

# 令和 5年度 科学部の活動の記録



高

兵庫県立姫路東高等学校

## 主要な大会でいずれも全国大会に進出した実り多き 1 年

科学部主顧問 主幹教諭 川勝 和哉

科学部の活動の目標は「出る杭を育てる」です。この方針の下で、多くの生徒が、これまで自覚していなかった個性や能力に気付き、科学部の活動を通してその力を伸ばしてきました。科学部での活動が高く評価され、その生徒の大学進学に結び付きました。気付けば、「出る杭」の生徒は科学部のあちこちにおり、それぞれが主体的な活動で探究の力を培っていました。顧問が助言を与えることで、彼らはさまざまな工夫をして、研究のレベルを高めていきました。顧問が関わらないのにここまでいけるのか、と驚く場面が多くありました。生徒の能力を信じれば生徒は自発的に成長していくものであり、逆に生徒の限界を決めてしまうのは指導者であることも再認識させられました。

タイトルに書いたように、本年度は主要な大会で全国大会へ進出しました。しかもそれらがすべて異なるチームであったことは、本校の科学部の活動レベルの高さを証明しています。物理系研究部磁性流体班は、全国高等学校総合文化祭自然科学部門に出場し、全国 8 位以内相当の奨励賞を受賞しました。地学系研究部マグマ班の研究は、兵庫県予選を通過して、日本学生科学賞の中央審査会に進出し、きわめて学術的価値の高い研究であると高い評価を得ました。生物系研究部サボテン班は、数度の予選を通過して、高校生・高専生科学技術チャレンジ (JSEC) の最終審査会に進出し、見事に花王奨励賞を受賞しました。文部科学省認定大会である、神奈川大学全国高校生理科・科学論文大賞では、科学部全体が団体奨励賞を受賞するなど、本校が科学研究の活動を始めて 4 年目で、見事な成果を残しました。

本年度は、念願であったオーストラリア海外研修 (野外露頭調査) も実施することができ、京都大学理学部との連携によって、現在学術的価値の高い研究が進行しつつあります。来年度の国際学会での発表を目指して、生徒はますます活気づいて活動を進めています。顧問は傍で生徒の成長を見守るばかりです。

## 目 次

1	はじめに .....	1
2	科学部の活動方針 .....	1
3	科学部の研究の進め方 .....	2
4	研究成果( 専門学会と論文コンテスト等) .....	2
5	小中学生を対象にした活動 .....	1 6
6	発展的な探究活動 .....	1 7
7	国際的な活動 .....	1 9
8	校外研修 .....	2 4
9	専門学会誌に論文掲載 .....	2 6
1 0	科学部顧問の活動 .....	2 7
1 1	生徒アンケートの結果 .....	2 9

## 研究論文とポスター

外部磁力による磁性流体のスパイク形成の条件( その 2 )

( 科学部物理系研究部 磁性流体班) .....

3 1

刺座配列を示すサボテン種に共通な螺旋方程式と種固有の変数( その 2 )

( 科学部生物系研究部 サボテン班) .....

4 5

片利共生する軟体動物の腎囊表面の形状による蠕虫型二ハイチュウの棲み分け( その 2 )

( 科学部生物系研究部 二ハイチュウ班) .....

5 6

マグマ分化末期の熱水残液の循環 - 角閃石から発見した波状累帯構造を基に -

( 科学部地学系研究部 マグマ班) .....

6 5

## 1 はじめに

本校は令和2年度に文部科学省からスーパーサイエンスハイスクール(SSH)の指定を受け、本年度は期4年目であった。本校SSH事業の研究開発の4つの柱のうちのひとつに「科学部の国際的な活動への挑戦」を据えて活動を続けており、すべての研究班が国内の専門学会で発表し、いずれも高い評価を得た。とりわけ、主要な大会で全国大会(中央審査会)に出場することができた。それらが異なる分野の研究班であることは、科学部の研究レベルの高さを証明している。

科学部の活動は、他の生徒の課題研究の見本となり、多くの生徒が科学部のポスターや論文を参考にして研究を進めている。このように、科学部の活動は学校全体の研究レベルを引き上げている。と同時に、科学部員は、3年生の秋まで活動を精力的に続けており、科学部の探究活動の面白さが、生徒を引き付けていると感じる。

本年度は、科学部に新たに「数学系研究部」ができ、5名の生徒が日々数学に取り組んでいる。数学オリンピックなどへの挑戦を始めており、今後花開くことが期待される。

## 2 科学部の活動方針

### (1) グループ研究を柱とする。

知識も経験も乏しい高校生が研究活動を行うためには、生徒が研究班を構成して、互いに議論しながら研究活動を進めることが、生徒の成長のために有益である。グループ研究では、考えをまとめる力、聞き共感する力、議論する力、伝える力などが育成され、生徒自身の主体性も向上することから、本校科学部ではグループ研究を基本としている。教員は折に触れて助言するにとどめている。

### (2) 身近な自然現象をテーマとして扱う。

生徒自らが日常生活の中で疑問に感じたことをテーマにしている。テーマの発見のためには、日ごろから周囲に興味を持って観察するセレンディピティの姿勢が必要なので、常にメモを取るよう指導している。科学部は、物理、化学、生物、地学、数学、工学、農学等の各分野の純粋なテーマばかりでなく、それらの分野横断的あるいは統合的なテーマも扱う。むしろ近年は複数の分野にまたがるテーマを扱うことの方が一般的である。また、生徒が希望すれば、同時並行で異なる複数のテーマの研究を行うこともある。

### (3) 特別な分析機器を用いずに、高校生らしい柔軟な発想と工夫で研究を行う。

学会発表で、どのような仕組みの分析装置かは知らないが、そこから出てくる数値によって考察をしているという生徒を見かける。SSHでは、大学や専門機関との連携が求められているが、分析のバックアップをするだけという安易な連携は、間違ったメッセージを高校生に与える。本校では、高大連携によって高度な分析装置を活用する場合には、きちんと講習を受講することを求めている。高校生のうちは、特別な装置を用いずに、身の回りにある装置で目的を達成することはできないかを考えさせたい。生徒は、研究を行う中で、データの統計処理やグラフや図表を作成する情報処理の力、国語や英語によるプレゼンテーションや論文作成の力、科学倫理の理解など、総合的な力が必要であることを理解する。

### (4) 研究成果は学会や論文コンテストで評価を得る。

科学的な研究成果は、社会に公開して初めて意味を持つ。専門学会での発表等で、研究者と議論することによって成果の評価を得るほか、研究論文を発表する。専門学会やコンテストの全国レベルの高い成果は、生徒をさらに高い探究へと向かわせ、探究力が身につけていることを客観的に保証するものであることから、生徒の進学にも生かされる。

### (5) 研究成果を地域に還元する。

他の高等学校や地域の小・中学生、企業等を中心に、講座やHPなど様々な形で研究結果を公開することで、成果を社会に還元する。

### 3 科学部の探究の進め方

- (1) 9月～12月：学会発表等が集中している時期であるが、その合間を縫って、部員一人一人が、今後取り組みたいテーマ案を持ち寄る。この際には、先行研究論文なども読み、興味深さや研究の現状、高校生が取り組むテーマであるか、等について互いに議論し、テーマ案を絞り込む。
- (2) 1月～3月：テーマ案の中から部員各自の希望によってグループ分けを行い、詳細な研究目的と方法、計画を具体化させる。さらに予備実験や予備観察を通して、問題点を整理する。
- (3) 4月～8月：新入生の獲得活動とともに本格的な研究を開始する。成果をまとめて論文を作成し、そこからプレゼンテーションに必要な、パワーポイント（口頭発表）、ポスター（ポスター発表）、発表原稿、質疑応答集等を作成する。
- (4) 9月～12月：学会等の発表会に積極的に参加して、研究者との議論の中から、研究の問題点や補足すべき点などについて得た指摘に基づいて追加の研究を行い、最終論文にまとめて発表する。

科学部の部員数は、令和2年度18名（男子14、女子4）、令和3年度24名（男子19、女子5）、令和4年度31名（男子19、女子12）、令和5年度36名（男子27名、女子9名）と増加している。

### 4 研究成果（専門学会と論文コンテスト等）

コロナが5類に引き下げられたとはいえ、まだまだ研究活動を思うように進めることはできなかった。活動時間や活動場所の制約がある中で、生徒は詳細なスケジュールを立て、各班のリーダーの指導の下で昨年度以上の高い成果を上げた。科学部が研究活動を行うようになって4年目を終えようとしているが、顧問が口出しをする必要もなく、先輩から後輩へと、探究活動の柱の考え方やノウハウが受け継がれている。本年度の活動の特徴は次の3点である。

毎年、すべての研究班が、参加したすべての大会で、全国上位入賞を果たしていることは、本校科学部の探究力が高いレベルで維持されていることを示している。

3年次生徒も最後まで研究に参加するなど、生徒の主体的な活動が見られる。

それらの結果、教育委員会が主催する高等学校総合文化祭、文部科学省が後援・認定する日本学生科学賞と高校生科学技術チャレンジ（JSEC）の3つの大会で全国大会に進出し、上位の成果を得た。

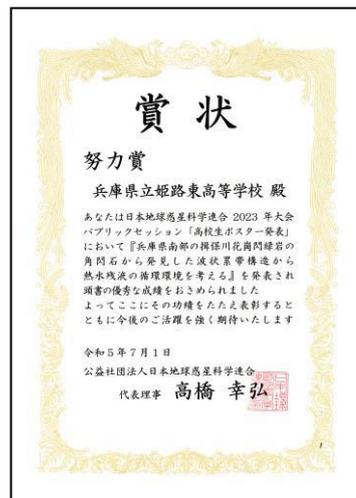
類似の表題の研究発表や論文が複数あるが、研究を継続的に行っているため、提出する大会ごとに内容は異なっている。また大会の趣旨に合わせて発表の重点を変えている。

#### (1) 日本地球惑星科学連合（JpGU）高校生セッションで発表（地学系研究部マグマ班）

- 主催 日本地球惑星科学連合
- 応募 令和5年4月7日（金）申込締切  
令和5年4月13日（木）予稿締切  
令和5年5月18日（木）e-poster 投稿締切
- 日時 令和5年5月21日（日）13:45～15:15
- 場所 千葉県幕張メッセ（千葉市美浜区中瀬2-1）
- テーマ ・兵庫県南部の揖保川花崗閃緑岩の角閃石から発見した波状累帯構造から熱水残液の循環環境を考える（地学系研究部マグマ班）
- 発表者 ・高田健吾、前田隆良（地学系研究部マグマ班）
- 結果



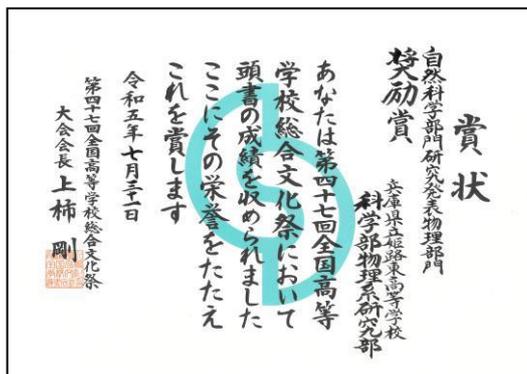
日本で最大級の学会で、研究発表総数は6455件におよぶ。高校生発表としては、予備審査を通過した昨年度よりも多い91件が対面でポスター発表を行った。昨年度まではZOOMによる発表であったが、今回は大会会場で専門研究者と対話をしたり、大学・企業ブースを訪問したりして、よい経験となった。



全国大会出場

(2) 第47回全国高等学校総合文化祭(鹿児島大会)でポスター発表し、奨励賞(全国8位以内)受賞

- 主催 文化庁、公益社団法人全国高等学校文化連盟、ほか
- 応募 令和5年4月21日(金)推薦校の申込締切  
令和5年5月11日(木)要旨締切
- 日時 令和5年7月29日(土)10:30  
~7月31日(月)13:00
- 場所 鹿児島大学郡元キャンパス  
(鹿児島市郡元 1-21-24)  
谷山サザンホール(鹿児島市谷山中央 10-4360)
- テーマ ・外部磁力の強度と磁性流体のスパイクの形状  
(物理系研究部磁性流体班)
- 発表者 ・志村実咲、菅原楓(3年次磁性流体班)、陰山麻  
愉(2年聴講)
- 結果 兵庫県高等学校総合文化祭で物理分野最優秀と  
なり、兵庫県を代表して全国大会に出場した。  
出場164団体(口頭研究発表)中、高い専門性  
としっかりとしたプレゼンテーション、的確な  
質疑応答によって、最優秀賞、優秀賞に続く奨  
励賞を受賞した。  
また、巡検に参加し、現地でなければできない  
貴重な経験を積んだ



(3) スーパーサイエンスハイスクール(SSH)生徒研究発表会で発表(物理系研究部磁性流体班)

- 主催 文部科学省、(独)科学技術振興機構
- 応募 令和5年5月23日(火)申込および要旨締切  
令和5年7月28日(金)ポスター電子ファイル提出締切
- 日時 令和5年8月9日(水)9:00~8月10日(木)15:30
- 場所 神戸国際展示場(神戸市中央区港島中町 6-11-1)

テーマ ・ 外部磁力の強度変化による磁性流体が形成するスパイクの形状変化（物理系研究部磁性流体班）

Change in the Shape of Spikes formed by Ferrofluids due to Changes in the Strength of External Magnetic Force

発表者 ・ 志村実咲、菅原楓（3年次磁性流体班）

結果 経験校を含む221件の発表があった。発表生徒は実に堂々と説明をし、また多く出された困難な質問にも的確に答えており、3年間の成長がみえた。先端的で専門性が高く、実験の回数も十分であり信頼度が高いと評価された。

（4）第14回東京理科大学坊っちゃん科学賞に応募し、優良入賞（全国3位）3件（生物系研究部二ハイチュウ班、地学系研究部マグマ班、物理系研究部磁性流体班）、入賞2件（生物系研究部サボテン班、物理系研究部金平糖班）を受賞

主催 東京理科大学

応募 令和5年7月31日（月）申込締切

令和5年8月31日（木）論文締切

テーマ ・ 二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（生物系研究部二ハイチュウ班）

・ 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（地学系研究部マグマ班）

・ 外部磁力の強度による磁性流体のスパイクの形状変化（物理系研究部磁性流体班）

・ サボテン（プリンチュウ *Pachycereus pringlei*）の刺座の配列方程式（生物系研究部サボテン班）

・ 金平糖の成長に伴う「角」の消失の過程（物理系研究部金平糖班）

研究者 ・ 岸上栞菜（生物系研究部二ハイチュウ班）

・ 高田健吾、志村実咲、菅原楓、本脇敬人、陰山麻愉、前田隆良、松田理沙、村尾倭生（地学系研究部マグマ班）



・ 志村実咲、菅原楓、陰山麻愉、松田理沙、村瀬太郎、大和司（物理系研究部磁性流体班）

・ 岸上栞菜、前田智彦、本脇敬人、吉田龍之介、藤田詩桜、村瀬太郎、大和司（生物系研究部サボテン班）

・ 佐藤知希、後藤大道、竹内智哉、西野侑吏、北条陸翔（物理系研究部金平糖班）



結果 221 件の論文応募があった。中学

校・高等学校教育関係者 48 名による分野別審査と、秋山仁特任副学長を審査委員長とする 12 名による東京理科大学教授審査が 9 月 29 日（金）に行われ、本校から応募した 5 件の研究すべてが受賞を果たした。これらの研究論文をまとめた作品集が 3 月に出版される。

(5) 日本動物学会第 94 回大会で発表し高校生ポスター賞を受賞（生物系研究部二ハイチュウ班）

主催 日本動物学会  
 応募 令和 5 年 6 月 21 日（水）申込および要旨締切  
 日時 令和 5 年 9 月 9 日（土）11: 30 ~ 14: 00  
 場所 山形大学小白川キャンパス  
 （山形市小白川町 1-4-12）

テーマ ・片利共生する軟体動物の腎囊表面の形状による蠕虫型二ハイチュウの棲み分け（生物系研究部二ハイチュウ班）

研究者 ・岸上菜菜、佐藤知希、高田健吾、前田隆良、岡本涼佑、中田天晴、中村賢矢、岡本莉空、小林憲正（生物系研究部二ハイチュウ班）

結果 昨年度を大きく超える 63 件の発表があった。審査の結果、ユニークな研究内容が評価され高校生ポスター賞を受賞した。



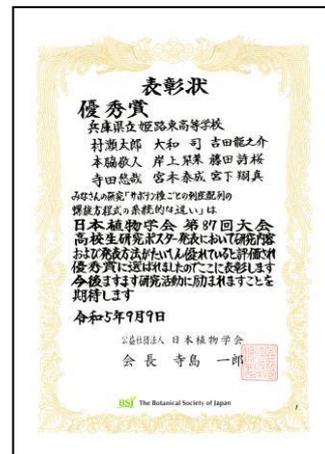
(6) 日本植物学会第 87 回大会で発表し優秀賞（全国 2 位）受賞（生物系研究部サボテン班）

主催 日本植物学会  
 応募 令和 5 年 7 月 11 日（火）申込締切  
 令和 5 年 8 月 1 日（火）要旨締切  
 日時 令和 5 年 9 月 9 日（土）9: 30 ~ 12: 10  
 場所 北海道大学工学部（札幌市北区北 13 条西 8）

テーマ ・サボテン種ごとの刺座配列の螺旋方程式の系統的な違い（生物系研究部サボテン班）

研究者 ・村瀬太郎、大和司、吉田龍之介、本脇敬人、岸上菜菜、藤田詩桜、寺田悠哉、宮本泰成、宮下翔真（生物系研究部サボテン班）

結果 全国から 27 件の発表があった。刺座配列に数式代入して数値化した点、データ取得で ImageJ を活用して客観性を担保している点、質疑応答が的確・明快である点、環境要因にまで踏み込んでいる点、巻貝などとの比較も面白いという生物学的意義を持っている点、などが高く評価された。



(7) 日本地質学会第 130 年学術大会（京都大会）第 20 回ジュニアセッションで奨励賞（全国 3 位）を受賞（地学系研究部マグマ班）

主催 日本地質学会  
 応募 令和 5 年 8 月 1 日（火）申込および要旨締切  
 日時 令和 5 年 9 月 17 日（日）13: 30 ~ 15: 00 ポスターコアタイム  
 場所 京都大学吉田南校舎（京都市左京区吉田本町）

テーマ ・西南日本山陽帯と山陰帯のマグマ分化末期の熱水残液の循環  
 深成岩の角閃石から発見される波状累帯構造から（地学系研究部マグマ班）

研究者 ・高田健吾、前田隆良、陰山麻愉、藤田詩桜、松田理沙（地学



系研究部マグマ班)

結果 日本地質学会の全理事 17 名によって、事前に提出した要旨と当日発表の審査がおこなわれ、発表 25 件中全国 3 位に相当する奨励賞を受賞した。

(8) 第 67 回日本学生科学賞兵庫県コンクールで兵庫県教育長賞 (2 位) を受賞し、中央審査会へ進出 (地学系研究部マグマ班)

主催 読賣新聞社・兵庫県教育委員会・神戸市教育委員会・兵庫県中学校教育研究会理科部会  
文部科学省認定大会

応募 令和 5 年 10 月 5 日 (木) 申込および研究概要締切  
読賣新聞 30 面 (2023 年 10 月 15 日)  
令和 5 年 10 月 12 日 (木) 審査委員会

場所 バンドー神戸青少年科学館 (神戸市中央区港島中町 7-7-6)

- テーマ
- ・西南日本山陽帯と山陰帯のマグマ分化末期の熱水残液循環の比較 深成岩の角閃石から発見した波状累帯構造から推定する (地学系研究部マグマ班)
  - ・片利共生する軟体動物の腎囊表面の形状による蠕虫型二ハイチュウの棲み分け (2) (生物系研究部二ハイチュウ班)

研究者

- ・松田理沙、藤田詩桜 (地学系研究部マグマ班)
- ・前田隆良、岡本莉空、岡本涼佑、中田天晴、中村賢矢 (生物系研究部二ハイチュウ班)

結果 論文およびポスターによって 9 名の審査委員によって審査された。その結果、高校生の研究ながら学術的意義が高く優れているとして、中央審査会への推薦が決まった。



### 中央予備審査へ10点

神戸市長賞は、神戸市立上野中3年、石井翔春さんの「S10P1システム」の応募作品が、審査員9人の合評を経て、審査員9名から推薦された。審査員9名から推薦された。審査員9名から推薦された。

## 佐藤さん、木原さん知事賞

第67回日本学生科学賞の審査が12日、神戸市中央区のバンドー神戸青少年科学館で開かれた。最優秀の知事賞は、神戸市立上野中2年、佐藤いちごさんの「卵の大きさや成体の大きさの関係についての研究」(トトリ)と、小笠原のまことさんの「マリスエ国際学校2年(高校2年)、木原白桃さんの「競技がたに」(ロボット)が選ばれた。中学6点、高校4点の計10点は、11月12日に東京で行われる中央予備審査に出展される。

「タンジムの被害を止める」、神戸市立本山南中2年、一村花音さんの「空の観察を覗き見、竹田城跡の雲海に100%出たい！」が受賞した。今回は、奨励賞や観賞を基に中高生らが、察した観賞の応募があり、審査員9人が、創造性や科学性、総合的な観察から審査。応募作品は、13、15日前9時半(午後5時)最終日は、午後5時、バンドー神戸青少年科学館で公開される。入賞作品の審査や総評は、15日朝刊に掲載される。ほかの入賞者は次の通り。

◎観賞賞 県立田原高等学校 2年 佐藤いちごさん  
◎奨励賞 県立田原高等学校 2年 木原白桃さん

◎神戸市立上野中2年 佐藤いちごさん  
◎神戸市立上野中2年 木原白桃さん

◎神戸市立上野中2年 佐藤いちごさん  
◎神戸市立上野中2年 木原白桃さん

◎神戸市立上野中2年 佐藤いちごさん  
◎神戸市立上野中2年 木原白桃さん

読賣新聞 27 面 (2023 年 10 月 13 日)

2023年(令和5年)10月15日(日曜日) 読者 5頁 発行 5月
30

## 地学と広領域の応募増

### 神戸市長賞

と考え、各種類の中から「チョウの外殻のエネルギー抽出液を使ったワタモロシ」の種を「ワタモロシ」に抽出液を混ぜて育てた。実験の結果、抽出液を混ぜたワタモロシは、通常のワタモロシよりも成長が速く、葉の緑色が濃くなった。これは、抽出液に含まれる酵素がワタモロシの成長を促進したためと考えられる。

【神戸市長賞受賞理由】  
抽出液を使ったワタモロシの栽培は、従来のワタモロシ栽培とは異なり、抽出液の効果が顕著に現れた。これは、抽出液に含まれる酵素がワタモロシの成長を促進したためと考えられる。また、抽出液の濃度を調整することで、ワタモロシの成長速度をコントロールできることがわかった。

### 神戸市教育長賞

「水シャボン玉の研究」は、水シャボン玉の表面積を最大化するための実験を行った。結果、水シャボン玉の表面積は、通常の水シャボン玉よりも約2倍大きくなった。これは、水シャボン玉の表面積を最大化するための実験を行った。結果、水シャボン玉の表面積は、通常の水シャボン玉よりも約2倍大きくなった。

【神戸市教育長賞受賞理由】  
水シャボン玉の研究は、水シャボン玉の表面積を最大化するための実験を行った。結果、水シャボン玉の表面積は、通常の水シャボン玉よりも約2倍大きくなった。これは、水シャボン玉の表面積を最大化するための実験を行った。結果、水シャボン玉の表面積は、通常の水シャボン玉よりも約2倍大きくなった。

### 知事賞

「鳥の大きさを比較する」は、鳥の大きさを比較するための実験を行った。結果、鳥の大きさは、通常の鳥よりも約1.5倍大きくなった。これは、鳥の大きさを比較するための実験を行った。結果、鳥の大きさは、通常の鳥よりも約1.5倍大きくなった。

【知事賞受賞理由】  
鳥の大きさを比較する実験は、鳥の大きさを比較するための実験を行った。結果、鳥の大きさは、通常の鳥よりも約1.5倍大きくなった。これは、鳥の大きさを比較するための実験を行った。結果、鳥の大きさは、通常の鳥よりも約1.5倍大きくなった。

### 学生科学賞審査委員賞

「鳥の大きさを比較する」は、鳥の大きさを比較するための実験を行った。結果、鳥の大きさは、通常の鳥よりも約1.5倍大きくなった。これは、鳥の大きさを比較するための実験を行った。結果、鳥の大きさは、通常の鳥よりも約1.5倍大きくなった。

【学生科学賞審査委員賞受賞理由】  
鳥の大きさを比較する実験は、鳥の大きさを比較するための実験を行った。結果、鳥の大きさは、通常の鳥よりも約1.5倍大きくなった。これは、鳥の大きさを比較するための実験を行った。結果、鳥の大きさは、通常の鳥よりも約1.5倍大きくなった。

### 神戸商工会議所 会頭賞

「火山灰を用いたコンクリートの強度特性の調査」は、火山灰を用いたコンクリートの強度特性を調査するための実験を行った。結果、火山灰を用いたコンクリートの強度は、通常のコンクリートよりも約1.2倍強くなった。これは、火山灰を用いたコンクリートの強度特性を調査するための実験を行った。結果、火山灰を用いたコンクリートの強度は、通常のコンクリートよりも約1.2倍強くなった。

【神戸商工会議所 会頭賞受賞理由】  
火山灰を用いたコンクリートの強度特性の調査は、火山灰を用いたコンクリートの強度特性を調査するための実験を行った。結果、火山灰を用いたコンクリートの強度は、通常のコンクリートよりも約1.2倍強くなった。これは、火山灰を用いたコンクリートの強度特性を調査するための実験を行った。結果、火山灰を用いたコンクリートの強度は、通常のコンクリートよりも約1.2倍強くなった。

### 県教育長賞

「タマキカイイはなぜ海に落ちたのか？」は、タマキカイイがなぜ海に落ちたのかを調査するための実験を行った。結果、タマキカイイは、海に落ちた。これは、タマキカイイがなぜ海に落ちたのかを調査するための実験を行った。結果、タマキカイイは、海に落ちた。

【県教育長賞受賞理由】  
タマキカイイはなぜ海に落ちたのか？という問いに対する調査は、タマキカイイがなぜ海に落ちたのかを調査するための実験を行った。結果、タマキカイイは、海に落ちた。これは、タマキカイイがなぜ海に落ちたのかを調査するための実験を行った。結果、タマキカイイは、海に落ちた。

読者新聞 30面 (2023年 10月 15日)

- (9) 令和5年度高大連携課題研究合同発表会 at 京都大学で発表
- (物理系研究部磁性流体班、生物系研究部二ハイチュウ班、地学系研究部マグマ班、生物系研究部サボテン班)
- 主催 兵庫県教育委員会
- 応募 令和5年10月10日(火) 申込および要旨締切
- 日時 令和5年11月3日(金・祝) 11:30~16:00
- 場所 京都大学吉田南校舎(京都市左京区吉田本町)
- テーマ
- 外部磁力による磁性流体のスパイク出現の条件(物理系研究部磁性流体班)
  - 片利共生する軟体動物の腎囊表面の形状による蠕虫型二ハイチュウの棲み分け(生物系研究部二ハイチュウ班)
  - 角閃石の微細構造から推定するマグマ文化末期の熱水残液の循環(地学系研究部マグマ班)
  - サボテンに共通な刺座配列方程式と種特異性(生物系研究部サボテン班)
- 研究者
- 陰山麻愉、松田理沙、飯田凌央、石井漸、永井翔、中村賢矢、富士佳蓮(物理系研究部磁性流体班)
  - 前田隆良、岡本莉空、岡本涼佑、中田天晴、中村賢矢(生物系研究部二ハイチュウ班)
  - 陰山麻愉、松田理沙、藤田詩桜、前田隆良(地学系研究部マグマ班)

- ・村瀬太郎、大和司、岸上菜菜、本脇敬人、吉田龍之介、伊坂奈桜、寺田悠哉、宮下翔真、宮本泰成（生物系研究部サポテン班）

結 果

京都大学大学院農学研究科の北島薫教授の記念講演「熱帯の生物多様性研究とフィールド科学の魅力」の後に、研究のポスター発表と討議が行われた。兵庫県のSSH指定校は、県教育委員会を通じて京都大学と連携協定を結んでおり、28件の研究発表が行われた。本校からは4件の研究発表を行ったが、それぞれについてポスターの改善点や研究の今後の方向性などについて、京都大学の研究者や参加生徒と行った議論は、研究発表よりも有意義なものであった。



全国大会出場

(10) 第67回日本学生科学賞 中央審査会に出場（地学系研究部マグマ班）

主 催 読賣新聞社、全日本科学教育振興委員会、科学技術振興機構 文部科学省認定大会

応 募 令和5年10月30日（月）応募フォーム（出品票）および研究レポート提出締切  
令和5年11月11日（土）～12日（日）中央予備審査会

テーマ ・西南日本山陽帯と山陰帯のマグマ分化末期の熱水残液循環の比較 深成岩の角閃石から発見した波状累帯構造から推定する（地学系研究部マグマ班）

研究者 ・松田理沙、藤田詩桜（地学系研究部マグマ班）

結 果 全国から寄せられた291件（兵庫県を含めて9都県は各都県で予備審査あり）の研究論文について20名の審査委員によって審査された。残念ながら中央最終審査には至らなかった。学術的意義の高い研究であっただけに残念であったが、生徒の主体的な活動によって、これまでの成果を得ることができたことは、高く評価されるべきであろう。

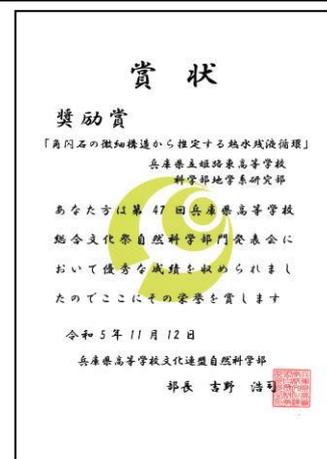
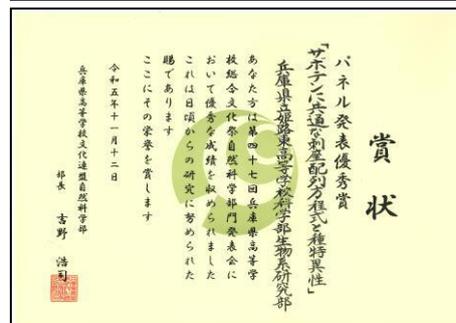
なお、審査カードには「研究結果があまりにもきれいにまとめられているなど、高校生の力だけではできないであろう論文となっています。京都大学の専門家の力が多く加わっていることが容易に推察できます。2人の独創性をさらに出すなど、今後のさらなる研究の発展を期待します。」とある。本研究は京都大学理学部との連携のもとに進められたものだが、分析方法についてのガイダンスを受けて以降は、生徒自身がX線分析についての専門書を学び、分析も生徒自身で行い、数値の処理もまた生徒自身がプログラムを組んで行ったものである。必要であれば高校では不可能な高いレベルの研究を展開することも、SSHにおける高大連携の目的のひとつであろう。これに対して、それが審査内容のすべてではないとしても、生徒が読む審査カードに（研究内容についてではなく）「高校生では無理だろう」という推測によって本研究の評価が低くなったと記されていることは、生徒の優れた主体性や高大連携に関する審査委員会の理解が不十分であると言わざるを得ず、大変残念である。これについては、共催する科学技術振興機構にも検討していただきたい。SSH指定校の間では、このような審査会に出品すると研究が正当に評価を受けないのではないかという意見が広がっており、学術誌への投稿に方針を切り替えることも検討すべき時期にきていると考える。

(11) 第47回兵庫県高等学校総合文化祭自然科学部門発表会で口頭およびポスター発表し、優秀賞（生物系研究部サポテン班）を得て近畿高等学校総合文化祭への出場を決めたほか、優良賞（物理系研

究部磁性流体班) パネル発表優秀賞(生物系研究部サポテン班) 奨励賞(地学系研究部マグマ班)を受賞

主催 兵庫県高等学校文化連盟自然科学部会  
 応募 令和5年9月25日(月)申込締切  
 令和5年10月4日(水)論文締切  
 令和5年10月27日(金)参加調査票提出締切  
 日時 令和5年11月10日(金)予選(生物分野)  
 令和5年11月11日(土)口頭発表、ポスター発表  
 フリーセッション  
 令和5年11月12日(日)ポスター発表、フリーセ  
 ッション  
 場所 バンドー神戸青少年科学館  
 (神戸市中央区港島中町7-7-6)  
 テーマ ・サポテンに共通な刺座配列方程式と種特異性(生物  
 系研究部サポテン班)  
 ・外部磁力による磁性流体のスパイク出現条件(物理  
 系研究部磁性流体班)  
 ・角閃石の微細構造から推定する熱水残液循環(地学  
 系研究部マグマ班)  
 研究者 ・村瀬太郎、大和司、伊坂奈桜、寺田悠哉、宮下翔真、  
 宮本泰成(生物系研究部サポテン班)  
 ・陰山麻愉、飯田凌央、石井漸、永井翔、中村賢矢、  
 富士佳蓮(物理系研究部磁性流体班)  
 ・藤田詩桜、松田理沙、前田隆良(地学系研究部マグ  
 マ班)

結果 口頭発表29件(物理分野5件、化学分野5件、生物分野16件、  
 地学分野3件) ポスター発表53件であった。論文と当日の口  
 頭発表、およびポスター発表審査の合計点で評価を受け、サポ  
 テン班が来年度開催の近畿総合文化祭への出場権を得た。特に  
 マグマ班の研究は、学会でも大学の専門研究者レベルの研究で  
 あると高い評価を受け、その論文もきちんとまとめられていた  
 が、審査のための論文が2ページであり、口頭発表12分間では  
 その有用性を伝えることができず残念であった。優れた研究に  
 ついては、審査会ではなく学会への論文投稿という形をとるべ  
 きだと強く感じた。



(12) 日本動物学会近畿支部高校生研究発表会で発表(生物系研究部二ハイチュウ班)

主催 日本動物学会近畿支部  
 応募 令和5年10月18日(水)申込および要旨締切  
 日時 令和5年11月18日(土)13:30~16:00  
 場所 大阪大学吹田キャンパス(大阪府吹田市山田丘1-3)  
 テーマ ・片利共生する軟体動物の腎囊表面における二ハイチュウの棲み分け(その2)(生物系研究部二ハイチュウ)



ウ班)

研究者 ・岸上菜菜、前田隆良、岡本涼佑、中田天晴、中村賢矢、岡本莉空（生物系研究部ニハイチュウ班）

結果 近畿圏の高等学校から12件の発表があった。1年次生徒によるプレゼンテーションを行い、発表の経験を積んだ。特にニハイチュウ研究の第一人者で、科学部の生徒が大阪大学のSEEDSプログラムでお世話になっている、大阪大学大学院理学研究科の古屋秀隆教授との議論は、今後の研究の大きな指標となった。

(13)神戸大学高校生・私の科学研究発表会2023で発表し1位優秀賞(地学系研究部マグマ班)、奨励賞(生物系研究部サボテン班、ニハイチュウ班)を受賞

主催 兵庫県生物学会、神戸大学サイエンスショップ

応募 令和5年10月19日(木)申込および要旨締切

日時 令和5年11月23日(木・祝)

場所 神戸大学百周年記念館(神戸市灘区六甲台町1-1)

- テーマ
- ・角閃石の微細構造から推定する熱水残液循環(地学系研究部マグマ班): 口頭発表、ポスター発表
  - ・サボテンに共通な刺座配列方程式と種特異性(生物系研究部サボテン班): 口頭発表、ポスター発表
  - ・片利共生する軟体動物の腎囊表面の形状による蠕虫型ニハイチュウの棲み分け(その2)(生物系研究部ニハイチュウ班): ポスター発表
  - ・外部磁力による磁性流体のスパイク出現条件(物理系研究部磁性流体班): 口頭発表、ポスター発表

研究者 ・陰山麻愉、松田理沙、藤田詩桜、前田隆良(地学系研究部マグマ班)  
 ・藤田詩桜、村瀬太郎、大和司(生物系研究部サボテン班)  
 ・前田隆良、岡本莉空、岡本涼佑、中田天晴、中村賢矢(生物系研究部ニハイチュウ班)  
 ・陰山麻愉、飯田凌央、石井漸、永井翔、中村賢矢、富士佳蓮(物理系研究部磁性流体班)

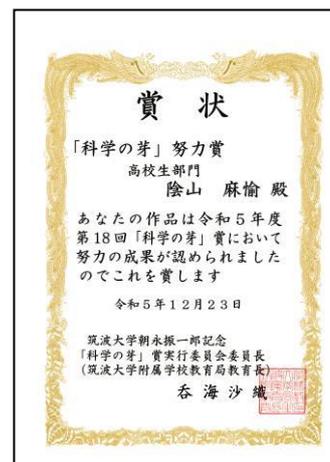
結果 口頭発表とポスター発表を合わせて60件の発表があった。本校からは1年次生徒が初めて中心になって発表する機会と位置付けており、良い経験となった。



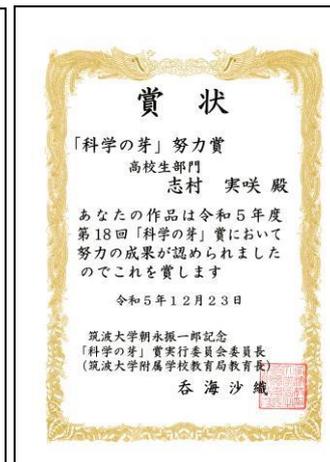
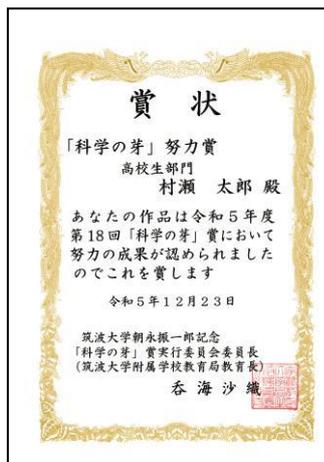
(14)第18回筑波大学「科学の芽」賞に応募し、努力賞(全国3位/地学系研究部マグマ班、生物系研究部サボテン班、物理系研究部磁性流体班)を受賞

主催 筑波大学「科学の芽」賞実行委員会 文部科学省認定大会

- 応募日時 令和5年9月16日(土) 申込および論文締切  
 令和5年11月30日(木) 審査委員会
- テーマ
- ・西南日本内帯山陽帯の揖保川花崗閃緑岩の角閃石から発見した波状累帯構造から推定する熱水残液の循環(地学系研究部マグマ班)
  - ・サボテンの刺座配列の螺旋方程式 系統樹上の位置と関連はあるのか(生物系研究部サボテン班)
  - ・外部磁力の強度と磁性流体のスパイク出現の関係(2)(物理系研究部磁性流体班)
  - ・片利共生する軟体動物の腎囊表面の形状による蠕虫型二ハイチュウの棲み分け(2)(生物系研究部二ハイチュウ班)



- 研究者
- ・陰山麻愉、藤田詩桜、松田理沙、高田健吾、前田隆良(地学系研究部マグマ班)
  - ・村瀬太郎、大和司、岸上栞菜、本脇敬人、吉田龍之介、伊坂奈桜、寺田悠哉、宮下翔真、宮本泰成(生物系研究部サボテン班)
  - ・志村実咲、菅原楓、陰山麻愉、松田理沙、飯田凌央、石井漸、永井翔、中村賢矢、富士佳蓮(物理系研究部磁性流体班)
  - ・岸上栞菜、高田健吾、佐藤知希、前田隆良、岡本莉空、岡本涼佑、中田天晴、中村賢矢(生物系研究部二ハイチュウ班)



結果 昨年度より20件近く多い292件の応募のうち、全国2位にあたる奨励賞を3研究が受賞した。昨年度から2年連続の受賞となった。

(15) 第22回神奈川大学全国高校生理科・科学論文大賞に応募し努力賞(全国3位)(地学系研究部マグマ班、物理系研究部磁性流体班) 4件の応募研究で科学部が団体奨励賞を受賞

- 主催 神奈川大学 文部科学省認定大会
- 応募日時 令和5年8月24日(木) 申込および論文締切  
 令和5年12月1日(金) 審査委員会
- テーマ
- ・西南日本内帯山陽帯の揖保川花崗閃緑岩の角閃石から発見した波状累帯構造から推定するマグマ分化過程末期の環境(その2)(地学系研究部マグマ班)
  - ・外部磁力による磁性流体のスパイク出現の条件(その2)(物理系研究部磁性流体班)
  - ・サボテン種の刺座配列を示す配列方程式の系統樹上の比較(生物系研究部サボテン班)
  - ・片利共生する軟体動物の腎囊表面の形状による蠕虫型二ハイチュウの棲み分け(その2)(生物系研究部二ハイチュウ班)

- 研究者
- ・陰山麻愉、藤田詩桜、松田理沙、高田健吾、前田隆良(地学系研究部マグマ班)
  - ・志村実咲、菅原楓、陰山麻愉、松田理沙、飯田凌央、石井漸、永井翔、中村賢矢、富士佳



- 蓮（物理系研究部磁性流体班）
- ・村瀬太郎、大和司、岸上菜菜、本脇敬人、吉田龍之介、伊坂奈桜、寺田悠哉、宮下翔真、宮本泰成（生物系研究部サボテン班）
  - ・岸上菜菜、高田健吾、佐藤知希、前田隆良、岡本莉空、岡本涼佑、中田天晴、中村賢矢（生物系研究部二ハイチュウ班）

**結果** 応募総数 59 校 132 件。予備審査と審査委員 5 名による本審査を経て、2

件の論文が努力賞を、また科学部としても団体奨励賞を受賞した。科学部全体の研究レベルの高さを示した大会であった。なお、指導した川勝和哉主幹教諭には 16 年連続で指導教諭賞が贈られた。



(16) 第 46 回日本分子生物学会高校生発表会で口頭発表およびポスター発表(生物系研究部サボテン班、生物系研究部二ハイチュウ班)

- 主催** 日本分子生物学会
- 応募** 令和 5 年 9 月 21 日 (木) 申込および要旨締切
- 日時** 令和 5 年 12 月 8 日 (金) 13:45 ~ 15:45
- 場所** 神戸国際展示場 (神戸市中央区港島中町 6-11-1)
- テーマ**
- ・サボテン種に共通な刺座配列の螺旋方程式と種ごとの違い (生物系研究部サボテン班)
  - ・片利共生する軟体動物の腎囊表面の形状による蠕虫型二ハイチュウの棲み分け (その 2) (生物系研究部二ハイチュウ班)



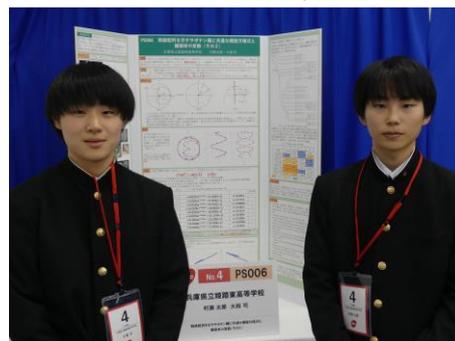
- 研究者**
- ・村瀬太郎、大和司、寺田悠哉、宮本泰成、宮下翔真 (生物系研究部サボテン班)
  - ・岸上菜菜、前田隆良、岡本涼佑、中田天晴、中村賢矢、岡本莉空 (生物系研究部二ハイチュウ班)

**結果** 口頭発表の後、引き続いてポスター発表を行った。1 年次生徒が中心となって発表したが、今後のプレゼンテーションに期待が持てる立派な発表だった。本年度は、審査を通過した、25 件の口頭発表と 45 件のポスター発表があった。なお本大会にプレゼンテーションの審査はない。

全国大会出場

(17) 第 21 回高校生科学技術チャレンジ 2023 (JSEC) に応募し最終審査会で花王奨励賞 (生物系研究部サボテン班) 入選 (物理系研究部磁性流体班)

- 主催** 朝日新聞社、テレビ朝日 文部科学省認定大会
- 応募** 令和 5 年 10 月 2 日 (月) 申込および論文締切
- 令和 5 年 10 月上旬 ~ 中旬 予備審査
- 令和 5 年 10 月下旬 ~ 11 月上旬 1 次審査会
- 日時** 令和 5 年 12 月 9 日 (土) 14:10 ~ 10 日 (日) 17:30 最終審査会
- 場所** 日本科学未来館 (東京都江東区青海 2-3-6)



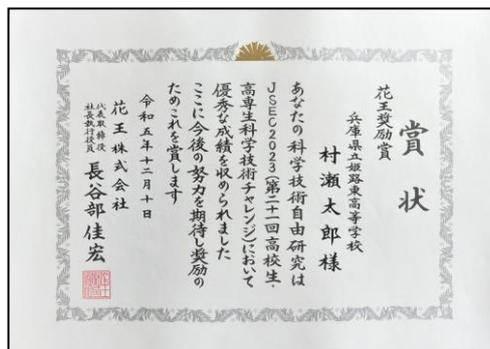
- テーマ
- ・刺座配列を示すサボテン種に共通な螺旋方程式と種固有の変数(その2)(生物系研究部サボテン班)
  - ・外部磁力による磁性流体のスパイク形成の条件(その2)(物理系研究部磁性流体班)
- 研究者
- ・村瀬太郎、大和司(生物系研究部サボテン班)
  - ・陰山麻愉、石井漸、永井翔(物理系研究部磁性流体班)(JSECは各研究3名以内しか認めていない)

結果

過去最多の174校から343件の応募があった。論文に対する予備審査(1研究あたり4~6名の審査委員)によって、本校を含む100研究が1次審査に進出した。入選以上となる1次審査(審査委員22名)で、サボテン班の研究が最終審査会の30研究に選出された。2年次生徒の村瀬太郎と大和司は、昨年度も入賞している。

最終審査会では、時間割制専門審査、自由時間割制専門審査、時間割制総合審査を経て、順位が付けられた。結果は、あと1研究で国際大会ISEFへの派遣校となる11位と惜しい成績だったが、生徒は澁刺と自信をもって発表を行い、高い評価を得た。また、磁性流体班の研究は、予備審査を通過して1次審査に進んだものの、最終審査会進出研究とはならず、入選となった。

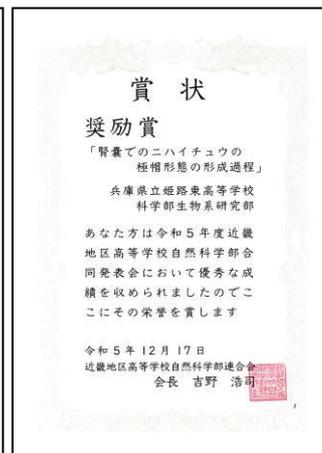
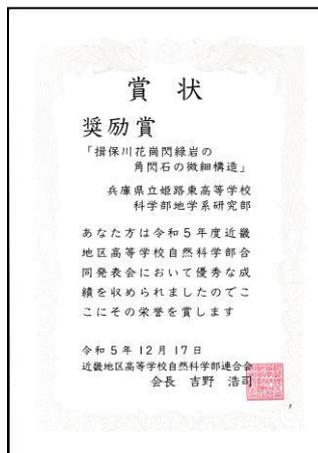
令和6年4月2日(火)~3日(水)に花王株式会社本社のサイエンスツアーに招待され、そこで研究発表を行う予定である。



(18) 令和5年度近畿地区高等学校自然科学部合同発表会(近畿高等学校総合文化祭)で発表(地学系研究部マグマ班、生物系研究部二ハイチュウ班)

- 主催 近畿地区高等学校自然科学部連合会
- 応募 令和5年6月23日(金)申込締切  
令和5年9月15日(金)論文締切
- 日時 令和5年12月17日(日)11:30~18:00
- 場所 バンドー神戸青少年科学館(神戸市中央区港島中町7-7-6)

- テーマ
- ・ 揖保川花崗閃緑岩の角閃石の微細構造（地学系研究部マグマ班）
  - ・ 腎囊での二ハイチュウの極帽形態の形成過程（生物系研究部二ハイチュウ班）
- 研究者
- ・ 陰山麻愉、藤田詩桜、松田理沙（地学系研究部マグマ班）
  - ・ 岸上栞菜、前田隆良、中田天晴、岡本莉空、小林憲正、中村賢矢、岡本涼佑（生物系研究部二ハイチュウ班）
- 結果
- 近畿地方の各府県から選抜された



25件の研究のポスター発表会で、高校生どうしの交流も積極的に行われた。本校から発表した2件は、昨年度の兵庫県高等学校総合文化祭で優れた研究であると選抜された研究である。

(19) 第26回化学工学会学生発表会で本発表研究に採択され発表予定（物理系研究部磁性流体班）

主催 化学工学会

応募 令和5年12月8日（金）申込締切

令和6年2月2日（金）要旨締切

日時 令和6年3月2日（土）9:30～17:00 オンライン開催

テーマ

- ・ 外部磁力による磁性流体のスパイク形状の条件（物理系研究部磁性流体班）

研究者

- ・ 陰山麻愉、飯田凌央、石井漸、永井翔、中村賢矢、富士佳蓮（物理系研究部磁性流体班）

内容 発表予定は357件。

(20) 第174回日本金属学会2024年春期講演大会 高校生・高専生ポスター発表に採択されポスター発表予定（物理系研究部磁性流体班）

主催 日本金属学会

応募 令和6年1月17日（水）申込締切

日時 令和6年3月12日（火）14:30～18:00

場所 東京理科大学葛飾キャンパス（東京都葛飾区新宿6-3-1）

テーマ

- ・ 外部磁力による磁性流体のスパイク形成の条件（その2）（物理系研究部磁性流体班）

発表者

- ・ 陰山麻愉、飯田凌央、石井漸、永井翔、中村賢矢、富士佳蓮（物理系研究部磁性流体班）

内容 発表予定は64件。

(21) 第20回日本物理学会 Jr. セッション（2024）で本発表研究に採択され発表予定（物理系研究部磁性流体班）

主催 日本物理学会、高等学校文化連盟全国自然科学専門部

応募 令和5年12月13日（水）申込および要旨、論文、研究倫理受講確認書締切

日時 令和6年3月16日（土）9:00～13:30 オンライン開催

テーマ

- ・ 外部磁力による磁性流体のスパイク形状の条件（物理系研究部磁性流体班）

研究者

- ・ 陰山麻愉、飯田凌央、石井漸、永井翔、中村賢矢、富士佳蓮（物理系研究部磁性流体班）

内容 発表予定件数は未公表。

(22) 京都大学ポスターセッション 2023 の予備審査を通過し、兵庫県代表としてポスター発表予定(地学系研究部マグマ班)

- 主催 京都大学
- 応募 令和5年10月13日(金)兵庫県教育委員会高校教育課に兵庫県代表校選考書類提出締切  
令和5年11月30日(木)代表校決定  
令和5年12月15日(金)ポスターテーマ提出締切  
令和6年1月31日(水)要旨提出締切
- 日時 令和6年3月16日(土)12:00~16:30
- 場所 京都大学(京都市左京区吉田本町)
- テーマ ・山陽帯花崗岩類の角閃石から発見した波状累帯構造からマグマ分化末期の熱水残液の循環を推定する(地学系研究部マグマ班)
- 発表者 ・陰山麻愉、松田理沙、藤田詩桜(地学系研究部マグマ班)
- 内容 兵庫県内のSSH指定校の発表を希望する学校が提出した要旨による審査で、本校科学部の研究が3年連続で発表研究に選出された。選抜された滋賀県、京都府、和歌山県、奈良県、三重県、徳島県、大阪府、兵庫県、東京都、石川県、福井県が発表を行い、成果を競う。発表予定は予選を通過した全国31件。

(23) 第71回日本生態学会(2024年)高校生ポスター発表会で本発表研究に採択され発表予定(生物系研究部二ハイチュウ班)

- 主催 日本生態学会
- 応募 令和5年10月31日(火)申込締切  
令和6年1月31日(水)要旨締切
- 日時 令和6年3月17日(日)11:30~13:30 コアタイム オンライン開催
- テーマ ・片利共生する軟体動物の腎囊表面の形状による蠕虫型二ハイチュウの棲み分け(生物系研究部二ハイチュウ班)
- 研究者 ・前田隆良、岡本莉空、岡本涼佑、中田天晴、中村賢矢(生物系研究部二ハイチュウ班)
- 内容 発表予定は63件。

(24) 日本農芸化学会2024年度大会ジュニア農芸化学会で本発表研究に採択され発表予定(生物系研究部サボテン班、生物系研究部二ハイチュウ班)

- 主催 日本農芸化学会
- 応募 令和6年1月15日(月)申込締切  
令和6年1月26日(金)要旨締切
- 日時 令和6年3月26日(火)10:30~16:00
- 場所 東京農業大学世田谷キャンパス(東京都世田谷区桜丘1-1-1)
- テーマ ・サボテン種に共通な刺座配列の螺旋方程式と種固有性(生物系研究部サボテン班)  
・蠕虫型二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(生物系研究部二ハイチュウ班)
- 研究者 ・村瀬太郎、大和司、寺田悠哉、宮本泰成、宮下翔真(生物系研究部サボテン班)  
・前田隆良、岡本莉空、中田天晴、中村賢矢、岸上栞菜(生物系研究部二ハイチュウ班)
- 内容 2年連続で本学会での発表が専門誌「化学と生物」に掲載されたことから、今年度も大きな期待をもって大会に参加する。発表予定数は未公表。

## 5 小中学生を対象にした活動

### (1) 「出前授業 in 荒川公民館」を開催

**目的** 近隣小学校の児童を荒川公民館に集めて、身近な科学の面白さを体験してもらうことによって、自然科学に関する興味・関心を高める。本校生徒のプレゼンテーション能力の向上を図る。

**主催** 兵庫県立姫路東高等学校科学部

**募集** 令和5年7月19日(水)申込締切  
近隣の小学4・5・6年生を対象に募集する。

**日時** 令和5年7月26日(水)14:30~16:00

**場所** 姫路市立荒川公民館(姫路市町坪127-4)

**テーマ** 成長するビスマスの結晶を観察しよう

**参加者** 兵庫県立姫路東高等学校科学部の生徒及び教員

**内容** 科学部が研究しているオリジナルなテーマの内容について、科学部の生徒がわかりやすくした実験・観察を行い、発見や解明の楽しさを追体験してもらう。近隣小学生21名(4年生4名、5年生6名、6年生11名)、中学生6名(1年生2名、2年生1名、3年生3名)、保護者7名が参加し、盛況となった。  
配布プリントや、お土産用のビスマスカードを作成し、楽しく学んで科学への理解を深めた。



### (2) わくわく実験教室を開催

**目的** 近隣小学校の児童を本校に招き、身近な科学の面白さを体験してもらうことによって、自然科学に関する興味・関心を高める。本校生徒のプレゼンテーション能力の向上を図る。

**主催** 兵庫県立姫路東高等学校科学部、生活創造部

**募集** 令和5年7月12日(水)申込締切  
近隣の小学4・5・6年生を対象に募集する。

**日時** 令和5年8月12日(土)9:00~12:00

**場所** 兵庫県立姫路東高等学校 生物教室・調理教室



**姫路東高生アイス作る実験など**

姫路東高校(姫路市本町)の生徒が、地元の小学生に科学の面白さを教える「わくわく実験教室」が、同校で開かれた。児童たちはお菓子作りや化学の実験を楽しみながら、理科の面白さを学んだ。

同校は、理数系教育を重点的に行う文部科学省の「スーパーサイエンスハイスクール」に指定されている。教室は12日にあり、船場小と手柄小の4、5年生計9人が参加。姫路東高校の科学部と生活創造部が実験などを手伝った。

科学部のブースでは、金

**科学の面白さ児童に伝える**

高校生の手を借りながら、実験に挑戦する子どもたち。姫路東高校

属を溶かして結晶を取り出す実験に挑戦。小鍋にビスマスの板を入れて加熱した後、児童らはピンセットで玉虫色に変化した結晶を取り出し、誰が一番大きいか競い合った。生活創造部では、氷に塩を混ぜると急激に温度が下がる「氷点降下」を利用し、アイスクリーム作りに取り組んだ。

手柄小5年の藤下智大君(10)は「知らないことをたくさん学べて楽しかったです。科学部部長の陰山麻愉さん(16)は「小学生にも科学の面白さが伝わり、準備したかいがありました」と笑顔だった。

(成将希)

神戸新聞 21面 (2023年8月23日)

- テーマ 虹の結晶を作ろう！（ビスマス結晶の成長の観察 / 地学系研究部）  
 無重力パフェ～アイスをつくろう（氷点降下と卵の泡立ち性 / 生活創造部）
- 参加者 兵庫県立姫路東高等学校科学部、生活創造部の生徒及び教員
- 内容 科学部が研究しているオリジナルなテーマの内容について、科学部の生徒がわかりやすくした実験・観察を行い、発見や解明の楽しさを追体験してもらった。近隣小学生9名（4年生4名、5年生5名）が参加し、保護者や小学校教員とともに実験や観察を行った。

## 6 発展的な探究活動

(1) JST グローバルサイエンスキャンパス企画大阪大学の教育研究力を活かした SEEDS プログラム（傑出した科学技術人材発見と早期育成）で3年次生徒が活動、さらに1年次生徒2名が合格

- 主催 大阪大学理学部
- 応募 令和5年5月31日（水）申込および書類締切
- 日時 令和5年6月11日（日）、6月18日（日）13:30～17:30  
 記述試験と面接審査
- 場所 大阪大学（豊中市待兼山町1-1）
- 参加者 3年次生徒が活動し8月20日に修了した。  
 新たに、体感コースS（科学系部活動所属生徒対象）に1年次生徒3チーム8名が挑戦し、男子2名（中田天晴、小林憲正）が合格した。
- 協力者 古谷秀隆教授（大阪大学大学院理学研究科）
- 内容 体感コースSは、現在高等学校の部活動で行っている研究をさらに深化させるために大阪大学の教員および施設を活用するもので、事前に研究計画書を提出して面接審査を受け、採択の可否が決定する。二ハイチュウを研究する男子生徒2名が採択され、定期的に大阪大学を訪問して研究活動を行っている。



(2) JST グローバルサイエンスキャンパス企画「“越える”力を育む国際的科学技術人材育成プログラム（ROOT プログラム）」で2年次生徒1名が実践ステージで活動、さらに1年次生徒1名が基礎ステージに合格

- 主催 GSC ひょうご神戸コンソーシアム（神戸大学・兵庫県立大学・関西学院大学・甲南大学・理化学研究所・県立人と自然の博物館・高輝度光科学研究センター・兵庫工業会・関西各教育委員会等）
- 応募 令和5年6月25日（日）申込および書類締切
- 日時 令和5年7月8日（土）、7月9日（日）、7月17日（月・祝）に面接審査
- 場所 神戸大学をはじめとする兵庫県内の国公立大学
- 参加者 陰山麻愉（2年次）が実践ステージで、さらに岡本莉空（1年次）が基礎ステージに合格し活動した
- 協力者 石田駿一助教（神戸大学大学院工学研究科）
- 内容 2年次生徒の陰山麻愉は、昨年度の基礎ステージで優れた成績を得たことから、本年度は実践ステージ生に選抜された。協力者から助言をもらいながら、科学部で研究中の磁性流体について高いレベルの研究を行った。また、新たに合格した岡本莉空は、基礎ステージで科学研究の基礎を学んだ。

(3) 京都大学理学探究活動推進事業 COCOCUS-R2023 で3名が活動

**主催** 京都大学大学院理学研究科  
**応募** 令和5年2月3日(金) 申込および書類締切  
**日時** 令和5年2月17日(金) 合格発表  
**場所** 京都大学理学部(京都市左京区北白川追分町)  
**参加者** 2年次女子生徒3名(陰山麻愉、松田理沙、藤田詩桜)  
**協力者** 河上哲夫教授(大学院理学研究科地球惑星科学)、中野美玖氏(同大学院生)  
**内容** 応募があり選考に合格した女子高校生1~3名と、京都大学理学部の大学院生がチームとなり探究活動を進める事業で、2023年2月~2024年3月まで、定期的に(月2回) ZOOM を活用して会議を行う。審査の結果21校が合格。本校の合格した地学系研究部マグマ班の3名が、ZOOM ミーティングの枠を超えて、高大連携の事業に発展させ、京都大学理学部の Electron Probe Micro Analyzer (EPMA) を8月2日(水)~3日(木)の2日間自由に使って、鉱物の化学成分分析を行わせていただくことができた。その成果は論文にまとめて学会で発表したほか、日本学生科学賞に応募して中央審査会に進出することになった。今後、支援期限を過ぎても連携関係を維持することが確認されている。



(4) 数学理科甲子園に6名が挑戦

**主催** 兵庫県教育委員会  
**応募** 令和5年9月6日(水) 申込締切  
**日時** 令和5年10月28日(土) 9:00~16:00  
**場所** 甲南大学 講堂兼体育館(神戸市東灘区岡本 8-9-1)  
**受験者** 2年次生6名1チーム  
**結果** 本大会は、科学の甲子園全国大会の兵庫県予選と位置付けられている。2年次生徒6名が1つのチームとなって、数学や理科の課題に取り組んだ。予選(筆記競技)の個人戦、団体戦の合計得点で本選進出が決まるが、残念ながら予選敗退し本選に進出できなかった。

(5) 第16回日本地学オリンピック(第18回国際地学オリンピック日本代表選抜)に21名が挑戦

**主催** NPO 法人地学オリンピック日本委員会  
**応募** 令和5年11月15日(水) 申込締切  
**日時** 令和5年12月17日(日) 16:30~17:30(オンライン開催)  
**場所** 生徒各自の自宅で受験  
**受験者** 2年次生11名、1年次生10名  
**結果** 国際大会予選として実施される科学オリンピックのひとつ。この成績は多くの国立大学のAO入試や推薦入試に用いることができる。マークシート方式の筆記試験で、原則として高等学校地学基礎の教科書の内容から出題されるが、思考的な発展問題も含まれる。同日に近畿高等学校総合文化祭が開催されたため、申し込みをした一部の生徒は受験することができなかった。

受験者総数 1578 名、平均点 28.1 点、本校受験者平均点 22.4 点であった。

(6) 第34回日本数学オリンピック予選で地区優秀賞

- 主催 公益社団法人数学オリンピック財団
- 応募 令和5年10月31日(火)申込締切
- 日時 令和6年1月8日(月・祝)13:00~16:00
- 場所 神戸大学大学院理学研究科(神戸市灘区六甲台町1-1)
- 受験者 2年次生4名
- 結果 国際大会予選として実施される科学オリンピックのひとつ。予選突破まであと一步ところまで迫った黒岩空渡が、兵庫県受験者366名のうち24名以内の地区優秀賞を受賞した。



## 7 国際的な活動

(1) オーストラリア海外研修(野外調査)

- 目的 日本国内ですでに多くの成果を上げている岩石・鉱物学に基づくマグマ分化に関する研究の成果を基にして、オーストラリア南東部ニューサウスウェールズ州海岸地帯の露頭調査と、岩石・鉱物学的な国際的な課題研究を行うことによって、日本国内の研究で提案したマグマ分化過程のモデルが国際的に通用するのかどうかについて検証を行う。本研修の成果は、論文にまとめ、国内の専門学会はもちろんのこと、2025年1月にワシントンD.C.で開催予定の国際学会である American Geophysical Union (AGU)での発表を目指す。この野外調査活動により、高校生のレベルをはるかに超えた専門的な研究成果を得るとともに、生きた語学力の育成や異文化交流、国際理解も深めることができ、本校生徒が目指す「世界を牽引する人材育成のための国際的な課題研究」への大きな一歩となることが期待できる。

日時 令和6年1月22日(月)8:00~2月1日(木)23:30の9泊11日(機内1泊)

場所 シドニー大学 (Camperdown NSW 2050)  
オーストラリア博物館 (1 William Street, Sydney NSW 2010)  
ナルーマ~トマキン海岸線、ブルーマウンテンズ国立公園

参加者 1、2年次生徒希望者19名 引率教員2名(川勝和哉、平林友貴)  
科学部12名(2年男子3名、2年女子3名、1年男子6名)  
科学部以外7名(2年男子1名、2年女子4名、1年男子1名、1年女子1名)

- 内容
  - ・シドニー大学  
本調査地域の自然について長く調査・研究を行っているシドニー大学理学部を訪問し、実際に調査を行った研究者等と議論することによって、観点を絞って効率的な調査ができるようにした。特に、調査地域は複雑な岩石分布であることが知られており、それらの個々について、地質構造や鉱物組成の特徴について理解することは重要である。さらに、潮位変化など海岸地帯特有の調査の難しさがあるため、安全な調査の継続のために助言を得た。
  - ・オーストラリア博物館  
オーストラリア南東部の地質調査および岩石試料採取の前に、シドニー市街にあるオーストラリア最古の博物館であるオーストラリア博物館を訪問した。調査地域に分布する岩石や鉱物等を事前に観察することにより、事前学習で得た知識を活用しながら、それぞれの岩石や鉱物等の特徴をまとめ、フィールドワークに活用した。また研究者と議論を行い、研究の内容に関する理解を深めた。
  - ・ナルーマ~トマキンの海岸線(フィールドワーク)

今回の海外研修の主要な目的である、露頭調査を集中的に行った。日本国内で経験と実績を積んできたマグマ分化の研究をさらに発展させるために、本格的な野外での地質調査を行うとともに、岩石の観察と岩石試料の採取を行った。

地形図をもとに、日本から持参するクリノメーターやハンマー、地形図等の地質調査用具を用いて測量を行ったり、岩石の露頭観察を行ったりして、地質図を作成すると同時に、必要な岩石試料の採取を行った。毎日夕食後に、その日の調査結果についての報告会を開いて情報を共有したり試料の整理を行ったりするとともに、翌日の活動の計画を立てた。なお、採取した岩石試料は日本へ持ち帰り、研磨薄片を作成して偏光顕微鏡で観察したり、京都大学を訪問して Electron Micro Probe Analyzer (EPMA) 分析を行う(連携済)。

・ブルーマウンテンズ(スリーシスターズ)

先行研究から、ナルーマ～トマキンの海岸線では、この地域を構成する広域な地層の観察は困難であるため、ユネスコの世界自然遺産に指定されているブルーマウンテンズを訪問し、今回の研究で注目する火成岩が貫入している地層を広域に観察した。広域にわたるため、位置を変えながら、日本から持参する双眼鏡とクリノメーター等を活用して地質構造を観察したが、霧が濃い時間が多く、十分な観察をすることができなかつたことが残念であった。

・シーニックワールド

ブルーマウンテンズ同様、ナルーマ～トマキンの海岸線に分布する地層を構成する岩石について、現地ガイドの説明を聞くとともに、地層を構成する岩石を直接手に取って、ルーペ等を用いて観察し記録した。

旅 程

・1月22日(月)

8:30 JR 姫路駅出発(貸切バス) 10:30 関西空港到着  
13:30 関西空港出発(大韓航空 KE728 便) 15:25 仁川空港到着(乗り継ぎ)  
18:45 仁川空港出発(大韓航空 KE401 便)

・1月23日(火)

6:55 シドニー空港到着、シドニー大学研修、オーストラリア博物館研修  
18:00 METRO HOTEL MARLOW SYDNEY CENTRAL 泊

・1月24日(水)

9:00 ホテル出発(専用車) 16:00 ナルーマ到着、The Harrington Motel 泊

・1月25日(木)～29日(月)

8:00(9:00) ナルーマ～トマキン海外線の野外調査に出発(専用車)  
9:00(10:00) 調査地域に到着、調査、15:00(15:30) 調査地域出発(専用車)  
16:30 ナルーマ到着、The Harrington Motel Horizon Holiday Apartments Narooma 泊

・1月30日(火)

10:00 シドニーへ移動(専用車) 18:00 シドニー到着、METRO HTL MARLOW SYD 泊

・1月31日(水)

8:30 専用車で移動、ブルーマウンテンズ研修  
シーニックワールド研修  
18:00 ホテル到着、METRO HTL MARLOW SYD 泊

・2月1日(木)

6:10 シドニー空港へ移動(専用車)  
9:00 シドニー空港出発(KE402 便)  
18:05 仁川空港到着、乗り継ぎ  
19:05 仁川空港出発(KE721 便)  
21:00 関西国際空港到着



22:00 関西国際空港出発(貸し切りバス) 23:30 JR 姫路駅到着、解散



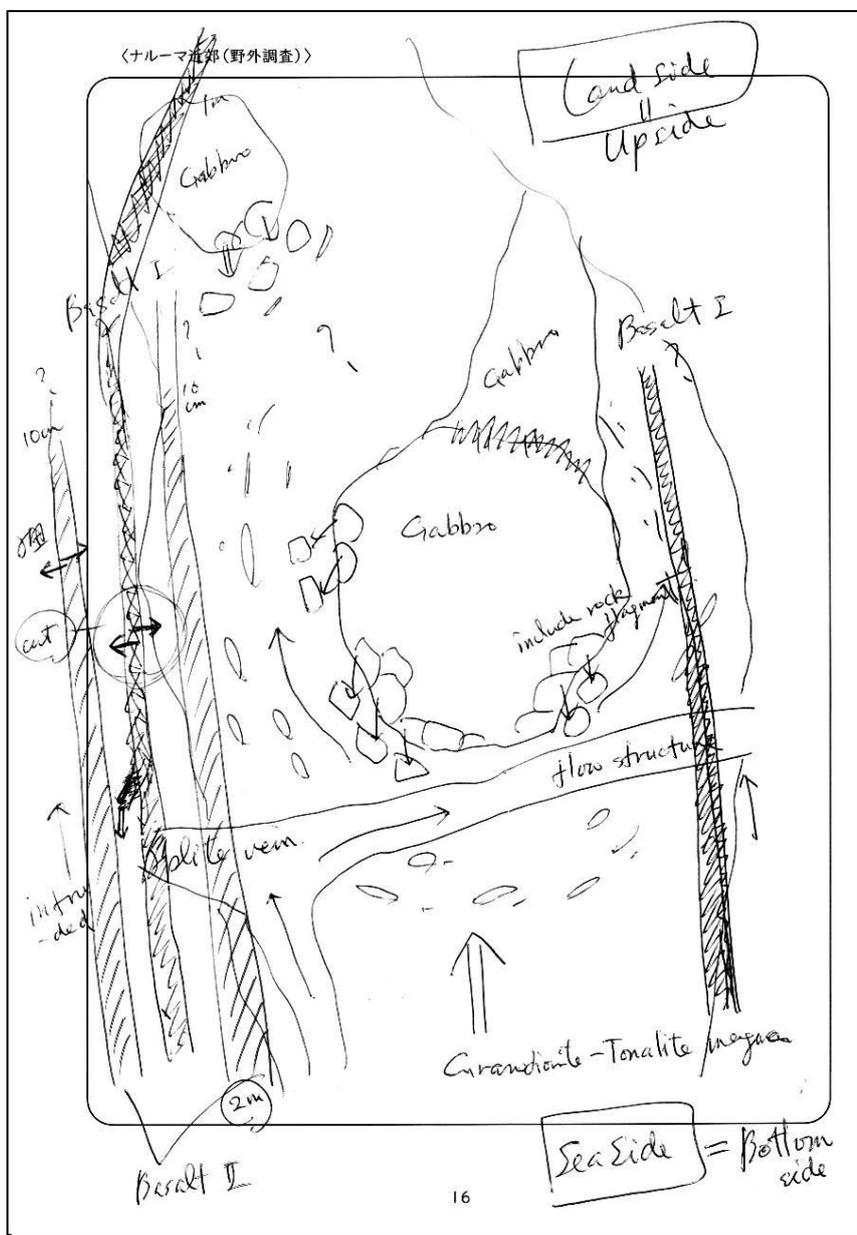
主な調査地域である Bingi Bingi Point (Google Earth)



シドニー大学研修



オーストラリア博物館研修



現地調査中に描いた地質構造図の粗稿





調査地域の主な露頭写真等（それぞれの説明は避ける）



ブルーマウンテンズ研修



調査に参加した生徒 19名

ここでは詳細な調査内容は掲載できない。来年度夏までに研究結果を論文にまとめ、American Geophysical Union等の専門学会で公表する。

**成果** まとめ冊子「オーストラリア海外研修」で詳細に示すが、参加した生徒の全員が、研修期間中で最も楽しく充実しており、自分が最も成長したことを自覚したのは、ナルーマ～トマキンの海外線露頭調査の5日間であったと答えている。これまでは「石」を見ても何の興味も持たなかったという生徒が、「岩石」の名前を英語で言い、マグマの流れやそれによって作られた構造について、目を輝かせて現場で熱く議論する姿は、学校生活では見ることができないものであった。

科学部の生徒の研究する姿を見て、科学部ではない生徒も高い次元の研究方法与技能を身に付けていき、今後も論文をまとめて発表するまで、積極的に関わりたいと希望している。やはり、一般的によく行われている海外での見学研修とは異なり、専門研究としての現地調査には、独特の魅力があり、生徒を大きく成長させる。

## 8 校外研修

経験の浅い生徒にとって、現地を訪れて本物に触れることは、自然科学観を育成するために重要である。生徒の探究心を育成するうえで、きわめて有効な機会を得ることができた。

### (1) 筑波学園都市研修

**目的** 最先端の科学・技術に直接触れ、また研究員から講義を受けたり研究員と議論したりすることによって、自然科学への興味・関心を深化させ、研究レベルの向上を図る。

**日時** 令和5年8月17日(木)6:20~19日(土)18:45の2泊3日

**場所** 地図と測量の科学館(国土地理院)(8月17日(木)/つくば市北郷1番国土地理院)

サイバーダインスタジオ(8月17日(木)/つくば市研究学園5-19)

筑波実験植物園(国立科学博物館)(8月18日(金)/つくば市天久保4-1-1)

地質標本館(産業技術総合研究所)(8月18日(金)/つくば市東1-1-1)

サイエンススクエアつくば(8月18日(金)/つくば市東1-1-1中央第1)

筑波宇宙センター(JAXA)(8月19日(土)/つくば市千現2-1-1)

つくばエキスポセンター(8月19日(土)/つくば市吾妻2-9)

**参加者** 科学部1、2年次生徒希望者26名(内科学部以外が5名参加)

**引率** 川勝和哉

**内容** 本企画で設定した訪問先を、つくばサイエンスツアーを活用して廻った。いずれの訪問先でも研究員に事前に依頼をして、案内していただくほか議論を行った。

科学部にはさまざまな分野の研究課題があり、生徒は自分の研究テーマに関する訪問だけではなく、他のテーマに関する内容にも熱心に耳を傾けた。帰校後の研究において、それらの経験が生かされた。

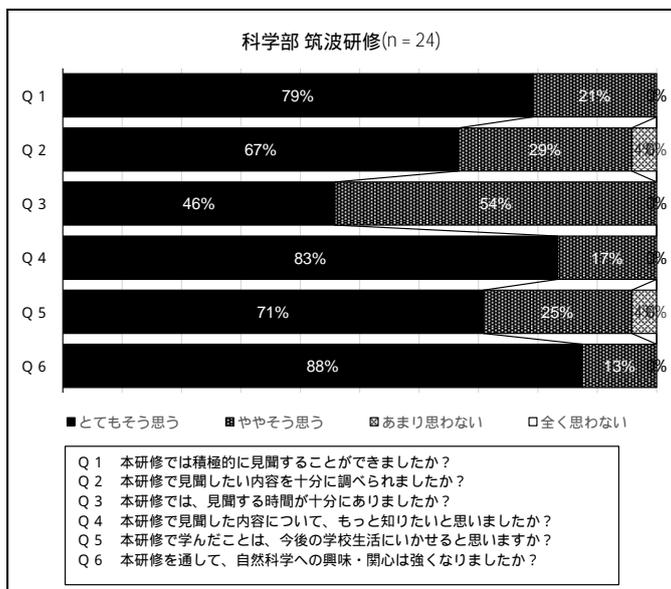
事前学習会を行ったほか、報告書の提出を求め、校内で広く公開した。

**感想** ・たくさんの施設に行けて充実した研修だった。あのように施設が密集しているのは羨ましい。展示物は見るだけで楽しいものがたくさんあった。しかし、その説明を聞くと、一見ピンとこなかったものが急に面白く感じた。今後はもっと注意して見て、展示物の意味を考えていきたい。そうすれば何倍も楽しいと思う。

- ・今回は科学の発展などの分野における倫理の重要性が強く印象づけられるものとなった。人間にとっての発展とはなにか、どのようにして発展に研究をつなげ、どうすればよいものとして社会に貢献できるのか、を考えさせられる機会となった。
- ・この研修を通して今後の探究や部活動で活用できそうなことを色々学べた。特に生命倫理について全体を通して教えられ、今後はそこを強く意識して研究・探究を行おうと思う。



**検 証** 一気に多くの博物館をめぐるこの研修には、やはり2泊3日が必要であった。多くの生徒の感想で目に付くのが、科学倫理についての気づきや学びがあったというものである。科学の推進には、技術の発達とともに倫理観の醸成が必要であり、そのことに科学部の生徒が気づけたこともまた、科学部の生徒の優れた点だと感じる。



(2) 東京博物館研修

**目 的** 日本を代表する2つの博物館を訪問し、研究員から講義を受けたり研究員と議論したりすることによって、自然科学への興味・関心を深化させ、研究のレベルを上げる一助とする。

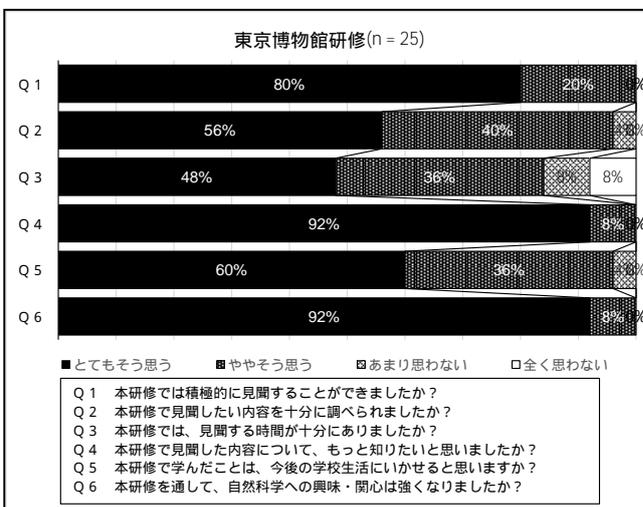
**日 時** 令和5年8月28日(月)6:20~29日(火)19:00の1泊2日  
**場 所** 国立科学博物館(8月28日(月)) / 東京都台東区上野公園(7-20)

日本科学未来館(8月29日(火)) / 東京都江東区青梅2-3-6)

**参加者** 1、2年次生徒希望者25名(科学部員以外の生徒が16名参加)

**引 率** 川勝和哉、平林友貴

**内 容** 国立科学博物館では、自然科学の理学的側面が充実した常設展の見学をし、研究員と議論した。一方、日本科学未来館では、主に工学や農学などの科学と社会との関係や、科学倫理的側面の展示を見学した。参加したすべての生徒が「時間が足りない」というほど充実した研修となり、ここでの経験をもとにして課題研究を深化させることができた。実施1週間



- 前から事前研修を行い、成果は生徒研究後期発表会等で校内の生徒に発表し共有した。
- 感想**
- ・2つの科学館や博物館での見学を通して、同じテーマについての展示であってもそれぞれ違った切り口で展示されていることがあってとても興味深かった。例えば、次世代エネルギーについての展示で、日本科学未来館では核融合発電についての展示があり、国立博物館では波力発電についての展示があって、それぞれのメリット・デメリットについて考えさせられた。2日間ともとても実になる学びが多く、有意義な研修になった。
  - ・ただ話を聞くだけでなく、自分の目で見て、体験をして、考える、という普段の授業とは違うスタイルで学ぶことができた。自分にはこのスタイルがあっていると思った。展示物が多く、たくさんのもに興味が惹かれた。そのため、全てのフロアをまわって体験することができなかったことが少し残念だ。
  - ・全体を通して集合時間の指定のみで非常に自由なプログラムになっていて、自主的に気になるトピックについて観覧できるのが良かった。「本物」に触れることで、より理解や興味が深まった。
  - ・いまひとつ生命倫理について検索しても理解出来ない部分が多かったが、現地で自分の目で見て自分の耳で聞くことで、かなり理解を深めることができた。今後の理数探究で大いにいかしていきたい。
- 検証**
- 目的の異なる2つの大きな博物館研修は、それぞれの意義を感じさせられる研修となった。時間が不足していたと答える生徒が84%に達することからも、充実した研修であったことがわかるが、一方で時間を有効に活用する工夫を考える必要がある。



## 9 専門学会誌に論文掲載

### (1) 日本農芸化学会誌「化学と生物」に研究論文が掲載された

- 論 題** 軟体動物の腎囊の生育場所による二ハイチュウの極帽形態の変化
- 著 者** 岸上 菜菜 (生物系研究部 3年)
- 掲載誌** 「化学と生物」第61巻, 第11号, 710号, 569-571.
- 内 容** 2023年度の日本農芸化学会での研究発表「蠕虫型二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」が高い評価を受け、研究論文を投稿することになった。2度の査読を経て、2023年1月に受理された。昨年度の「サボテンの刺座の配列は規則的なのか」(第61



巻, 第1号, 710号, 46-48.) に続いて2年連続、著者の岸上栞菜は、昨年のサボテン(植物)に続いて、異なる分野のニハイチュウ(動物)の論文が2年連続で掲載されたことになる。

なお、本論文は専門誌のほか、オンラインジャーナルとしても公開されている。



(2) 日本金属学会誌「まてりあ」に研究論文が掲載された

- 論 題 外部磁力の強度によって磁性流体のスパイクの形状はどのように変化するのか
- 著 者 志村実咲、菅原楓、陰山麻愉、松田理沙(物理系研究部磁性流体班)
- 掲載誌 「まてりあ」第62巻, 第12号, 809-811.
- 内 容 2023年の日本金属学会で、科学部物理系研究部磁性流体班の「外部磁力の強度によって磁性流体のスパイクの形状はどのように変化するのか」が、日本金属学会賞(全国1位)を受賞したことを契機に、学会誌「まてりあ」への論文を投稿することになった。研究論文は査読を経て、2023年7月7日に受理された。  
なお、本論文は専門誌のほかオンラインジャーナルとしても公開されている。



10 科学部顧問の活動

SSHでは、教員の研究活動や学会での発表を推奨されている。以下に、本校の科学部顧問である川勝和哉主幹教諭が、学会等での研究発表や運営での活動についてまとめる。今後は、他の教員の活動も活性化させていきたい。

(1) JST-RISTEX プログラムの科学技術の倫理的・法制度的・社会的課題(ELSI)への包括的実践研究開発プログラム「公正なゲノム情報利活用のELSI ラグを解消する法整備モデルの構築」研究事業(代表: 瀬戸山晃一京都府立医科大学大学院教授)研究協力者

- 内 容 本校のSSH事業「科学倫理教育のロールモデルの作成と全国への普及」の一環として、ロールモデル作成がひとまず終わったことから、高大連携を活用して次のステージへ向かうために準備を整えた。令和6年度には、全国の科学倫理教育に興味を持っている高等学校に、京都府立医科大学医学部大学院の瀬戸山晃一教授や愛知学院大学法学部の鈴木慎太郎教授のELSIの活動と連携して、現地での模擬授業や研修会で訪問普及を行う予定である。
- 成 果 2021年~ELSI研究協力者(特に高等学校へのアプローチを担当)  
ZOOM説明会を3回実施し、全国から9校(うちSSH指定校5校)からの希望を得た。  
2024年から順次、希望校を訪問する。

(2) 一般社団法人VR革新機構 VR研究倫理学会 法務倫理研究委員会(委員長: 横松繁 VR革新機構代表理事)委員

- 内 容 生成AIの普及に伴う課題について、倫理的側面から検討し、学会として指標作りを行う。
- 成 果 2023年4月~学会の委員を務める。

3D や VR、生成 AI の法制度面および倫理面を考慮した、バランスの取れたガイドラインの作成を行うことを目的に議論を行っている。

(3) 日本地球惑星科学連合 (JpGU) 代議員および国際教育対応小委員会委員

内 容 日本最大の自然科学系学会であり、アメリカ地球惑星科学連合 (AGU) と連携関係にある学会である。学会活動をどのようにリードしていくのかについて、議論を重ねている。その中でも、岩石・鉱物の専門研究や、高校生への教育活動、それに海外研究機関との連携について担当している。

成 果 2020 年～2022 年 固体地球科学セクション代議員  
 2024 年～2026 年 地球惑星科学総合セクション代議員  
 2022 年 9 月～ 国際教育対応小委員会委員

(4) 日本地質学会第 130 年学術大会 (京都大会) で講演および代議員、日本地質学会日本地学オリンピック支援委員会委員

主 催 日本地質学会  
 日 時 令和 5 年 9 月 17 日 (日) ポスター発表  
 場 所 京都大学 (京都市吉田南)  
 テーマ ・高大連携を活用して推進する高校生の研究活動～地域の鉱物学的研究から国際研究への展開～  
 内 容 ・本校が取り組んでいる高大連携の実績について、詳しく説明を行った。高等学校における地球科学を基調とした理科教育についてや、高大連携を活用して国際的に展開している実績に対して、活発な質疑が行われた。  
 2022 年～2026 年 日本地質学会代議員、日本地学オリンピック支援委員会委員

(5) World Congress of Earth Science and Climate Change 2023 で基調講演

主 催 Scholars Conferences  
 日 時 令和 5 年 9 月 25 日 (月)  
 11:30～12:20 ZOOM による口頭発表  
 テーマ ・全体テーマ Exploring the Novel Advances in Earth Science and Climate Change の中で、Disaster Prevention Education: Combining Scientific Understanding of Disaster with Knowledge of Disaster Mitigation Strategies と題して基調講演を行った。

内 容 ・昨年度の国際学会 The 9<sup>th</sup> International Conference on Geoscience Education (IX GeoSci Ed 2022) での発表、および国際学会誌 Journal of Modern Education Review 誌掲載の論文を契機に、主催者より直接基調講演の依頼を受けて、40 分間にわたって防災・減災教育についての基調講演を行った。この講演に対して Certificate of Appreciation が贈られた。また 4 月 8 日 (月)～9 日 (火) にパリで開催される国際学会への招待を受けた。



(6) 第35回日本生命倫理学会年次大会で講演

- 主催 日本生命倫理学会
- 日時 令和5年12月10日(日) 16:25~17:55 公募ワークショップで発表
- 場所 明治学院大学白金キャンパス(東京都港区白金台1-2-37)
- テーマ ・高等学校における科学倫理探究活動の実施と課題
- 内容 ・丸山マサ美(九州大学大学院)、鈴木美香(大阪大学)、木村利人(早稲田大学)の各氏とともに登壇し、講演の後にワークショップも行った。高等学校での科学倫理教育の取組について会場の参加者から強い関心が寄せられ、活発な議論が行われた。



11 生徒アンケートの結果

令和6年1月14日実施、3年次生11名、2年次生11、1年次生12名が回答)

問1. 研究を始める前は、研究についてどのように思っていましたか？(1年次生は入学時、2・3年次は年度当初)

期待していた	よくわからないので不安だった	興味がなかった
1年次：8名(67%)	1年次：4名(33%)	1年次：0名(0%)
2・3年次：21名(95%)	2・3年次：1名(5%)	2・3年次：0名(0%)

問2-1. 問1で「期待していた」と答えた人に聞きます。

期待通りだった	期待通りではなかった
1年次：8名(100%)	1年次：0名(0%)
2・3年次：21名(100%)	2・3年次：0名(0%)

問2-2. 問1で「不安だった」や「興味がなかった」と答えた人に聞きます。

思っていた以上に面白かった	やはり面白くなかった
1年次：4名(100%)	1年次：0名(0%)
2・3年次：1名(100%)	2・3年次：0名(0%)

問3. 大学の先生の指導や助言はどうでしたか？(1~3年次全体)

刺激を受けた、面白かった	期待通りではなかった
34名(100%)	0名(0%)

問4. 科学部の活動は自分にとって役立ったと思いますか？(複数回答可、1~3年次全体)

自然科学に対する 興味が増した	進路選択の役に立った	勉強の意欲が増した	役に立たなかった
34名(100%)	28名(82%)	17名(50%)	0名(0%)

問5 . 科学部の活動についての自由記述。

- ・本格的な研究ができたり、大学などでの発表会にも行けたりして、自分の将来に役立つ経験を積むことができた。発表を通じてプレゼンテーションの能力も向上した。身近な物事について、より深くまで探究したいという好奇心が身についた。
- ・大学と連携した活動が想像以上に充実していた。また他者と話をする機会が増えて、自分では思いつかない視点が多くあり、楽しかった。さまざまな研究を通して、新しい発見や興味深いと感じることが多くあった。つらいことやしんどいこともあったが、それ以上に仲間と協力して行う研究の楽しさや面白さを感じることができ、大学での研究も楽しみになった。
- ・入学前から科学がとても好きだったので、難しい問題があっても頑張ることができた。科学部の活動はいろいろな経験ができて、とても楽しいです。
- ・自然科学の研究は、研究し尽くしたと思っていた内容でも、発表会で議論を交わすことで毎回新しい指摘があり、議論そのものが面白かった。
- ・研究が行き詰まったり、わからないことが現れたりしたときに、よく考えて何とか答えを見つけるのが楽しかった。忙しい時期を乗り越えた時や研究が評価されたときは、大きな達成感があった。
- ・部活動の雰囲気がとてもよく、過ごしやすかった。顧問の先生との対話や講話の内容がとても興味深く、自分の進むべき道についての疑問に答えてくれた。
- ・研究したいテーマがあって入部したわけではなかったけれど、知らないことをたくさん知ることができ、普通の生活をしては行くことができない学会や研修にも参加することができて、多くの良い経験を積むことができた。

【振り返りと分析】

科学部の部員数が、SSH 指定1年目の令和2年度18名(男子14名、女子4名)、令和3年度24名(男子19名、女子5名)、令和4年度31名(男子19名、女子12名)、令和5年度34名(男子26名、女子8名)と増加しており、活発に活動できた。特に本年度には数学系研究部が立ち上がり、数学オリンピックに挑戦するなどした。来年度は女子生徒を増やしたい。

科学部で活動したいと考えて本校を受験する中学生が増えている。入部当初に活動に期待していたという生徒は、昨年度の22%から78%に大きく増加している。全国レベルの高い研究成果を上げ続けていることから、1年次生徒の一部には、入部当初不安があったようだが、日常のやわらかい雰囲気と、研究活動を始めた時の引き締まった雰囲気によって、すぐに打ち解けていった。優れた研究成果を上げるためには、まず探究活動の面白さを知ってもらうことが必要であるが、科学部はそれに成功している。2、3年次の生徒についても、期待しながら本年度の研究に入った生徒が、昨年度の22%から95%へと大きく伸びた。充実したグループ研究の良さが引き出されている。

コロナ禍を何とか抜け出し、さまざまな大学での学会発表や研修が実施できるようになった。対面での発表や実体験を伴う活動が抑制されただけに、本年度実施できたことは生徒に大きな満足感を与えた。オーストラリア海外研修を含め、国内外の研修には多くの生徒が参加を希望し、抽選で参加者を決める場面が多くあった。来年度はオーストラリア海外研修(露頭調査)の研究成果を、米国ワシントンD.Cで開催されるアメリカ地球惑星科学連合(AGU)で発表することを目標にしている。

本年度もまた「出る杭」の優れた生徒を育成することができた。特に異なる研究班がそれぞれに主体的な活動を行い、3つの研究班は全国大会に進出するなど、目覚ましい活躍を見せた。科学部員は科学部の活動が、推薦入試を含めた進路選択に大きく役立っていると感じている。

# 研究論文とポスター

全国高等学校総合文化祭自然科学部門に進出した研究論文です。

外部磁力による磁性流体のスパイク形成の条件 (その2)

兵庫県立姫路東高等学校  
陰山 麻愉 石井 漸 永井 翔

A: 研究目的

磁性流体の平面に対して上下方向に磁力を加え、臨界磁力に達すると、磁力線に沿って盛り上がりスパイクを形成する<sup>1)</sup>。本校は2022年3月から磁性流体の研究を始めた。2022年の研究では、磁性流体にさまざまな強度の磁力を加え、磁性流体の表面に形成されるスパイクの底面の形状や面積、スパイクの高さ、スパイクの数について研究を行い(図1)、次のことを明らかにした<sup>2)</sup>。① スパイクは、磁性流体表面の磁力と表面張力、重力のつり合いによって形成される(図1)。

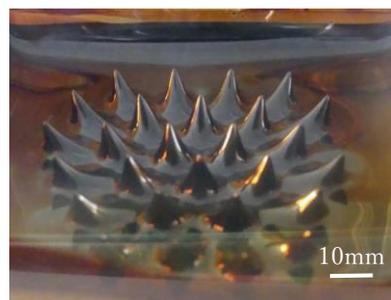


図1 磁性流体のスパイク

② 7~8mT で生じた円形のスパイクは、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。接着面を上から見ると、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2)。③ さらに磁力を強めると、10mT 付近でスパイクは不安定化して五角形や七角形に崩れていく(図2)。磁性流体にはたらく力の関係を図3、図4にまとめた。

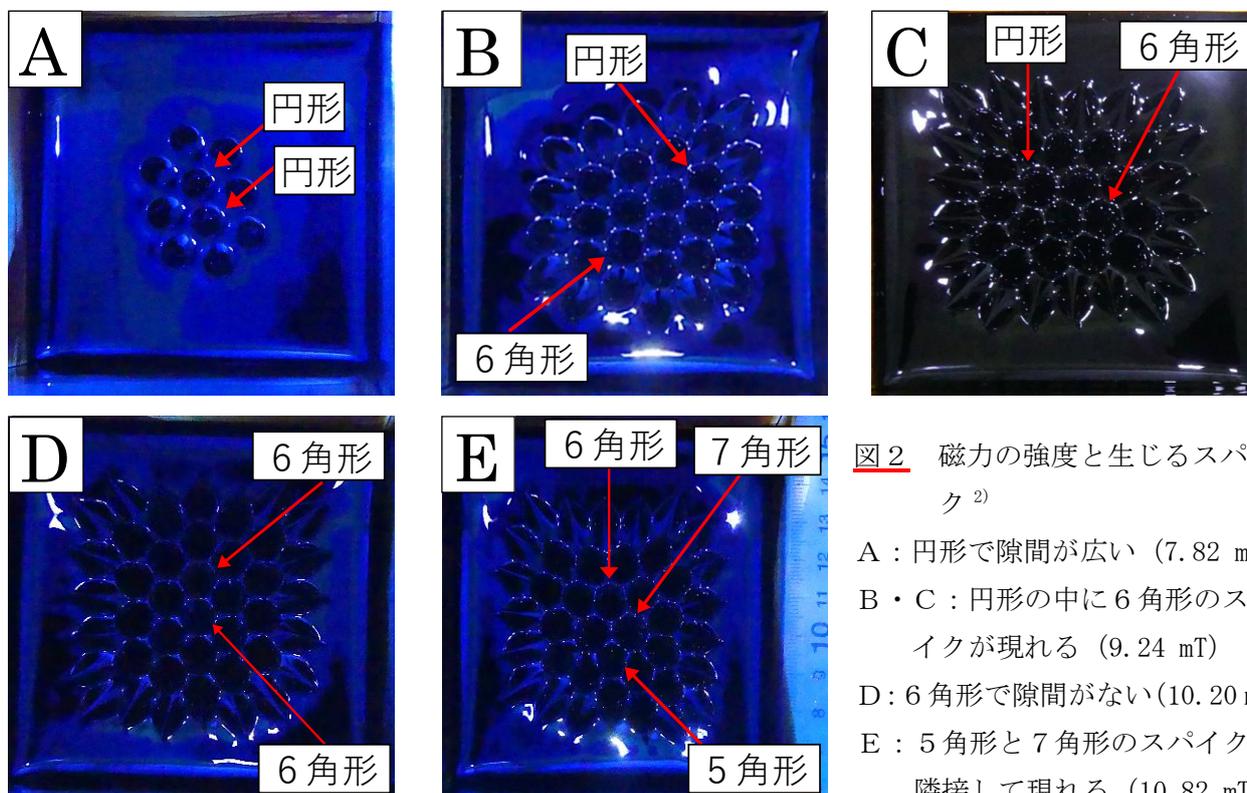


図2 磁力の強度と生じるスパイク<sup>2)</sup>

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

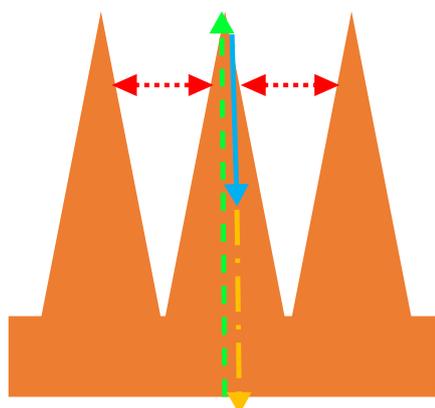


図3 スパイクのモデル図<sup>2)</sup> (力の大きさは正確ではない)  
 (赤/点線: スパイク間の斥力、緑/破線: 磁性超微粒子間の引力、青/実線: 表面張力、黄/一点鎖線: 重力)

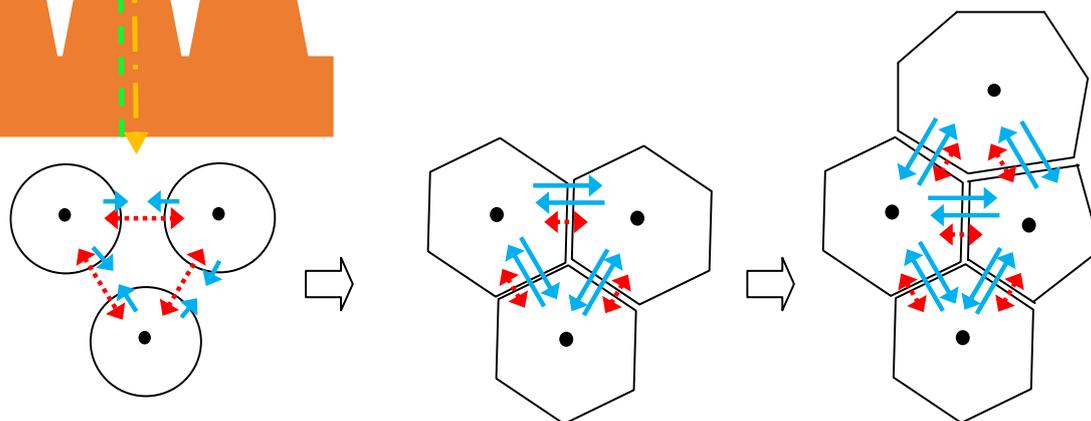


図4 磁力を強くするにつれてスパイク底面の形状が変化する<sup>2)</sup>  
 (赤/点線: スパイク間の斥力、青/実線: 表面張力、力の大きさは正確ではない)

この成果を、日本金属学会やプラズマ・核融合学会、日本物理学会等で発表し、多くの研究者と直接議論する機会を得たことから、新たな課題として、(1) 磁石を磁性流体から遠ざけたり近づけたりすることによって、磁性流体にはたらく磁力線の強度の割合に違いがあるのか、(2) 磁性流体の濃度とスパイクの高さや形状の関係はどうなっているのか、濃度による臨界磁力はいくらなのか (3) 磁力を加える磁性流体の深さ (厚さ) はスパイクの形成と関係があるのか、(4) スパイクが最初に形成される磁力はいくらか、またそこはどこか、を明らかにすることを目的に研究を行った。

## B: 研究方法

### 実験 1: 磁性流体にはたらく磁力線強度の確認実験

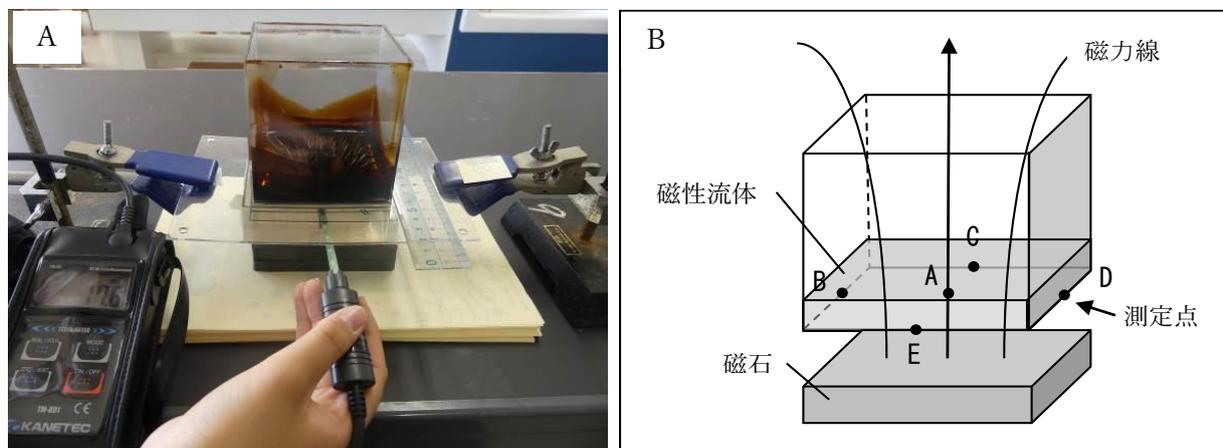


図5 磁力の測定の様子 (A) と磁力の測定点 A~E (B)

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 (20℃密度 1.40、20℃粘度 97mPa/sec、飽和磁化 9mT、濃度 48%) を用いた。強い磁力をもつコイルは高額で購入できなかったため、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。そのため、図 5における磁性流体の底面にはたらく磁力線は場所ごとに異なった。そこで、中央の磁力線は常に鉛直上方に向かうが、フェライト磁石を遠ざけたり近づけたりすることによって、他の B~E の磁力線の向きが一定かどうかを確認する必要がある。測定した A~E の磁力の平均値を外部からの磁力とするためにも、磁石との距離による測定各点の磁力の増減の割合が一定であることを確認することにした。

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 (深さ 5.0mm になった)、フェライト磁石を容器底面から遠ざけたり近づけたりして、形成されるスパイクを観察した。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。フェライト磁石を遠ざけたり近づけたりして、図 5の A~E の磁力を測定した。測定回数は各 168 回である。

### 実験 2：磁性流体の濃度とスパイク形成の有無およびスパイクの高さ

前述のシグマハイケミカル社製磁性流体 DS-50 (濃度 48%) をイソパラフィンで薄めて、濃度が 48%、27%、14%の磁性流体を作成した。それぞれを 図 5の実験装置のスチロール樹脂製容器に入れ、磁力をさまざまに変化させて、スパイクが形成されるかどうか、形成された場合にはその高さはいくらかを観察、測定した。中央および容器底面の合計 5 か所で磁力を測定し、その平均値を求めて磁力とした。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撮影した。測定回数は、48%が 36 回、27%が 43 回、14%が 49 回の合計 128 回である。

### 実験 3：磁性流体の深さ (厚さ) とスパイク形成の有無

濃度 48%の磁性流体について、内底面が 86mm×86mm のスチロール樹脂製容器に入れる磁性流体の容積を変えて、深さが、2.5mm、5.0mm、10.0mm の 3 パターンを準備し、実験 1 の要領で磁力をさまざまに変化させて、スパイクが形成されるかどうか、形成された場合その高さはいくらかを観察、測定した。実験 2 を補完するために、磁性流体の濃度も 48%、27%、14%の 3 つのパターンを準備した。測定回数は 2.5mm が 48 回、5.0mm が 36 回、10.0mm が 43 回の合計 127 回である。

## C：得られた結果

### 実験 1：磁性流体にはたらく磁力線強度の確認実験

容器底面 5 か所で測定した平均の磁力と、各測定点における磁力の関係を 図 6 に示した。いずれの測定点においても、容器底面と磁石が近くなるほど磁力は大きくなっており、磁石中央の測定点 A の磁力が最も大きい。

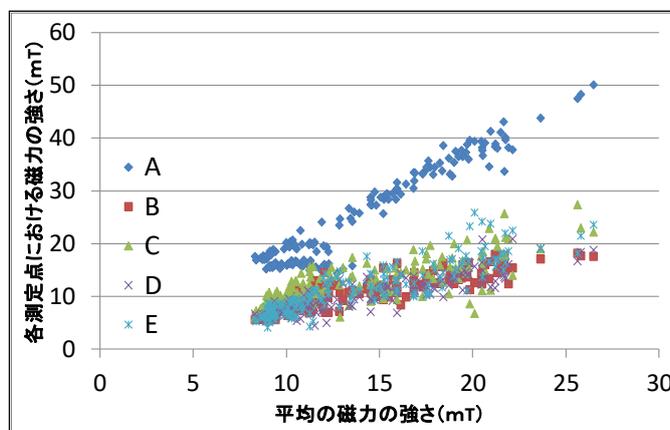


図 6 平均の磁力と各測定点の磁力 (測定 168 回)

実験2：磁性流体の濃度とスパイク形成の有無およびスパイクの高さ

磁力を強めていくと、磁力が最も強い中央部からスパイクが形成され始める（図7）。この中央のスパイク1本の形成に注目して、スパイク形成の臨界磁力を調べた。

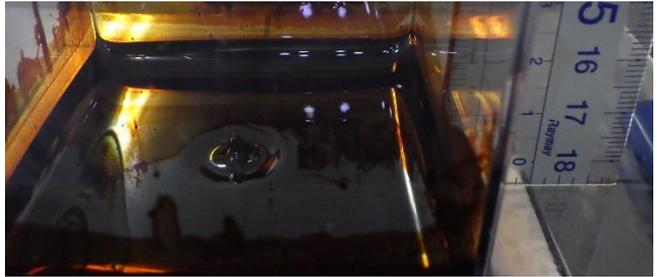


図7 最初に形成されるスパイク

磁性流体の濃度が48%で12mT、27%で15mT付近でスパイクが形成される（図8）。濃度が高いほどスパイクが形成される磁力は小さい。一度スパイクが形成されると、磁力を強くしてもスパイクの高さはほとんど変わらない。一方、濃度が14%では磁力にかかわらずスパイクが形成されない。

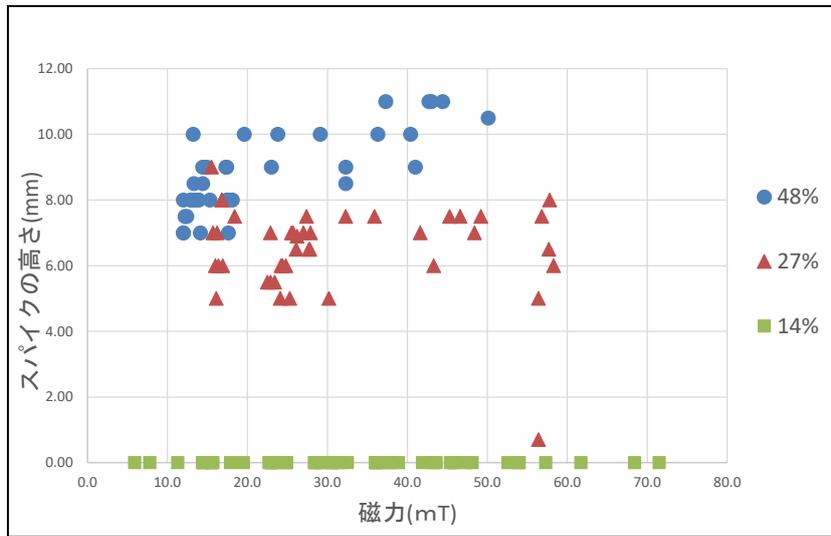
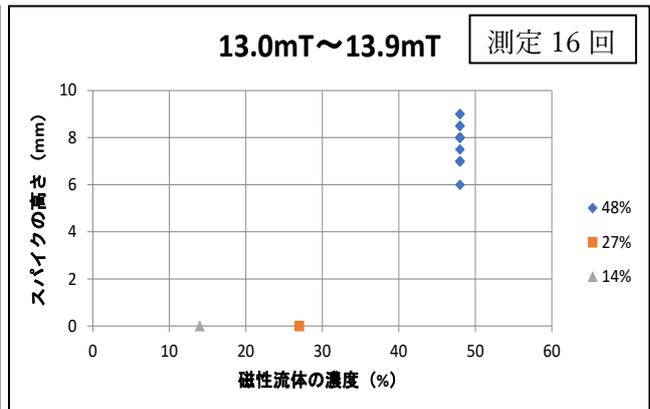
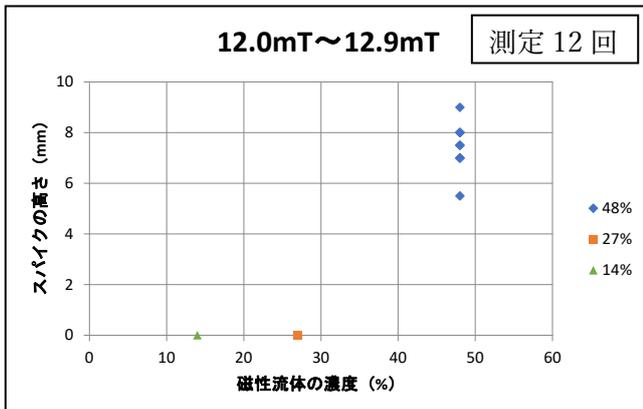
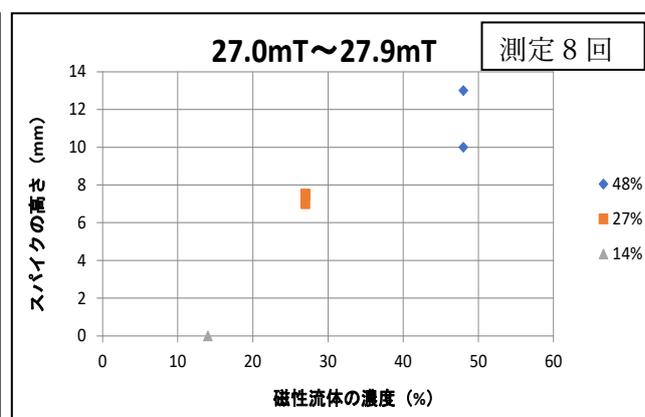
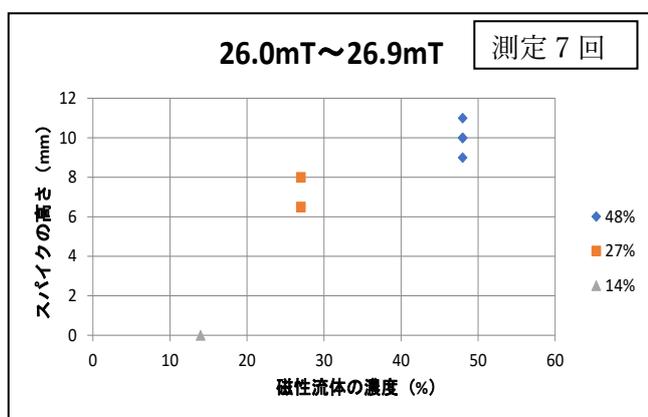
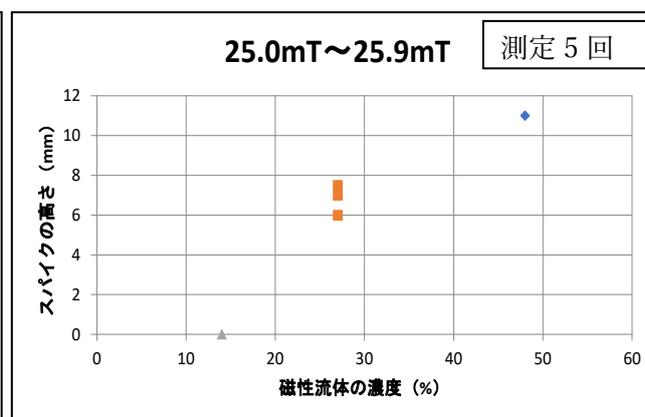
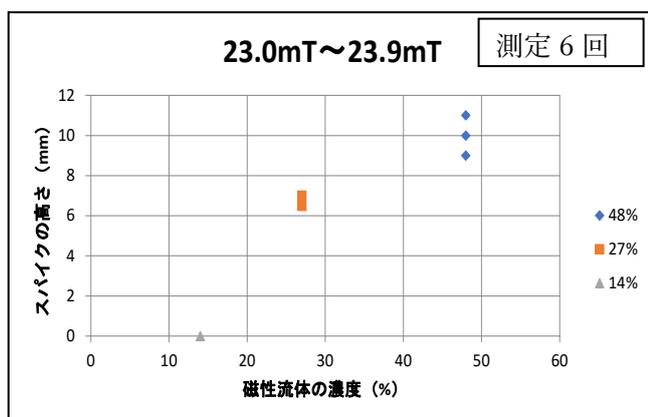
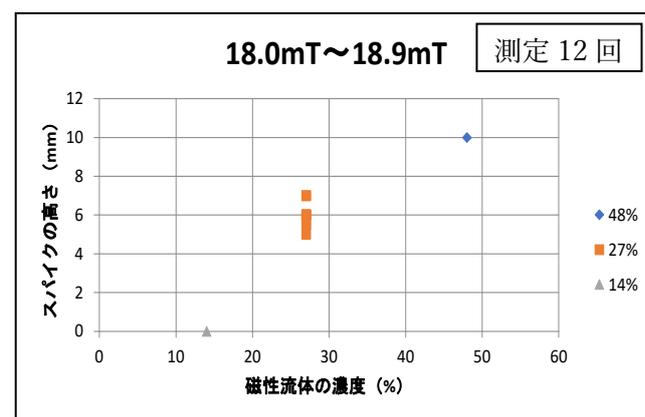
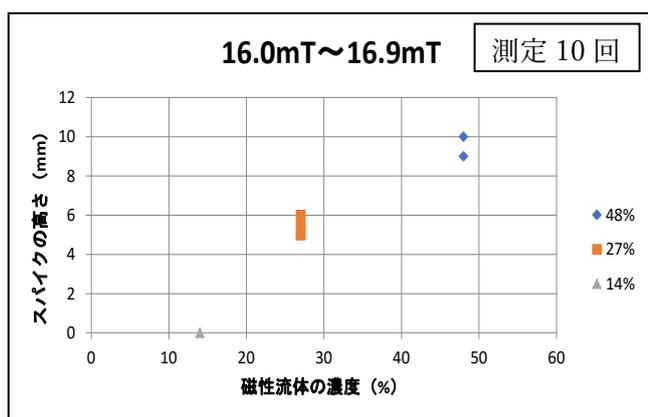
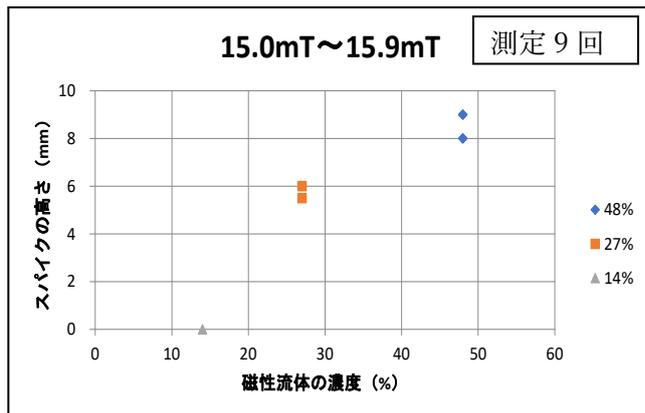
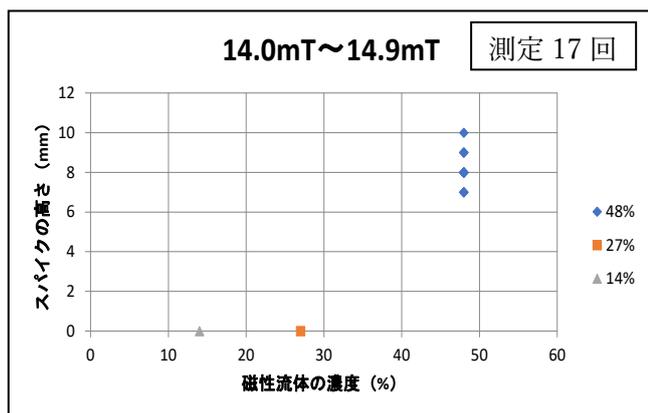


図8 磁性流体の濃度とスパイク形成の有無と高さ（測定回数 48%37回、27%43回、14%49回）

外部の磁力としてフェライト磁石を用いているので、実験では磁力を思い通りに設定することができなかった。そのため、狭い範囲の磁力ごとに、濃度とスパイク形成の有無および高さについてグラフ化した（図9）。12.0~14.9mTでは、48%の磁性流体のみでスパイクが形成される。15.0mT以上になると、27%の磁性流体でもスパイクが形成され始める。スパイクの高さは濃度が低い方が低く、磁力を強めてもほぼ一定である。濃度が14%の磁性流体は、磁力を強めてもスパイクは形成されなかった。





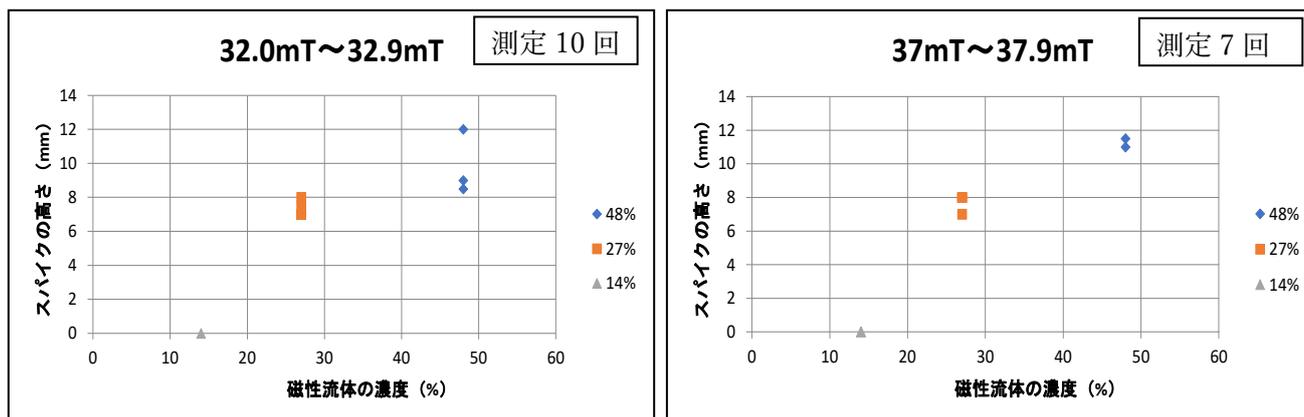
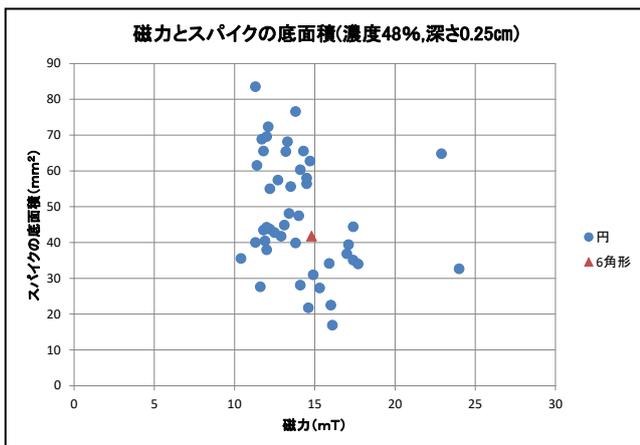
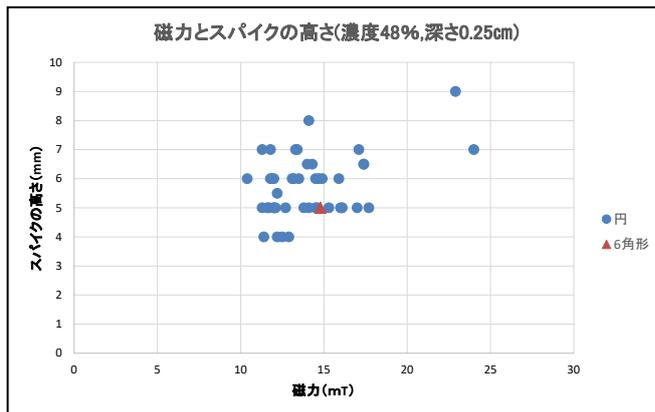
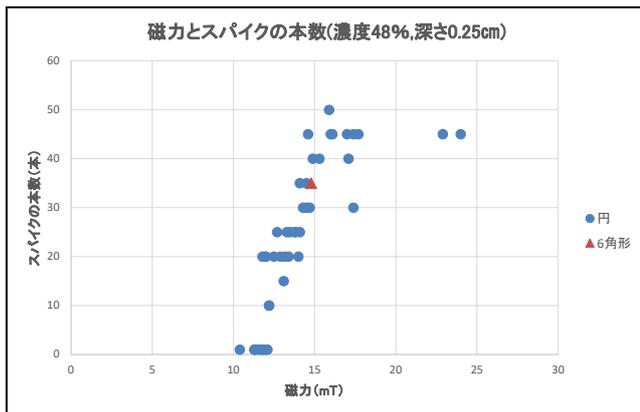


図9 一定の磁力における磁性流体の濃度とスパイク形成の有無と高さ（測定回数合計 119 回）

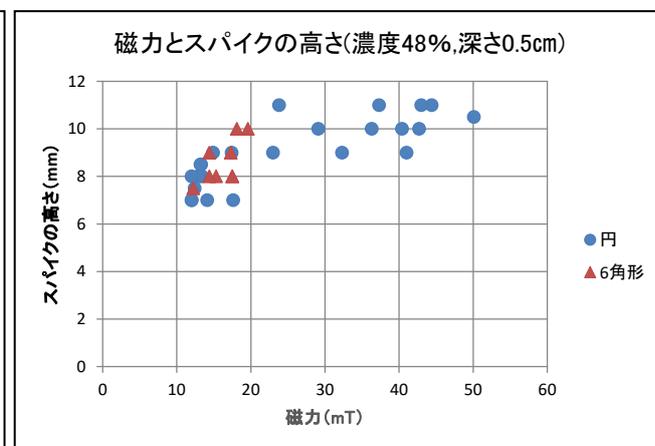
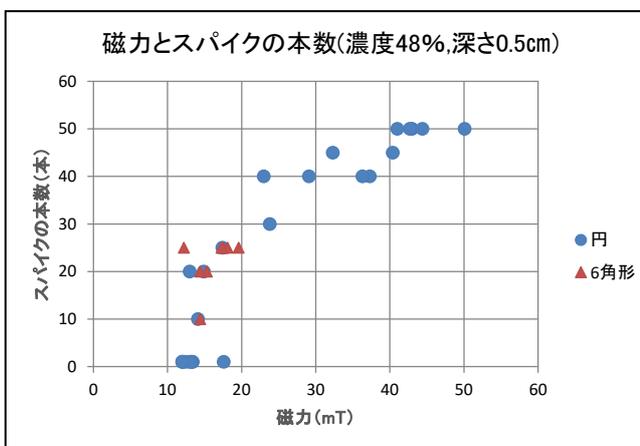
### 実験3：磁性流体の深さ（厚さ）とスパイク形成の有無

濃度 48%の磁性流体は、深い（厚い）ほど、スパイクが形成されるために強い磁力が必要であるが、一度臨界磁力をこえてスパイクが形成されると、容易に底面が 6 角形や 4 角形のスパイクに変化する。深さが 10.0mm あれば、20mT ですでに 4 角形のスパイクが形成されている。また、深さが 2.5mm のときには磁力が 10mT~20mT の間でもスパイクの本数が変化するが、5.0mm では 10mT~50mT で、10.0mm では 15mT~65mT でスパイクの本数が変化している。スパイクの本数は、深さが小さい（浅い）方が磁力の影響を受けやすい。スパイクが現れると、深いほど初めからスパイクは高く底面積が大きい傾向がある。2.5mm のグラフでは、磁力が同程度でも底面積の大きさのばらつきが大きい。

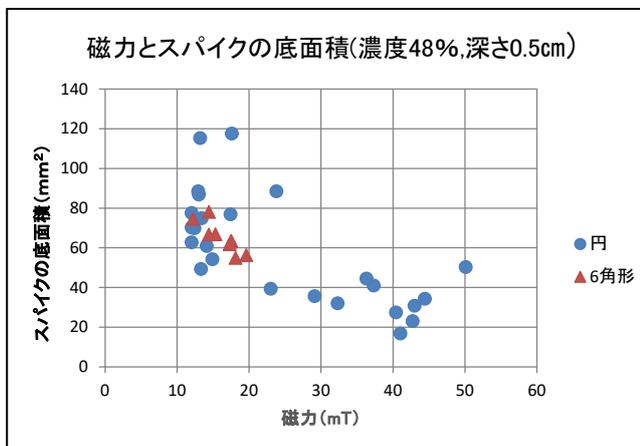
一方、深さ 5.0mm で濃度を変えた場合、濃度が低いとスパイクが現れる磁力は強い。48%と 27%を比べると、27%のほうが 4 角形のスパイクが形成されるために強い磁力が必要である。また、スパイクは濃度が低いと高さも低い、底面積に有意差は認められない。濃度 48%で深さが 2.5mm および 10.0mm では、スパイクの高さがほぼ一定だが、濃度 48%深さ 5.0mm では、20mT 付近まで磁力を強くするにつれてスパイクは高くなり、それよりも磁力を強くしてもスパイクの高さが 11.0mm よりも高くなることはない（図 10）。



測定 48 回



測定 36 回



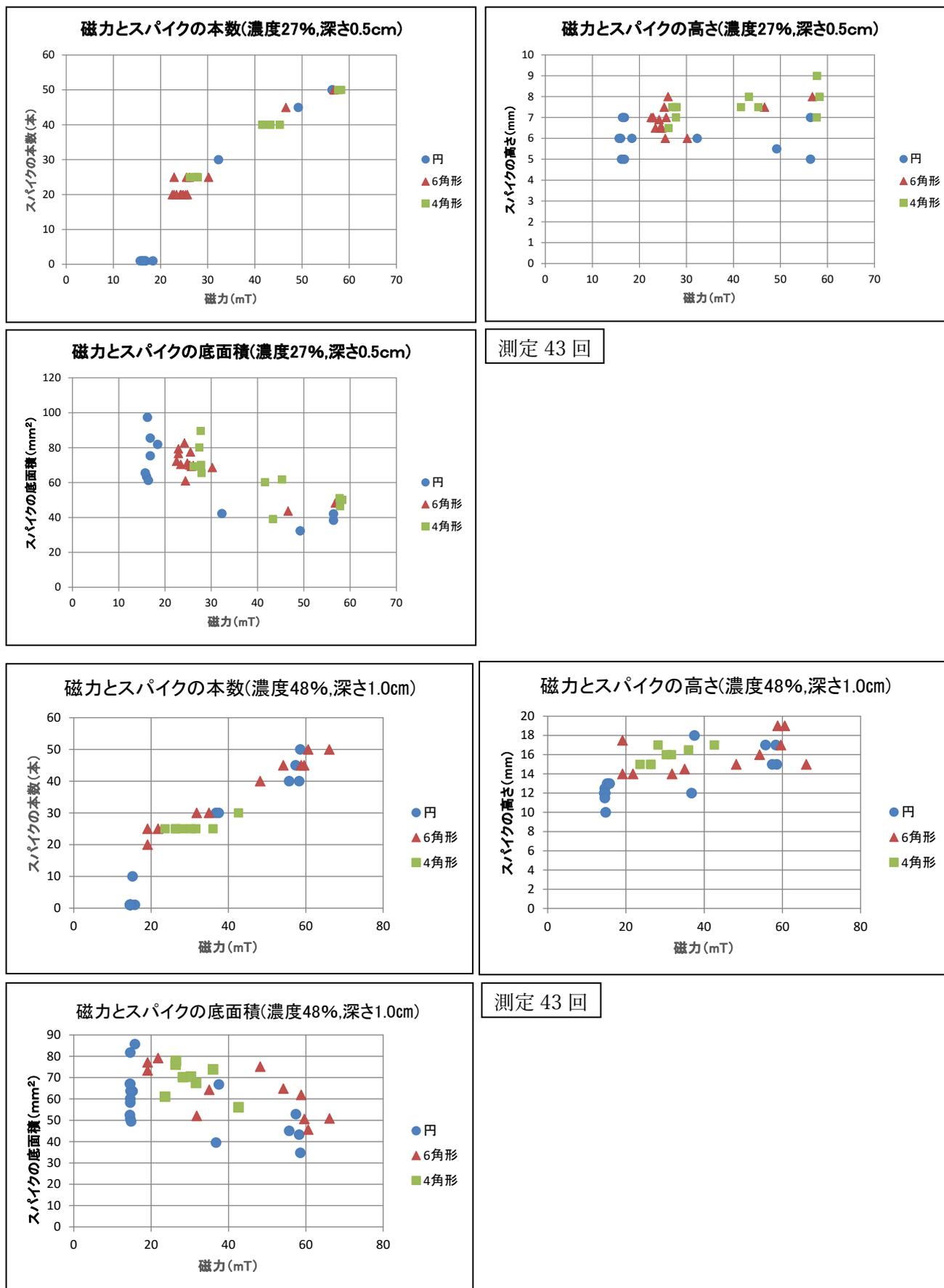


図 10 磁性流体の濃度と深さ（厚さ）を変えた磁力とスパイク形成の関係（測定回数合計 170 回）

D：考察

実験1：磁性流体にはたらく磁力線強度の確認実験

角型フェライト磁石を使ったためばらつきが大きいですが、平均の磁力と各測定点の磁力の割合はほぼ一定であり、磁石を離しても近づけても磁力線の向きはほぼ一定に保たれていると考えられる。

実験2：磁性流体の濃度とスパイク形成の有無およびスパイクの高さ

実験3：磁性流体の深さ（厚さ）とスパイク形成の有無

濃度48%の時の磁性流体の深さと臨界磁力の関係は、図11のようであり、磁性流体が深い（厚い）ほど、スパイクが立ち上がるまでは強い磁力が必要である。臨界磁力をこえるとスパイクが形成され、その後は図10に示すように容易にスパイクの形が変化していく。

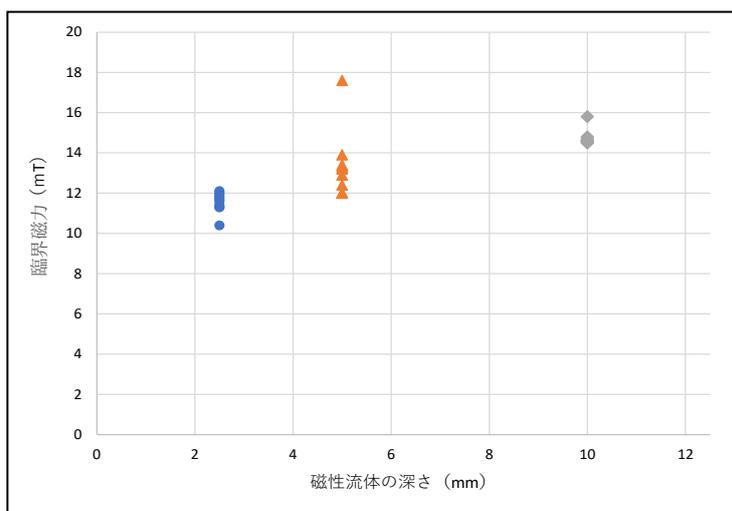


図11 磁性流体の深さ（厚さ）と臨界磁力の関係（濃度48%のとき／測定回数30回）

また、磁性流体の濃度が高いほど、スパイクが形成される磁力は小さくてすみ、高いスパイクを形成することから、スパイクの形成には深さ（厚さ）よりも磁性流体の濃度が重要な条件であることがわかる。磁性流体の濃度が低い（超微細粒子の密度が低い）と、磁力によって超微細粒子どうしが引き合う力が、表面張力と重力の合力よりも大きくなることができない。磁性流体の濃度が14%では磁力にかかわらずスパイクが形成されないことから、臨界濃度は27%～14%の領域にあると考えられる（図12）。また、27%の磁性流体の臨界磁力は15.0mTであり、濃度が高いほど臨界磁力は小さい。

MR流体の3Dシミュレーション実験で、粒子が隙間がなく積み上がって盛り上がることを示されている<sup>3)</sup>。スパイクは、超微細粒子の表面張力と重力の合力とつりあった高さまでしか高くなることはできない。磁性流体はMR流体と特性が異なるが、超微細粒子が隙間なく積み重なってスパイクを形成していると仮定すると、磁力が強いほど高いスパイクを形成することから、スパイクの高さは超微細粒子が集めた数を反映していると考えられることもできる。スパイクの高さによらず、スパイク内部では超微細粒子が一様に分布している可能性がある。

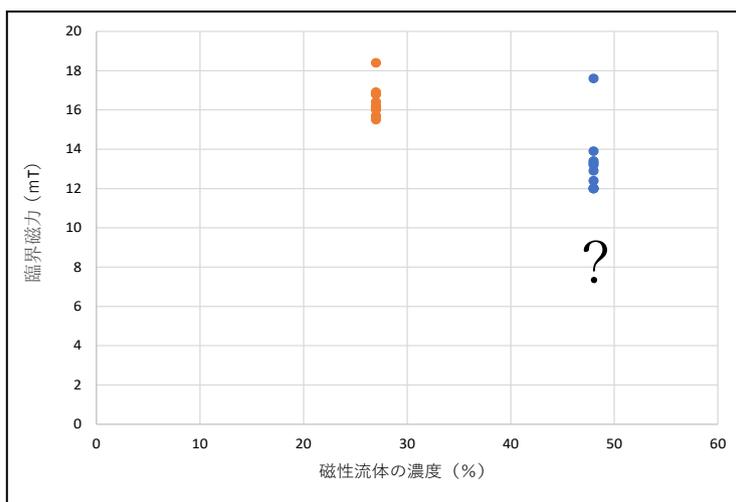


図 12 磁性流体の濃度と臨界磁力の関係（深さ 5.0mm のとき／測定回数 20 回）

E：結論

- (1) 磁性流体にはたらく磁力線の強度の割合に違いはなく、磁力線の向きはほぼ一定に保たれている。
- (2) スパイク形成の臨界濃度は 27%～14%の領域にある。
- (3) 磁性流体が深い（厚い）ほど、スパイクが形成されるまでは強い磁力が必要だが、臨界磁力をこえて一度スパイクが形成されると、スパイク底面の形が 6 角形や 4 角形へと容易に変化する。
- (4) 磁性流体の中央部に、最初にスパイクが形成される。27%の磁性流体の臨界磁力は 15.0mT である。

現在、磁性流体中の超微細粒子がスパイクの中でどのように分布しているのかについて、先行研究<sup>4)</sup>を参考に、本実験をもとにしたシミュレーションを行っている。また、磁性流体を入れる容器の形状や大きさは、スパイクの高さに影響を及ぼさないことが、先行研究によって示されている<sup>5)</sup>。しかし、本実験では、磁性流体の容器内の深さ（厚さ）がスパイクの形成に大きな影響を与えているので、容器の形状や大きさとスパイク形成の関係についても明らかにしようと考えている。

F：謝辞

日本金属学会やプラズマ・核融合学会、日本物理学会等での発表に対して、時間を取って助言や議論をして下さった多くの研究者に謝意を表します。

G：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) 志村実咲・菅原楓・陰山麻愉・松田理沙 (2023) 外部磁力の強度によって磁性流体のスパイクの形状はどのように変化するのか (日本金属学会誌まてりあ, 印刷中)
- 3) Han, K., Feng, Y. T, and Owen, D. R. J (2010) Three-dimensional modelling and simulation of magnetorheological fluids, (J. Numer. Meth. Engng, 84, 1273-1302.)
- 4) 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.)
- 5) 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.)

## 外部磁力による磁性流体のスパイク出現条件

兵庫県立姫路東高等学校 科学部物理系研究部  
 陰山麻愉 飯田凌央 石井漸 永井翔 中村賢矢 富士佳蓮

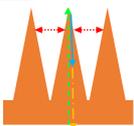
### キーワード

- 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。
- 臨界磁場・・・磁性流体がスパイクを形成し始める磁場強度。
- 超微細粒子・・・磁性流体に含まれる直径10nm程度の超常磁性体の粒子。

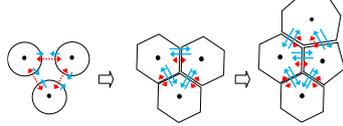
### 動機と目的

#### ●昨年度の研究で明らかになったこと

- ① 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る(図1)。
- ② 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じ、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2)。
- ③ 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2)。



(図1 スパイクのモデル図)



(図2 外部磁場を強くするにつれてスパイク底面の形状が変化する)

赤(点線):スパイク間の斥力、緑(破線)磁性超微細粒子間の引力  
 青(実線)表面張力、黄:(一点鎖線)重力

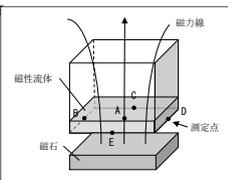
#### ●本研究の新たな課題

- (1) フェライト磁石と磁性流体の距離を変えたときの、磁性流体にはたらく磁力線の強度の割合の差は?
- (2) 磁性流体の濃度とスパイクの高さや形状の関係、その時の臨界磁場は?
- (3) 外部磁力を加える磁性流体の深さ(厚さ)とスパイクの形成の関係は?
- (4) スパイクが最初に形成される磁力、位置は?

### 実験方法

#### 実験1: 磁性流体にはたらく外部磁力の磁力線強度の確認実験

- ① 磁性流体37mlを容器に入れ(深さ5.0mm)、1~3枚重ねた角形フェライト磁石を容器底面に近づけたり離したりしてスパイクを観察した(図3)。
- ② ガウスメーターでA~E地点の磁力を測定した。



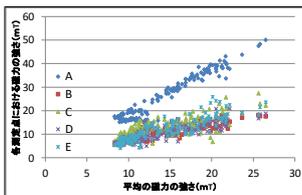
(図3 外部磁力の測定点A~E)

#### 実験2: 磁性流体の濃度とスパイク出現の有無、およびスパイクの高さ

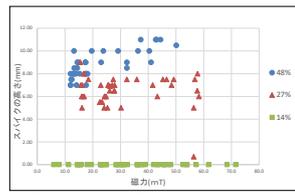
- ① 濃度48%の磁性流体をイソパラフィンで薄めて、48%、27%、14%の磁性流体を作成した。
- ② それぞれを図3の実験装置の容器に入れ、外部磁場をさまざまに変化させてスパイクが出現するか、その高さはどうかを観察した(図3)。外部磁場の強さは、中央および容器底面の5か所で測定し(図3)、その平均値とした。

#### 実験3: 磁性流体の深さ(厚さ)とスパイク出現の有無

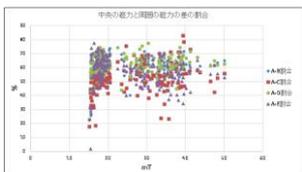
- ① 濃度48%の磁性流体を用いて、容器に入れる深さが、2.5mm、5.0mm、10mmのものを準備した。
- ② 磁力を様々に変化させて、スパイクの出現の有無と、高さを記録した。



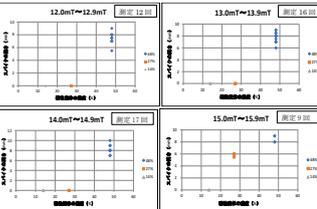
(図4 平均の磁力の強さと各測定点における磁力の強さの関係(測定168回))



(図6 磁性流体の濃度とスパイクの出現の有無と高さ(測定回数48%637回、27%43回、14%49回))



(図5 中央A点の磁力と周囲B~Eの4点の磁力の差の割合(測定168回))



(図7 一定の外部磁力における濃度とスパイクの有無(測定回数合計119回のうちの一部を示す))

### 今後の課題

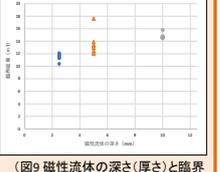
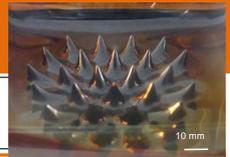
磁性流体中の超微細粒子がスパイクの中でどのように分布しているのかについて、シミュレーションを行うこと。外部磁場によるスパイクを形成する臨界濃度を詳細に調べること。容器の形状や大きさとの関係について明らかにすること。

### 謝辞

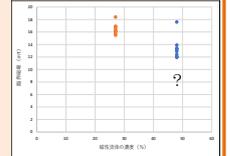
本校科学部顧問の川勝和哉主幹教諭には、考察において有意義な議論をしていただいた。ここに記して謝意を表す。

### 考察

- (1) 磁力線はほぼ一定の向きで、中央と周囲の磁力線の強度はほぼ一定である。
- (2)(3)
  - ◆濃度48%の磁性流体は深いほど、スパイクが立ち上がるまでは強い外部磁力が必要だが、臨界磁場をこえるとスパイクが出現し、底面の形が六角形や四角形へと容易に変化する(図9、10)。
  - ◆磁性流体の濃度が高いほど、高いスパイクを形成することから、深さよりも濃度がスパイク発生に必要な条件である。
  - ◆超微細粒子の密度が低いと、互いに引き合う力が、表面張力と重力の合力よりも大きくなることできない。濃度が14%ではスパイクが立ち上がらないことから、臨界濃度は27%~14%の領域にある(図11)。また、濃度が高いほど臨界磁場は小さい。
- (4) 磁性流体の中央部に、最初にスパイクが形成される。27%の磁性流体の臨界磁力は15.0mTである。MR流体3Dシミュレーション実験では、粒子が隙間なく積み上がったて盛り上がる。スパイクは、超微細粒子の表面張力と重力の合力とつりあった高さで一定になる。磁性流体はMR流体と特性が異なるが、超微細粒子が隙間なく積み重なってスパイクを形成していると外部磁力が強いほどスパイクが高くなることから、スパイクの高さは超微細粒子が集合した数を反映していると考えられる。スパイクの高さによらず、スパイク内部では超微細粒子が一様に分布している可能性がある。



(図9 磁性流体の深さ(厚さ)と臨界磁場の関係(濃度48%のとき/測定回数30回))



(図10 磁性流体の濃度と臨界磁場の関係(深さ5.0mmのとき/測定回数20回))

### 結果

#### 実験1: 磁性流体にはたらく外部磁力の磁力線強度

- 容器底面と磁石が近くなるほど外部磁場強度は大きくなっていく。磁石中央Aの外部磁場強度が最も大きい(図4)。
- 外部磁力強度を変えても周囲4点の磁力差の割合はほぼ40~70%の幅の中にある(図5)。



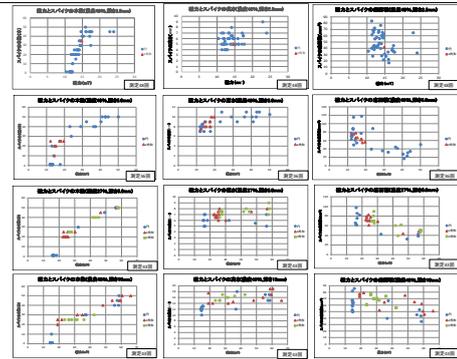
(図5 最初に立つスパイク)

#### 実験2: 磁性流体の濃度とスパイク出現の有無、スパイクの高さ

- 磁力が最も強い中央部分からスパイクが出現する(図5)。
- 磁性流体の濃度が48%で12mT、27%で15mT付近でスパイクが出現する(図6)。
- 濃度が高いほど小さい外部磁力でスパイクが立ち上がる。一度スパイクが立ち上がると、スパイクの高さはほぼ変わらない。14%では外部磁場の強さにかかわらずスパイクは立ち上がらない。(図7)

#### 実験3: 磁性流体の深さ(厚さ)とスパイク出現の有無(図8)

- 濃度48%の磁性流体は、深いほどスパイクが現れるために強い磁力が必要だが、いったんスパイクが立ち上がると、容易に次々と現れる。
- スパイクの本数は、浅い方が磁力の影響を受けやすい。また、深いほど初めからスパイクは高く底面積が大きい傾向がある。
- 深さ5.0mmで濃度を変えた場合、濃度が低いとスパイクが現れる磁力は高い。
- スパイクは濃度が低いと高さも低い底面積に有意差は認められない。
- 濃度48%のとき深さが2.5mmおよび10mmでは、スパイクの高さがほぼ一定だが、深さ5.0mmでは、20mT付近まで磁力を強くしていくにつれてスパイクは高くなるが、スパイクの高さが11mmよりも高くなることはない。



(図8 磁性流体の濃度と深さを変えた磁力とスパイク出現の関係(測定回数合計170回))

### 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. 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.)
3. Han, K., Feng, Y.T. and Owen, D.R.J. (2010) Three-dimensional modelling and simulation of magnetorheological fluids, (J.Numer.Meth.Engng.84:1273-1302)
4. 石川 一・Yonghao Yue・岩崎慶・土橋典典・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.)
5. 志村美咲・菅原楓・陰山麻愉・松田理沙(2023) 外部磁力の強度によって磁性流体のスパイクの形状はどのように変化するのか(日本金属学会誌まてりあ, 印刷中)

# スポットライト

～第9回「高校生・高専学生ポスター発表」  
～日本金属学会会長賞～

## 外部磁場の強度によって磁性流体のスパイクの形状はどのように変化するか

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 陰山麻愉 松田理沙

### 1. 動機と目的

磁性流体とは、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、直径が10 nm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す。磁性流体には、スパイクという特徴的な形状をなすことが知られています。一例として図1にスパイクが立ち上がっている磁性流体の様子を示します。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す。

外部磁場を変化させることで、六角形や四角形のスパイクが生じることが知られています<sup>(1)-(3)</sup>が、外部磁場強度とスパイクの形状およびスパイク間距離の関係についてはまだ説明されておらず、筆者らはスパイクの形状がどのように変化していくのかを明らかにすることを目的にしました。



図1 磁性流体のスパイク。(オンラインカラー)

### 2. 実験方法

磁性流体は、酸化鉄(マグネタイト)、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を用いました(20°C密度1.40 g/cm<sup>3</sup>, 20°C粘度97 mPa/s, 飽和磁化9 mT)。また、外部磁場として、縦100 mm×横100 mm×厚さ10 mmのケニス社製角形フェライト磁石(磁束密度140 mT)SQ 100を1~3枚重ねて用いました。磁性流体37 mlを内底面が86 mm×86 mmのスチロール樹脂製容器に入れると、5 mmの深さに溜まりました。フェライト磁石と容器底面の距離を変化させ、生じるスパイク

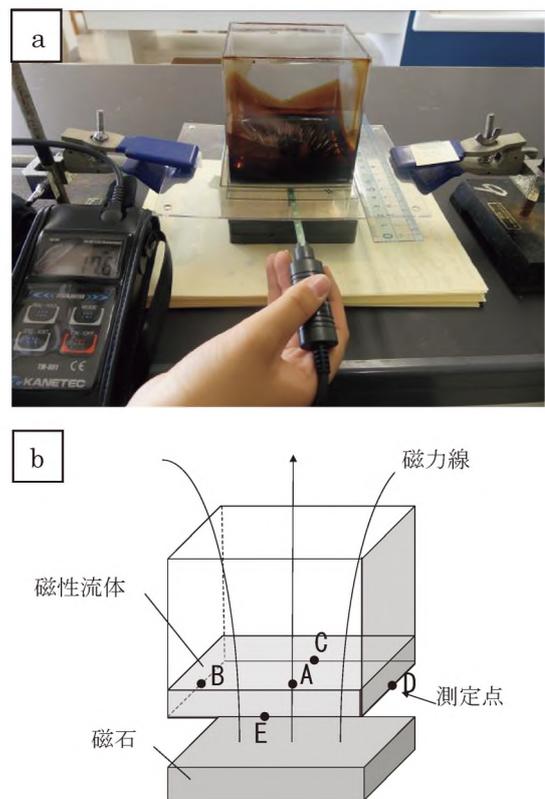


図2 (a)測定装置の外観図。(b)測定装置の模式図、A-Eは磁力の測定点。(オンラインカラー)

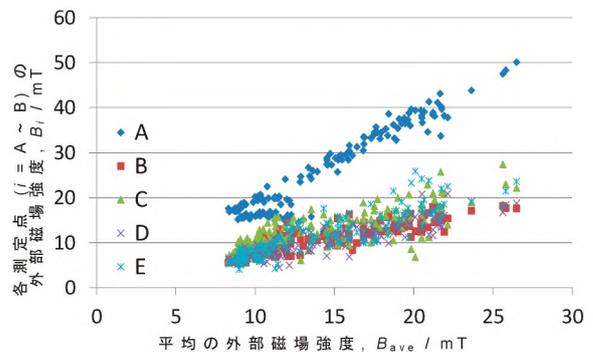


図3 容器底面5か所で測定された平均の外部磁場強度と各測定点における外部磁場強度の関係(測定168回)。(オンラインカラー)

を観察しました。図2に測定装置の外観図と磁束密度(外部磁場強度)の測定点を示します。外部磁場強度の測定は、カネテック社製ガウスメーター TM-801(分解能0.1 mT, 精度 $\pm 5\%$ )を用いました。容器底面5か所で測定し、その平均値を外部磁場強度としました。容器底面と磁石の距離をさまざまに変化させた時の、容器底面5か所で測定された平均の磁力の強さと各測定点における磁力の強さの関係を図3に示しました。いずれの測定点においても容器底面と磁石が近くなるほど外部磁場強度は大きくなっていきました。また、磁石の中央の測定点Aの外部磁場強度が最も大きかったです。

### 3. 結果

フェライト磁石と容器底面の距離が近くなるほど外部磁場強度も大きくなっていきますが、詳細な関係は不明です。

外部磁場強度を変化させると、スパイクの形状や高さ、数が変化しました(図4:スパイクの外観図, 図5:外部磁場強度とスパイクの数, 図6:外部磁場強度とスパイク1本あたりの底面積, 図7:外部磁場強度とスパイクの高さ)。また、磁性流体全体に現れるスパイクの形状の分布を観察し

たため、測定点全体の磁束密度の平均値を平均の外部磁場強度として、その大きさとスパイクの形状の関係を示しました。

磁性流体に外部磁場を加えると、7~8 mT付近で、底面が円形のスパイクが出現しました。円形のスパイクの間には多くの隙間が見られました(図4(a))。外部磁場を強めていくと、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り(図4(b)~(d))。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

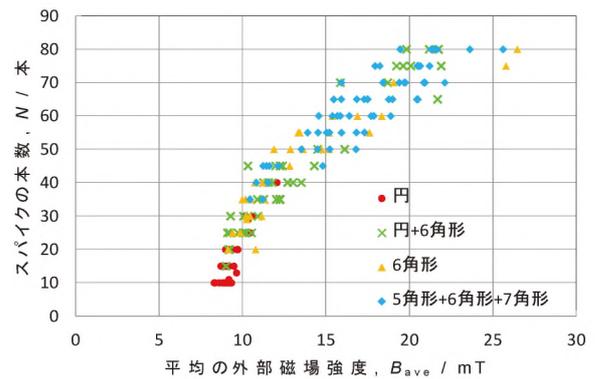


図5 平均の外部磁場強度とスパイクの本数(測定154回)。(オンラインカラー)

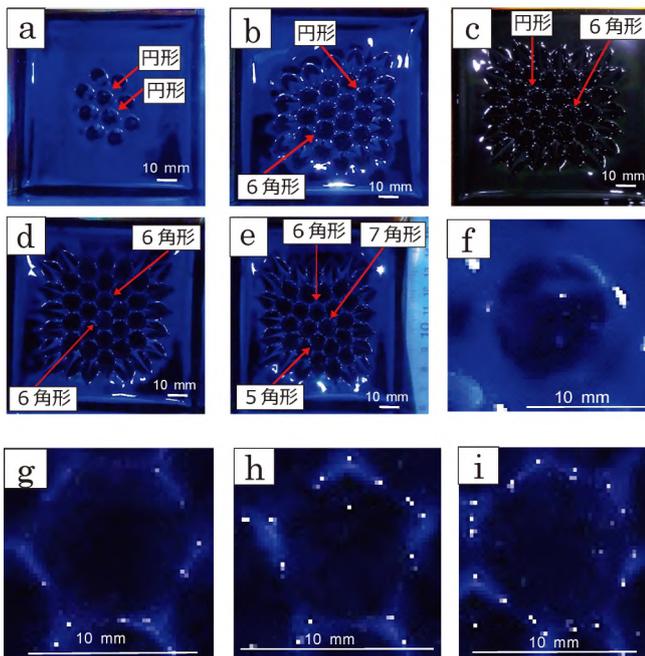


図4 平均の外部磁場強度と生じるスパイク形状。(オンラインカラー)  
 (a) 円形で隙間が広い(7.8 mT)  
 (b), (c) 円形の中に六角形のスパイクが現れる(9.2 mT)  
 (d) 六角形で隙間がない(10.2 mT)  
 (e) 五角形と七角形のスパイクが隣接して現れる(10.8 mT)  
 (f) (a)で観察された円形のスパイクの拡大図  
 (g) (d)で観察された六角形のスパイクの拡大図  
 (h) (e)で観察された五角形のスパイクの拡大図  
 (i) (e)で観察された七角形のスパイクの拡大図

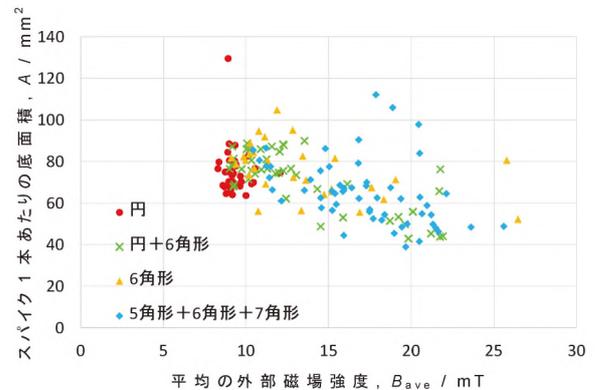


図6 平均の外部磁場強度とスパイク1本あたりの底面積(平均値)(測定154回)。(オンラインカラー)

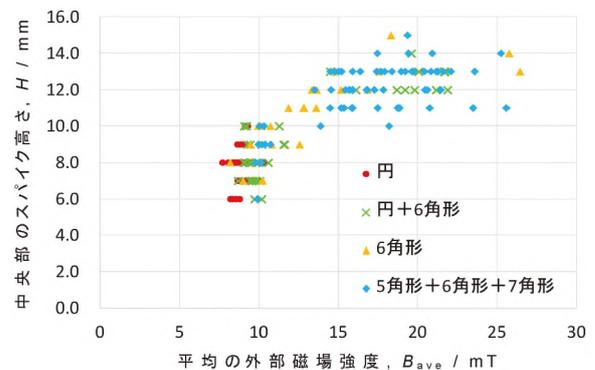


図7 平均の外部磁場強度と中央部のスパイクの高さ(測定168回)。(オンラインカラー)

しました。さらに外部磁場を強めると、10 mT 付近から、6 角形のスパイクの中に 5 角形と 7 角形のスパイクが出現しました。外部磁場を強めると、スパイクの本数は増えていきましたが、6 角形のスパイクが安定を失って、底面積が小さい 5 角形や底面積が大きい 7 角形(図 4(e))のスパイクに変化するものが現れるようになりました。また、外部磁場を強くしても、12~14 mm よりもスパイクが高くなることはほとんどありませんでした。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がわかっています<sup>(3)</sup>。

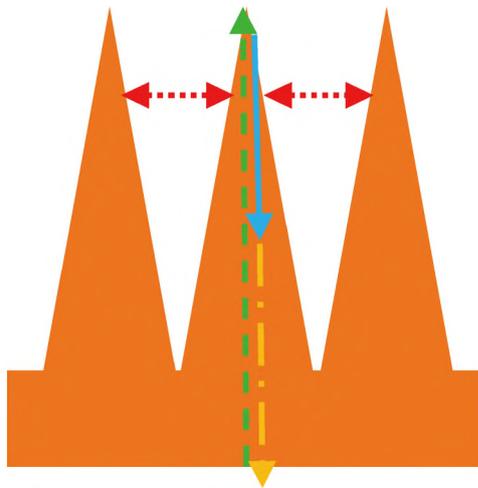


図 8 スパイクのモデル図。(オンラインカラー)  
赤(点線)：スパイク間の斥力  
緑：(破線)磁性超微粒子間の引力  
青：(実線)表面張力  
黄：(一点鎖線)重力

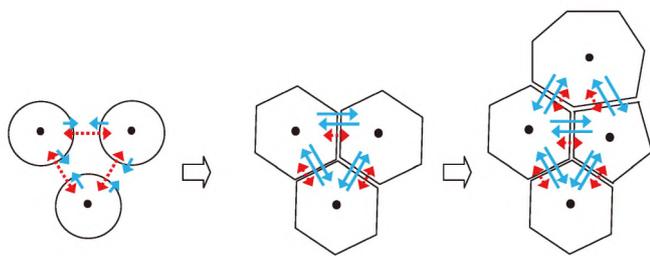


図 9 外部磁場を強くするとスパイク底面の形状が変化する。(赤(点線)：斥力, 青(実線)：表面張力)(オンラインカラー)

#### 4. 考 察

磁性流体に外部磁場を加え、臨界磁場に達すると、磁場の方向に沿ってスパイクを形成します。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りませんが、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ります。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ます(図 8)にスパイクのモデル図を示します。

スパイクが円形から 6 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します。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、6 角形をなすと考えられます。図 9 に外部磁力を強くしていく際のスパイクの形状変化のモデル図を示しています。さらに外部磁場を強めると、10 mT 付近でスパイクは不安定化して 5 角形や 7 角形に崩れていきます。

#### 5. 結言と今後の課題

本研究では磁力を強くしていくことでスパイクの本数は増えますが、底面積はほとんど変化しないために隣接するスパイクが接着するようになり、スパイクの形状が変化していくということを明らかにしました。

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と考えられます。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形状が変化するのか、スパイク内の磁性超微粒子の密度分布はどうなっているのか、について研究を続けています。

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有意義な議論をしていただきました。ここに記して謝意を表します。

#### 文 献

- (1) A. Galitis : J. Fluid Mech., **82**(1977), 401-413.
- (2) 伊丹俊夫, 松本英明, 正木匡彦, 荒磯恒久: 日本マイクログラフィティ応用学会誌, **11**(1994), 101-106.
- (3) 福田芳行, 堂原教義: 日本機械学会論文集, **66**(2000), 139-146.

(2023年 7 月 7 日 受理)[doi:10.2320/materia.62.000]  
(連絡先: 〒670-0012 兵庫県姫路市本町68番地70)

JSEC2023 で予備審査、1次審査を通過して中央最終審査会に進出した研究です。

## 刺座配列を示すサボテン種に共通な螺旋方程式と種固有の変数（その2）

兵庫県立姫路東高等学校

村瀬 太郎 大和 司

### A：研究目的

2021年から、サボテンの葉や茎が変形した刺座がどのように配列しているのかについて継続的に研究を行っている。2022年に筆者らは、ブリンチュウの刺座は、頂端部から左右に螺旋方程式で客観的に示すことができる螺旋を描いて配列していることを明らかにした。その方程式は、水平距離  $r = 0.0107e^{-0.127n} \theta$ 、垂直距離  $z = -0.1757n$  ( $\theta$ ：隣接する2つの刺座間のなす水平面上の角度の累積、 $n$ ：原点の刺座を0としたとき何番目の刺座か、 $e$ ：ネイピア数 2.71828) というものであった。しかし、これがブリンチュウに固有の方程式なのかどうかは、他種のサボテンの数式の算出を待たなければならなかった。

その研究の中で、さまざまな課題が明らかとなり、2023年は、① 刺座の配列を示す数式を汎用性の高いものにするために計算方法を修正すること、② 複数の種のサボテンで刺座の配列座標を測定し、種に固有な数式で表わすことができるのかを検討すること、③ 数式で表現できる場合、その数式と系統樹上の種間距離との関係の有無を明らかにすること、を目的に研究を行った。特に②について、サボテン種に共通な特徴と、種ごとの違いを見出すことができないかについて着目した。

### B：研究方法

#### (1) 刺座配列の測定方法

岸上ほか<sup>1)</sup>は、8個体のブリンチュウの刺座配列を座標で測定し、螺旋方程式で示した。しかしこの螺旋方程式には以下のような欠点があったことから、今回の研究では昨年度の研究で示した螺旋方程式をさらに汎用性の高いものにするために、計算方法を修正することにした。

- ① 変数が  $\theta$ （隣接する2つの刺座のなす角度の累積）と  $n$ （原点の刺座から何番目の刺座か）の2つあり複雑であるため、変数を  $n$  のみにする。
- ② これまでの基準では、上から見た場合の頂点から1番目の共有刺座（原点から最初に左右の螺旋が交わる刺座のことをいう）までの距離を1とし、横から見た場合には頂点から第1共有刺座までの高さを1としていた。しかしこれでは水平方向と垂直方向で「1」の基準が異なり、異種間でサボテンの形状を比較することができない。頂点から第1共有刺座までの水平距離を基準値1とするように統一する。

上から見たときの頂点の刺座を原点とし、共有刺座までの水平距離を1として、上から見た水平面の刺座の位置を座標として測定した（[図1](#)）。原点と各刺座を直線で結び、隣接する刺座間の水平面上の角度を刺座間の角度 ( $u$ ) として測定した（[図2](#)）。また、横から見た垂直面の刺座の位置と刺座間の距離を、原点と第1共有刺座の水平距離を1として、隣接する刺座間の垂直距離（高さ  $b$ ）と座標を測定した（[図3](#)）。

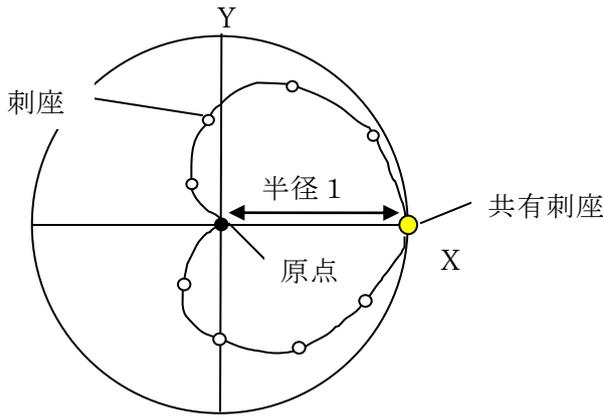


図1 上から見た刺座配列の座標測定

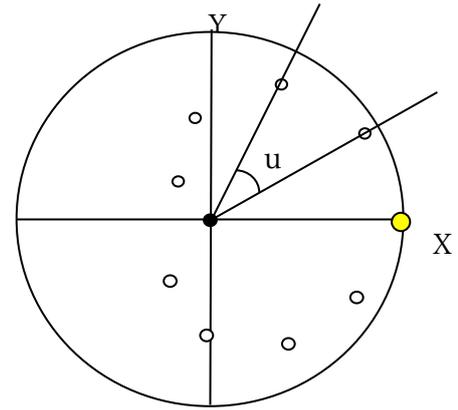


図2 刺座間の角度  $u$  の測定方法

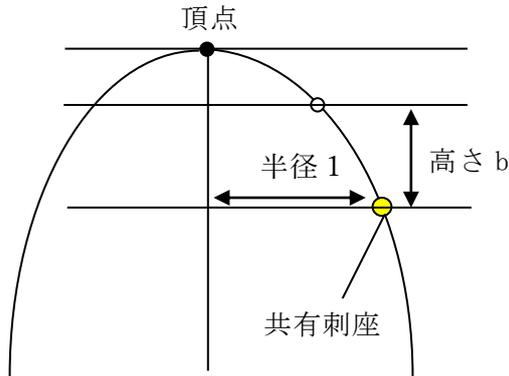


図3 横から見た刺座配列の高さ  $b$  の測定



図4 歪みの測定

刺座の座標の測定値は、歪みを修正して数式化した。岸上ほか<sup>1)</sup>は、ブリンチュウの研究において、頂点を原点として、原点と第1刺座を結ぶ直線を引いてそれを下方に延長し、第2刺座以降のこの直線からの左右へのずれの角度を測定して、実際の刺座の位置をその角度だけ水平方向に移動させた。本研究においても、この歪みの修正を行った(図4)。歪みを修正することによって、 $\theta$ の値が変化し、 $a$ の値もこれと連動して変化する。

### (2) 9種類のサボテンの刺座配列の測定

キンシャチ(エキノカクタス属/8個体)、オウカンリュウ(フェロカクタス属/7個体)、シュワルジー(フェロカクタス属/7個体)、ブリンチュウ(パキケレウス属/8個体)、ギンオウギョク(エリオシケ属/3個体)、エイカンマル(パロジア属/9個体)、カカンマル(エキノプシス属/7個体)、タンゲマル(エキノプシス属/6個体)、ソデガウラ(ハリシア属/7個体)の9種類のサボテンについて、それぞれ刺座の配列を座標として測定した(図5)。入手が困難な種があり、すべての種の個体数を揃えることはできなかった。



キンシャチ

オウカンリュウ

シュワルジー



ブリンチュウ

ギンオウギョク

エイカンマル



カカンマル

タンゲマル

ソデガウラ

図5 測定に用いた9種のサボテン

C: 得られた結果

いずれの種のサボテンも、上方中央の原点をなす刺座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た。一例として、図6にブリンチュウの代表的な刺座配列を示す。赤が右回り、青が左回りの刺座配列を示し、黄丸は共有刺座である。

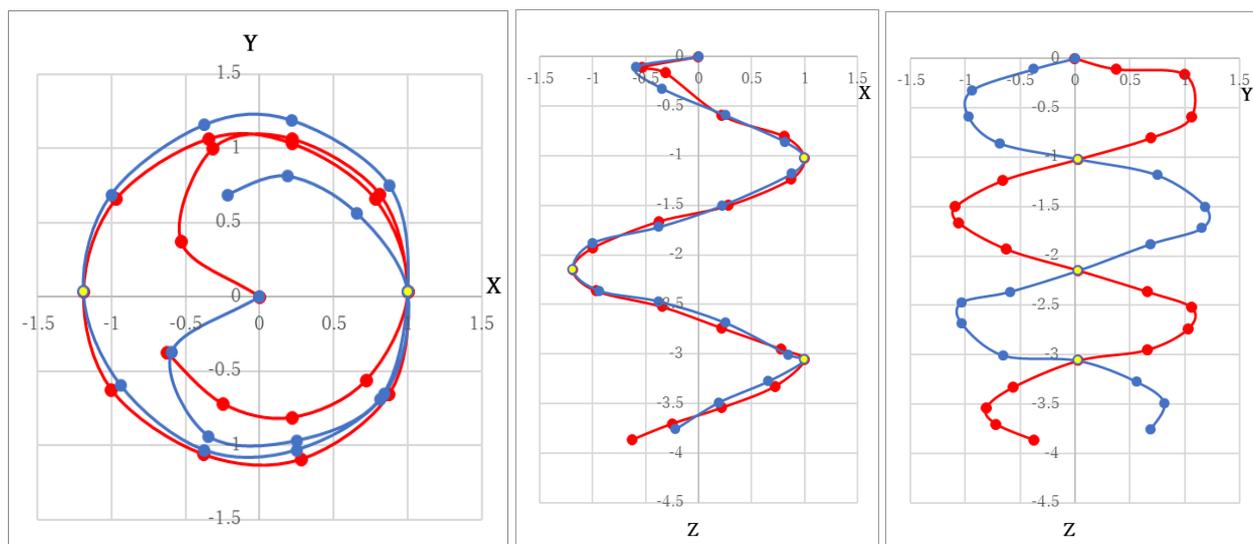


図6 ブリンチュウの螺旋をなして配列する刺座の座標例  
(赤: 右回り、青: 左回り、黄丸: 共有刺座)

D：考察

測定した座標から、 $n$  本目の刺座における螺旋方程式を、左回りと右回りでそれぞれ求めた。 $X$ - $Y$  平面では、半径  $r$ 、中心角  $\theta$  とすると、サボテンの刺座配列は極方程式  $r=a\theta$  と表される。また裾の刺座ほど高さ  $z$  は小さくなり、 $z=bn$  と表される。この2つを合わせて一般に螺旋方程式という。図1において上から見て原点から第1刺座までの距離を1とした場合、原点から各刺座までの水平距離  $r=a\theta$  より、 $r$  と  $\theta$  の実測値から刺座ごとに  $a$  を求めた。図7に一例を示した方法を用いてExcel上で近似曲線を引き、 $a=se^{tn}$  を求めた。また、 $\theta$  は左右回りのそれぞれ1つ目の刺座と原点を結ぶ直線を基準 ( $\theta=0$ ) とするため、 $\theta=u(n-1)$  となる。図3において横から見て中心線から第1刺座までの水平距離を1とした場合の、原点から各刺座までの垂直距離  $z=bn$  である。これより、サボテン種に共通な刺座配列の方程式は次のような螺旋方程式で表すことができる。

$$r = se^{tn} \times u(n-1) \quad z = bn$$

- $r$  : 原点から各刺座までの水平距離
- $u$  : 隣接する2つの刺座間のなす水平面上の角度
- $n$  : 原点の刺座を0としたとき何番目の刺座か
- $e$  : ネイピア数 2.71828
- $z$  : 原点から各刺座までの垂直距離
- $b$  : 横から見たときの隣接する2つの刺座間のなす垂直距離 (高さ)

垂直距離  $z$  は頂点の原点に位置する刺座から測定できるが、 $\theta$  は、原点の刺座と1つめの刺座を結ぶ直線を基準にして角度を求めるため、 $n-1$  を掛けることになる。 $s$  は数値が小さいほど上から見たときの刺座が描く螺旋が大きく膨らみをもつ。また  $t$  は螺旋を描く刺座の数が多いほど数値は小さくなる。

Excel 上に、個体ごとの左回りと右回りの螺旋のすべての刺座座標の変数  $\theta$ 、 $z$  および  $r=a\theta$  から求めた  $a$  の値をプロットし、それらの近似曲線から、種としての  $\theta$ 、 $a$ 、 $z$  の値を求めた。一例として、プリンチュウの近似直線を 図7に示す。

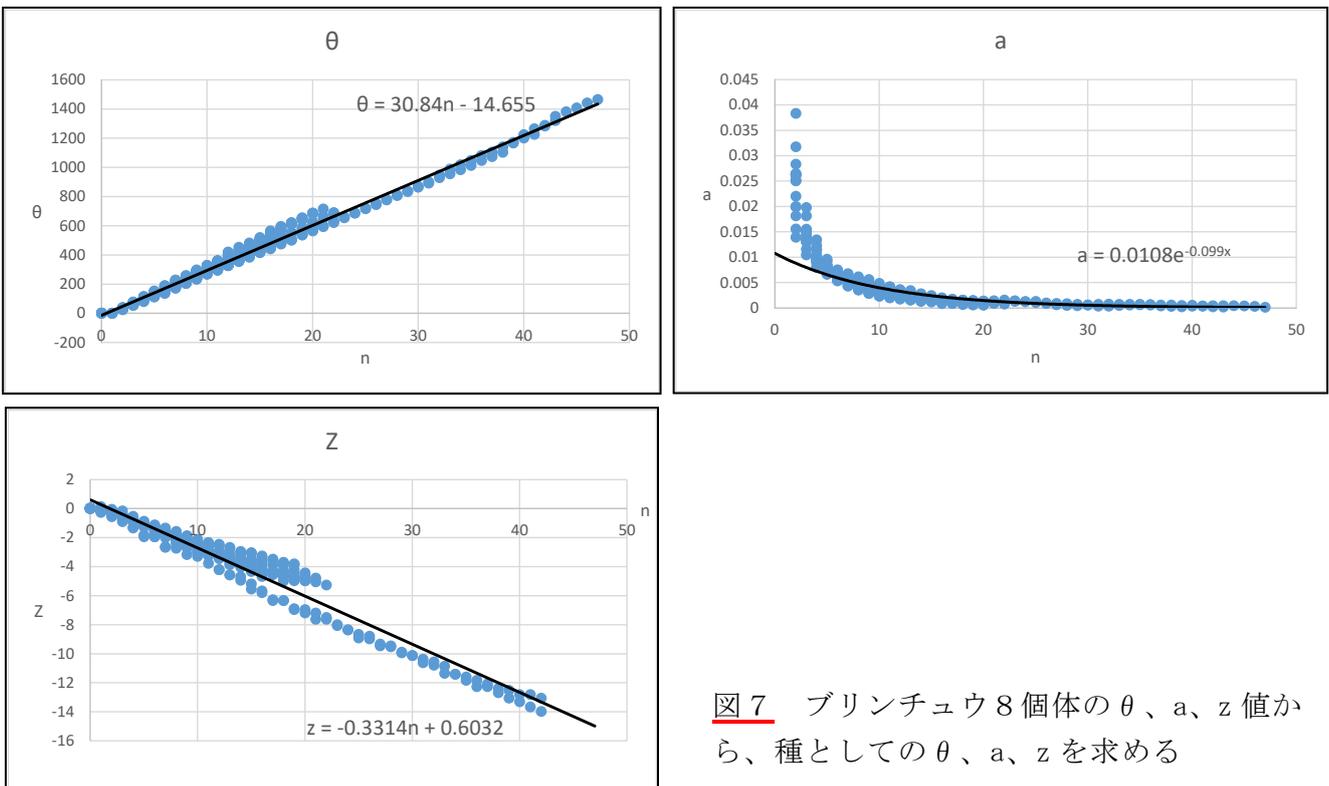


図7 プリンチュウ8個体の  $\theta$ 、 $a$ 、 $z$  値から、種としての  $\theta$ 、 $a$ 、 $z$  を求める

このようにして求めた9種類のサボテン種の螺旋方程式における種ごとの相違(変数)を表1に示す。さらに、図8~図11に、種ごとのs、t、u、bの数値をグラフ上で比較した。キンシャチとオウカンリュウは、個体の大小によってa、bの値の誤差が大きい。これは、1回転する間の刺座が少なく、個体によって誤差が大きくなるためである。

表1 サボテン種の刺座配列の螺旋方程式の変数一覧

サボテン種名	属名	r	z	個体数
キンシャチ	エキノカクタス	$r=0.0227e^{-0.279n} \times 31.330(n-1)$	$z=-0.2009n$	8
オウカンリュウ	フェロカクタス	$r=0.0365e^{-0.320n} \times 37.444(n-1)$	$z=-0.1729n$	7
シュワルジー	フェロカクタス	$r=0.0166e^{-0.134n} \times 27.791(n-1)$	$z=-0.0889n$	7
ブリンチュウ	パキケレウス	$r=0.0108e^{-0.099n} \times 30.840(n-1)$	$z=-0.3314n$	8
ギンオウギョク	エリオシケ	$r=0.0233e^{-0.180n} \times 24.993(n-1)$	$z=-0.1265n$	3
エイカンマル	パロジア	$r=0.0103e^{-0.068n} \times 31.129(n-1)$	$z=-0.1061n$	9
カカンマル	エキノプシス	$r=0.0331e^{-0.198n} \times 22.234(n-1)$	$z=-0.1001n$	7
タンゲマル	エキノプシス	$r=0.0148e^{-0.137n} \times 24.839(n-1)$	$z=-0.0780n$	6
ソデガウラ	ハリシア	$r=0.0105e^{-0.126n} \times 71.903(n-1)$	$z=-0.9329n$	7

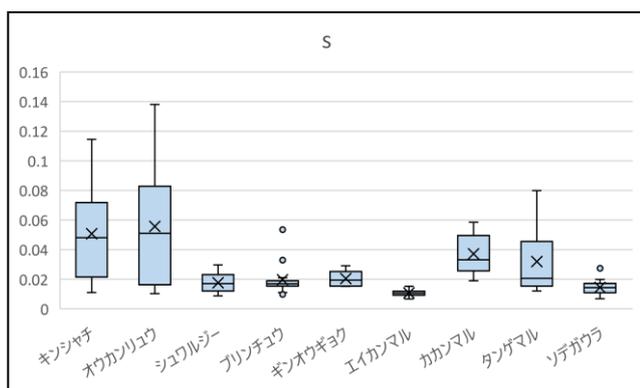


図8 9種のサボテンの螺旋方程式のs値

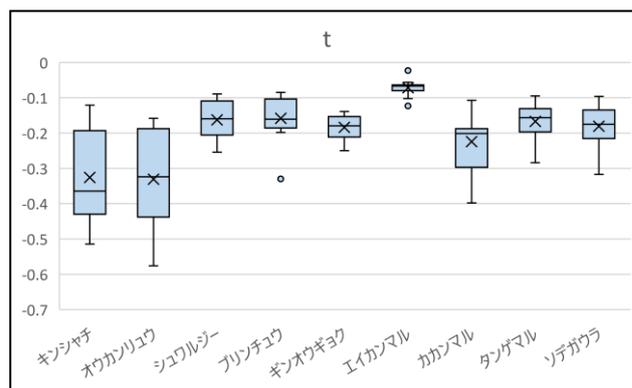


図9 9種のサボテンの螺旋方程式のt値

(横線は中央値、×は平均値、○は外れ値)

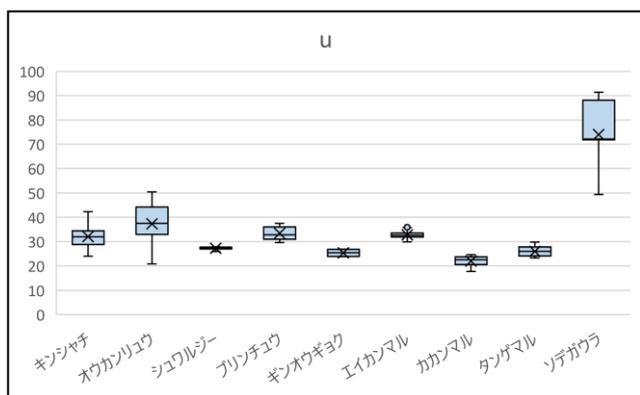


図10 9種のサボテンの螺旋方程式のu値

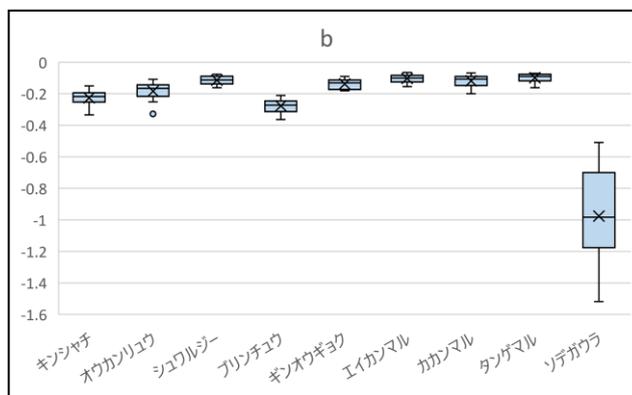


図11 9種のサボテンの螺旋方程式のb値

(横線は中央値、×は平均値、○は外れ値)

異種のサボテンで外形が異なっていたり、同種のサボテンであっても成長するにつれて刺座の配列が変化するように見える場合があるが、螺旋方程式を求めると、種ごとに一定の特徴を持つ螺旋方程式で表わすことができる。このように、9種類すべてのサボテンで、刺座の配列は上方中央の刺座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する螺旋方程式で表すことができ、その方程式は種ごとに特徴的な変数をもつことが明らかになった。

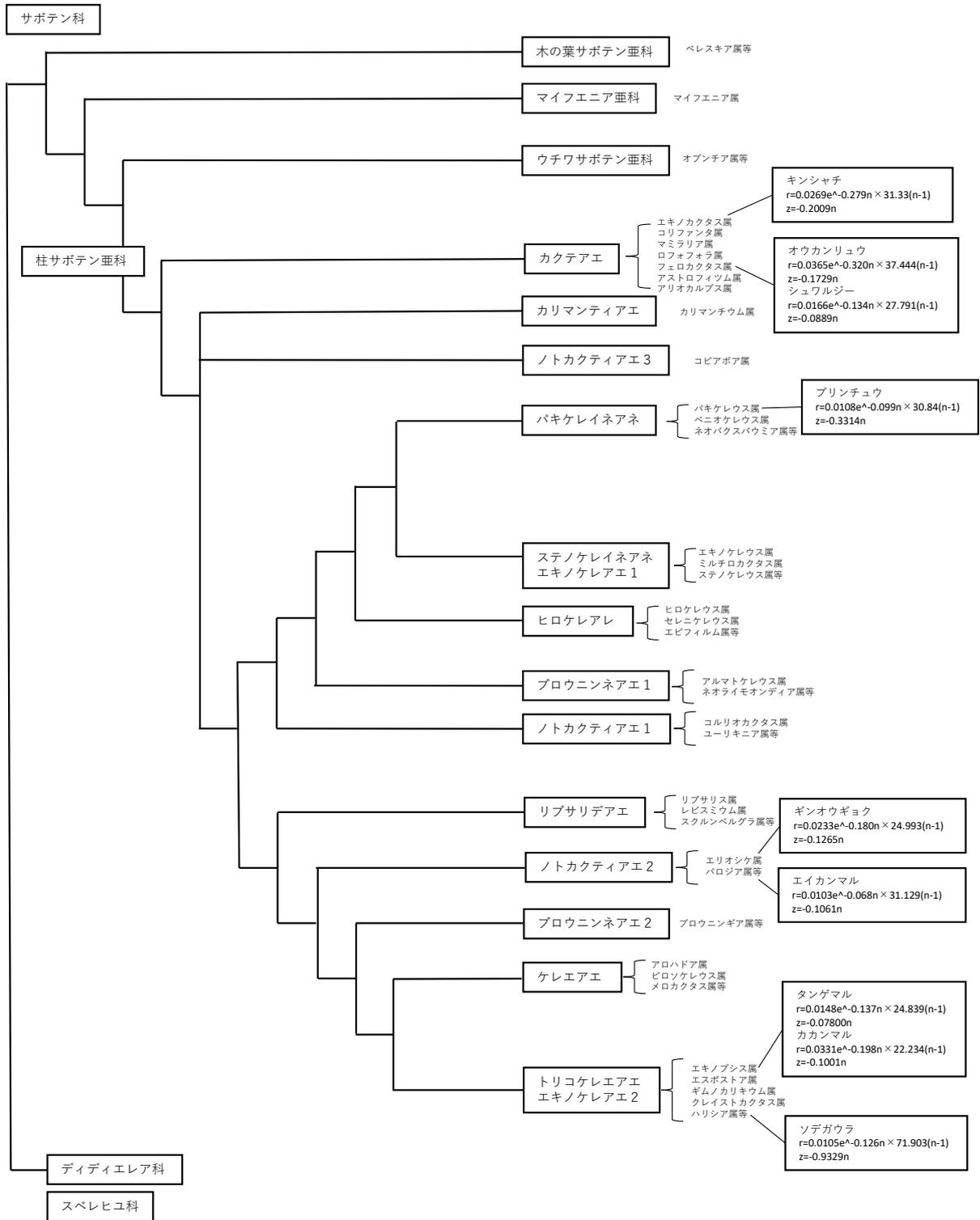


図 12 DNA に基づくサボテン種の系統樹 (Hernández et al.,<sup>2)</sup> をまとめて加筆)

サボテン種の系統樹(図12)上の距離と9種のサボテンの螺旋方程式を対比してみると、系統樹上の距離が近い近縁種であっても、螺旋方程式の変数が類似しているわけではない。また、種間距離が遠くても、変数が類似している場合がある。これらは、刺座の配列方程式がDNAによってのみ規定されているのではないことを示している。

International Union for Conservation of Nature<sup>3)</sup>のレッドリストから、そのサボテン種が生息する環境を調べた(表2)。さらに、生息地の標高、年間雨量、年間日照時間、最高平均気温、年平均気温、最低平均気温を調べ(表3)、各サボテン種のa、t、u、bの値との相関係数をExcel上で求めた。生息地が複数ある場合には、それらの平均値を用いた。ここではソデガウラは交配種のため、比較対象から省き、残りの8種類で比較した(表4)。絶対値が0~0.2までを「相関なし」、0.2~0.4までを「弱い相関」、0.4~0.7までを「相関あり」、0.7~1.0までを「強い相関」とすると、相関をもつ環境条件が多くみられるが、螺旋方程式に誤差が大きいキンシャチとオウカンリュウを省いて比較を行うと、さらに多くの環境条件で相関関係が見られた。サボテンの刺座配列は、遺伝子によってではなく、環境要因によって種固有の螺旋方程式を示している可能性がある。

表2 各サボテン種が生息する環境

種	生息地	標高(m)	年間雨量(mm)	時間(時間)	気温(°C)	年平均気温(°C)	気温(°C)	標高の下限(m)	標高の上限(m)
キンシャチ	メキシコ(ケタラ州、サカタカス州)	2200.0	511.4	2739.7	24.4	17.3	10.2	1400.0	1900.0
オウカンリュウ	メキシコ(ケタラ州、イダルゴ州、サンルイスポトシ州、グアナファト州)	2012.5	516.1	2806.6	24.6	13.8	9.9	550.0	2300.0
シュワルジー	メキシコ(シナロア州)	1000.0	667.3	2498.9	32.5	25.0	17.5	30.0	200.0
プリンチュウ	メキシコ(バハ・カリフォルニア州、ソノラ州、バハ・カリフォルニア・スル州)	401.0	209.0	3052.9	31.4	24.0	16.5	0.0	1000.0
ギンオウギョク	チリ(コキンボ州、サンティアゴ・デル・エステロ州、バルパライソ州)	1138.3	267.3	2314.8	19.4	14.8	10.2	600.0	2000.0
エイカンマル	ブラジル(リオグランデ・ド・スル州)	300.0	1795.0	2867.4	25.6	19.9	15.9	300.0	800.0
カカンマル	アルゼンチン(サンティアゴ・デル・エステロ州、ラ・リオハ州、コルドバ州、カタマルカ州)	796.8	494.9	2745.3	26.0	19.0	12.3	1000.0	1500.0
タンゲマル	ブラジル(サンタカタリーナ州、リオグランデスル州、パラナ州)	441.7	1114.5	2958.0	25.5	14.9	14.9	350.0	1300.0

**表3** 生息地の標高、年間雨量、年間日照時間、最高平均気温、年平均気温、最低平均気温

	州	標高 (m)	年間雨量 (mm)	年間日照時間 (時間)	最高平均気温 (°C)	年平均気温 (°C)	最低平均気温 (°C)
メキシコ	ケレタロ州	1800	527.5	2807	26.5	18.9	11.2
	サカテカス州	2600	495.2	2672.4	22.2	15.7	9.1
	イダルゴ州	2400	411.9	2694.2	21.4	14	6.6
	グアナファト州	2000	732.8	2793.1	26.2	18.7	11.3
	シナロア州	1000	667.3	2498.9	32.5	25	17.5
	サンルイスポトシ州	1850	392.1	2932	24.3	17.4	10.5
アメリカ南西部からメキシコ	ソノラ州	500	386.9	2862.8	32.4	25.1	17.8
	バハ・カリフォルニア州	178	70.9	3148	31.2	23.1	14.9
	バハ・カリフォルニア・スル州	525	169.2	3148	30.7	23.7	16.8
チリ北部	コキンボ州	2200	87	2269	18.2	14.4	10.7
	サンティアゴ・デル・エステロ州	182	342	2556.4	22.8	15.8	8.7
	バルパライソ州	1033	373	2119	17.3	14.3	11.2
アルゼンチン	ラ・リオハ州	515	411.4	2691	27.7	20.01	13.8
ブラジル南部	サンタカタリーナ州	600	400.5	3293.37	26.8	21.1	15.5
	パラナ州	425	1148	2713.3	24	18.6	13.3
	リオグランデドスル州	300	1795	2867.44	25.6	19.9	15.9
アルゼンチン	カタマルカ州	490	412	3200	28.2	21.2	14.3
	コルドバ州	2000	814	2533.9	25.1	18.8	12.5

**表4** 環境要因と刺座配列の螺旋方程式の変数との相関関係

環境要因	変数	相関係数	相関の有無
雨量	s	-0.452515	相関あり
	t	0.4642742	相関あり
	b	0.5127725	相関あり
	u	0.0488401	相関なし
日照時間	s	-0.282937	弱い相関
	t	0.1939165	相関なし
	b	0.5127725	相関あり
	u	0.3025052	弱い相関
最高気温	s	-0.428973	相関あり
	t	0.4088448	相関あり
	b	-0.279898	弱い相関
	u	0.1047264	相関なし
平均気温	s	-0.543256	相関あり
	t	0.5903304	相関あり
	b	-0.275859	弱い相関
	u	-0.073892	相関なし
最低気温	s	-0.816004	強い相関
	t	0.845894	強い相関
	b	0.0122529	相関なし
	u	-0.160784	相関なし
標高の上限	s	0.671476	相関あり
	t	-0.677739	相関あり
	b	0.0810093	相関なし
	u	-0.084805	相関なし
標高の下限	s	0.7380096	強い相関
	t	-0.793695	強い相関
	b	-0.149144	相関なし
	u	0.2324687	弱い相関

環境要因	変数	相関係数	相関の有無
雨量	s	-0.442011	相関あり
	t	0.5977689	相関あり
	b	0.4855745	相関あり
	u	0.3310772	弱い相関
日照時間	s	-0.467843	相関あり
	t	0.5520489	相関あり
	b	-0.441237	相関あり
	u	0.3745112	弱い相関
最高気温	s	-0.386205	弱い相関
	t	0.4171459	相関あり
	b	-0.374978	弱い相関
	u	0.4615888	相関あり
平均気温	s	-0.325447	弱い相関
	t	0.4261771	相関あり
	b	-0.448894	相関あり
	u	0.5834743	相関あり
最低気温	s	-0.716143	強い相関
	t	0.7425135	強い相関
	b	-0.22788	弱い相関
	u	0.6869458	相関あり
標高の上限	s	0.8833854	強い相関
	t	-0.748362	強い相関
	b	0.4324296	相関あり
	u	-0.803561	強い相関
標高の下限	s	0.5356517	相関あり
	t	-0.602861	相関あり
	b	0.0107528	相関なし
	u	-0.585805	相関あり

#### E：結論

サボテンの刺座は、螺旋方程式で表されるように左右回りの螺旋を描いて配列している。サボテン種に共通な螺旋方程式があること、一方、種ごとに変数が異なっていることを明らかにすることができた。外形が異なっていたり、成長するにつれて刺座の配列が変化するように見える場合でも、螺旋方程式は種ごとに固有の特徴を持っている。サボテン種の系統樹上の距離と9種のサボテンの螺旋方程式には相関関係が見られない。これらのことは、刺座の配列方程式がDNAによってのみ規定されているのではないことを示しており、たとえば生育地の環境要因等が関係している可能性が考えられる。

同一のサボテン販売店から入手したサボテンを用いて観察と測定を行ったことから導かれた結論である可能性があるため、それぞれのサボテン種の原因によって形成された特徴なのか、そのサボテン種の個体が生育した環境によるのかを明らかにしようと研究を続けている。また、サボテン以外の他の植物との方程式の比較を行うと、新たな発見があると期待される。

#### F：謝辞

本研究は、公益財団法人武田科学振興財団より研究助成を受けて行ったものである。また、国立科学博物館筑波実験植物園の職員には、現地を訪問した際に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。

#### G：参考文献

- 1) 岸上栞菜・前田智彦・本脇敬人・吉田龍之介・藤田詩桜・村瀬太郎・大和司 (2022) サボテンの刺座の配列は規則的なのか (化学と生物, 第64巻, 第1号, 710号, 46-48.)
- 2) Hernández-Hernández, T., Hernández, H. M., De-Nova, J. A., Puente, R., Eguiarte, L. E. and Magallón, S. (2011) Phylogenetic Relationships and Evolution of Growth Form in CACTACEAE (Caryophyllales, Eudicotyledonae), (American Journal of Botany 98(1): 44-61. 2011.)
- 3) International Union for Conservation of Nature (2023) The IUCN Red List of Threatened Species, Version 2022-2. (<https://www.iucnredlist.org>. Downloaded on August 11, 2023.)

# サボテンに共通な刺座配列方程式と種特異性

兵庫県立姫路東高等学校 科学部生物系研究部  
 村瀬太郎 大和司 伊坂奈桜 寺田悠哉 宮下翔真 宮本泰成

**キーワード** 共有刺座、螺旋方程式、系統樹、種間距離

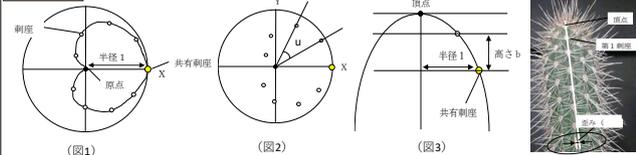
**目的**

**動機**

サボテンの枝が変形した刺座の配列について研究を行っている。昨年度、プリンチュウの刺座は、頂端部から左右に螺旋を描いて配列しており、**螺旋方程式**によって客観的に示せることを明らかにした。他種の刺座配列はどうなっているのか、これがプリンチュウに固有の方程式なのかを明らかにしたいと考えた。

1. 螺旋方程式を汎用性の高いものにするために修正する。
2. 複数の種のサボテンで方程式を算出し、種に固有な方程式で表すことができるのか検討する。
3. その数式とDNAに基づく系統樹上の種間距離との関係の有無を明らかにする。特に2.について、サボテン**種に共通な特徴と、種ごとの違いを見出す**ことができないかについて着目した。

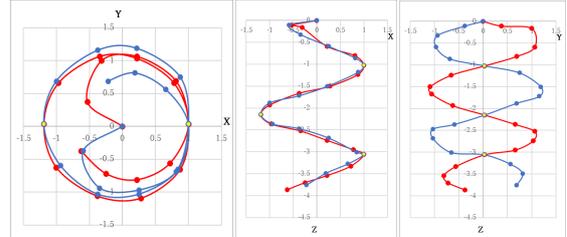
**観察方法**



- 上から見たときの頂点の刺座を原点とし、共有刺座までの水平距離を1として、水平面の刺座の座標と垂直距離を測定した(図1)。
- 原点と各刺座を直線で結び、隣接する刺座間の水平面上の角度を刺座間の角度(u)として測定した(図2)。
- 横から見た垂直面の刺座の位置と刺座間の距離を、原点と第1共有刺座の水平距離を1として、隣接する刺座間の垂直距離(高さb)を測定した(図3)。
- 刺座の座標は、歪みを修正して数式化した(図4)。

**結果**

いずれの種のサボテンも、原点の刺座から下方に向かって、左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た(図5)。



(図5) プリンチュウの螺旋をなして配列する刺座の座標例(赤：右回り、青：左回り、黄丸：共有刺座)

**考察** 刺座が螺旋を描いて配列しているサボテンの方程式は次のような螺旋方程式で表すことができた。

$$r = r_0 e^{(t/n)} \times u(n-1) \quad z = b n \quad e: \text{ネイピア数}(2.71828)$$

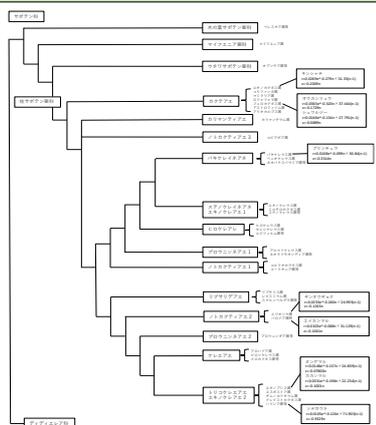
**u** : 隣接する2つの刺座間のなす水平面上の角度、**b** : 横から見た隣接する2つの刺座間の垂直距離  
**n** : 原点の刺座を0としたとき何番目の刺座か  
**s** : 数値が小さいほど上から見たときの刺座が描く螺旋が大きく膨らむ。  
**t** : 螺旋を描く刺座の数が多しほど数値は小さくなる。

(表1) サボテン種の刺座配列の螺旋方程式の変数一覧

サボテン種名	属名	r	z	個体数
キンシャチ	エキノカクタス	$r=0.0227e^{-0.279n} \times 31.330(n-1)$	$z=-0.2009n$	8
オウカンリュウ	フェロカクタス	$r=0.0365e^{-0.320n} \times 37.444(n-1)$	$z=-0.1729n$	7
シュワルジー	フェロカクタス	$r=0.0166e^{-0.134n} \times 27.791(n-1)$	$z=-0.0889n$	7
プリンチュウ	バキケレウス	$r=0.0108e^{-0.099n} \times 30.840(n-1)$	$z=-0.3314n$	8
ギンオウギョク	エリオシケ	$r=0.0233e^{-0.180n} \times 24.993(n-1)$	$z=-0.1265n$	3
エイカンマル	パロジア	$r=0.0103e^{-0.068n} \times 31.129(n-1)$	$z=-0.1061n$	9
カカンマル	エキノブシス	$r=0.0331e^{-0.198n} \times 22.234(n-1)$	$z=-0.1001n$	7
タンゲマル	エキノブシス	$r=0.0148e^{-0.137n} \times 24.839(n-1)$	$z=-0.0780n$	6
ソデガウラ	ハリシア	$r=0.0105e^{-0.126n} \times 71.903(n-1)$	$z=-0.9329n$	7



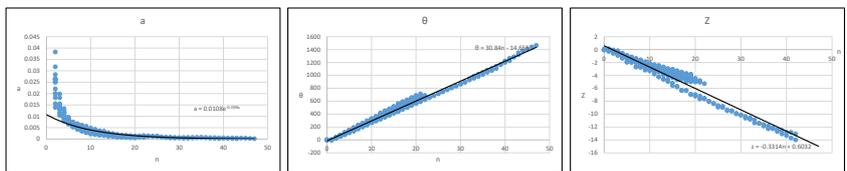
9種類のサボテンで、刺座の配列は上方中央の刺座から下方に向かって、左回りと右回りに螺旋を描いて、共有刺座で出会いながら配列する**螺旋方程式で表すことができ、その方程式は種ごとに特徴的な変数をもつ。**



(図7) DNAに基づくサボテン種の系統樹 (Hernández et al., 2011)

• DNAに基づく系統樹(図7)上の距離と9種のサボテンの螺旋方程式を対比すると、系統樹上の距離に近い近縁種であっても、螺旋方程式の変数が類似しているわけではない。種間距離が遠くても、変数が類似している場合がある。

測定した座標から、n本目の刺座における螺旋方程式を、左回りと右回りでそれぞれ求めた。 $r = a\theta$ より、rとθを測定し刺座ごとにaを求める。図7のように近似曲線を引き、 $a = se^{t/n}$ を、また角度 $\theta = u(n-1)$ 、各刺座までの垂直距離 $z = bn$ を求めた(図6)。



(図6) プリンチュウの近似曲線の例(8個体のa, θ, z値から種としてのa, θ, zを求める)

**今後の課題**

DNAによって種を示す刺座の螺旋方程式が規定されているわけではないとすると、生育地の環境要因等が関係している可能性が考えられる。サボテン種が生息する地域の環境条件を調べ、各サボテン種の変数の相関係数を求めると、相関をもつ条件が多くみられた(表2)。同一のサボテン販売店から入手したサボテンを用いて観察と測定を行ったこと

(表2) 環境要因との変数との相関関係

	s	t	u	b
雨量	-0.14586	-0.05616	0.204105	0.169089
日照時間	-0.21973	0.109095	0.274587	-0.49613
最高気温	-0.42897	0.408845	0.104725	-0.2799
平均気温	-0.54326	0.59033	-0.07389	-0.27586
最低気温	-0.816	0.845894	-0.16078	0.012253
標高の上限	0.73801	-0.79369	0.232469	-0.14914
標高の下限	0.671476	-0.67774	-0.08481	0.081009

**謝辞**

本研究は、公益財団法人武田科学振興財団より研究助成を受けて行ったものである。また、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る。

**引用文献**

- 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(化学と生物, 第64巻, 第1号, 710号, 46-48, 2022).
- Hernández-Hernández, T., Hernández, H. M., De Nova, J. A., Puente, R., Eguarte, L. E. and Magallón, S. (American Journal of Botany 98(1): 44-61. 2011.)
- International Union for Conservation of Nature (<https://www.iucnredlist.org>. Downloaded on August 11, 2023)

## 片利共生する軟体動物の腎囊表面の形状による蠕虫型ニハイチュウの棲み分け (その2)

岸上栞菜 高田健吾 佐藤知希 前田隆良 岡本莉空 岡本涼佑 中田天晴 中村賢矢  
兵庫県立姫路東高等学校 科学部生物系研究部 ニハイチュウ班

### 1. 研究の背景

ニハイチュウ (二胚動物門) は、底生頭足類の腎囊に片利共生する体長数 mm、細胞総数 22 個前後の多細胞動物である (図1)。蠕虫型と滴虫型の2タイプがあり、蠕虫型ニハイチュウは尿とともに海中に排出されないように頭部(極帽)で腎囊表面に接着している。極帽の形状は腎囊表面の凹凸によってさまざまに異なる (栗田ほか, 2007、古屋, 1996、古屋, 2002、古屋, 2004、古屋, 2006、古屋, 2011、古屋, 2020a、古屋, 2020b)。ニハイチュウは多細胞生物が退化して生まれていることから、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とされており、体を構成する細胞数が減少する方向に進化したと考えられている (古屋, 2011)。

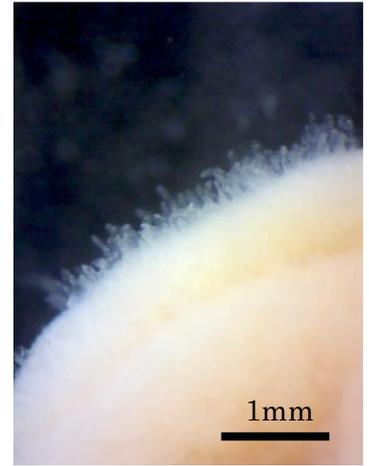


図1 腎囊表面に吸着するニハイチュウ

岸上栞菜は、2022 年度にタコやイカの腎囊に片利共生するニハイチュウの研究を始めた。そこでは、① イカやタコの種によって共生するニハイチュウの種が異なる、② 蠕虫型ニハイチュウの極帽は幼生の段階ではすべて同じ円錐形であるが、極帽が円錐形の種は腎囊の窪みにのみ接着し、成長しても円錐形を維持する、③ 極帽が円盤形の種は平坦な場所にもみ接着し、成長しても極帽は成長しないか途中で成長が止まり、極帽の形を円盤形に変形させる (図2)、ことを明らかにした (岸上, 2023)。

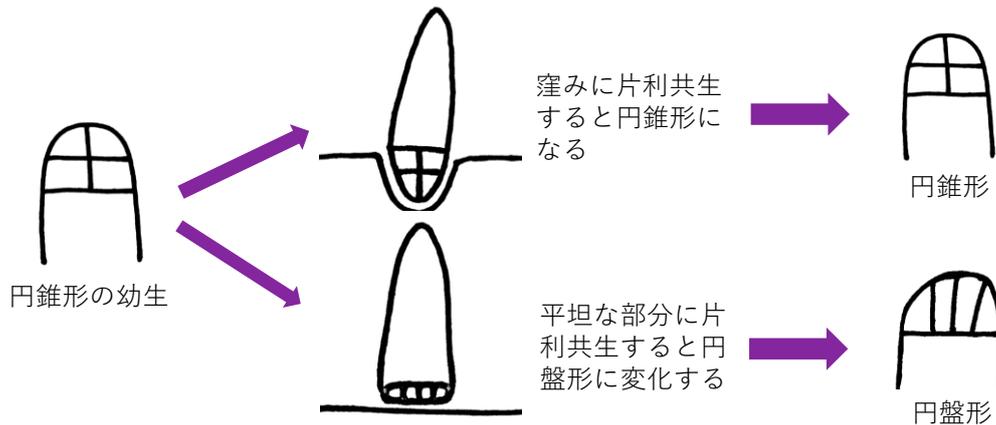


図2 ニハイチュウの極帽の場所による形態変化 (岸上,2023 を一部改変)

### 2. 研究の目的

円盤形のニハイチュウは円錐形のものよりも頭部が扁平で、平坦な場所での接着に適応しているとされている (古屋, 2004)。腎囊の窪みはニハイチュウの大きさに対して十分大きいにも

かわらず、なぜ極帽が円盤形のニハイチュウは窪みの中に入らずに、極帽の形状を変化させて平坦な場所に接着するのか疑問に感じ、明らかにすることを目的に研究を行った。

### 3. 実験方法

#### (1) 極帽と腎囊の窪みの面積の比較

先行研究(越田, 1982、能登ほか, 1998)を参考にして、市場から購入してきたマダコの腎囊を開いて、腎囊腔にたまっているマダコの尿をスポイトで吸い取ってスライドガラス上に垂らし(図3)、実体顕微鏡で観察すると、ニハイチュウが尿の中で遊泳しているようすが観察できる。円錐形と円盤形のニハイチュウ頭部の極帽の大きさをマイクロメーターで測定して、頭部の大きさを比較した(図4)。円錐形ニハイチュウは104個体の極帽のAの長さを測定した。円盤形のニハイチュウの極帽は、体の成長とともに後極細胞が開いて前極細胞がその隙間に陥没するように落ち込んで形成される。そのため、円盤形ニハイチュウでは、192個体の極帽のB+Cを計測した。円錐形のニハイチュウも円盤形のニハイチュウも、上から見た極帽の形は円形であるため、測定値を半径として計算によって断面積を求めた。また、また腎囊表面を実体顕微鏡で観察すると、腎囊表面の窪みを観察することができる。宿主である底生頭足類のマダコの腎囊表面212か所の写真を撮影し、その窪み部分の面積を測定して、ニハイチュウの極帽の面積と比較した。円錐形のニハイチュウは腎囊の窪みに入り込んでいるため、採取が困難であった。採取できても体が伸びてしまったり弱ってしまうことが多く、多くの試料を取り出すことは困難であった。

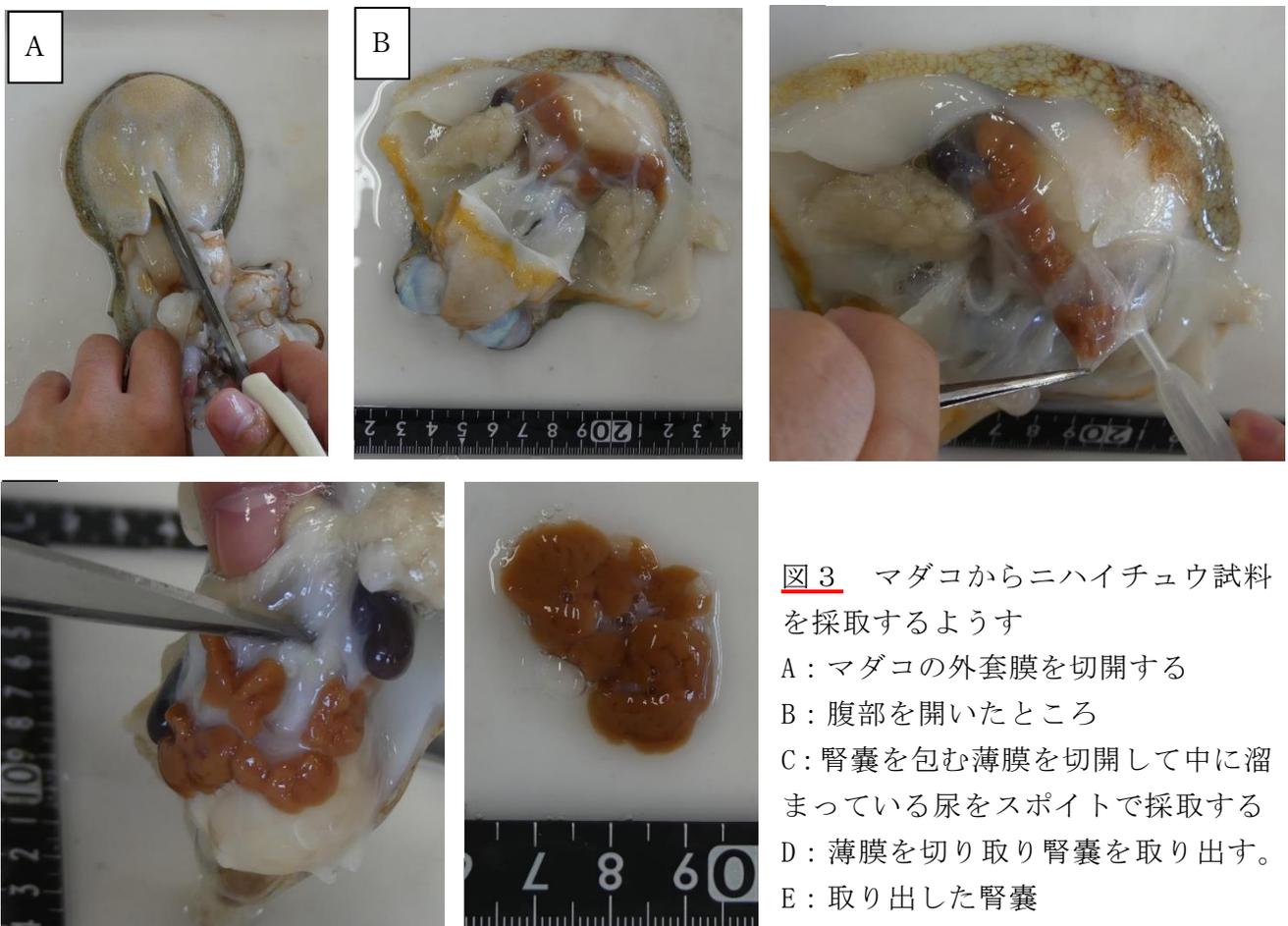


図3 マダコからニハイチュウ試料を採取するようす  
A: マダコの外套膜を切開する  
B: 腹部を開いたところ  
C: 腎囊を包む薄膜を切開して中に溜まっている尿をスポイトで採取する  
D: 薄膜を切り取り腎囊を取り出す。  
E: 取り出した腎囊

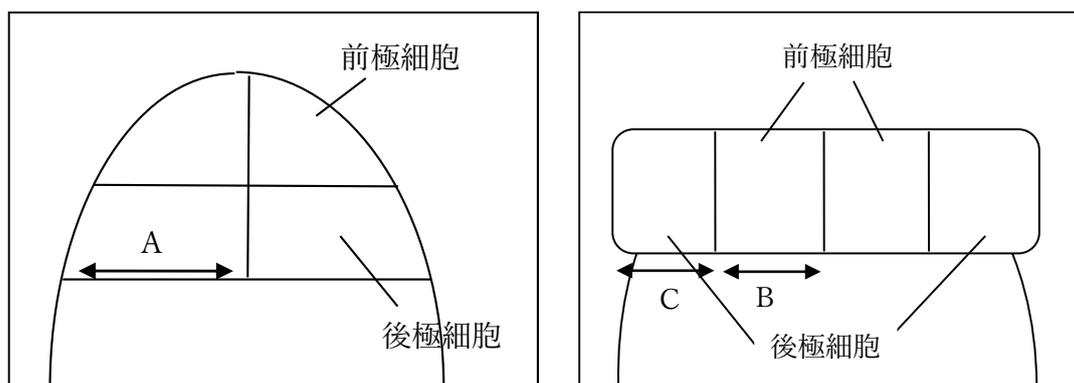


図4 極帽の大きさの測定部分 A、B、C ( $\mu\text{m}$ /左：円錐形/右：円盤形)

## (2) ニハイチュウの遊泳力の比較

腎囊表面から円盤形と円錐形のニハイチュウを採取し、腎囊腔にたまっているマダコの尿をスポイトで吸い取ってプレパラート上に垂らし、そこに採取したニハイチュウを浸し、25℃の条件で顕微鏡下で遊泳させ、時間と移動距離を測定して遊泳速度を求めた。

## 4. 結果と考察

### (1) 実験の結果～極帽と腎囊の窪みの面積の比較

円盤形と円錐形のニハイチュウの頭部と腎囊表面の窪みの写真を図5に示す。また測定の結果を図6に示す。円盤形のニハイチュウは円錐形のものよりも極帽が大きいとされてきたが、本研究の測定では有意差を示さなかった。また、腎囊表面の窪みは、2種類のニハイチュウの極帽に対して十分な大きさを持っていた。

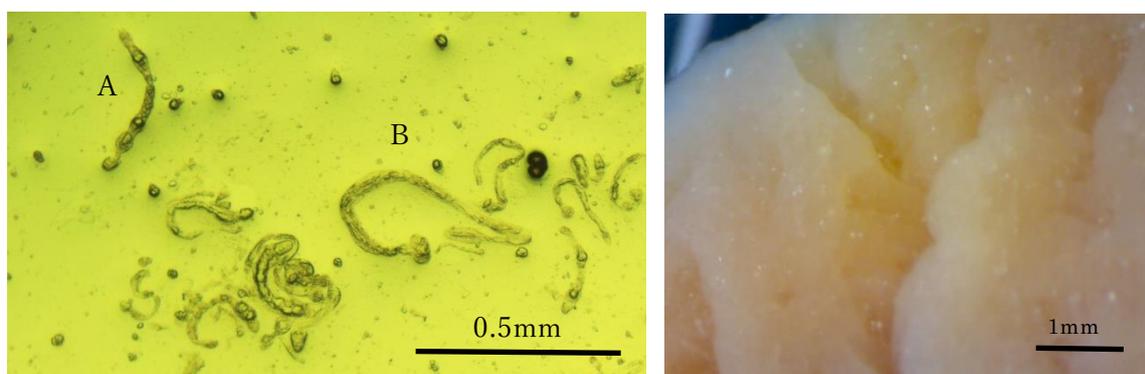


図5 円錐形ニハイチュウ (A) と円盤形ニハイチュウ (B)、腎囊表面の窪み (右)

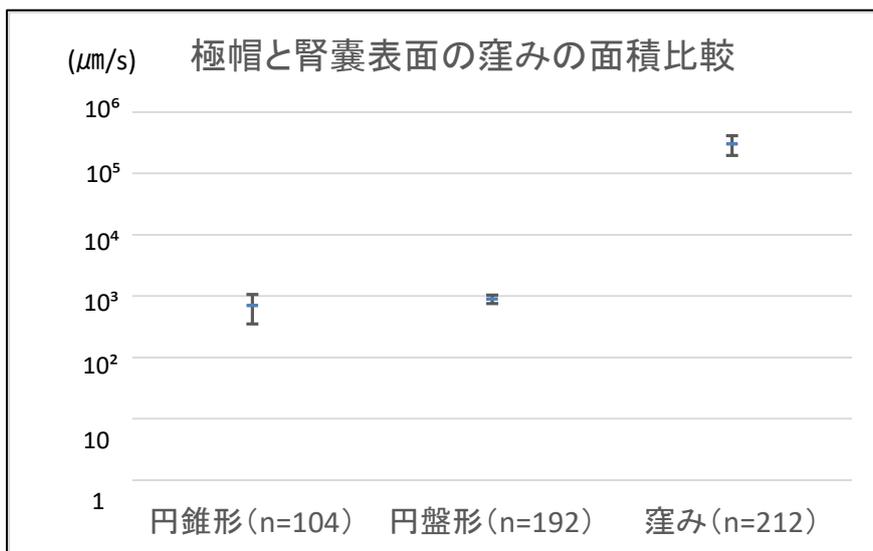


図6 ニハイチュウの極帽とマダコの窪みの断面面積比較

### (2) 実験の結果～ニハイチュウの遊泳力の比較

結果を図7に示す。円錐形は24個体測定し、その平均は43 μm/秒であった。円盤形は78個体測定し、その平均は38 μm/秒であった。やや円錐形のニハイチュウの方が遊泳力に勝っているが、大きな差は認められなかった。

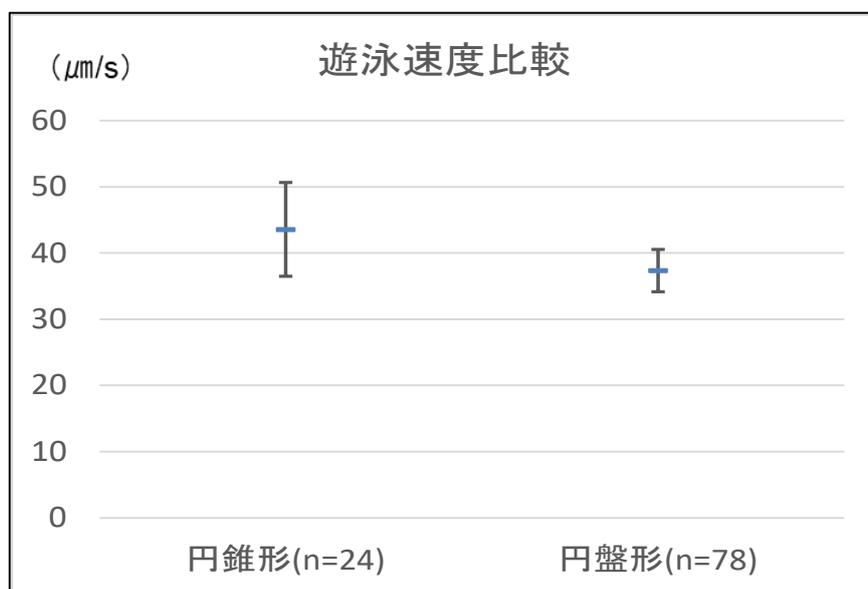


図7 円盤形と円錐形のニハイチュウの遊泳速度比較

### (3) 考察

円錐形のニハイチュウと円盤形のニハイチュウは、現在形質の違いによって分類されているが、遺伝子が異なる種なのか表現型可塑性によるのかは、まだ明らかになっていない。遺伝子が同じで、表現型可塑性によって円錐形と円盤形に分かれている場合、偶然接着した場所に適応した極帽形態に変化している可能性がある。円錐形と円盤形で遺伝子が異なる場合、もともと極帽が円錐形で接着条件は同じなのに、どのようなメカニズムで接着場所を棲み分けているのかは不明である。

円錐形のニハイチュウと円盤形のニハイチュウで、極帽の大きさに有意差は見られなかった。また、腎囊の窪みは極帽に対して十分に大きく、円錐形と円盤形で腎囊の接着場所を分け合う理由がない。さらに、円錐形と円盤形のニハイチュウで、遊泳力にも差は認められず、円錐形のニハイチュウが、高い遊泳力でより接着に適している腎囊の窪みを優先的に奪っているとも考えにくい。腎囊の窪みは底生頭足類の尿細管であり、円錐形のニハイチュウは尿に何らかの反応を示している可能性がある。

## 5. 結論

蠕虫型ニハイチュウの極帽は幼生の段階ではすべて同じ円錐形であるが、極帽が円錐形の種は腎囊の窪みにのみ接着し、極帽が円盤形の種は平坦な場所のみに接着する。この原因として、表現型可塑性と遺伝子が円錐形と円盤形で異なっている可能性が考えられる。腎囊の窪みは極帽に対して十分に大きく、また円錐形と円盤形のニハイチュウで、遊泳力にも差は認められない。腎囊の窪みは底生頭足類の尿細管であり、円錐形のニハイチュウは尿に反応を示している可能性がある。

円盤形のニハイチュウと円錐形のニハイチュウは、現在形質の違いによって分類されているが、遺伝子が異なる種なのかどうかを確認する必要がある。また、円錐形のニハイチュウと底生頭足類の尿との関係を明らかにしていきたい。

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専攻の古屋秀隆教授には、ニハイチュウについての基礎情報や観察方法について丁寧なご指導をいただいた。また本校科学部主顧問の川勝和哉主幹教諭には、終始有益な議論をしていただいた。ここに記して謝意を表す。

## 6. 参考文献

- 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 (2011) ニハイチュウの分子生物学と培養系の確立 (公益財団法人東レ科学振興会第 52 回事業報告書, pp. 70-71.)
- 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.)
- 岸上栞菜 (2023) 軟体動物の腎囊の生育場所によるニハイチュウの極帽形態の変化 (化学と生物 / 投稿中)
- 越田豊 (1982) ニハイチュウ (中生動物) の教材化 (日本科学教育学会年会論文集, 6, pp. 145-146).
- 栗田ひろ子・能登朋子・遠藤浩 (2007) 中生動物ニハイチュウの寄生適応戦略: 発生中の DNA の増幅と削減、そして細胞分化後の反復配列の特異的増幅 (原生動物学雑誌, 第 40 巻第 1 号, pp. 68-70) .
- 能登朋子・山口正晃・遠藤浩 (1998) ニハイチュウの系統的位置の再検討 (日本分子生物学会年会プログラム講演要旨集, 21, p343) .

# 片利共生する軟体動物の腎囊表面におけるニハイチュウの棲み分け(その2)

兵庫県立姫路東高等学校 科学部生物系研究部 ニハイチュウ班  
岸上葉菜 前田隆良 岡本莉空 中田天晴 中村賢矢

キーワード 極帽 円錐形 円盤形 腎囊

## ニハイチュウについて

ニハイチュウ(二胚動物門)は、底生頭足類の腎囊内に片利共生する体長数mm、細胞総数22個前後の多細胞動物である(図1)。蠕虫型と滴虫型の2タイプがあり、蠕虫型ニハイチュウは尿とともに海中に排出されないように頭部(極帽)で腎臓表面に接着している。蠕虫型ニハイチュウの極帽の形状は腎臓表面の凹凸によってさまざまに異なる。マダコには円錐形と円盤形の極帽をもつ個体が存在する(1)~(8)。ニハイチュウは、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な生物でされている(6)。



図1 腎臓表面に吸着するニハイチュウ

## 考察

- ①円錐形と円盤形で、極帽の大きさに有意差は見られない。腎臓の窪みは極帽に対して十分に大きく、円錐形と円盤形で腎臓の接着場所を分け合う理由が見つからない。
- ②円錐形と円盤形で、遊泳速度に差は認められず、円錐形が、速い遊泳速度でより接着に適している腎臓の窪みを優先的に奪っているとも考えにくい。
- ③底生頭足類では、尿管の付近に腎臓の窪みがあり、円錐形のニハイチュウは尿に何らかの反応を示している可能性がある。
- 円錐形と円盤形のニハイチュウは、現在形質の違いによって分類されているがDNA分析が難しく、遺伝子が異なる種なのか表現型可塑性によるのかは、明らかになっていない。
  - (a)遺伝子が同じで、表現型可塑性によって分かれている場合、偶然接着した場所に適応した極帽形態に変化している可能性がある。
  - (b)遺伝子が異なる場合、もともと円錐形で接着条件は同じなのに、どのようなメカニズムで接着場所を棲み分けているのかは不明である。

## 実験方法

- (1) 極帽と腎臓の窪みの面積の比較
  - ①マダコの腎囊を開いて、尿をスポイトで吸い取ってスライドガラス上に垂らし(図3)、観察した(10)11)。
  - ②円錐形は104個体の極帽のAの長さを測定した。円盤形は、体の成長とともに後極細胞が開いて前極細胞がその隙間に陥没するように落ち込んで形成されるため9)、192個体のB+Cの長さを計測した。
  - ③腎臓表面の窪みを顕微鏡で観察した後、腎臓表面の窪みの212か所の写真を撮影し、面積を測定して、ニハイチュウの極帽の面積と比較した。
- (2) ニハイチュウの遊泳速度の比較
  - ①腎臓表面からニハイチュウを採取し、腎囊腔にたまっている尿をスポイトで吸い取ってプレパラート上に垂らし、採取したニハイチュウを浸した。
  - ②20°Cで顕微鏡下で遊泳させ、時間と移動距離から遊泳速度を求めた。

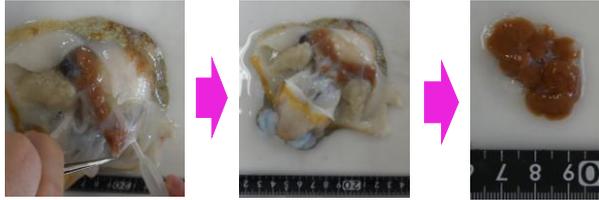


図3 マダコからニハイチュウ試料を採取するようす

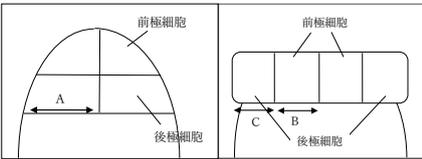


図4 極帽の大きさの測定部分 A、B、C(μm)左:円錐形/右:円盤形

## 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(2011)ニハイチュウの分子生物学と培養系の確立(公益財団法人東し科学振興会第52回事業報告書, pp.70-71.)
- 6)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.)
- 7)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.)
- 8)岸上葉菜(2023)軟体動物の腎囊の生育場所によるニハイチュウの極帽形態の変化(化学と生物/投稿中)
- 9)越田豊(1982)ニハイチュウ(中生動物)の教材化(日本科学教育学会年會論文集, 6, pp.145-146.)
- 10)栗田ひろ子・能登朋子・遠藤浩(2007)中生動物ニハイチュウの寄生適応戦略:発生中のDNAの増幅と削減、そして細胞分化後の反復配列の特異的増幅(原生動物学雑誌, 第40巻第1号, pp.68-70.)
- 11)能登朋子・山口正晃・遠藤浩(1998)ニハイチュウの系統的再検討(日本分子生物学年會プログラム講演要旨集, 21, p.343.)

## 動機と目的

昨年度の筆者らの研究で、  
①蠕虫型ニハイチュウの極帽は幼生ではすべて同じ円錐形であるが、極帽が円錐形の種は腎臓の窪みにのみ接着し、成長しても円錐形を維持する。  
②極帽が円盤形の種は平坦な場所のみ接着し、成長しても極帽は成長しないか途中で成長が止まり、極帽の形を円盤形に変形させる(図2)9)。  
→円盤形は円錐形のものよりも頭部が扁平で、平坦な場所での接着に適していると考えられている4)。なぜ極帽が円盤形のニハイチュウは窪みの中に入らずに、極帽の形状を変化させて平坦な場所に接着するのか明らかにする。

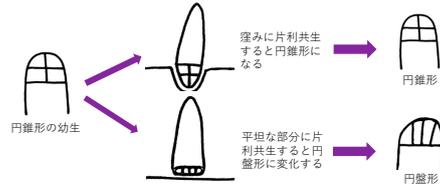


図2 ニハイチュウの極帽の場所による形態変化(岸上,2023を一部改変)

## 結果

- ①円盤形は円錐形のものよりも極帽が大きいとされてきたが、本研究の測定では有意差を示さなかった。また、腎臓表面の窪みは、2種類のニハイチュウの極帽に対して十分な大きさを持っていた(図5)。
- ②円錐形は24個体測定し、その平均は75μm/秒であった。円盤形は78個体測定し、その平均は63μm/秒であった。やや円錐形の方が遊泳速度に勝っているが、大きな差は認められなかった。

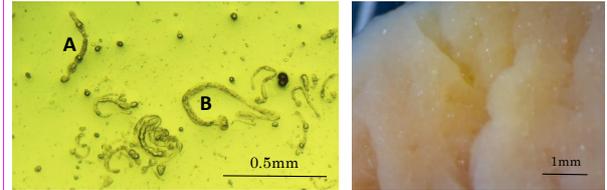


図5 円錐形ニハイチュウ(A)と円盤形ニハイチュウ(B)、腎臓表面の窪み(右)

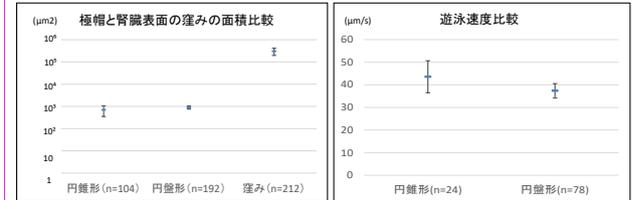


図6 ニハイチュウの極帽とマダコの窪みの断面積比較 図7 円盤形と円錐形のニハイチュウの遊泳速度比較

## 今後の課題

- ①円盤形と円錐形のニハイチュウは、現在形質の違いによって分類されている。ニハイチュウのDNA解析が難しいと聞くと、両者は遺伝子が異なる種なのかを確認する必要がある。
- ②円錐形のニハイチュウと底生頭足類の尿との関係を明らかにしていきたい。現在棲み分けの解明に向けて継続的に研究に取り組んでいる。

## 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専攻の古屋秀隆教授には、ニハイチュウについての基礎情報や観察方法について丁寧なご指導をいただいた。また本校科学部主顧問の川勝和哉主幹教諭には、終始有益な議論をしていただいた。ここに記して謝意を表す。



# @ High School

本研究は、日本農芸化学会2023年度大会（広島）における「ジュニア農芸化学会」（変更した発表は新型コロナウイルス感染症対策のためオンライン形式で実施）に応募された研究のうち、本誌編集委員会が優れた研究として選定した6題の発表のうちの一つです。

## 軟体動物の腎囊の生育場所による ニハイチュウの極帽形態の変化

兵庫県立姫路東高等学校科学部生物系研究部

岸上菜菜（顧問：川勝和哉）

ニハイチュウ（二胚動物門）は、底生頭足類の腎囊に片利共生する体長数mmの多細胞動物である。片利共生には蠕虫型と滴虫型の2タイプがあり、蠕虫型個体が腎囊に接着する頭部（極帽）の形状は腎囊表面の凹凸によって異なるとされている。蠕虫型ニハイチュウの極帽は幼生の段階ではすべて同じ円錐形であるが、極帽が円錐形の種は腎囊の窪みにのみ接着し、成長しても円錐形を維持した。一方、極帽が円盤形の種は平坦な場所のみ接着し、成長しても極帽は成長しなしか途中で成長が止まり、極帽の形が円盤形に変形した。幼生の段階では同じ表現型を示す別種の生物が、成長の過程で異なる表現型に移行する仕組みを明らかにするための基礎的な知見を得た。

本研究の目的・方法および結果と考察

### 【研究の背景と目的】

ニハイチュウは、底生頭足類の腎囊に片利共生する体長数mm、細胞総数22個前後の多細胞動物である。図1に腎囊表面に吸着するニハイチュウを示す。蠕虫型と滴虫型の2タイプがあり、蠕虫型ニハイチュウは尿とともに海中に排出されないよう、その極帽で腎囊表面に極帽で接着して離れないようにしている<sup>(1)</sup>。腎囊に接着する頭部（極帽）の形状は腎囊表面の凹凸によってさまざまに異なり、どのように極帽の形状を変えるのか解明されていない<sup>(1-8)</sup>。ニハイチュウは多細胞生物が退化して生まれたと考えられていることから、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とされている。ニハイチュウは体を構成する細胞数が減少する方向に進化したと考えられている<sup>(6)</sup>。

本研究は、蠕虫型ニハイチュウが接着した腎囊表面の場所と、極帽を構成する前極細胞と後極細胞の成長の違いを比較し、異なる形態の極帽が形成される過程を明らかにすることを目的にした。

### 【方法】

蠕虫型ニハイチュウは、極帽の形状によって、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、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（円盤形と帽子形の中間型）、今回発見した新種のツネキニハイチュウ（円盤形）の合計6種類のニハイチュウを研究材料として5~7月に教室で



図1 ■ 腎囊表面のニハイチュウ（綿のよう見える）

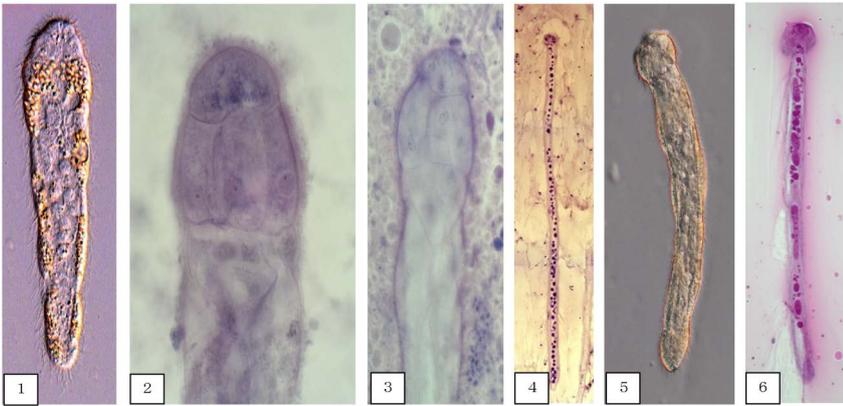


図2 ■ 観察したニハイチュウ (1, 4~6: 写真縦100  $\mu\text{m}$ , 2, 3: 50  $\mu\text{m}$ )

1: ミサキニハイチュウ, 2: マッコナギーニハイチュウ, 3: スベルニハイチュウ, 4: アオリイカニハイチュウ, 5: ヤマトニハイチュウ, 6: ツネキニハイチュウ.

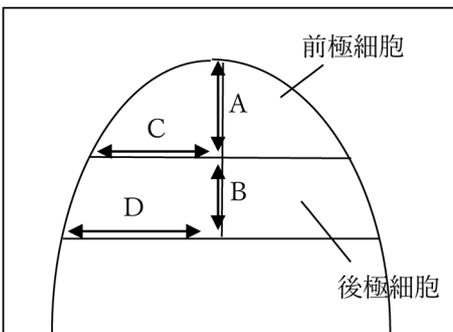


図3 ■ 極帽の大きさの測定部分 ( $\mu\text{m}$ )

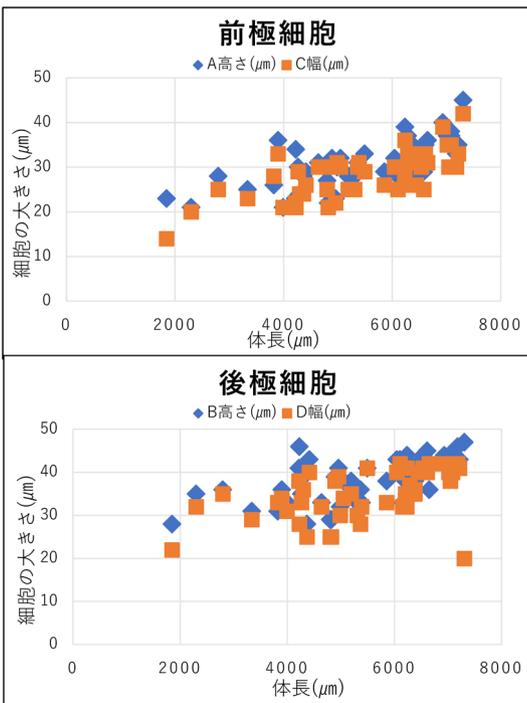


図4 ■ スベルニハイチュウの極帽の変化

採取した。

顕微鏡下でミズダコやクモダコ, マダコ, アオリイカの腎嚢を切開し, 表面にスライドガラスをこすりつけて

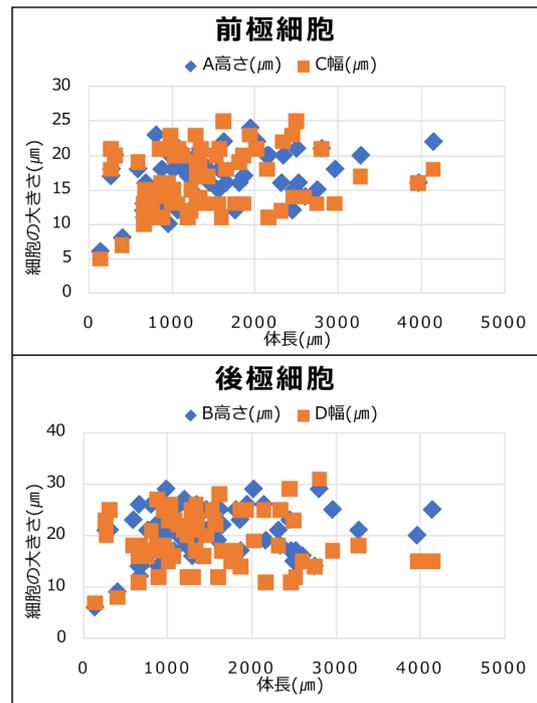


図5 ■ アオリイカニハイチュウの極帽の変化

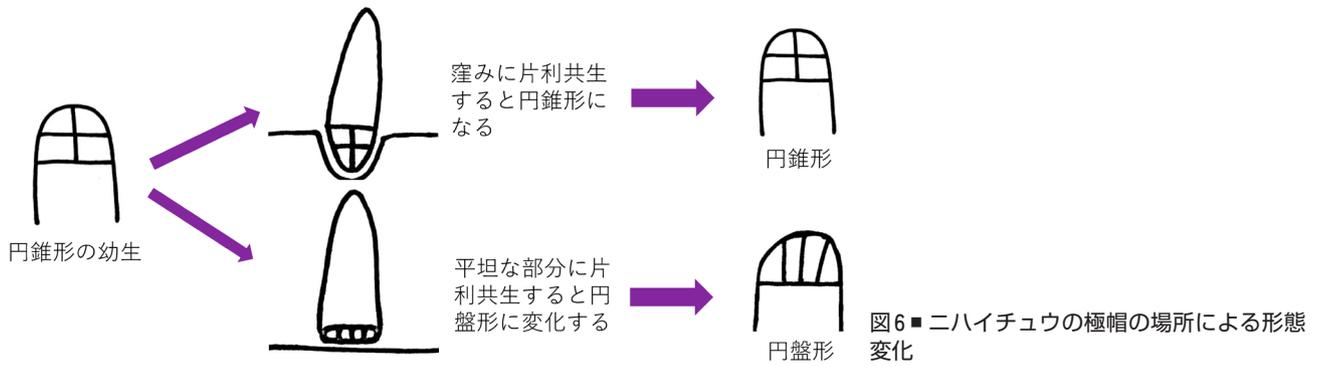
付着させ, プレパラートを作成した<sup>(9, 10)</sup>. 6種を各50個体収集し, 極帽をなす前極細胞と後極細胞の高さ (A, B) と幅 (C, D) (図3) をマイクロメーターで測定した。

**【結果】**

今回観察した6種類のニハイチュウは, 成長しても円錐形を保つ種と, 成長に伴い円盤形に変形する種に大別することができた。

成長しても円錐形のままの種は, ミサキニハイチュウ, マッコナギーニハイチュウ, スベルニハイチュウであった。ミサキニハイチュウとスベルニハイチュウは, 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った。マッコナギーニハイチュウの極帽はゆるやかに大きくなった (図4)。

一方, 成長すると円錐形から円盤形へ変化する種は,



アオリイカニハイチュウ、ヤマトニハイチュウ、ツネキニハイチュウであった。アオリイカニハイチュウとヤマトニハイチュウは成長しても、極帽の大きさはほとんど変化しなかった。ツネキニハイチュウは、はじめは体の成長とともに極帽も成長したが、体長800 $\mu\text{m}$ 前後で前極細胞、後極細胞ともに成長が止まった(図5)。

#### 【考察】

本研究で扱った6種のニハイチュウには、極帽の形状の違いで2パターンの形成過程が観察された。すべての種の極帽は幼生の時期には円錐形であるが、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った。ミズダコ、クモダコ、マダコ、アオリイカといった宿主の違いにかかわらず、極帽が円錐形の種は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っていた。一方、極帽が円盤形のものや一部帽子形の種は、平坦な部分に接着し、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ていた。

円錐形のニハイチュウと円盤形のニハイチュウでは遺伝子が異なっているとされている<sup>6)</sup>。幼生の段階で同じ表現型を示している円錐形と円盤形のニハイチュウの極帽形態が、接着場所によって変化するようすを図6にまとめた。

#### 本研究の展望と意義

本研究を行う中で、新たな疑問が生じた。極帽が円盤形のニハイチュウは円錐形のニハイチュウよりも頭部が大きく、平坦な場所での接着に適応しているように見える。しかし、腎囊の窪みはニハイチュウの大きさに対して十分大きいにもかかわらず、円錐形のニハイチュウが窪みを独占し、円盤形のニハイチュウは窪みの中に入ら

ずに、極帽の形状を変化させて平坦な場所に接着するのはなぜなのか、という疑問である。腎囊の窪みは腎細管の開口部であることから、円錐形と円盤形のニハイチュウで、底生頭足類の尿に対する反応が異なる可能性があるため、腎囊表面の分泌物を調べる必要がある。

また、円錐形のニハイチュウは円盤形のニハイチュウよりも運動能力が高く、より吸着しやすく共生生活にとって有利な窪みを優先的に独占できるのではないかとこの疑問もある。両者の運動能力の比較として、遊泳速度の測定を行いたい。

また、イカやタコの種によって、共生するニハイチュウの種が異なるのはなぜなのかについても、底生頭足類とそれに共生するニハイチュウの対応表を作成しようと考えている。

本研究の成果は、幼生の段階では同じ表現型を示す別種の生物が、成長の過程で異なる表現型に移行する仕組みを明らかにするための基礎的知見となる。

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専攻の古屋秀隆教授には、ニハイチュウについての基礎情報や観察方法について丁寧なご指導をいただきました。ここに記して謝意を表します。

#### 文献

- 1) 古屋秀隆：比較生理生化学会誌，**13**, 209 (1996).
- 2) 古屋秀隆：日本動物分類学会第38回大会講演抄録，2002.
- 3) 古屋秀隆：比較生理生化学会誌，**21**, 128 (2004).
- 4) 古屋秀隆：日本動物分類学会誌，**21**, 19 (2006).
- 5) 栗田ひろ子，能登朋子，遠藤 浩：原生動物学雑誌，**40**, 68 (2007).
- 6) 古屋秀隆：東レ科学振興会第52回事業報告書，2011, pp.70-71.
- 7) 古屋秀隆：日本動物分類学会誌，**48**, 1 (2020).
- 8) 古屋秀隆：日本動物分類学会誌，**48**, 3 (2020).
- 9) 越田 豊：日本科学教育学会年会論文集，**6**, 145 (1982).
- 10) 能登朋子，山口正晃，遠藤 浩：日本分子生物学会年会プログラム講演要旨集，**21**, 343 (1998).

日本学生科学賞兵庫県大会で兵庫県教育長賞を得て中央審査会に進んだ作品です。

マグマ分化末期の熱水残液の循環  
—角閃石から発見した波状累帯構造を基に—

兵庫県立姫路東高等学校 科学部地学系研究部  
陰山 麻愉 松田 理沙 藤田 詩桜

## 1. 要旨、概要

西南日本内帯の磁鉄鉱系列山陰帯の花崗岩類の研究によって、深成岩類の角閃石に発達している波状累帯構造は、サブソリダス過程における熱水残液の循環による再平衡によって形成されたことが明らかにされている。一方、山陰帯と対をなすチタン鉄鉱系列山陽帯の花崗岩類の角閃石からは、これまで波状累帯構造が発見されておらず、角閃石の波状累帯構造がマグマの脱水と発泡の指標として一般に使えるのかについての議論ができなかった。

今回筆者らは、山陽帯揖保川花崗閃緑岩の角閃石から、明瞭な波状累帯構造を発見し、EPMA を用いた化学分析を行い、山陰帯大東—横田石英閃緑岩の先行研究を参考にして、山陽帯と山陰帯のマグマ分化末期の環境を比較した。

揖保川花崗閃緑岩の自形～半自形角閃石の波状累帯構造は、コアからリムにわたって広い範囲に不整合的な形状で発達しており、結晶の内側から外側に向かって c 軸方向に発達している。波状累帯構造は磁鉄鉱の自形結晶と共存しており、マグマ過程末期にはマグマの脱水と発泡が起こり、酸化的环境になったと考えられる。角閃石は、形成された熱水残液の循環によって広範囲に再平衡し、淡緑色リム部が結晶の外側から形成されるとともに、角閃石のコア部付近からリム部に向かって波状累帯構造を形成した。山陰帯大東—横田石英閃緑岩の角閃石の波状累帯構造は、早期にマグマの脱水と発泡が起こった後、酸化的环境で流体相の度重なる循環によって淡緑色リムが形成され、その過程で結晶外側から波状累帯構造が形成されたと考えられている。

マグマ分化当初には、山陽帯は還元的环境であり、山陰帯は酸化的环境であったと考えられているが、いずれもマグマ分化末期には酸化的环境となり、熱水残液の循環が起こったと考えられる。このように、波状累帯構造はマグマの脱水と発泡の指標となる。

## 2. 問題提起、研究目的

### (1) 角閃石の波状累帯構造とは何か (山陰帯における先行研究のまとめとともに)

角閃石の波状累帯構造は変成岩類ではよく知られているが、深成岩類の角閃石の波状累帯構造は、山陰帯大東—横田石英閃緑岩の角閃石からの報告が最初であった (Kawakatsu and Yamaguchi, 1987a)。本研究では、変成岩類ではなく深成岩類の角閃石の波状累帯構造の比較を行う。

山陰帯大東—横田石英閃緑岩の角閃石の波状累帯構造は、マグマ分化末期の熱水残液の循環によって、既に結晶化した角閃石のリム部が二次的に置換されて形成される、結晶の c 軸方向に幅数 $\mu\text{m}$ 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熱水残液の循環で再平衡して形成されたとされている (Kawakatsu and Yamaguchi, 1987a)。熱水残液の循環は、マグマに含まれる  $\text{H}_2\text{O}$  の脱水と発泡によって起こるとされている (Kennedy, 1955)。Kawakatsu and Yamaguchi (1987b) らの先行研究によると、

山陰帯大東一横田石英閃緑岩では、豊富な熱水残液が数度にわたって循環した結果、角閃石に広範囲に波状累帯構造が発達しており、そのイオン置換は、酸化環境下で起こる Tschermakite 型が主であり、イオン平衡を保つために Edenite 型なども補助的に起こっている。これらは Finnmarka Complex (Czamanske and Wones, 1973) や多くの porphyry Copper を胚胎する花崗岩体 (Mason, 1978、Chivas, 1981、Hendry et al., 1981) に共通した特徴であり、高い酸素分圧条件下で結晶化したことを示している。

## (2) 問題提起

西南日本内帯は、岩石の化学組成や構成鉱物、帯磁率、放射年代などの特徴によって、北部から南部に向かって、磁鉄鉱系列の山陰帯、チタン鉄鉱系列の山陽帯、領家帯に三分される (Ishihara, 1971、Ishihara, 1981、Murakami, 1974、飯泉ほか, 1985)。山陰帯の花崗岩類については、マグマの累進的酸化過程が多く発表されている (野口ほか, 2021 など)。また、先山・田中 (1984) は、山陰帯の花崗岩類中の角閃石のコアとリムからなる単純な累帯構造を研究し、マグマ過程早期に角閃石が晶出した場合と輝石が晶出した後角閃石の晶出に移行した場合で、角閃石の累帯構造の特徴 (特に  $\text{SiO}_2$  に対する  $\text{Al}_2\text{O}_3$  の割合) が異なることを示した。さらに山口 (1984) は、角閃石の単純な累帯構造からマグマ分化過程末期の累進的酸化環境を推定している。一方、山陽帯の花崗岩類については、田結庄 (1986) などのマグマ結晶作用についての報告があるが、角閃石についての詳細な研究はあまりない。

2019 年以降、兵庫県立姫路東高等学校科学部は、西南日本内帯の山陽帯白亜紀一古第三紀相生層群に属し (兵庫県, 2017)、兵庫県南部の 1 級河川である揖保川の上流～中流に点々と小岩体として分布する揖保川花崗閃緑岩の角閃石に着目して研究を行っている。姫路市の揖保川花崗閃緑岩の角閃石から、微弱な波状累帯構造様の微細構造の発見を報告したが (兵庫県立姫路東高等学校科学部, 2019、兵庫県立姫路東高等学校科学部, 2021)、光学的な干渉によるなど錯覚の可能性があるとの指摘を受け、その存在は認められなかった。

2023 年 3 月以降、筆者らはいったん頓挫していた研究を再開し、明確な角閃石の波状累帯構造の発見を目指し、波状累帯構造の存在を信じて黙々と研究を続けた。筆者らが角閃石の波状累帯構造に着目したのは、① 先行研究で、山陰帯深成岩の角閃石の波状累帯構造がマグマ分化過程末期の環境を示す有効な指標であることが知られていること、② EPMA (Electron Probe Micro Analyzer) による化学分析によって、環境による (酸化的か還元的か) 角閃石の波状累帯構造の組み合わせ置換のパターンが明らかにされていること、③ 山陰帯の花崗岩類の角閃石の波状累帯構造についての研究が進んでいる一方、山陽帯の花崗岩類の角閃石からはまだ波状累帯構造が発見されておらず、山陽帯での波状累帯構造の発見によって、波状累帯構造に関する比較研究が可能になることの理由によった。

## (3) 研究目的

山陰帯と山陽帯の花崗岩類のマグマ分化過程に関する研究は多く発表されており、山陰帯は酸化的、山陽帯は還元的環境で形成されたことが知られている。一方、マグマ分化末期の熱水残液が循環するステージの環境については、山陰帯で角閃石の波状累帯構造を指標として用いて、累進的酸化環境にあったことが示されているが、山陽帯では角閃石の波状累帯構造が発見されていなかったことから、波状累帯構造が熱水残液循環の指標として使えるのかどうかや、波状累帯構造に基づいた山陽帯のマグマ分化末期の熱水残液の循環に関する研究はほとんどなされてこなかった。

筆者らは、①山陽帯花崗岩類の角閃石から明瞭な波状累帯構造を発見し、②波状累帯構造からマグマ分化末期の環境を明らかにして、山陰帯大東－横田石英閃緑岩の波状累帯構造に関する先行研究と比較して、マグマ分化末期の環境を検討することと、③波状累帯構造が熱水残液循環の指標として有効なのかどうかを検証することを目的に研究を行った。

### 3. 研究方法

#### (1) 地質調査と岩石試料

兵庫県南西部を南北に流れる1級河川の揖保川上流～中流地域(図1)の露頭調査を行い、地質図を作成した。また、分布する花崗閃緑岩の試料を6地点から各3個ずつ採取した。

#### (2) 揖保川花崗閃緑岩の角閃石の記載

採取した試料のすべての研磨薄片を作成した。Nikon社製ECLIPSE Ci POL偏光顕微鏡を用いてほぼ1か月間、毎日2時間観察を行い、その結果を基にして山陰帯との比較を行った。

#### (3) 角閃石のEPMA分析

京都大学理学部の協力を得て、2023年8月2日～3日に筆者ら自身でEPMA分析を行った。JEOL社EPMA(JXA-8105)を用いて反射電子線像を撮影した後、波状累帯構造の点分析と、波状累帯構造をもつ角閃石の面分析を行った(図2)。その結果を基にしてイオン置換のパターンを推定した。



図1 本研究の調査地域(楕円の地域)  
(d-maps.com, 2023 に加筆)

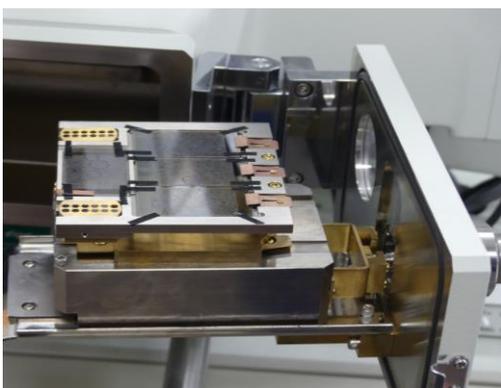


図2 真空炭素蒸着を行った薄片試料(左)とEPMA分析の実施(右/京都大学理学部 JEOL JXA-8105)

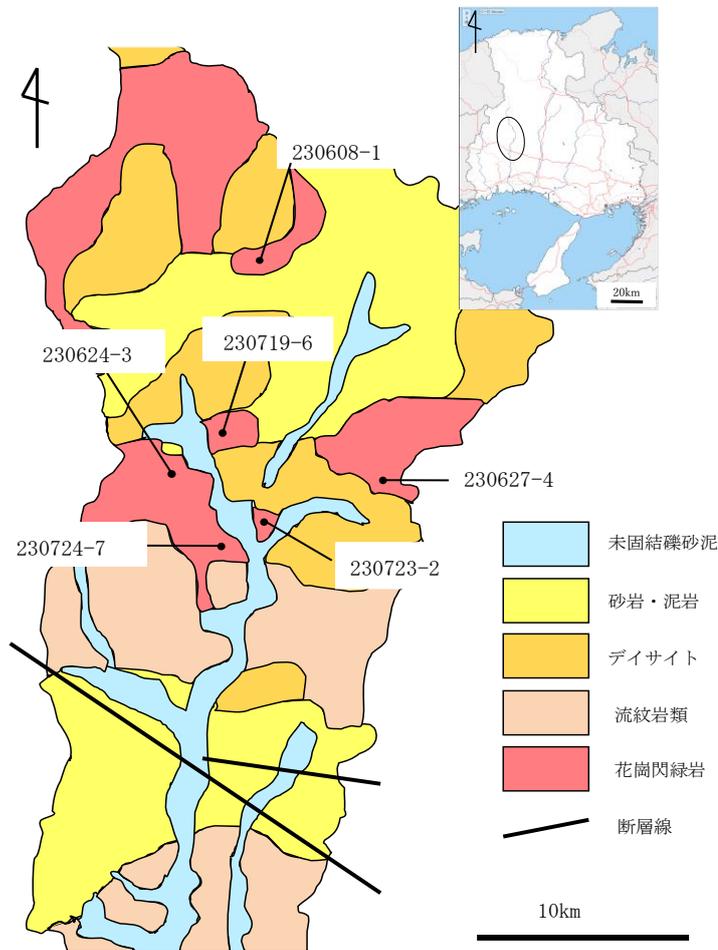


### 4. 結果

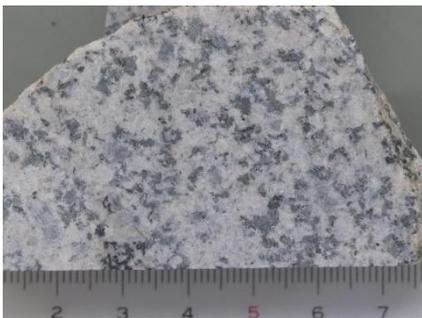
#### (1) 地質概説と岩石試料

地質調査を行い、先行研究（兵庫県立姫路東高等学校科学部, 2021）を参考にして、新たに地質図を作成した（[図3](#)）。本地域にはデイサイトー流紋岩類が広く分布しており、それらを貫いて白亜紀後期の花崗閃緑岩が点々と島状に露出している。これらのうち、宍粟市一宮町の6地点から揖保川花崗閃緑岩の試料を各3個ずつ採取した（[図3](#)）。

揖保川花崗閃緑岩は比較的新鮮で、試料 230723-2 や 230724-7 においては、直径 3~5cm 程度の角閃石を中心とした有色鉱物の集合体が点在している。主な有色鉱物は最大 5mm 程度の角閃石であり、無色鉱物は、最大長 10mm 程度の斜長石と 3mm 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 4.1、斜長石 58.5、角閃石 12.8、その他、磁鉄鉱、ジルコン、燐灰石、黒雲母、スフェーンなどである。有色鉱物の集合体をもつ花崗閃緑岩の角閃石には、波状累帯構造がよくみられる。[図4](#)~[図6](#)に波状累帯構造を持つ角閃石が複数発見された、代表的な揖保川花崗閃緑岩試料の写真を示した。



[図3](#) 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 をもとに新たに作成）



[図4](#) 花崗閃緑岩 (230719-6)



[図5](#) 花崗閃緑岩 (230723-2)



[図6](#) 花崗閃緑岩 (230724-7)

(2) 揖保川花崗閃緑岩の角閃石の記載

角閃石は自形～半自形で、コアと淡緑色リムからなり、淡緑色リム部にもコア部にも、幅1 $\mu\text{m}$ 程度の帯が波状に重なる波状累帯構造が、結晶の成長方向に形成されている(図7～図15の楕円で囲った部分)。波状累帯構造は自形～半自形の磁鉄鉱と共存していることが多い(図7、図9)。波状累帯構造は、長柱状方向に切片が作成された角閃石のリム部には比較的好くみられる。

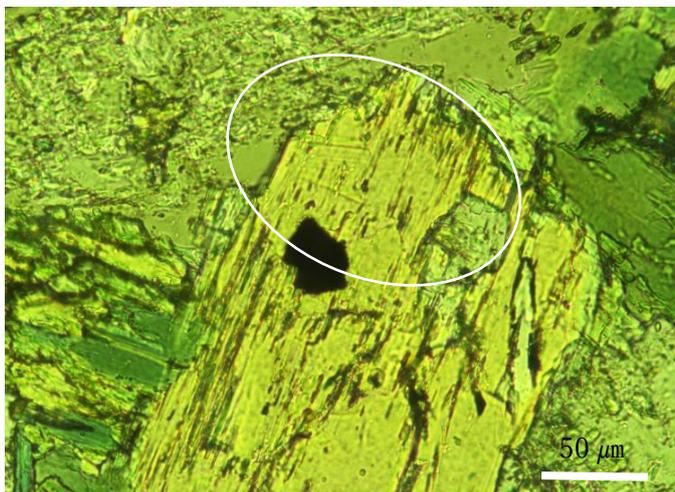


図7 試料 230608-1 (オープンニコル 400倍)

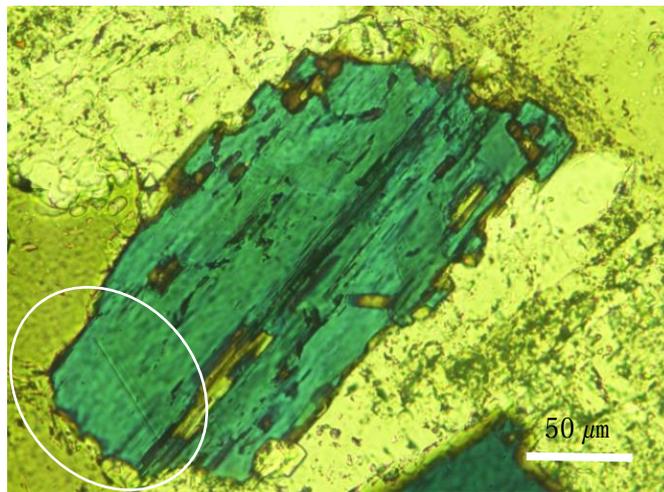


図8 試料 230624-3 (オープンニコル 400倍)

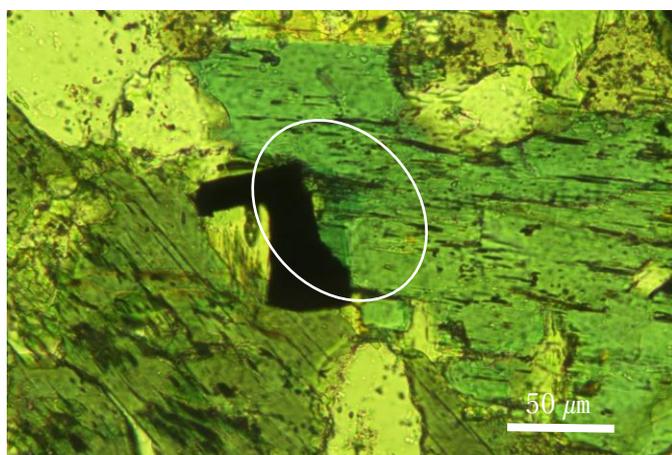


図9 試料 230627-4 (オープンニコル 400倍)

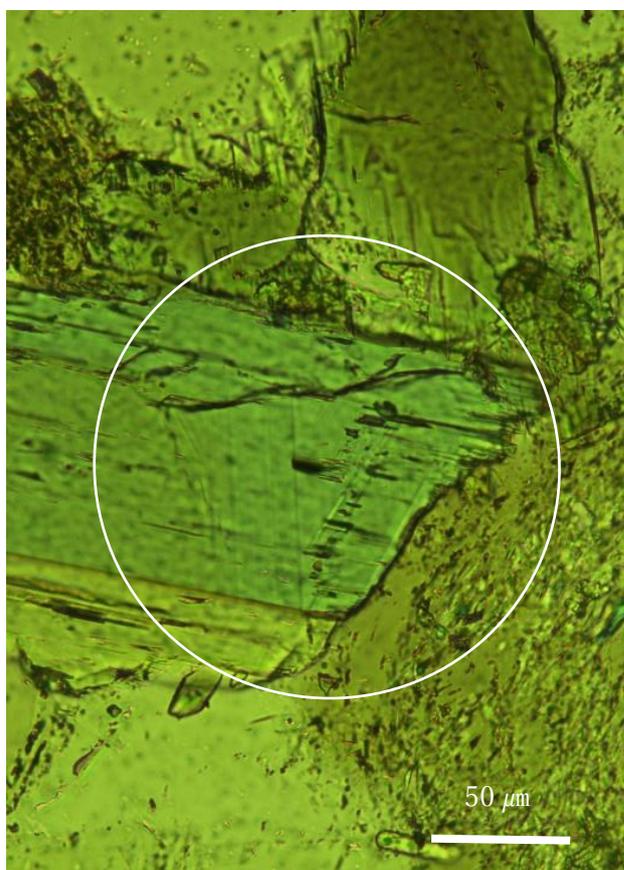


図10 試料 230719-6 (オープンニコル 400倍)

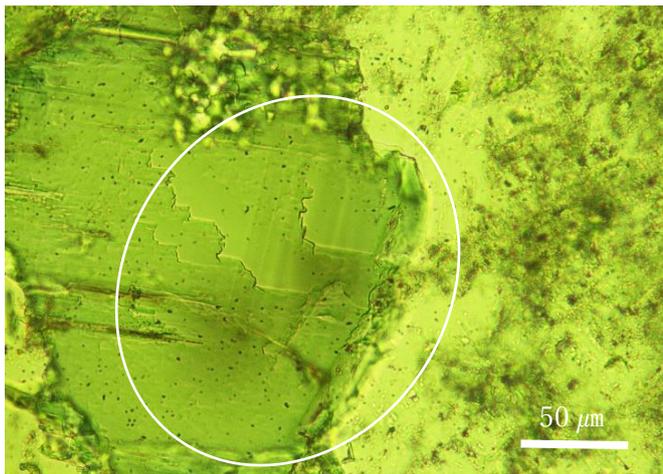


図 11 試料 230724-7 (オープンニコル 400 倍)

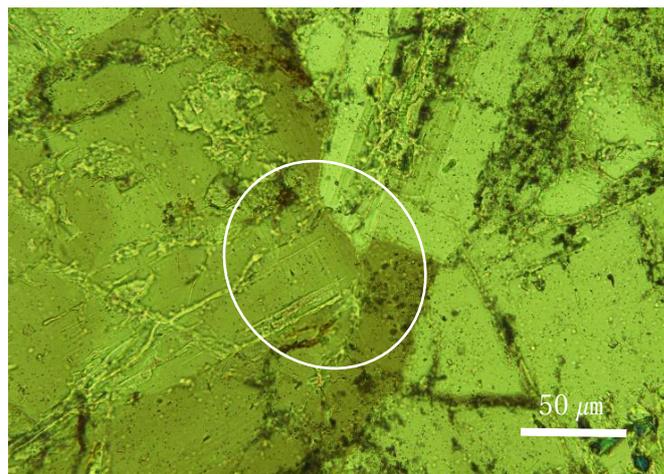


図 12 試料 230723-2 (オープンニコル 400 倍)

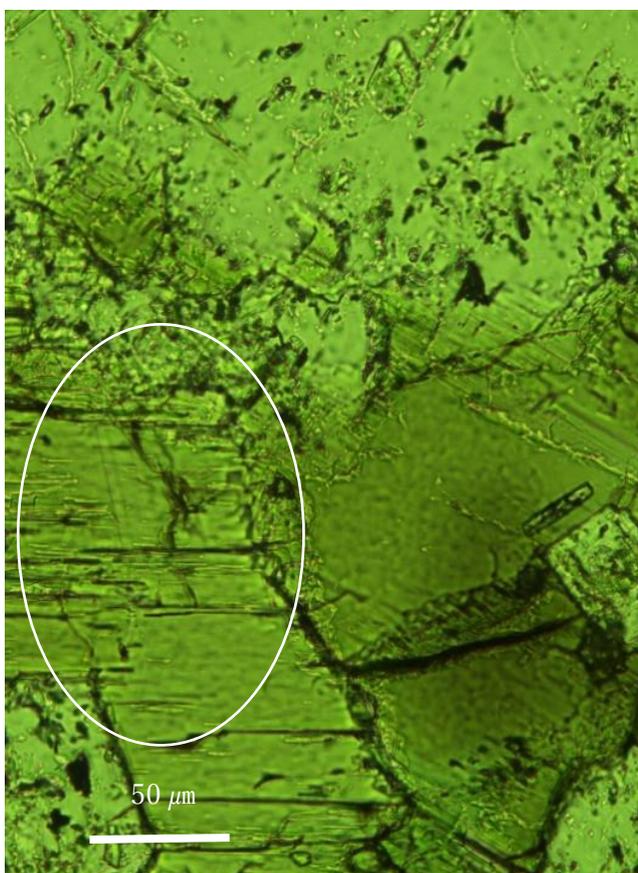


図 13 試料 230723-2 (オープンニコル 400 倍)

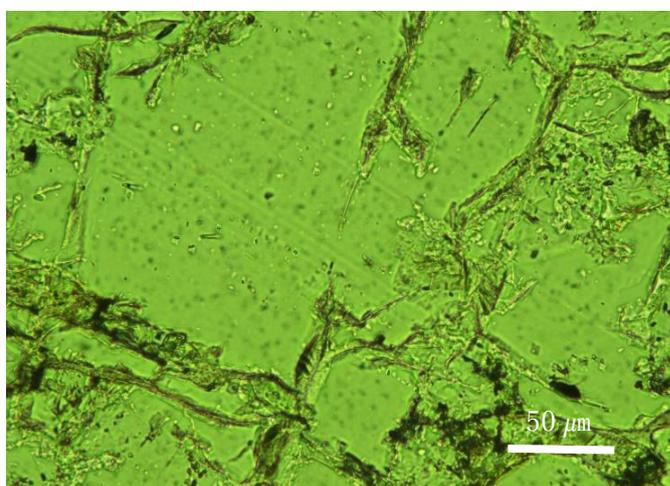


図 14 試料 230723-2 (オープンニコル 400 倍)

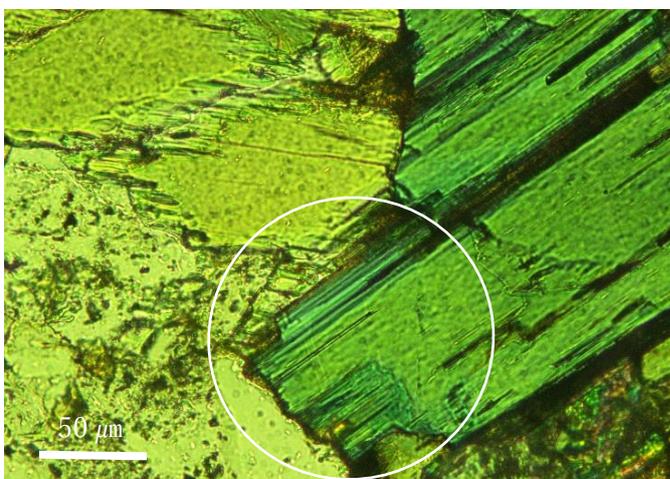


図 15 試料 230723-2 (オープンニコル 400 倍)

### (3) 角閃石の EPMA 分析

角閃石の反射電子線像を図 16～図 22 に示す。1 本の幅が 1～3  $\mu\text{m}$  の波状累帯構造は、コア付近から淡緑色リム部まで c 軸方向に発達している。図 19 の角閃石の波状累帯構造は、外側の波状累帯構造が内側のそれに切られるような、不整合的な形状をしている。揖保川花崗閃緑岩の角閃石は、このような形状を見せるものが多い。図 20 の角閃石には、再平衡による二次的に形成された離溶ラメラが、図 22 には、コアと淡緑色のリム間に反応線が見られる。

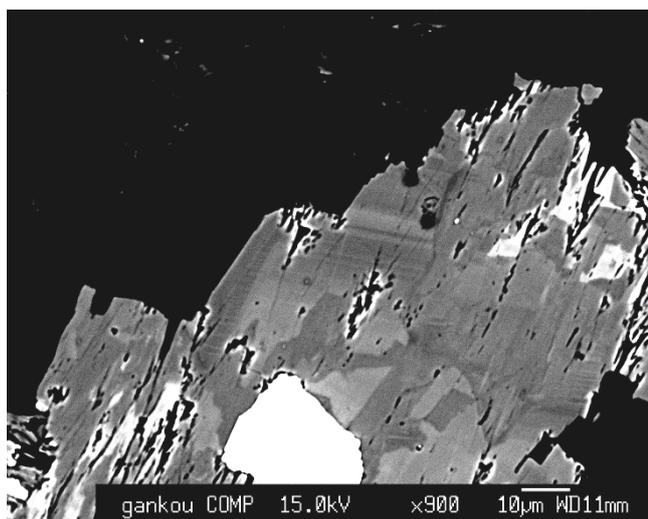


図 16 反射電子線像 (図 7 の試料 230608-1)

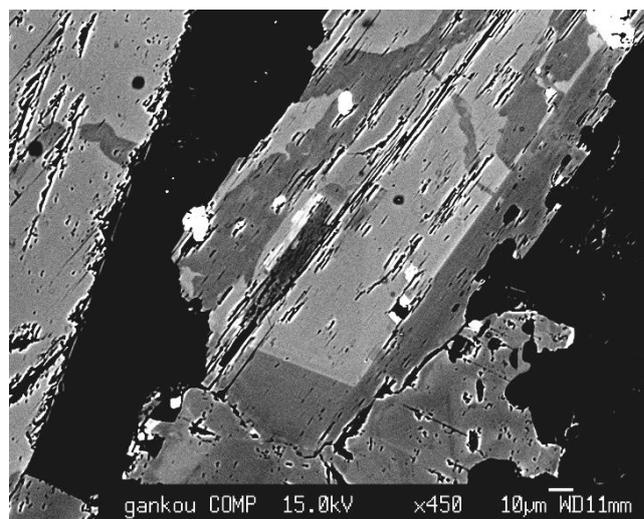


図 17 反射電子線像 (図 8 の試料 230624-3)

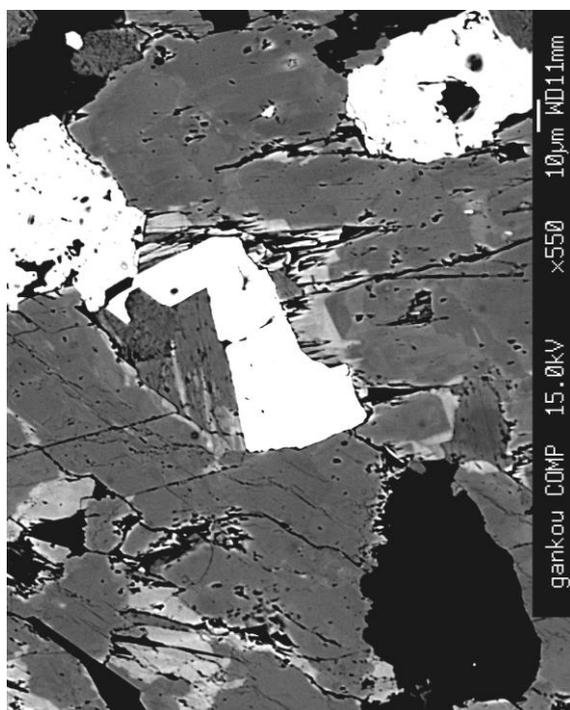


図 18 反射電子線像 (図 9 の試料 230627-4)

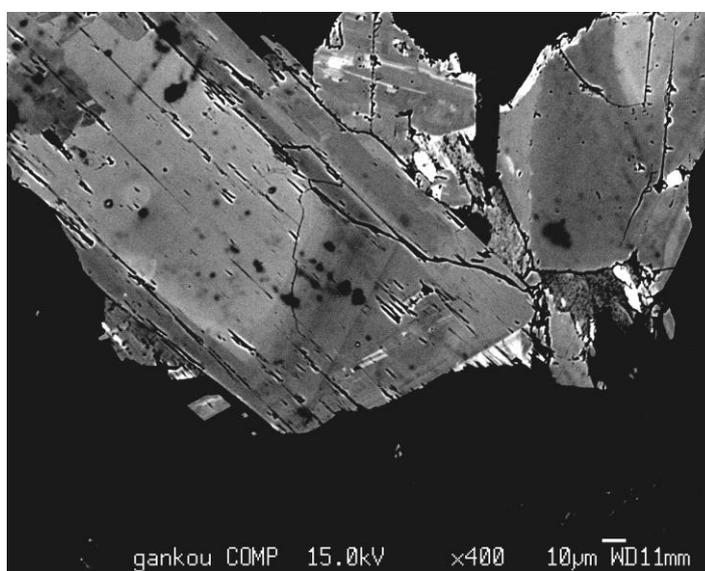


図 19 反射電子線像 (図 10 の試料 230719-6)

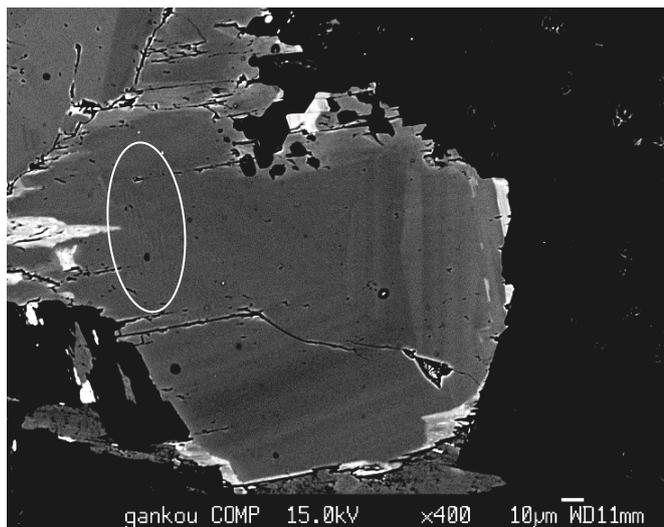


図 20 反射電子線像 (図 11 の試料 230724-7)  
(楕円で示す部分に離溶ラメラ構造が見える)

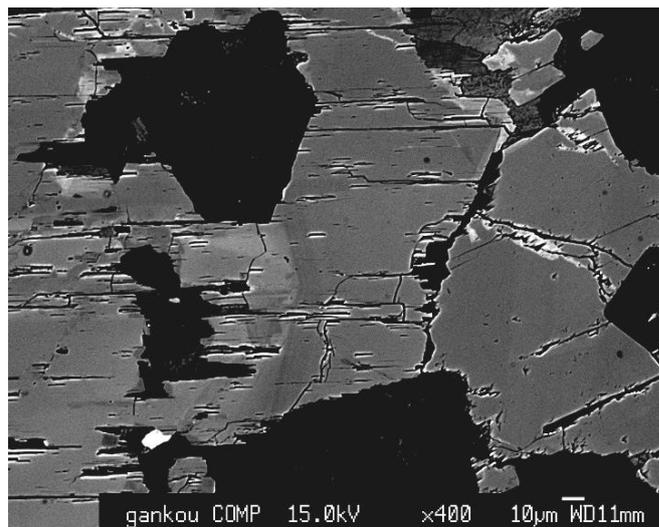


図 21 反射電子線像 (図 13 の試料 230723-2)

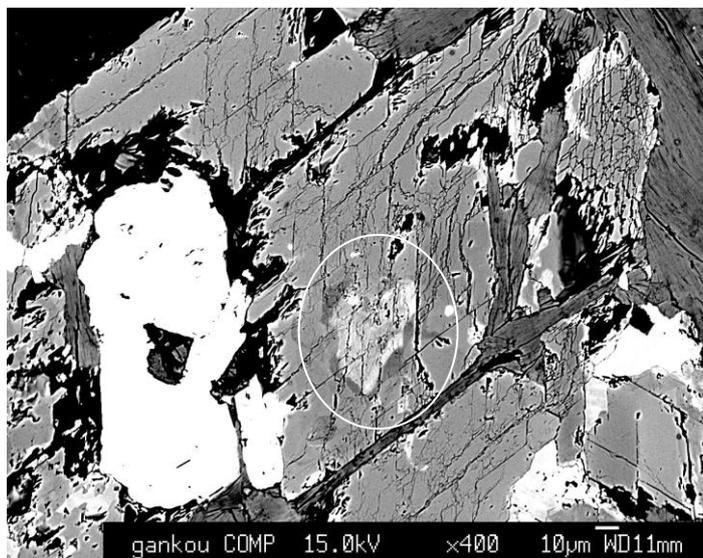


図 22 試料 230724-7 に見られるコアと淡緑色のリム間の反応線 (楕円の部分)

組成を分析した点を図 23～図 27 に示す。点分析は、15.0kV、 $6 \times 10^{-8}$ A、ビーム径  $3 \mu\text{m}$  の条件で行った。

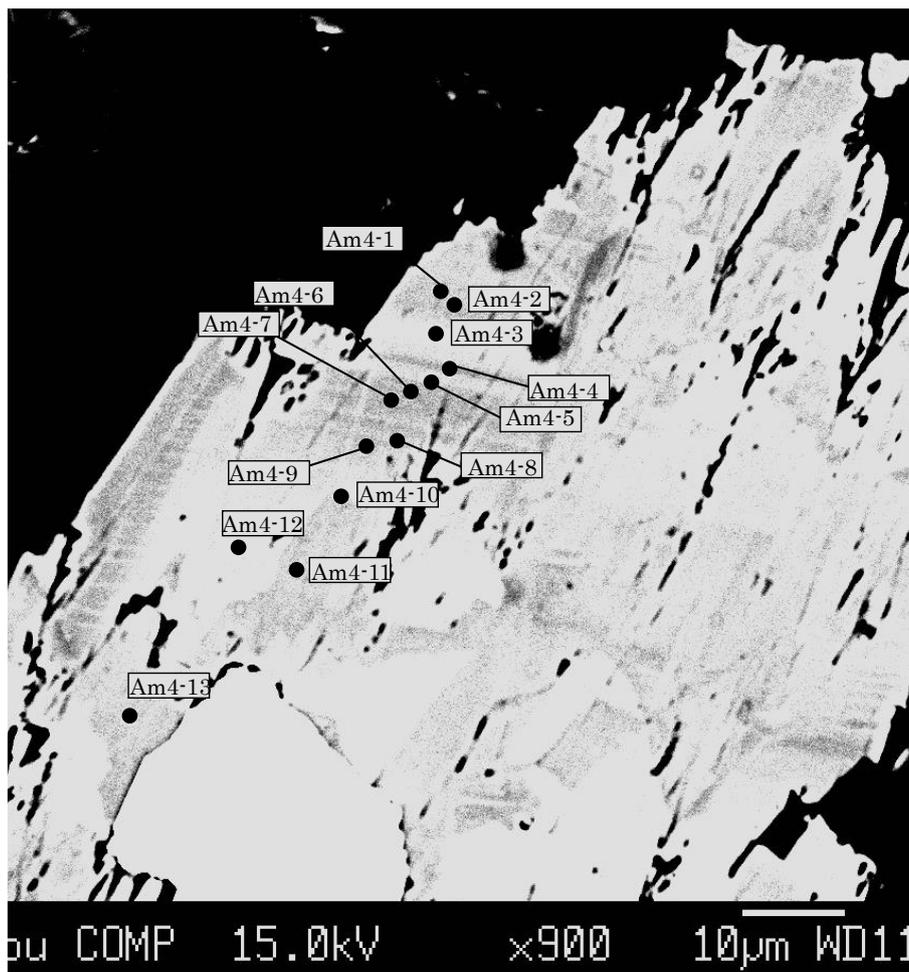


図 23 反射電子線像 (図 16 の試料 230608-1)

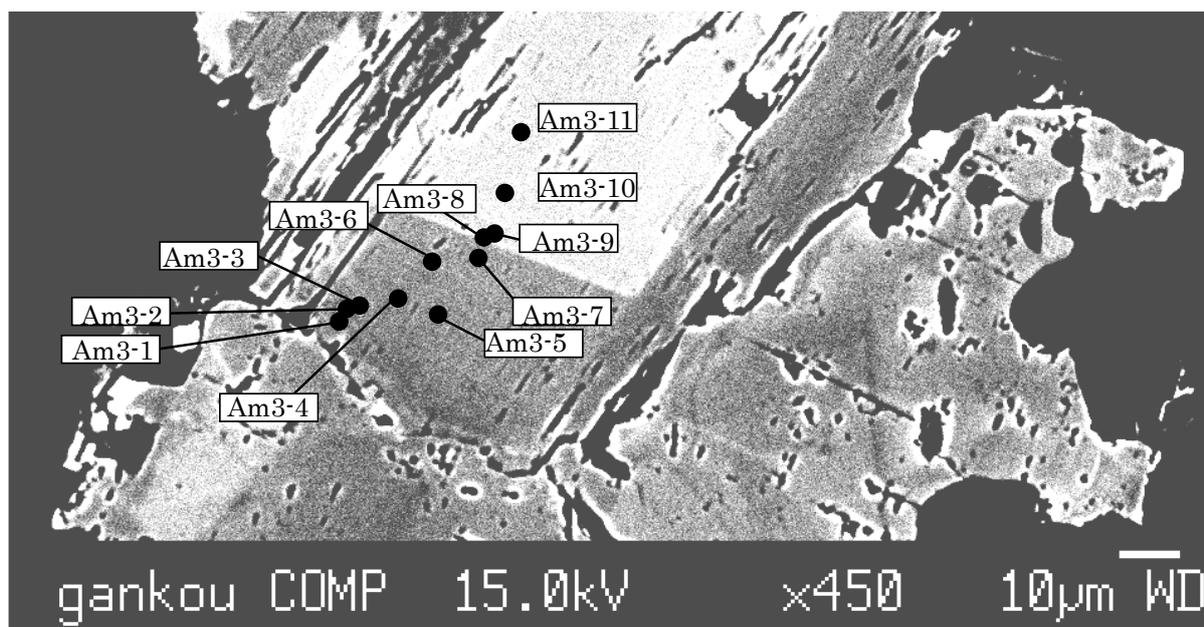


図 24 反射電子線像 (図 17 の試料 230624-3)

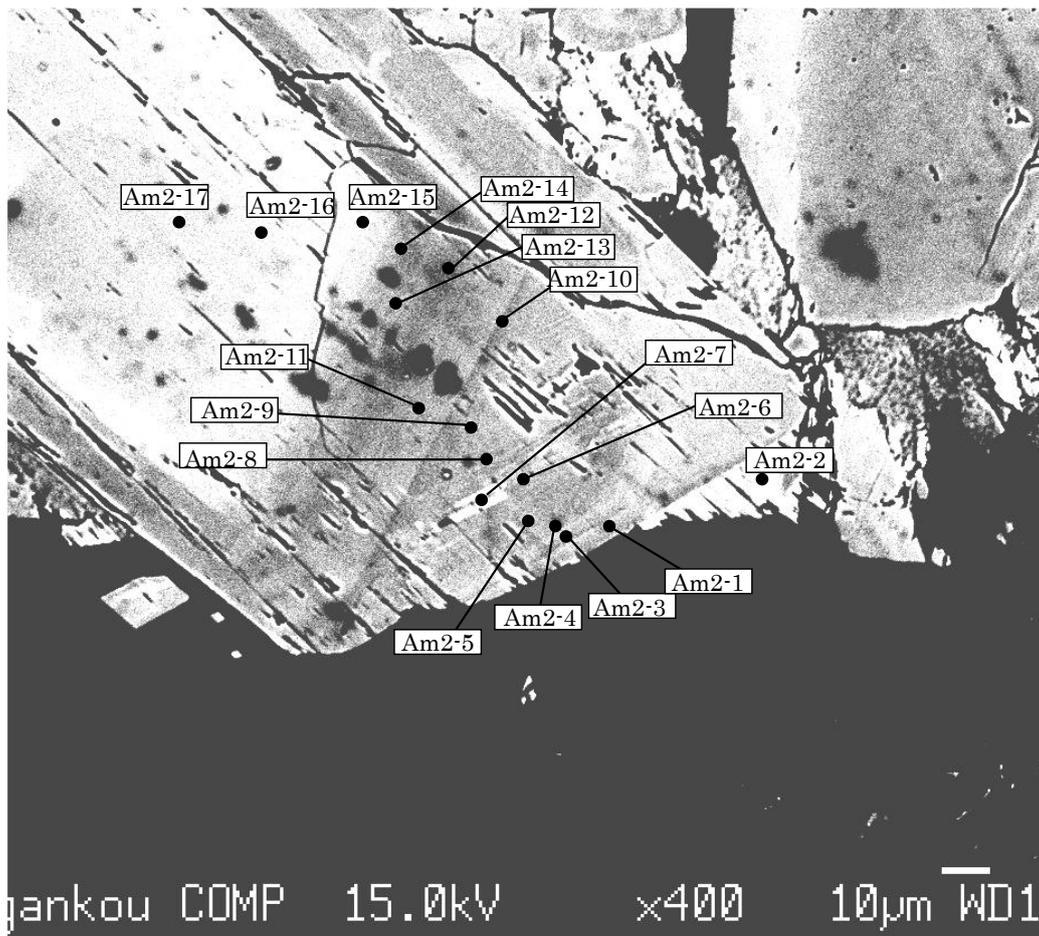


図 25 反射電子線像 (図 19 の試料 230719-6)

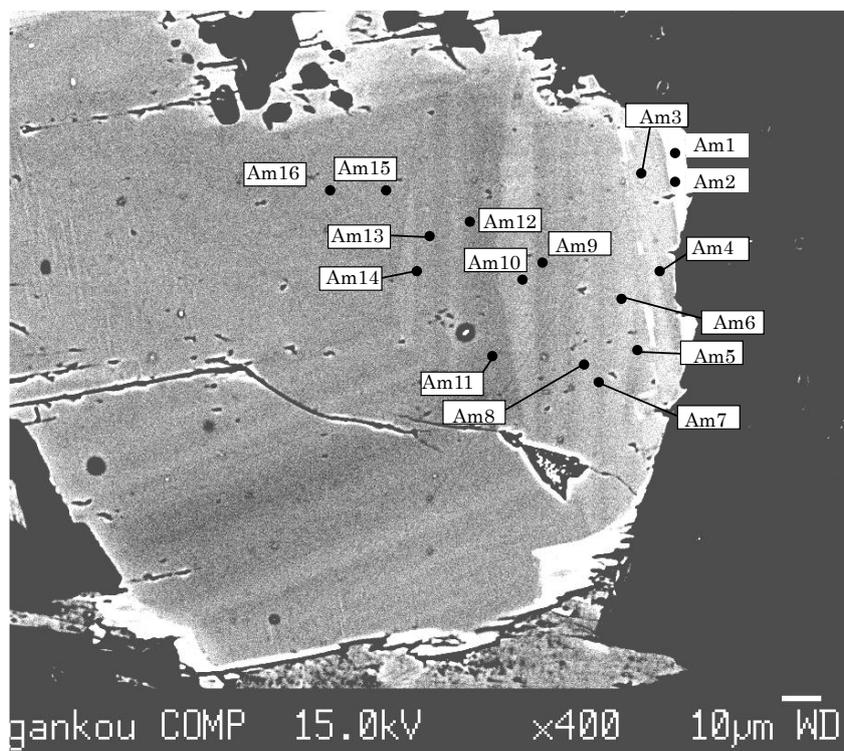


図 26 反射電子線像 (図 20 の試料 230724-7)

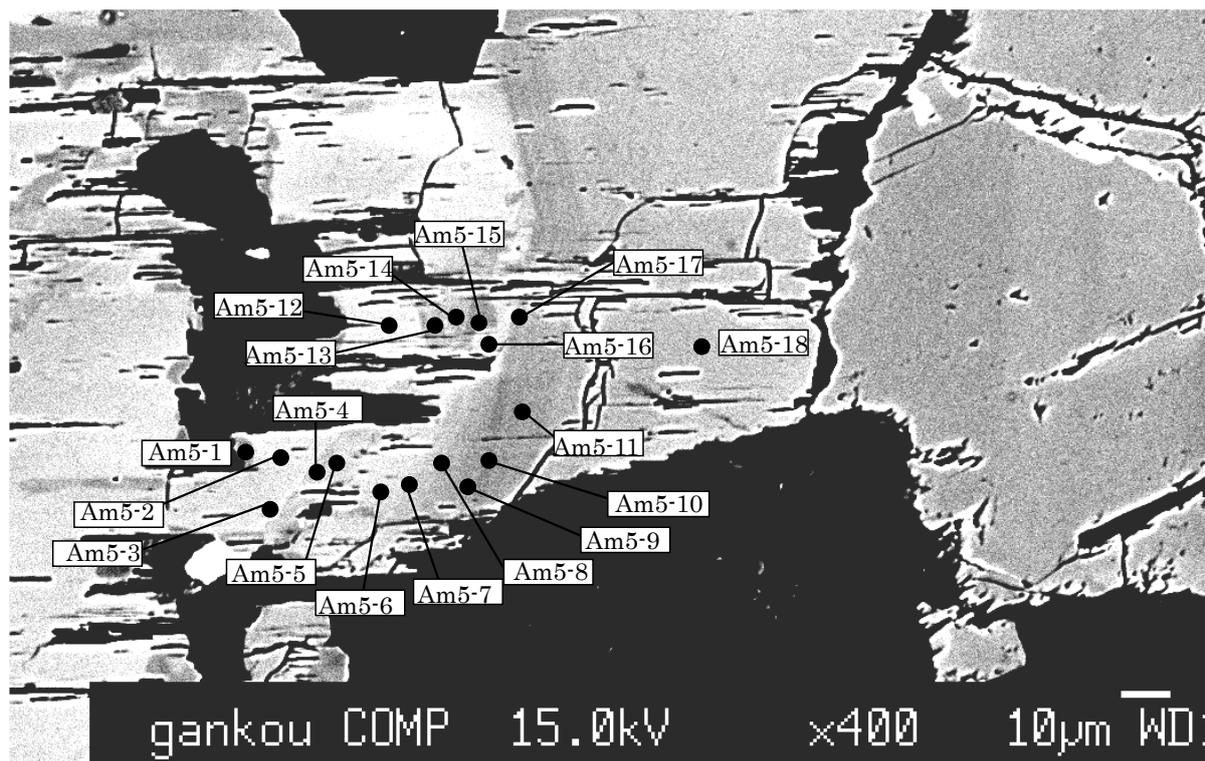


図 27 反射電子線像 (図 21 の試料 230723-2)

点分析の結果は Holland and Blundy (1993) に基づいて計算し、表 1 および図 28 に示した。また波状累帯構造部分の角閃石の mg-Si 図を図 29 に示した。mg 値は、Leak (1968) による角閃石の分類に用いる指標で、 $Mg / (Mg + Fe_{Total})$  の値である。グラフにプロットすると、波状累帯構造部分は、主に Actinolitic hornblende ~ Actinolite (一部 Magnesian hornblende) の間で波状に組成が変化している。

表 1 角閃石の波状累帯構造の EPMA 分析による化学組成

① 図 23 (図 16) の試料 230608-1

sample	Am4-1	Am4-2	Am4-3	Am4-4	Am4-5	Am4-6	Am4-7	Am4-8	Am4-9	Am4-10	Am4-11	Am4-12	Am4-13
SiO2	51.037	51.017	49.267	49.798	50.71	51.694	51.084	51.226	50.707	53.155	51.979	48.556	51.988
TiO2	0.477	0.804	0.744	0.298	0.775	0.567	0.06	0.268	0.506	0.06	0.357	1.246	0.416
Al2O3	3.978	3.865	5.652	5.357	4.729	4.201	4.076	4.247	4.332	1.938	2.957	5.799	2.639
Cr2O3	0.059	0.05	0.059	0	0.012	0.073	0.005	0.026	0.026	0	0.042	0.073	0
FeO	12.627	13.322	13.872	13.677	13.036	12.648	12.373	12.869	13.46	13.615	13.993	14.646	13.609
MnO	0.459	0.51	0.377	0.398	0.286	0.398	0.214	0.429	0.448	0.662	0.489	0.264	0.621
MgO	15.385	15.385	14.558	14.904	15.12	15.839	15.478	15.275	15.62	15.867	14.963	13.934	15.325
CaO	10.71	11.016	11.292	11.3	11.291	11.307	10.9	11.137	11.253	11.348	11.57	11.28	11.072
BaO	0.022	0	0.037	0	0	0.052	0	0.096	0.022	0	0	0.17	0
Na2O	1.036	0.932	1.16	1.318	1.071	0.978	0.893	0.965	1.114	0.418	0.595	1.374	0.706
K2O	0.305	0.241	0.431	0.449	0.312	0.348	0.365	0.318	0.272	0.14	0.162	0.446	0.184
F	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.045
Cl	0.244	0.248	0.262	0.205	0.153	0.152	0.151	0.145	0.136	0.101	0.106	0.163	0.166
Total	96.339	97.39	97.711	97.704	97.495	98.257	95.599	97.001	97.896	97.304	97.213	97.951	96.771
T-sites													
Si	7.502503	7.449872	7.224301	7.286895	7.382756	7.450252	7.538849	7.485367	7.319143	7.69656	7.558083	7.143386	7.631363
Aliv	0.497497	0.550128	0.775699	0.713105	0.617244	0.549748	0.461151	0.514633	0.680857	0.30344	0.441917	0.856614	0.368637
total	8	8	8	8	8	8	8	8	8	8	8	8	8
M1,2,3 sites													
Alvi	0.191698	0.115052	0.201083	0.210758	0.194184	0.163827	0.24779	0.216777	0.056091	0.027282	0.06483	0.148858	0.087919
Ti	0.052752	0.088326	0.082075	0.032806	0.084884	0.061477	0.006661	0.029462	0.054947	0.006536	0.039053	0.137905	0.04594
Fe3+	0	0	0	0	0	0	0	0	0.357487	0.221491	0.263164	0	0
Mg	3.371531	3.349191	3.182365	3.251187	3.281597	3.403041	3.405207	3.327457	3.361104	3.424963	3.243478	3.055945	3.353575
Mn	0.05715	0.06308	0.046824	0.049329	0.035268	0.048585	0.02675	0.053096	0.054772	0.081189	0.060225	0.032897	0.07721
Fe2+	1.326869	1.38435	1.487654	1.45592	1.404067	1.323071	1.313592	1.373208	1.1156	1.23854	1.32925	1.624396	1.435355
Ca	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
total	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5
M4 site													
Fe	0.22548	0.242589	0.213513	0.217826	0.183154	0.201406	0.213493	0.199455	0.151734	0.188657	0.109206	0.177577	0.235325
Ca	1.686878	1.723578	1.774123	1.771667	1.761288	1.746029	1.723534	1.743669	1.740339	1.760536	1.802562	1.778048	1.741399
Na	0.087642	0.033833	0.012364	0.010507	0.055558	0.052565	0.062973	0.056876	0.107927	0.050807	0.088232	0.044375	0.023276
total	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2
A site													
Ca	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Na	0.207633	0.230041	0.317431	0.363425	0.246758	0.22072	0.192543	0.216523	0.203835	0.066541	0.079513	0.347542	0.177657
K	0.057198	0.044896	0.080626	0.083818	0.057948	0.063984	0.068718	0.05928	0.050086	0.025861	0.030051	0.083706	0.034457
Sum A	0.264831	0.274937	0.398057	0.447243	0.304706	0.284704	0.261261	0.275803	0.253922	0.092402	0.109564	0.431248	0.212113
OH site													
O	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
OH	1.939212	1.938625	1.93489	1.949162	1.962249	1.962874	1.962234	1.964091	1.96647	1.975095	1.973728	1.95936	1.937813
F	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.02
Cl	0.06	0.06	0.07	0.05	0.04	0.04	0.04	0.04	0.03	0.02	0.03	0.04	0.04
total	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2

② 図 24 (図 17) の試料 230624-3

sample	Am3-1	Am3-2	Am3-3	Am3-4	Am3-5	Am3-6	Am3-7	Am3-8	Am3-9	Am3-10	Am3-11
SiO2	52.151	51.767	51.353	51.172	51.101	52.121	50.796	48.457	48.724	48.725	49.274
TiO2	0.268	0.567	0.656	0.894	0.924	0.656	0.894	1.425	1.189	1.188	1.011
Al2O3	3.629	3.753	4.005	3.689	3.629	3.867	3.828	5.703	5.783	5.817	5.582
Cr2O3	0	0.005	0.009	0.007	0	0.033	0.007	0	0.038	0	0
FeO	13.006	12.473	12.648	13.26	12.746	13.246	13.044	14.642	13.883	14.628	14.343
MnO	0.449	0.408	0.296	0.306	0.276	0.327	0.265	0.458	0.397	0.346	0.285
MgO	15.645	15.739	15.447	15.585	15.451	15.531	15.181	13.947	13.918	13.533	14.45
CaO	11.319	11.295	11.417	11.21	11.104	11.544	11.593	10.974	11.193	11.092	11.244
BaO	0	0.089	0	0	0	0.015	0	0	0.133	0.007	0.067
Na2O	0.834	0.913	0.892	0.919	0.922	1.082	0.917	1.353	1.426	1.376	1.324
K2O	0.254	0.292	0.325	0.228	0.309	0.355	0.327	0.462	0.45	0.404	0.458
F	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Cl	0.2	0.23	0.249	0.249	0.255	0.239	0.227	0.172	0.155	0.166	0.151
Total	97.755	97.531	97.297	97.519	96.717	99.016	97.079	97.593	97.289	97.282	98.189
T-sites											
Si	7.553383	7.513063	7.47804	7.456233	7.489791	7.480128	7.441629	7.147531	7.187577	7.197601	7.201749
Aliv	0.446617	0.486937	0.52196	0.543767	0.510209	0.519872	0.558371	0.852469	0.812423	0.802399	0.798251
total	8	8	8	8	8	8	8	8	8	8	8
M1,2,3 sites											
Alvi	0.172854	0.155009	0.165394	0.08974	0.116669	0.134201	0.102575	0.138953	0.192999	0.210324	0.163285
Ti	0.029202	0.061908	0.071866	0.098	0.101886	0.070827	0.098532	0.15813	0.131954	0.132024	0.111166
Fe3+	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Mg	3.378026	3.405256	3.353318	3.385341	3.376023	3.3228	3.315488	3.066824	3.060729	2.980153	3.148448
Mn	0.055082	0.050154	0.036509	0.037765	0.034264	0.039749	0.032883	0.05722	0.049604	0.043291	0.035282
Fe2+	1.364836	1.327673	1.372913	1.389154	1.371158	1.432422	1.450523	1.578873	1.564714	1.634208	1.541819
Ca	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
total	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5
M4 site											
Fe	0.210564	0.186247	0.16741	0.226688	0.191206	0.157402	0.147627	0.227336	0.148024	0.172921	0.211368
Ca	1.756548	1.7564	1.781341	1.750112	1.743785	1.775112	1.819732	1.734353	1.769128	1.755573	1.760817
Na	0.032888	0.057353	0.051248	0.0232	0.065009	0.067486	0.032641	0.03831	0.082848	0.071506	0.027816
total	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2
A site											
Ca	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Na	0.201315	0.199557	0.200597	0.236426	0.197001	0.233586	0.227827	0.34863	0.325007	0.322589	0.347378
K	0.046932	0.054064	0.060376	0.042382	0.057777	0.064995	0.061115	0.086936	0.084686	0.076134	0.085397
Sum A	0.248247	0.253621	0.260973	0.278808	0.254778	0.298582	0.288942	0.435566	0.409693	0.398722	0.432775
OH site											
O	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
OH	1.950907	1.943428	1.938549	1.938511	1.936658	1.94187	1.94364	1.957003	1.961249	1.958442	1.962597
F	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Cl	0.05	0.06	0.06	0.06	0.06	0.06	0.06	0.04	0.04	0.04	0.04
total	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2

③ 図 25 (図 19) の試料 230719-6

sample	Am2-1	Am2-2	Am2-3	Am2-4	Am2-5	Am2-6	Am2-7	Am2-8	Am2-9	Am2-10	Am2-11	Am2-12	Am2-13	Am2-14	Am2-15	Am2-16	Am2-17
SiO2	52.899	51.689	52.304	51.936	52.109	51.87	53.19	52.759	52.506	51.786	51.619	52.078	51.337	51.166	50.074	48.129	47.864
TiO2	0.179	0	0.298	0.507	0.626	0.537	0.323	0.119	0.149	0.358	0.149	0.478	0.567	0.537	1.19	1.337	1.546
Al2O3	2.324	2.095	2.532	3.174	2.964	3.216	1.461	2.197	2.433	2.276	2.97	3.036	3.293	3.709	4.464	5.636	5.617
Cr2O3	0.045	0	0.019	0.028	0	0.031	0	0.017	0	0	0	0.017	0	0.024	0	0	0
FeO	13.747	18.718	13.706	13.696	13.647	12.593	17.846	13.233	13.331	13.185	13.09	13.038	12.811	13.689	13.809	14.198	13.892
MnO	0.674	0.427	0.449	0.378	0.439	0.46	1.228	0.582	0.592	0.409	0.449	0.276	0.276	0.225	0.255	0.112	0.163
MgO	15.025	10.913	14.835	14.911	15.427	15.327	16.134	15.613	15.447	15.941	15.267	16.203	15.803	15.47	14.539	13.538	14.186
CaO	11.523	12.295	11.154	10.935	10.952	11.171	5.571	10.594	10.544	10.944	10.756	11.413	11.664	11.227	11.091	11.099	11.14
BaO	0.03	0.11	0	0.022	0	0.089	0	0.052	0	0	0.037	0.015	0.037	0	0.044	0.111	0.067
Na2O	0.476	0.238	0.573	0.724	0.712	0.738	0.414	0.614	0.691	0.622	0.81	0.881	0.933	1.061	1.176	1.52	1.449
K2O	0.096	0.094	0.153	0.225	0.166	0.183	0.059	0.071	0.118	0.138	0.208	0.207	0.246	0.283	0.376	0.431	0.483
F	0	0	0	0	0	0	0	0.024	0	0	0	0	0	0.016	0	0	0.09
Cl	0.086	0	0.135	0.196	0.21	0.194	0.121	0.176	0.198	0.169	0.233	0.205	0.221	0.25	0.204	0.139	0.142
Total	97.104	96.579	96.158	96.732	97.252	96.409	96.347	96.051	96.009	95.828	95.588	97.847	97.188	97.657	97.222	96.25	96.639
T-sites																	
Si	7.72119	7.776676	7.705686	7.615607	7.599268	7.604765	7.848466	7.756286	7.728486	7.625752	7.646925	7.514567	7.500247	7.464057	7.356784	7.18492	7.122467
Aliv	0.27881	0.223324	0.294314	0.384393	0.400732	0.395235	0.151534	0.243714	0.271514	0.374248	0.353075	0.485433	0.499753	0.535943	0.643216	0.81508	0.877533
total	8	8	8	8	8	8	8	8	8	8	8	8	8	8	8	8	8
M1,2,3 sites																	
Alvi	0.120977	0.148156	0.145324	0.164135	0.108708	0.160466	0.10254	0.136951	0.150554	0.020753	0.165474	0.030873	0.067259	0.101742	0.129742	0.176532	0.107569
Ti	0.019656	0	0.033029	0.05593	0.068681	0.05923	0.035856	0.013161	0.0165	0.03966	0.016606	0.051889	0.06232	0.058934	0.131529	0.150157	0.173074
Fe3+	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.148086	0	0.17915	0	0	0	0	0
Mg	3.269338	2.447646	3.258161	3.259503	3.353892	3.349926	3.548995	3.42178	3.38952	3.499406	3.371627	3.485408	3.44186	3.364282	3.184335	3.012854	3.146951
Mn	0.083326	0.054414	0.056028	0.046948	0.054226	0.057123	0.153475	0.072471	0.073806	0.051013	0.056339	0.033732	0.034154	0.027801	0.031732	0.014162	0.020544
Fe2+	1.506703	2.349784	1.507458	1.473485	1.414493	1.373254	1.159134	1.355636	1.36962	1.241082	1.389955	1.218948	1.394407	1.447241	1.522661	1.646294	1.551862
Ca	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
total	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5
M4 site																	
Fe	0.171378	0.005392	0.181253	0.206084	0.249932	0.170816	1.043101	0.271349	0.271409	0.234579	0.231799	0.175265	0.170888	0.222823	0.174043	0.126304	0.176976
Ca	1.802086	1.981972	1.760679	1.718019	1.711298	1.754829	0.880767	1.668746	1.662892	1.72671	1.707266	1.764504	1.825853	1.754811	1.745901	1.775301	1.77615
Na	0.026536	0.012635	0.058068	0.075897	0.03877	0.074355	0.076132	0.059904	0.065699	0.03871	0.060935	0.060231	0.003259	0.022366	0.080056	0.098394	0.046873
total	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2
A site																	
Ca	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Na	0.108171	0.05679	0.105605	0.129939	0.162549	0.135429	0.042309	0.11511	0.131502	0.138875	0.171719	0.186244	0.261026	0.277727	0.254932	0.341558	0.371185
K	0.017876	0.018042	0.028756	0.04209	0.030883	0.034228	0.011106	0.013316	0.022158	0.025924	0.03931	0.038105	0.04585	0.052667	0.070473	0.082083	0.091691
Sum A	0.126047	0.074832	0.134361	0.172029	0.193433	0.169657	0.053415	0.128426	0.15366	0.1648	0.211028	0.224348	0.306876	0.330394	0.325405	0.42364	0.462876
OH site																	
O	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
OH	1.978726	2	1.966293	1.951292	1.948098	1.951796	1.969741	1.94499	1.950608	1.957688	1.941502	1.949672	1.94528	1.930811	1.949206	1.964833	1.921834
F	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.01	0.00	0.00	0.04
Cl	0.02	0.00	0.03	0.05	0.05	0.05	0.03	0.04	0.05	0.04	0.06	0.05	0.05	0.06	0.05	0.04	0.04
total	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2

④ 図 26 (図 20) の試料 230724-7

sample	Am1	Am2	Am3	Am4	Am5	Am6	Am7	Am8	Am9	Am10	Am11	Am12	Am13	Am14	Am15	Am16
SiO2	52.442	51.369	53.31	53.316	53.239	52.39	52.037	52.118	52.022	51.166	51.744	51.735	52.21	51.896	51.828	51.465
TiO2	0.119	0	0.208	0.209	0.447	0.387	0.566	0.358	0.359	1.014	0.09	0.478	0.418	0.657	0.745	0.746
Al2O3	4.186	3.985	2.221	2.298	2.563	2.926	3.092	3.213	3.103	3.755	3.084	3.163	3.037	3.075	2.901	2.773
Cr2O3	0.054	0.028	0	0	0	0	0	0.012	0.017	0	0.029	0.019	0.026	0.009	0	0.028
FeO	17.058	17.805	14.396	13.519	14.012	13.408	13.374	13.135	12.556	12.791	11.718	12.588	12.532	12.838	12.725	12.42
MnO	0.386	0.122	0.642	0.531	0.592	0.368	0.46	0.398	0.266	0.368	0.297	0.378	0.317	0.235	0.531	0.399
MgO	10.677	10.434	14.924	15.18	15.331	15.399	15.835	15.571	16.089	15.665	16.462	16.684	16.392	16.403	16.372	16.149
CaO	11.382	11.431	11.062	11.286	11.133	10.561	11.132	11.444	11.463	11.204	11.197	11.315	11.443	11.092	10.505	10.885
BaO	0.022	0.066	0	0	0.059	0.037	0.045	0	0.067	0	0	0.022	0	0.052	0.007	0
Na2O	0.306	0.3	0.435	0.482	0.741	0.775	0.794	0.847	0.896	1.049	0.866	0.973	0.884	0.942	0.81	0.933
K2O	1.487	1.378	0.128	0.101	0.109	0.228	0.184	0.242	0.177	0.301	0.28	0.251	0.194	0.183	0.192	0.201
F	0	0	0	0	0	0	0	0	0.03	0	0.004	0	0	0	0.061	0.049
Cl	0.002	0.006	0.055	0.09	0.126	0.2	0.204	0.215	0.208	0.217	0.179	0.2	0.177	0.215	0.124	0.119
Total	98.121	96.924	97.381	97.012	98.352	96.679	97.723	97.553	97.253	97.53	95.95	97.806	97.63	97.597	96.801	96.167
T-sites																
Si	0	0	7.758029	7.760269	7.6773	7.663102	7.555655	7.575247	7.568477	7.444858	7.593997	7.473224	7.558292	7.528235	7.565163	7.564385
Aliv	8	8	0.241971	0.239731	0.3227	0.336898	0.444345	0.424753	0.431523	0.555142	0.406003	0.526776	0.441708	0.471765	0.434837	0.435615
total	8	8	8	8	8	8	8	8	8	8	8	8	8	8	8	8
M1,2,3 sites																
Alvi	-8	-8	0.13896	0.154477	0.112896	0.167515	0.084776	0.125643	0.100535	0.088791	0.127431	0.011715	0.076459	0.053962	0.064229	0.044745
Ti	0	0	0.022772	0.022886	0.048494	0.042586	0.061827	0.039146	0.039293	0.110997	0.009937	0.051946	0.045525	0.071701	0.081811	0.08249
Fe3+	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.134037	0	0	0	0
Mg	0	0	3.237699	3.293818	3.295776	3.357819	3.427571	3.373915	3.489466	3.397926	3.601651	3.592794	3.537614	3.547245	3.562576	3.538472
Mn	0	0	0.079134	0.065463	0.072308	0.045592	0.056572	0.048998	0.032778	0.045353	0.036919	0.046249	0.03887	0.028874	0.06565	0.049673
Fe2+	0	0	1.521435	1.463356	1.470527	1.386488	1.369253	1.412298	1.337927	1.356932	1.224062	1.163259	1.301532	1.298218	1.225735	1.28462
Ca	13	13	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
total	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5
M4 site																
Fe	0	0	0.23064	0.182272	0.219318	0.25368	0.254759	0.184343	0.189782	0.199562	0.21418	0.22342	0.215722	0.25927	0.327652	0.242072
Ca	-13	-13	1.724843	1.76008	1.720141	1.655139	1.731834	1.782215	1.78687	1.746712	1.7607	1.751262	1.774937	1.72402	1.642945	1.714207
Na	15	15	0.044517	0.057648	0.060541	0.091182	0.013407	0.033443	0.023348	0.053726	0.02512	0.025317	0.00934	0.01671	0.029402	0.043721
total	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2
A site																
Ca	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Na	-15	-15	0.078221	0.078376	0.146637	0.128607	0.210118	0.20525	0.229393	0.242209	0.221299	0.247193	0.238784	0.248236	0.199835	0.222161
K	0	0	0.023764	0.018754	0.020052	0.042545	0.034083	0.044873	0.032851	0.055873	0.052424	0.046255	0.035829	0.033866	0.035753	0.037689
Sum A	-15	-15	0.101984	0.09713	0.166689	0.171152	0.244201	0.250123	0.262245	0.298082	0.273723	0.293448	0.274612	0.282102	0.235588	0.25985
OH site																
O	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
OH	1.999502	1.998479	1.986435	1.977799	1.969207	1.950421	1.949801	1.947039	1.934911	1.946489	1.953622	1.950895	1.956574	1.947143	1.941165	1.94758
F	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.03	0.02
Cl	0.00	0.00	0.01	0.02	0.03	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.04	0.05	0.04	0.05	0.03	0.03
total	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2

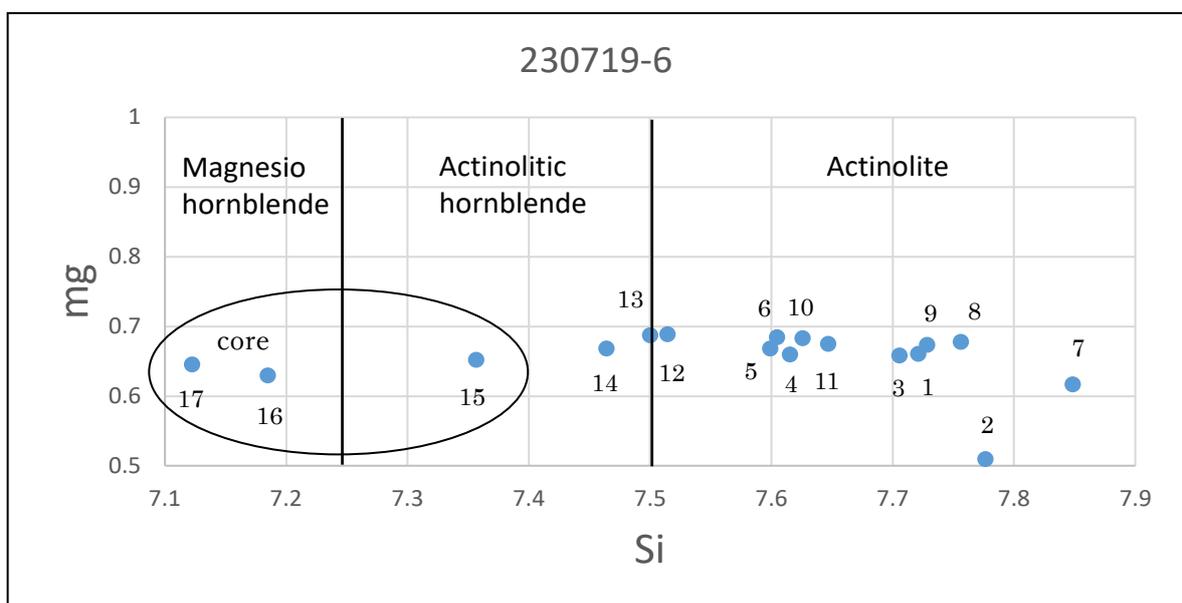
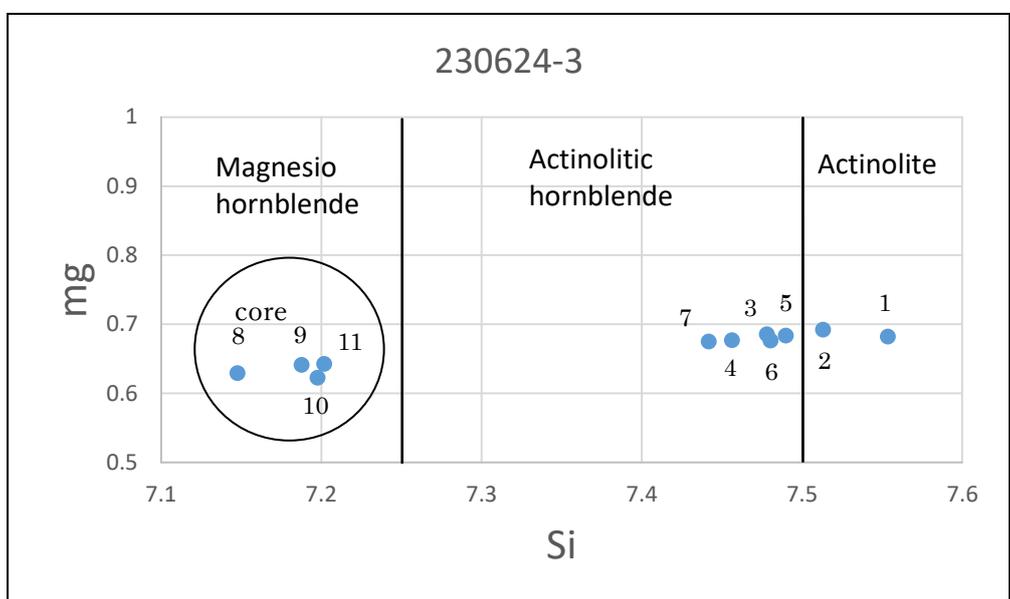
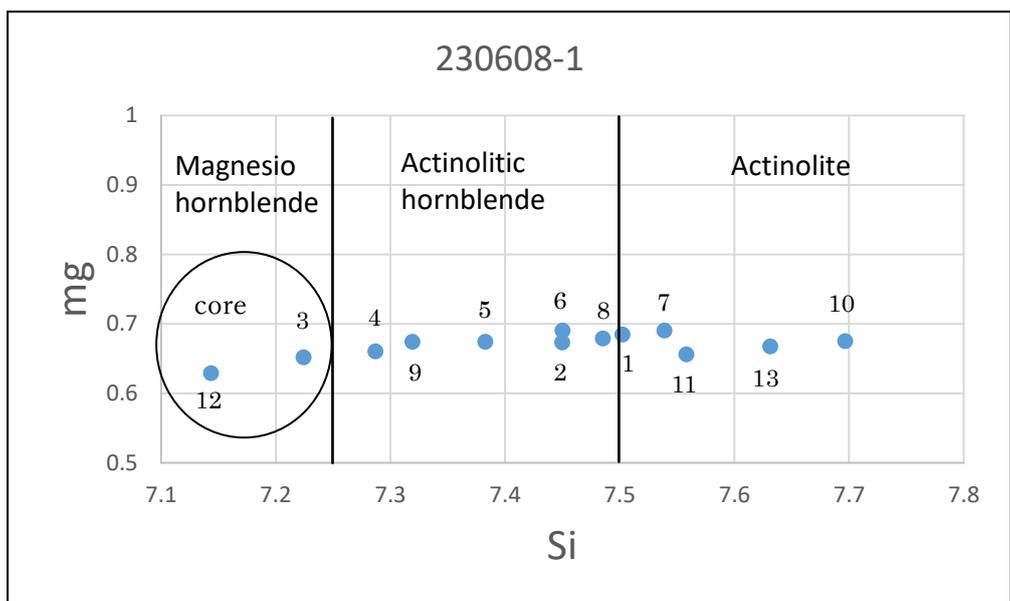
※ 1 と 2 は分析に失敗した。

⑤ 図 27 (図 21) の試料 230723-2

sample	Am5-1	Am5-2	Am5-3	Am5-4	Am5-5	Am5-6	Am5-7	Am5-8	Am5-9	Am5-10	Am5-11	Am5-12	Am5-13	Am5-14	Am5-15	Am5-16	Am5-17	Am5-18
SiO2	48.545	48.695	50.014	49.823	49.242	49.19	49.821	49.893	50.285	50.672	49.969	48.147	51.379	52.037	51.389	49.725	50.335	49.917
TiO2	1.247	0.832	0.923	1.22	1.279	1.189	1.192	1.073	1.104	0.778	0.864	1.335	0.565	0.327	0.328	1.397	0.953	1.012
Al2O3	5.867	5.72	4.715	4.794	4.803	5.066	4.711	4.335	4.161	3.981	4.089	5.717	3.184	3.085	3.495	4.586	4.125	4.493
Cr2O3	0	0	0.057	0	0	0.012	0	0	0.002	0	0.064	0	0.005	0	0.009	0	0.014	0.059
FeO	14.153	14.161	13.126	13.1	13.184	13.423	11.909	12.417	11.748	11.597	12.409	14.621	13.259	13.928	13.249	13.612	12.979	13.177
MnO	0.285	0.387	0.306	0.357	0.143	0.143	0.204	0.235	0.102	0.205	0.224	0.214	0.581	0.397	0.347	0.336	0.316	0.143
MgO	14.445	14.251	15.1	15.173	14.96	14.959	15.094	15.4	15.467	15.926	15.677	14.279	15.178	15.871	15.326	14.794	15.359	15.325
CaO	11.051	11.207	11.297	11.211	11.127	10.938	10.655	11.453	11.334	11.489	11.503	11.254	11.046	11.206	11.561	11.241	11.314	10.96
BaO	0	0.037	0.089	0	0	0	0	0.007	0.03	0.074	0	0.133	0.067	0.03	0	0	0	0
Na2O	1.435	1.405	1.248	1.273	1.212	1.379	1.295	1.157	1.105	1.089	1.125	1.499	0.837	0.836	1.06	1.201	1.113	1.189
K2O	0.452	0.505	0.469	0.461	0.43	0.413	0.398	0.415	0.355	0.35	0.397	0.477	0.201	0.201	0.244	0.427	0.347	0.401
F	0.005	0.011	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.03	0	0	0	0	0	0.011
Cl	0.166	0.149	0.196	0.24	0.241	0.211	0.214	0.199	0.194	0.223	0.258	0.154	0.203	0.157	0.193	0.227	0.233	0.308
Total	97.651	97.36	97.54	97.652	96.621	96.923	95.493	96.584	95.887	96.384	96.579	97.86	96.505	98.075	97.201	97.546	97.088	96.995
T-sites																		
Si	7.13577	7.185098	7.31687	7.281548	7.273112	7.247434	7.377396	7.343505	7.413253	7.433487	7.360164	7.099835	7.562911	7.506592	7.516223	7.290915	7.380761	7.335654
Aliv	0.86423	0.814902	0.68313	0.718452	0.726888	0.752566	0.622604	0.656495	0.586747	0.566513	0.639836	0.900165	0.437089	0.493408	0.483777	0.709085	0.619239	0.664346
total	8	8	8	8	8	8	8	8	8	8	8	8	8	8	8	8	8	8
M1,2,3 sites																		
Alvi	0.152178	0.179816	0.129834	0.107296	0.109202	0.127121	0.199562	0.095489	0.136229	0.121779	0.070003	0.093415	0.115283	0.031087	0.118689	0.083411	0.093631	0.113838
Ti	0.1379	0.092357	0.101586	0.134139	0.14212	0.131792	0.132791	0.118813	0.122445	0.085863	0.095742	0.148102	0.062568	0.035488	0.036091	0.1541	0.105129	0.111885
Fe3+	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.236212	0	0	0	0
Mg	3.165355	3.134745	3.293209	3.305779	3.294009	3.285629	3.331989	3.379038	3.399265	3.48289	3.442376	3.138957	3.33063	3.413056	3.341695	3.233712	3.357396	3.357371
Mn	0.035484	0.048367	0.037918	0.044192	0.01789	0.017846	0.025586	0.029297	0.012737	0.025472	0.027946	0.026729	0.072438	0.048507	0.042988	0.041728	0.039247	0.0178
Fe2+	1.509083	1.544715	1.437453	1.408593	1.43678	1.437612	1.310072	1.377364	1.329326	1.283996	1.363933	1.592797	1.419081	1.235651	1.460537	1.487048	1.404597	1.399106
Ca	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
total	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5
M4 site																		
Fe	0.230771	0.202757	0.168505	0.192561	0.191765	0.216349	0.164731	0.151077	0.119121	0.138786	0.164659	0.210321	0.213152	0.20844	0.160081	0.182109	0.187027	0.220372
Ca	1.740488	1.771784	1.770802	1.755542	1.760904	1.726706	1.690508	1.80616	1.790304	1.805843	1.815395	1.778112	1.742134	1.732026	1.811749	1.765978	1.777544	1.725735
Na	0.028741	0.025459	0.060693	0.051896	0.04733	0.056945	0.144761	0.042763	0.090576	0.055371	0.019946	0.011567	0.044714	0.059534	0.02817	0.051912	0.035429	0.053893
total	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2
A site																		
Ca	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Na	0.380233	0.376491	0.293301	0.308823	0.299753	0.336984	0.227037	0.287412	0.225273	0.25437	0.301336	0.417008	0.194164	0.174287	0.272425	0.289514	0.280998	0.284888
K	0.08476	0.09506	0.087532	0.085951	0.081024	0.077628	0.075185	0.077924	0.066766	0.065501	0.074599	0.089734	0.037745	0.03699	0.045528	0.079872	0.064911	0.075178
Sum A	0.464993	0.471551	0.380832	0.394774	0.380777	0.414612	0.302222	0.365336	0.29204	0.319872	0.375936	0.506742	0.231909	0.211277	0.317953	0.369386	0.345909	0.360066
OH site																		
O	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
OH	1.956322	1.957607	1.951404	1.940555	1.939673	1.947314	1.946295	1.950361	1.951529	1.944558	1.935596	1.947523	1.949358	1.961419	1.95216	1.943592	1.942098	1.918178
F	0.00	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.01
Cl	0.04	0.04	0.05	0.06	0.06	0.05	0.05	0.05	0.05	0.06	0.06	0.04	0.05	0.04	0.05	0.06	0.06	0.08
total	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2



図 28 角閃石の波状累帯構造の化学組成の代表的なグラフの例 (図 25 の試料 230719-6)



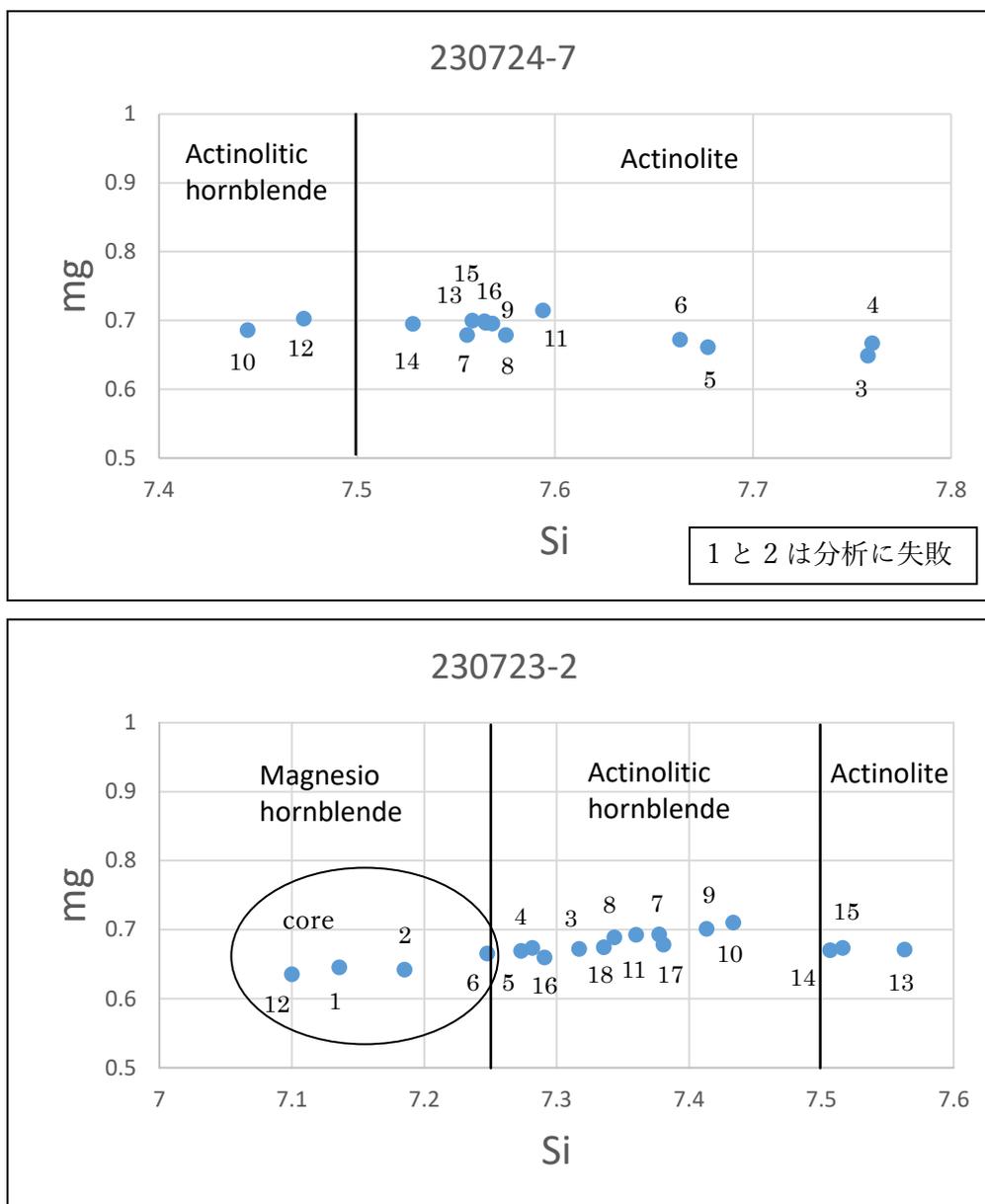
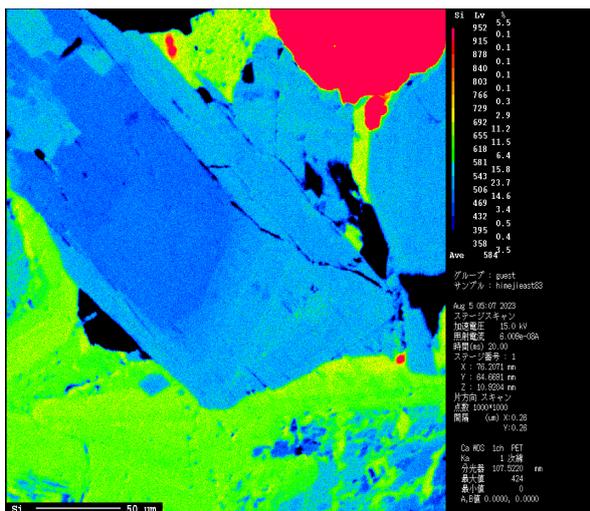
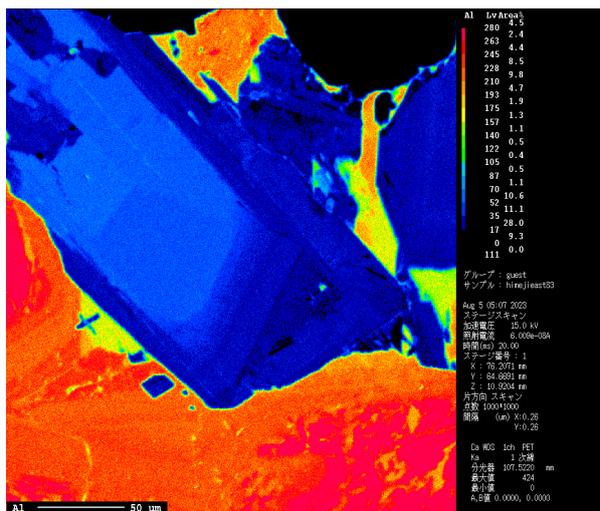


図 29 波状累帯構造部分の角閃石の mg-Si 図

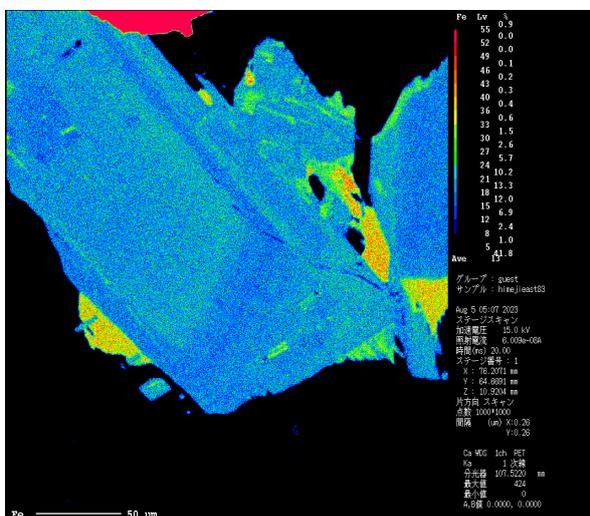
角閃石の波状累帯構造領域のマッピングを行った (15.0KV、 $6 \times 10^{-8} \text{A}$  / 図 30、図 31)。面分析では、鉱物にどのような成分がどのように分布しているかを広範囲に知ることができる。図 30 の試料 230719-6 および図 31 の試料 230724-7 の角閃石は、ともにリム部で Si が少なく Al が多い。リム部の Fe、Na、K は少なく、Mg が減少している。Mn や Ti は全体に少なく、また Ca はコアとリム部の間で大きな差はない。Cl はコアから淡緑色リムにかけて少量ながら一定量を保っている。



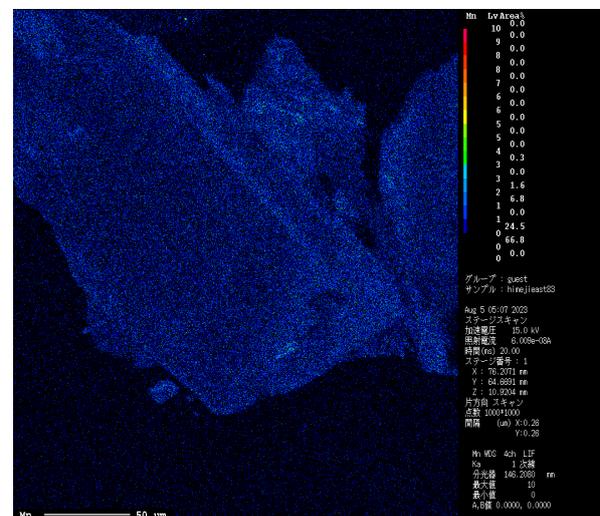
Si



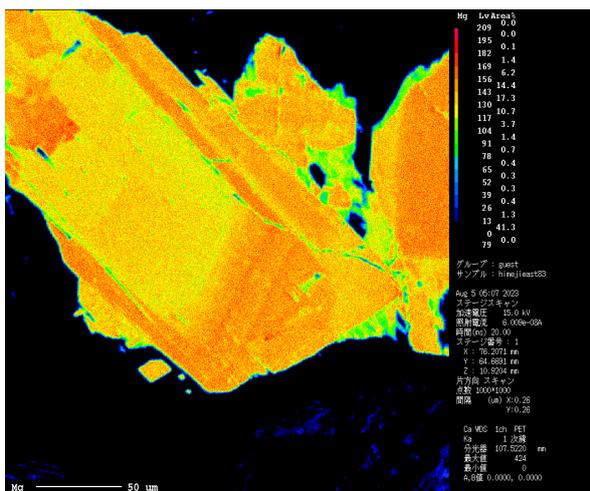
Al



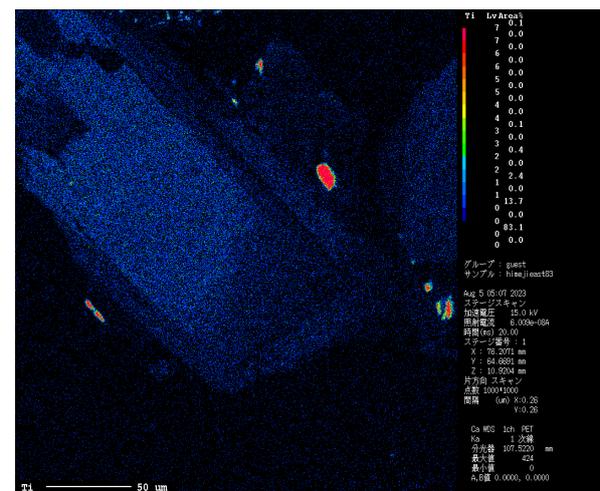
Fe



Mn



Mg



Ti

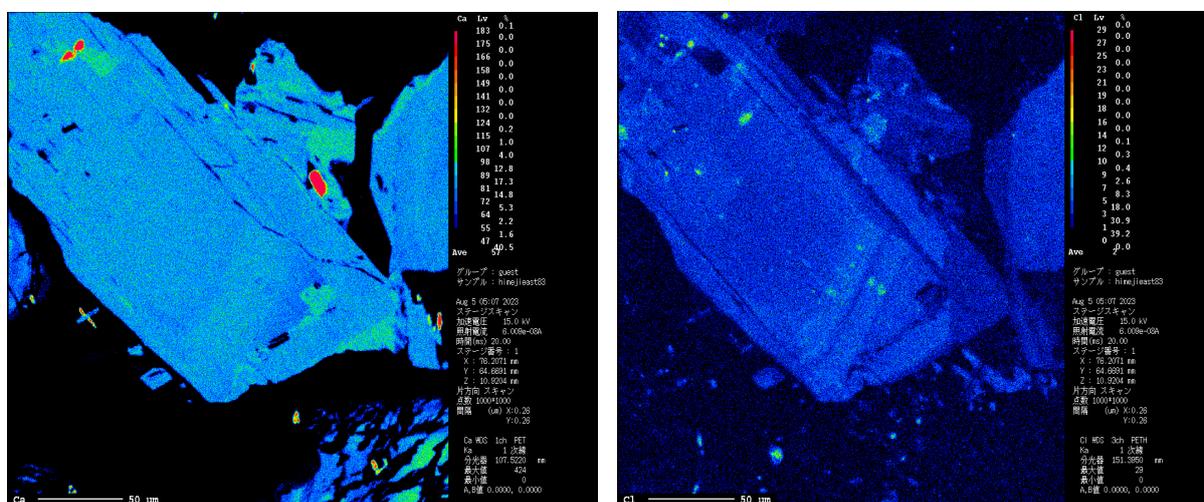
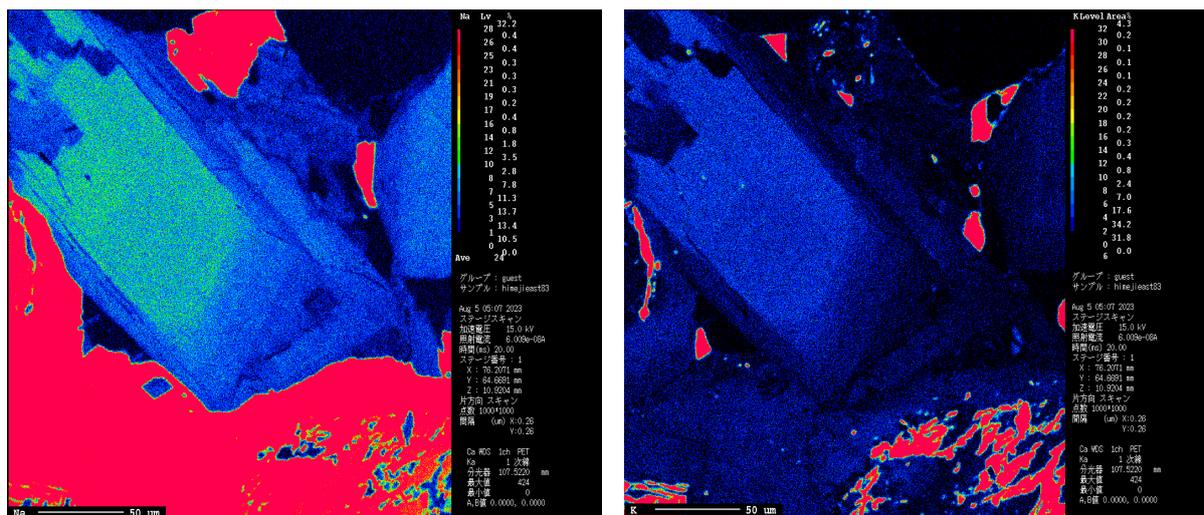
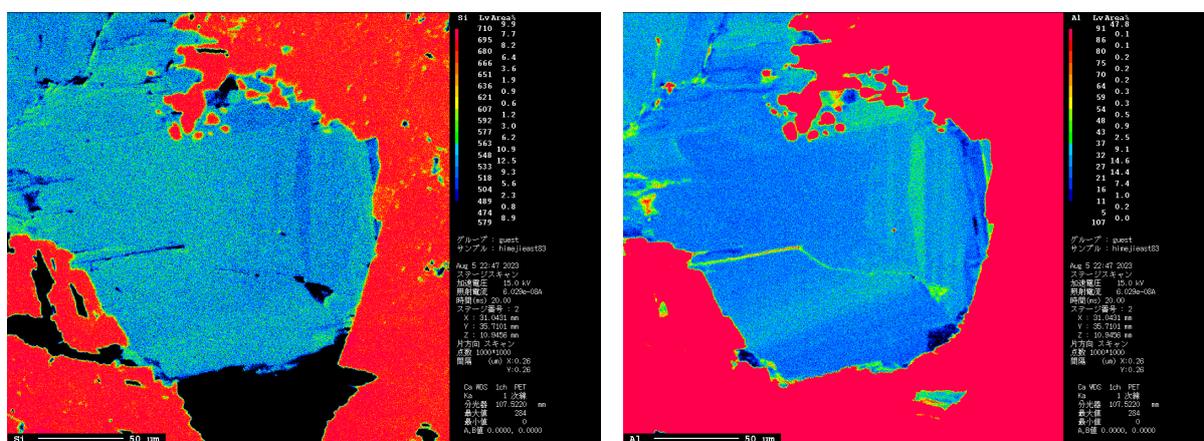
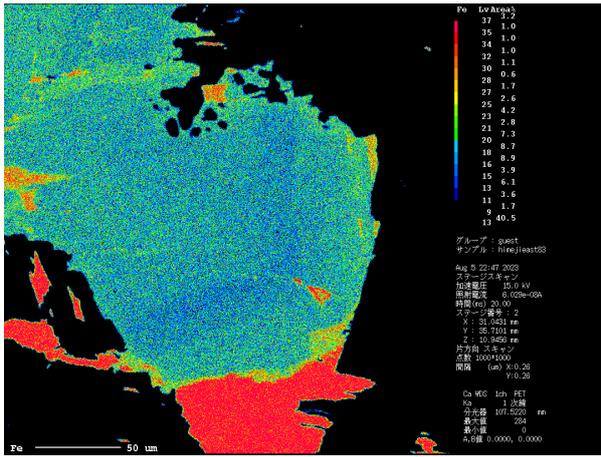
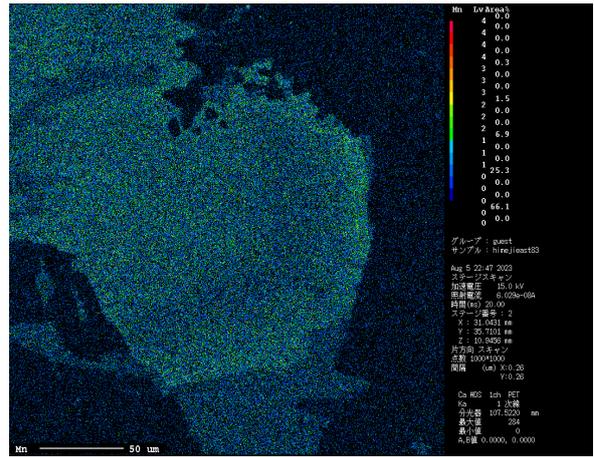


図 30 図 25 の試料 230719-6 の角閃石の面分析結果

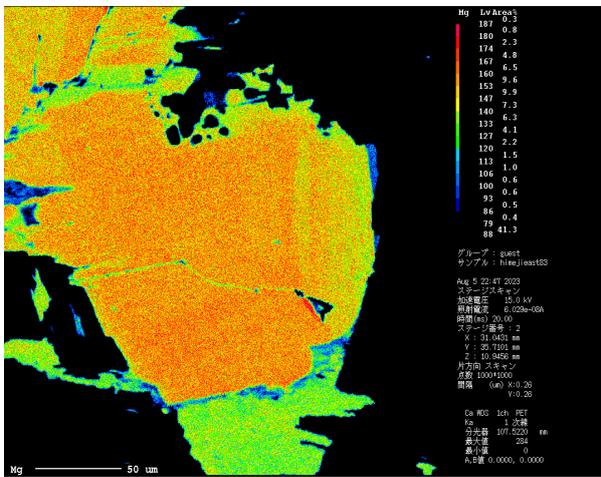




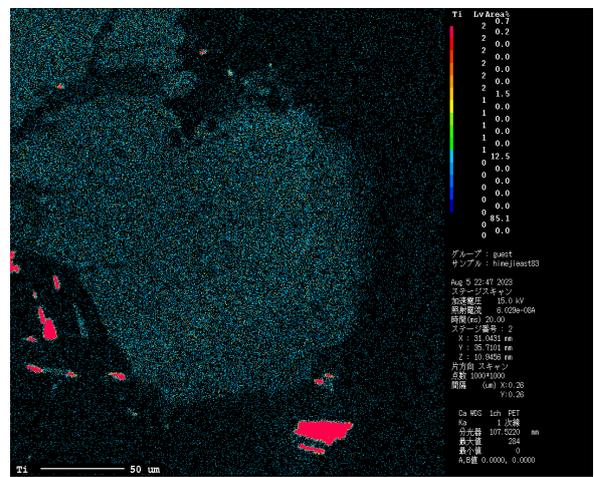
Fe



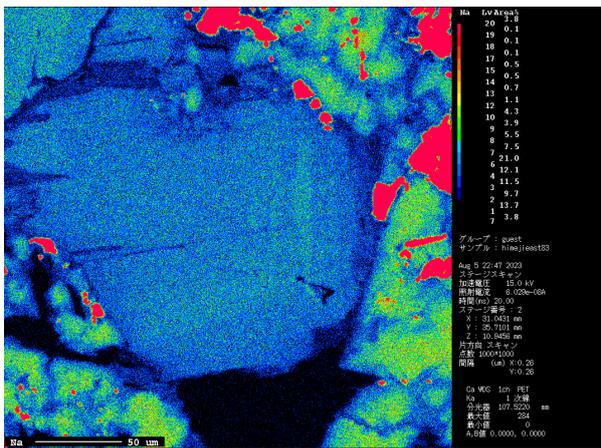
Mn



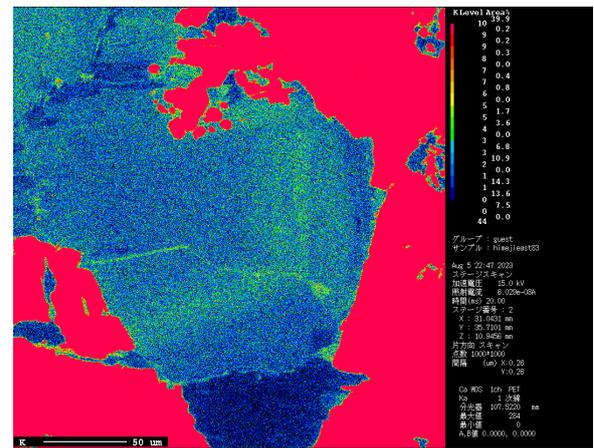
Mg



Ti



Na



K

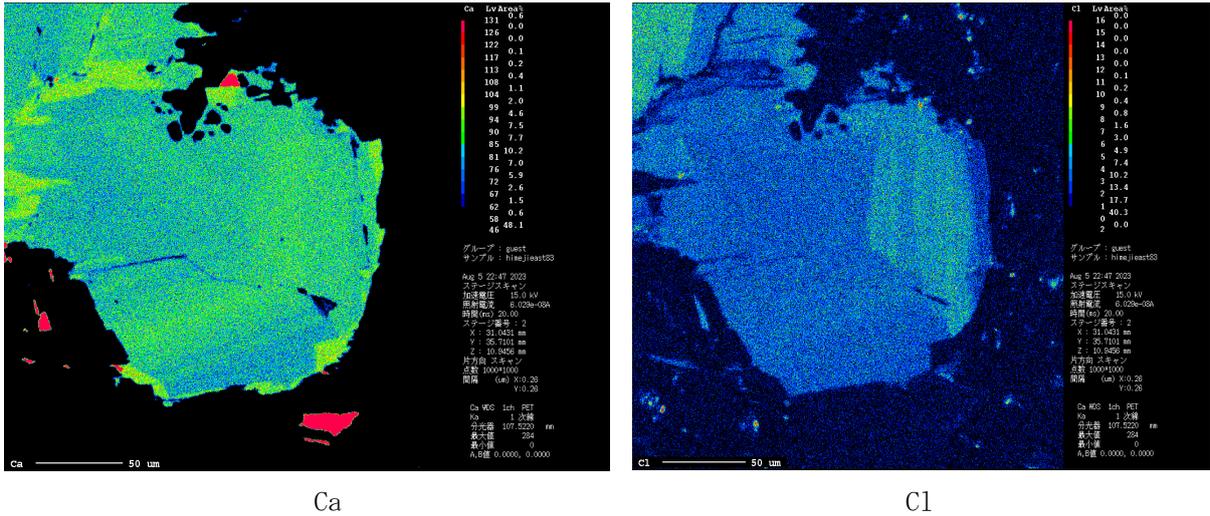


図 31 図 26 の試料 230724-7 の角閃石の面分析結果

5. 考察

山陽帯チタン鉄鉍系列に属する揖保川花崗閃緑岩の角閃石は自形～半自形で、マグマから晶出したことを示している。角閃石の多くは、そのコア部から淡緑色リム部にまたがって波状累帯構造が見られる。コア部の組成は Magnesian hornblende であるのに対して、リム部は酸化的環境下で形成されたことを示す Actinolitic hornblende～Actinolite である (図 29)。波状累帯構造は、熱水残液による再平衡によって形成される淡緑色リムに覆われていることから、それ以前に形成されたと考えられる (図 16)。外側の波状累帯構造が内側のそれに切られるように発達しており (図 25)、数度にわたって向きを変えながら結晶の内側から外側に向かって波状累帯構造が形成されたことを示している。

一方、山陰帯磁鉄鉍系列に属する大東－横田石英閃緑岩の角閃石では、一般に外側の波状累帯構造が内側のそれを切るような形状であり、外側から形成されたことを示している (図 32/Kawakatsu and Yamaguchi, 1987a)。

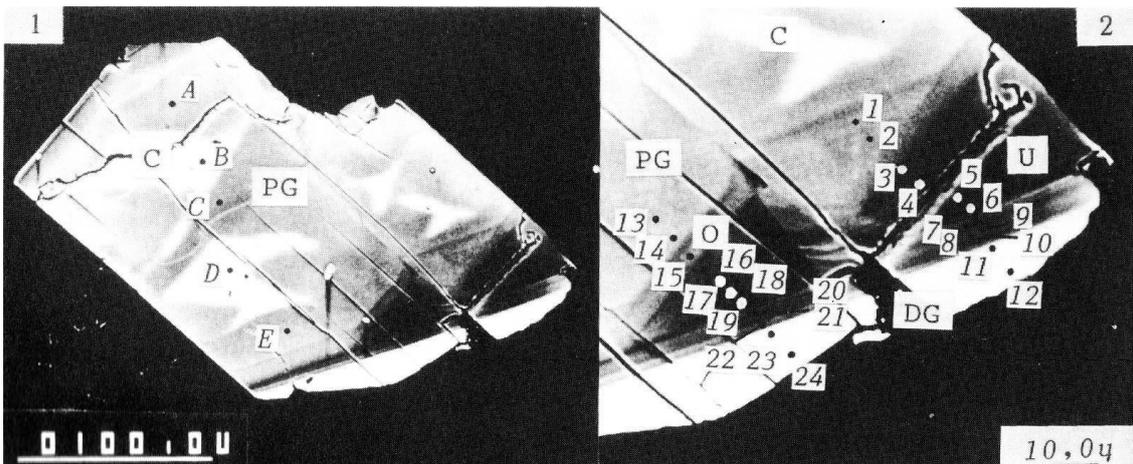
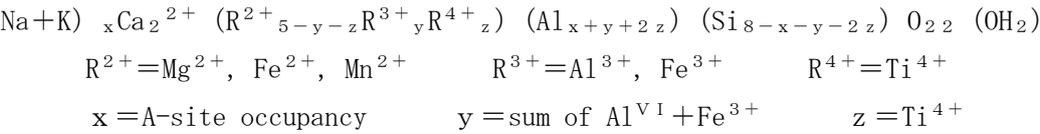


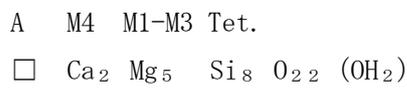
図 32 山陰帯大東－横田石英閃緑岩の角閃石の波状累帯構造の反射電子線像 (Kawakatsu and Yamaguchi, 1987a)

マグマが脱水すると、マグマ中の Cl は極めて高い割合で流体相中に分配され、発泡によってマグマ中の Cl 含量は著しく低下する (Anderson, 1973)。山陽帯揖保川花崗閃緑岩の角閃石の波状累帯構造部分の Cl 含有量は低く、脱水と発泡を経験した後に波状累帯構造が形成されたことを示唆している。その後、酸素分圧の上昇によって磁鉄鉱と再平衡した。これらの特徴は、早期に脱水と発泡を経験して、熱水残液の循環によって淡緑色リム部を形成し、そこに高い酸素分圧条件下で結晶外側から Cl が乏しい環境で波状累帯構造を形成した、山陰帯大東-横田石英閃緑岩の角閃石の特徴と類似している (Kawakatsu and Yamaguchi, 1987a、Kawakatsu and Yamaguchi, 1987b、山口・川勝, 1987)。

角閃石の固溶体は一般に次のように表わすことができる (Leak, 1978)。



このうち、最も単純な Tremolite の構造式は以下である。



これを基準として、一般に行われている Fe<sup>2+</sup>と Mg<sup>2+</sup>の置換のほか、表2のような主要な6つの型の組み合わせ置換が示されている (Czamanske and Wones, 1973)。

表2 角閃石の組み合わせ置換のパターン (左が Edenite /Czamanske and Wones, 1973 に加筆)

A	Tet.		A	Tet.				
空白	+	Si	→	Na、K	+	Al	1型	Edenite type
M1-M3	Tet.		M1-M3	Tet.				
Mg	+	Si	→	Al	+	Al	2A型	Tschermakite type
Mg	+	Si	→	Fe <sup>3+</sup>	+	Al	2B型	
M4	M1-3		M4	M1-3				
Ca	+	Mg	→	Na	+	Al	3A型	Glaucophane type
Ca	+	Mg	→	Na	+	Fe <sup>3+</sup>	3B型	Riebeckite type
A	M4		A	M4				
空白	+	Ca	→	Na	+	Na	4型	Richtecite type
M1-M3	Tet.		M1-M3	Tet.				
Mg	+	2Si	→	Ti	+	2Al	5型	
M4	M1-3		M4	M1-3				
2Ca	+	Mg	→	2Na	+	Ti	6A型	
Ca	+	Al	→	Na	+	Ti	6B型	

揖保川花崗閃緑岩の角閃石は、A サイトに Na+K が最大 0.54 を占めており、この平衡をとるために四面体の Al<sup>IV</sup>が増加している。Al<sup>IV</sup>-Na+K in A-site 関係のグラフが良い直線関係をもっていることから、I型の Edenite 型置換が行われていることがわかる。一方、Al<sup>IV</sup>-Na in M4-site には相関関係が

認められず、4型の Richterite 型はほとんど起こっていない。また Ca に規則的な増減は認められないことから、3型、4型、6型置換もほとんどないと考えられる。さらに、 $Al^{IV}-Al^{VI}+Fe^{3+}+2Ti$  に相関関係が認められる。Mi-M3 サイトの  $Fe^{3+}$  は増減なくほとんど0であり、2B型の置換は考えにくい。同様に、 $Al^{IV}-Ti$  のグラフに相関関係が見られるものの、M1-M3 サイトの Ti は非常に少ないことから、5型の置換も考えにくい。このように考えていくと、 $Al^{IV}-Al^{VI}+Fe^{3+}+2Ti$  の相関関係は、主に  $Al^{VI}$  と四面体の  $Al^{IV}$  の間の置換である 2A型の Tschermakite 型置換を示しているものと考えられる。このことは、面分析で、波状累帯構造部分の Mg が減少しているにもかかわらず、 $Fe^{3+}$  が極めて少なく、Al が増加していることとも矛盾がない。

Leak (1971) は、マグマから晶出した角閃石には  $Al^{VI}$  が 0.6 以下のものは見られないとしている。さらに Chivas (1981) は、 $Al^{VI}$  が 0.6 以下の角閃石部分は、マグマ活動の後の流体相存在下のサブソリダス過程で形成されることを示している。本研究の角閃石の波状累帯構造は、ほとんどの  $Al^{VI}$  が 0.6 以下であり、マグマが脱水と発泡を経験し、熱水残液の循環によって形成されたことを示している。

I型と2A型が中心となっているイオン置換のパターンは、Finnmarka complex (Czamanske and Wones, 1973) や多くの porphyry copper を胚胎する花崗岩体 (Mason, 1978, Chivas, 1981, Hendry et al., 1981) に共通した特徴で、酸素分圧が高い環境を示しており、山陽帯のマグマも最後には磁鉄鉱と共存するような酸化環境であったと考えられる。

EPMA のビーム径が  $3\ \mu\text{m}$  に対して角閃石の波状累帯構造1本のバンド幅が  $1\sim 2\ \mu\text{m}$  と狭いため、点分析値は純粹にバンド1本の成分を示すものではない。それでも、四面体の  $Al^{IV}$ 、M1-M3 サイトの Ti、 $Al^{VI}$ 、Mn、M4 サイトの Ca、A サイトの Na の組成が波状に増減を繰り返すように変化している。 $Fe^{3+}$ 、 $Fe^{2+}$ 、Mg に波状関係は認められない。

## 6. 結論、今後の課題

### (1) 結論

①山陽帯の角閃石からも波状累帯構造を発見することができ、②それをもとにしてマグマ分化末期の熱水残液が循環するステージの環境を推定することができた。③角閃石の波状累帯構造は、マグマの脱水と発泡の指標となる可能性がある。

$Al^{VI}$  が 0.6 以下のサブソリダス条件を示しており Cl も少ないこと、イオン置換のパターンが酸化環境下で起こるパターンと共通していること、リム部が自形の磁鉄鉱と共存していることから、山陽帯揖保川花崗閃緑岩の角閃石は、晶出後にマグマの脱水と発泡が起こり、酸化環境で再平衡して波状累帯構造を形成した。波状累帯構造は不整合的な形状を示すことがあるが、外側の構造を内側の構造が切っており、内側から外側に向かって形成されたと考えられる。この後に、熱水残液の循環によって波状累帯構造を覆うように淡緑色リムが形成された。マグマ分化当初は、山陽帯は還元的環境であり、山陰帯は酸化環境であったと考えられているが、いずれもマグマ分化末期にはマグマが  $H_2O$  に飽和脱水し発泡する酸化環境となり、熱水残液の循環が起こったと考えられる。山陽帯と山陰帯の波状累帯構造をもつ角閃石の形成過程の比較を [図 33](#) に示す。

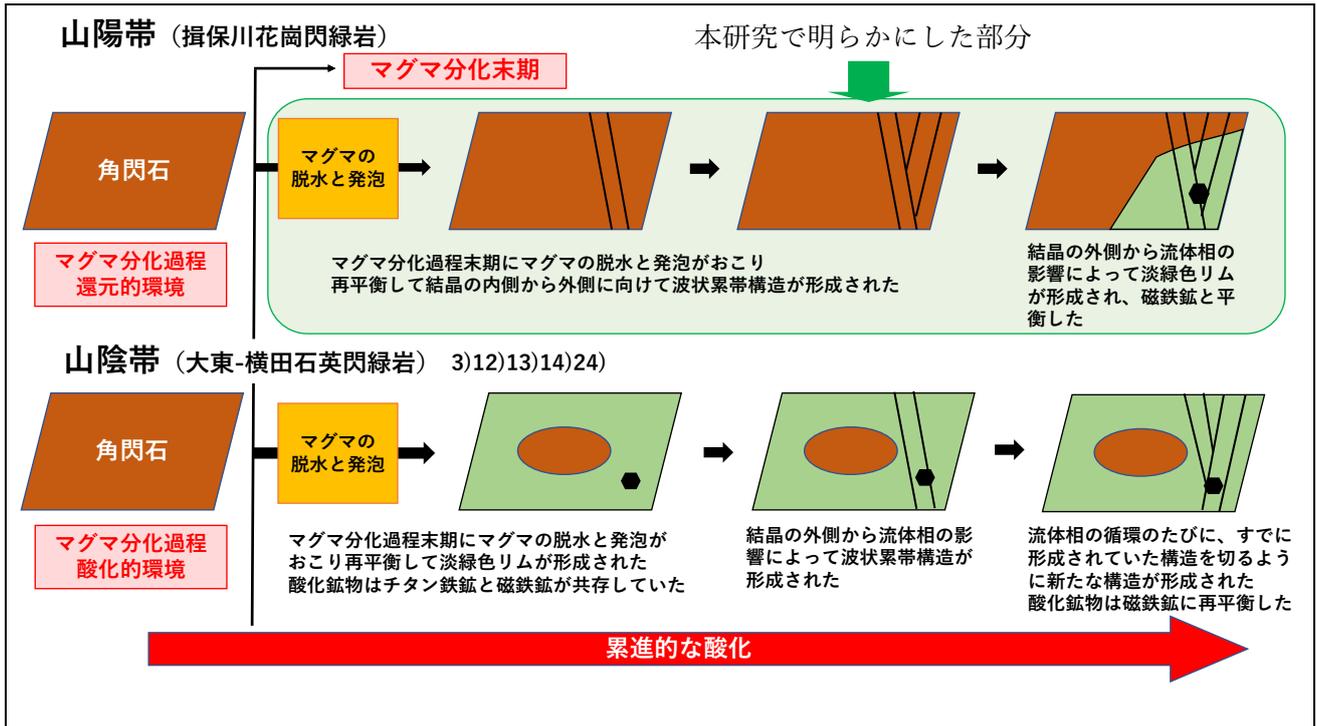


図 33 山陽帯と山陰帯の花崗岩類の角閃石に波状累帯構造が形成されるモデル図

(2) 今後の課題

現在、酸化鉱物や長石の組成を分析し、鉱物温度計を活用して、波状累帯構造が形成された温度、圧力を推定しようとしている。さらに山陽帯の他の地域でも同様の研究を幅広く行い、山陽帯と山陰帯を総合的に比較したい。

7. 参考文献

Anderson, A. T. (1973) Chlorine, sulfur, and water in magmas and oceans, (Geol. Soc. Amer. 85, 1485-1492)

Chivas, A. R. (1981) Geochemical evidence for magmatic fluids in porphyry copper mineralization. Part.1. Mafic silicates from the Koloula igneous complex. (Contrib. Mineral. Petrol., 78, 389-403.)

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.)

d-maps.com (2023) 兵庫県 ([https://d-maps.com/carte.php?num\\_cap=30034&lang=ja](https://d-maps.com/carte.php?num_cap=30034&lang=ja))

Hendry, D. A. F., Chivas, A. R., Reed, S. J. B. and Long, J. V. P. (1981) Geochemical evidence for magmatic fluids in porphyry copper mineralization. Part.2. Iron-probe analysis of Cu contents of mafic minerals, Koloula igneous complex. (Contrib. Mineral. Petrol., 78, 404-412.)

Holland, T. and Blundy, J. (1993) Non-ideal interactions in calcic amphiboles and their bearing on amphibole-plagioclase thermometry. (Contrib. Mineral. Petrol., 116:433~447)

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)
- 飯泉滋・沢田順弘・先山徹・今岡照喜 (1985) 中国・四国地方の白亜紀～古第三紀火成活動：火成岩類の対比を中心として (地球科学, 39, 372-384.)
- Ishihara, S. (1971) Modal and chemical composition of the granitic rocks related to the major molybdenum and tungsten deposits in the Inner zone of Southwest Japan. (J. Geol. Soc. Japan, 77, 441-452.)
- Ishihara, S. (1981) The Granitoid Series and Mineralization. (Econ. Geol. 75<sup>th</sup> Anniversary Vol., 458-484.)
- 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.)
- Kennedy, G. C. (1955) Some aspects of the role of water in rock melts. (Geol. Soc. Amer. Sp. Paper 62, 489-504.)
- Leak, B. E. (1968) A catalog of analyzed calciferous and subcalciferous amphiboles together with their nomenclature and associated minerals. (Geol. Soc. Amer. Spec. Paper, 98, 210.)
- Leak, B. E. (1971) On aluminous and edenitic hornblendes. (Mineral. Mag., 38, 389-407.)
- Leak, B. E. (1978) Nomenclature of amphiboles. (Amer. Mineral., 63, 1023-1052.)
- Mason, D. R. (1978) Compositional variations in ferromagnesian minerals from porphyry copper-generating and barren intrusions of the Western Highlands, Papua New Guinea. (Econ. Geol., 73, 878-890.)
- Murakami, N. (1974) Some problems concerning late Mesozoic to early Tertiary igneous activity on the inner side of Southwest Japan. (Pac. Geol., 8, 139-151.)
- 野口将志・亀井淳志・鈴木博美・小林夏子 (2021) 山陰帯島根県雲南地域に分布する大東花崗閃緑岩の火成活動 (地質学雑誌, 127, 461-478.)
- 先山徹・田中忍 (1984) 山陰帯および飛騨帯花崗岩類中の角閃石に見られる累帯構造について—鉛山グラノファイア類・奥津花崗閃緑岩帯・船津複合岩体を例に— (地球科学, 38, 5号, 321-333.)
- 田結庄良昭 (1986) 兵庫県西北部、波賀累帯深成岩体の地質および岩石 (岩鉱, 81, 32-45.)
- 山口佳昭 (1984) 浅所貫入深成岩のCa角閃石の累帯構造 (地球科学, 38, 346-351.)
- 山口佳昭・川勝和哉 (1987) 大東-横田地域の石英閃緑岩類中のFe-Ti酸化物の産状と化学組成 (山陰地域研究 (自然科学) 第3号, 157-165.)

## 8. 謝辞

野外調査から岩石採取、薄片作成、偏光顕微鏡による鉱物観察と波状累帯構造の発見、EPMA 分析の手配と分析の実施と、一連の流れをコロナ禍の中で行うことができたことは、多くの方々の支えがあったからである。特に、京都大学大学院理学研究科地球惑星科学専攻地球物質科学講座の河上哲生教授、東野文子助教および同修士の中野美玖氏には、筆者らが EPMA 分析を行う便宜を図っていただき、分析方法や解析方法について詳しくご教示いただいた。ここに記して謝意を表す。

# 角閃石の微細構造から推定する熱水残液循環

兵庫県立姫路東高等学校 科学部地学系研究部  
藤田詩桜 松田理沙 前田隆良

キーワード 波状累帯構造 山陽帯 山陰帯 熱水残液 脱水と発泡

**背景と目的** 山陰帯と山陽帯の花崗岩類のマグマ分化過程に関する研究は3)9) 19)20)21)22)など多く発表されており、山陰帯は酸化的、山陽帯は還元的环境で形成されたことが知られて。一方マグマ分化末期の熱水残液が循環するステージの環境については、山陰帯で角閃石の波状累帯構造を指標として用いて、酸化的環境にあったことが示されているが12)13)23)24)、山陽帯では角閃石の波状累帯構造が発見されていなかったことから、波状累帯構造が指標として使えるのかどうか、山陽帯の末期の熱水残液の循環はあったのかなどが明らかにされていない。筆者らは、山陽帯花崗岩類の角閃石から波状累帯構造を発見し、**マグマ分化末期の環境を明らかにし、波状累帯構造が指標として有効なのかどうかを明らかにすることを目的に研究を行った。**

**研究内容** ・兵庫県南西部を南北に流れる揖保川上流地域の露頭調査を行って地質図を作成し、宍粟市一宮町の6地点から揖保川花崗閃緑岩の試料を各3個ずつ採取し研磨薄片を6枚作成して偏光顕微鏡で観察した。  
・主な有色鉱物は最大5mm程度の角閃石、無色鉱物は、最大長10mm程度の斜長石と3mm程度の石英。  
・モード組成は、石英20.9、カリ長石4.1、斜長石58.5、角閃石12.8、その他、磁鉄鉱、ジルコン、燐灰石、黒雲母、スフェーンなど。



**考察 (形状と組成から)** ・角閃石は自形~半自形である。  
・波状累帯構造部分はAl<sup>IV</sup>が0.6以下のサブソリダス条件を示し2)16)、Clも少ない1)。イオン置換のパターンが酸化環境を示す。  
・リム部が自形の磁鉄鉱と共存している。

**角閃石が晶出後にマグマの脱水と発泡が起こり酸化的環境で再平衡して波状累帯構造を形成した**

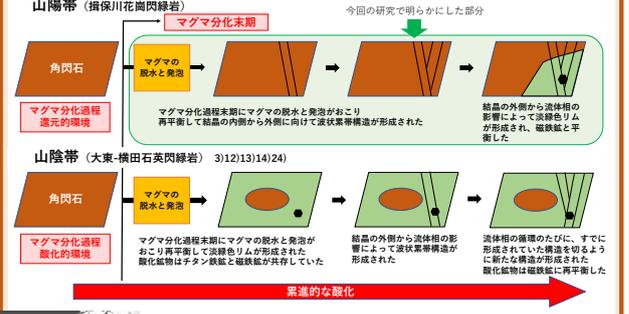
・波状累帯構造は不整合的な形状で、外側の構造を内側の構造が切っている。

**波状累帯構造は内側から外側に向かって形成された**

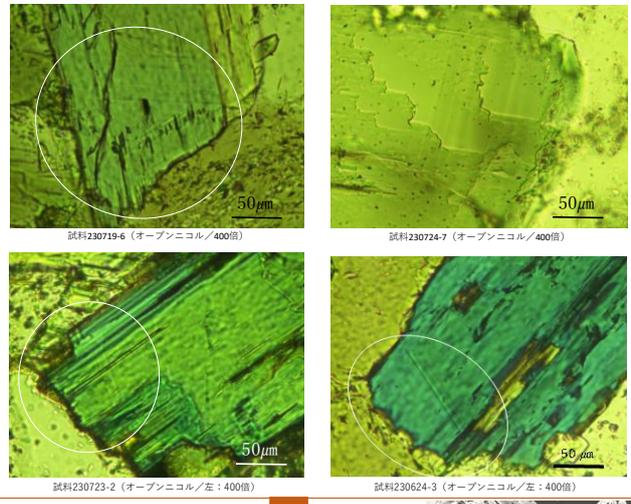
・波状累帯構造全体を覆うように、マグマの飽和脱水の指標である淡緑色リム12)13)23)24)が形成されている。

**最終的にはマグマがH<sub>2</sub>Oに飽和脱水し、発泡した**

**角閃石の波状累帯構造はマグマ分化末期の環境を推定する指標になる**

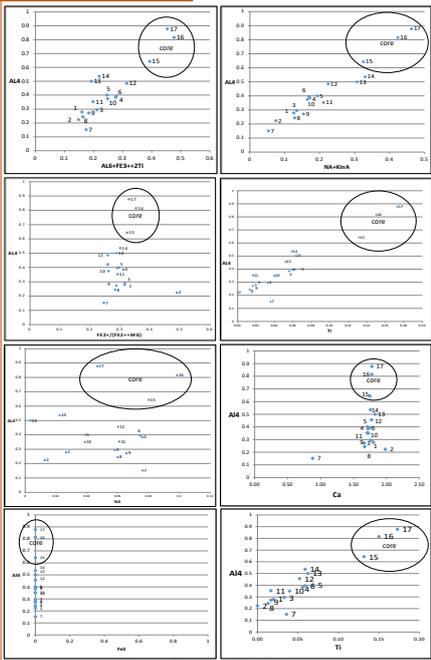


## 発見した波状累帯構造



## EPMA分析の結果

試料230719-6の例



## 参考文献

- Anderson, A.T. (1973) Geol.Soc.Amer. 85, 1485-1492.
- Chivas, A.R. (1981) Contrib.Mineral.Petrol., 78, 389-403.
- Czamanske, G.K. and Wones, D.R. (1973) J. Petrol., 14, 349-380.
- Hendry, D.A.F., Chivas, A.R., Reed, S.J.B. and Long, J.V.P. (1981) Contrib.Mineral.Petrol., 78, 404-412.
- Holland, T. and Blundy, J. (1993) Contrib.Mineral.Petrol., 116, 433-447.
- 兵庫県 (2017) 5-1seibeikeikakuh29.pdf.
- 兵庫県立姫路東高等学校科学部 (2019) 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) 日本地質学会第128年学術大会要旨.
- 飯泉滋・沢田順弘・先山徹・今岡照善 (1985) 地球科学, 39, 372-384.
- Ishihara, S. (1971) J.Geol.Soc.Japan, 77, 441-452.
- Ishihara, S. (1981) Econ.Geol.75<sup>th</sup> Anniversary Vol., 458-484.
- Kawakatsu, K. and Yamaguchi, Y. (1987a) Geochim.Cosmochim. Acta, 51, 535-540.
- Kawakatsu, K. and Yamaguchi, Y. (1987b) Geol. Rep. Shimane Univ. 6, 175-183.
- Kennedy, G.C. (1955) Geol.Soc.Amer.Sp. Paper, 62, 489-504.
- Leak, B.E. (1968) Geol.Soc.Amer.Spec. Paper, 98, 210.
- Leak, B.E. (1971) Mineral.Mag., 33, 389-407.
- Leak, B.E. (1978) Amer.Mineral., 63, 1023-1052.
- Mason, D.R. (1978) Econ.Geol., 73, 878-890.
- Murakami, N. (1974) Pac.Geol., 8, 139-151.
- 野口将志・亀井淳志・鈴木博美・小林夏子 (2021) 地質学雑誌, 127, 461-478.
- 先山徹・田中忍 (1984) 地球科学, 38, 5号, 321-333.
- 田結庄良昭 (1986) 岩鉱, 81, 32-45.
- 山口佳昭 (1984) 地球科学, 38, 346-351.
- 山口佳昭・川勝和哉 (1987) 山陰地域研究 (自然科学) 第3号, 157-165.

## 謝辞

京都大学大学院理学研究科地球惑星科学専攻地球物質科学講座の河上哲生教授、東野文子助教および同修士の中野美玖氏には、EPMA分析を行う便宜を図っていただき、分析方法や解析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、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る。

## 今後の課題

波状累帯構造をもつ角閃石と共存する鉱物について詳細に分析したい。現在、酸化鉱物や長石の組成を分析し、波状累帯構造が形成された温度、圧力を推定しようとしている。さらに山陽帯の他の地域でも同様の研究を幅広く行い、山陽帯と山陰帯を総合的に比較したい。

# 漆喰を使った溶岩の固結時のひび割れ(節理)の規則性を明らかにする(中間発表)

兵庫県立姫路東高等学校 科学部 漆喰班

村尾 侔生

### キーワード

乾燥亀裂(クラック) 柱状節理

### 動機と目的

柱状節理や方状節理の割れの方向は規則的である。節理は玄武洞や東尋坊など、様々な場所でみられるが、その規模や多角形の形状は、マグマの種類によってさまざまに異なる。そこで、マグマの粘度と節理の形状の関係を明らかにすることを目的に研究を行った。



さまざまな種類の柱状節理



### 実験方法

準備: 消石灰、糊、水の混合比率を変えて、様々な粘度の漆喰を作った。(消石灰と糊の重量の比率が96:8,98:6,100:4,102:2(g)の5つ)  
漆喰の粘度はスランプ試験(図1)で測定した。スランプ差が小さいものは粘度が高い。  
漆喰はインキュベーター内で温度を一定にして乾燥させた。

(測定1) 乾燥させた漆喰を撮影し、発生したヒビの角(Y、もしくはT字状に発生したひび割れの交点の角)の個数を数える。  
(測定2) 漆喰に発生したヒビの長さをimage-jを用いて測定する。  
(測定3) 漆喰に発生した角の角度をimage-jを用いて測定する。



図1:スランプ試験イメージ図



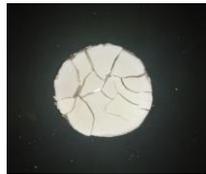
図2:生じたひび割れ

### 結果

1. 粘度が高いほど、角の個数は多い。特に角の個数は消石灰96g:糊8gのものが極端に多い(図3)。
2. ひび割れの長さの合計も、粘度が高い程長い(図4)。
3. 粘度によって、ひび割れの角にできる角度の分布に違いは見られなかった(図5)。



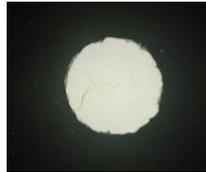
消石灰:96g,糊:8g



消石灰:98g,糊:6g



消石灰:100g,糊:4g



消石灰:102g,糊:2g

### 参考文献

- 1) 赤石和幸・山本仁(2001)ピーカーの中の玄武洞―片栗粉を用いた柱状節理のアナログモデル実験― (地球惑星科学関連学会合同大会予稿集, A7-009)
- 2) 石渡明(2020)柱状節理は低温の発砲膨張,板状節理は高温の流動剪断でできる(日本地質学会News 23号, p8.)
- 3) 廣部紗也子・小国(旧宇)健二(2016)乾燥亀裂における亀裂パターン形成の数値解析(土木学会論文集A2(応用力学),Vol.72, No.1, pp38-48.)
- 4) 伊藤寛之・宮田雄一郎(1998)マッドクラックのパターン形成実験(地質学雑誌 第104巻, 第2号, pp90-98.)

### 仮説

玄武岩の柱状節理よりも、安山岩の柱状節理の方が、節理が大きい場合が多いように思う。このことから、節理の断面積は、粘度が高いものの方が大きいのではないかと。

### 考察

1. 粘度がひび割れの形成に影響を与えている。
2. 粘度が高いもののひび割れの角の個数が多い理由として、粒子同士が糊で接着することによって、粒子の隙間を充てんしながら固まることができず、ひび割れが多くなったのではないかと考えられる。
3. 粘度が高い漆喰は、ひび割れの長さも、角の個数も多いことから、より細かくひび割れているのではないかと考えられる。
4. 玄武洞などで知られる玄武岩に発生する柱状節理よりも、壘石や東尋坊などで知られる安山岩(東尋坊は輝石安山岩)に発生する柱状節理の方が、節理断面積は大きい傾向にある。粘度が高いものがより細かくひび割れたとすると、自然界における冷却節理のひび割れは、本結果と異なることになる。乾燥収縮と違い、冷却節理はひび割れる過程で内側からの膨張があるとされている1)。このことが、ひび割れに逆とも思える結果の違いを生んだのではないかと。
5. 発生した角の角度に粘度による差や傾向は見られなかった。このことから、節理が柱状節理と方状節理で形を変えることに関して、粘度は影響していない可能性がある。

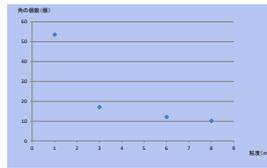


図3: 測定1 粘度と角の個数の平均

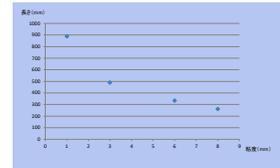


図4: 測定2 粘度とひびの長さ

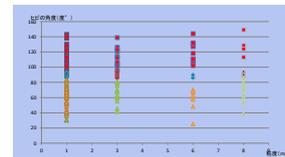


図5: 測定3 粘度と角の角度

### 今後の課題

1. 当初、ひび割れでできた図形の面積も測定する予定だったが、塗布した面積が少なかったからか、粘度が高いものではひび割れで図形ができず、端から端まで亀裂が走り、測定できなかった。より大きな範囲に塗布することで、面積を測定したい。
2. 今回の実験においてひび割れが発生する理由は乾燥による収縮である。しかし、マグマの冷却節理は、内部の膨張と外部の冷却が同時に起きた結果だともいわれている。どのように再現するのか検討したい。
3. 粘度が異なるマグマは成分だけでなく温度も異なる。今回はできなかったが、温度が変化することで分子が自由に動くようになり、粘度が変化する溶かした砂糖などを用いて、温度と粘度が異なる液体が凝結した際にどのようなひび割れができるかを観察したい。

### 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。今後の研究に生かしていきたい。ここに記して謝意を表す。

令和5年度 科学部の活動の記録

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/>