

外部磁力の強度による磁性流体のスパイクの形状変化

兵庫県立姫路東高等学校 科学部物理系研究部

○志村実咲 多田明良 菅原楓 高田健吾 西野侑吏 山浦奈々
浦岡杜樹 陰山麻愉 松田理沙 村瀬太郎 大和司

キーワード：磁性流体 スパイク現象 臨界磁場

要 旨

磁性流体を磁場の近くに置くと、その磁力線の流れに沿って磁性流体から角が生えたような突起が形成されるスパイク現象という特徴的な現象が起こる。磁性流体の平面に対して上下方向に磁場を加え、臨界磁場に達すると、磁場の方向に沿って盛り上がりスパイクを形成する。スパイクは、磁性流体表面における磁場の強さと表面張力、重力のつり合いによって盛り上がり、一定の高さ以上にはならない。7～8mT で生じた円形のスパイクは、外部磁力を強くしていくにつれて円形から六角形へと変化し、隣接するスパイクが磁性流体の表面張力によって接着する。接着面は最短距離の直線となり、スパイク間の斥力を失って六角形をなす。さらに磁性を強めると、10mT 付近でスパイクは不安定化して五角形や七角形に崩れていく。

1. 動機と目的

磁性流体 (Magnetorheological fluid, Magnetic Fluid, Ferrofluid) とは、MR 流体とも呼ばれ、流体でありながら、磁性を帯び、砂鉄のように磁石に反応する性質を持つ機能性流体のひとつである。直径が 10nm 程度の磁性超微粒子と、分散媒体である水、有機溶剤、さらに粒子を吸着して分散媒体中で安定に分散させるための界面活性剤からなるコロイド溶液である。筆者らは youtube で磁性流体を知り、興味をもって先行研究を調べてみた。

磁性流体には、スパイク現象という特徴的な形状をなすことが知られている (図 1)。スパイク現象とは、磁場の近くに置くと、その磁力線の流れに沿って磁性流体から角が生えたような突起が形成される現象をいい、他の磁性体にはない特徴的な現象である。

筆者らは、磁場の設定場所によって、芸術的な美しいスパイクがのびるようすに感動した。M. Cowley and R. Rosensweig (1967) は、磁性流体に磁力をかけると、底面が六角形のスパイクが形成されることを示し (図 2)、スパイクが発生し始める臨界磁場の磁束密度について解析をおこなった。また、水田 (2010) は、六角形のスパイクの界面磁場を解析している。

Gailitis (1977) は、六角形のスパイク表面のエネルギー分布について研究し、さらに磁場を変化させることによって、六角形や四角形のスパイクが生じることを示した。磁力を強くすれば六角形や四角形のスパイクが生じることは、伊丹ほか (1994) や福田・堂原 (2000) も示している。しかし、磁力を次第に強くしていくことによって、どのようにスパイクの形状が変化していくのか、どのようにスパイク間の位置関係



図 1 磁性流体表面に生成するスパイク

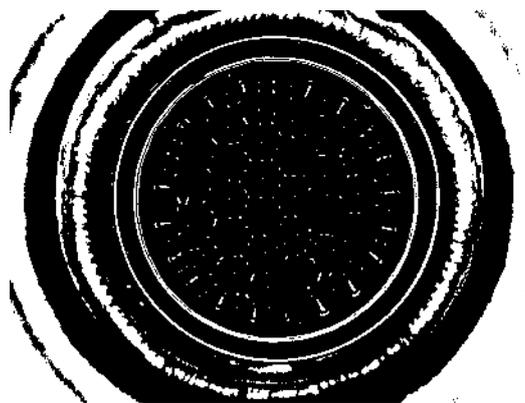


図 2 六角形のスパイクの底面 (M. Cowley and R. Rosensweig, 1967)

が変化するのかについては、まだ解明されていない。筆者らは、それらの点に注目して研究をおこなうことにした。

2. 実験方法

磁性流体は、酸化鉄、イソパラフィン、イソステアリン酸を成分とする、シグマハイケミカル社製 DS-50 を用いた。20℃密度 1.40、20℃粘度 97mPa/sec、飽和磁化 9mT である。外部磁場としてコイルを作成したが十分な磁力を生むことはできなかった。高い磁力をもつコイルは、とても購入できないほど高額であったため、やむなく縦 100mm×横 100mm×厚さ 10mm のケニス社製角形フェライト磁石 (140mT) SQ100 を 1~3 枚重ねて用いた。

磁性流体 37ml を内底面が 86mm×86mm のスチロール樹脂製容器に入れると 5mm の深さに溜まった。この容器を固定し、フェライト磁石を容器底面に近づけたり離したりして底面にかかる磁力を様々に変えて、どのようなスパイクが生成するかを観察した (図 3)。磁力の測定は、カネテック社製ガウスメーター TM-801 (直流磁界標準分解能測定モード 0~200.0mT の分解能 0.1mT、精度 ±5% of rdg. +3digit / 200.1~3000.0mT の分解能 1mT、精度 ±5% of rdg. +10digit) を用いた。容器底面の 5 か所で測定し (図 4)、その平均値を求めて外部磁場の強さとした。暗室内でブラックライトを当てて、上部からデジタルカメラでスパイクを撮影し、画像を 1mm 方眼紙に写し取って、スパイク間の距離や角度を測定した。



図 3 磁性流体のスパイクの測定実験

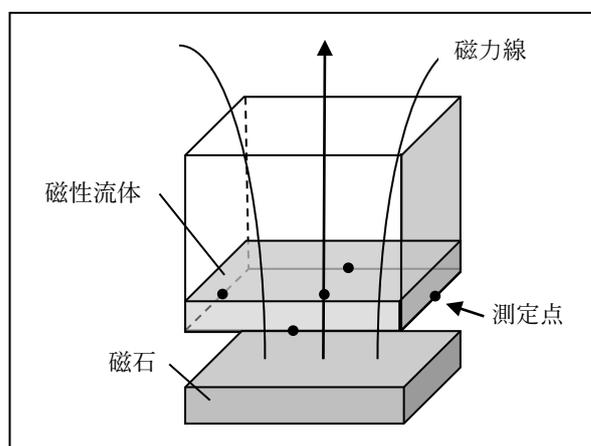


図 4 外部磁力の測定点 (各辺の中点の●で示す部分の 5 か所)

3. 結果

容器の底面中央から上方に向かって磁力線が曲線をなして伸びているため、底面の 5 か所で測定した値は、図 4 に示すように磁力線が上方外側に向かうため、各辺の中央部よりも底面中央部の測定値の方が強い。本研究では、5 か所の磁力の平均値をとってグラフ化した。

外部磁力の強さとスパイクの本数の関係 (図 6) と、同時に測定した、スパイク 1 本あたりの底面積 (図 7) をグラフにまとめて示す。測定回数は 154 回である。スパイクの本数は、磁力線によって斜めに立ち上がったものも含めて数えている。スパイク 1 本あたりの底面積は、容器周縁部で斜めに立ち上がったスパイクを除き、上方に立ち上がったスパイクの底面積を測定して平均値で示した。さらに、中央部のスパイクの高さ (図 8) を 168 回測定した。スパイクの高さは、容器中央部の最も高いスパイクの高さを測定した。いずれの測定値も紙面の都合上、ここでは省略する。

磁性流体の平面に外部磁力を加えると、7~8mT 付近で、底面が円形のスパイクが出現する。円形のスパイクの間には多くの隙間が見られる。磁力を強めていくと、スパイクは底面積をほぼ一定に保ったまま次第に高くなり、数を増やしていくため、隣接するスパイクどうしが接着するようになる。接着面は

最短距離の直線をなして、容易に底面が六角形をなすスパイクに変化する。さらに磁力を強めると、10mT 付近から、六角形のスパイクの中に五角形と七角形のスパイクが出現するようになる。外部磁力を強めると、スパイクの本数は増えていくが、六角形のスパイクが安定を失って底面積が小さい五角形や、

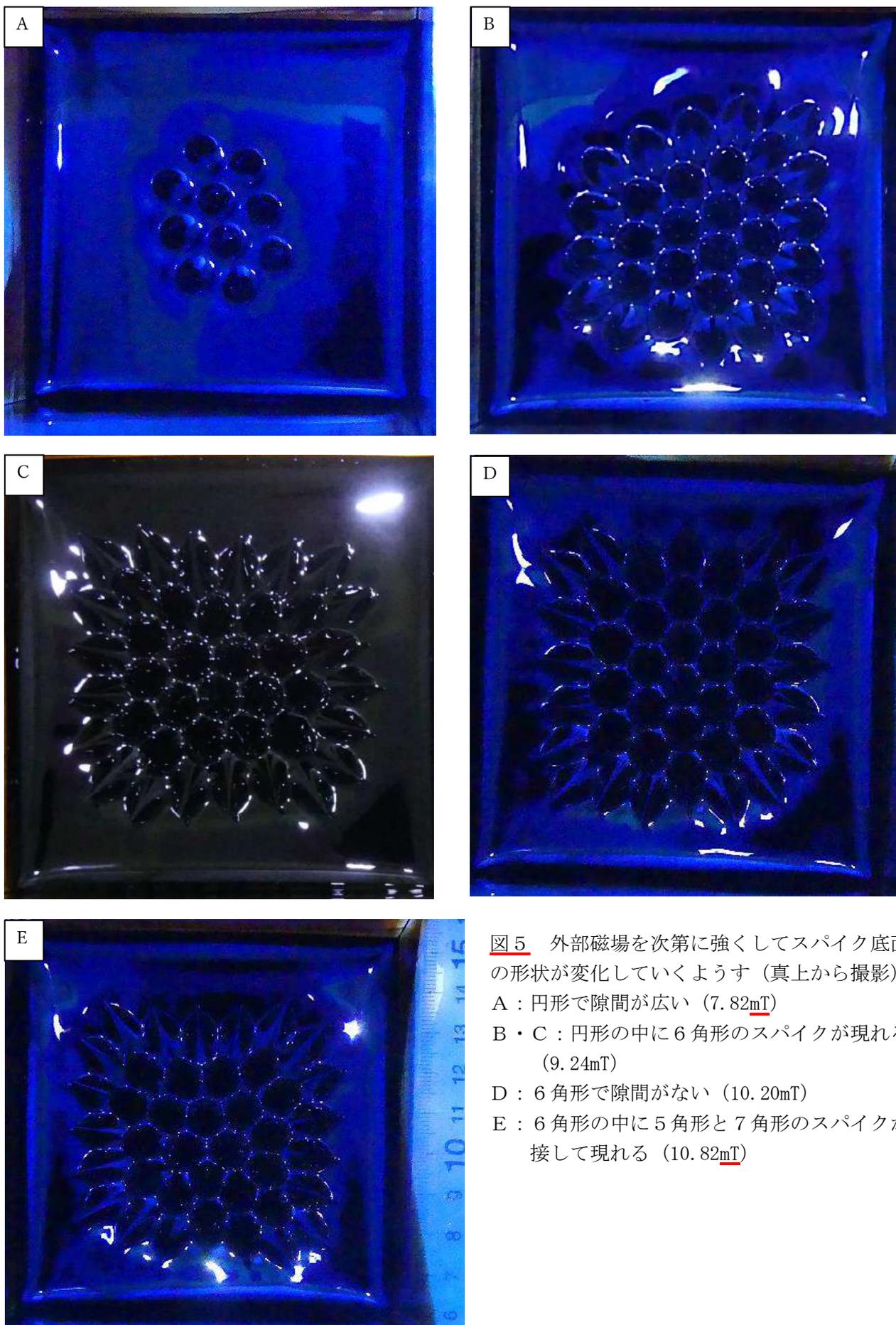


図5 外部磁場を次第に強くしてスパイク底面の形状が変化していくようす（真上から撮影）
A：円形で隙間が広い（ 7.82mT ）
B・C：円形の中に六角形のスパイクが現れる（ 9.24mT ）
D：六角形で隙間がない（ 10.20mT ）
E：六角形の中に五角形と七角形のスパイクが接して現れる（ 10.82mT ）

底面積が大きい7角形のスパイクに変化するものが現れるようになる。また、磁力を強くしても、1.2～1.4cm よりもスパイクが高くなることはほとんどない。福田・堂原（2000）は、磁性流体を入れる容器の形状や大きさは、スパイクの生成に影響を及ぼさないことを示している。

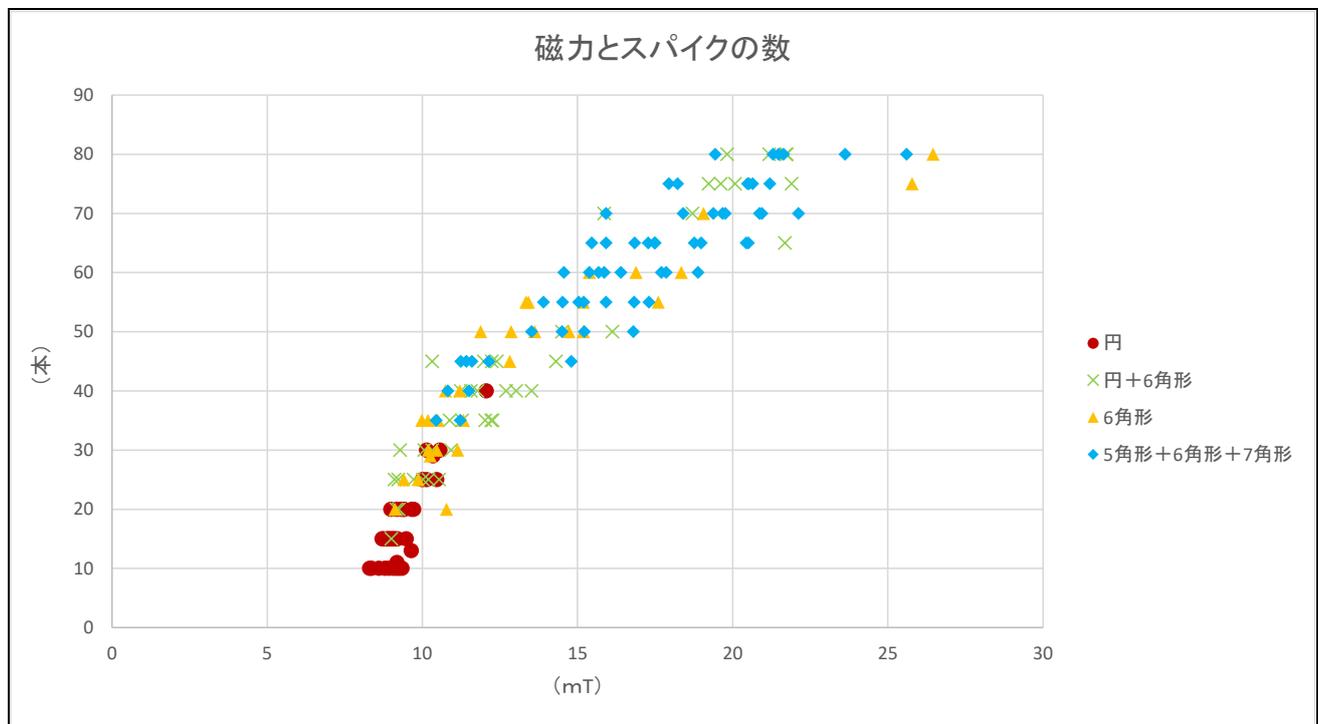


図6 外部磁力の強さとスパイクの本数の関係（測定 154 回）

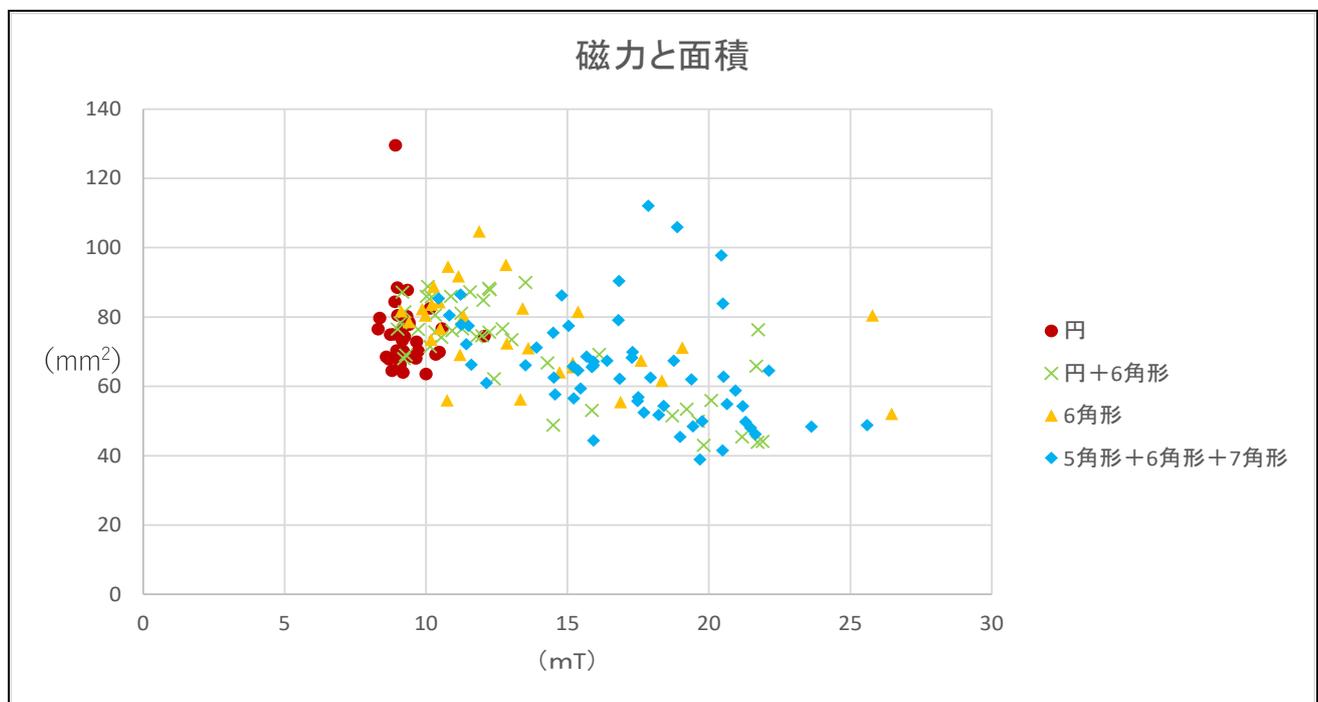


図7 外部磁力の強さとスパイク 1 本あたりの底面積（平均値）の関係（測定 154 回）

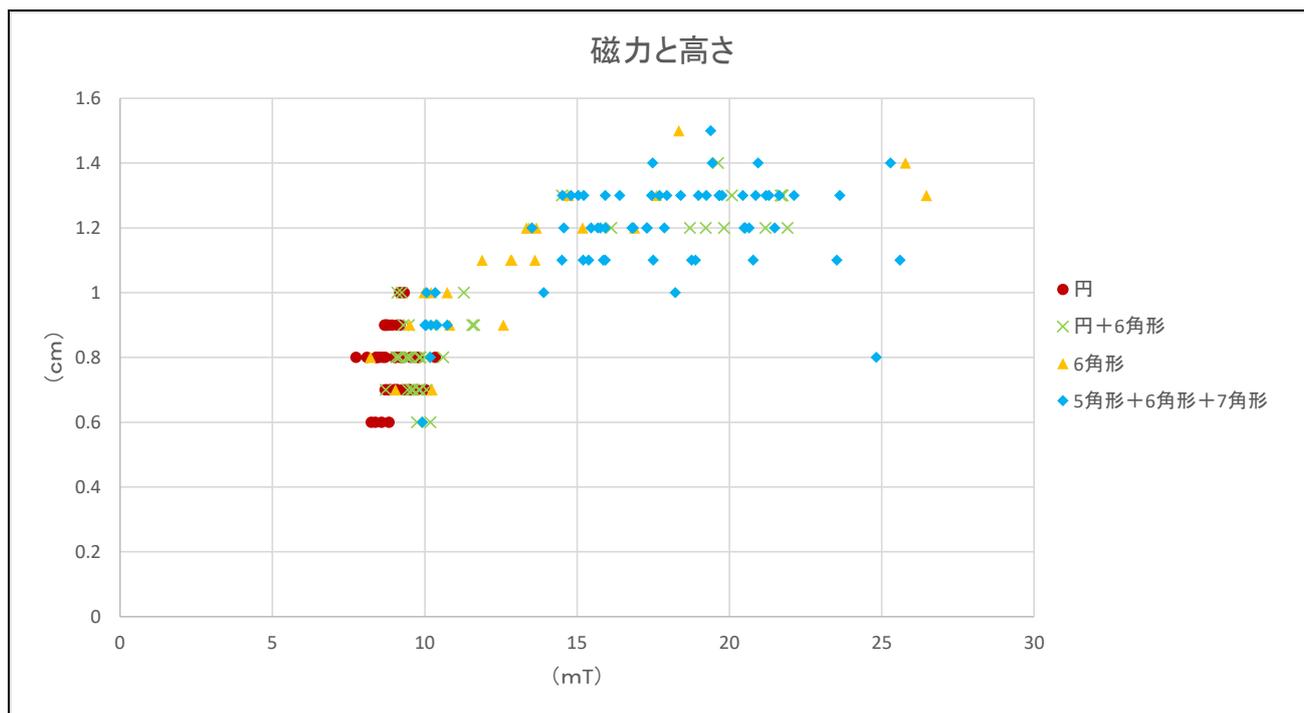


図8 外部磁力の強さと中央部のスパイクの高さの関係 (測定 168 回)

4. 考察

磁性流体の平面に対して上下方向に磁場を加え、臨界磁場に達すると、平滑な平面を維持したまま、磁場の方向に沿って盛り上がりスパイクを形成する。スパイクの表面は、磁性流体内の磁性超微粒子どうしの引き合う力で盛り上がるが、磁性流体の表面張力および重力の合力とつりあった高さで安定となる。一方外部磁場に垂直な方向には斥力がはたらくため、スパイクは外部磁場を加えている平面全体に均一に分布すると考えられる (図9)。猪又 (2009) や石川ほか (2011) は、磁性超微粒子どうしの斥力で盛り上がるようすを、プログラム上のシミュレーションを用いて再現させることに成功している。

スパイクが円形から六角形へと成長するにつれて、隣接するスパイクが磁性流体の表面張力によって接着する。表面張力が大きくなり、斥力を上回ると、接着面は最短距離の直線となり、六角形をなすと考えられる (図10)。さらに磁性を強めると、10mT 付近でスパイクは不安定化して五角形や七角形に崩れていく。

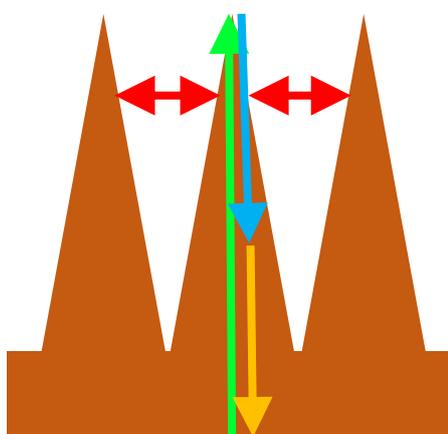


図9 スパイクのモデル図 (向きを表したもので、大きさは正確ではない)

- 赤：スパイク間の斥力
- 緑：磁性超微粒子どうしの引き合う力
- 青：表面張力
- 黄：重力

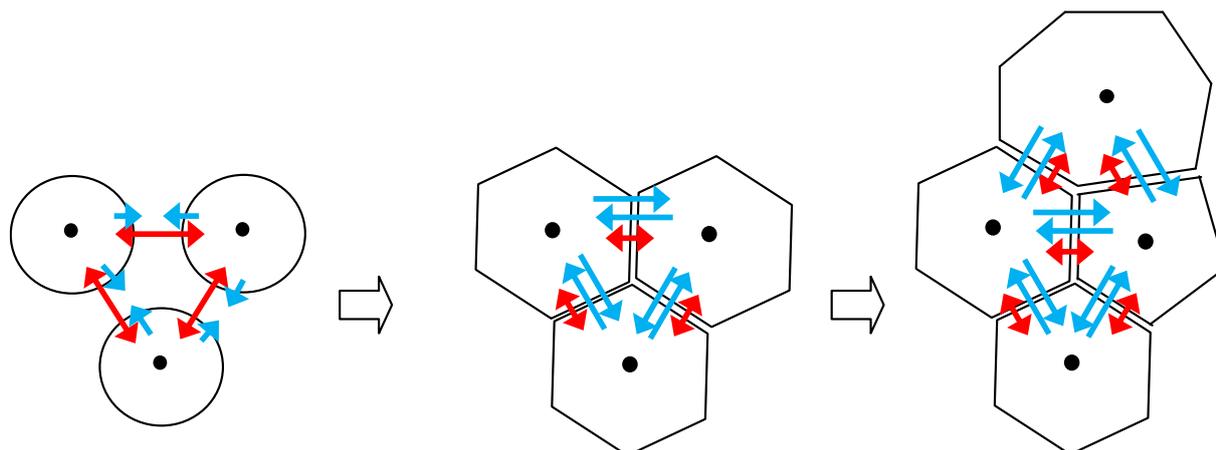


図10 外部磁場を強くするにつれてスパイク底面の形状が円形から六角形、五角形と七角形へ変化する
(赤：斥力、青：表面張力)

5. 今後の課題

磁性流体を利用した応用機器が多方面で開発されており、本研究はその基礎研究となる。磁性流体のスパイクの形状が連続的に変化することを明らかにしたが、現在スパイク底面の磁性超微粒子にどのような力が加わって変化するのかについて研究をおこなっている。

磁性流体をガラス板で挟んで薄膜状にして、これに垂直に磁界を加えると、ラビリンスパターンという迷路のような模様が生じる。これも芸術的で非常に美しく筆者らの心をつかむ。今後はラビリンスパターンが生じる条件についても調べ、メディア・アート分野への応用に発展させたい。

6. 謝辞

本研究を行うにあたり、本校科学部顧問の川勝和哉主幹教諭には、考察において有意義な議論をしていただいた。ここに記して謝意を表す。

7. 引用文献

Cowley, M. and Rosensweig, R. (1967) The interfacial stability of ferromagnetic fluid. (J.Fluid Mech, vol.30, 671-688.)

Galitis, A. (1977) Formation of the hexagonal pattern on the surface of a ferromagnetic fluid in an applied magnetic fluid. (J.Fluid Mech, vol.82, 401-413.)

福田芳行・堂原教義 (2000) 磁性流体の界面変形現象に関する研究 (日本機械学会論文集, 66 巻, 651 号, 139-146.)

猪又溪吾 (2009) 磁性流体を表現するCGアルゴリズムの構築と芸術への応用 (電気通信大学大学院電気通信学研究科平成20年度修士論文)

石川知一・Yonghao Yue・岩崎慶・土橋宣典・西田友是 (2011) スパイク現象を表現するための磁性流体のビジュアルシミュレーション (情報処理学会研究報告, vol.144, 1-8.)

伊丹俊夫・松本英明・正木匡彦・荒磯恒久 (1994) 重力および無重力化での磁性流体の挙動 (日本マイクログラフィティ応用学会誌, Vol.11, No.3, 101-106.)

水田洋 (2010) 磁性流体界面における磁場解析と安定性解析 (数理解析研究所講究録, 1707 巻, 139-150.)

PB2

外部磁力の強度と磁性流体のスパイクの形状

兵庫県立姫路東高等学校 科学部 物理系研究部

志村実咲、菅原楓、西野侑吏、村瀬太郎、陰山麻侑、大和司、松田理沙

キーワード

- 磁性流体…流体でありながら、磁性を帯び、砂鉄のように磁石に反応する性質を持つ機能性流体
- スパイク現象…磁場の近くに置くと、その磁力線の流れに沿って磁性流体から角が生えたような突起が形成される現象(図1)
- 臨界磁場…磁性流体がスパイクを形成し始める磁場強度

動機と目的

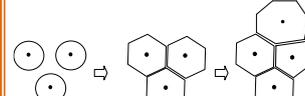
- YouTubeで磁性流体を知り、芸術的なスパイクがのびるのびるに感動した。
- 先行研究を調べると、磁場を変化させることによって、六角形や四角形のスパイクが生じることを知った。
- 磁力を強くしていくことによって、どのようにスパイクの形状が変化していくのか、どのようにスパイク間の位置関係が変化するのが気になり、研究を始めた。



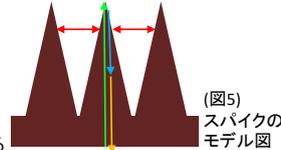
(図1)スパイク現象

考察

- 磁性流体の平面に対して上下方向に磁場を加え、臨界磁場に達すると、平滑な平面を維持したまま、磁場の方向に沿って盛り上がりスパイクを形成する。
- スパイクの表面は、磁性流体内の磁性超微粒子どうしの引き合う力で盛り上がるが、磁性流体の表面張力および重力の合力とつりあった高さで安定となる。
- 外部磁場に垂直な方向には斥力がはたらくため、スパイクは外部磁場を加えている平面全体に均一に分布すると考えられる。
- スパイクが円形から六角形へと成長するにつれ、隣接するスパイクが磁性流体の表面張力によって接着する。接着面は最短距離の直線となり、スパイク間の斥力を失って、六角形をなす(図4)。
- 磁力を強めると、10mT付近でスパイクは不安定化して五角形と七角形に崩れていく。



(図4) 外部磁場を強くするにつれてスパイク底面の形状が円形から六角形、五角形と七角形へと変化する



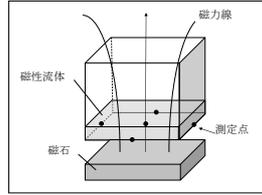
(図5) スパイクのモデル図

実験方法

- ①磁性流体37mlを容器に入れ、固定し、角形フェライト磁石を1~3枚重ね、容器底面に近づけたり離したりして底面にかかる磁力を様々に変え、どのようなスパイクが生成するかを観察した。(図2)
- ②ガウスメーターを用い、底面の5か所で磁力を測定し(図3)、その平均値を求めて外部磁場の強さとした。
- ③暗室内でブラックライトを当て、上部からデジタルカメラでスパイクを撮影し、画像を1mm方眼紙に写し取り、スパイクの底面積を測定した。



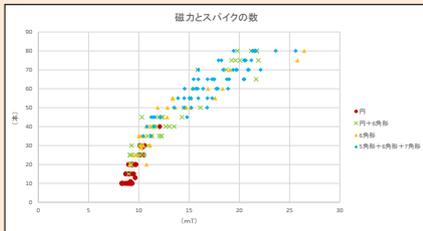
(図2) 実験の様子



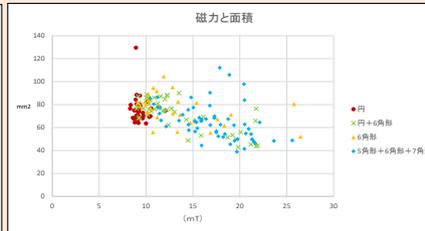
(図3)外部磁力の測定点(容器底面の中央と各辺の midpoint の●で示す部分の5か所)

結果

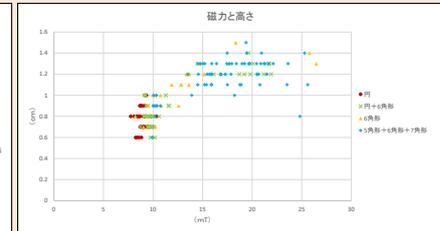
- 容器の底面中央から上方外側に向かって磁力線が曲線をなして伸びているため、底面の5か所で測定した値は、図3に示すように、各辺の中央部よりも底面中央部の測定値の方がやや強い。そのため平均値を用いた。
- 磁性流体の平面に外部磁場を加えると、7~8mT付近で、底面が円形のスパイクが出現する。
- 円形のスパイクの間には多くの隙間が見られるが、磁力を強めると、底面積をほぼ一定に保ったまま、数を増やしていくため、隣接するスパイクどうしが接着するようになる。接着面は最短距離の直線をなして、容易に底面が六角形をなすスパイクに変化する。
- 10mT付近から、六角形のスパイクが安定を失って底面積が小さい五角形や、底面積が大きい七角形のスパイクに変化するものが現れるようになる。
- 磁力を強くしても、1.2~1.4cmよりもスパイクが高くなることはない。



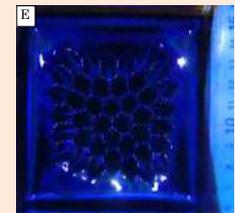
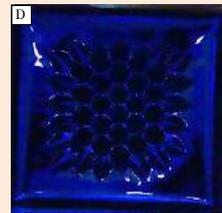
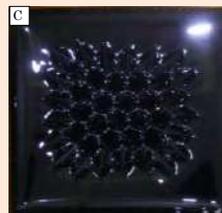
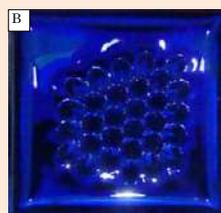
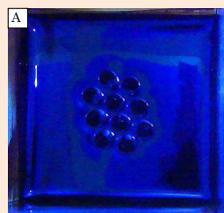
(図7)外部磁力の強さとスパイクの本数の関係(測定154回)



(図8)外部磁力の強さとスパイク1本あたりの底面積(平均値)の関係(測定154回)



(図9)外部磁力の強さと中央部のスパイクの高さの関係(測定168回)



(図10)外部磁場を次々に強くしてスパイク底面の形状が変化していくようす(真上から撮影)

- A: 円形で隙間が広い(7.82mT)
- B・C: 円形の中に六角形のスパイクが現れる(9.24mT)
- D: 六角形で隙間がない(10.20mT)
- E: 六角形の中に五角形と七角形のスパイクが接着して現れる(10.82mT)

今後の課題

磁性流体をガラス板で挟んで薄膜状にして、これに垂直に磁界を加えると、ラビリンスパターンという迷路のような模様が生じる。これも芸術的で非常に美しく筆者らの心をつかむ。今後はラビリンスパターンが生じる条件についても調べ、メディア・アート分野への応用に発展させたい。



(図11) ラビリンスパターン

謝辞

本研究を行うにあたり、本校科学部顧問の川勝和哉主幹教諭には、考察において有意義な議論をしていただいた。ここに記して謝意を表す。

参考文献

1. Cowley, M. and Rosensweig, R. (1967) The interfacial stability of ferromagnetic fluid. (J.Fluid Mech, vol.30, 671-688.)
2. Galitis, A. (1977) Formation of the hexagonal pattern on the surface of a ferromagnetic fluid in an applied magnetic fluid. (J.Fluid Mech, vol.82, 401-413.)
3. 福田芳行・堂原教義 (2000) 磁性流体の界面変形現象に関する研究 (日本機械学会論文集, 66巻, 651号, 139-146.)
4. 猪又漢吾 (2009) 磁性流体を表現するCGアルゴリズムの構築と芸術への応用 (電気通信大学大学院電気通信学研究科平成20年度修士論文)
5. 石川知一・Yonghao Yue・岩崎慶・土橋宣典・西田友是 (2011) スパイク現象を表現するための磁性流体のビジュアルシミュレーション (情報処理学会研究報告, vol.144, 1-8.)
6. 伊丹俊夫・松本英明・正木匡彦・荒磯恒久 (1994) 重力および無重力化での磁性流体の挙動 (日本マイクログラフィティ応用学会誌, Vol.11, No.3, 101-106.)
7. 水田洋 (2010) 磁性流体界面における磁場解析と安定性解析 (数理解析研究所講究録, 1707巻, 139-150.)

金平糖の成長に伴う「角」の消失の過程

兵庫県立姫路東高等学校 科学部物理系研究部

○佐藤知希 児玉尚子 多田明良 三井彩夏 後藤大道 竹内智哉 西野侑吏 横尾侑眞
田村花里奈 藤盛心実 北条陸翔 溝垣月渚

キーワード：金平糖 角 雹

要 旨

これまで、金平糖の角がどのように生じるのかについては多く研究されてきたが、ある程度大きくなった金平糖の角がどのように消失していき、角の本数が少なくなっていくのかについては研究されてこなかった。金平糖に生じた角の長さに不均一が生じた場合、長さの差が小さい場合には、短時間のうちに角と角の間の溝が埋められ、角が消失していく。しかし、生じた角の長さに大きな差（本研究では隣接する突出部が5mmに対して3mm以上、4mmに対して2mmに相当）がある場合には、なかなか角の間の溝が埋まらず、角は残る。最後まで残る角の条件は、角が高いだけでなく、隣接する角との高さに大きな差がある必要がある。

1. 動機

幼いころから親しんで食べている金平糖について、筆者らは長い間、どうして金平糖には角ができるのか、どの金平糖を見ても角の本数がほとんど同じなのはなぜなのか、いつ角はできるのか、と疑問に感じていた。金平糖について先行研究を調べてみると、中田（1995）など、金平糖を作る時の条件によって「角」の形状や本数が異なることを知ったが、それ以上のことが本格的に科学的な研究はおこなわれていない。金平糖にはさまざまな角の形状や本数のものが市販されている（[図1](#)）が、糖の成分や作成の方法等は公開されていない。



[図1](#) 緑寿庵清水の伝統的な金平糖

2. 予備観察

金平糖の粒子の成長には、容器を動かす速度と温度、上から垂らす糖の量に関係している（中田，1995）。筆者らは予備観察として、金平糖を作りながら、角の本数や形状の変化についての課題を洗い出すことにした。

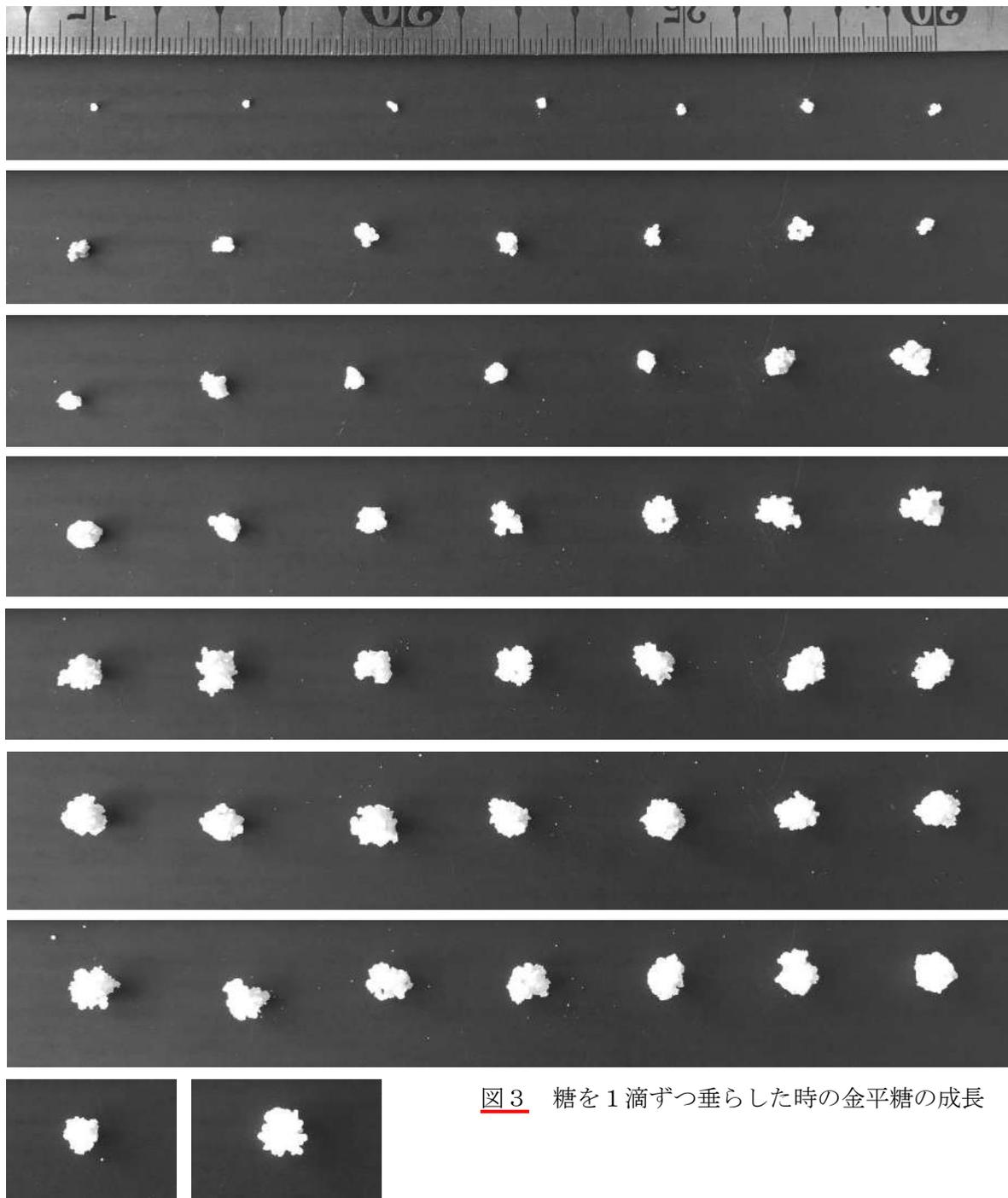


[図2](#) 金平糖の作成

けしの実を種として用いて、加熱した小型のフライパンで加熱した後、グラニュー糖を蒸留水に溶解して25%の溶液を作った。フライパンを火からおろして、糖の溶液を1mlずつ垂らし、よくかき混ぜる。再びフライパンを火にかけて加熱する。この操作を50回繰り返して、金平糖を作成した（[図2](#)）。

金平糖の核であるけしの実に糖が付着して成長を始めると、不均一に成長した部分に角ができ始める。角がどの位置に何本できるかは、そのときの糖の付着の場所によってランダムに決まる。さらに糖を垂

らしていくと、角の先に糖が付着しやすくなり、角が成長していく。その後、次第に隣接する角と角が合体をはじめ、成長しながら角は本数を減らしていく（[図3](#)）。



[図3](#) 糖を1滴ずつ垂らした時の金平糖の成長

3. 研究の目的

角の成長と消失の予備実験の結果は、Murai and Nakata (1988) の数値シミュレーションモデル ([図4](#)) と類似している。また鈴木 (2020) も、金平糖が大きく成長するにつれて、外形が次第に変化していくようすをシミュレーションで示している。しかしこれらは、段階的な外形の変化を示すものであり、角の成長と消失の過程を断面で連続的に示すものではない。さらに塚本 (2019) は、角のある核となる種のまわりに同心円状に糖が成長している様子を、金平糖断面の透過電子顕微鏡写真と偏光顕微鏡写真で示しており ([図5](#))、金平糖が同心円状に成長したようすが推測できるが、角がどのように成長し消失

したのかはわからない。そこで本研究では、角の消失の過程について研究することにした。

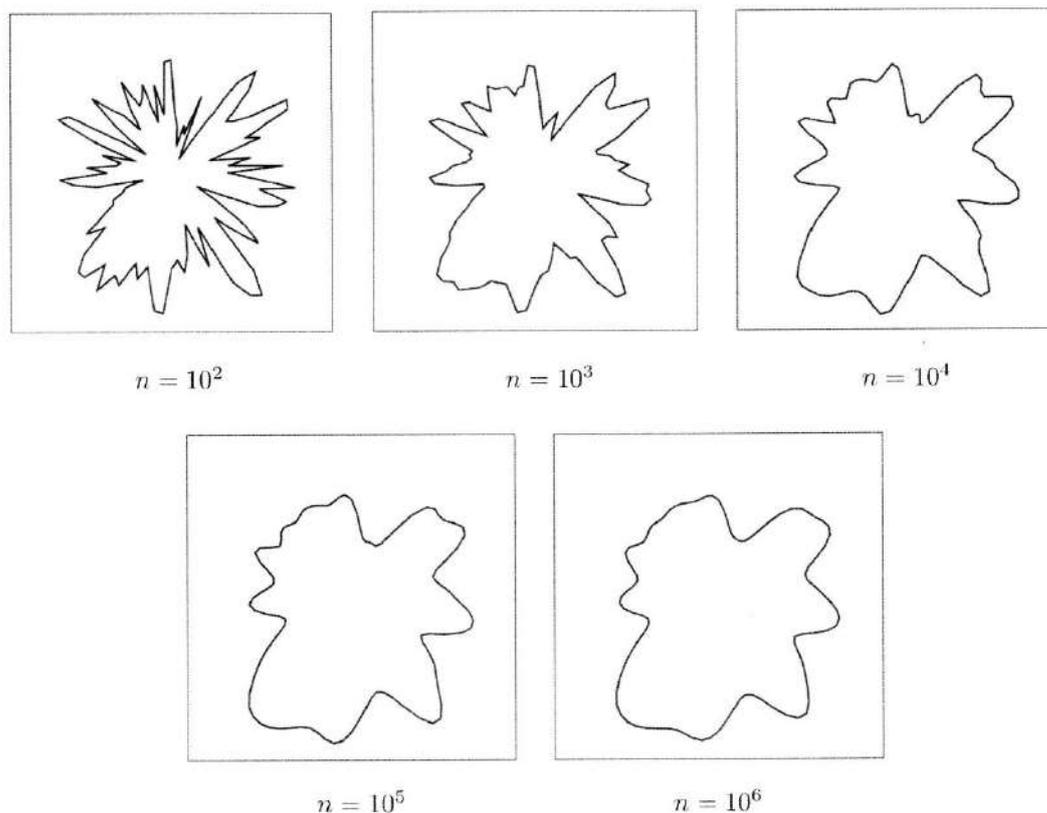


図4 中田・村井モデルの数値シミュレーション（nは著者らが設定した成長段階）

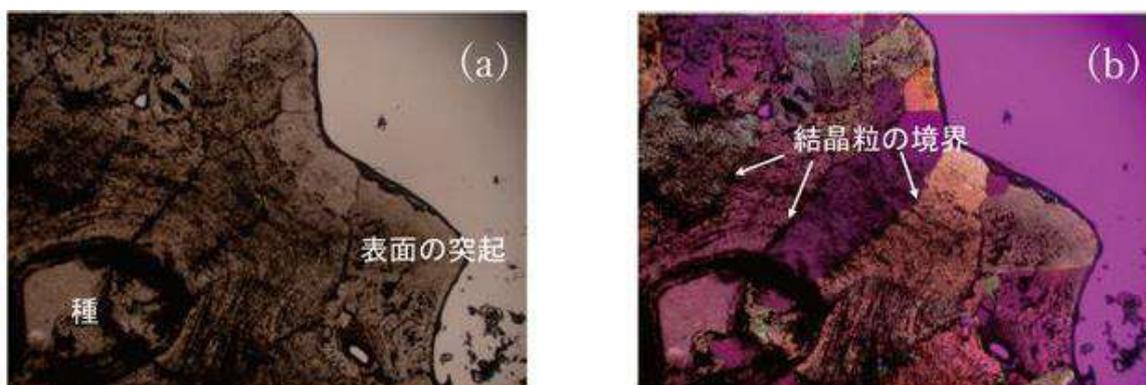


図5 簡便な方法で作った金平糖の断面（a：透過電子顕微鏡写真、b：偏光顕微鏡写真）（塚本, 2019）

4. 実験の方法

直径 10mm の木製の円柱の棒に、ドライバーを用いて 6mm 間隔に穴を 3 つ開け、そこに直径 2.5mm の竹串を差し込む。竹串の突起部分の長さをさまざまに変えたものを作成した (図6)。これに絵の具で着色した UV レジン(ブルーライトを当てることによって硬化する樹脂) に竹串の部分を浸し、引き上げてたれ落ちないように回転させながら、原ウール社製 UV/LED レジンライト 6W (波長 405nm+365nm) を当てて硬化させる。竹串の突起の高さの違いがなくなるまで赤、青、黄、緑に着色したレジン(ブルーライトを当てることによって硬化する樹脂) を順に浸して、硬化させる作業を繰り返す。こうしてできた試料を半分に切り、断面を観察する。角の周囲に層状に重なった部分の厚さを測

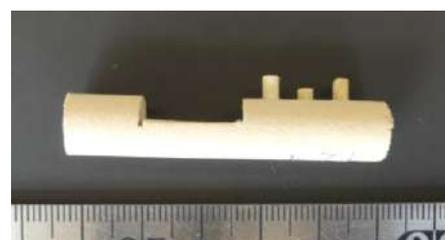


図6 実験用の試料の例

定し、重なり方を観察する (図7)。

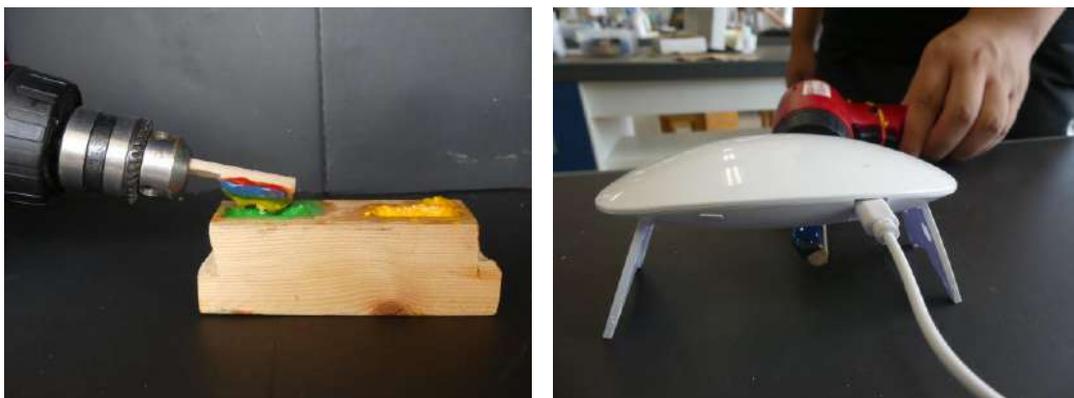
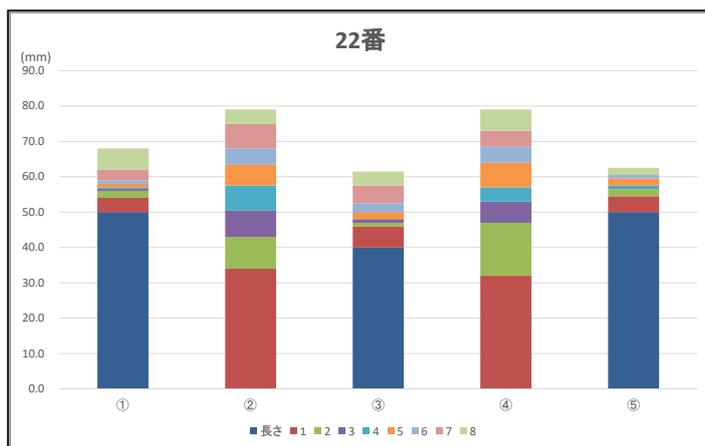


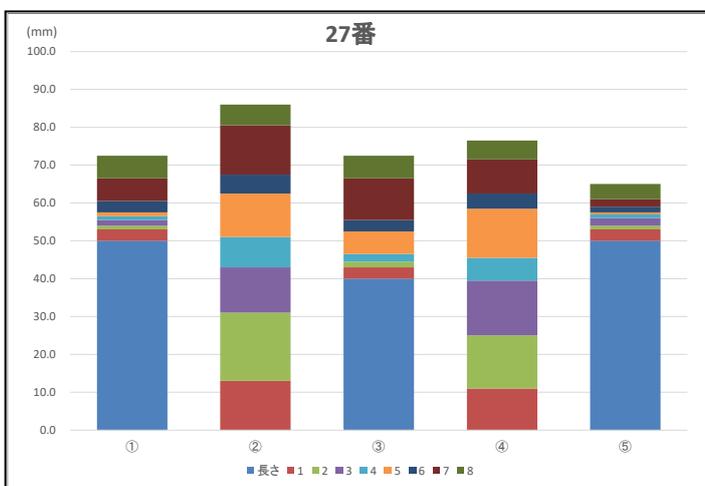
図7 実験操作の写真 (左：レジンに浸す、右：UV を当てて硬化させる)

5. モデル実験の結果

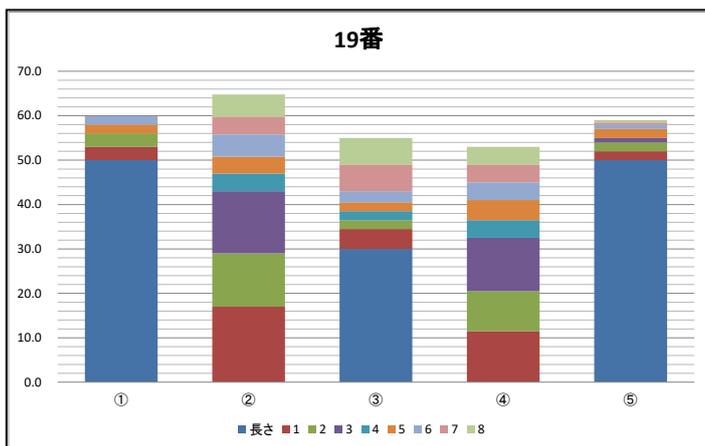
角に見立てた突出部のレジンが重層していくようすを図8に示した。突出部の長さによって、あるいは長さの差によって、重層のようすには違いがみられる。グラフの①、③、⑤の縦軸0mmからの青色の棒の高さは、竹串で作成した突出部の高さを示している。実測値は巻末に資料として示した。



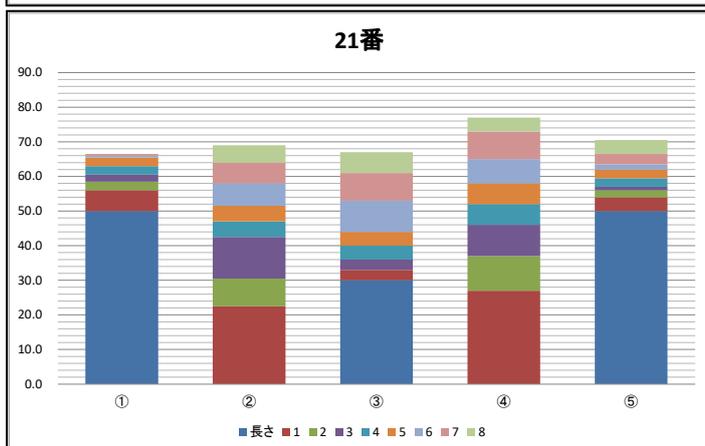
突出部の長さ：左から 5mm、4mm、5mm



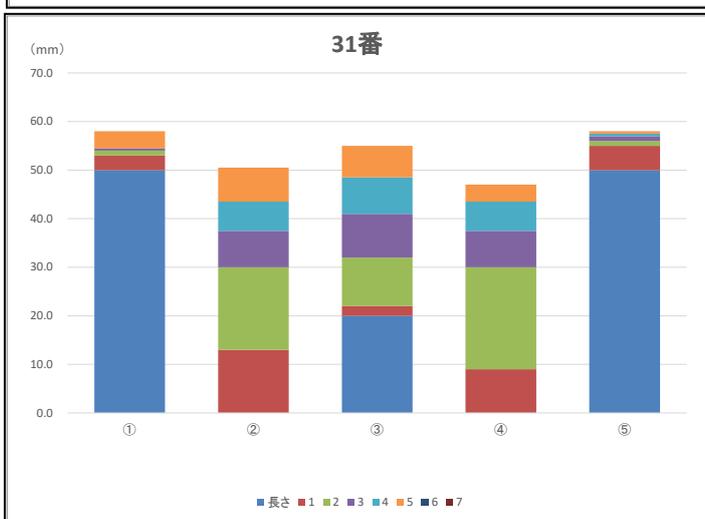
突出部の長さ：左から 5mm、4mm、5mm



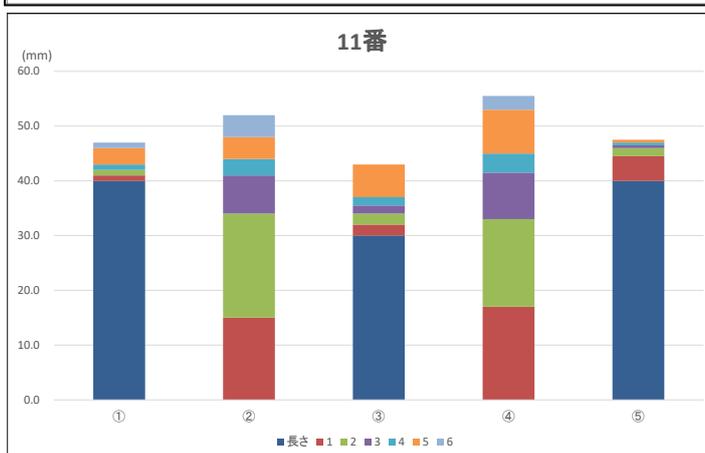
突出部の長さ：左から 5mm、3mm、5mm



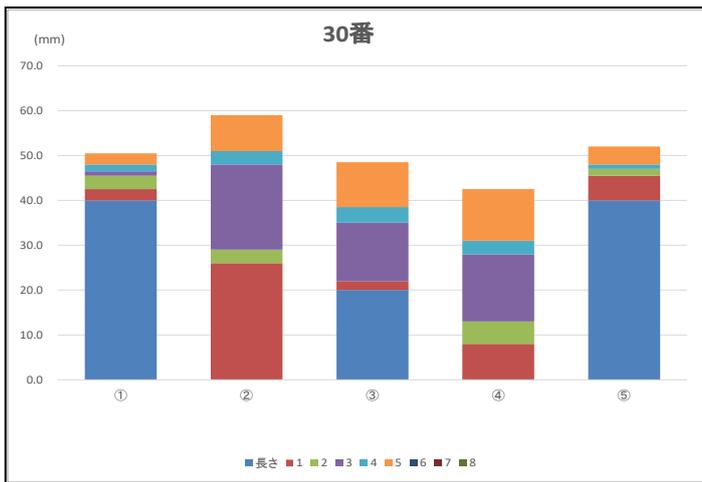
突出部の長さ：左から 5mm、3mm、5mm



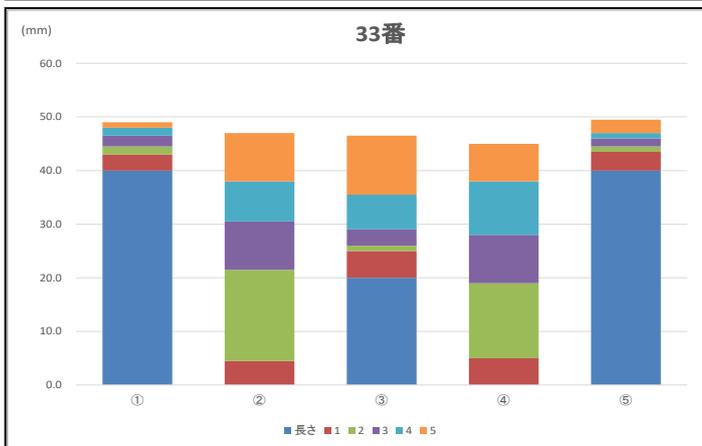
突出部の長さ：左から 5mm、2mm、5mm



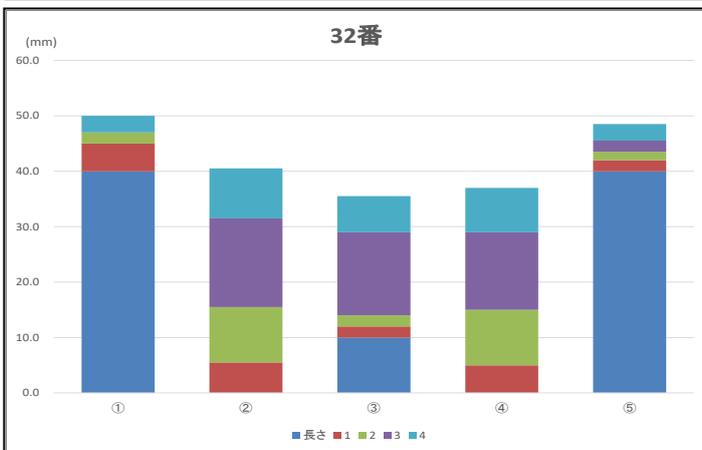
突出部の長さ：左から 4mm、3mm、4mm



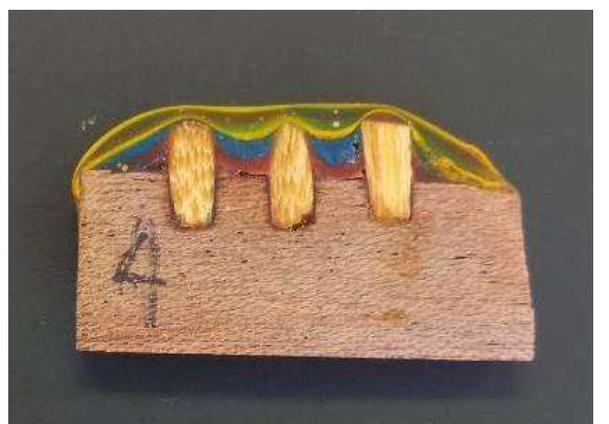
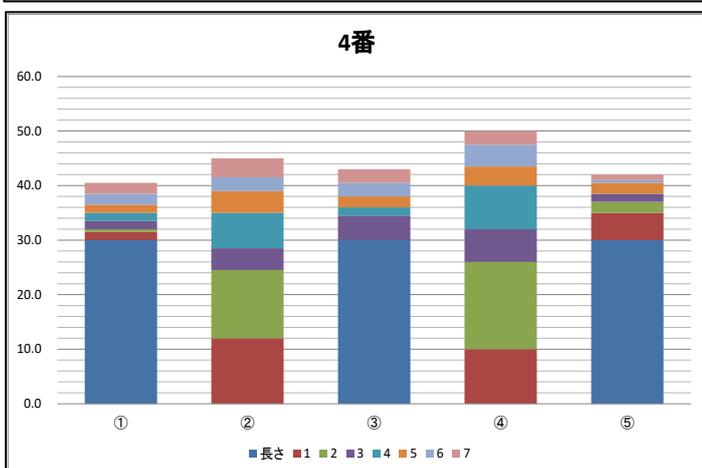
突出部の長さ：左から 4mm、2mm、4mm



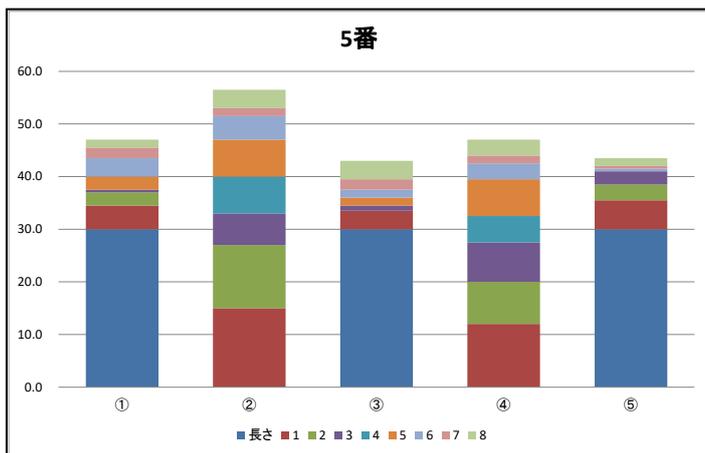
突出部の長さ：左から 4mm、2mm、4mm



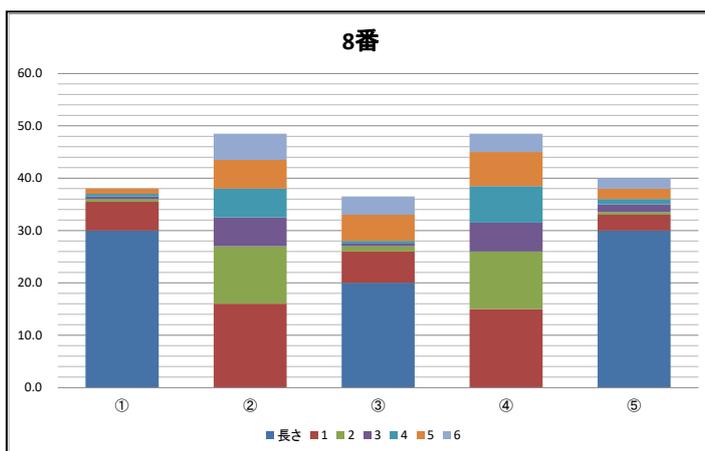
突出部の長さ：左から 4mm、1mm、4mm



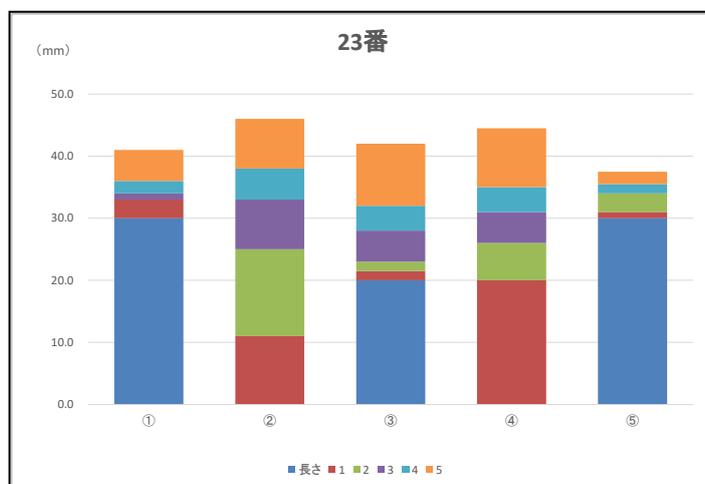
突出部の長さ：左から 3mm、3mm、3mm



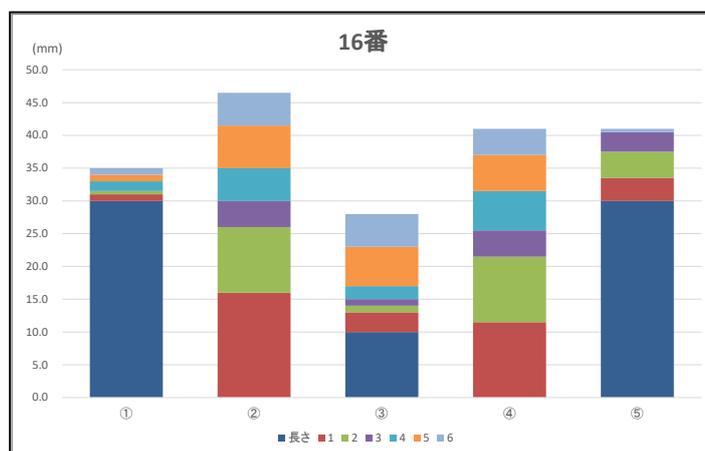
突出部の長さ：左から 3mm、3mm、3mm



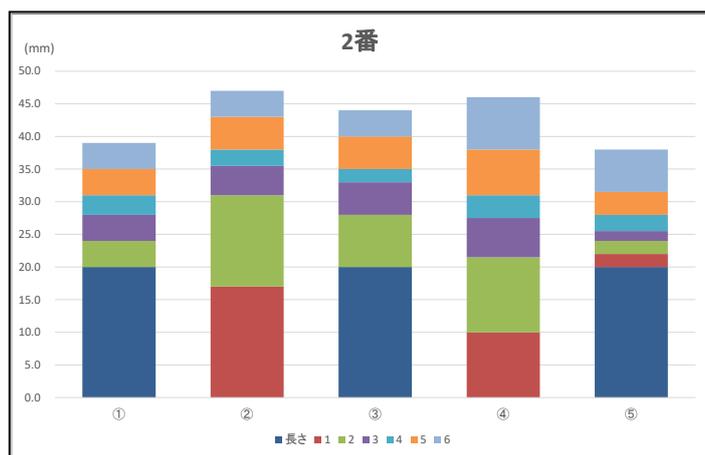
突出部の長さ：左から 3mm、2mm、3mm



突出部の長さ：左から 3mm、2mm、3mm



突出部の長さ：左から 3mm、1mm、3mm



突出部の長さ：左から 2mm、2mm、2mm

図8 さまざまな条件のモデル実験の結果

金平糖の角に見立てた竹串の突出部の長さの差がない場合（4番、5番、2番）や、差が1mmの場合（22番、27番、11番、8番、23番）には、3回～5回レジンに浸すとほぼ高さの違いがなくなる。差が2mmになると5回～8回浸すことが必要となり（19番、21番、30番、33番）、差が3mmになると、8回浸しても角の溝を埋めて高さの差をなくすることはできなくなる（31番、32番）。差が2mmの場合でも、両端の突出が低いと、溝を埋めることができない（16番）。

6. 考察

これまで、金平糖が成長する過程には、① 雪がさまざまな形をとるように、何らかの理由で角が形成されると、濃度の高い糖の方に成長を続ける、という考えや、② 乾燥した糖の小さな粉が丸い糖の表面に付着して角ができる、というモデルがある（塚本, 2019）。一方で、ある程度大きくなった金平糖の角がどのように消失していき、角の本数が少なくなっていくのかについては研究されてこなかった。

角がどの位置に何本できるかはランダムに決まる。金平糖に生じた角の長さ不均一が生じた場合、隣接する角の長さの差が小さいと、短時間のうちに角と角の間の溝が埋められ、角が消失していくと考えられる。しかし、隣接して生じた角の長さに大きな差（本研究では突出部の5mmに対して3mm以上、4mmに対して2mmに相当）がある場合には、溝を埋めることが困難になり、角は埋められずに残る。最後まで残る角の条件は、角が高いだけではなく、隣接する角との高さに大きな差がある必要がある。

7. 今後の課題と発展

本研究では、角の間隔を一定にして実験をおこなった。間隔によって角の消え方には違いがあると考えられるため、今後のモデル実験では、間隔を変えた実験をおこないたい。また、本研究のように簡易に作成できる金平糖で形成される角の本数は、だいたいいつも最大で16本ないしは24本となる。この理由は何なのか明らかにしたい。もしかすると、種の形に関係しているのかもしれない。

伝統的な方法で2週間程度かけて作られる銘菓の金平糖では、数時間の簡便な方法で作成した今回のような金平糖と比べて、成長速度が非常に遅いため、薄い糖の層が緻密に重なってできており、そのために硬く長期間保存が可能なのだという（塚本, 2019）。これについても、成長の過程を明らかにできないか検討したい。

金平糖の形状は、上空から融解せずに落下してくる雹の形状に類似していることに気付く。中国やメキシコで確認されている金平糖型の雹を図9に示した。本研究の成果は、単に金平糖の形状についてのものではなく、上空に漂う微細な塵などを核として水分が成長して雹を形成する過程の解明の端緒にもなるものと期待される。



図9 金平糖型の雹（A：火災保険有効活用サポートナビ,2022、 B：Nairaland Forum, 2022）

8. 謝辞

本研究を行うにあたり、大阪糖菓株式会社の浜田様には、金平糖作成の方法についてご教示いただいた。また、本校科学部顧問の川勝和哉主幹教諭には、考察において有意義な議論をしていただいた。ここに記して謝意を表す。

9. 引用文献

火災保険有効活用サポートナビ (2022) fire-insurance-navi.com

Murai, N. and Nakata, T. (1988) Rounded spikes of kompeitoh and scaling relations (Amer. J. Phys. 56, 459-462)

Nairaland Forum (2022) Snow Look Like Coronavirus Rain-fall In Adamawa (nairaland.com)

中田友一 (1995) 金平糖の数理モデル (日本オペレーションズ・リサーチ学会誌, 165-169)

鈴木宏昌 (2020) 金平糖成長過程の連続モデル (滋賀大学教養学部紀要, No 70, 165-171)

塚本勝男 (2019) 金平糖の不思議 (砂糖類・でん粉情報, 6, 2-6)

金平糖の成長に伴う「角」の消失の過程

兵庫県立姫路東高等学校

佐藤知希、後藤大道、竹内智哉、西野佑吏、横尾侑眞、田村花里奈、北條陸翔、溝垣月渚

キーワード 金平糖 角 電

動機

幼いころから親しんで食べている金平糖について、わたしたちはなぜこのような形をしているのか疑問に感じた。金平糖について先行研究を調べてみると、中田(1995)など、金平糖を作る時の条件によって「角」の形状や本数が異なることを知ったが、それ以上の科学的な研究は行われていない。

先行研究と研究目的

- 角の成長と消失の予備実験の結果は、Murai and Nakata (1988) の数値シミュレーションモデル(図1)と類似している。また鈴木(2020)も、金平糖が大きく成長するにつれて、外形が変化していく様子をシミュレーションで示している。しかしこれらは段階的な外形の変化を示すものであり、角の成長と消失の過程を連続的に説明するものではない。
- 塚本(2019)は、角ができる種のまわりに同心円状に糖が成長している様子を、金平糖断面の透過電子顕微鏡写真と偏光顕微鏡写真で示しており(図2)、金平糖が同心円状に成長した様子が推測できるが不明瞭で、角がどのように成長し消失したのかはわからない。そこで本研究では、角の消失の過程について研究することにした。



図1 中田・村井モデルの数値シミュレーション (nは著者が設定した成長段階)



図2 簡便な方法で作った金平糖の断面 (a: 透過電子顕微鏡写真, b: 偏光顕微鏡写真) (塚本,2019)

実験方法

- 直径10mmの木製の円柱の棒に6mm間隔に穴を3つ開け、そこに直径2.5mmの竹串を差し込む。
- 竹串の長さを様々に変えたものを作成する(図5)。
- ②で作成したものの竹串の部分に絵の具で着色したUVレジンに竹串の部分を通し、UV/LEDレジンライトを当てて硬化させる。
- 竹串の高さの違いがなくなるまで赤、青、黄、緑に着色したレジンに浸し、硬化させる作業を繰り返す。
- できた試料を縦半分に切り、断面の角の周囲に層状に重なった部分の厚さを測定し、重なり方を観察する(図6)。

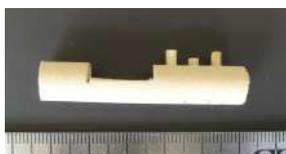


図5 実験用の試料



図6 実験操作の写真 (左: レジンに浸す, 右: UVを当てて硬化させる)



図3 金平糖の作成

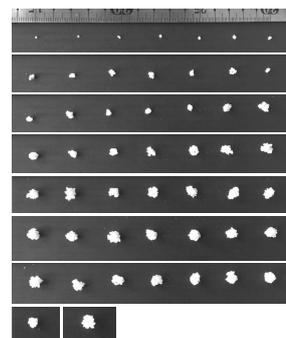


図4 糖を1滴ずつ垂らした時の金平糖の成長

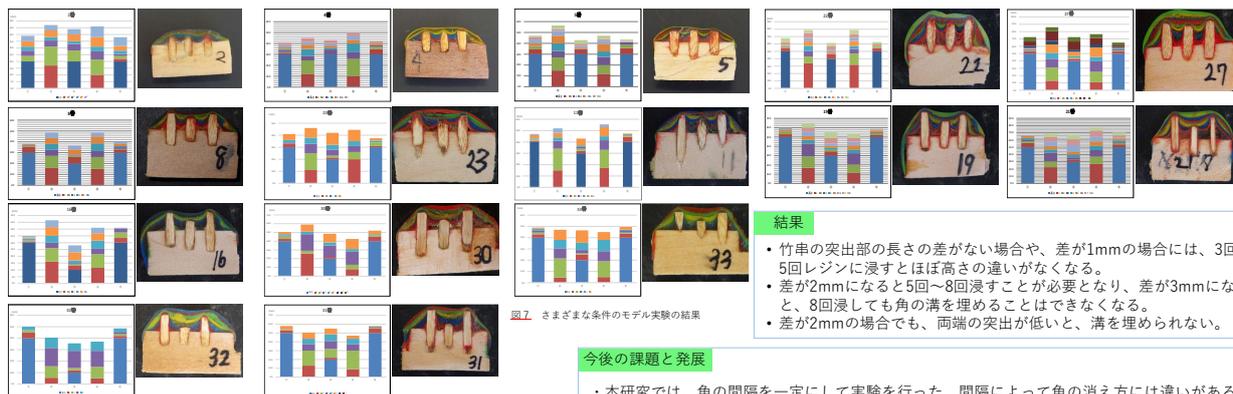


図7. さまざまな条件のモデル実験の結果

結果

- 竹串の突出部の長さの差がない場合や、差が1mmの場合には、3回~5回レジンに浸すとほぼ高さの違いがなくなる。
- 差が2mmになると5回~8回浸すことが必要となり、差が3mmになると、8回浸しても角の溝を埋めることはできなくなる。
- 差が2mmの場合でも、両端の突出が低いと、溝を埋められない。

今後の課題と発展

- 本研究では、角の間隔を一定にして実験を行った。間隔によって角の消え方には違いがあると考えられるため、今後のモデル実験では、間隔を変えた実験を行いたい。
- 本研究のように簡易に作成できる金平糖で形成される角の本数は最大で16本ないしは24本となる。この理由は何なのか明らかにしたい。種の形に関係している可能性も考えられる。
- 金平糖の形状は、上空から融解せずに落下してくる電の形状に類似している。中国やメキシコで確認されている金平糖型の電を図8に示した。本研究の成果は、上空に漂う微細な塵などを核として水分が成長して電を形成する過程の解明の端緒にもなるものと期待される。

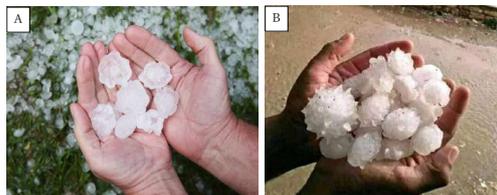


図8 金平糖型の電 (A: 火災保険有効活用サポートナビ,2022. B: Nairaland Forum,2022.)

引用文献

- 火災保険有効活用サポートナビ (2022) fire-insurance-navi.com
- Murai, N. and Nakata, T. (1988) Rounded spikes of kompeitoh and relations (Amer.J.Phys. 56, 459-462)
- Nairaland Forum (2022) [Snow Look Like Coronavirus Rain-fall In Adamawa \(nairaland.com\)](https://www.nairaland.com/4711111/snow-look-like-coronavirus-rain-fall-in-adamawa)
- 中田友一 (1995) 金平糖の数理モデル (日本オペレーションズ・リサーチ学会誌, 165-169)
- 鈴木宏昌 (2020) 金平糖成長過程の連続モデル (滋賀大学教養学部紀要, No 70, 165-171)
- 塚本勝男 (2019) 金平糖の不思議 (砂糖類・でん粉情報, 6, 2-6)

謝辞

本研究を行うにあたり、大阪糖業株式会社の浜田様には、金平糖作成の方法についてご教示いただいた。また、本校科学部顧問の川勝和哉主幹教諭には、考察において有意義な議論をしていただいた。ここに記して謝意を表す。

サボテン (ブリンチュウ *Pachycereus pringlei*) の刺座の配列方程式

兵庫県立姫路東高等学校 科学部生物系研究部

○岸上葉菜 前田智彦 本脇敬人 吉田龍之介 藤田詩桜 村瀬太郎 大和司

キーワード：共有刺座 歪み 螺旋方程式

要 旨

2022年に兵庫県立姫路東高等学校科学部は、10種類のサボテンの刺座の配列を測定し、螺旋の規則性の有無について研究したが、刺座の配列の規則性を見出すことはできなかった。筆者らは、規則性が認められなかった原因は、刺座の位置を座標として測定しなかったこと、個体ごとの歪みを修正しなかったこと、によるものと考えた。試料としてブリンチュウ8個体を用いて刺座の配列を座標として測定し、個体ごとの歪みを補正した。

筆者らは、以下について明らかにした。① ブリンチュウの刺座は、上方中央から下方に向かって、左回りと右回りに螺旋を描いて、共有刺座で出会いながら配列している。② 刺座の配列の歪みの多少にかかわらず、刺座配列の螺旋方程式を求めることができる。③ 本来の位置からの刺座の歪みを修正すると、ブリンチュウという種を示す螺旋方程式を求めることができる。ブリンチュウ種を表す固有の螺旋方程式は、 $r = 0.0114e^{-0.127n} \theta$ 、 $z = -0.1757n$ である。

1. 動機と目的

多くの植物には、規則的な配列がみられる。たとえばヒマワリの種子はフィボナッチ数列に基づいて配列しているし、荒谷ほか(2014)は、ダイオウマツの松毬の鱗片の配列が螺旋方程式に基づいていることを明らかにしている。兵庫県立姫路東高等学校科学部(2022)は、10種のサボテンの刺座の配列を測定し、そこに規則性がないかどうかを明らかにする研究を行った(前田ほか、投稿中)。これは、植物を数学的な視点から考察するものとして高い評価を受けたが、具体的な規則性を見つけることはできなかった。同じ種であっても刺座の配列は個体によって異なっていた。前田ほか(投稿中)は、① 刺座は、他の植物の葉の付き方のように一定の規則性をもたない、② 多くの植物の葉で認められ、数理モデルで示される規則性は、葉が変形して形成されたサボテンの刺座の配列には認められない、と結論付けている。規則性が認められなかった原因は、刺座の配列を座標で示さなかったことと、サボテンの形状の個体差(歪み)を修正しなかったからではないかと考えた筆者らは、本年度の研究ではブリンチュウに種を絞り、個体の歪みを補正して螺旋方程式を求めることを目的に研究を行った。

2. 観察方法

丸いものから縦に伸びたものまで、外形が様々に異なるブリンチュウ9個体(図1)を用いて、外形が異なっても同種であれば刺座の配列に同じ規則性があるという仮説を立てて、観察を行った。

ブリンチュウを真上から見たときの軸の中央部を基準(原点)とすると、刺座は左回りと右回りに螺旋状に配列し、共有刺座で出会いながら下方に伸びている。測定しやすいように、刺をハサミで切り取り、刺座に垂直に針を刺して、真上から見た際に刺座の位置が確認しやすいようにした(図2)。写真を撮影し、そこに方眼紙を乗せて、一本ずつ刺座の位置を求めた。

(1) 刺座の配列の測定方法

原点と1つ目の共有刺座(黄色)とを結ぶ線分をx軸、これに直角な線分をy軸とし、原点と1つ目

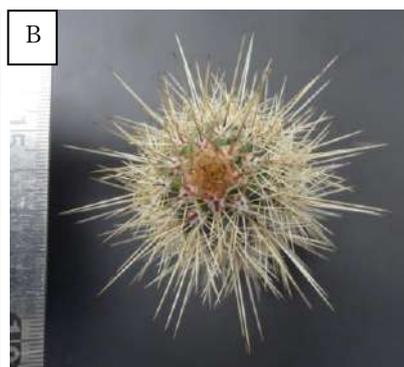


図1 さまざまな個性的な刺座の配列を持つプリンチュウ
(A : 歪みが小、B : 歪みが大)



図2 刺座の水平面における配列の確認

の共有刺座間の距離を1として、左回りと右回りに、それぞれの刺座の位置の座標を求めた。また、サボテンを真横から見て、原点と刺座まで、あるいは刺座間の高さの差を測定し、ひとつめの共有刺座までの垂直距離を1として示した (図3)。

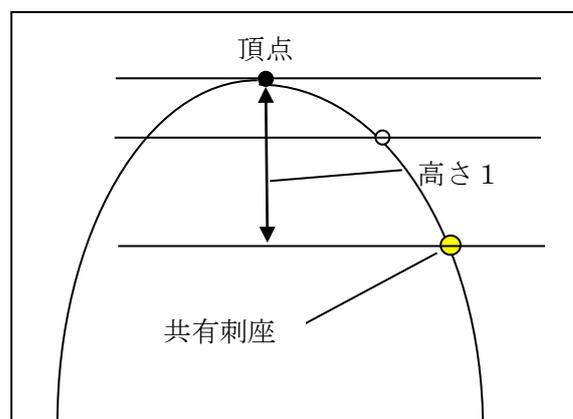
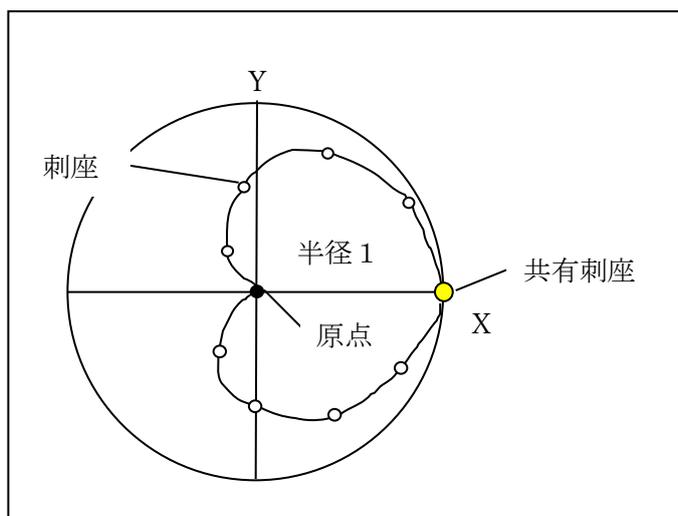


図3 刺座の配列の測定方法

(2) 螺旋方程式の求め方

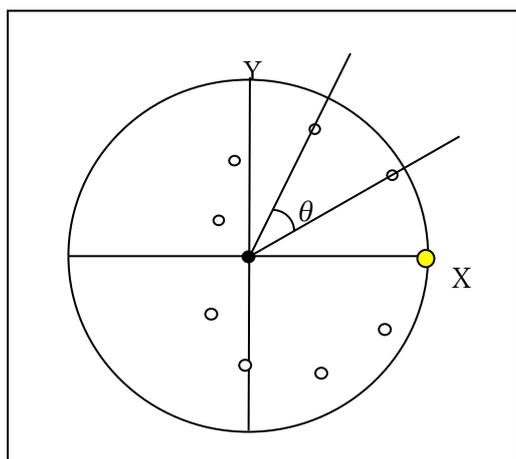


図4 刺座間の角度の測定方法

形状を客観的に比較するために、刺座の配列の螺旋方程式を求めようと試みた。真横から見た刺座間の距離 (図3) に加えて、ブリンチュウを真上から見た x-y 平面で、隣り合う刺座間の角度 θ (図4) を測定した

測定した値から、n 本目の刺座における螺旋方程式を、左回りと右回りのそれぞれで求める。x-y 平面では、半径 r、中心角 θ とすると、極方程式 $r=a\theta$ 、高さ $z=bn$ となり、この2つを螺旋方程式という。a は r と θ の値から求めた。b は高さの座標から求めた。

(3) 歪みの測定方法

ブリンチュウの頂点を原点として、原点と第1刺座を結ぶ直線を引き、それを下方に延長する (図5)。第2刺座以降、この直線から左右にずれがある場合、左右のずれの距離 (mm) を測定して、実際の刺座の位置をその長さだけ水平方向に移動させ、これを本来の理想的な配置とした。

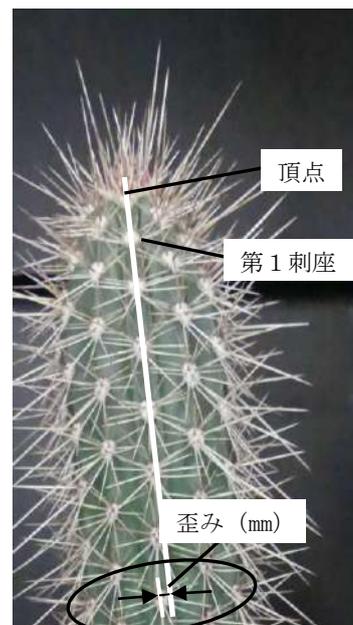


図5 歪みの測定方法

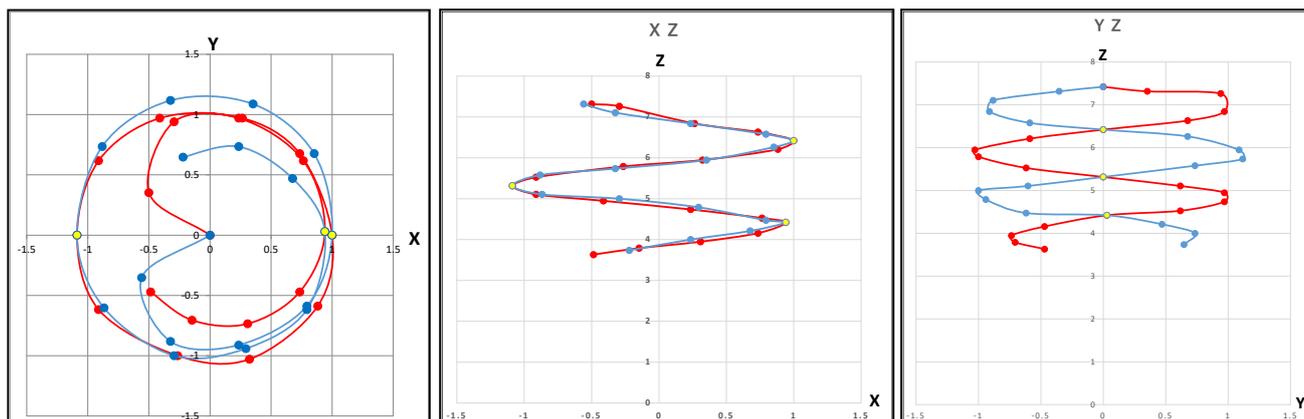
3. 結果

以下の図6～図15に、ブリンチュウを上から見た時の、左回りと右回りの刺座の配列を示す。頂点と第1共有刺座を結ぶ線を x 軸とし、黄色は共有刺座を示す。さらに、横から見た x-z 軸方向と y-z 軸方向の刺座の配列、左回り n 番目の刺座 a の値、右回り n 番目の a の値、左回り n 番目の刺座の高さ b、右回りの b を示す。測定値は巻末に資料としてまとめて示す。

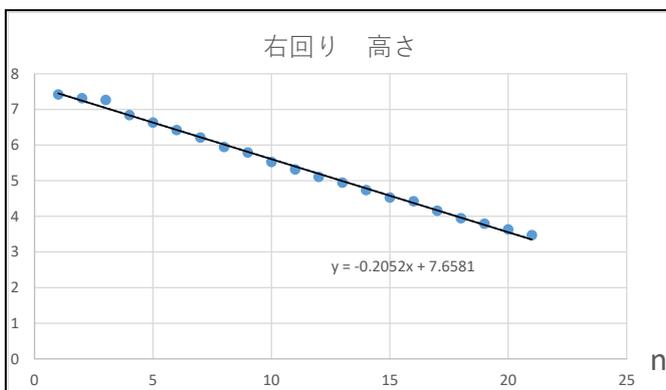
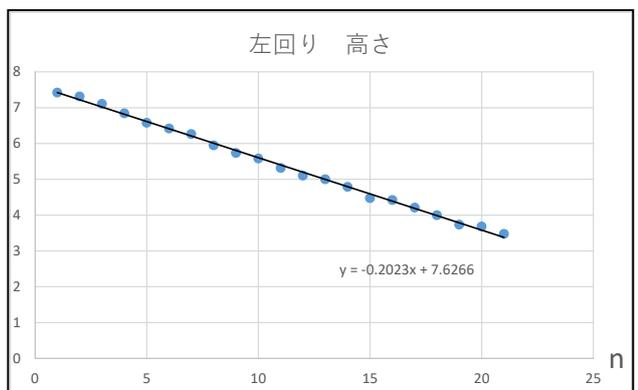
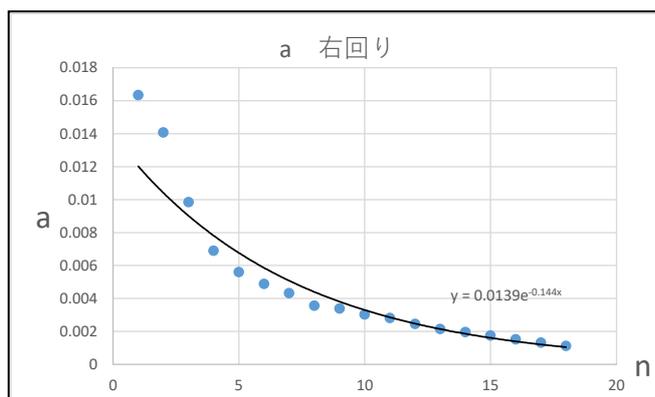
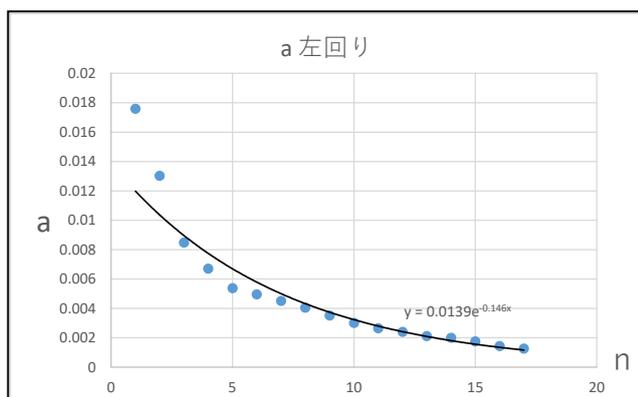
(1) ブリンチュウ1 (図6)



$$\begin{aligned} \text{左回り } a &= 0.0139e^{-0.146n} \\ & b = -0.2023n \\ \text{右回り } a &= 0.0139e^{-0.144n} \\ & b = -0.2052n \end{aligned}$$



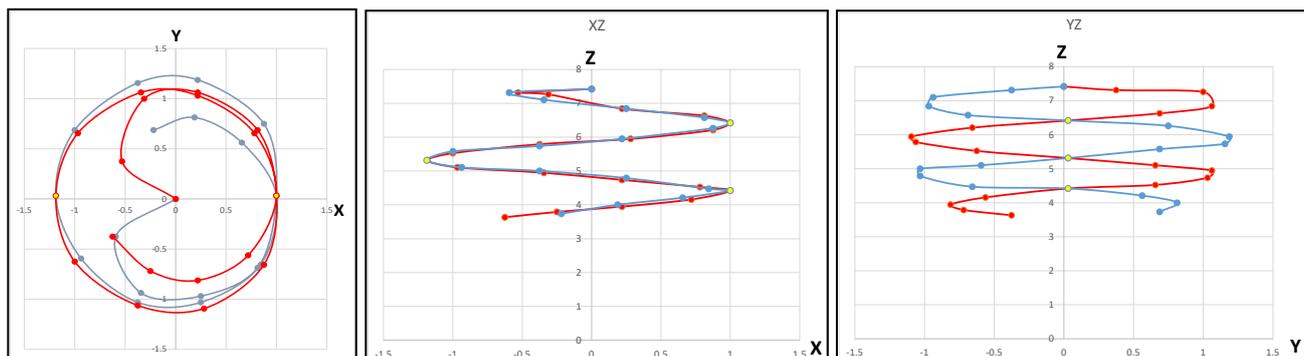
※ 赤は右回りの刺座の配列、青は左回りの刺座の配列を示す。

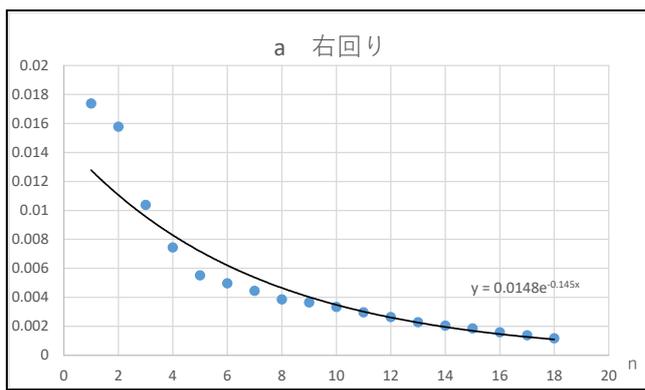
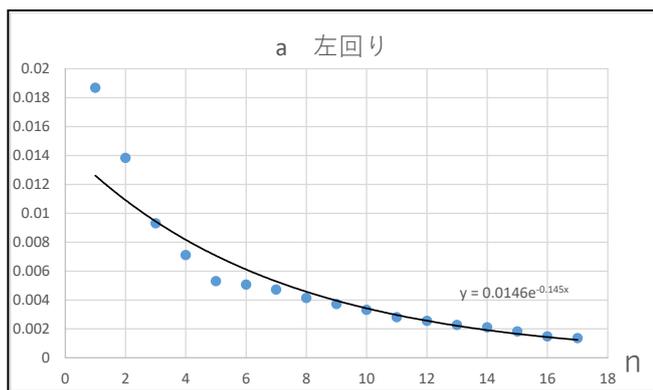


ブリンチュウ1の刺座の配列の歪みを修正すると、以下の通りになる。修正は、それぞれの刺座のサポテンの頂点から第1刺座を結ぶ直線からの左右のずれを修正して、本来の刺座の位置と考えられる位置に水平に移動させた。

左回り $a = 0.0146e^{-0.145n}$

右回り $a = 0.0148e^{-0.145n}$

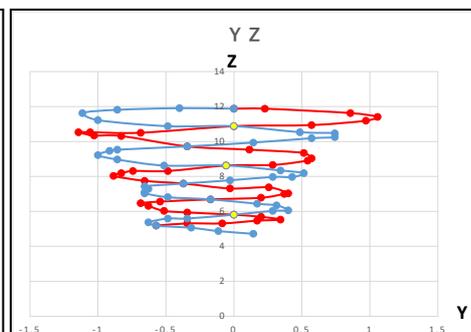
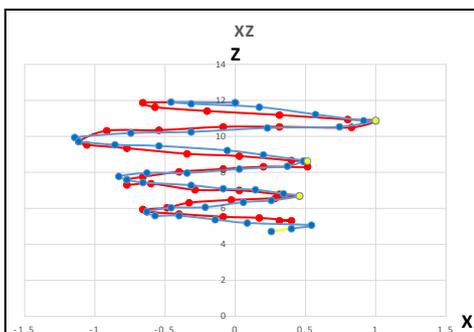
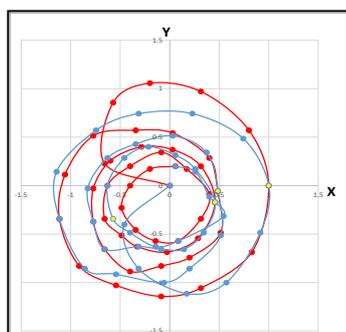




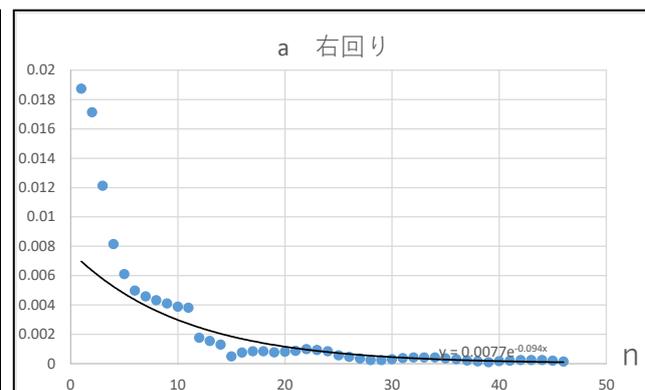
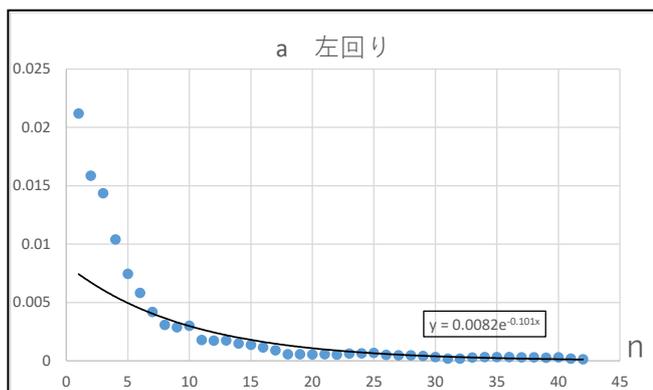
(2) ブリンチュウ 2 (図7)

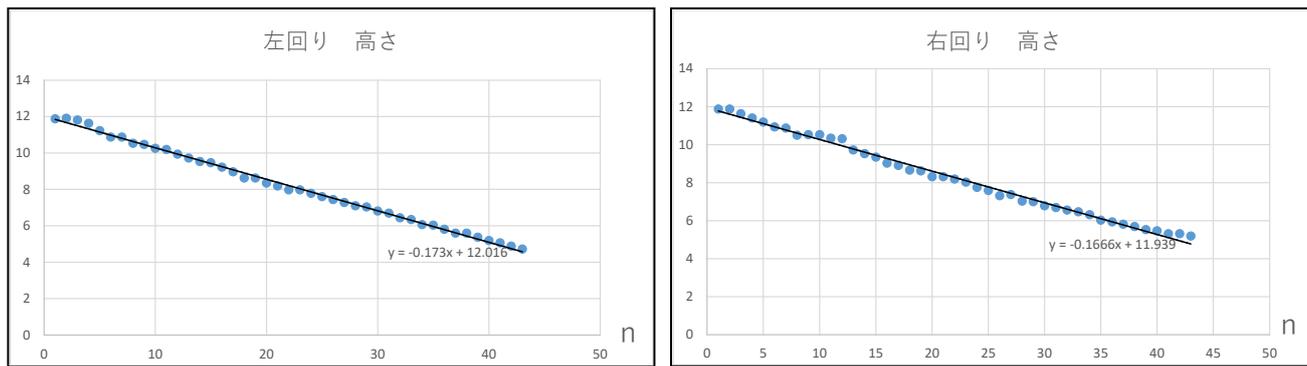


左回り $a = 0.0082e^{-0.101n}$
 $b = -0.1730n$
 右回り $a = 0.0077e^{-0.094n}$
 $b = -0.1666n$



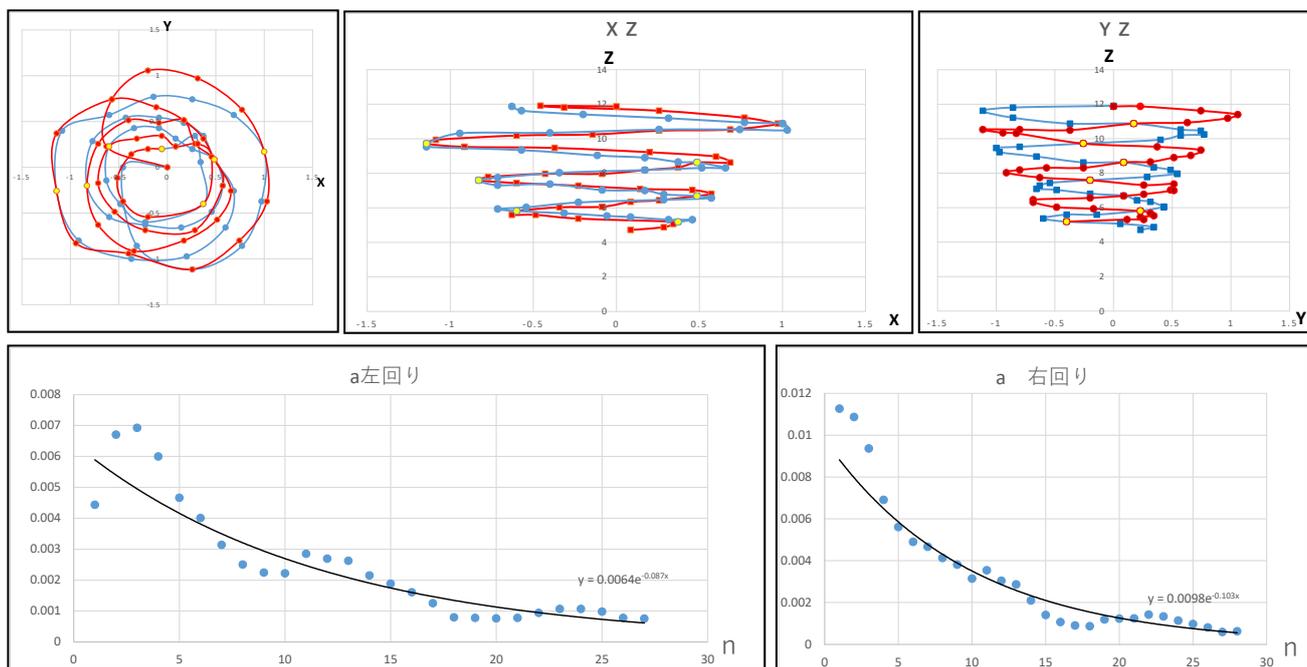
※ 赤は右回りの刺座の配列、青は左回りの刺座の配列を示す。





プリンチュウ2の刺座の配列の歪みを修正すると、以下ようになる。

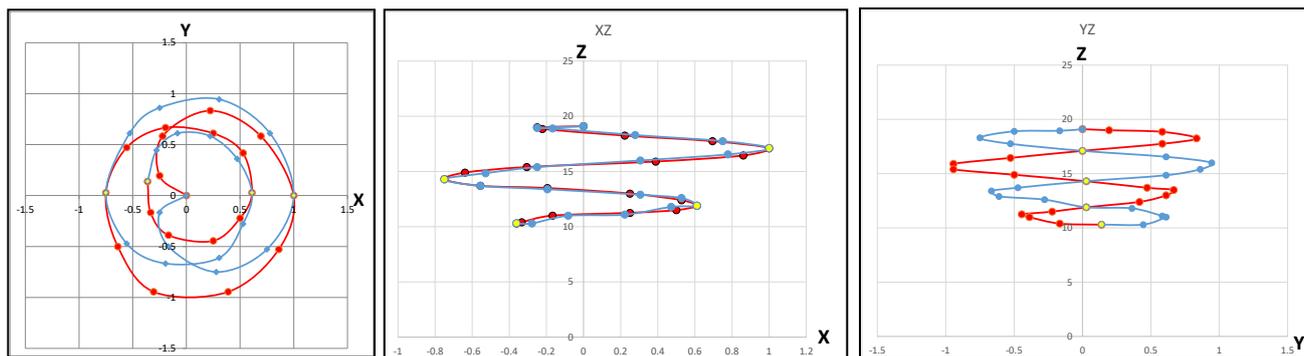
左回り $a = 0.0064e^{-0.087n}$ 右回り $a = 0.0098e^{-0.103n}$



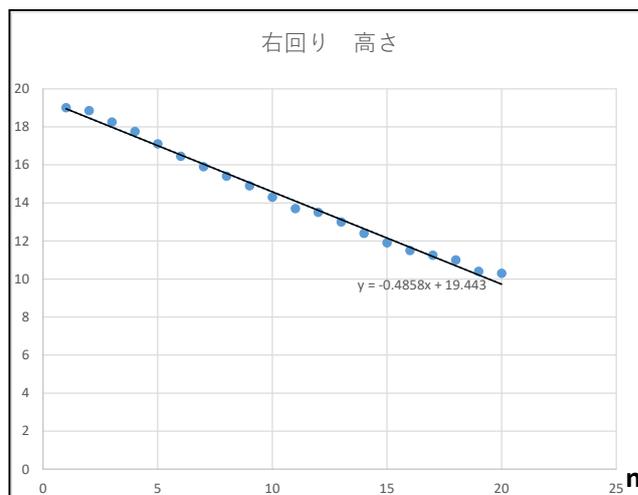
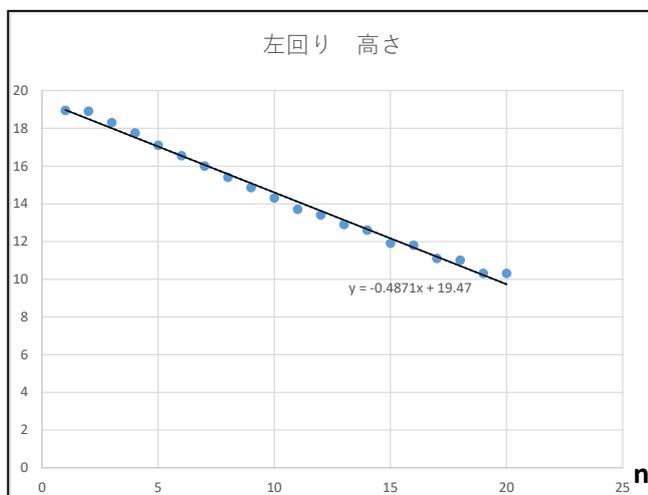
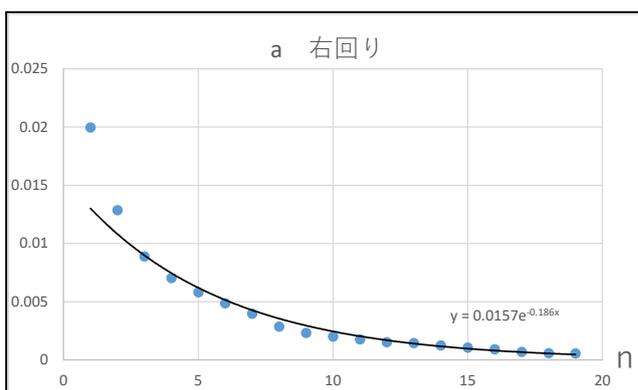
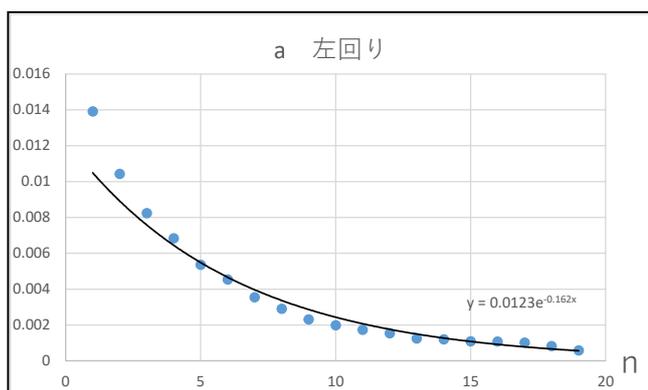
(3) プリンチュウ3 (図8)



左回り : $a = 0.0123e^{-0.162n}$
 $b = -0.4871n$
 右回り : $a = 0.0157e^{-0.186n}$
 $b = -0.4858n$



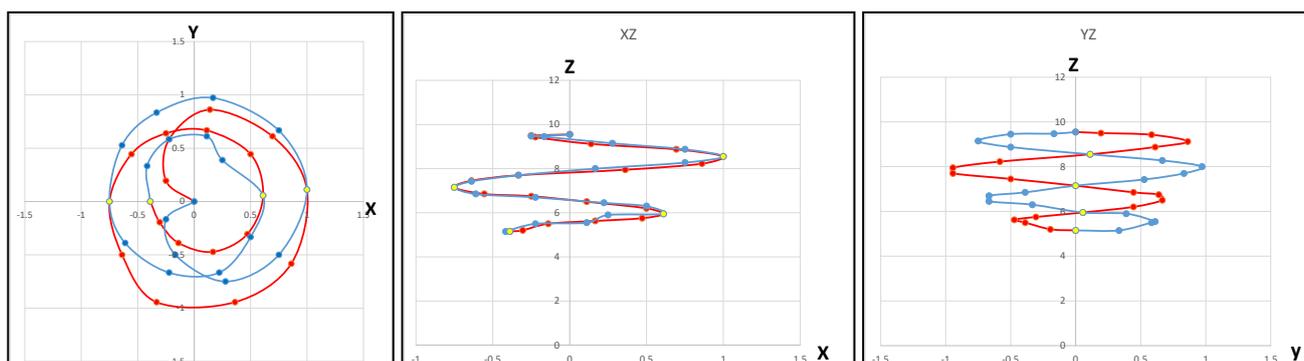
※ 赤は右回りの刺座の配列、青は左回りの刺座の配列を示す。

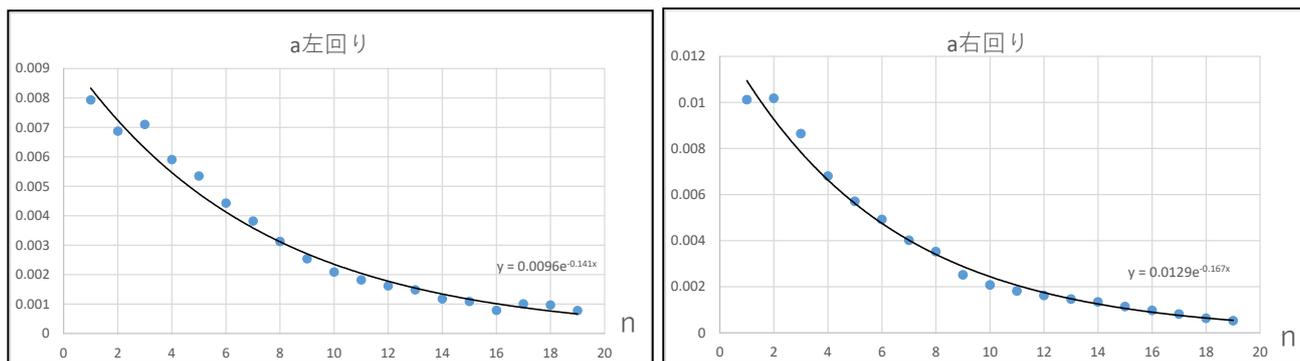


ブリンチュウ3の刺座の配列の歪みを修正すると、以下のようになる。

左回り $a = 0.0096e^{-0.141n}$

右回り $a = 0.0129e^{-0.16n}$

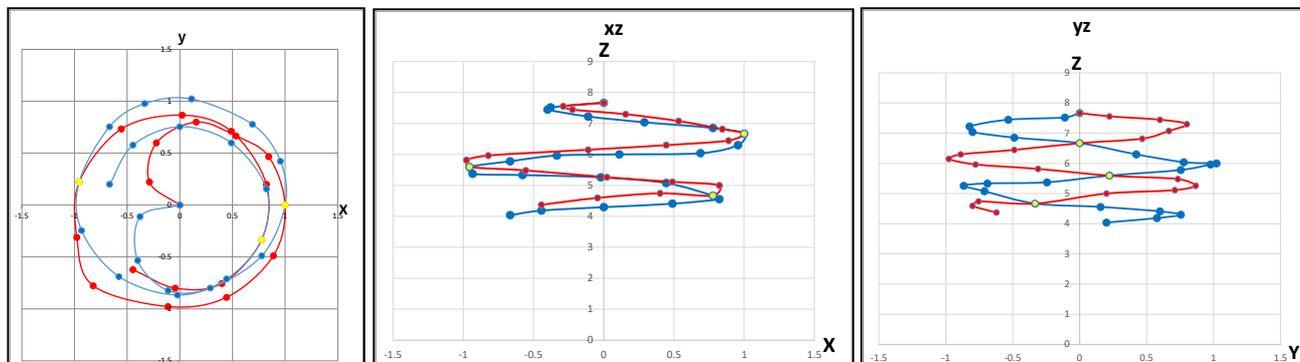




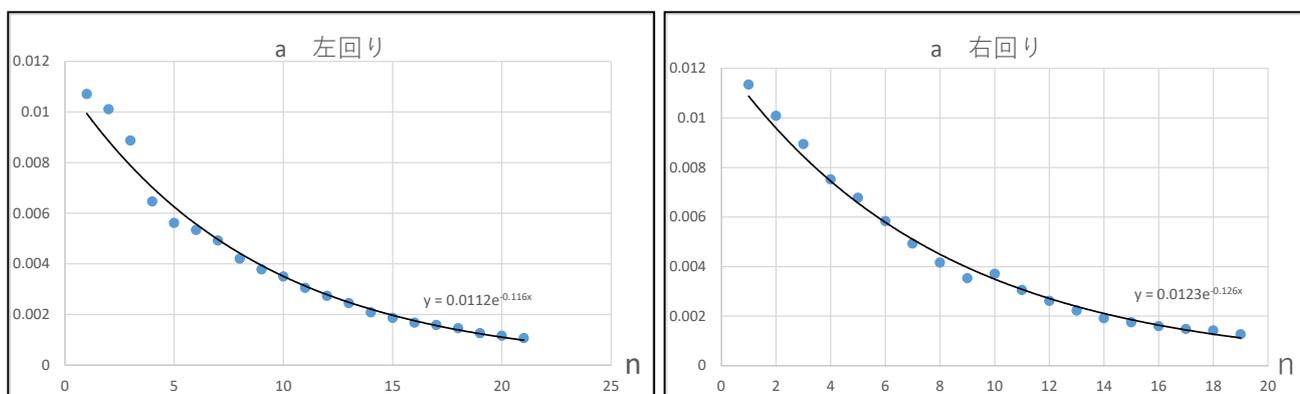
(4) ブリンチュウ4 (図9)

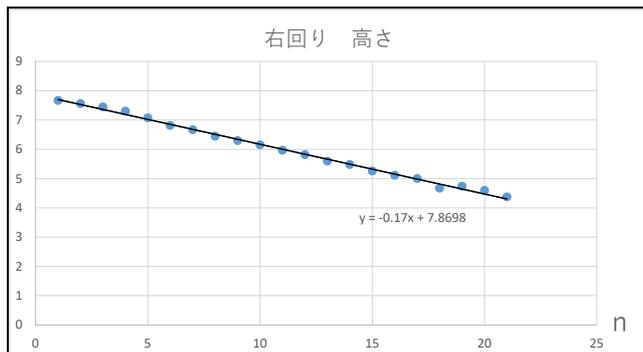
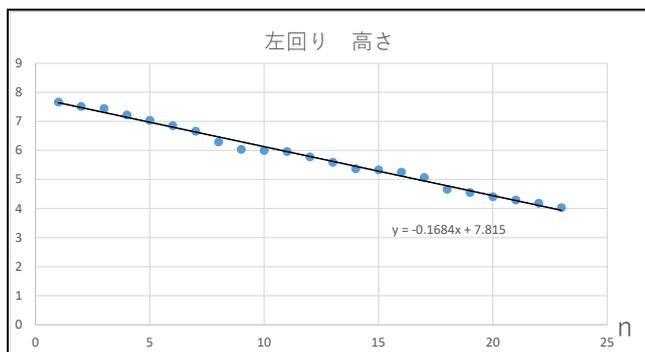


左回り : $a=0.0112e^{-0.116n}$
 $b=-0.1684n$
 右回り : $a=0.0123e^{-0.126n}$
 $b=-0.1700n$



※ 赤は右回りの刺座の配列、青は左回りの刺座の配列を示す。

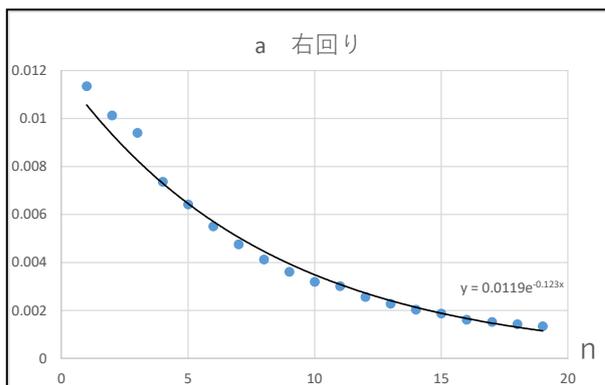
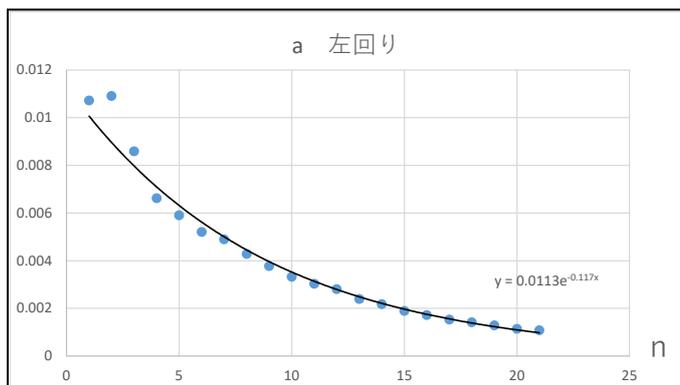
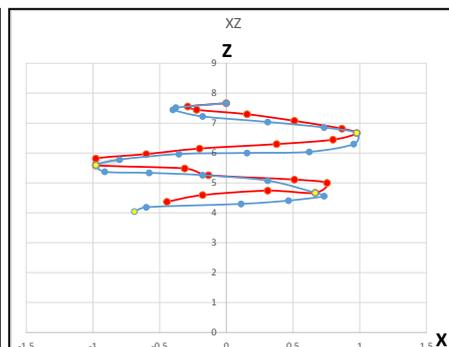
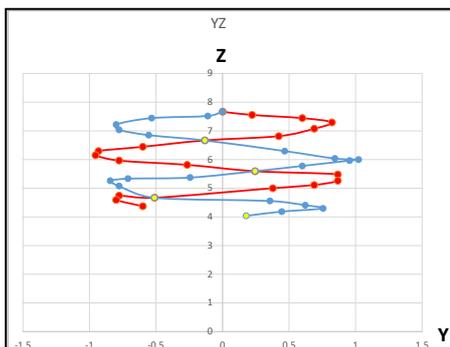
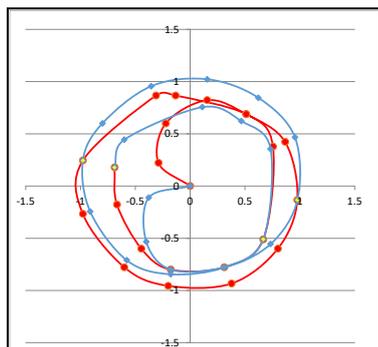




ブリンチュウ4の刺座の配列の歪みを修正すると、次のようになる。

左回り : $a = 0.0113e^{-0.117n}$

右回り : $a = 0.0119e^{-0.123n}$



(5) ブリンチュウ5 (図10)

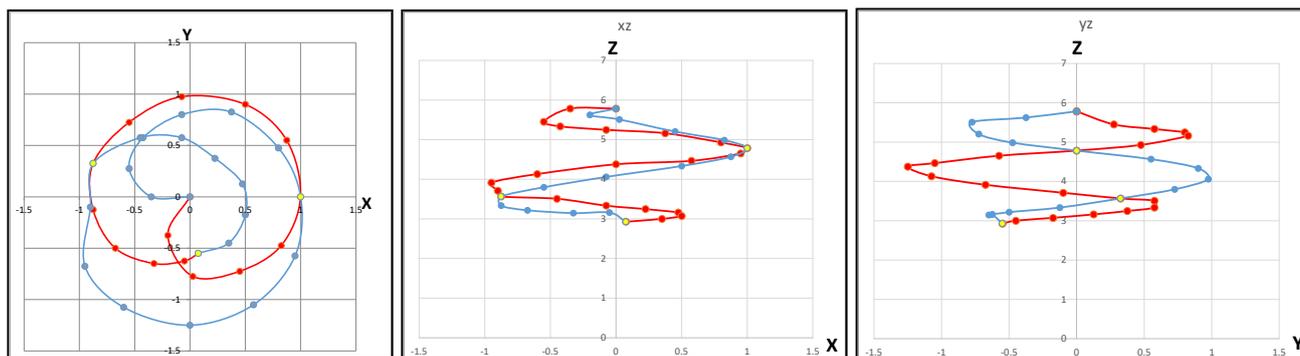


左回り : $a = 0.0213e^{-0.201n}$

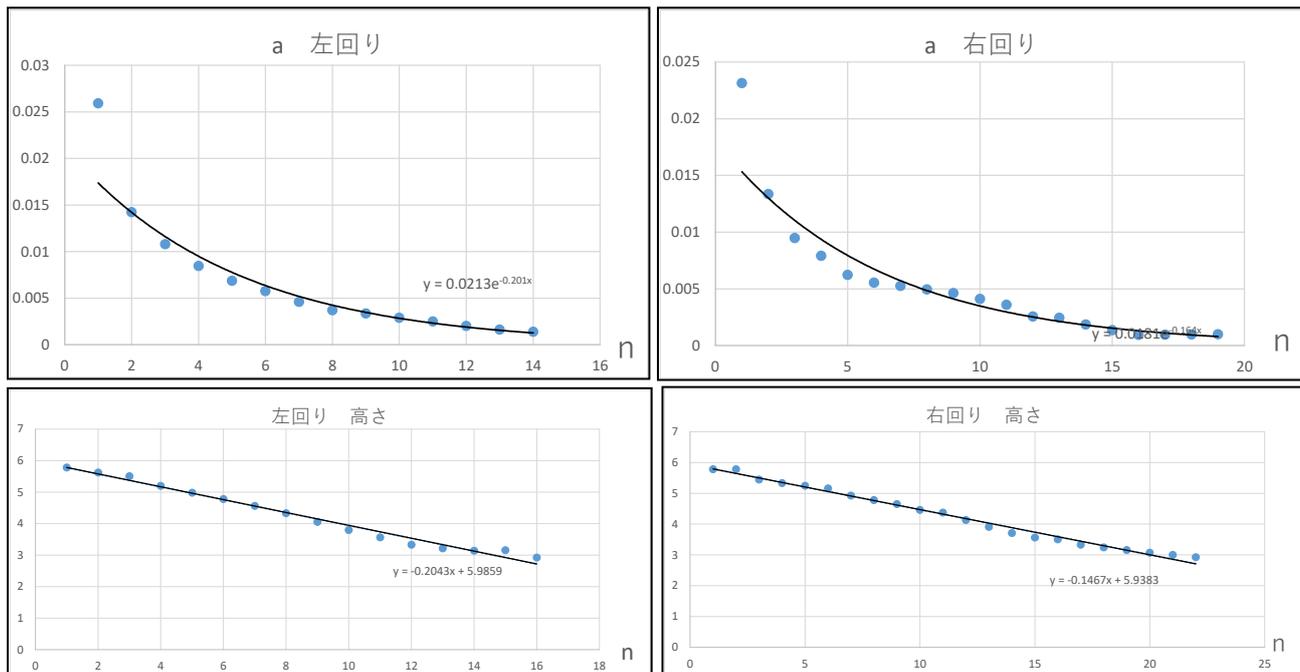
$b = -0.2043n$

右回り : $a = 0.0181e^{-0.164n}$

$b = -0.1467n$

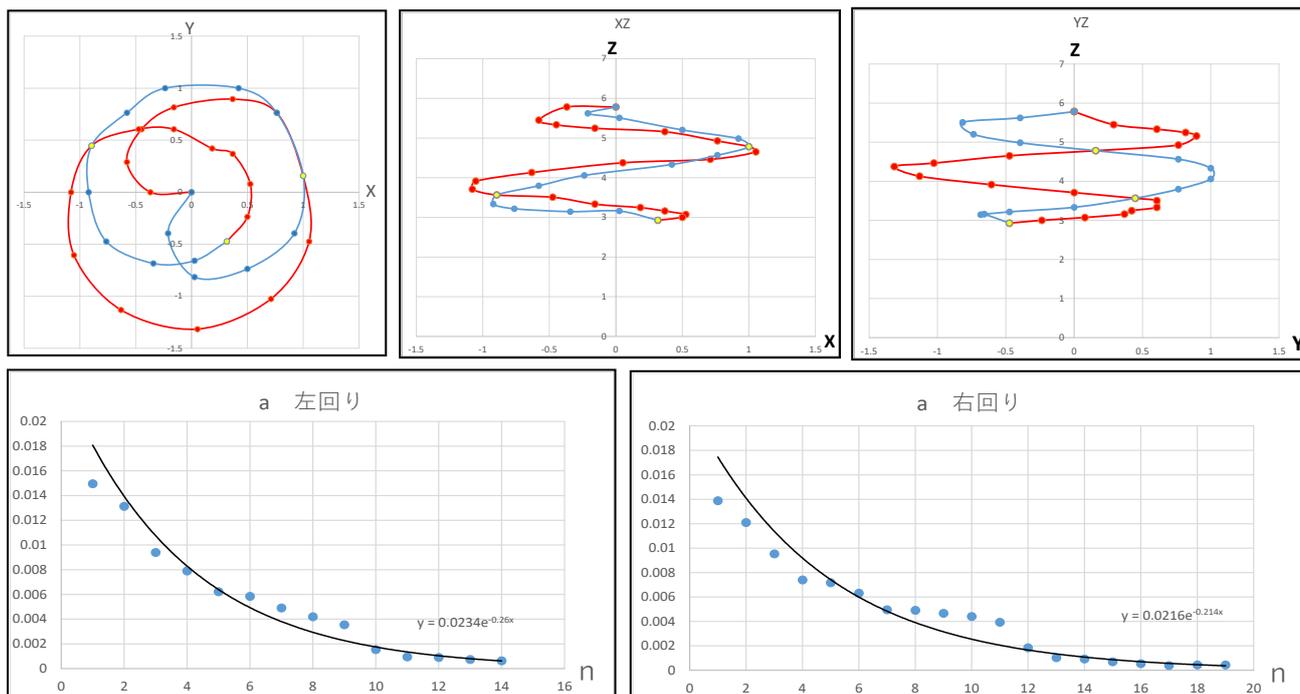


※ 赤は右回りの刺座の配列、青は左回りの刺座の配列を示す。



ブリンチュウ5の刺座の配列の歪みを修正すると、次のようになる。

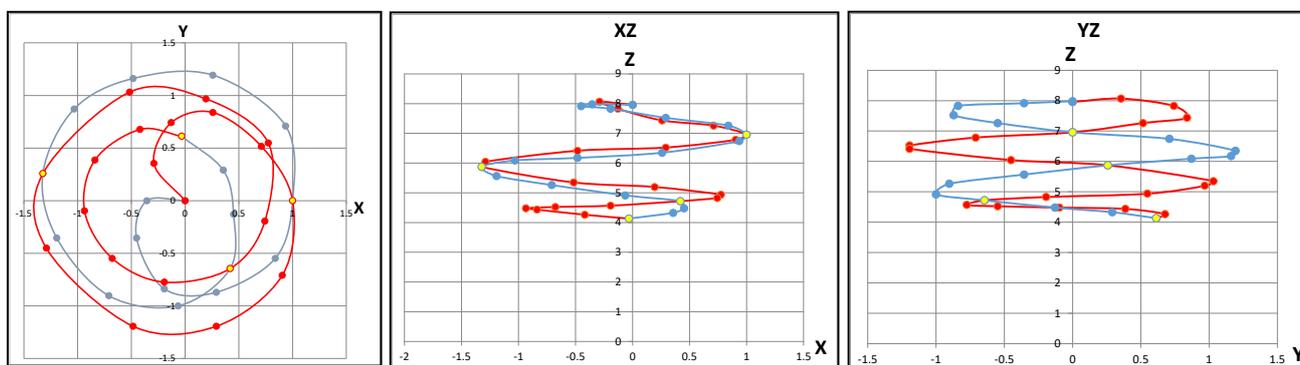
左回り : $a = 0.0234e^{-0.26n}$ 右回り : $a = 0.0216e^{-0.214n}$



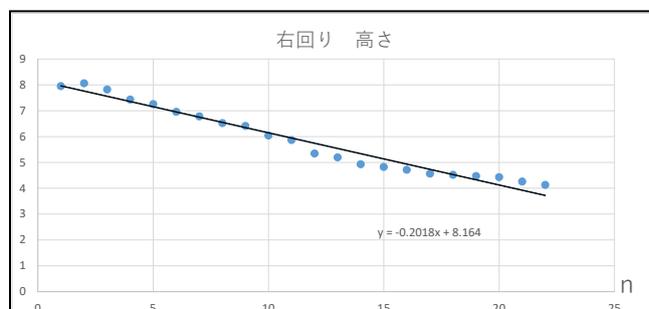
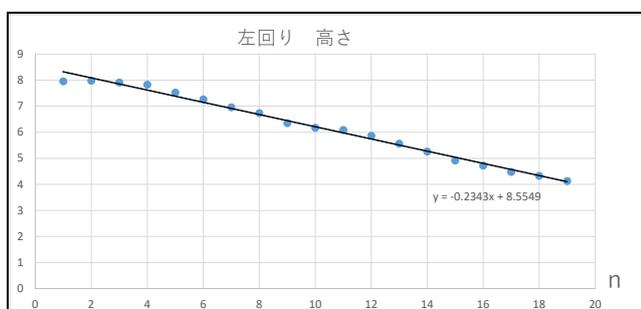
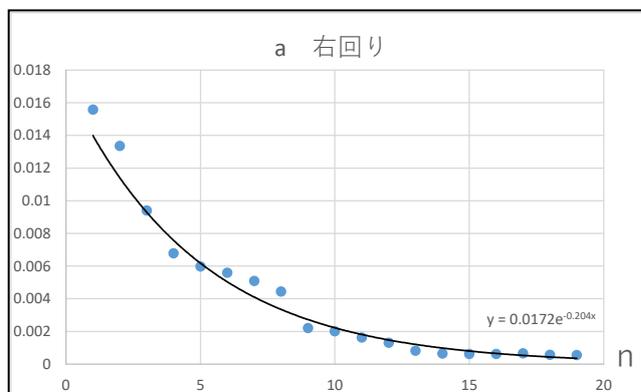
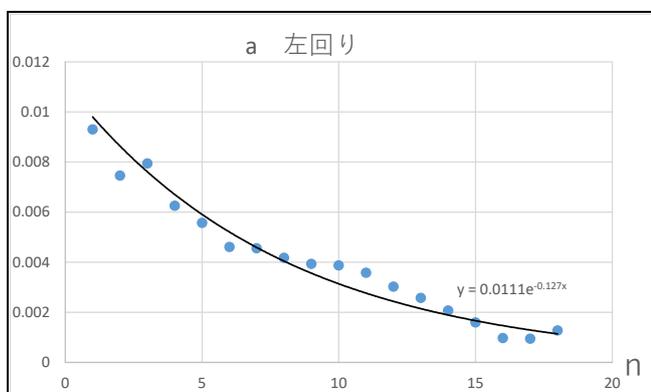
(6) ブリンチュウ6 (図10)



左回り : $a=0.0111e^{-0.127n}$
 $b=-0.2343n$
 右回り : $a=0.0172e^{-0.204n}$
 $b=-0.2018n$

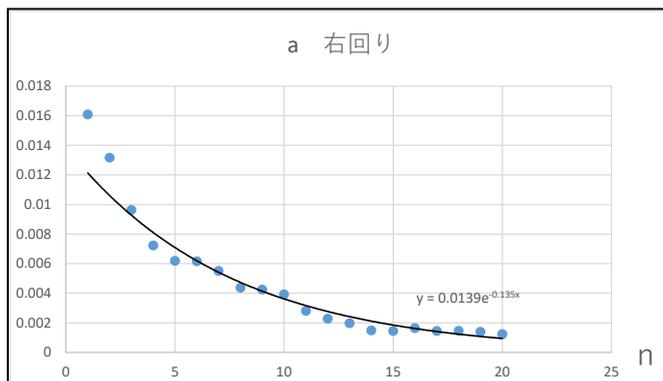
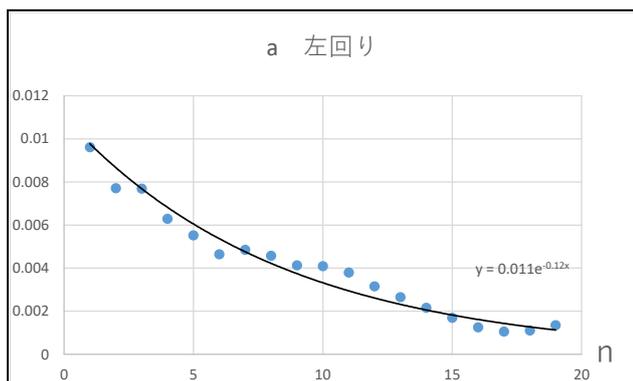
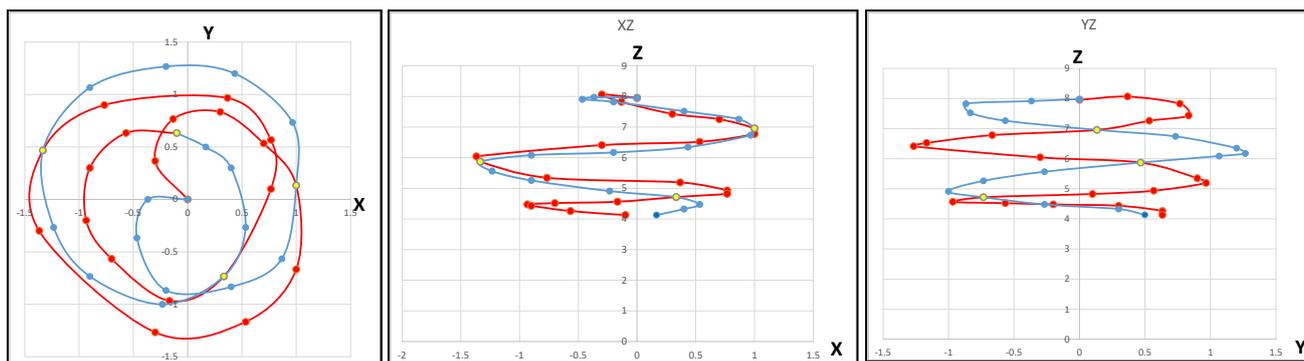


※ 赤は右回りの刺座の配列、青は左回りの刺座の配列を示す。



ブリンチュウ6の刺座の配列の歪みを修正した結果は、次のとおりである。

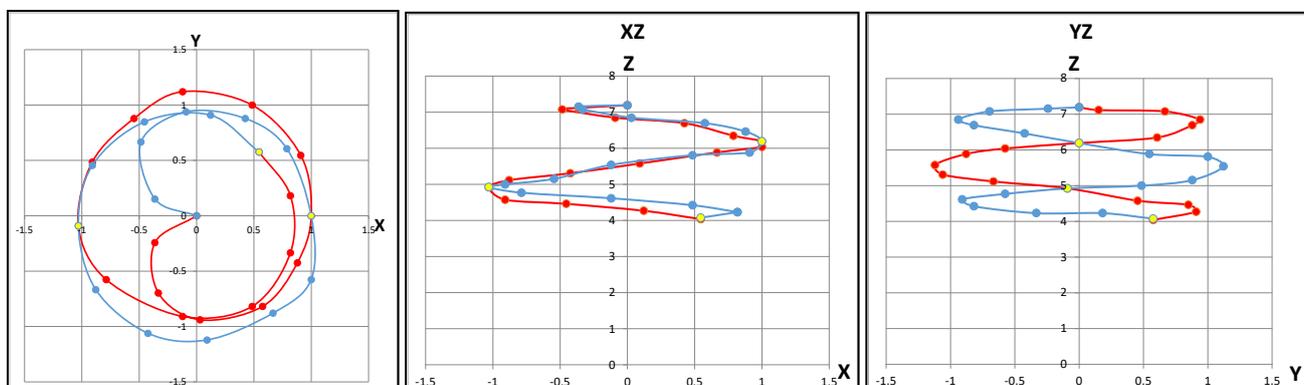
左回り : $a=0.011e^{-0.120n}$ 右回り : $a=0.0139e^{-0.135n}$



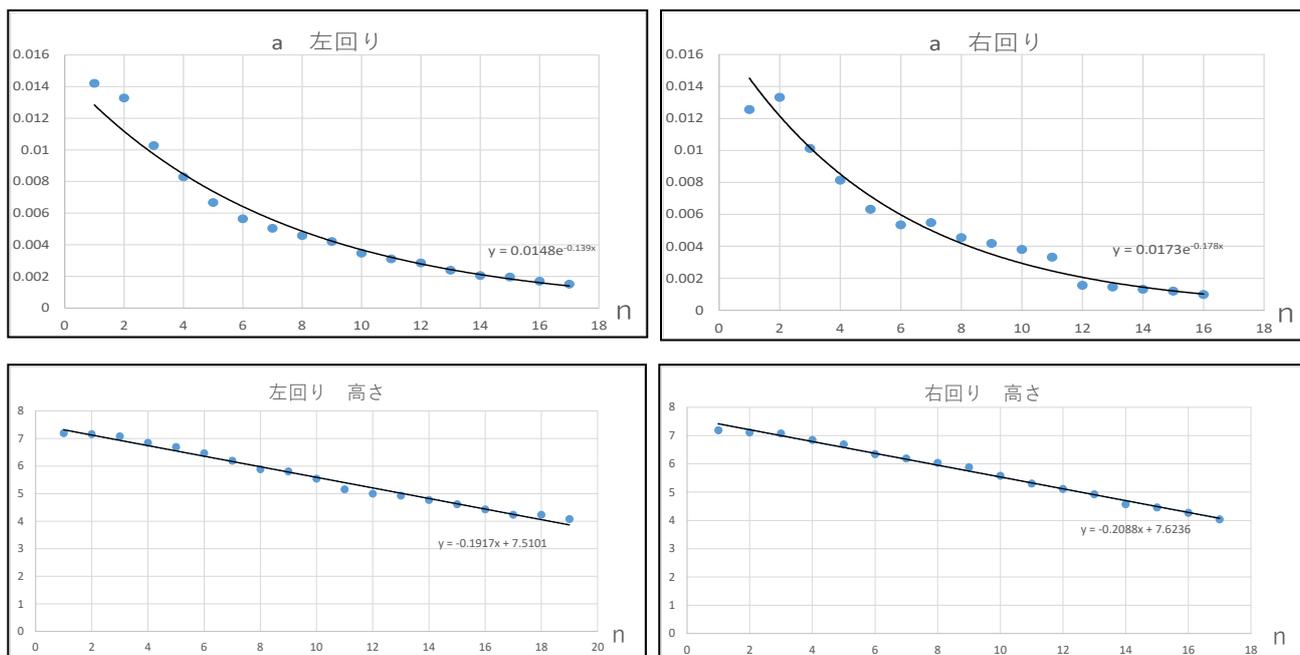
(7) ブリンチュウ7 (図 12)



左回り : $a=0.0148e^{-0.139n}$
 $b=-0.1917n$
 右回り : $a=0.0173e^{-0.178n}$
 $b=-0.2088n$

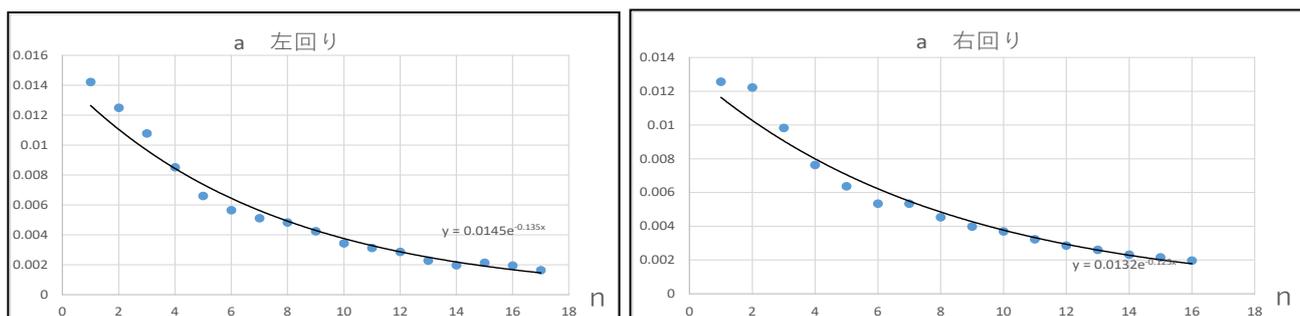
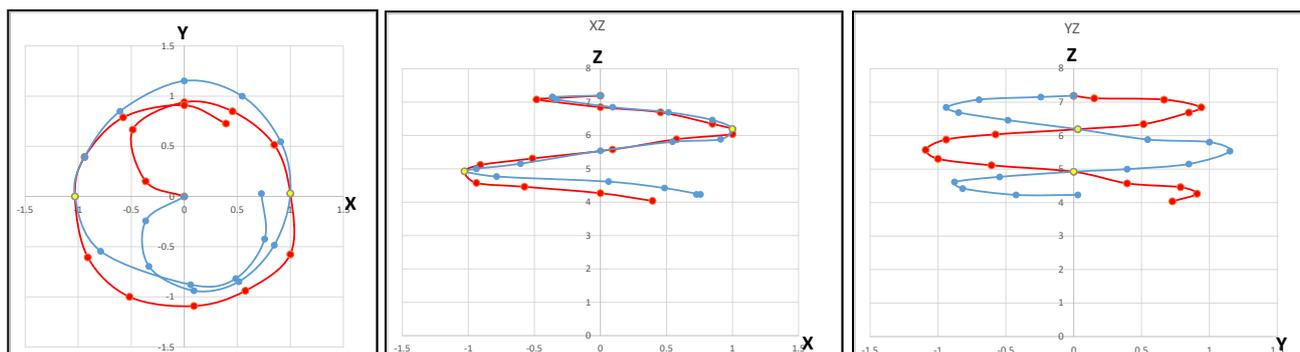


※ 赤は右回りの刺座の配列、青は左回りの刺座の配列を示す。



ブリンチュウ7の刺座の配列の歪みを修正すると、次のとおりになる。

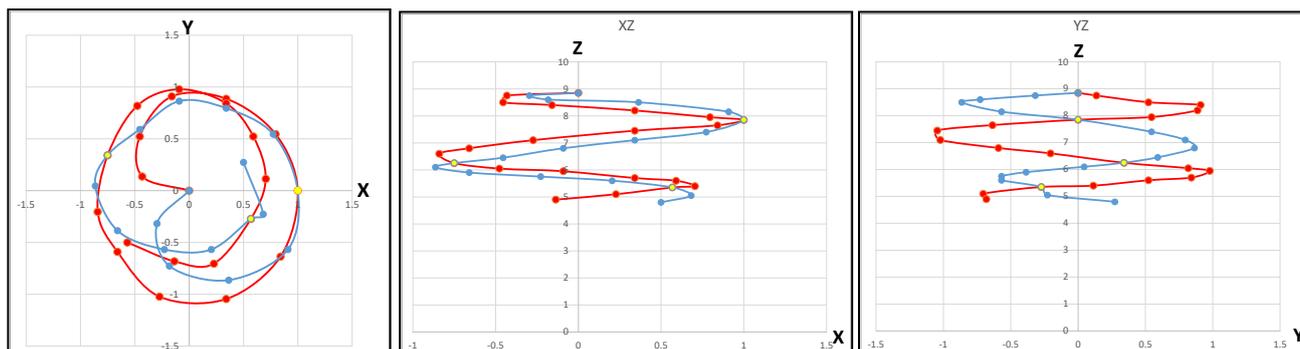
左回り : $a = 0.0145e^{-0.135n}$ 右回り : $a = 0.0132e^{-0.125n}$



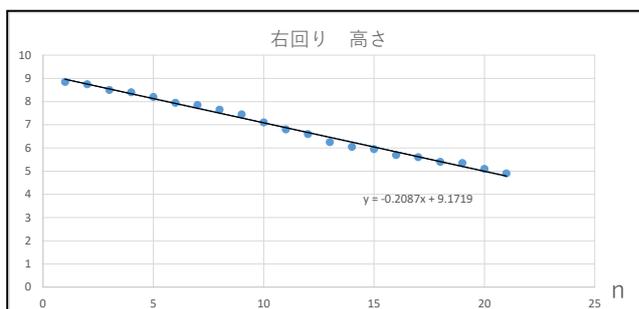
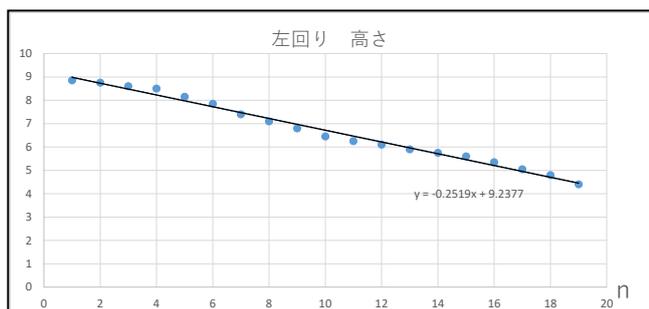
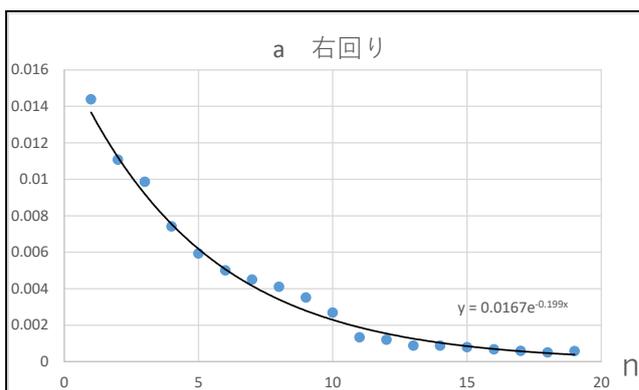
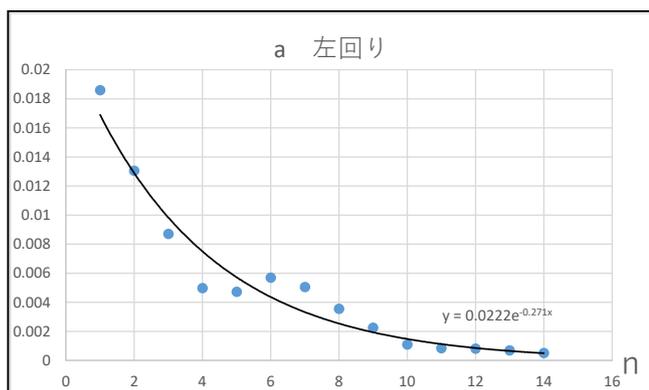
8

(8) ブリンチュウ8 (図13)

左回り : $a = 0.0222e^{-0.271n}$
 $b = -0.2519n$
 右回り : $a = 0.0167e^{-0.199n}$
 $b = -0.2087n$



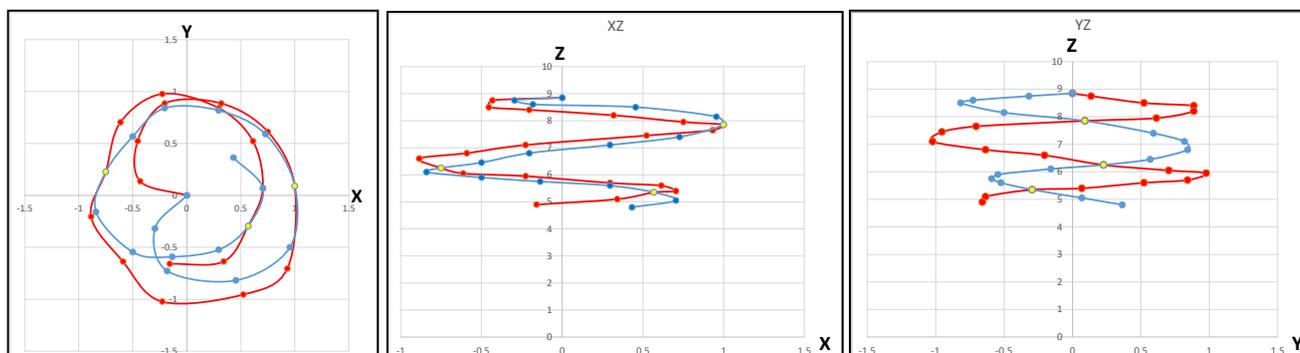
※ 赤は右回りの刺座の配列、青は左回りの刺座の配列を示す。

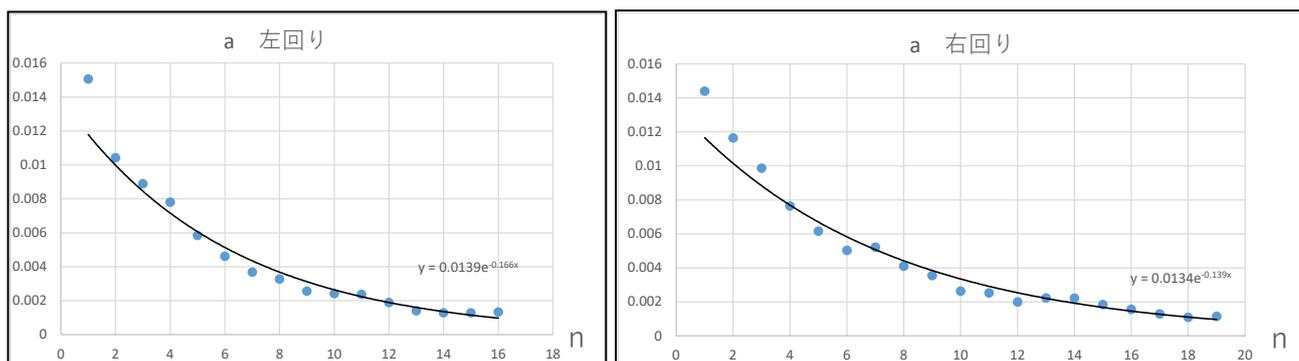


プリンチュウ8の刺座の配列の歪みを修正すると、次のようになる。

左回り : $a = 0.0139e^{-0.166n}$

右回り : $a = 0.0134e^{-0.139n}$





4. 考察

サボテンの刺は、乾燥した環境に適応するために葉が変化したものであり、他の植物にも見られるように螺旋を描いて配列しているように見えるが、これまでそれを明らかにした先行研究はなかった。筆者らはブリンチュウを試料として用いて、ブリンチュウの刺座の配列を測定した。同一個体の外見が乾燥（水分量）や成長（個体の大きさ）によって変化しても、刺座の配列の位置関係は変わらない（前田ほか, 投稿中）。

ブリンチュウには、さまざまに個性的な外見のものがあるが、筆者らは以下について明らかにした。

- ① ブリンチュウの刺座は、上方中央から下方に向かって、左回りと右回りに螺旋を描いて、共有刺座で出会いながら配列している。
- ② 歪みの多少にかかわらず、ブリンチュウの刺座配列の螺旋方程式を求めることができたが、その a や b の値はばらついている（表1）。

表1 ブリンチュウ試料1～9の螺旋方程式における n 本目の a と b

| | 測定値 | 修正値 | | 測定値 | 修正値 |
|---------|---|-------------------------|---------|---|-------------------------|
| ブリンチュウ1 | 左回り $a = 0.0139e^{-0.146n}$ $b = -0.2023$ | $a = 0.0146e^{-0.145n}$ | ブリンチュウ5 | 左回り $a = 0.0213e^{-0.201n}$ $b = -0.2043$ | $a = 0.0234e^{-0.260n}$ |
| | 右回り $a = 0.0139e^{-0.144n}$ $b = -0.2052$ | $a = 0.0148e^{-0.145n}$ | | 右回り $a = 0.0181e^{-0.164}$ $b = -0.1467$ | $a = 0.0216e^{-0.214n}$ |
| ブリンチュウ2 | 左回り $a = 0.0082e^{-0.101n}$ $b = -0.1730$ | $a = 0.0064e^{-0.087n}$ | ブリンチュウ6 | 左回り $a = 0.0111e^{-0.127n}$ $b = -0.2343$ | $a = 0.011e^{-0.120n}$ |
| | 右回り $a = 0.0077e^{-0.094n}$ $b = -0.1666$ | $a = 0.0098e^{-0.103n}$ | | 右回り $a = 0.0172e^{-0.204n}$ $b = -0.2018$ | $a = 0.0139e^{-0.135n}$ |
| ブリンチュウ3 | 左回り $a = 0.0123e^{-0.162n}$ $b = -0.4871$ | $a = 0.0096e^{-0.141n}$ | ブリンチュウ7 | 左回り $a = 0.0148e^{-0.139n}$ $b = -0.1917$ | $a = 0.0145e^{-0.135n}$ |
| | 右回り $a = 0.0157e^{-0.162n}$ $b = -0.4858$ | $a = 0.0129e^{-0.160n}$ | | 右回り $a = 0.0173e^{-0.178n}$ $b = -0.2088$ | $a = 0.0132e^{-0.125n}$ |
| ブリンチュウ4 | 左回り $a = 0.0112e^{-0.116n}$ $b = -0.1684$ | $a = 0.0113e^{-0.117n}$ | ブリンチュウ8 | 左回り $a = 0.0222e^{-0.271n}$ $b = -0.2519$ | $a = 0.0139e^{-0.166n}$ |
| | 右回り $a = 0.0123e^{-0.126n}$ $b = -0.1700$ | $a = 0.0119e^{-0.123n}$ | | 右回り $a = 0.0167e^{-0.199n}$ $b = -0.2087$ | $a = 0.0134e^{-0.139n}$ |

③ 刺座の歪みを、個体が歪んでいなければ本来その場所にあったであろうと考えられる位置に水平方向に修正すると、中心角 θ の値が変化し、 a の値も連動して変化し、個体間の誤差が小さくなる (表 1)。 a は $n=1$ 、ネイピア数 $e=2.71828$ 、 b は $n=1$ のときの数値を求めても、ばらついていた 8 個体の実測値よりも、8 個体間の誤差が小さくなり、類似した a および b をもつ螺旋方程式になることがわかる (表 2、図 14)。

表 2 実測値と、歪みを修正した a と b の値 ($n=1$ の場合の値で比較)

| | プリンチュウ1 | プリンチュウ2 | プリンチュウ3 | プリンチュウ4 | プリンチュウ5 | プリンチュウ6 | プリンチュウ7 | プリンチュウ8 |
|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|
| 左回りa | 0.0120 | 0.0074 | 0.0105 | 0.0100 | 0.0174 | 0.0098 | 0.0129 | 0.0169 |
| 左回りb | -0.2023 | -0.1730 | -0.4871 | -0.1684 | -0.2043 | -0.2343 | -0.1917 | -0.2519 |
| 右回りa | 0.0120 | 0.0070 | 0.0130 | 0.0108 | 0.0154 | 0.0140 | 0.0145 | 0.0137 |
| 右回りb | -0.2052 | -0.1666 | -0.4858 | -0.1700 | -0.1467 | -0.2018 | -0.2088 | -0.2087 |
| 歪み (mm) | 2.84 | 3.59 | 1.16 | 1.71 | 5.69 | 3.15 | 1.7 | 2.84 |
| 左回り修正a | 0.0126 | 0.0059 | 0.0083 | 0.0101 | 0.0180 | 0.0098 | 0.0127 | 0.0118 |
| 右回り修正a | 0.0128 | 0.0088 | 0.0110 | 0.0105 | 0.0174 | 0.0121 | 0.0116 | 0.0117 |

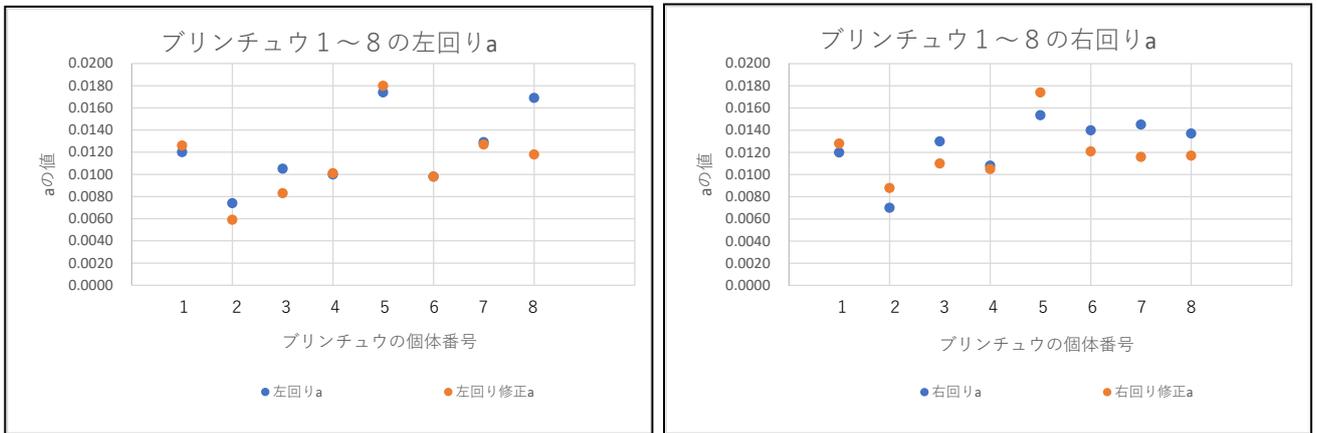


図 14 歪みを修正する前後のプリンチュウの螺旋方程式の a の値

④ 試料として用いたすべてのプリンチュウの、歪みを修正した左回りと右回りの刺座の座標 a と b をすべてまとめて図 15 に示した。 a 、 b ともによく似た傾向を示す。 a の近似曲線および b の近似直線を引くと、 $a=0.0114e^{-0.119n}$ 、 $b=-0.2007$ となる。

このことから、プリンチュウ種を表す螺旋方程式は、以下のように表すことができる。

$$r = 0.0107e^{-0.127n} \theta \quad z = -0.1757n$$

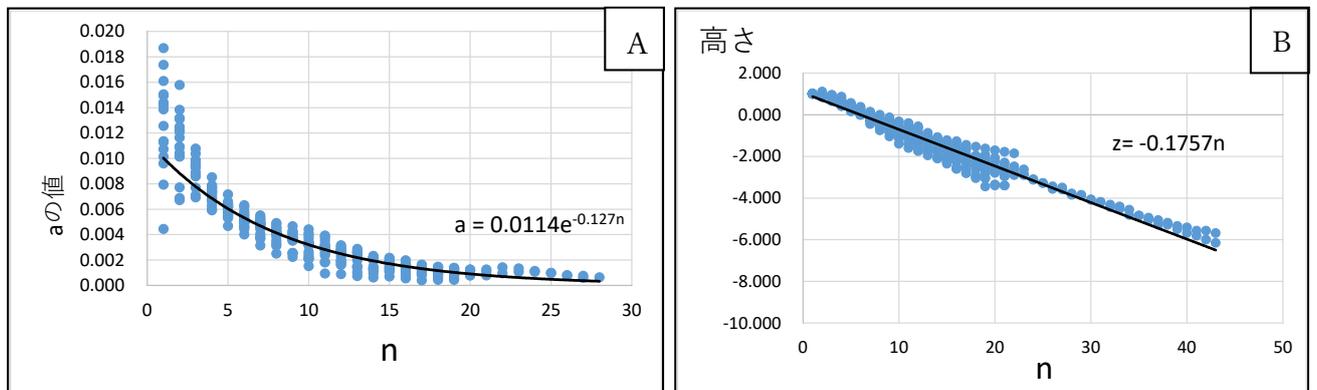


図 15 すべてのプリンチュウの、歪みを修正した左回りと右回りの刺座の座標 a (図 A) と b (図 B)

6. 今後の課題

本研究では、歪み指数を用いて配列を修正すれば、歪んだ個体でもブリンチュウを示す螺旋方程式を求めることができた。他のサボテン種でも同様の研究をおこない、比較をすることによって、今回の螺旋方程式の a と b がブリンチュウという種を表すものかどうかについて検証しなければならない。さらに今後は、さまざまなサボテンの種の螺旋方程式を求め、系統樹上の距離との関係の有無についても明らかにしていきたい。

7. 謝辞

本研究を行うにあたり、国立科学博物館筑波実験植物園と本校科学部顧問の川勝和哉主幹教諭には、有意義な議論をしていただいた。ここに記して謝意を表す。

8. 引用文献

荒谷優太・石田薫・北野彩華・平岩尚樹・廣瀬友佳・赤塚千春・河内遥・中川潤哉・山本彩楓（2014）マツの種類による松毬の鱗片配列の規則性の共通点と相違点(化学と生物, 第52巻, 第8号, 555-557)
前田智彦・岸上栞菜・武内優果・本脇敬人・吉田龍之介（2022）サボテンの刺座の配列に規則性はあるのか（化学と生物, 投稿中）

サボテン(プリンチュウ *Pachycereus pringlei*) の刺座の配列方程式の決定

兵庫県立姫路東高等学校 科学部生物系研究部

○岸上菜菜 前田智彦 本脇敬人 吉田龍之介 藤田詩桜 村瀬太郎 大和司

キーワード 共有刺座 歪み 螺旋方程式

動機 昨年度のサボテン班(2021)は、10種のサボテンの刺座の配列を測定し、そこに規則性がないかどうか、方程式で示すことができないか研究を行った。しかし、同じ種であっても刺座の配列は個体によって異なっており、規則性を明らかにすることはできなかった。

目的と仮説 ・昨年度規則性が認められなかった原因は、規則性を表す方程式が適切でないことや、サボテンの形状の個体差を処理しなかったからだと考えた。
 ・本年度は、プリンチュウに種を絞り、刺座の配置を座標で表して螺旋方程式の考えを導入し、さらに個体の歪みを修正して方程式で表すことができないか研究を行った。
 ・同種であれば刺座の配列に同じ規則性があるという仮説を立てた。



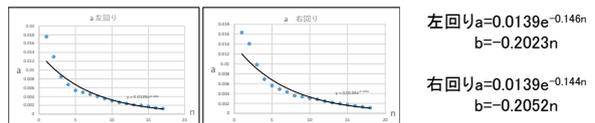
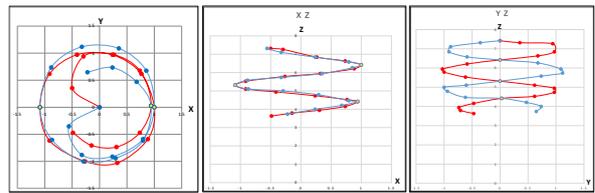
考察

- ① プリンチュウを真上から見たとき、刺座は左回りと右回りに螺旋を描いて配列し、共有刺座で交差しながら下方に伸びている。
- ② 歪みの多少にかかわらず、プリンチュウの刺座配列を螺旋方程式で表すことができた。
- ③ 本来の位置から刺座がどのくらい歪んで配置しているかを測定して、歪みを修正すると、より正確にプリンチュウの刺座の配列を表す特徴的な螺旋方程式を求めることができた。

$$r=0.0114e^{-0.127n\theta} \quad z=-0.1757n$$

結果

プリンチュウ1を例にして

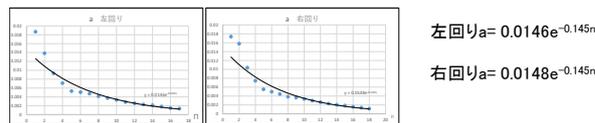
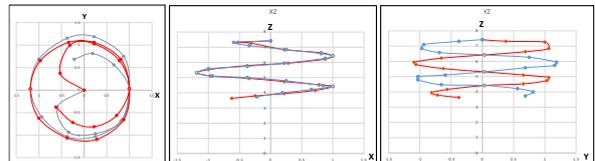


左回り $a=0.0139e^{-0.146n}$
 $b=-0.2023n$

右回り $a=0.0139e^{-0.144n}$
 $b=-0.2052n$



刺座の配列の歪みを水平方向に修正すると



左回り $a=0.0146e^{-0.145n}$

右回り $a=0.0148e^{-0.145n}$

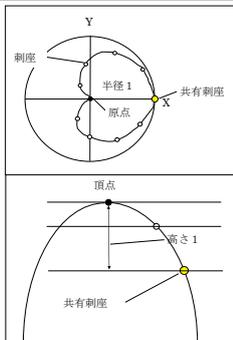
プリンチュウ試料1~8の螺旋方程式におけるn本目のaとb

| | プリンチュウ1 | プリンチュウ2 | プリンチュウ3 | プリンチュウ4 | プリンチュウ5 | プリンチュウ6 | プリンチュウ7 | プリンチュウ8 |
|----------|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 実数値 a, b | 左回り $a=0.0139e^{-0.146n}$ 右回り $b=-0.2023n$ | 左回り $a=0.0125e^{-0.144n}$ 右回り $b=-0.1790n$ | 左回り $a=0.0123e^{-0.144n}$ 右回り $b=-0.4871n$ | 左回り $a=0.0112e^{-0.144n}$ 右回り $b=-0.1684n$ | 左回り $a=0.0215e^{-0.144n}$ 右回り $b=-0.2043n$ | 左回り $a=0.0111e^{-0.144n}$ 右回り $b=-0.2343n$ | 左回り $a=0.0149e^{-0.144n}$ 右回り $b=-0.1917n$ | 左回り $a=0.0225e^{-0.144n}$ 右回り $b=-0.2519n$ |
| 修正値 | 左回り $a=0.0146e^{-0.145n}$ 右回り $b=-0.2052n$ | 左回り $a=0.0146e^{-0.145n}$ 右回り $b=-0.1688n$ | 左回り $a=0.0146e^{-0.145n}$ 右回り $b=-0.4868n$ | 左回り $a=0.0146e^{-0.145n}$ 右回り $b=-0.1700n$ | 左回り $a=0.0146e^{-0.145n}$ 右回り $b=-0.1467n$ | 左回り $a=0.0146e^{-0.145n}$ 右回り $b=-0.2018n$ | 左回り $a=0.0146e^{-0.145n}$ 右回り $b=-0.2058n$ | 左回り $a=0.0146e^{-0.145n}$ 右回り $b=-0.2087n$ |

研究方法

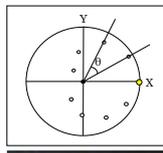
〈刺座の配列の測定方法〉

- 外形が様々に異なるサボテン8個体を
- ① 真上から見た際に刺座の位置が確認しやすいように刺を切り取り、刺座に垂直に針をさした。
 - ② 真上から写真を撮影し、方眼紙を乗せて刺座の座標を求めた(原点と1つ目の共有刺座(黄色)とを結び線分をx軸、これに垂直な線分をy軸とし、原点と1つ目の共有刺座間の距離を1とした。
 - ③ サボテンを真横から見て、原点と刺座まで、あるいは刺座間の高さの差を測定し、原点から1つ目の共有刺座間の距離を1として示した。



〈螺旋方程式の求め方〉

- ① プリンチュウを真上から見たx-y平面で、隣り合う刺座間の角度 θ を測定し、n本目の刺座における螺旋方程式を、左回りと右回りのそれぞれで求めた。
- ② x-y平面では、半径r、中心角 θ とすると、極方程式 $r=a\theta$ 、高さ $z=b\theta$ となる。aはrと θ の値から求めた。bは高さの座標から求めた。rとzの2つの方程式を合わせて螺旋方程式という。



〈歪みの測定方法〉

- ① プリンチュウの頂点を原点として、原点と第1刺座を結び直線を引き、それを下方に延長する。
- ② 第2刺座以降、この直線から左右にずれがある場合、左右のずれの距離(mm)を測定して、実際の刺座の位置をその長さだけ水平方向に移動させ、これを本来の理想的な配置とした。



今後の課題

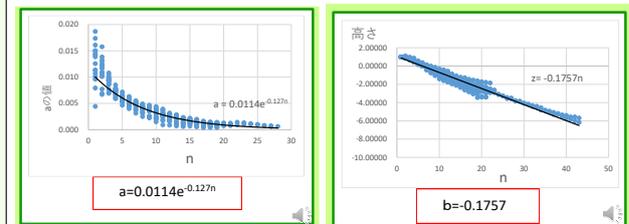
歪みを修正すれば、歪んだ個体でもプリンチュウを示す螺旋方程式を求めることができた。他のサボテン種でも同様の研究をおこない、比較することによって、今回の螺旋方程式のaとbがプリンチュウという種を表す特有のものかどうかについて検証しなければならない。さらに今後は、さまざまなサボテンの種の螺旋方程式を求め、系統樹上の距離との関係の有無についても明らかにしていきたい。

謝辞

本研究を行うにあたり、国立科学博物館筑波実験植物園と本校科学部顧問の川勝和哉主幹教諭には、有意義な議論をしていただいた。ここに記して謝意を表す。

引用文献

荒谷優太・石田薫・北野彩華・平岩尚樹・廣瀬友佳・赤塚千春・河内通・中川潤哉・山本彩楓(2014)マツの種類による松茸の鱗片配列の規則性の共通点と相違点(化学と生物, 第52巻, 第8号, 555-557)
 前田智彦・岸上菜菜・武内優果・本脇敬人・吉田龍之介(2022)サボテンの刺座の配列に規則性はあるのか(化学と生物, 投稿中)



歪みを修正したaの近似曲線とbの近似直線

プリンチュウを表す螺旋方程式

$$r=0.0114e^{-0.127n\theta}$$

$$z=-0.1757n$$

蠕虫型ニハイチュウが片利共生する軟体動物の 腎囊における生育場所に対応する極帽形態の形成過程

兵庫県立姫路東高等学校 科学部生物系研究部

岸上 葉菜

キーワード：腎囊 極帽 片利共生 分化

要 旨

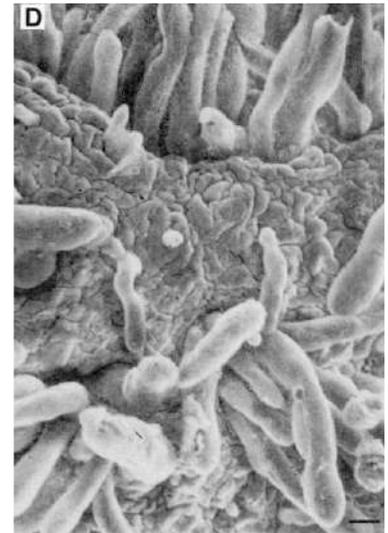
ニハイチュウ（二胚動物門）は、底生頭足類の腎臓に片利共生する体長数 mm の多細胞動物である。ニハイチュウには、蠕虫型個体と滴虫型幼生の2タイプがあり、蠕虫型個体が腎囊に接着する頭部（極帽）の形は腎囊表面の凹凸によってさまざまに異なる。

蠕虫型ニハイチュウの極帽はもともとすべて同じ円錐形であるが、イカやタコの腎囊表面の窪みや平らな部分の形状に対応して、成長とともに極帽の形状を適応させようとして変化させ、異なる種へと分化する。極帽が円錐形の種は、宿主に関わらず腎囊の窪みに接着し、極帽が成長しても変形せずに円錐形を保つ。一方、極帽が円盤形のものや一部帽子形様のものは、成長しても極帽は成長しないか、あるいは途中で成長が止まり、極帽の形を円盤形に変形させる。

1. 動機と目的

2021年に筆者は科学部顧問の勧めで大阪大学のSEEDSプログラムに挑戦し合格することができた。そこで、日本で数少ないニハイチュウの研究者であり多くの研究論文を発表しておられる古屋秀隆教授に出会い、ニハイチュウに強い興味をもち、以来2年間研究をおこなっている。

ニハイチュウはイカやタコなどの頭足類の腎囊表面に接着して過ごす片利共生生物である（[図1](#)）。接着する頭部（極帽とよぶ）の形は腎囊表面の凹凸によってさまざまに異なる。どのように極帽の形を変えるのかについての研究は、まだ始まったばかりである。本研究では、生殖場所で異なるニハイチュウの蠕虫型個体について、極帽を構成する前極細胞と後極細胞がどのような細胞成長を行うことで、もともとと同じ紡錘形であった極帽形態に違いが生じるのか、形成過程を明らかにすることを目的に研究をおこなうことにした。



[図1](#) 腎囊表面に吸着するニハイチュウ（古屋, 2004）
（スケールは20 μm）

2. ニハイチュウについて

ニハイチュウ（二胚動物門）は、底生のタコやイカなど頭足類の腎臓に片利共生する体長数 mm の多細胞動物である。細胞総数は種によってほぼ一定で、一般に22個前後であり、最多でも50個未満である。通常は無性生殖で増えるが、腎囊内で数が増えると有性生殖も行う。ニハイチュウの生活史には、蠕虫型個体と滴虫型幼生の2タイプの形態がみられる。蠕虫型個体は、尿とともに海中に排出されないよう、その極帽で腎囊に接着するか、腎囊表面の窪みに極帽を挿入して離れないようにしている。したがって、ニハイチュウにとって蠕虫型個体の極帽形態は、腎臓にとどまる上で重要な部域といえる。極帽は、一般に4個の前極細胞と4~6個の後極細胞とよばれる2層の細胞群によって構成されている。蠕虫型個体

の腎臓表面に接着する種の極帽は扁平な形、一方腎臓の窪みに挿入する種の極帽は円錐形である（古屋，1996・2002・2004・2006・2020a・2020b）。

ニハイチュウは多細胞生物が退化して誕生したことから、ニハイチュウの研究は、単細胞生物と多細胞生物の間のつながりを知るために重要であるにもかかわらず、ほとんど研究がなされていない。

3. 観察

蠕虫型のニハイチュウは、極帽の形状によって大きく、円錐形、円盤形、帽子形、不定形の4種類に分類できる。本研究ではそのうち、図2に示す、ミサキニハイチュウ（円錐形）、マッコナギーニハイチュウ（円錐形）、ヌベルニハイチュウ（円錐形）、アオリイカニハイチュウ（円盤形）、ヤマトニハイチュウ（円盤形と帽子形の間中型）の5種類と今回発見された新種の1種類（ツネキニハイチュウと命名／円盤形）の合計6種類のニハイチュウを対象として研究をおこなった。

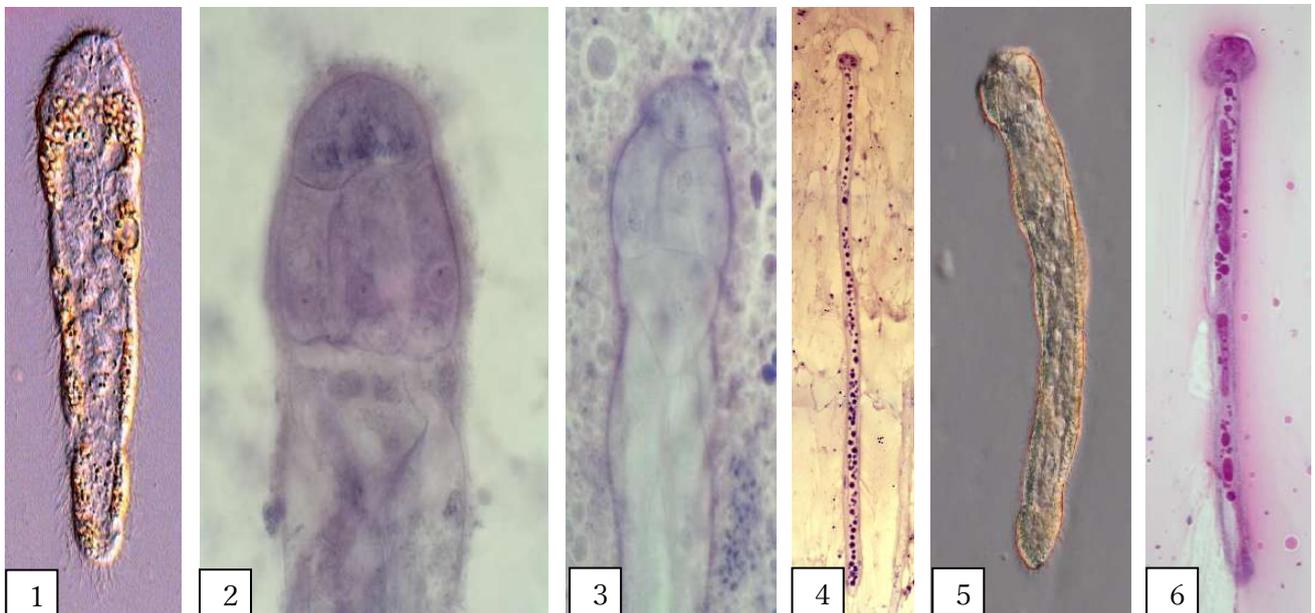


図2 研究対象としたニハイチュウ（1、4、5、6：写真縦100 μm、2、3：写真縦50 μm）

1：ミサキニハイチュウ（円錐形） 2：マッコナギーニハイチュウ（円錐形） 3：ヌベルニハイチュウ（円錐形） 4：アオリイカニハイチュウ（円盤形） 5：ヤマトニハイチュウ（円盤形と帽子形の間中型） 6：ツネキニハイチュウ（新種／円盤形）

顕微鏡下でミズダコやクモダコ、マダコ、アオリイカの腎臓を開き、腎臓表面をスライドガラスでこすり取るようにしてニハイチュウを付着させ、プレパラートを作成する。この際、体がのびて変形してしまうことがあるため、観察と測定に用いることができるニハイチュウは、3個体中1個体程度である。こうしてはがしとった、変形していないニハイチュウを、前述の6種類でそれぞれ50個体ずつ収集し、極帽をなす前極細胞（4個の細胞からなる）と後極細胞（4～6個の細胞からなる）の高

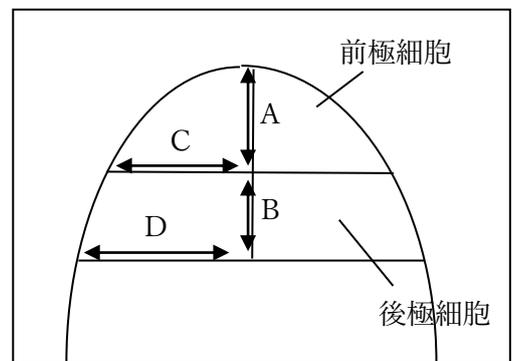


図3 ニハイチュウの極帽の測定

さ（A、B）と幅（C、D）（図3）をマイクロメーターを用いてそれぞれ測定した。引きはがす際の微弱的な変形がある可能性があるため、測定値を統計的に処理した。

4. 結果

6種類のニハイチュウの測定結果をグラフにまとめて示す。実測値は巻末に資料として示す。ここに示すすべてのニハイチュウは、ミスダコ、クモダコ、マダコ、アオリイカに関わらず同様に採取することができる。観察したすべてのニハイチュウは、小さいときには極帽がすべて円錐形であるが、成長するにつれて種ごとに極帽の形状に個性がみられるようになる。

(1) ミサキニハイチュウ (*Dicyemodoca misakiense*)

体が成長するにつれて前極細胞、後極細胞ともに成長して大きくなるが、終始円錐形を保っており、極帽の形状は変化しない（図4～図6）。

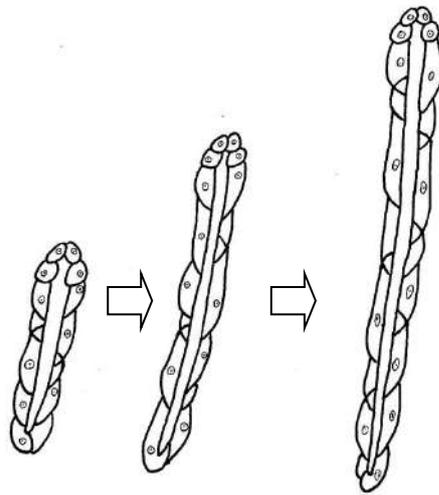


図4 ミサキニハイチュウの成長過程のスケッチ

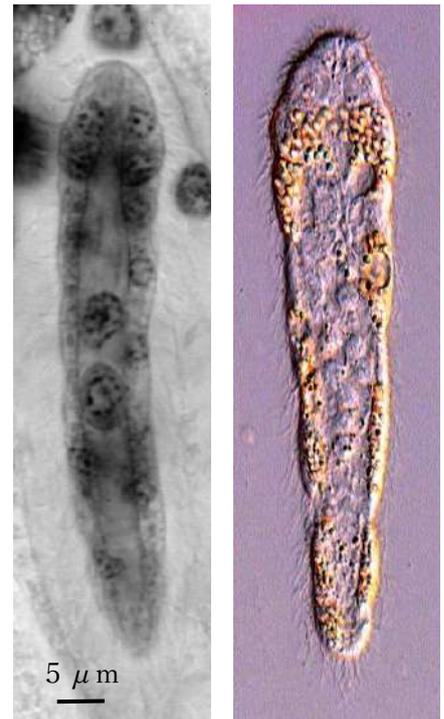
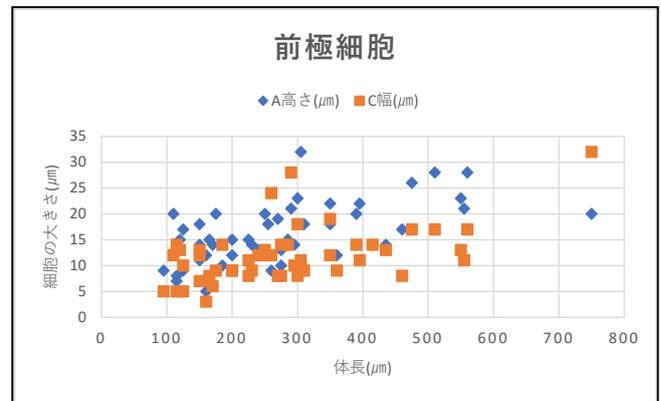
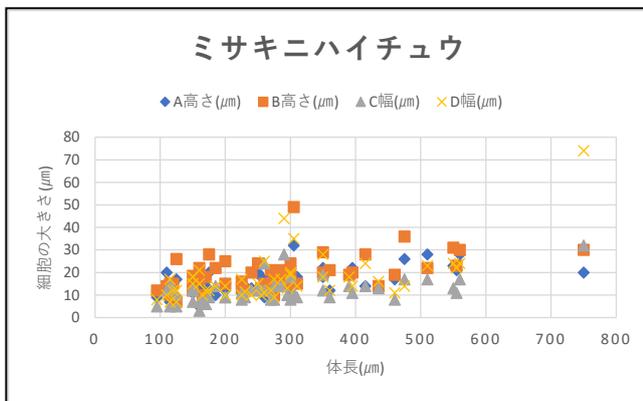


図5 ミサキニハイチュウの幼生（左）と成体（右／写真縦100μm）



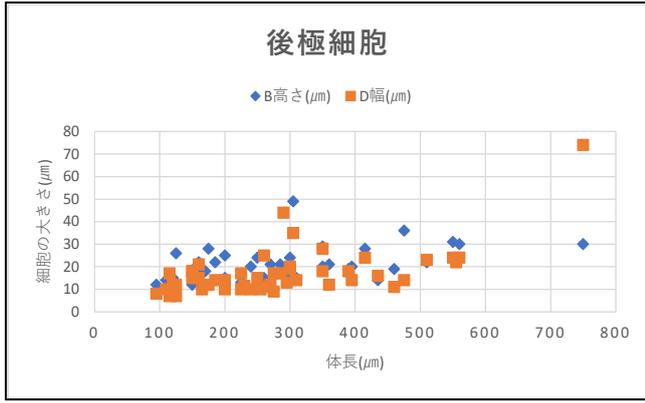


図6 ミサキニハイチュウの体長と極帽をつくる細胞の大きさ

(2) マッコナギーニハイチュウ (*Dicyemodeca mcconaugheyi*)

他の種と比べ、極帽の大きさの変化が、体の成長による体幅の増加の影響を受けにくい。他の円錐形の種と違い、後極細胞の個数が5個と多いことによるためだと考えられるが、前極細胞、後極細胞ともに1個あたりの極帽は少しずつ成長している。極帽の形状は、成長しても円錐形のままで変化しない (図7～図9)。

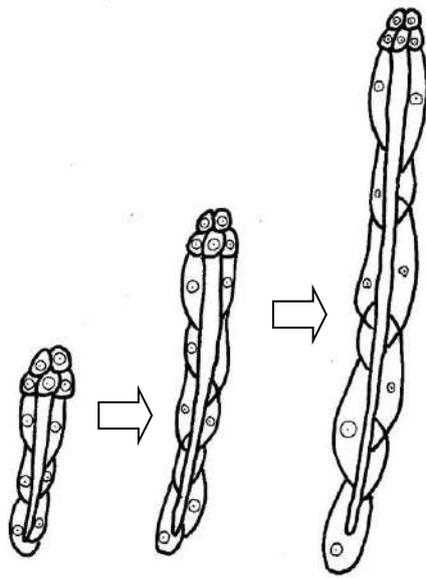
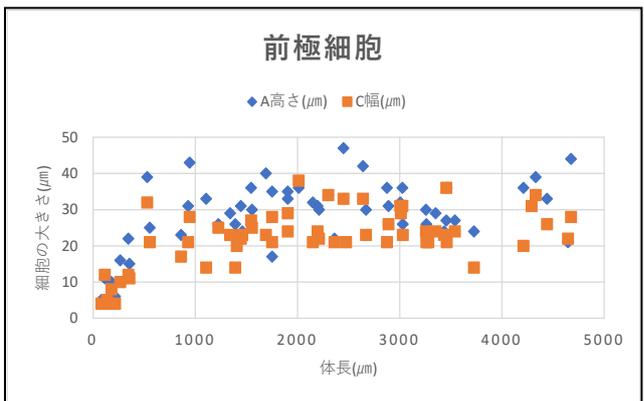
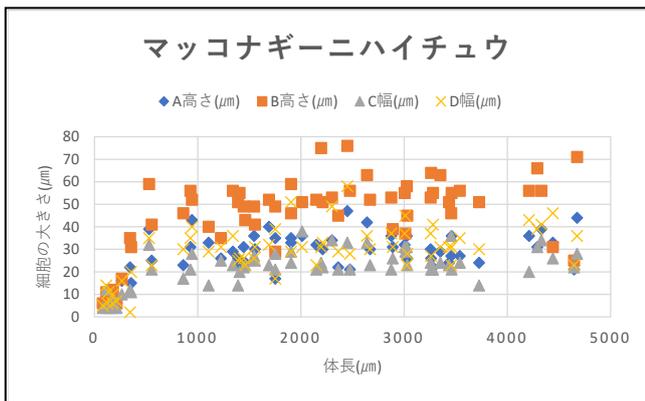


図7 マッコナギーニハイチュウの成長過程のスケッチ



図8 マッコナギーニハイチュウの幼生(左)と成体(右/縦50 μm)



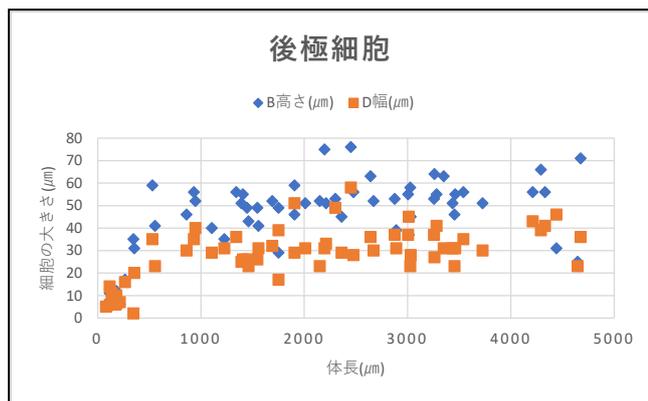


図9 マッコナギーニハイチュウの体長と極帽をつくる細胞の大きさ

(3) ヌベルニハイチュウ (*Dicyemenea nouveli*)

成長するにつれて前極細胞、後極細胞ともに大きくなる (図10～図12)。極帽の形状は、成長しても円錐形のまま変化しない。

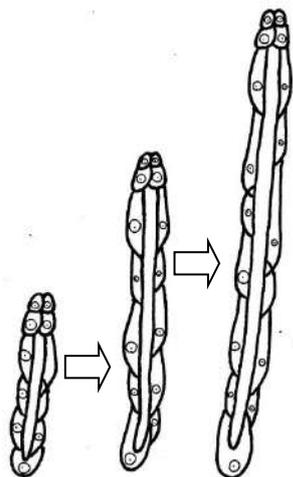


図10 ヌベルニハイチュウの成長過程のスケッチ

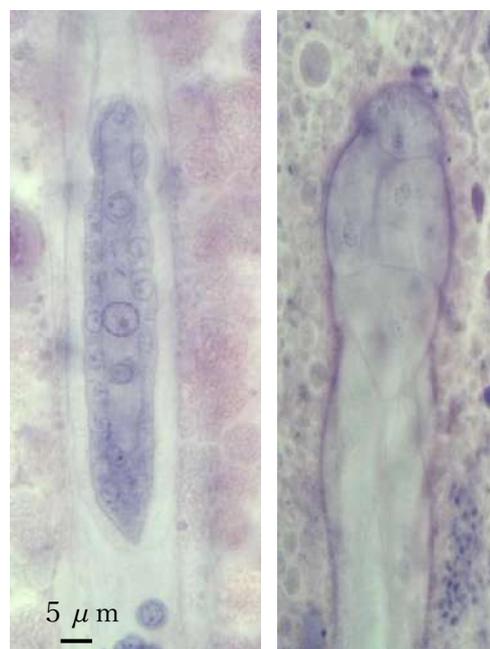
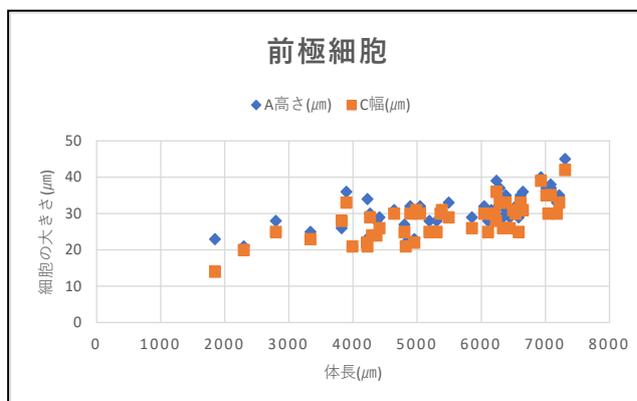
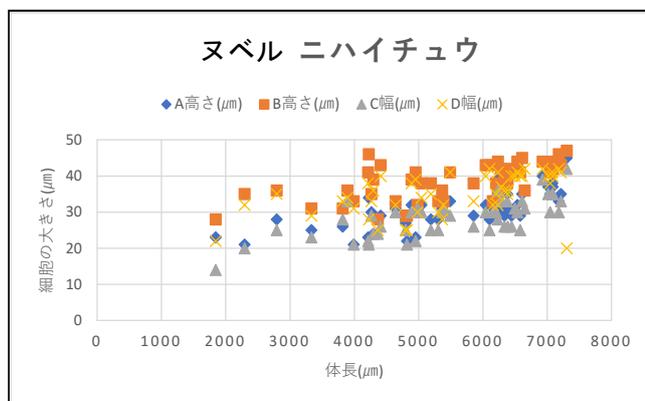


図11 ヌベルニハイチュウの幼生 (左) と成体 (右/縦50 μm)



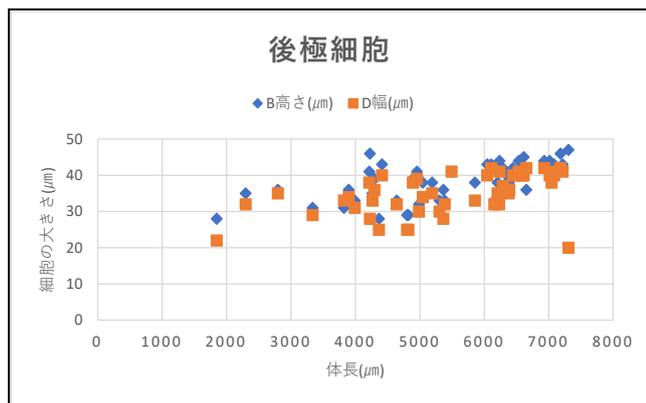


図12 スベルニハイチュウの体長と極帽をつくる細胞の大きさ

(4) アオリイカニハイチュウ (*Dicyema orientale*)

成長しても、極帽の大きさはほとんど変化しない(図13~図15)。極帽の形状は成長とともに円錐形から円盤形に変化していく。

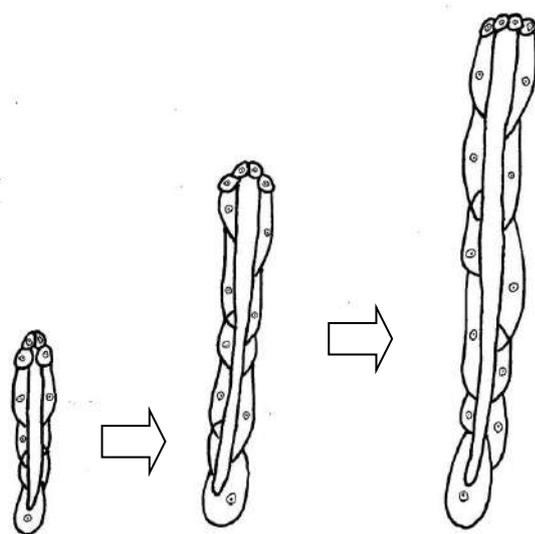


図13 アオリイカニハイチュウの成長過程のスケッチ

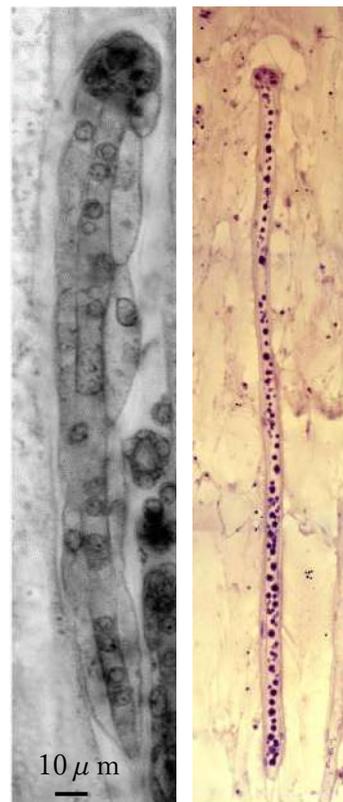
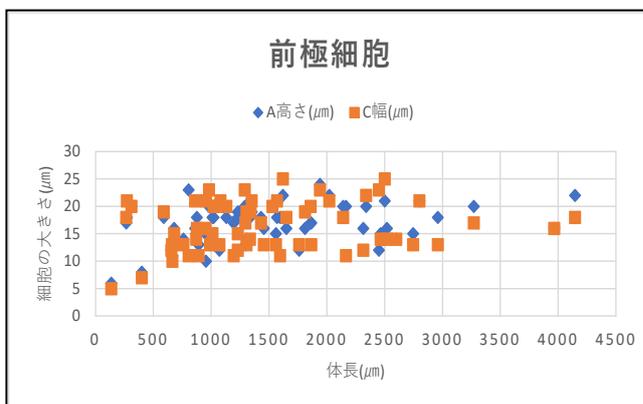
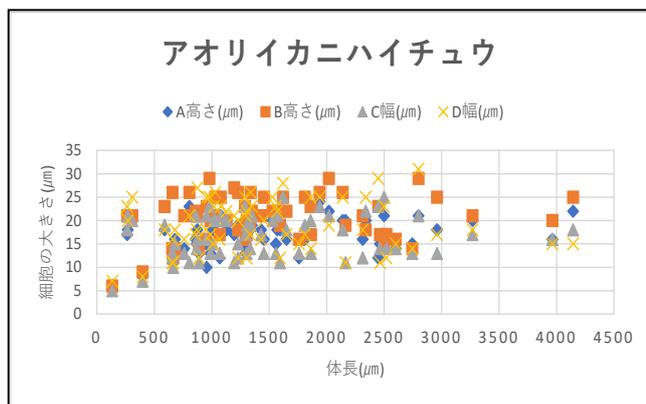


図14 アオリイカニハイチュウの幼生(左)と成体(右/縦100 μm)



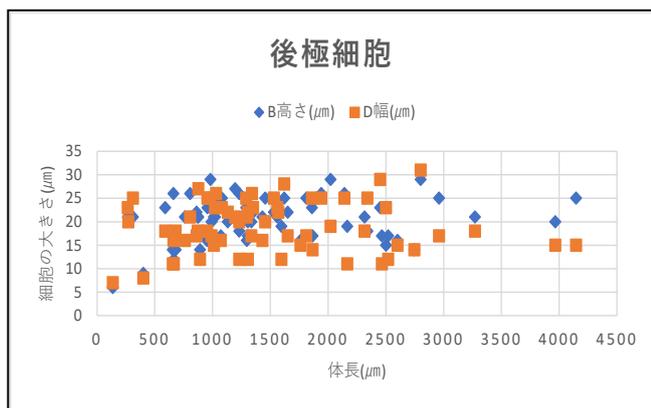


図15 アオリイカニハイチュウの体長と極帽をつくる細胞の大きさ

(5) ヤマトニハイチュウ (*Dicyemodoca japonicum*)
 成長しても、前極細胞も後極細胞も成長することはなく、極帽の大きさは変化しない(図16~図18)。極帽に側極細胞が出現し、これが成長して極帽の形状を円盤形に変化させているように見える。

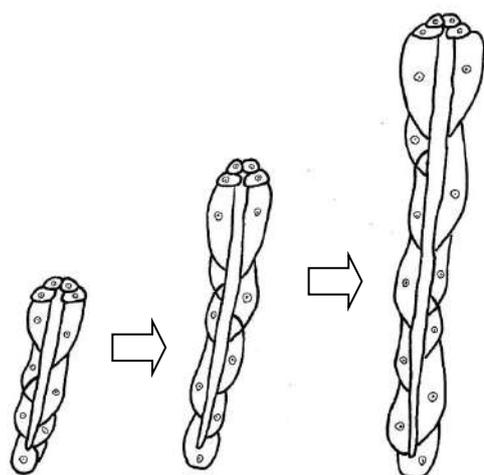
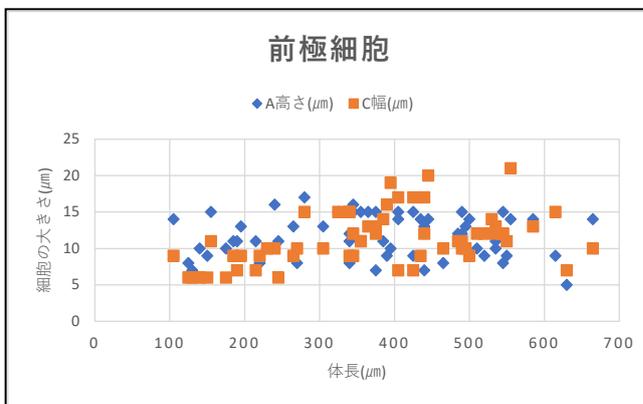
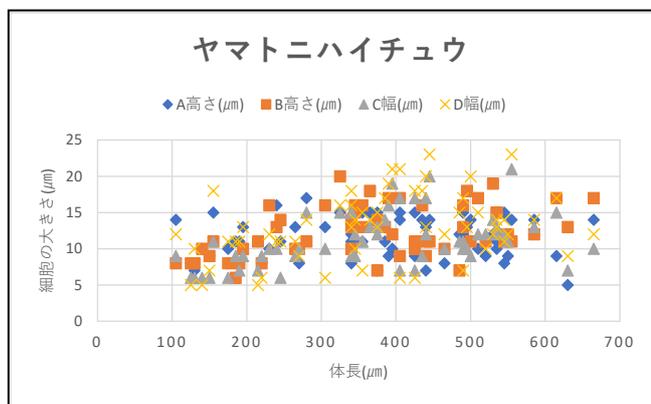


図16 ヤマトニハイチュウの成長過程のスケッチ



図17 ヤマトニハイチュウの幼生(左)と成体(右/写真縦100mm)



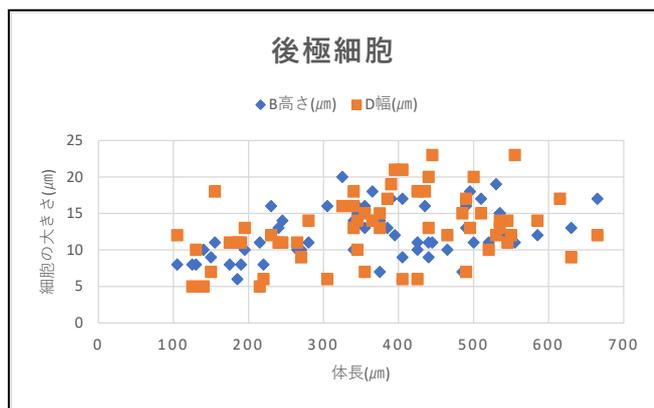


図 18 ヤマトニハイチュウの体長と極帽をつくる細胞の大きさ

(6) ツネキニハイチュウ (*Dicyemodeca tsunekii*)

はじめは体の成長とともに極帽も成長するが、体長 800 μm前後で前極細胞、後極細胞ともに成長が止まる (図 19~図 21)。体長 800 μm付近で、極帽が円盤形へと変と変形していく。

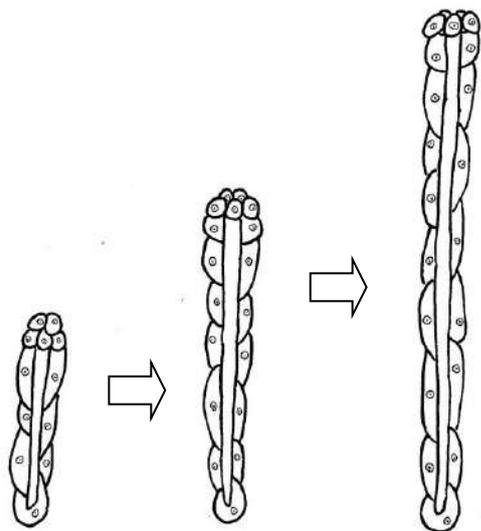


図 19 ツネキニハイチュウの成長過程のスケッチ

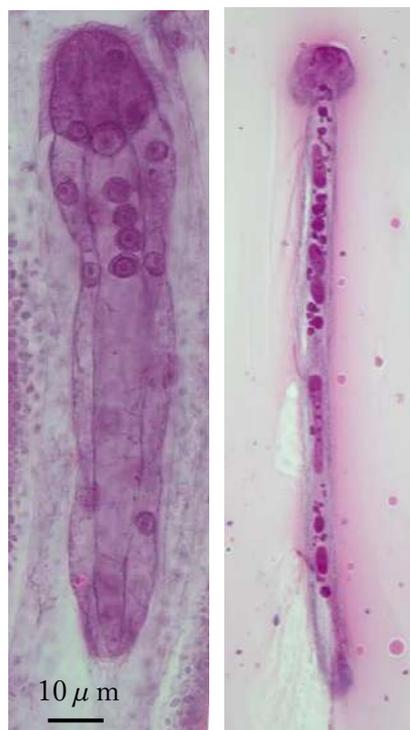
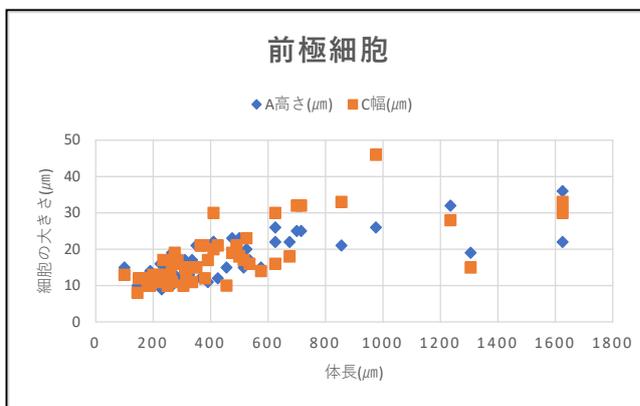
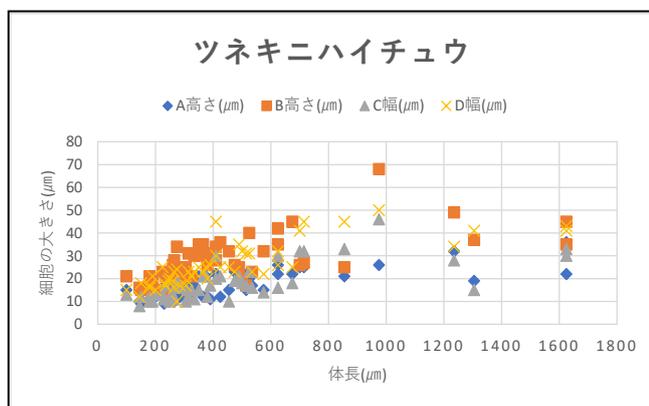


図 20 ツネキニハイチュウの幼生 (左) と成体 (右/写真縦 100 μ mm)



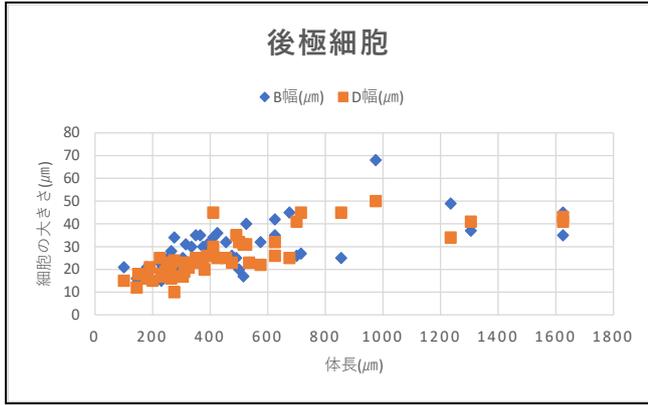


図 21 ツネキニハイチュウの体長と極帽をつくる細胞の大きさ

なお、ニハイチュウを採取したタコやイカの腎囊表面の形状はいずれも類似している。宿主となるイカやタコの種類によって、そこに接着しているニハイチュウの種類は異なるが、窪みには極帽が円錐形のニハイチュウが、平らな部分には極帽が円盤形のニハイチュウが接着しているという点で共通である。

5. 考察

蠕虫型ニハイチュウの極帽の形態は腎臓での生息場所に対応し、種によって異なっている。腎囊表面に接着する種の極帽は扁平な形、一方腎臓の窪みに挿入する種の極帽は円錐形である。本研究では、生殖場所で異なる蠕虫型個体について、前極細胞と後極細胞がどのような細胞成長を行うことで、それぞれ極帽形態に違いが生じるのか、形成過程を明らかにした。6種について各50個体計測し、極帽の形態の違いで、2パターンの形成過程が見られた。

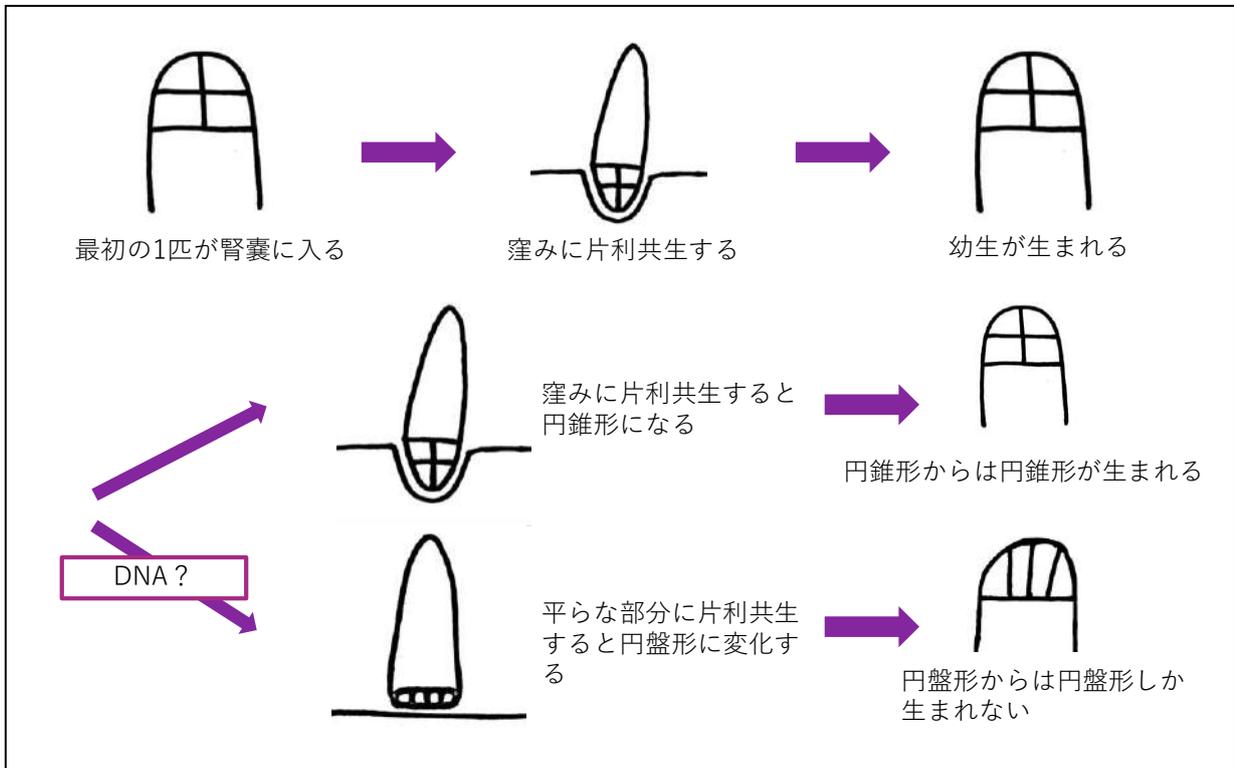


図 22 ニハイチュウの形質の変化の模式図

ニハイチュウの極帽はもともとすべて円錐形であるが、イカやタコと共生する際に、イカやタコの腎囊表面の窪みや平らな部分の形状に対応して、大きく4種類に極帽の形状を適応させようとして変化させ、異なる種へと変化することがわかった。そのうち、極帽が円錐形の種は、宿主がミズダコ、クモダコ、マダコ、アオリイカに関わらず、腎囊の窪みに接着し、極帽が成長しても変形せずに円錐形を保つ。一方、極帽が円盤形のものや一部帽子形様のものは、成長しても極帽は成長しないか、あるいは途中で成長が止まり、極帽の形を円盤形に変形させる。円錐形のニハイチュウの体を作る細胞が成長しても、後極細胞が成長を止めると、後極細胞間に隙間が生じ、そこに前極細胞が陥没して円盤形に変形する。一度円盤形に変化すると、そこから生まれた幼生はすべて円盤形になる(図22)。

最初は同じ円錐形であったものが、成長とともに極帽の形状に個性がみられるようになり、異なる種へと分化する。最初から種が異なっていて、成長とともに異なる個性を発現するようにプログラムされているのであれば、ニハイチュウは腎囊に接着する段階で、環境(腎囊の窪みか平らな場所か)を選んでいなければ、生育場所に適応した極帽の形状になることを説明できない。より高い可能性は、最初は種に分化していないニハイチュウは、生育する環境に適応して変形し、異なる種へと分化していくという可能性である。

6. 今後の課題

ニハイチュウの研究はまだ緒に就いたばかりであり、研究者も極めて少ない。

吸着する場所によって種が変化する現象をDNAから見るとどのようになっているのか、たとえば表に現れていない形質が出現するようになるのか、それとも形態的に異なる種へと分化しているのかを解明しなければならない。さらに、イカやタコの腎囊の窪みや平らな部分の大きさや形状を測定し、イカやタコの凹凸の大きさと、そこに吸着する種のニハイチュウの極帽の大きさや形状が対応しているのかどうかについて具体的に調べたい。また、ニハイチュウを採取したミズダコやクモダコ、マダコ、アオリイカの腎囊表面の形状はどれも同じであるが、イカやタコの種類によって、そこに接着しているニハイチュウの種類がなぜ異なるのかについても、さらに研究を続けたい。さらに、今回は扱いが困難で除外した、不定形のニハイチュウについても、極帽の形成過程を観察したい。

7. 謝辞

本研究を行うにあたり、大阪大学大学院理学研究科(生物科学)の古屋秀隆教授と、本校科学部顧問の川勝和哉主幹教諭には、考察において有意義な議論をしていただいた。ここに記して謝意を表す。

8. 引用文献

- 古屋秀隆(1996)ニハイチュウ(中生動物)の生物学(比較生理生化学会誌, 13, 209-218.)
古屋秀隆(2002)日本近海産2種のタコから見いだされたニハイチュウ(日本動物分類学会第38回大会講演抄録)
古屋秀隆(2004)中生動物ニハイチュウの形態と生活史の適応(比較生理生化学会誌, 21, 128-134.)
古屋秀隆(2006)ニハイチュウ類の分類に関する最近の話題(日本動物分類学会誌, 21, 19-32.)
古屋秀隆(2020a)熊野灘産底棲無脊椎動物相における最近の話題(日本動物分類学会誌, 48, 1-2.)
古屋秀隆(2020b)熊野灘産頭足類にみられるニハイチュウ類(日本動物分類学会誌, 48, 3-12.)

腎囊でのニハイチュウの極帽形態の形成過程

兵庫県立姫路東高等学校 科学部生物系研究部
岸上 菜菜

キーワード: 腎囊 極帽 片利共生 分化

ニハイチュウについて

ニハイチュウ(二胚動物門)は、底生のタコやイカなど頭足類の腎臓に片利共生する体長数mmの多細胞動物である。細胞総数は、一般に22個前後である。蠕虫型個体のニハイチュウは、尿とともに海中に排出されないよう、その極帽で腎囊に接着するか、腎囊表面の窪みに極帽を挿入して離れないようにしている。蠕虫型個体の腎臓表面に接着する種の極帽は扁平な形、一方腎臓の窪みに挿入する種の極帽は円錐形となることから、ニハイチュウの極帽形態は腎臓にとどまる上で重要な領域といえる(1)~(6)。

多細胞生物が退化してニハイチュウが生まれ、単細胞生物と多細胞生物の間のつながりを知るために重要な生物である!

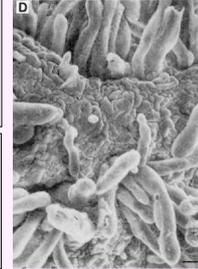


図1 腎囊表面に吸着するニハイチュウ(古屋2004)(スケールは20μm)

動機と目的

2021年に私は科学部顧問の勧めで大阪大学のSEEDSプログラムに挑戦し合格することができた。そこで、ニハイチュウに強い興味をもち、以来2年間研究をおこなっている。

接着する極帽の形は腎囊表面の凹凸によってさまざまに異なる。本研究では、生殖場所異なるニハイチュウの蠕虫型個体について、極帽を構成する前極細胞と後極細胞がどのような細胞成長を行うことで、もともと円錐形であった極帽形態に違いが生じるのか、形成過程を明らかにすることを目的に研究をおこなうことにした。

考察

・6種を各50個体計測し、極帽の形態の違いで2パターンの形成過程が見られた。
・極帽はもともとすべて円錐形であるが、イカやタコを共生する際に、その腎囊表面の窪みや平らな部分の形状に対応して、大きく4種類に極帽の形状を適応させようとして変化させ、異なる種へと分化する。

・極帽が円錐形の種は、宿主がミズダコ、クモダコ、マダコ、アオリイカに関わらず、腎囊の窪みに接着し、極帽が成長しても変形せずに円錐形を保つ。
・極帽が円盤形のものや一部帽子形様のものは、平らな部分に接着し、成長しても極帽は成長しないか、あるいは途中で成長が止まり、極帽の形を円盤形に変形させる。

観察

蠕虫型のニハイチュウは、極帽の形状によって大きく、円錐形、円盤形、帽子形、不定形の4種類に分類できる。本研究ではそのうち、図2に示すミサキニハイチュウ(1円錐形)、マッコナギーニハイチュウ(2円錐形)、ヌベルニハイチュウ(3円盤形)、アオリイカニハイチュウ(4円盤形)、ヤマトニハイチュウ(5円盤形と帽子形の中間型)、今回発見された新種のツネキニハイチュウ(6円盤形)の合計6種類のニハイチュウを対象として研究をおこなった。変形していないニハイチュウを、前述の6種類でそれぞれ50個体ずつ収集し、極帽をなす前極細胞と後極細胞の高さ(A、B)と幅(C、D)(図3)をマイクロメーターを用いてそれぞれ測定し、測定値を統計的に処理した。

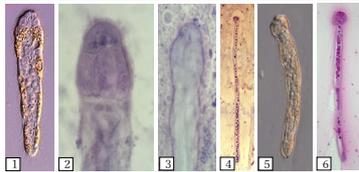


図2 研究対象のニハイチュウ(1456・写真縦100μm、23・50μm)

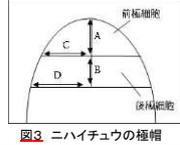


図3 ニハイチュウの極帽

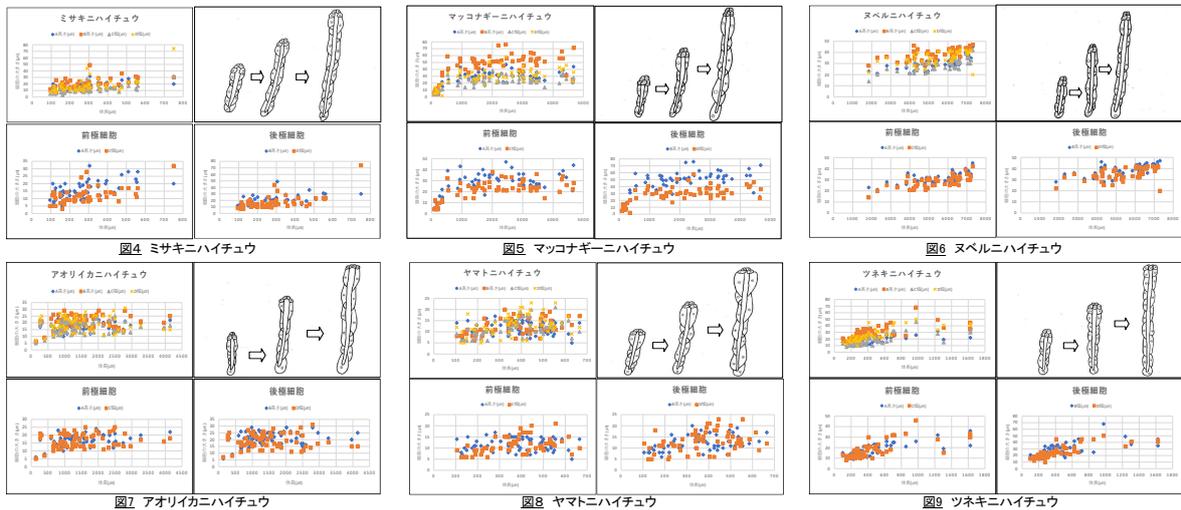
成長しても円錐形

- (1)ミサキニハイチュウ(*Dicyemodoca misakiense*)
成長するにつれて前極細胞、後極細胞ともに成長して大きくなる(図4)。
- (2)マッコナギーニハイチュウ(*Dicyemodoca mccoonaugheyi*)
他の種と比べ、極帽の大きさの変化が、体の成長による体幅の増加の影響を受けにくい(図5)。
- (3)ヌベルニハイチュウ(*Dicyemenea novelli*)
成長するにつれて前極細胞、後極細胞ともに大きくなる(図6)。

円錐形から円盤形へ変化

- (4)アオリイカニハイチュウ(*Dicyema orientale*)
成長しても、極帽の大きさはほとんど変化しない(図7)。
- (5)ヤマトニハイチュウ(*Dicyemodoca japonicum*)
成長しても、前極、後極細胞とも成長せず、極帽の大きさは変化しない(図8)。
- (6)ツネキニハイチュウ(*Dicyemodoca tsunekii*)
はじめは体の成長とともに極帽も成長するが、体長800μm前後で前極細胞、後極細胞ともに成長が止まる(図9)。

結果 6種類のニハイチュウの測定結果をグラフにまとめて示す。



今後の課題

イカやタコの腎囊の窪みや平らな部分の大きさや形状を測定し、その凹凸の大きさと、そこに吸着する種のニハイチュウの極帽の大きさや形状が対応しているのかどうかについて具体的に調べたい。また、ニハイチュウを採取したミズダコやクモダコ、マダコ、アオリイカの腎囊表面の形状はいずれも同じであるが、イカやタコの種類によって、そこに接着しているニハイチュウの種類がなぜ異なるのかについても、さらに研究を続けたい。さらに、今回は扱いが困難で除外した、不定形のニハイチュウについても、極帽の形成過程を観察したい。

参考文献

- 1) 古屋秀隆(1996)ニハイチュウ(中生動物)の生物学(比較生理生化学会誌, 13, 209-218.)
- 2) 古屋秀隆(2002)日本近海産2種のタコから見いだされたニハイチュウ(日本動物分類学会第38回大会講演抄録)
- 3) 古屋秀隆(2004)中生動物ニハイチュウの形態と生活史の適応(比較生理生化学会誌, 21, 128-134.)
- 4) 古屋秀隆(2006)ニハイチュウ類の分類に関する最近の話題(日本動物分類学会誌, 21, 19-32.)
- 5) 古屋秀隆(2020a)熊野灘産底棲無脊椎動物相における最近の話題(日本動物分類学会誌, 48, 1-2.)
- 6) 古屋秀隆(2020b)熊野灘産頭足類にみられるニハイチュウ類(日本動物分類学会誌, 48, 3-12.)

謝辞

本研究を行うにあたり、大阪大学大学院理学研究科(生物科学)の古屋秀隆教授には、大阪大学SEEDSプログラムで丁寧なご指導をいただいた。また、本校科学部顧問の川勝和哉主幹教諭には、考察において有意義な議論をしていただいた。ここに記して謝意を表す。

兵庫県南部の揖保川花崗閃緑岩の角閃石にみられる微細構造

兵庫県立姫路東高等学校 科学部地学系研究部

○高田健吾 中農拓人 志村実咲 菅原楓 本脇敬人 山浦奈々

陰山麻愉 田村花里奈 藤盛心実 前田隆良 松田理沙 溝垣月渚 村尾倅生

キーワード：熱水残液 波状累帯構造 サブソリダス環境

要 旨

角閃石の波状累帯構造は、結晶化後にサブソリダス環境下でマグマが発泡して生成した熱水残液の循環の影響によるイオン置換を記録している。本研究で筆者らは、山陽帯の花崗閃緑岩の角閃石から、初めて明瞭な波状累帯構造を確認した。ほぼ同時代に同地域で活動した中性マグマが固結してできた火山岩であるデイサイトの角閃石から同様の微細構造は発見されない。

波状累帯構造が幅広い領域に発達している山陰帯の深成岩の角閃石に比べて、山陽帯の深成岩では角閃石の波状累帯構造の発達の程度は低い。マグマが、発泡による熱水残液が形成されにくい深所に貫入して固結したために、熱水残液の循環が山陰帯に比べて起こりにくい還元的環境にあったと推定される。波状累帯構造をもつ角閃石の最外縁部には濃緑色リムが形成されており、最終段階では酸化的环境であったと考えられる。一方、デイサイトのような火山岩では、固結までの時間が短く、また還元的環境であったために、熱水残液が形成されたり循環が起こったりする可能性が低かったのではないかと推定される。

1. 研究の背景と目的

変成岩の角閃石に波状累帯構造 (Oscillatory Zoned Structure) などの微細構造がみられることは、1970年代以降多く報告されている (Yamaguchi, Akai and Tomita, 1978, Yamaguchi, Shibakusa and Tomita, 1983)。波状累帯構造は、結晶の成長方向 (c 軸) に垂直な面に幅数 μm の微細な帯状構造が発達する構造で、いったん結晶化した角閃石が二次的な熱によって再平衡し、再結晶化することで形成されたことが明らかにされている。

1987年、Kawakatsu and Yamaguchi (1987a) は、火成岩 (深成岩) としては初めて、山陰帯 (Ishihara, 1977・石原, 1982) の石英閃緑岩から、マグマ分化過程末期の熱水残液の循環によって二次的に形成された波状累帯構造を発見した。深成岩と変成岩では波状累帯構造の形成過程が異なるように見えるが、熱水や熱の影響の程度が異なるだけで、基本的に二次的に置換が起こって形成されるメカニズムに違いはない。その後、兵庫県立加古川東高等学校地学部 (2008・2013) が山陽帯加古川市一高砂市の播磨花崗閃緑岩と神戸市の布引花崗閃緑岩の角閃石について、また兵庫県立姫路東高等学校科学部 (2019) が山陽帯姫路市の揖保川花崗閃緑岩の角閃石について報告したが、いずれも発見したとされるものは波状累帯構造であるかどうか疑わしく、山陽帯の深成岩の角閃石に波状累帯構造がみられるのかどうかは明らかにされていない。

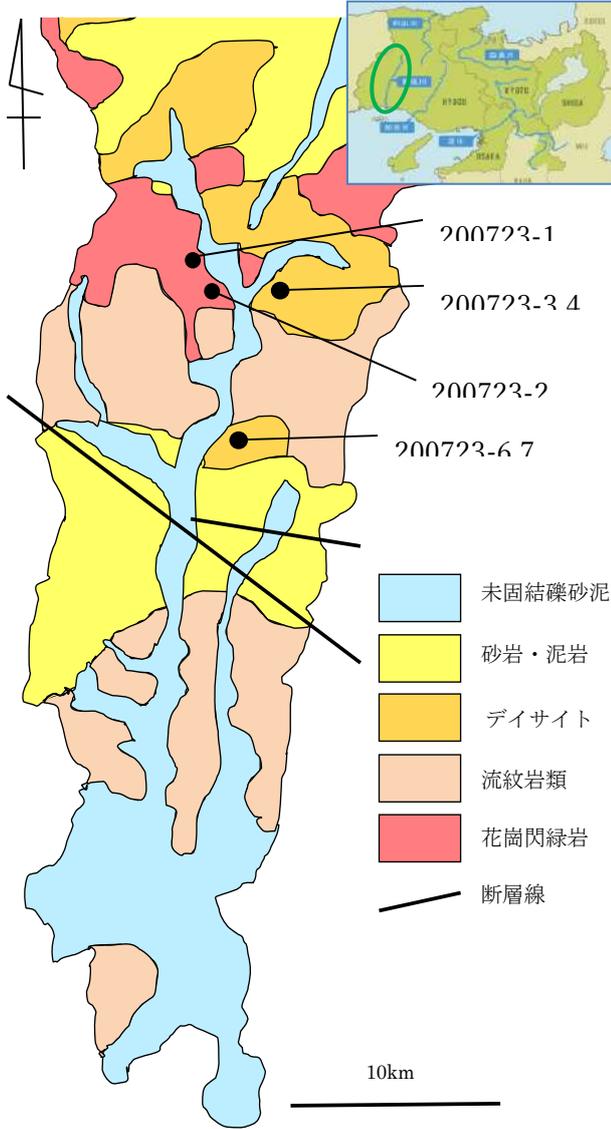
マグマの結晶分化作用は教科書で説明されているような単純なものではない。マグマから鉱物が結晶化するときには、融点の高い鉱物から順に黒雲母から輝石、角閃石へと晶出するわけではない (都城・久城, 1977・小出, 2017) し、マグマが相互に不混和なマグマに分かれたり、周囲の物質を取り込む混染を起こすこともある。熱水残液の循環によって、一度結晶化した鉱物が再平衡するなど、マグマは非常に複雑な系である。熱水残液の循環は、マグマに含まれる H_2O の発泡によって起こるとされている (Kennedy, 1955)。

2. 研究の目的

火成岩の波状累帯構造は、熱水残液の循環の程度とイオン置換による再平衡のようすを示す指標となる。そこで、ほぼ同時代に同地域で活動した中性マグマが固結してできた火山岩と深成岩を比較することにした。山陽帯白亜紀-古第三紀相生層群に属する(兵庫県, 2017) 揖保川花崗閃緑岩とデイサイトの研磨薄片を作成して詳細に観察し、熱水残液の循環が起こったのかどうかを明らかにしたいと考えた。

3. 観察の結果

(1) 岩石記載



兵庫県南西部を南北に流れる1級河川の揖保川流域の露頭調査をおこなった。本地域には、デイサイト～流紋岩類が広く分布しており、そこから島状に点々と花崗閃緑岩が顔を出している。宍粟市一宮町下野田(試料番号 200723-3、200723-4)と宍粟市山崎町三谷(試料番号 200723-6、200723-7)からデイサイトを、また宍粟市一宮町杉田(試料番号 200723-1)と宍粟市一宮町西安積(試料番号 200723-2)から花崗閃緑岩を採取した(図1)。

花崗閃緑岩は、風化の影響をあまり受けておらず、あちこちに角閃石を中心にした有色鉱物が直径 3cm 程度に集合している。主な有色鉱物は最大 8mm の角閃石で、一部は緑泥石化している。無色鉱物は、最大長 10mm 程度の斜長石と 5mm 程度の石英が中心である。モード組成は、石英 20.9、カリ長石 4.6、斜長石 59.5、角閃石 12.6、その他、磁鉄鉱、ジルコン、燐灰石、エピドート、黒雲母、スフェーンなどがみられる。

デイサイトには弱い流理構造が見られるが、肉眼で観察できる熱水脈はない。風化変質の影響が弱く、長さ 2mm～3mm 程度の石英や、最大 8mm の斜長石の斑晶が見られる。斑晶は、斜長石 20.3%、角閃石 6.3%、不透明酸化鉱物 3.1% である。角閃石の斑晶の多くは長さ 0.1mm 以下程度と小さく、一部変質によって緑泥石化している。

図1 調査地域の地質図と試料採取地点
(兵庫県立姫路東高等学校科学部, 2021 に加筆)

(2) 角閃石の波状累帯構造

偏光顕微鏡で観察した結果、初めて花崗閃緑岩の角閃石から微弱な波状累帯構造を発見した。いずれの波状累帯構造も、約 1 μm 程度の幅の細い帯が結晶の c 軸方向に垂直に波状にみられる。採取したデイサイトから波状累帯構造はまったく発見されない。

花崗閃緑岩の角閃石は自形～半自形で、淡褐色のコアと淡緑色のリムからなるものや、全体が淡緑色のものがある。いずれの場合にも波状累帯構造は、二次的に再平衡して形成されたとされる淡緑色リムから発見され、淡褐色のコアからは発見されない(図2)。最外縁部に濃緑色のゾーンをもつものも複数みられる。波状累帯構造を持つ角閃石は 1 か所に集合しているように見える。角閃石は斜長石やカリ長石と隣接しており、淡緑色リム部には酸化鉱物が包有されている。

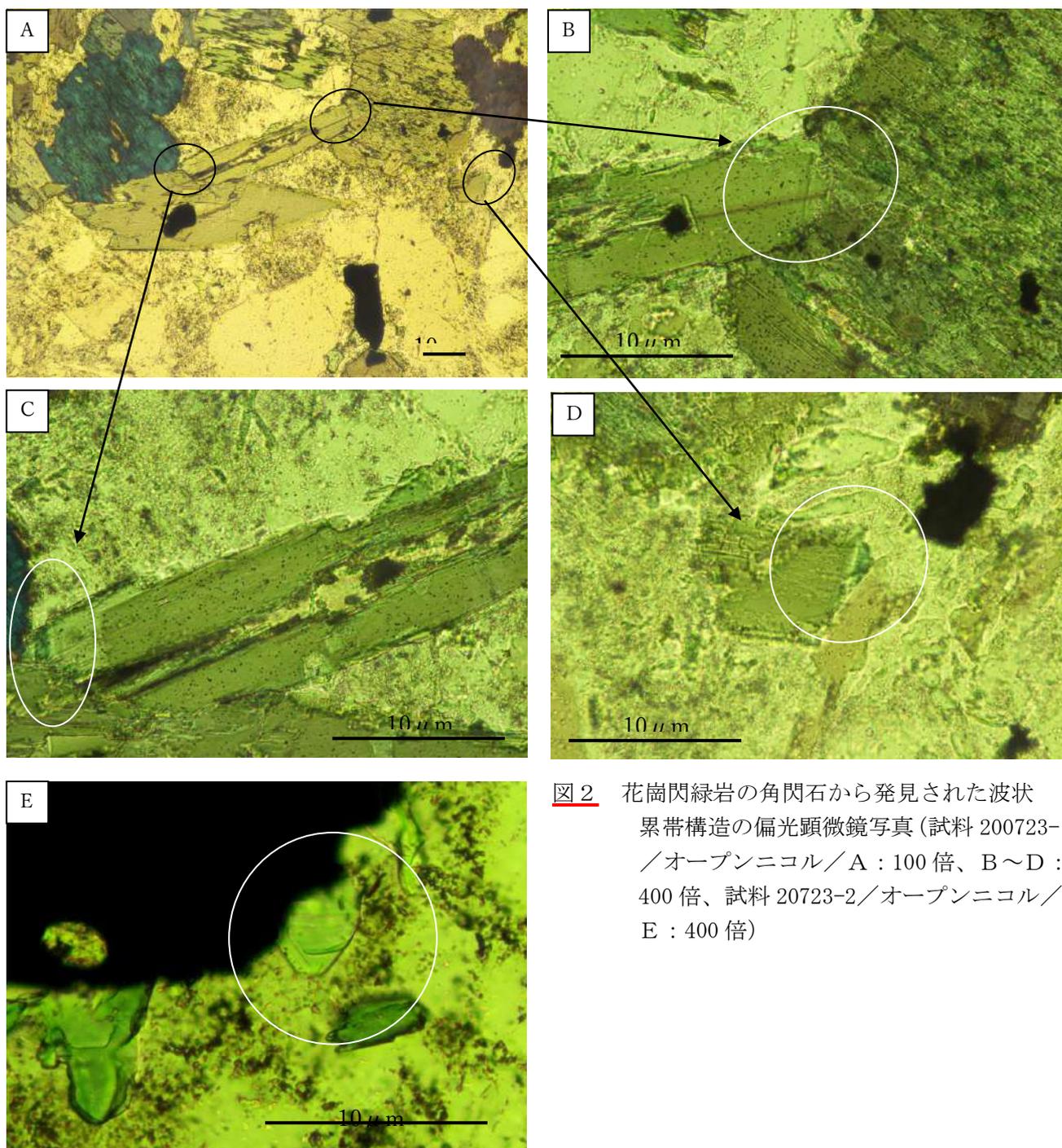


図2 花崗閃緑岩の角閃石から発見された波状累帯構造の偏光顕微鏡写真(試料 200723-1 /オープンニコル / A : 100 倍、B ~ D : 400 倍、試料 20723-2 /オープンニコル / E : 400 倍)

デイサイトの斑晶部分を形成するのは、斜長石やカリ長石、石英と角閃石である。角閃石は他形の破片状で、全体が淡緑色であり、一部は緑泥石化している。角閃石に波状累帯構造は見られない。

4. 考察

角閃石の波状累帯構造は、角閃石が結晶化した後に、マグマに含まれる H_2O の発泡によって起こった熱水残液の循環の影響によるイオン置換のようすを記録している。今回の研究では、ほぼ同時代に同地域で活動した中性マグマが固結してできた深成岩と火山岩を比較した。本研究で筆者らは、山陽帯の花崗閃緑岩の角閃石から、初めて明瞭な波状累帯構造を確認したことと、同地域に分布する火山岩であるデイサイトの角閃石からは同様の微細構造が発見されないことを合わせて示す。今回発見した花崗閃緑岩

の角閃石に見られる波状累帯構造も、先行研究や顕微鏡観察によって、サブソリダス環境下で形成されたものと考えられる。熱水残液の下で陽イオンの組合せ置換が起こり、その結果波状構造が形成される。

山陰帯の深成岩の角閃石には波状累帯構造が幅広い領域に発達している(図3)。これは、熱水残液が激しく循環したことを示しており(Kawakatsu and Yamaguchi, 1987a)、イオン置換のパターンから酸化的環境であったことが裏付けされている(Kawakatsu and Yamaguchi, 1987b)。これに比べて、山陽帯の

深成岩では角閃石の波状累帯構造の発達の程度は低く、熱水残液の循環が山陰帯に比べてずっと弱かったと推定できる。それは山陰帯に比べて山陽帯の花崗岩類を形成したマグマが、深所に貫入して還元的環境下で固結したことを裏付けていると考えられる(Ishihara, 1977、石原, 1982)。深所では発泡による熱水残液が形成されにくい(Kennedy, 1955)。波状累帯構造をもつ角閃石の最外縁部には、酸化的条件の下で形成されるとされる濃緑色リムが形成されており、波状累帯構造が形成される最終段階では、酸化的条件であったことを示している。一方、深成岩に比べて短時間で固結するデイサイトのような火山岩では、熱水残液の循環が微弱である山陽帯の深成岩よりも、さらに熱水残液の循環が起こる可能性が低かったのではないかと考えられる。固結までの時間が短く、また還元的環境であったために、熱水残液が形成されたり循環が起こったりする可能性が低かったのではないか。

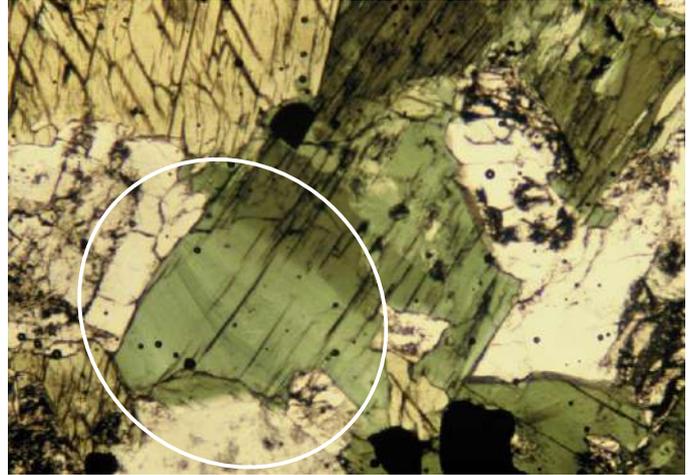


図3 山陰帯大東一横田花崗閃緑岩の角閃石の波状累帯構造(写真の横幅は2mm/川勝和哉, 1989)

マグマから鉱物が晶出後に、その全体が熱水残液などの外的影響によって置換されてしまい、別の鉱物に置き換わってしまうこともあることを考えれば、現在われわれが観察している鉱物は、最初からその鉱物として晶出したのかどうかについて議論しなければ、鉱物の観察によって得られた推測が誤ったものである可能性も出てくるのではないか。

5. 今後の課題

本年度もコロナ禍の拡大のため、十分な野外調査をおこなうことができず、もしかすると研究そのものができないのではないかと不安を持ちながらの半年間であった。そのような環境の中でも、山陽帯相生層群のデイサイトと花崗閃緑岩を採取し、花崗閃緑岩の角閃石から波状累帯構造を発見することができた。角閃石の波状累帯構造の組合せ置換のパターンと条件は、Leak (1978) や Czamanske and Wones (1973) によって明らかにされており、今後は、どのような置換が行われているかを EPMA (Electric Probe Micro Analyzer) を用いて明らかにすることによって、サブソリダス環境下で影響を与えた熱水残液の成分と環境の特徴を明らかにしたい。また、波状累帯構造をもつ角閃石と共存する長石や酸化鉱物をもとにして、波状累帯構造を形成した熱水残液の温度や圧力条件を推定したい。

6. 謝辞

本研究を行うにあたり、本校科学部顧問の川勝和哉主幹教諭には、考察において有意義な議論をしていただいた。ここに記して謝意を表す。

7. 引用文献

Czamanske, G. K. and Wones, D. R. (1973) Oxidation during magmatic differentiation, Finnmarka complex, Oslo area, Norway: Part 2, The mafic silicates. (J. Petrol, 14, 349-380.)

- 兵庫県 (2017) 揖保川水系揖保川圏域河川整備計画 (5-1seibikeikakkuh29.pdf)
- 兵庫県立加古川東高等学校地学部 (2008) 山陽帯チタン鉄鉱系列と山陰帯磁鉄鉱系列のマグマ分化を系統的に説明する—山陽帯加古川市花崗岩類の角閃石とリン灰石から波状累帯構造を発見— (日刊工業新聞社「未来の科学者との対話VI」第6回神奈川大学全国高校生理科・科学論文大賞受賞作品集, Vol. 6, 78-101)
- 兵庫県立加古川東高等学校地学部 (2013) 酸性マグマの分化過程におけるイオウの混染—山陽帯チタン鉄鉱系列花崗岩類と山陰帯磁鉄鉱系列花崗岩類— (日刊工業新聞社「未来の科学者との対話 XI」第11回神奈川大学全国高校生理科・科学論文大賞受賞作品集, Vol. 11, 166-175)
- 兵庫県立姫路東高等学校科学部 (2019) 兵庫県南部姫路市—加古川市の花崗閃緑岩の角閃石から波状累帯構造を発見 (日本地質学会第126年学術大会要旨)
- 兵庫県立姫路東高等学校科学部 (2021) 石英安山岩の角閃石から熱水残液の循環を示す波状累帯構造を発見 (日本地質学会第128年学術大会要旨／第20回神奈川大学全国高校生理科・科学論文大賞努力賞受賞論文)
- Ishihara, S. (1977) The Magnetite-Series and Ilmenite-Series Granitic Rocks (Min. Geol. Tokyo, 27, 293-305)
- 石原瞬三 (1982) 花崗岩系列と鉱化作用 (鉱山地質, 32, 281-283)
- Kawakatsu, K. and Yamaguchi, Y. (1987a) Successive Zoning of Amphiboles during Progressive Oxidation in the Daito-Yokota Granitic Complex, San-in Belt, Southwest Japan. (Geochim. Cosmochim. Acta, 51, 535-540.)
- Kawakatsu, K. and Yamaguchi, Y. (1987b) Microprobe analyses of zoned amphiboles from quartz diorites in the Daito-Yokota granitic complex, San-in belt, southwest Japan. (Geol. Rep. Shimane Univ. 6, 175-183.)
- 川勝和哉 (1989) 西南日本山陰帯のカコウ岩類の角閃石から oscillatory zoning の発見—その形成機構と条件— (兵庫県立西脇高等学校研究紀要, 6, 24-61.)
- Kennedy, G. C. (1955) Some aspects of the role of water in rock melts. (Geol. Soc. Amer. Sp. Paper 62, 489-504.)
- 小出良幸 (2017) マグマ固結過程における火成岩の化学的多様性の形成について (札幌学院大学人文学会紀要, 第102号, 1-29)
- Leak, B. E. (1978) Nomenclature of amphiboles. (Amer. Mineral., 63, 1023-1052.)
- 都城秋穂・久城育夫 (1977) 岩石学Ⅲ～岩石の成因 (共立出版株式会社)
- Yamaguchi, Y., Akai, J. and Tomita, K. (1978) Clinoamphibole Lamellae in Diopside of Garnet Lherzolite from Alpe Arami, Bllinzona, Swizerland, (Contrib. Mineral. Petrol., 66, 263-270.)
- Yamaguchi, Y., Shibakusa, H. and Tomita, K. (1983) Exsolution of Cumingtonite, Actinolite and Sodic Amphibole in Hornblende in High-Pressure Metamorphism. (Nature, Vol. 314, No. 5923, 257-259.)

揖保川花崗閃緑岩の角閃石の微細構造

兵庫県立姫路東高等学校 科学部地学研究部
高田健吾 本脇敬人 藤盛心実 溝垣月渚 前田隆良 村尾倅生 田村花里奈

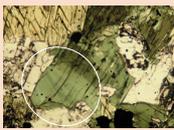
キーワード ・熱水残液 ・波状累帯構造 ・サブソリダス環境

動機 火成岩の波状累帯構造は、熱水残液の循環の程度とイオンの置換による再均衡のようすを示す指標となる。そこで、山陽帯白亜紀—古第三紀相生層群に属する(兵庫県,2017)花崗閃緑岩とデイサイトの研磨薄片を作成して詳細に観察し、熱水残液の循環が起こったのかどうかを明らかにしたいと考えた。

考察 ・ほぼ同時代に同地域で活動した中性マグマが固結してできた深成岩と火山岩を比較した。
・今回発見した花崗閃緑岩の角閃石に見られる波状累帯構造も、サブソリダス環境下の熱水残液の下で置換が起こり、形成された。

深成岩

- ・山陰帯
 - ①熱水残液が激しく循環して、波状累帯構造が幅広い領域に発達⁹⁾。
 - 浅所に貫入して熱水残液が形成されやすい**酸化的環境**であった¹⁰⁾。
- ・山陽帯
 - ①角閃石の波状累帯構造の発達の程度は低い。
 - 熱水残液の循環が山陰帯に比べて弱かった
 - 花崗岩類を形成したマグマが、発泡による熱水残液が形成されにくい深所に貫入して**還元的环境**で固結した^{7)・8)}。
 - ②波状累帯構造をもつ角閃石の最外縁部には濃緑色リムがみられる
 - 波状累帯構造が形成される最終段階では、**酸化的環境**であった。



山陰帯大東—横田花崗閃緑岩の角閃石の波状累帯構造(写真の幅は2mm/11)

火山岩

深成岩に比べて短時間で固結する

熱水残液の影響が微弱である山陽帯の深成岩より更に熱水残液の循環が起こる可能性が低かったのではないかと推察される。

マグマから鉱物が晶出後に、その全体が熱水残液などの外的影響によって置換されてしまい、別の鉱物に置き換わってしまうこともある。
→現在我々が観察している鉱物は、最初からその鉱物として晶出したのかどうかについて議論する必要がある。

岩石記載

兵庫県南西部を南北に流れる揖保川流域の露頭調査を行った。花崗閃緑岩とデイサイトの試料をそれぞれ2地点から採取し、12枚の薄片を作成し偏光顕微鏡で観察した。

花崗閃緑岩

→有色鉱物は直径3cm程に集合し、主な有色鉱物は最大8mmの角閃石で、一部が緑泥石化している。無色鉱物は最大10mm程の斜長石と5mm程の石英が中心である。モード組成は石英20.9、カリ長石4.6、斜長石59.5、角閃石12.6。

デイサイト

→弱い流理構造がみられるが、熱水脈はない。長さ2mm~3mm程、最大8mmの石英や斜長石の斑晶が見られる。有色鉱物の斑晶は確認できない。斑晶は、斜長石20.3%、角閃石6.3%、不透明酸化鉱物3.1%。

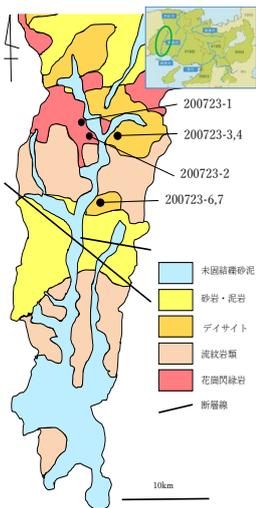


図1 調査地域の地質図と試料採取地点

角閃石の波状累帯構造

花崗閃緑岩の角閃石から**微弱な波状累帯構造を発見**。デイサイトからは波状累帯構造は**全く発見されない**。

花崗閃緑岩の波状累帯構造

- 約1μm程の幅の細い帯がみられる。
- 角閃石は自形~半自形
- 淡褐色のコアと淡緑色のリムからなるものや、全体が淡緑色のものがある
- 二次的に再平衡して形成されたとされる淡緑色リムから発見され、淡褐色コアからは発見されない(図2)。
- 最外縁部に濃緑色のゾーンを持つもの複数みられる
- 波状累帯構造を持つ角閃石は、1箇所に集合している
- 角閃石は斜長石やカリ長石と隣接しており、淡緑色リム部には酸化鉱物が包有されている。

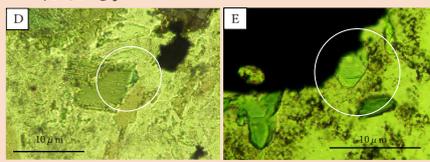
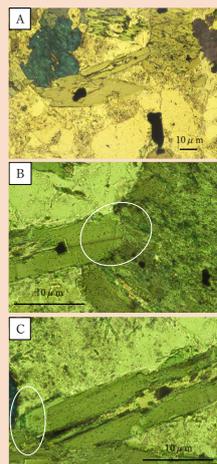


図2 花崗閃緑岩の角閃石から発見された波状累帯構造の偏光顕微鏡写真(試料200723-1/オープンニコル/A:100倍、B~D:400倍、試料20723-2/オープンニコル/E:400倍)

今後の課題

- 角閃石の波状累帯構造の組合せ置換のパターンと条件は、1)や、14)によって明らかにされており、どのような置換が行われているかをEPMA分析することによって、サブソリダス環境下で影響を与えた熱水残液の成分と環境の特徴を明らかにしたい。
- 波状累帯構造をもつ角閃石と共存する長石や酸化鉱物をもとにして、波状累帯構造を形成した熱水残液の温度や圧力条件を推定したい。

謝辞

本研究を行うにあたり、本校科学部顧問の川勝和哉主幹教諭には、考察において有意義な議論をしていただいた。ここに記して謝辞を示す。

引用文献

1. Czamanske, G.K. and Wones, D.R. (1973) Oxidation during magmatic differentiation, Finnmarka complex, Oslo area, Norway: Part 2, The mafic silicates. (J. Petrol., 14, 349-380.)
2. 兵庫県 (2017) 揖保川水系揖保川圏域河川整備計画 (5-1seibeikakku29.pdf)
3. 兵庫県立加古川東高等学校地学部 (2008) 山陽帯チタン鉄鉱系列と山陰帯磁鉄鉱系列のマグマ分化を系統的に説明する—山陽帯加古川市花崗岩類の角閃石とリン灰石から波状累帯構造を発見—(日刊工業新聞社「未来の科学者との対話VI」第6回神奈川大学全国高校生理科・科学論文大賞受賞作品集, Vol.6, 78-101)
4. 兵庫県立加古川東高等学校地学部 (2013) 酸性マグマの分化過程におけるイオウの混染—山陽帯チタン鉄鉱系列花崗岩類と山陰帯磁鉄鉱系列花崗岩類—(日刊工業新聞社「未来の科学者との対話XI」第11回神奈川大学全国高校生理科・科学論文大賞受賞作品集, Vol.11, 166-175)
5. 兵庫県立姫路東高等学校科学部 (2019) 兵庫県南部姫路市—加古川市の花崗閃緑岩の角閃石から波状累帯構造を発見 (日本地質学会第126年学術大会要旨)
6. 兵庫県立姫路東高等学校科学部 (2021) 石安山岩の角閃石から熱水残液の循環を示す波状累帯構造を発見 (日本地質学会第128年学術大会要旨/第20回神奈川大学全国高校生理科・科学論文大賞賞力賞受賞論文)
7. Ishihara, S. (1977) The Magnetite-Series and Ilmenite-Series Granitic Rocks (Min. Geol. Tokyo, 27, 293-305)
8. 石原謙三 (1982) 花崗岩系列と鉱化作用 (鉱山地質, 32, 281-283)
9. Kawakatsu, K. and Yamaguchi, Y. (1987a) Successive Zoning of Amphiboles during Progressive Oxidation in the Daito-Yokota Granitic Complex, San-in Belt, Southwest Japan. (Geochim.Cosmochim.Acta, 51, 535-540.)
10. Kawakatsu, K. and Yamaguchi, Y. (1987b) Microprobe analyses of zoned amphiboles from quartz diorites in the Daito-Yokota granitic complex, San-in belt, southwest Japan. (Geol. Rep. Shimane Univ. 6, 175-183.)
11. 川勝和哉 (1989) 西南日本山陰帯のコウヤ岩類の角閃石からoscillatory zoningの発見—その形成機構と条件—(兵庫県立西脇高等学校研究紀要, 6, 24-61.)
12. Kennedy, G.C. (1955) Some aspects of the role of water in rock melts. (Geol.Soc.Amer.Sp.Paper 62, 489-504.)
13. 小出良幸 (2017) マグマ固結過程における火成岩の化学的多様性の形成について (札幌学院大学人文社会紀要, 第102号, 1-29)
14. Leak, B.E. (1978) Nomenclature of amphiboles. (Amer.Mineral., 63, 1023-1052.)
15. 都城秋穂・久城育夫 (1977) 岩石学Ⅲ—岩石の成因 (共立出版株式会社)
16. Yamaguchi, Y., Akai, J. and Tomita, K. (1978) Clin amphibole Lamellae in Diopside of Garnet Lherzolite from Alpe Arami, Blinizona, Switzerland. (Contrib.Mineral.Petrol., 66, 263-270.)
17. Yamaguchi, Y., Shibakusa, H. and Tomita, K. (1983) Exsolution of Cummingtonite, Actinolite and Sodic Amphibole in Hornblende in High-Pressure Metamorphism. (Nature, Vol.314, No.5923, 257-259.)

令和4年度 自然科学生徒課題研究報告集
兵庫県立姫路東高等学校

〒670-0012 兵庫県姫路市本町 68 番地 70

電話 (079) 285-1166 (代)

FAX (079) 285-1167

URL <http://www.hyogo-c.ed.jp/~himehigashi-hs/>