および連載)、エッセイ、交流、ニュースなどを掲載します。投稿規定の詳細は、下記サイトをご覧ください。

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

# 形の科学シンポジウムを開催しませんか？

## シンポ代表世話人を募集します

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

<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@chibatech.ac.jp](mailto:yoshinori.teshima@chibatech.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。 <https://katachi-jp.com/nyukaiannai>

## 《インターネットによる入会手続き》

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

## 《E-mailによる入会手続き》

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

## 《郵送による入会手続き》

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

————— 切り取り線 —————

会員登録カード （記入日： 年 月 日）

氏名： 氏名フリガナ：

生年月日： 年 月 日

連絡先選択：勤務先・自宅・出張先（一つだけ残す）

勤務先名称：

勤務先郵便番号：〒

勤務先住所：

勤務先電話： 勤務先 FAX：

勤務先 Email：

自宅郵便番号：〒

自宅住所：

自宅電話： 自宅 FAX：

自宅 Email：

主要活動分野（20字以内）：

形関連の興味（箇条書きで各20字以内）：

備考（出張宛先, etc.）：

————— 切り取り線 —————

【形の科学会事務局】

〒150-8366 東京都渋谷区渋谷4-4-25

青山学院大学経営学部経営学科

塩澤 友規 宛

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

（[at]を半角の@で置き換えてください）

# セパタクローボールの構造の一般化について

松田能文

青山学院大学理工学部, 神奈川県相模原市中央区淵野辺 5-10-1

ymatsuda@math.aoyama.ac.jp

## Generalization of the structure of a speak takraw ball

Yoshifumi Matsuda

Aoyama Gakuin University, College of Science and Engineering,

Fuchinobe, ChuoKu, Sagamihara-shi, Kanagawa

**Abstract:** We discuss generalizations of structure of a speak takraw ball. We consider great circles on the sphere associated with major diagonals of regular polyhedra and propose another generalization.

**Keywords:** speak takraw ball, quasi-regular polyhedron, great circle, equiangular lines。

### 1. セパタクローボール

セパタクローは東南アジア発祥の球技で, そのボールは, 帯を編んだ対称性の高い構造をしている。セパタクローボールの構造をモデル化し, そのモデルの類似を考えることにより, セパタクローボールの構造を一般化することについて議論する。

### 2. 二十十二面体

本発表では, モデル化の際, 帯の幅を無視する。また, 帯の上下交差も無視してモデルを考えることにする (上下交差も考慮した, 3次元空間内の絡み目によるモデル化については[2]で議論している)。

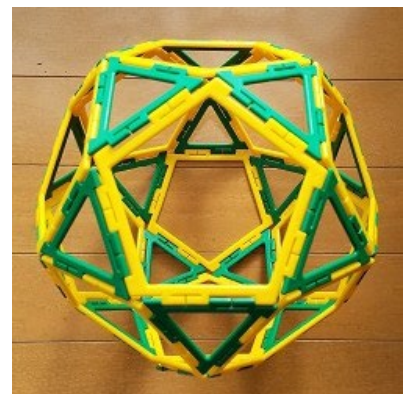
セパタクローボールは, 12個の穴と20個の交点(帯が三すくみ状に交わっている箇所)をもつ, と定められている。穴を正五角形, 交点を正三角形に対応させると, 二十十二面体と呼ばれる多面体の辺の和集合がセパタクローボールのモデルとして得られる。

### 3. 4価頂点をもつ正多面体および準正多面体

二十十二面体の一般化として, 4価頂点をもつ正多面体および準正多面体を考える。これは, 頂点を2本の帯の交わりに対応させることができ, 辺どうしが回転で移りあうような高い対称性をもつ多面体である。このような多面体は, 正八面体, 立方八面体および十二面体の3つに限られる。



セパタクローボール



二十十二面体

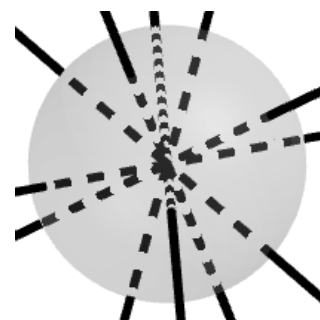
#### 4. 正多面体の主対角線族から得られる球面上の大円の和集合

他の一般化を考えるために、セパタクロールボールの別のモデルを考える。セパタクロールボールの帯の幅と上下交差を無視すると、2次元球面上の大円の6本の和集合が得られる。

2次元球面上の大円の和集合は、大円を含む平面と垂直で中心を通る直線に対応させることにより、3次元空間内の原点を通る直線族から得られる。セパタクロールボールのモデルとして考えた6本の大円の和集合は、正二十面体の主対角線族から得られる。

正八面体の主対角線族から得られる3本の大円の和集合は、正八面体自身の辺の集合に対応している。また、立方体の主対角線族から得られる4本の大円の和集合は、立方八面体の辺の集合に対応している。これらの多面体は、4価頂点をもつ正多面体および準正多面体としてすでに考えた。

一方で、正十二面体の主対角線族から得られる10本の大円の和集合は、辺の集合に対応する多面体が半正多面体ですらなく、対称性が低い。

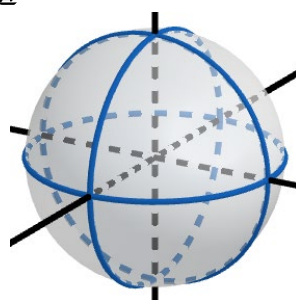


正二十面体の主対角線族と対応する6本の大円

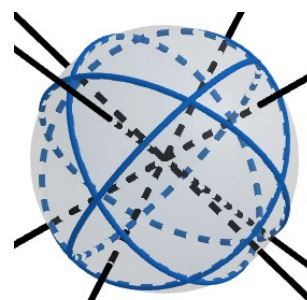
#### 5. 10本の等角直線族から得られる構造

正十二面体の6本の主対角線は3次元空間内の等角直線族をなしている。正八面体、立方八面体の主対角線族も等角直線族である。一方で、正十二面体の10本の主対角線は等角直線族をなしていない。このことは、対応する大円の和集合の対称性に違いに反映されている。

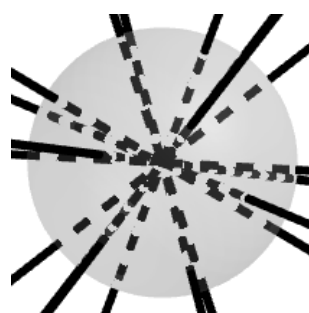
そこで、本発表では、10本の等角直線族から得られる構造を考えることを提案する。3次元空間および4次元空間内の等角直線族が含む直線は最大で6本であるが、5次元空間内の10本の等角直線族が存在する([1])。各直線の直交補空間と4次元単位球面との交わりを考えると、4次元球面内の10個の3次元球面が得られる。3次元球面どうしの交わりも考えることにより、2次元球面および円周を含めた構造が得られる。



正八面体の主対角線族と対応する3本の大円



立方体の主対角線族と対応する4本の大円



正十二面体の主対角線族と対応する10本の大円

#### 参考文献

[1] J.H van Lint, J.J Seidel, Equilateral point sets in elliptic geometry, Indag. Math., 28 (1966), pp. 335-348.

[2] 松田能文, セパタクロール絡み目について, 「結び目の数学X」報告集, 2018年, p159-164.

形の科学シンポジウム講演予稿集 Vol. 11 No. 1 (2026年6月)

発行： 形の科学会

学会長： 海野 啓明

事務局長： 塩澤 友規  
青山学院大学経営学部経営学科

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@chibatech.ac.jp](mailto:yoshinori.teshima@chibatech.ac.jp)