

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)。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

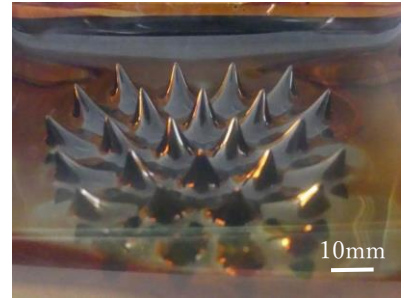


図1 磁性流体のスパイク

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。

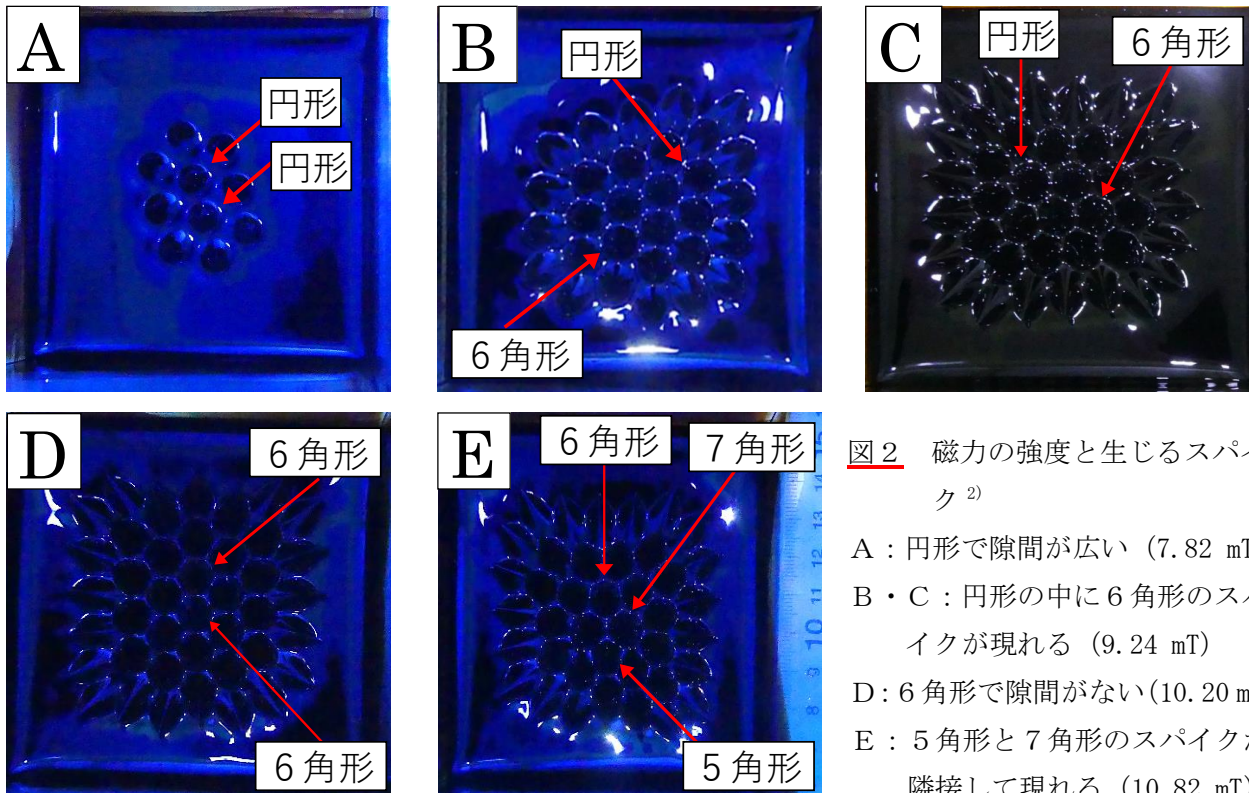


図2 磁力の強度と生じるスパイク<sup>2)</sup>

- 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)

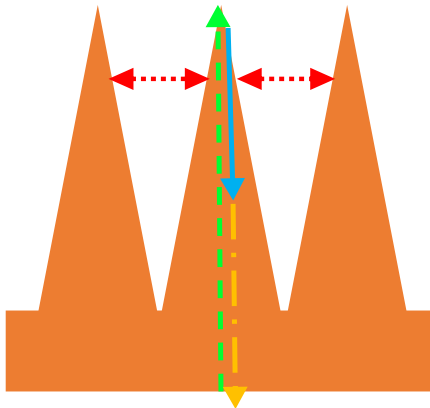


図3 スパイクのモデル図<sup>2)</sup> (力の大きさは正確ではない)  
 (赤/点線: スパイク間の斥力、緑/破線: 磁性超微粒子間の引力、青/実線: 表面張力、黄/一点鎖線: 重力)

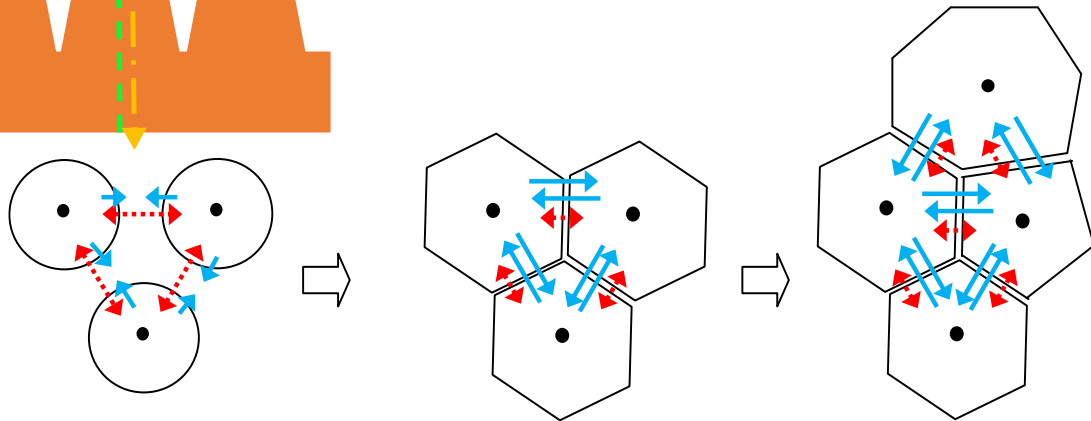


図4 磁力を強くするにつれてスパイク底面の形状が変化する<sup>2)</sup>  
 (赤/点線: スパイク間の斥力、青/実線: 表面張力、力の大きさは正確ではない)

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

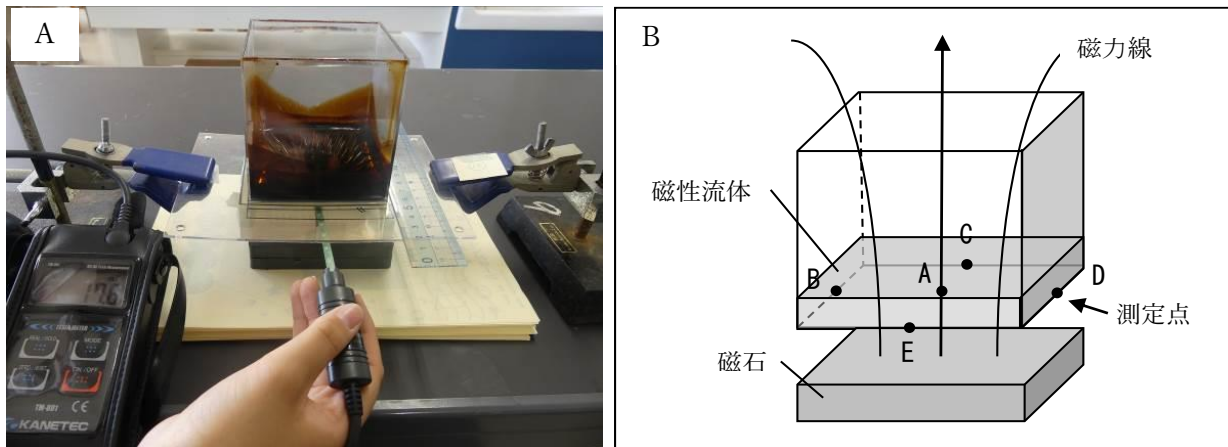


図5 磁力の測定の様子 (A) と磁力の測定点 A~E (B)

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。

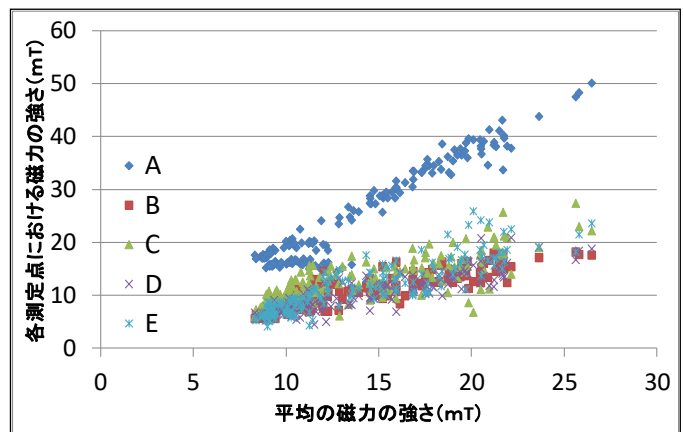


図 6 平均の磁力と各測定点の磁力 (測定 168 回)

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。

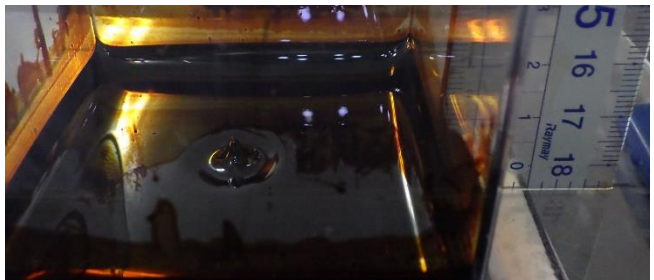


図7 最初に形成されるスパイク

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。

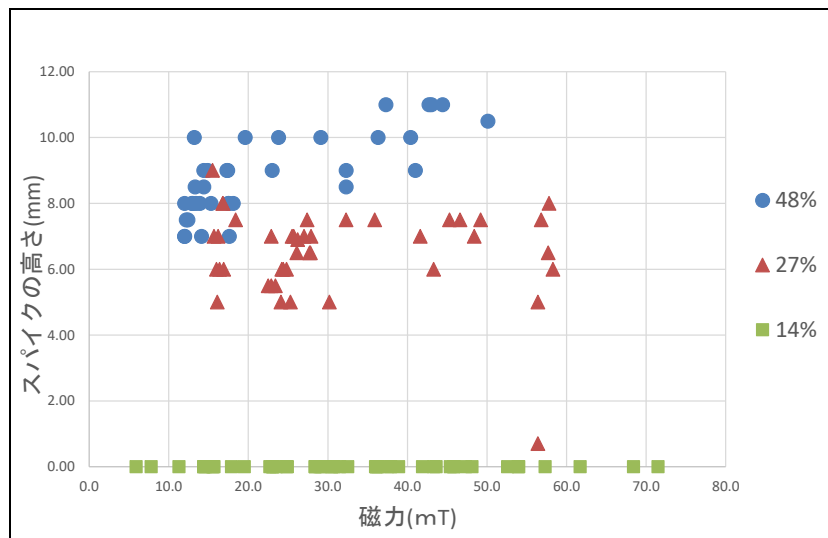
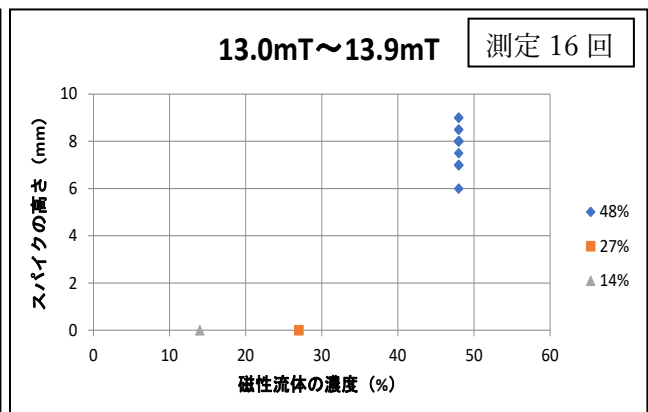
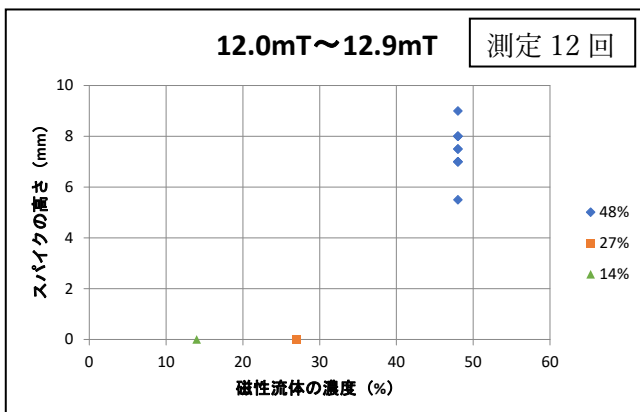
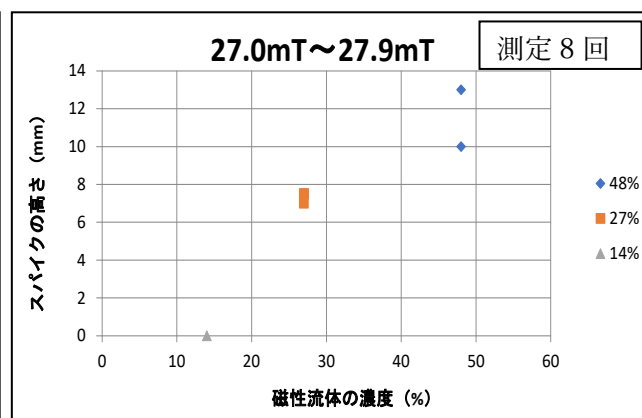
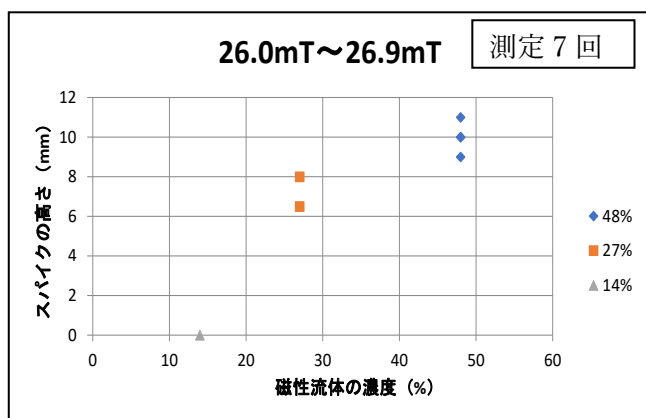
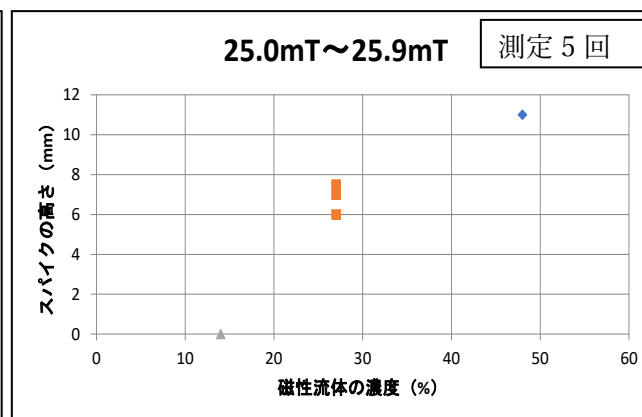
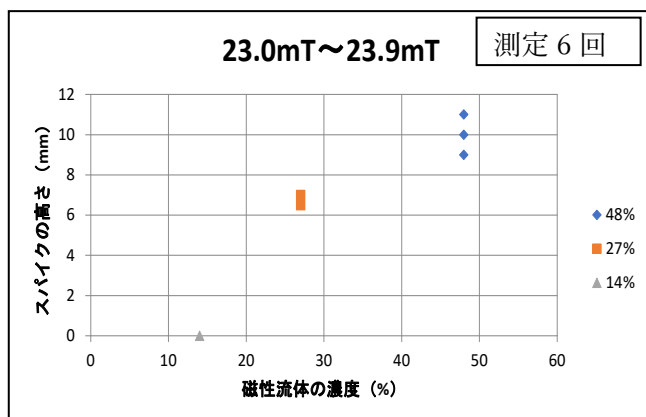
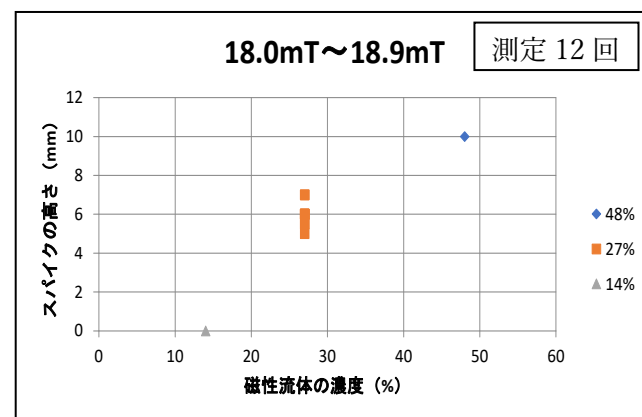
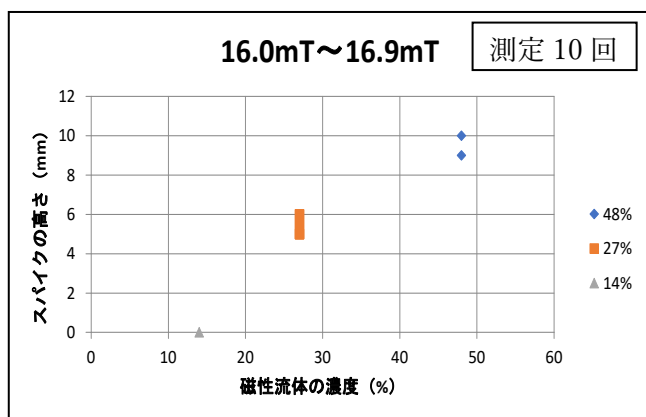
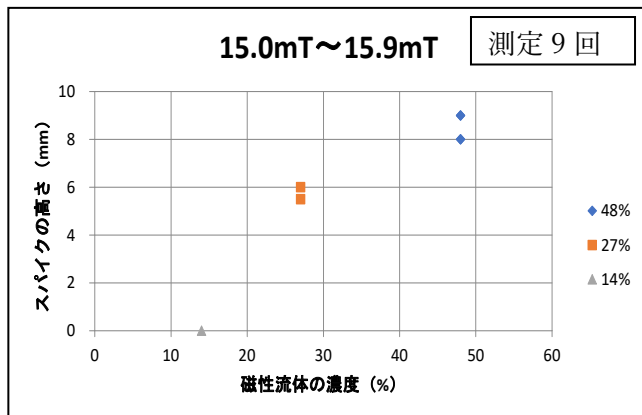
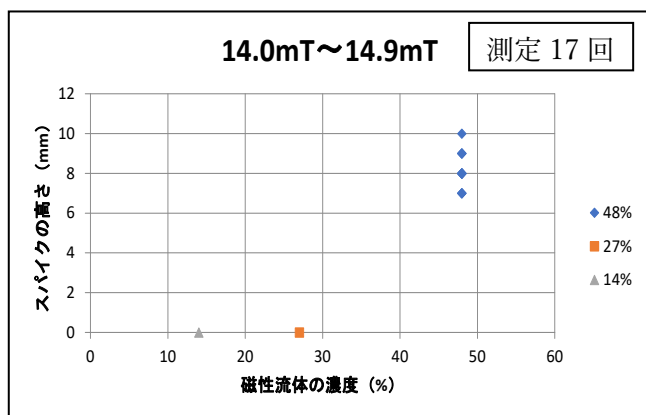


図8 磁性流体の濃度とスパイク形成の有無と高さ（測定回数 48%37回、27%43回、14%49回）

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。







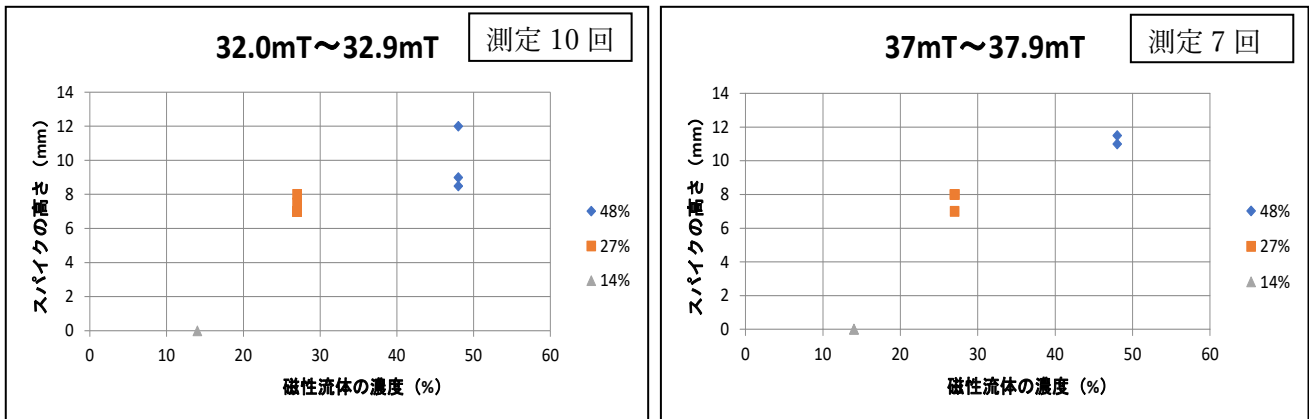
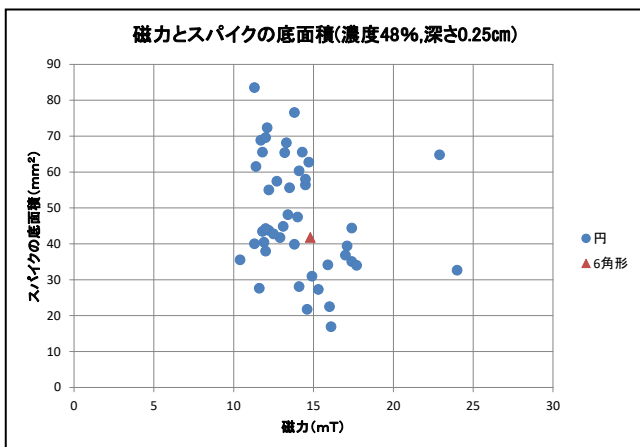
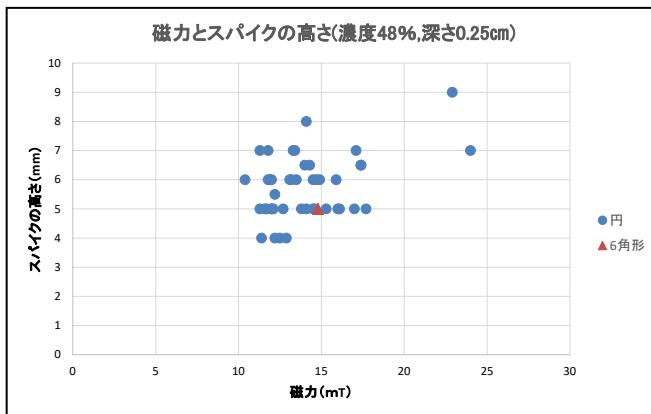
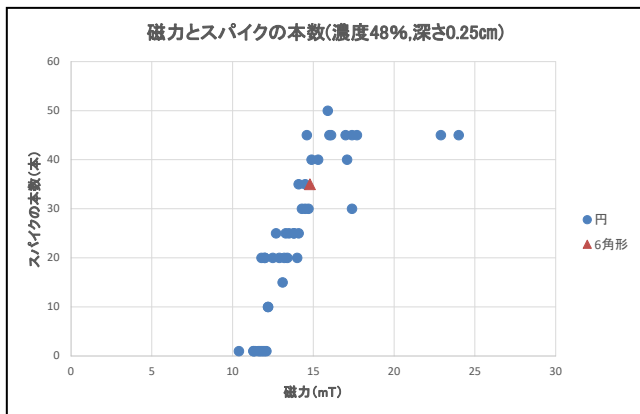


図9 一定の磁力における磁性流体の濃度とスパイク形成の有無と高さ（測定回数合計 119 回）

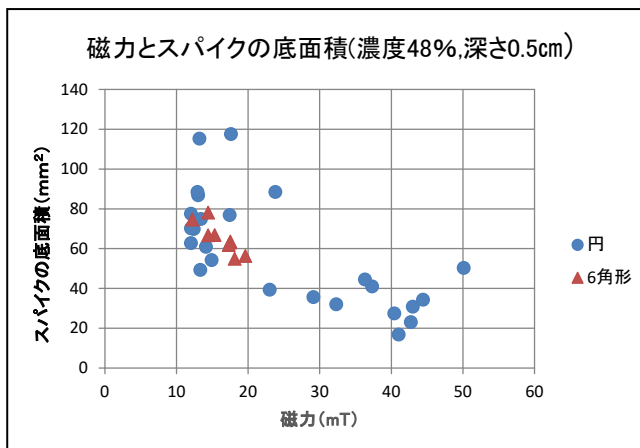
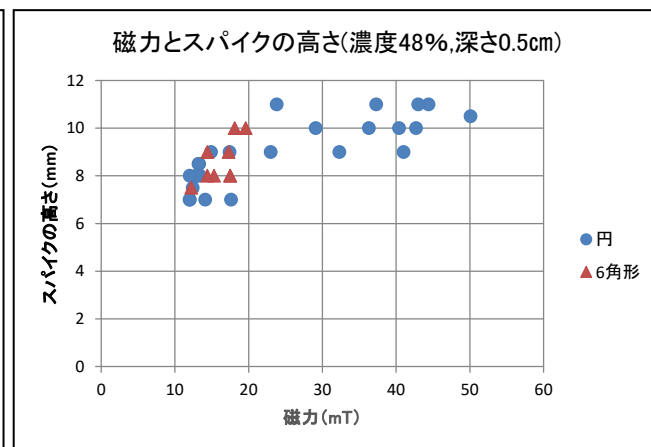
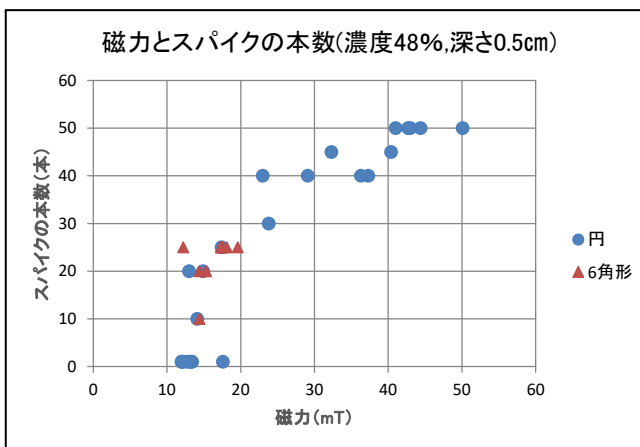
実験3：磁性流体の深さ（厚さ）とスパイク形成の有無

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

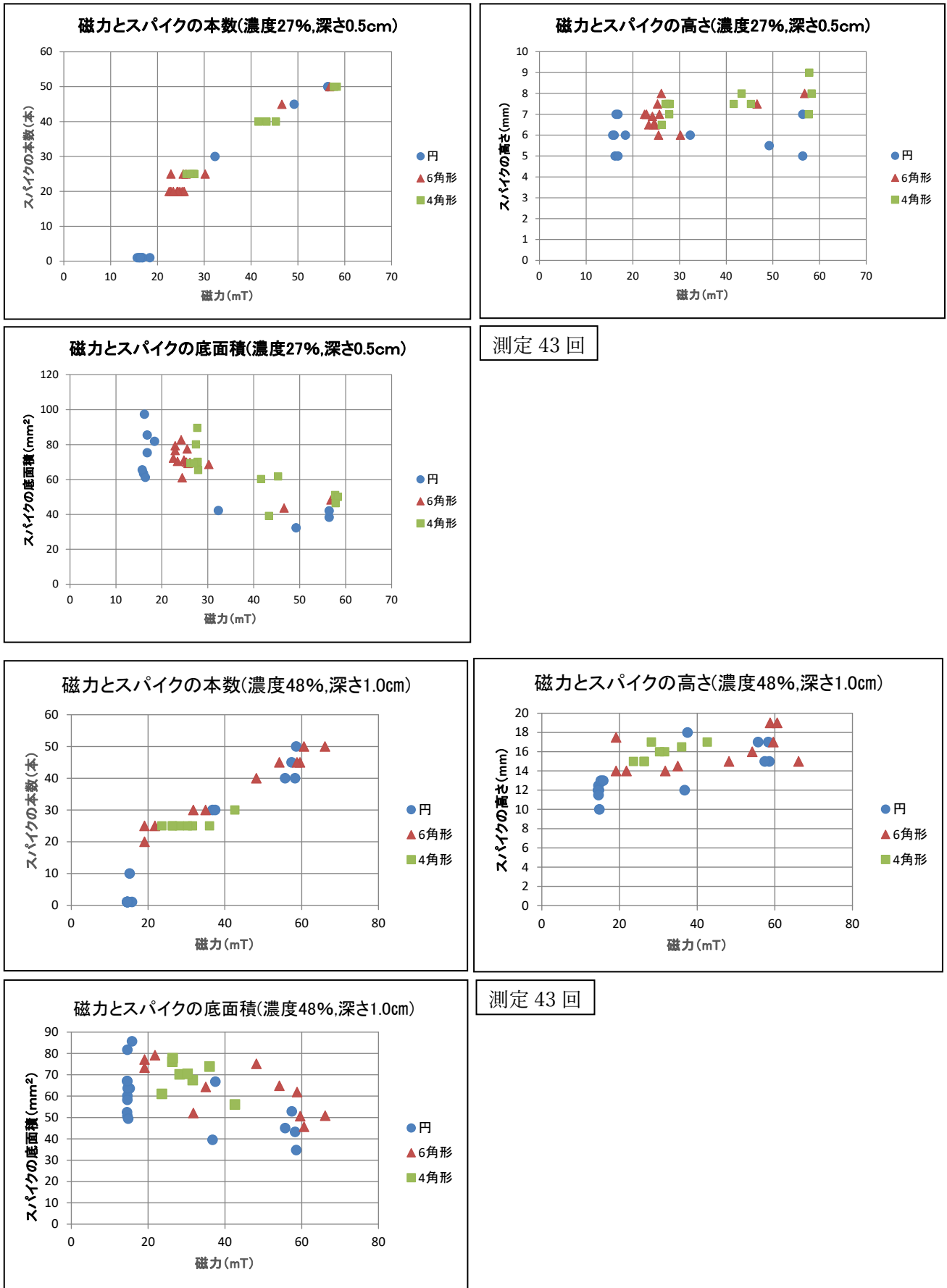


図 10 磁性流体の濃度と深さ（厚さ）を変えた磁気とスパイク形成の関係（測定回数合計 170 回）



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。

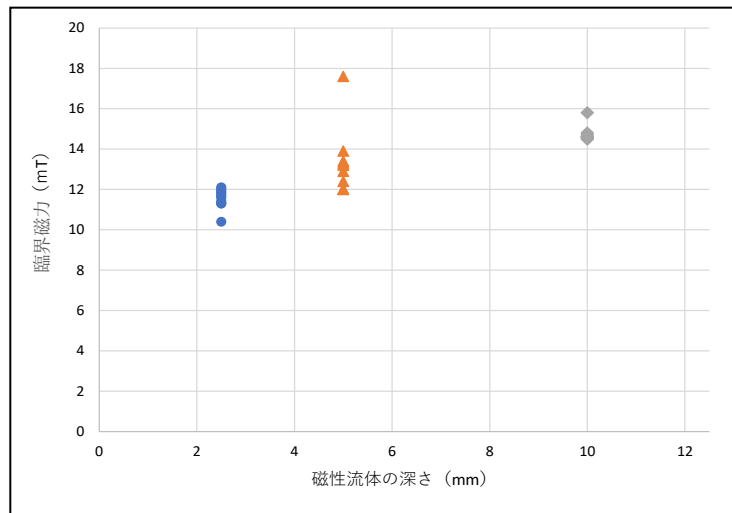


図11 磁性流体の深さ（厚さ）と臨界磁力の関係（濃度48%のとき／測定回数30回）

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。

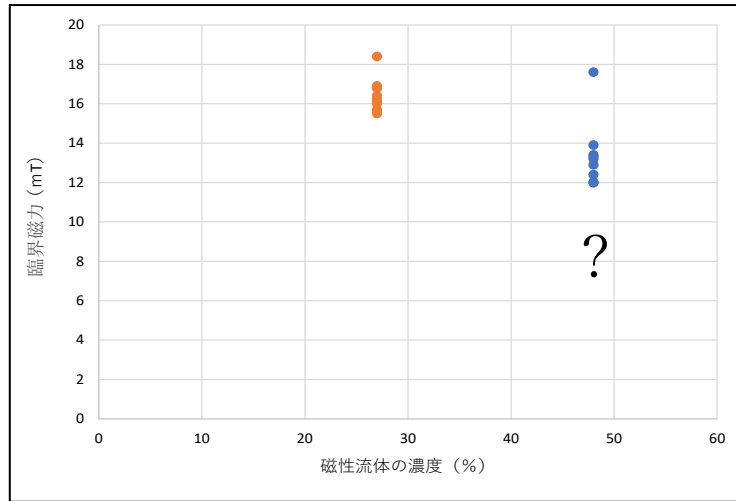


図 12 磁性流体の濃度と臨界磁力の関係（深さ 5.0mm のとき／測定回数 20 回）

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

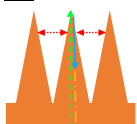
## キーワード

- 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。

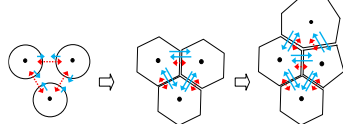
## 動機と目的

### ●昨年度の研究で明らかにしたこと

- 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

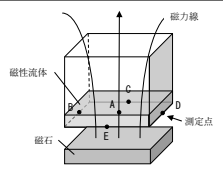
### ●本研究の新たな課題

- (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。



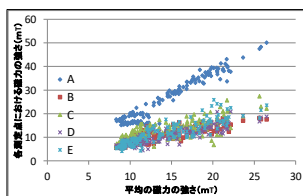
(図3 外部磁力の測定点A~E)

### 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

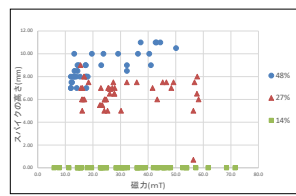
- ① 濃度48%の磁性流体をイソパラフィンで薄めて、48%、27%、14%の磁性流体を作成した。
- ② それぞれを図3の実験装置の容器に入れ、外部磁場をさまざまに変化させてスパイクが出現するか、その高さはどうかを観察した(図3)。外部磁場の強さは、中央および容器底面の5か所で測定し(図3)、その平均値とした。

### 実験3: 磁性流体の深さ(厚さ)とスパイク出現の有無

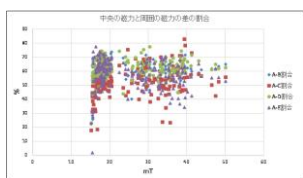
- ① 濃度48%の磁性流体を用いて、容器に入れる深さが、2.5mm、5.0mm、10mmのものを準備した。
- ② 磁力を様々に変化させて、スパイクの出現の有無と、高さを記録した。



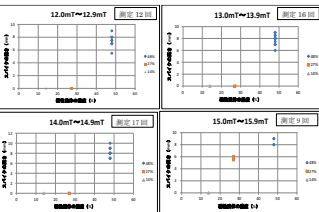
(図4 平均の磁力の強さと各測定点における磁力の強さの関係(測定168回))



(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

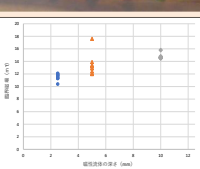
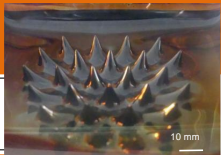
磁性流体中の超微細粒子がスパイクの中でのように分布しているのかについて、シミュレーションを行うこと。外部磁場によるスパイクを形成する臨界濃度を詳細に調べること。容器の形状や大きさとの関係について明らかにすること。

## 謝辞

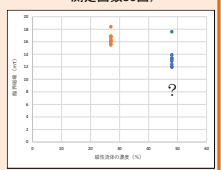
本校科学部顧問の川勝和哉主幹教諭には、考察において有意義な議論をしていただいた。ここに記して謝意を表す。

## 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均一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)。



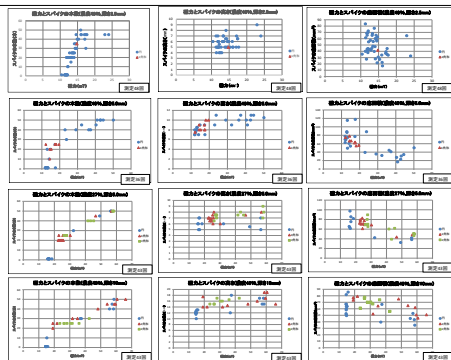
(図5 最初に立つスパイク)

### 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と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)

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](#)）。



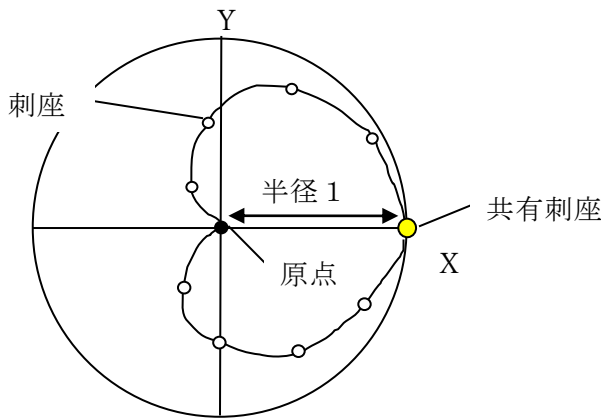


図1 上から見た刺座配列の座標測定

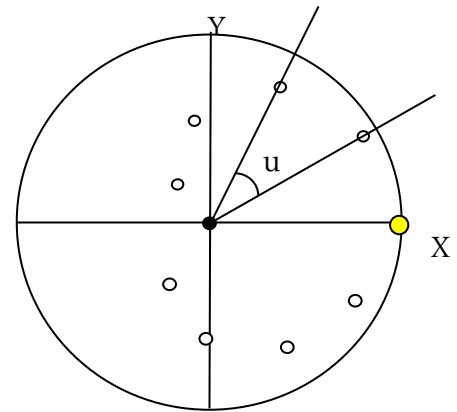


図2 刺座間の角度  $u$  の測定方法

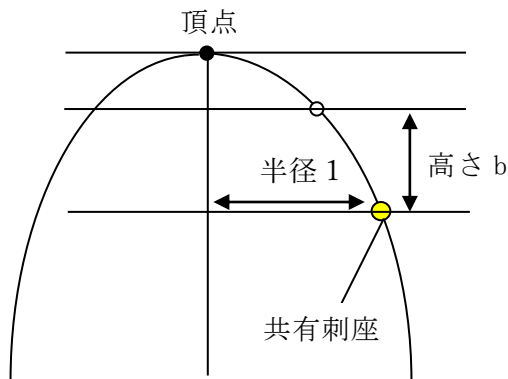


図3 横から見た刺座配列の高さ  $b$  の測定

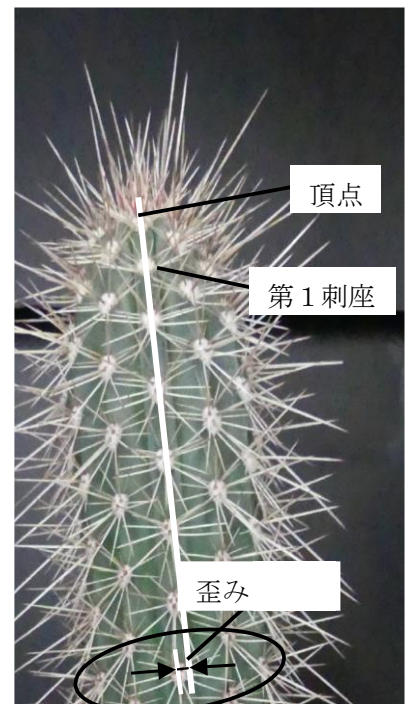
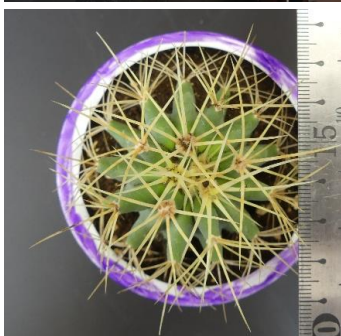
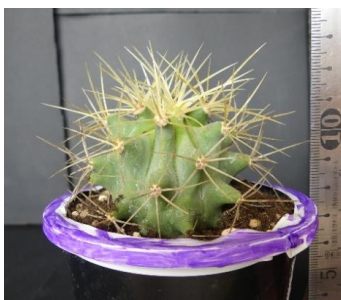


図4 歪みの測定

刺座の座標の測定値は、歪みを修正して数式化した。岸上<sup>1)</sup>は、布林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)、布林チュウ(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。

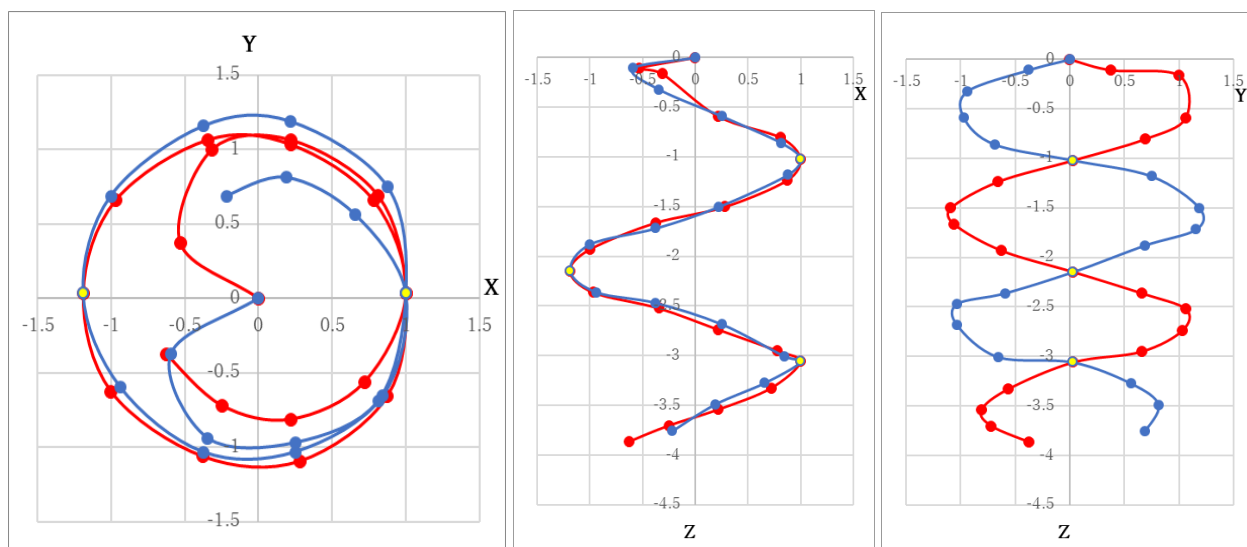


図6 ブリンチュウの螺旋をなして配列する刺座の座標例  
(赤: 右回り、青: 左回り、黄丸: 共有刺座)

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。

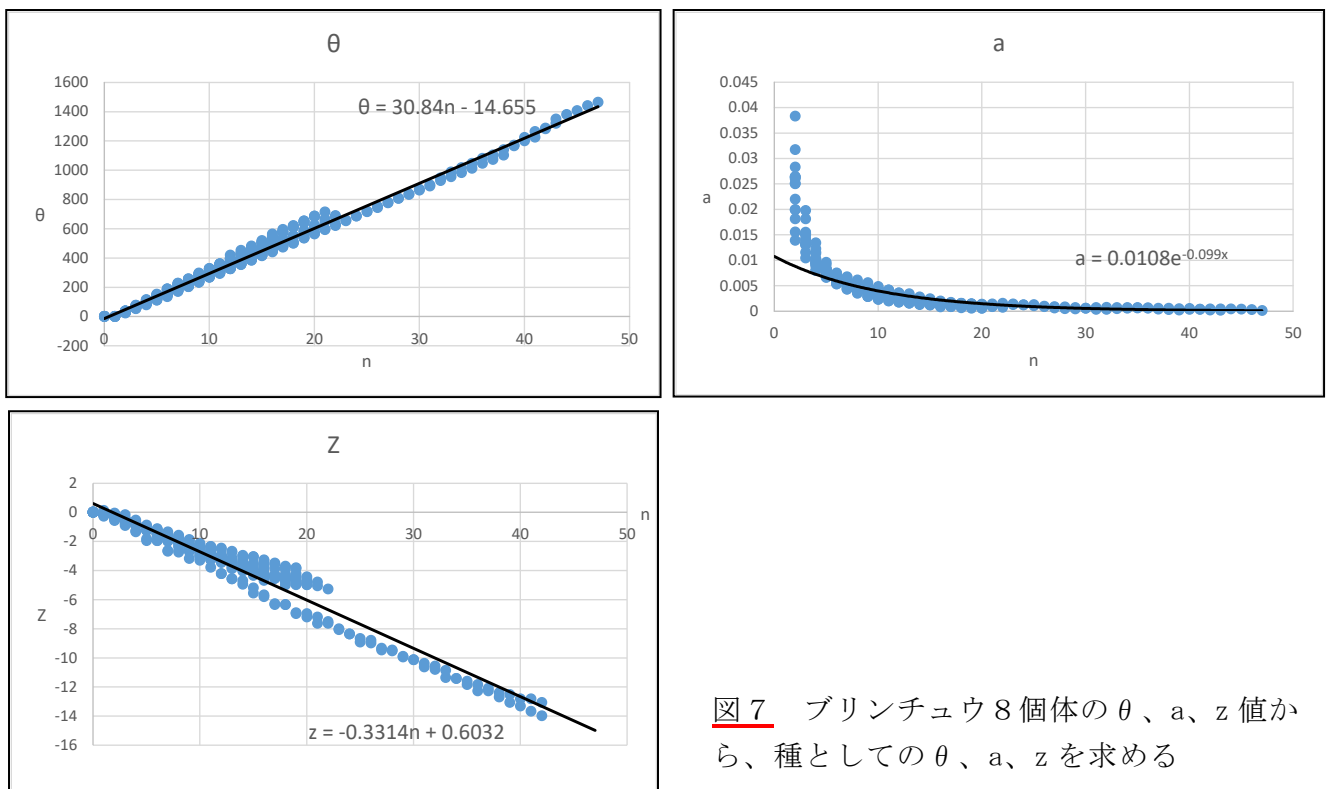


図7 プリンチュウ8個体の  $\theta$ 、 $a$ 、 $z$  値から、種としての  $\theta$ 、 $a$ 、 $z$  を求める



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

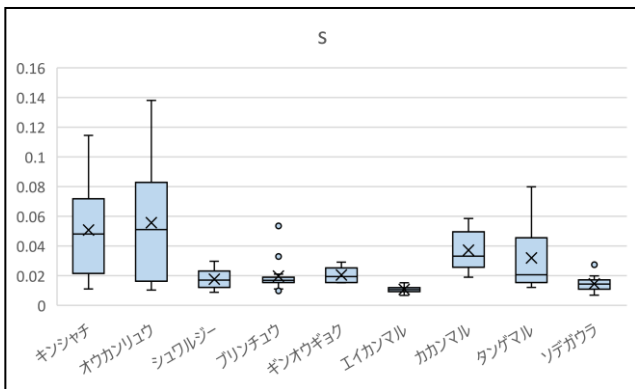


図8 9種のサボテンの螺旋方程式のs値

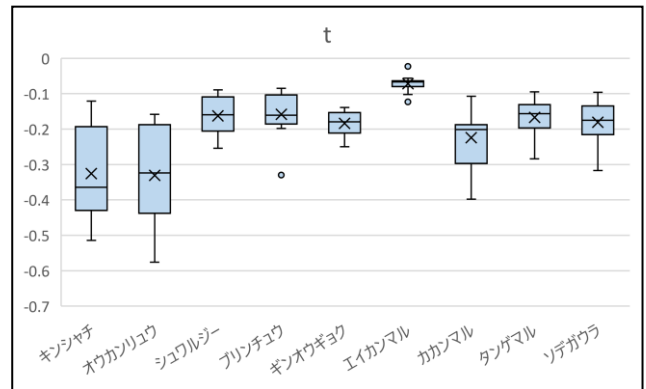


図9 9種のサボテンの螺旋方程式のt値

(横線は中央値、×は平均値、○は外れ値)

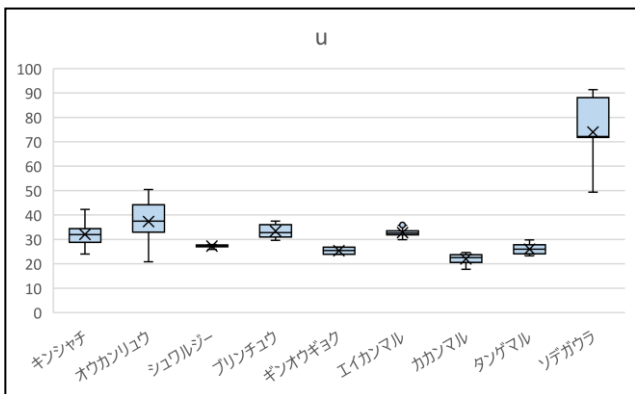


図10 9種のサボテンの螺旋方程式のu値

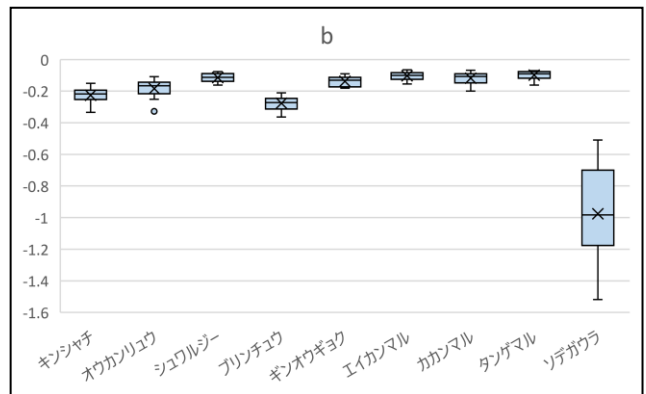


図11 9種のサボテンの螺旋方程式のb値

(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。

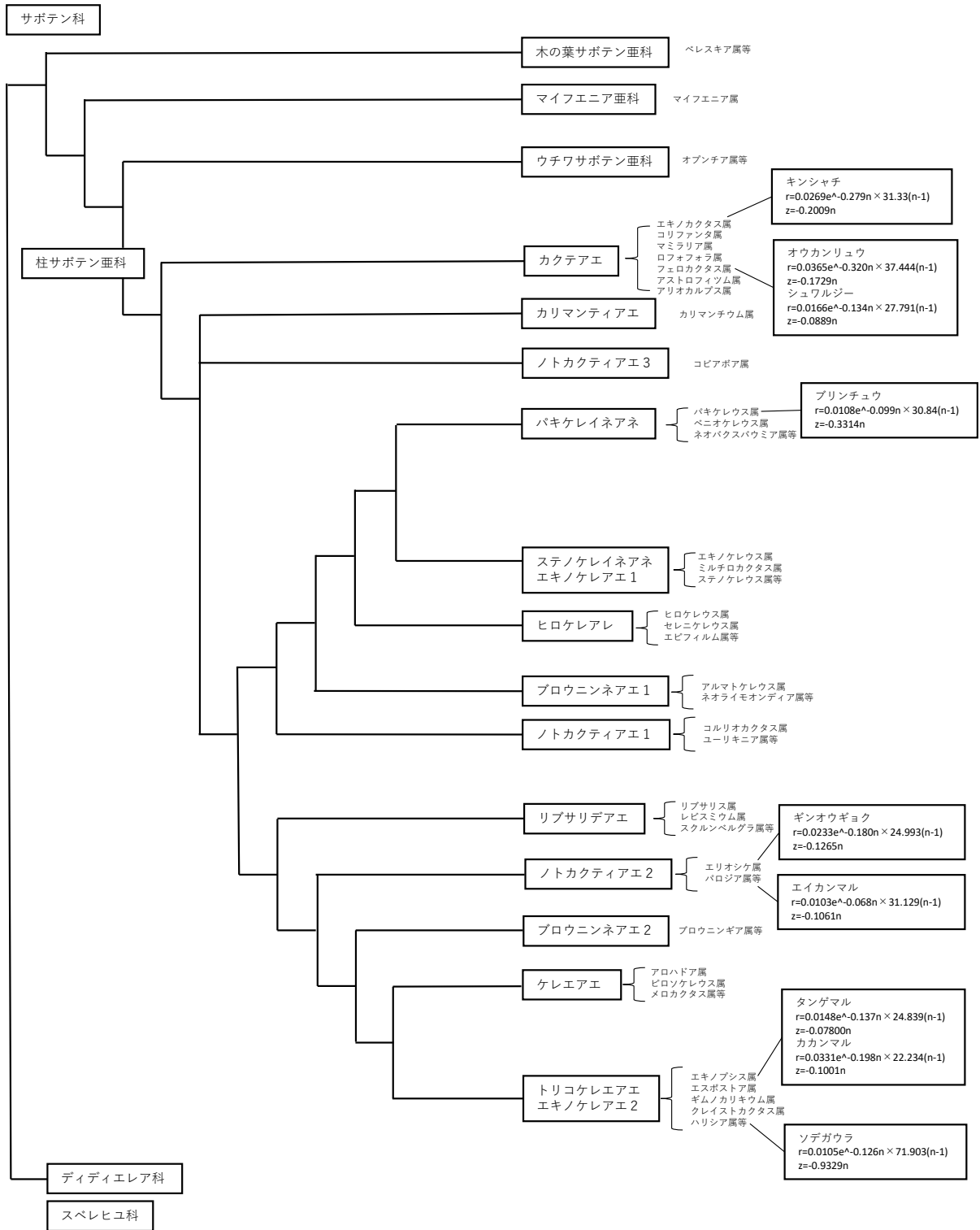


図 12 DNA に基づくサボテン種の系統樹 (Hernández et al.,<sup>2)</sup> をまとめて加筆)

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	環境要因	変数	相関係数	相関の有無
雨量	s	-0.452515	相関あり	雨量	s	-0.442011	相関あり
	t	0.4642742	相関あり		t	0.5977689	相関あり
	b	0.5127725	相関あり		b	0.4855745	相関あり
	u	0.0488401	相関なし		u	0.3310772	弱い相関
日照時間	s	-0.282937	弱い相関	日照時間	s	-0.467843	相関あり
	t	0.1939165	相関なし		t	0.5520489	相関あり
	b	0.5127725	相関あり		b	-0.441237	相関あり
	u	0.3025052	弱い相関		u	0.3745112	弱い相関
最高気温	s	-0.428973	相関あり	最高気温	s	-0.386205	弱い相関
	t	0.4088448	相関あり		t	0.4171459	相関あり
	b	-0.279898	弱い相関		b	-0.374978	弱い相関
	u	0.1047264	相関なし		u	0.4615888	相関あり
平均気温	s	-0.543256	相関あり	平均気温	s	-0.325447	弱い相関
	t	0.5903304	相関あり		t	0.4261771	相関あり
	b	-0.275859	弱い相関		b	-0.448894	相関あり
	u	-0.073892	相関なし		u	0.5834743	相関あり
最低気温	s	-0.816004	強い相関	最低気温	s	-0.716143	強い相関
	t	0.845894	強い相関		t	0.7425135	強い相関
	b	0.0122529	相関なし		b	-0.22788	弱い相関
	u	-0.160784	相関なし		u	0.6869458	相関あり
標高の上限	s	0.671476	相関あり	標高の上限	s	0.8833854	強い相関
	t	-0.677739	相関あり		t	-0.748362	強い相関
	b	0.0810093	相関なし		b	0.4324296	相関あり
	u	-0.084805	相関なし		u	-0.803561	強い相関
標高の下限	s	0.7380096	強い相関	標高の下限	s	0.5356517	相関あり
	t	-0.793695	強い相関		t	-0.602861	相関あり
	b	-0.149144	相関なし		b	0.0107528	相関なし
	u	0.2324687	弱い相関		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地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

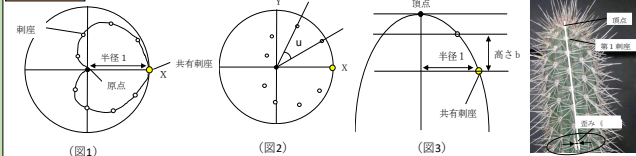
**目的**

**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を検討する。
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。

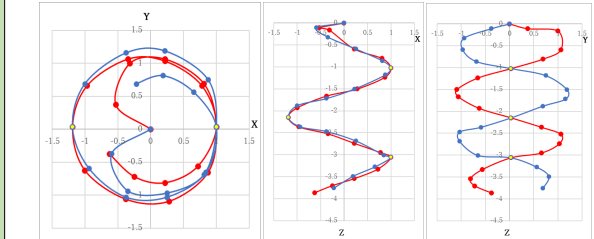
**観察方法**



- 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。

$$r = se^{(tn)} \times u(n-1) \quad z = bn \quad e: \text{ネイピア数}(2.71828)$$

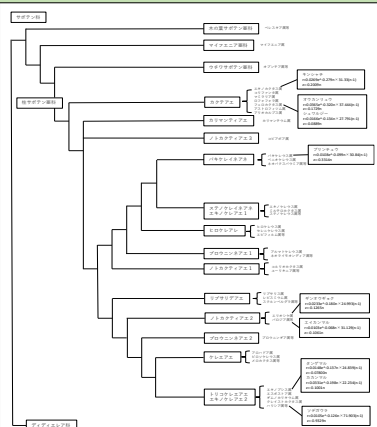
- u: 隣接する2つの刺座間のなす水平面上の角度、b: 横から見た隣接する2つの刺座間の垂直距離
- n: 原点の刺座を0としたとき何番目の刺座か
- sは数値が小さいほど上から見たときの刺座が描く螺旋が大きく膨らむ。
- tは螺旋を描く刺座の数が多しほど数値は小さくなる。

(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



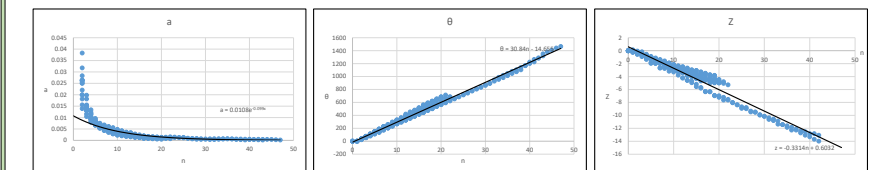
9種類のサボテンで、刺座の配列は上方中央の刺座から下方に向かって、左回りと右回りに螺旋を描いて、共有刺座で出会いながら配列する**螺旋方程式で表すことができ、その方程式は種ごとに特徴的な変数をもつ。**



(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、 $a = se^{tn}$ 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から、それぞれのサボテン種の種類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たい。

(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)。

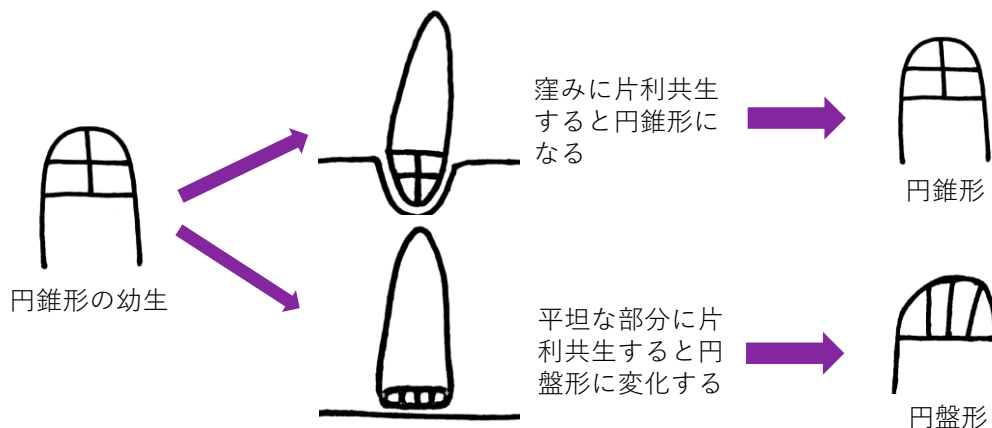


図2 ニハイチュウの極帽の場所による形態変化 (岸上,2023 を一部改変)

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



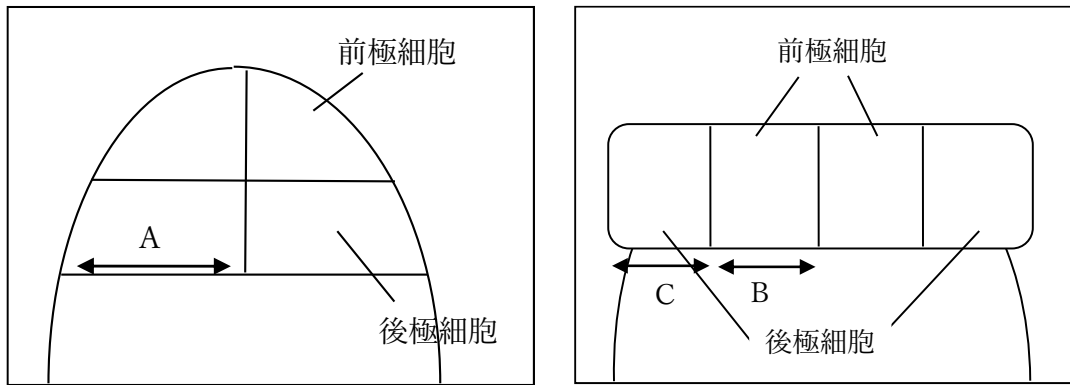


図4 極帽の大きさの測定部分 A、B、C ( $\mu\text{m}$ /左：円錐形/右：円盤形)

(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。

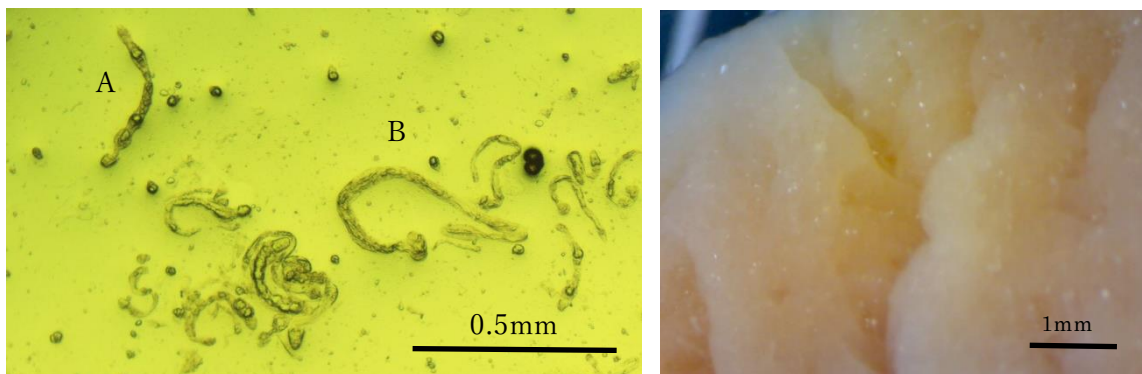


図5 円錐形ニハイチュウ (A) と円盤形ニハイチュウ (B)、腎囊表面の窪み (右)

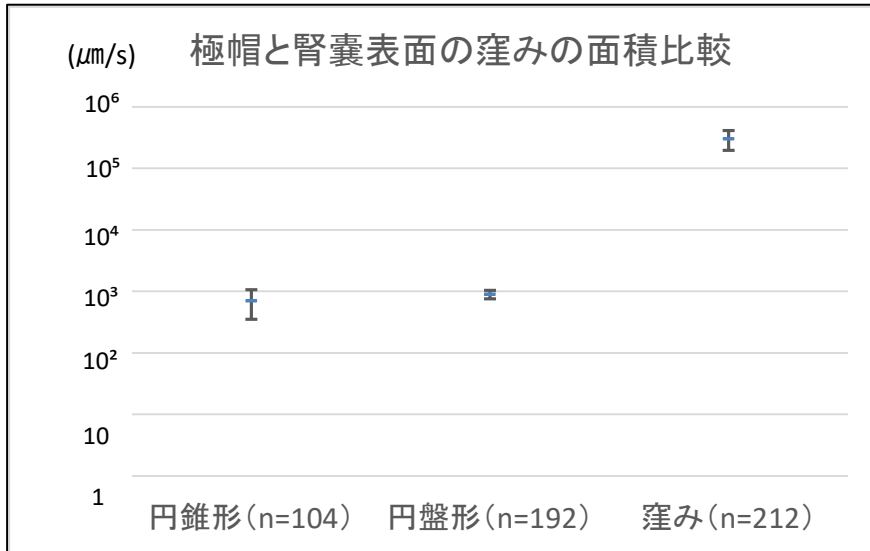


図6 ニハイチュウの極帽とマダコの窪みの断面面積比較

(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。

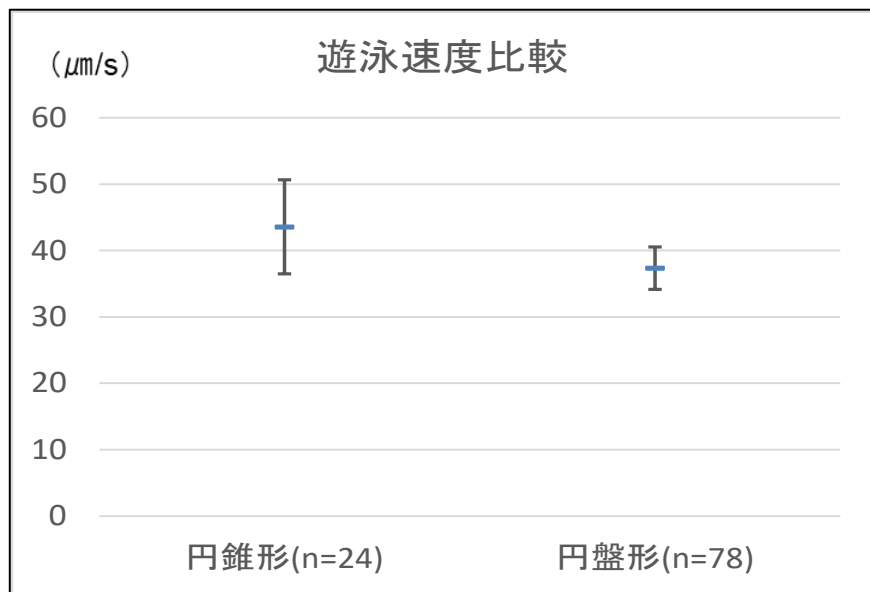


図7 円盤形と円錐形のニハイチュウの遊泳速度比較

(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

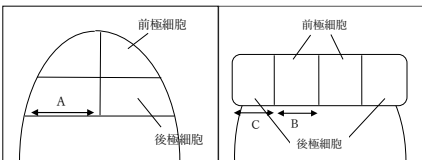


図4 極帽の大きさの測定部分 A、B、C(μm)左:円錐形/右:円盤形

## 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位の再検討(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。

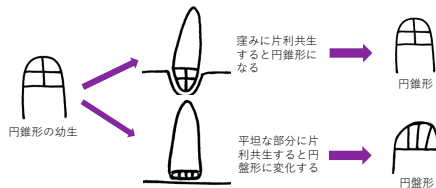


図2 ニハイチュウの極帽の場所による形態変化(岸上,2023を一部改変)

## 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。

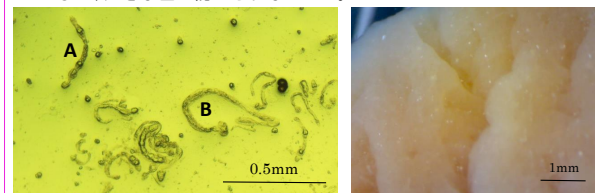


図5 円錐形ニハイチュウ(A)と円盤形ニハイチュウ(B)、腎臓表面の窪み(右)

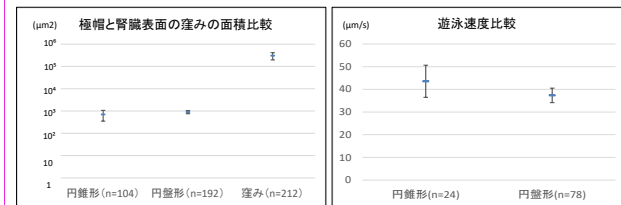


図6 ニハイチュウの極帽とマダコの窪みの断面積比較 図7 円盤形と円錐形のニハイチュウの遊泳速度比較

## 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。

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—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—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 (酸化的か還元のか) 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。

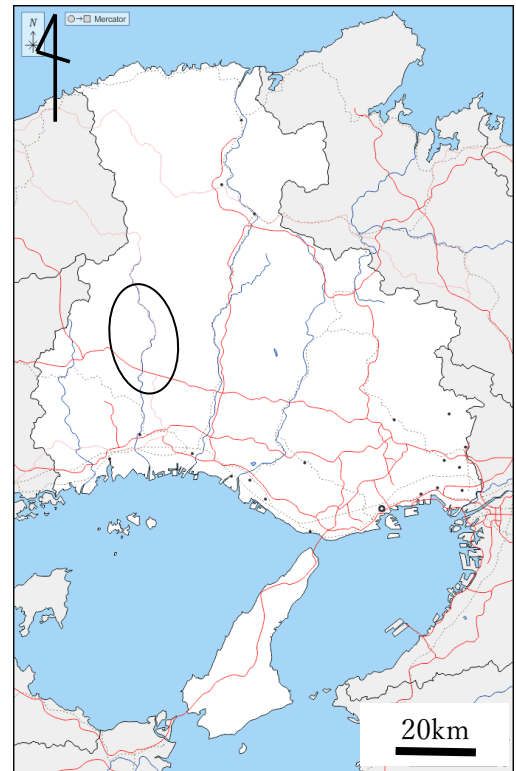


図1 本研究の調査地域(楕円の地域)  
(d-maps.com, 2023 に加筆)

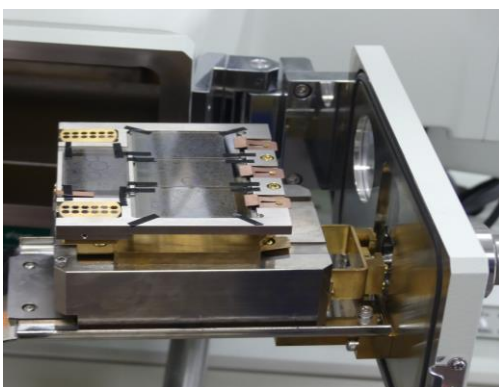


図2 真空炭素蒸着を行った薄片試料(左)とEPMA分析の実施(右/京都大学理学部 JEOL JXA-8105)

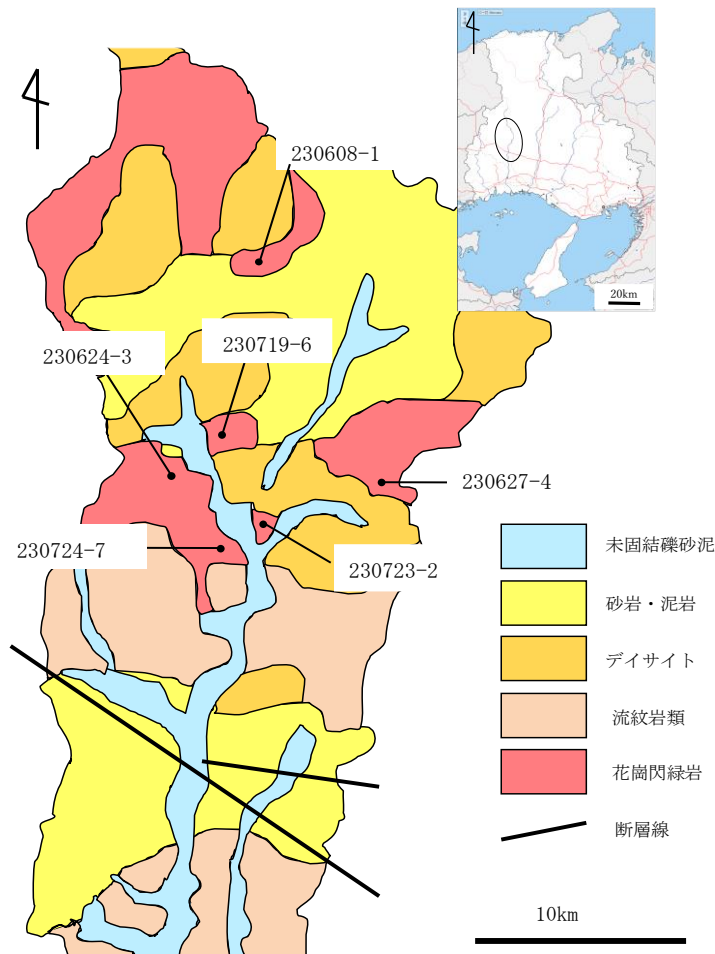


### 4. 結果

#### (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に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。

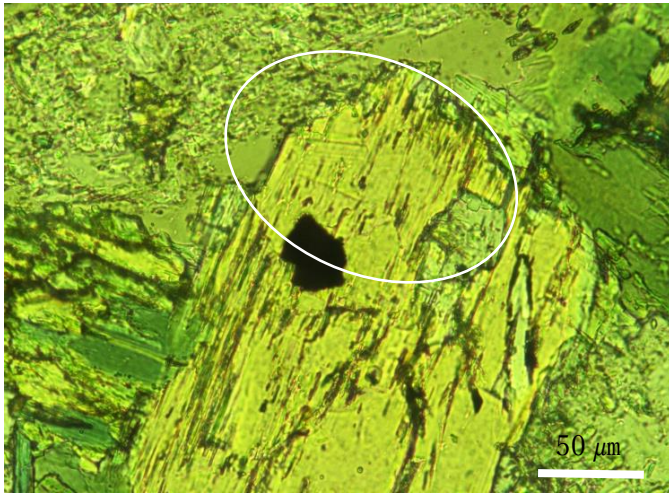


図7 試料 230608-1 (オープンニコル 400 倍)

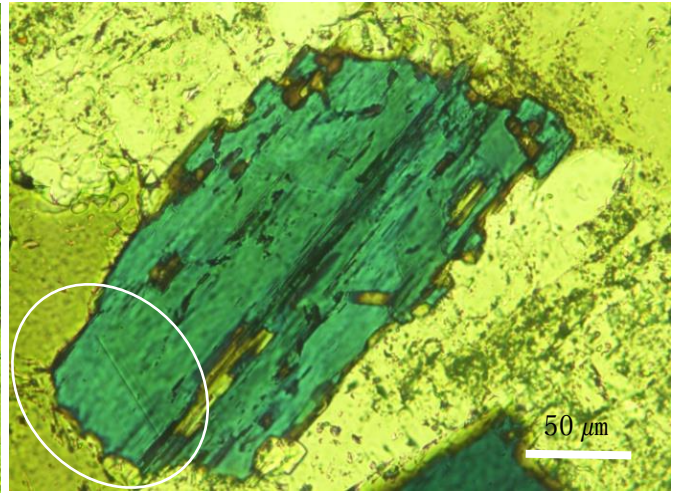


図8 試料 230624-3 (オープンニコル 400 倍)

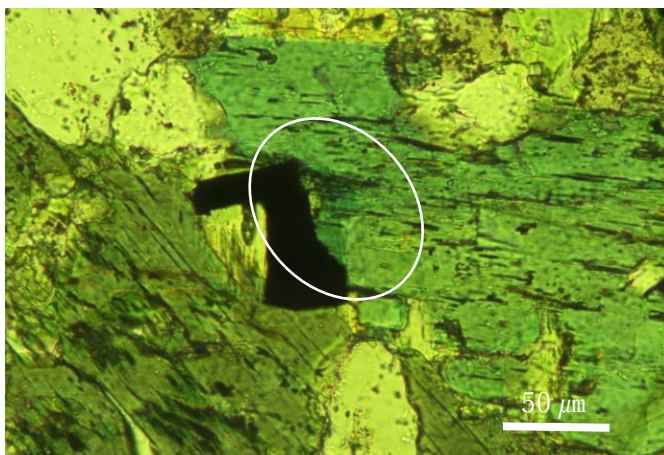


図9 試料 230627-4 (オープンニコル 400 倍)

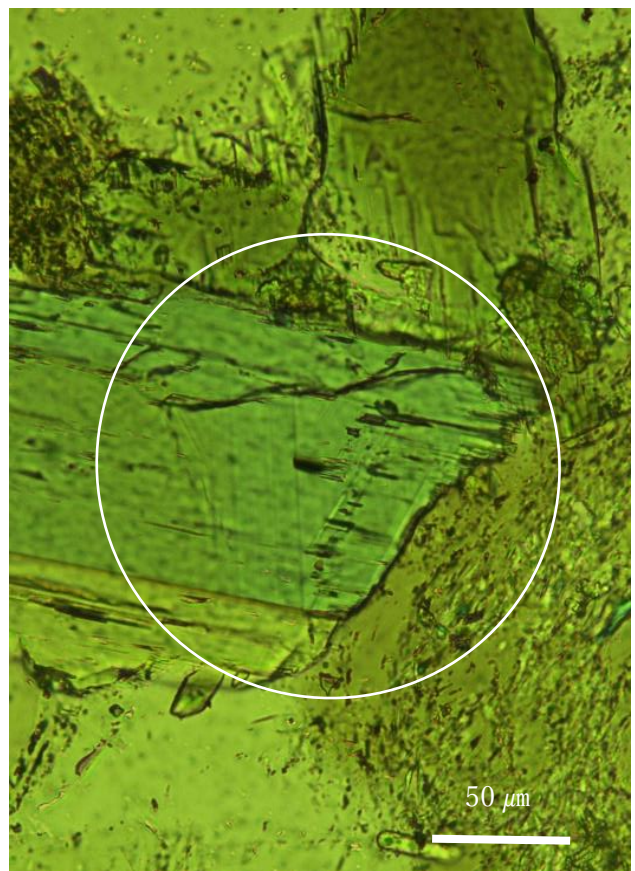


図10 試料 230719-6 (オープンニコル 400 倍)



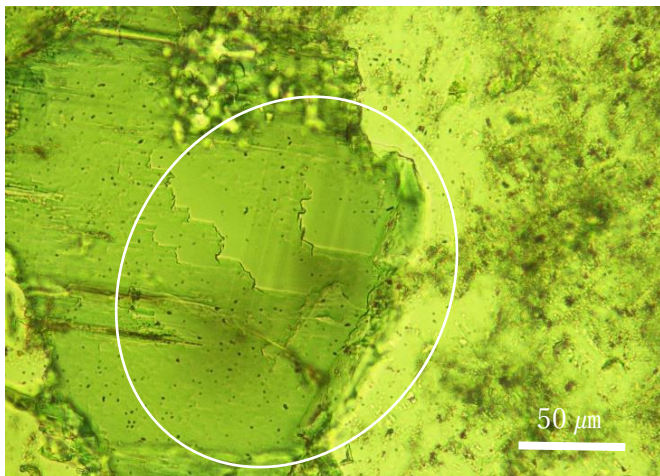


図11 試料 230724-7 (オープンニコル 400倍)

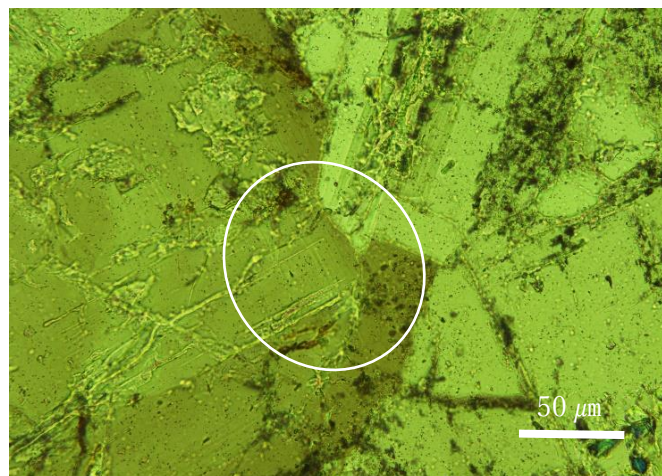


図12 試料 230723-2 (オープンニコル 400倍)

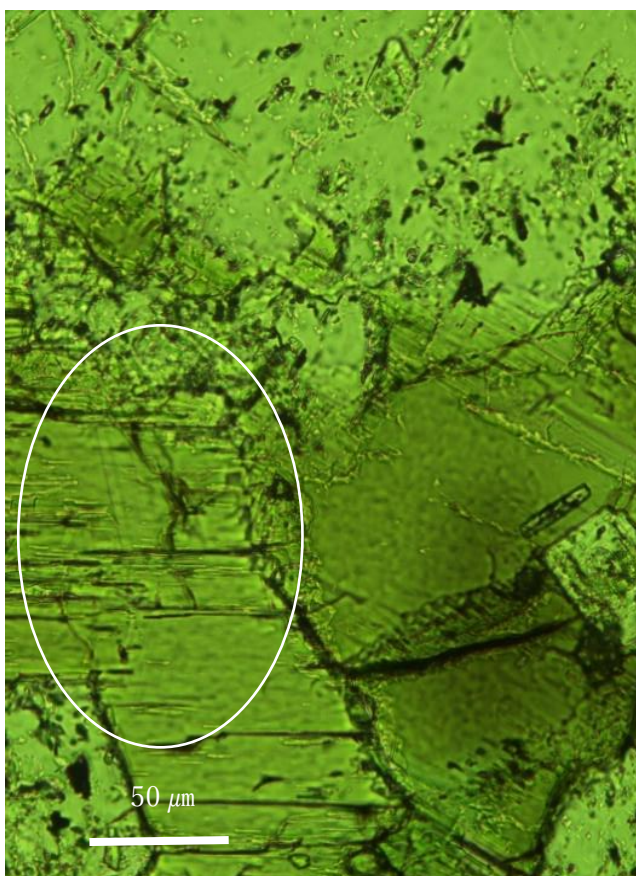


図13 試料 230723-2 (オープンニコル 400倍)

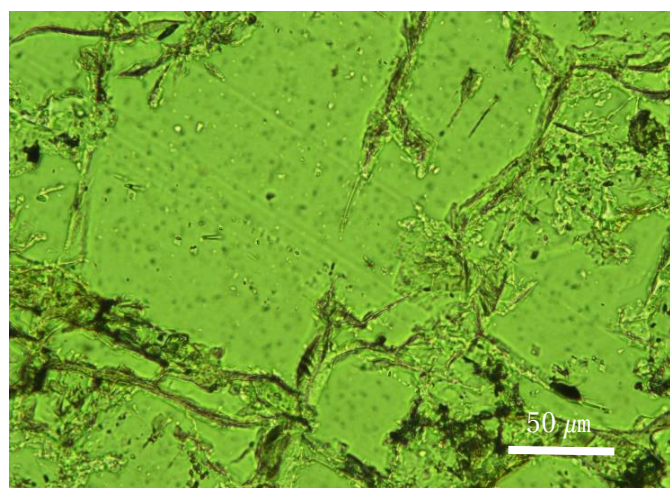


図14 試料 230723-2 (オープンニコル 400倍)

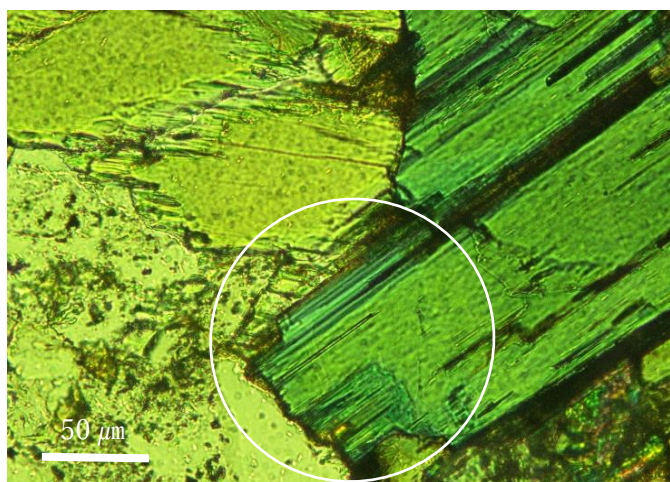


図15 試料 230723-2 (オープンニコル 400倍)



(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 μm 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縁が見られる。

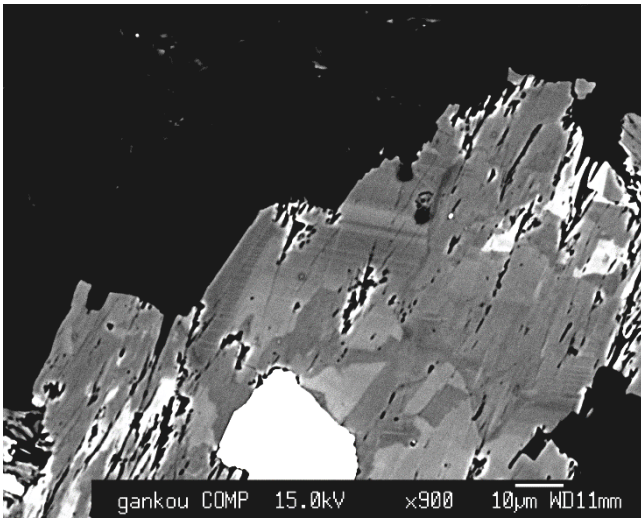


図 16 反射電子線像 (図 7 の試料 230608-1)

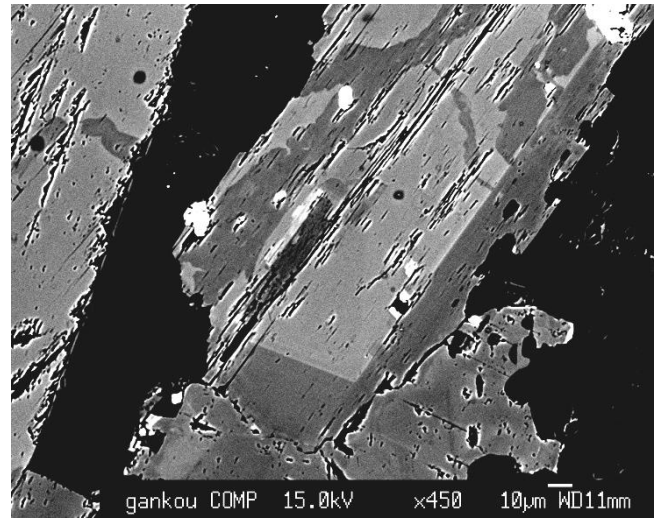


図 17 反射電子線像 (図 8 の試料 230624-3)

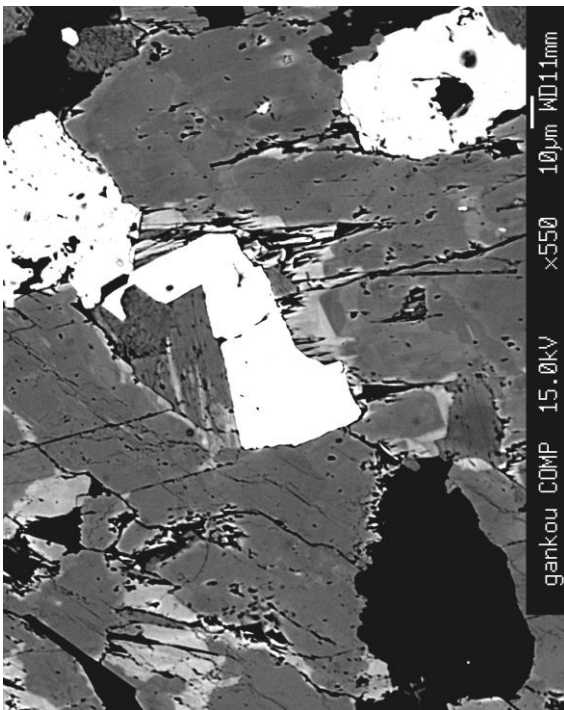


図 18 反射電子線像 (図 9 の試料 230627-4)

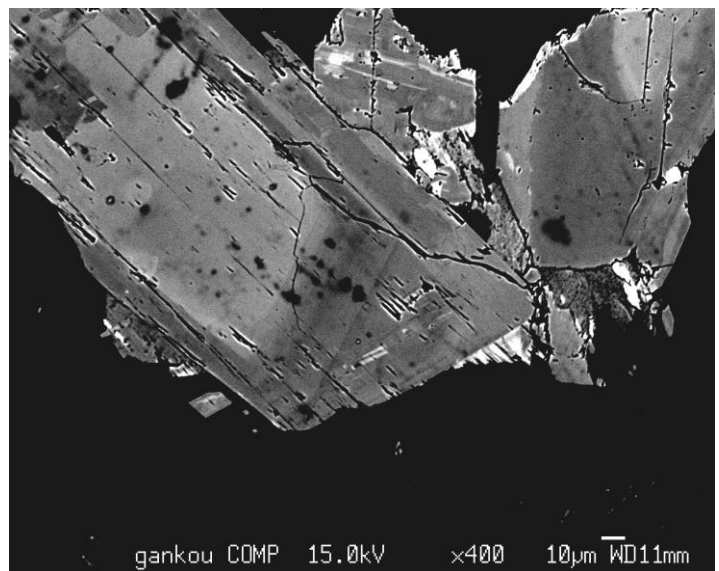


図 19 反射電子線像 (図 10 の試料 230719-6)

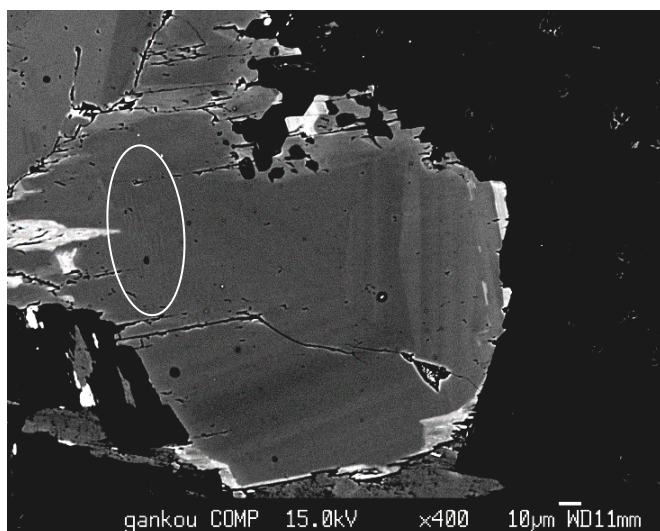


図 20 反射電子線像 (図 11 の試料 230724-7)  
(楕円で示す部分に離溶ラメラ構造が見える)

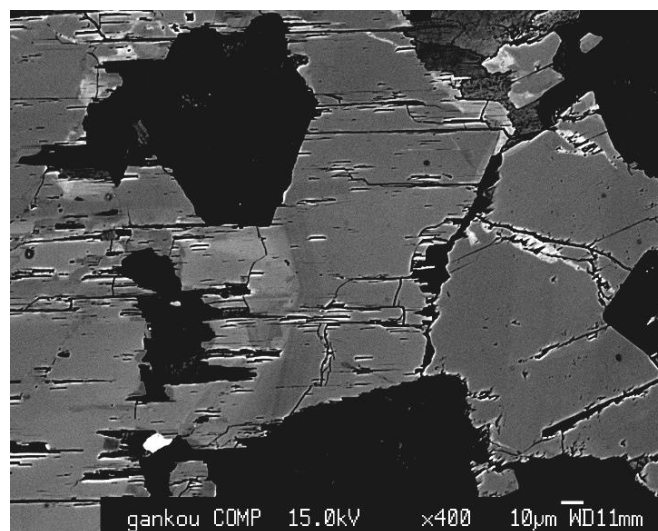


図 21 反射電子線像 (図 13 の試料 230723-2)

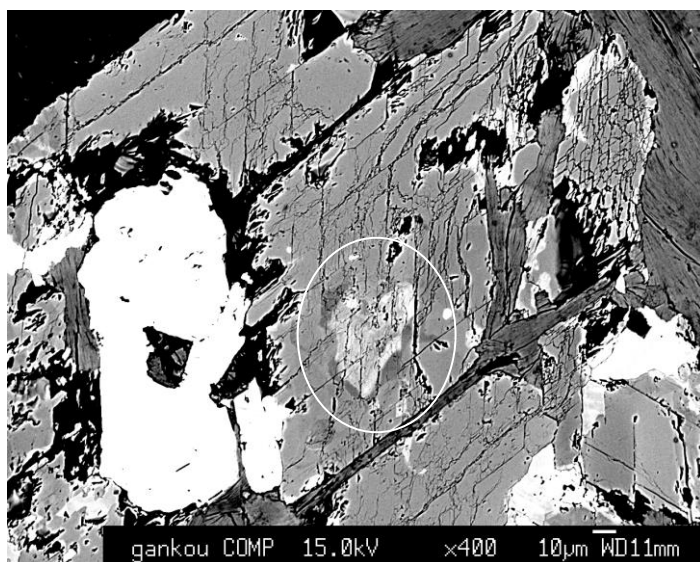


図 22 試料 230724-7 に見られるコアと淡緑色のリム間の反応線 (楕円の部分)

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。



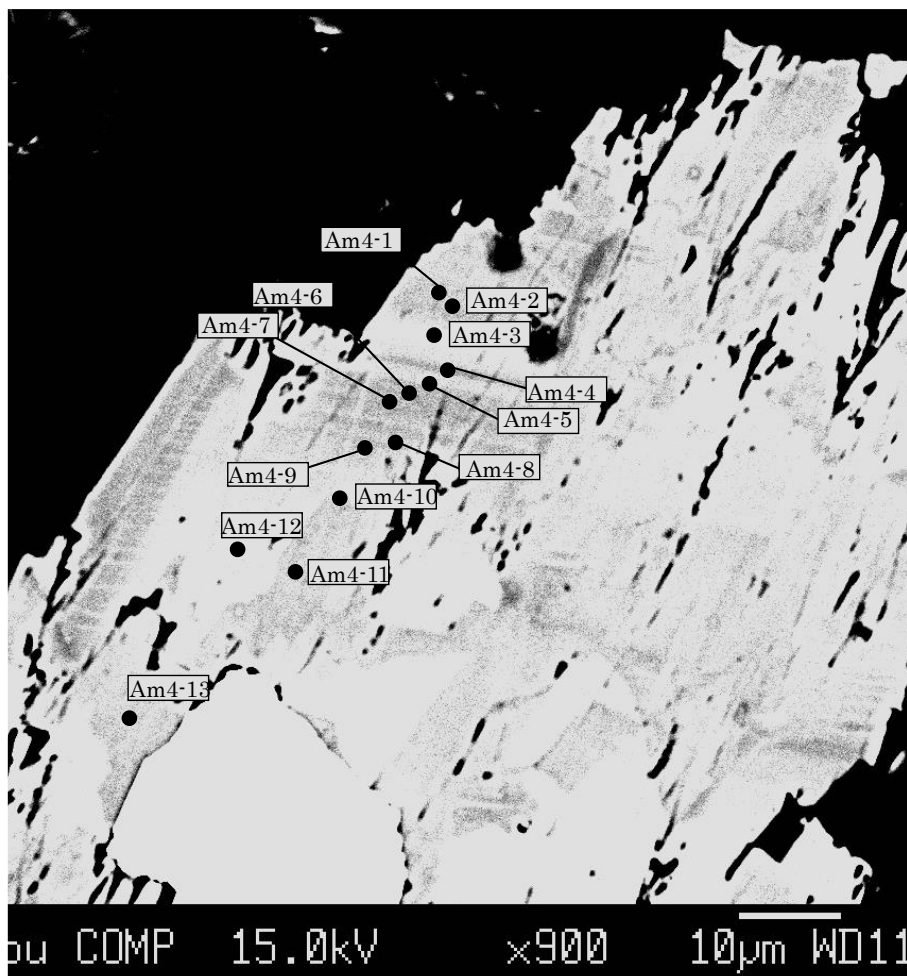


図 23 反射電子線像 (図 16 の試料 230608-1)

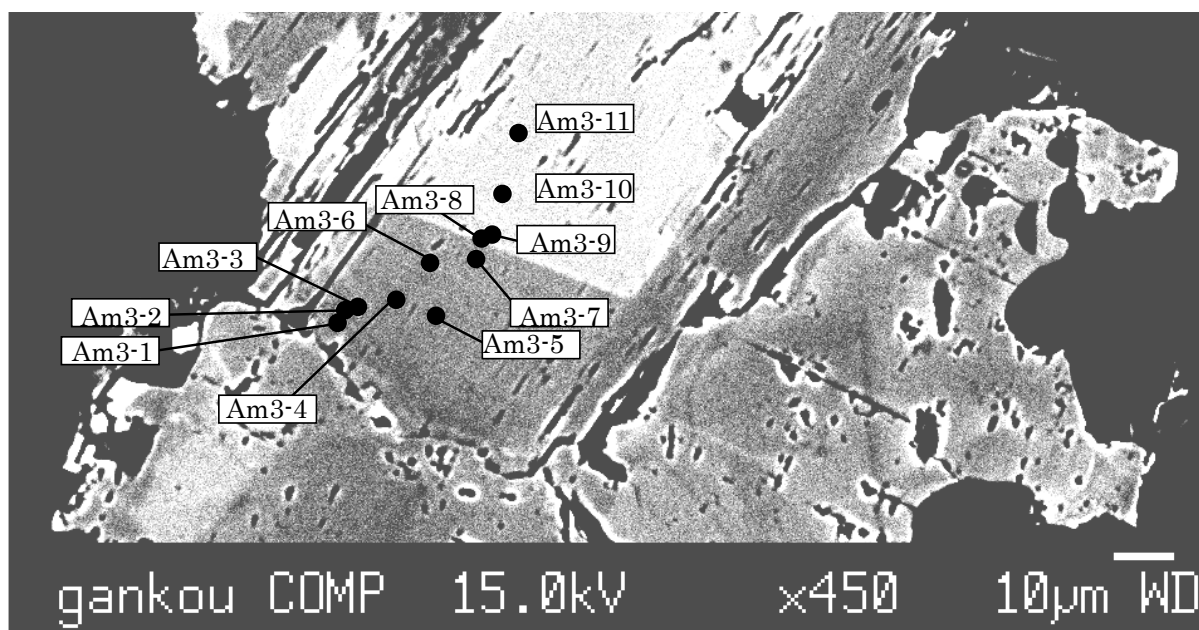


図 24 反射電子線像 (図 17 の試料 230624-3)

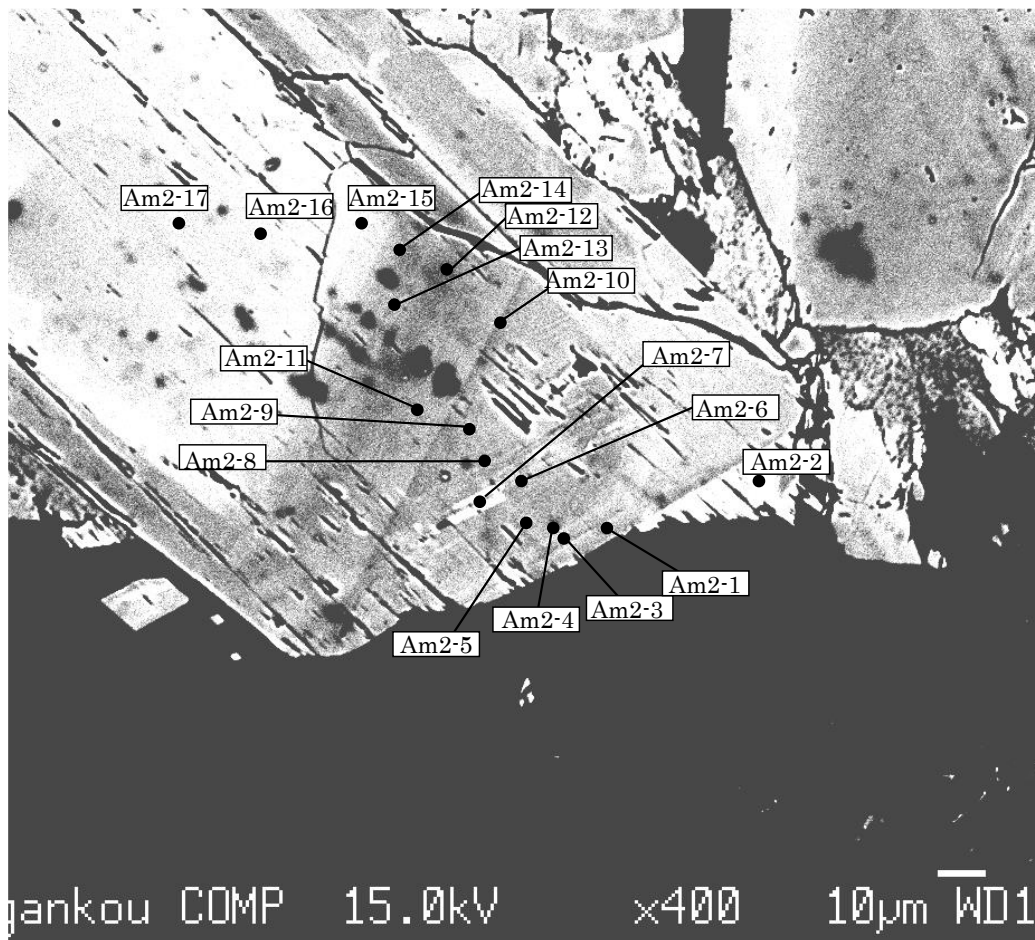


図 25 反射電子線像 (図 19 の試料 230719-6)

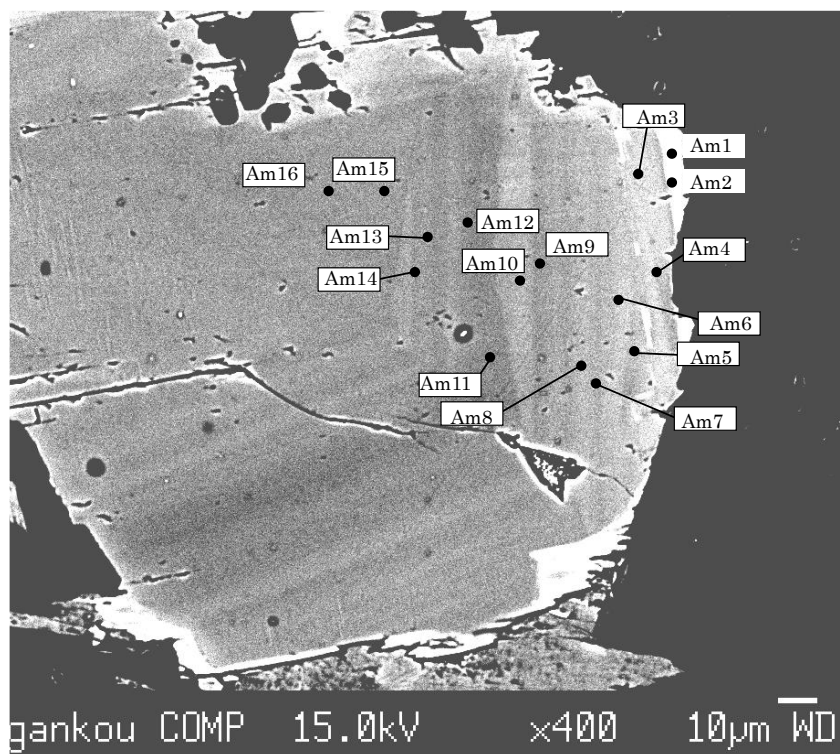


図 26 反射電子線像 (図 20 の試料 230724-7)



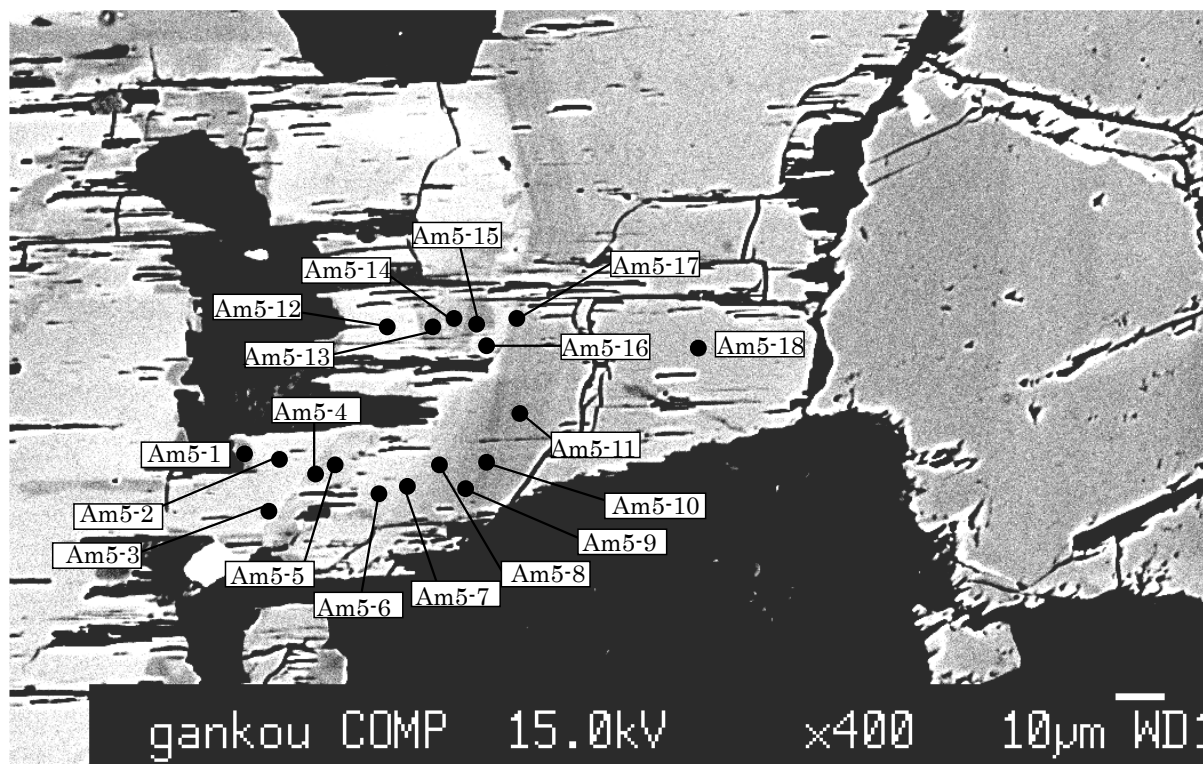


図 27 反射電子線像 (図 21 の試料 230723-2)

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	0.030329	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



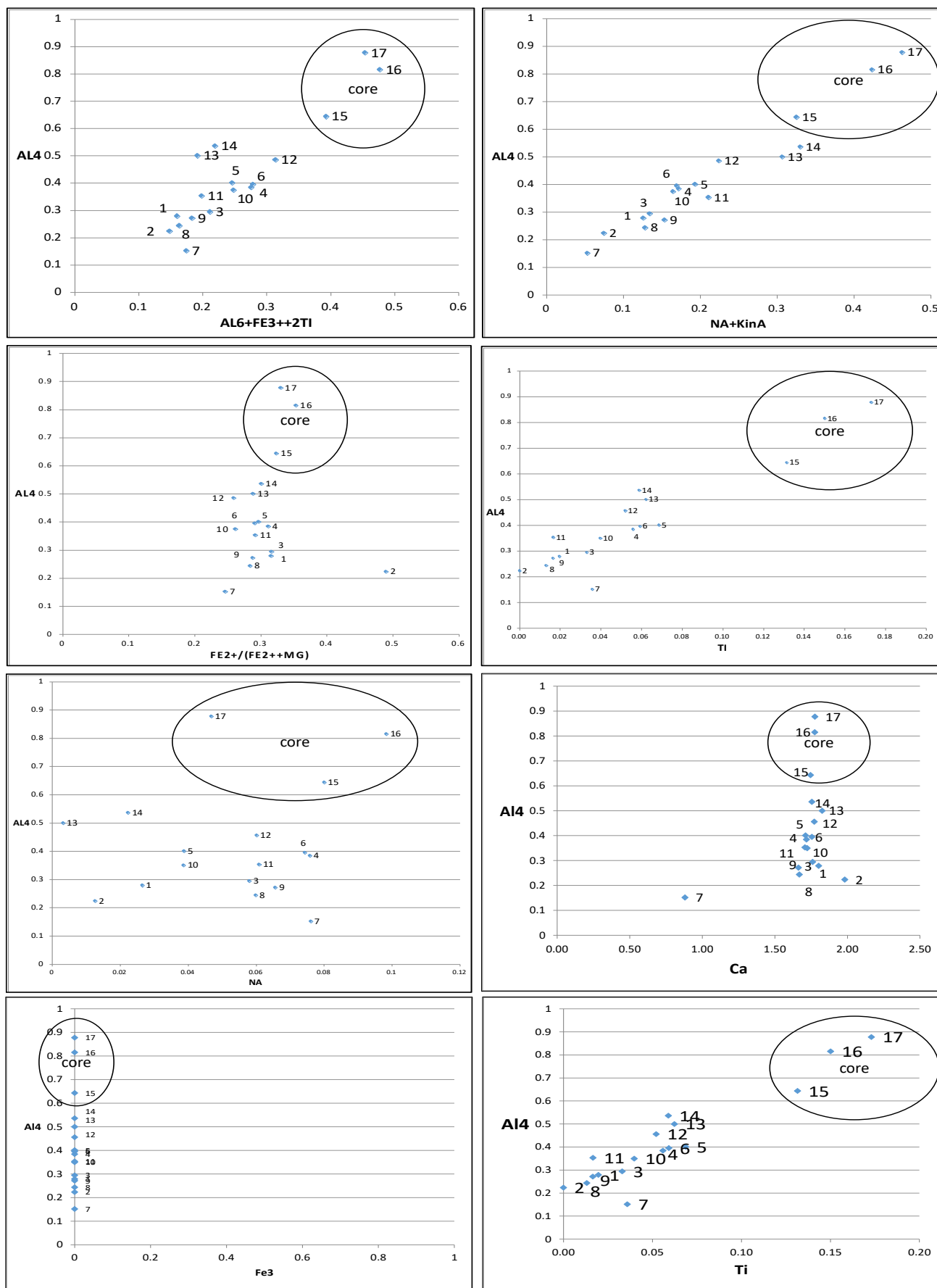
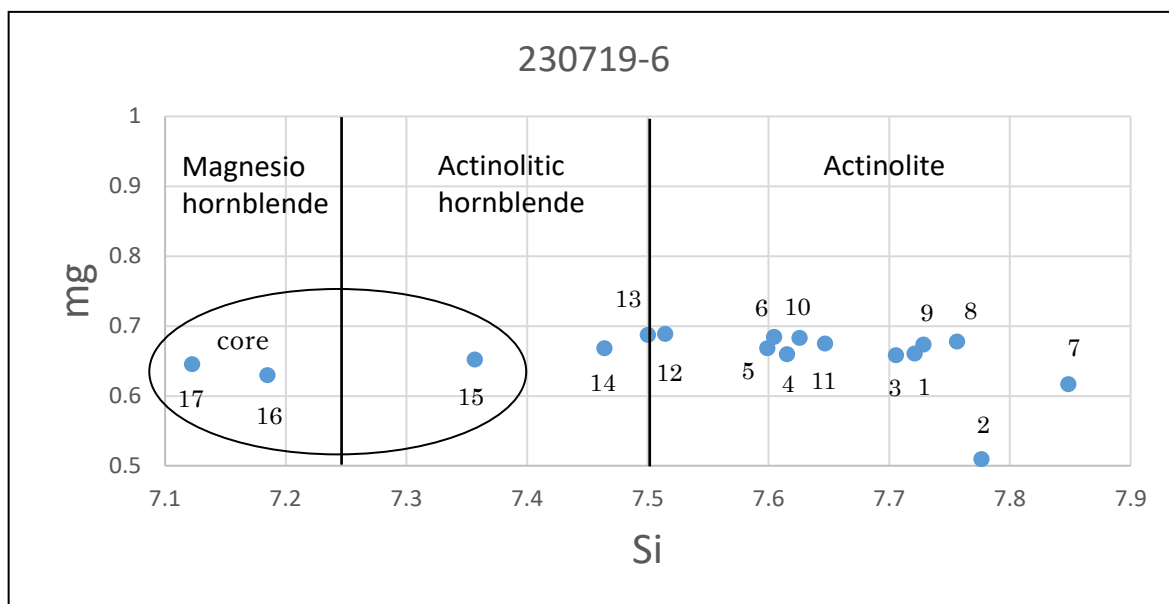
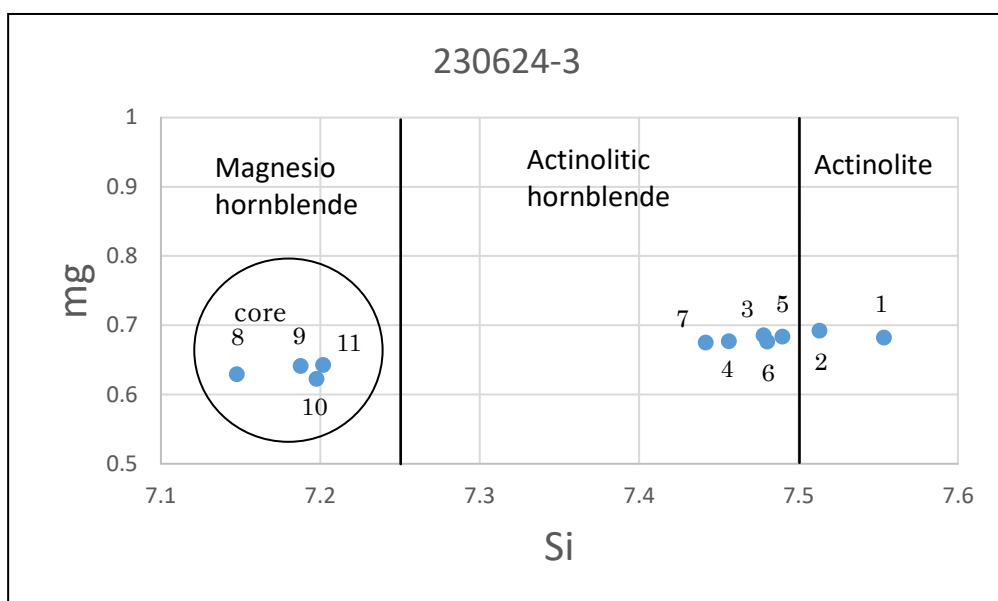
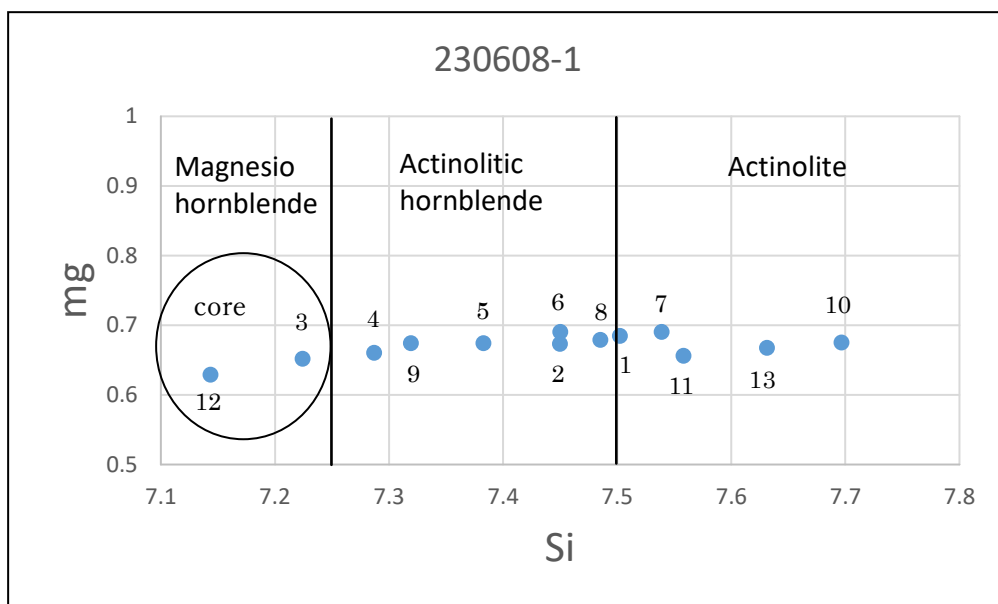


図 28 角閃石の波状累帯構造の化学組成の代表的なグラフの例 (図 25 の試料 230719-6)



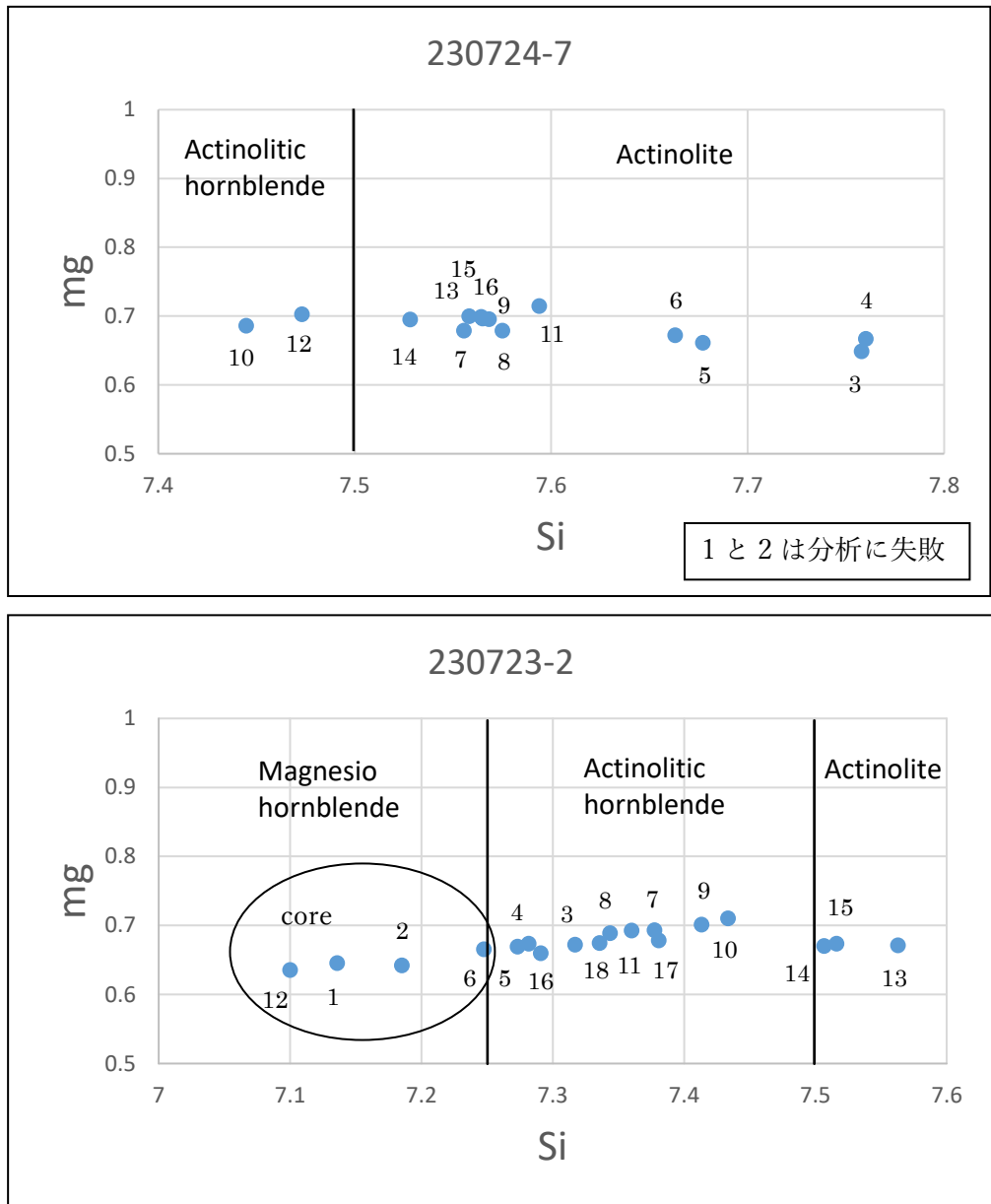
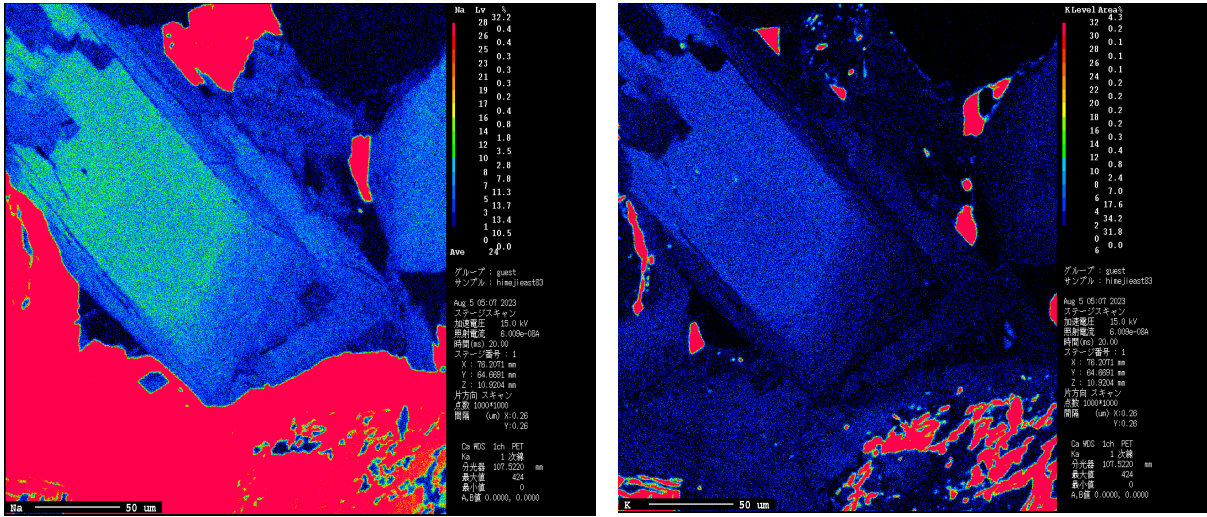


図 29 波状累帯構造部分の角閃石の mg-Si 図

角閃石の波状累帯構造領域のマッピングを行った (15.0KV、 $6 \times 10^{-8}A$  / 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。

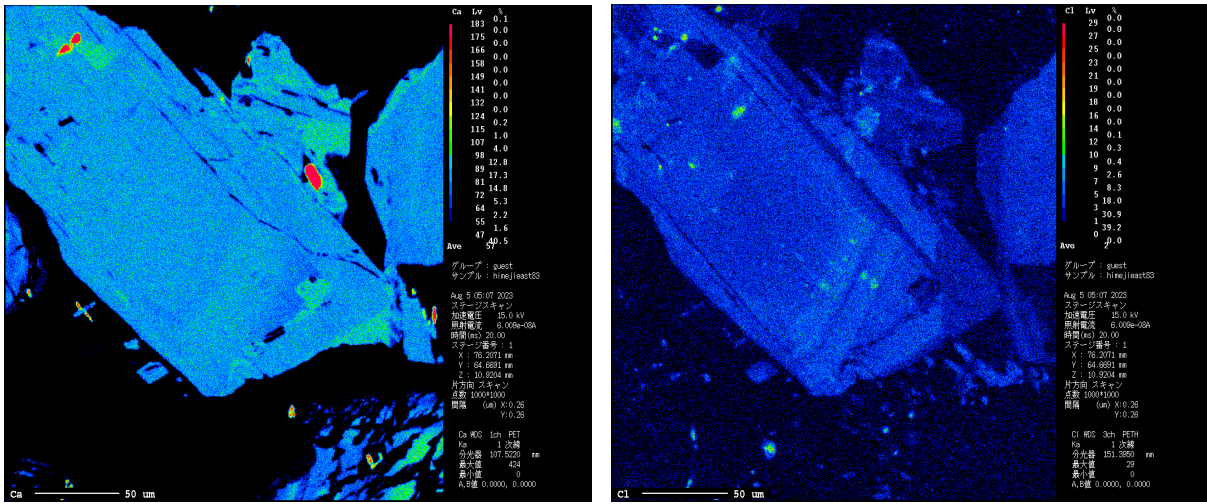






Na

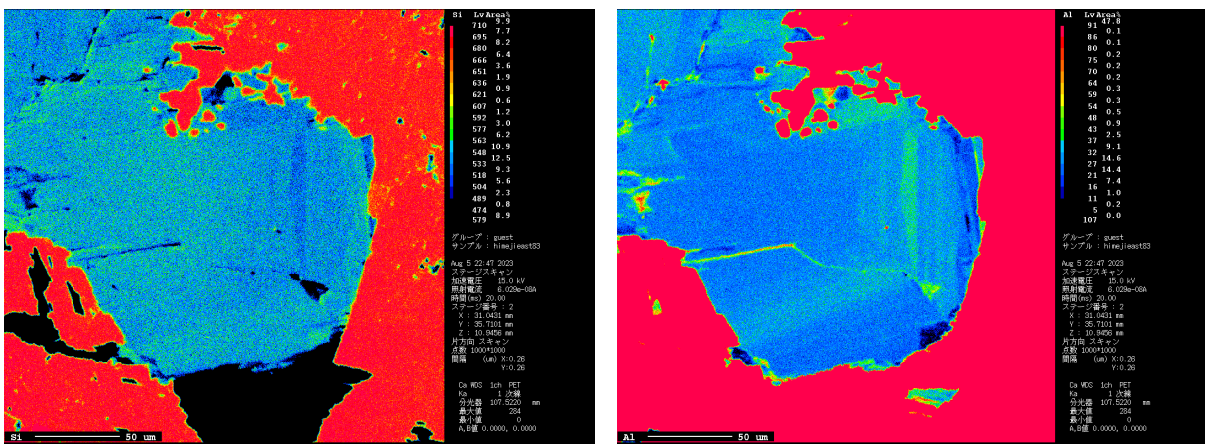
K



Ca

Cl

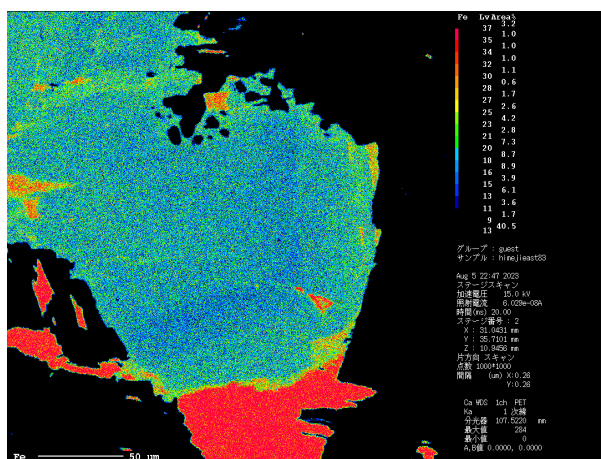
図 30 図 25 の試料 230719-6 の角閃石の面分析結果



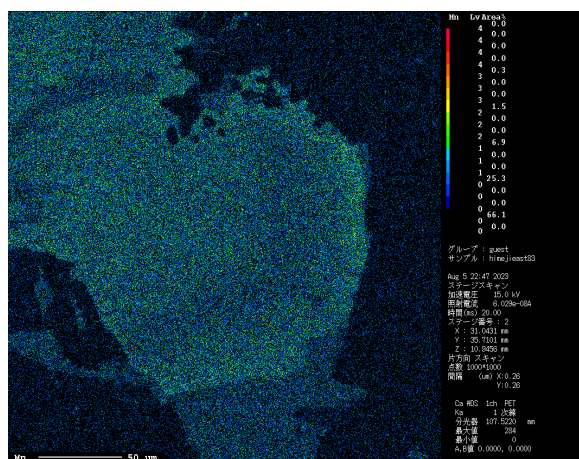
Si

Al

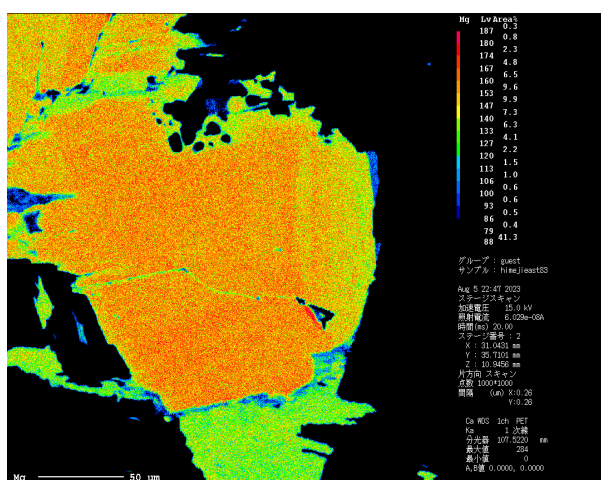




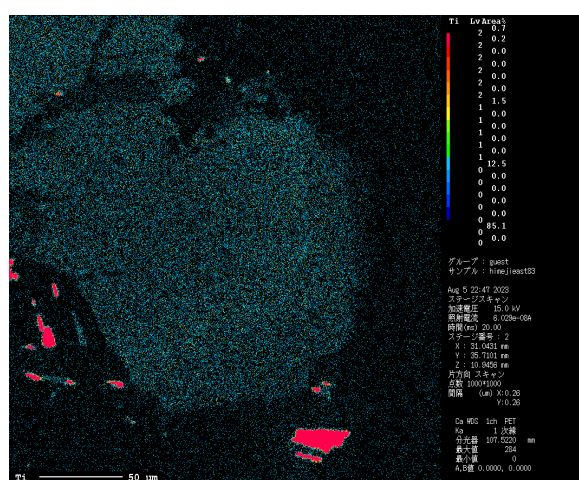
Fe



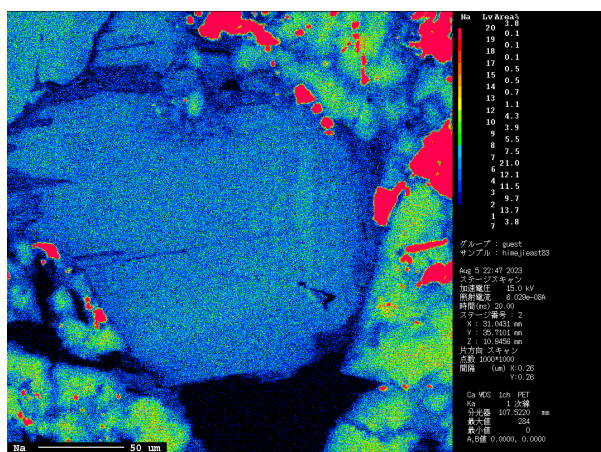
Mn



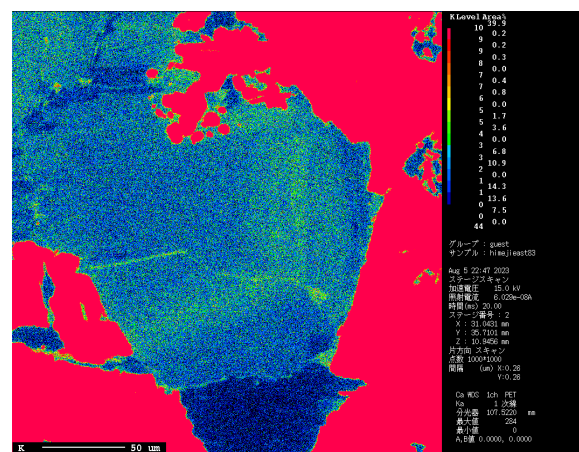
Mg



Ti



Na



K



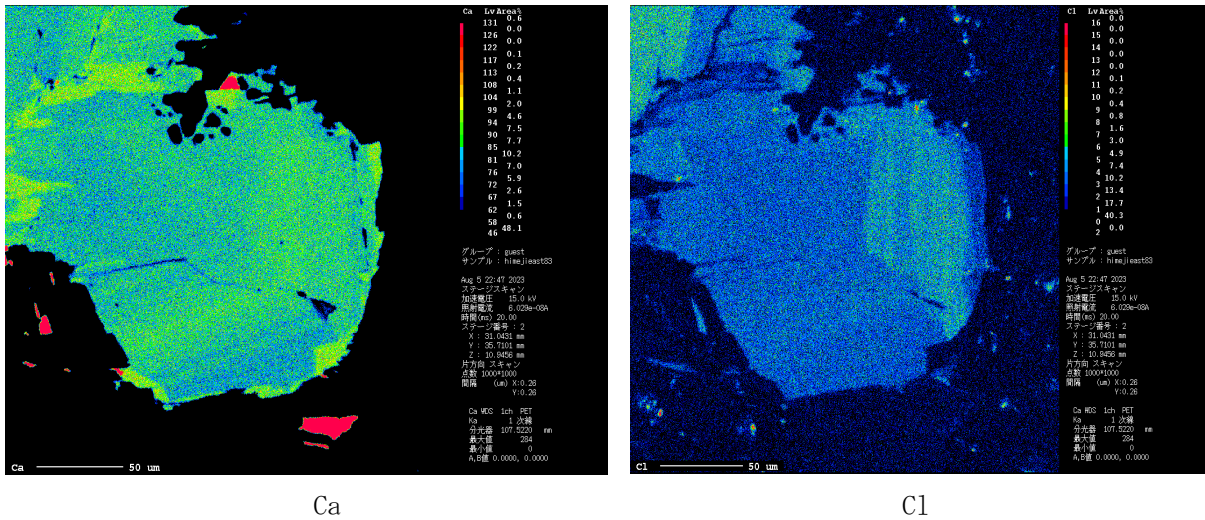


図 31 図 26 の試料 230724-7 の角閃石の面分析結果

### 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)。

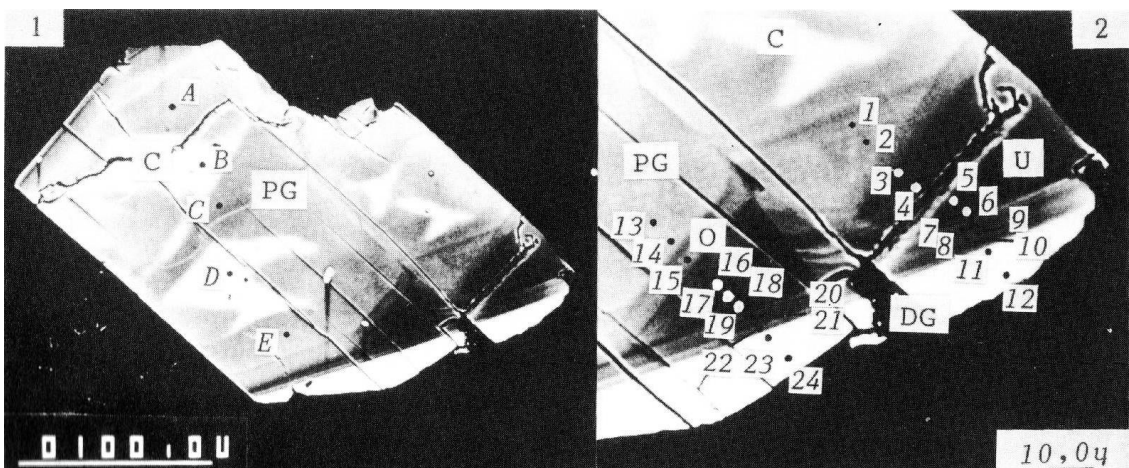
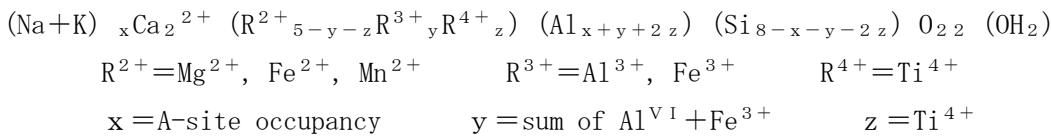


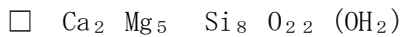
図 32 山陰帯大東－横田石英閃緑岩の角閃石の波状累帯構造の反射電子線像 (Kawakatsu and Yamaguchi, 1987a)

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  $Fe^{2+}$  と  $Mg^{2+}$  の置換のほかに、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	→	$Fe^{3+}$	+	Al	2B型	
M4	M1-3		M4	M1-3				
Ca	+	Mg	→	Na	+	Al	3A型	Glaucophane type
Ca	+	Mg	→	Na	+	$Fe^{3+}$	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  $Al^{IV}$  が増加している。 $Al^{IV}-Na+K$  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、 $Al^{IV}-Na$  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  $3\ \mu m$  に対して角閃石の波状累帯構造 1 本のバンド幅が  $1\sim 2\ \mu m$  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。



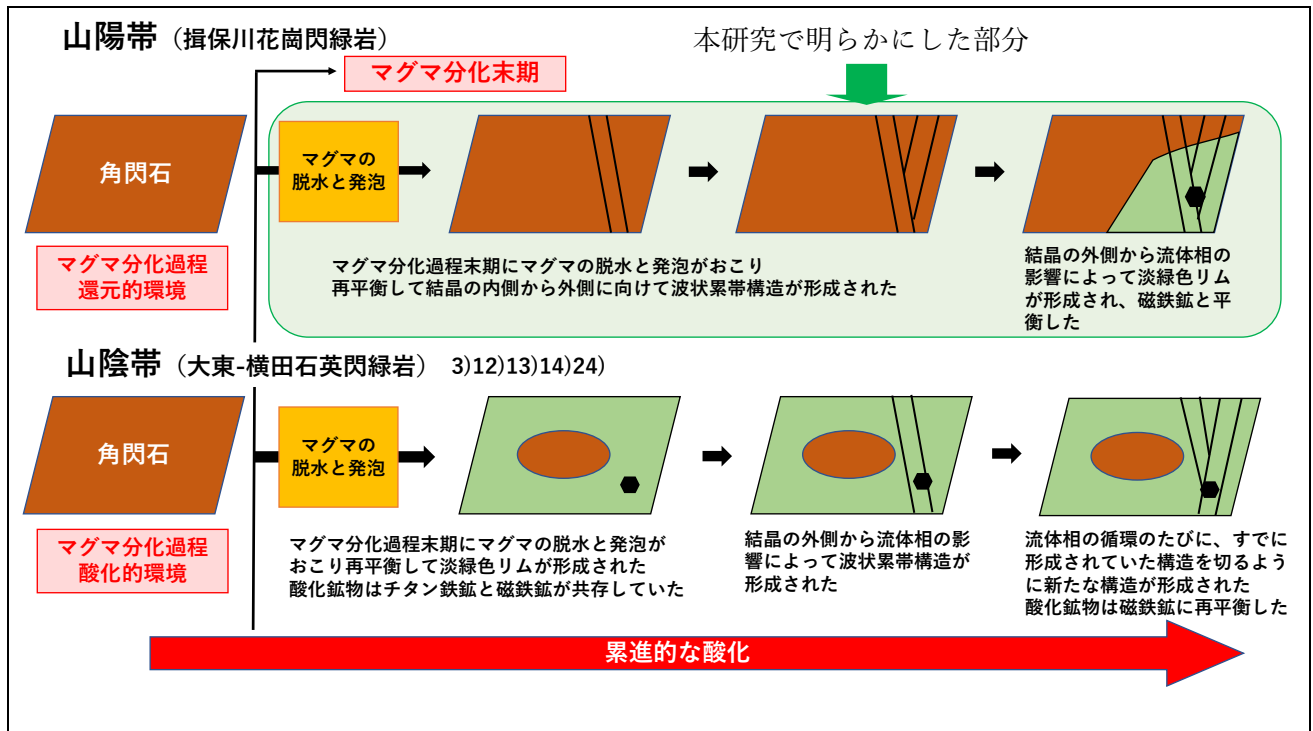


図 33 山陽帯と山陰帯の花崗岩類の角閃石に波状累帯構造が形成されるモデル図

(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る。

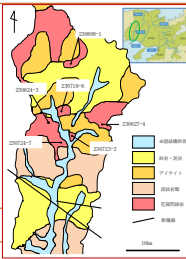
# 角閃石の微細構造から推定する熱水残液循環

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**

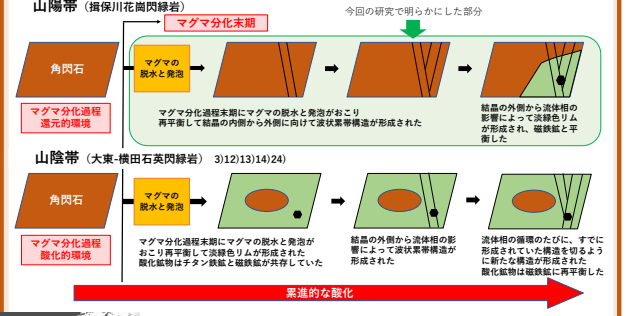
・波状累帯構造は不整合的な形状で、外側の構造を内側の構造が切っている。

**波状累帯構造は内側から外側に向かって形成された**

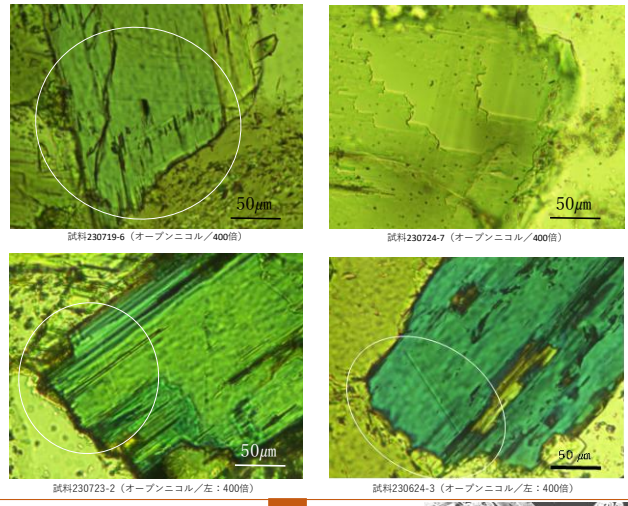
・波状累帯構造全体を覆うように、マグマの飽和脱水の指標である淡緑色リム12)13)23)24)が形成されている。

**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**

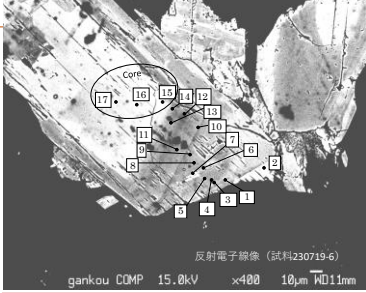
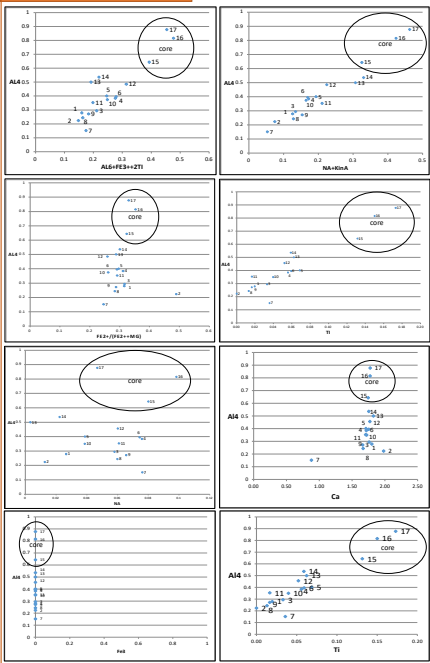


## 発見した波状累帯構造



## EPMA分析の結果

試料230719-6の例



・Al<sup>IV</sup> - Na + K in A-siteが直線関係でEdenite型置換がみられる。  
・Al<sup>IV</sup> - Naに相関関係がなくRicht-erite型置換は起こっていない。  
・Caに規則的な増減は認められず、3、4、6型置換はほとんどみられない。またM1-M3のFe<sup>3+</sup>はほぼ0で2B型は考えにくい。  
・Al<sup>IV</sup> - Tiのグラフに相関関係が見られるがM1-M3のTiは非常に少ないことから、5型置換はほとんど起こっていない。  
・Al<sup>IV</sup> - Al<sup>IV</sup> + Fe<sup>3+</sup> + 2Tiの相関関係は主にAl<sup>IV</sup>と四面体のAl<sup>IV</sup>間の置換である2A型Tschermakite型である。

山陰帯の角閃石の特徴12)13)24)やFinnmarka complex<sup>3)</sup>やporphyry copperを胚胎する花崗岩2)4)18)に共通した特徴を示す。

## 参考文献

- Anderson, A.T. (1973) Geol.Soc.Amer. 85, 1485-1492.
- Chivas, A.R. (1981) Contrib.Mineral.Petrol., 78, 389-403.
- Czamasz, 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) 5-1seibikeikakuh29.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洞一片栗粉を用いた柱状節理のアナログモデル実験ー(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泡膨張,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。

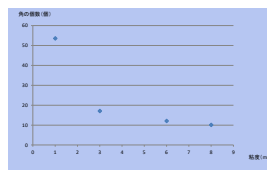


図3: 測定1 粘度と角の個数の平均

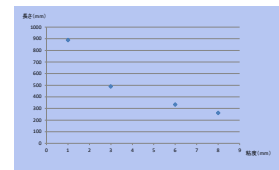


図4: 測定2 粘度とひびの長さ

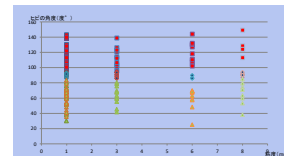


図5: 測定3 粘度と角の角度

## 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 自然科学生徒課題研究論文集  
兵庫県立姫路東高等学校

〒670-0012 兵庫県姫路市本町 68 番地 70

電話 (079) 285-1166 (代)

FAX (079) 285-1167

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