

**2021年9月16日(木)**

ポスター | R2: 結晶構造・結晶化学・物性・結晶成長・応用鉱物

9:30 ~ 18:30 | ePoster Session

**R2: 結晶構造・結晶化学・物性・結晶成長・応用鉱物**

9:30 ~ 18:30

[R2P-01] 凍結環境がVateriteのCalcite化の抑制に与える影響.

\*古川 登<sup>1</sup>、沖田 ひなこ<sup>1</sup> (1. 千葉大・院理)

9:30 ~ 18:30

[R2P-02] メラノフロジャイトと千葉石のゲスト分子の分子ダイナミクス

\*平沼 こうた<sup>1</sup>、門馬 綱一<sup>3</sup>、景山 真帆<sup>2</sup>、白石 柚衣<sup>2</sup>、岡村 英一<sup>1</sup>、野口 直樹<sup>1</sup> (1. 徳島大・院創成、2. 徳島大・理工、3. 国立科学博物館)

ポスター | R3: 高压科学・地球深部

9:30 ~ 18:30 | ePoster Session

**R3: 高压科学・地球深部**

9:30 ~ 18:30

[R3P-01] 透過型電子顕微鏡内その場圧縮観察による応力測定

\*三宅 亮<sup>1</sup>、伊神 洋平<sup>1</sup>、松本 徹<sup>1</sup>、甕 聡子<sup>3</sup>、野村 龍一<sup>2</sup> (1. 京都大・理、2. 京都大・白眉、3. 山形大・理)

9:30 ~ 18:30

[R3P-02] ビスマス相転移境界の再評価

\*小野 重明<sup>1</sup> (1. JAMSTEC)

9:30 ~ 18:30

[R3P-03] ラマン分光法によるトリディマイトの圧力誘起相転移研究

\*神崎 正美<sup>1</sup> (1. 岡大・惑星研)

9:30 ~ 18:30

[R3P-04] ステアリン酸からのダイヤモンド生成に伴う炭素同位体分別効果 ~C-H-O流体の炭素同位体組成決定へ向けた予察的検討~

\*川村 英彰<sup>1</sup>、大藤 弘明<sup>1</sup>、サティシュ クマール マドスーダン<sup>2</sup>、鈴木 昭夫<sup>1</sup> (1. 東北大・院理、2. 新潟大・院理)

9:30 ~ 18:30

[R3P-05] Phase boundary between diasporite and  $\delta$ -AlOOH\*鈴木 昭夫<sup>1</sup> (1. 東北大・院理)

9:30 ~ 18:30

[R3P-06] ダイヤモンドアンビルセルを用いたブリッジマナイト単結晶の高圧その場IR観察

\*辻野 典秀<sup>1</sup> (1. 岡山大・惑星研)

9:30 ~ 18:30

[R3P-07] 下部マントル最上部におけるマグマ中の含水量の 温度・圧力依存性の解明

\*奥村 晃太<sup>1</sup>、井上 徹<sup>1</sup>、柿澤 翔<sup>1</sup>、野田 昌道<sup>1</sup>、川添 貴章<sup>1</sup>、佐藤 友子<sup>1</sup>、新名 亨<sup>2</sup>、入船 徹男<sup>2</sup> (1. 広島大・院先進理工、2. 愛媛大・GRC)

9:30 ~ 18:30

[R3P-08] マグマ内に存在するFe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>の高圧下での部分モル体積坂 凛太郎<sup>1</sup>、\*鈴木 昭夫<sup>1</sup>、坂巻 竜也<sup>1</sup> (1. 東北大・院理)

9:30 ~ 18:30

[R3P-09] 高圧下におけるSiO<sub>2</sub>ガラスの屈折率測定\*境 毅<sup>1</sup>、三守 秀門<sup>1</sup> (1. 愛媛大・地球深部研)

## ポスター | R4: 地球表層・環境・生命

9:30 ~ 18:30 | ePoster Session

## R4: 地球表層・環境・生命

9:30 ~ 18:30

[R4P-01] サンゴ骨格中のカルサイト-アラゴナイト分布

\*甕 聡子<sup>1</sup>、波利井 佐紀<sup>2</sup>、富岡 尚敬<sup>3</sup>、伊藤 元雄<sup>3</sup> (1. 山形大・理、2. 琉大・熱生研、3. JAMSTEC)

9:30 ~ 18:30

[R4P-02] 魚類耳石を構成するvateriteの結晶学的特徴

「発表賞エントリー」

\*高橋 玄<sup>1</sup>、奥村 大河<sup>1</sup>、鈴木 道生<sup>2</sup>、小暮 敏博<sup>1</sup> (1. 東大・院理、2. 東大・院農)

9:30 ~ 18:30

[R4P-03] サポナイト層間における陽イオン交換選択係数の測定

\*野路 陽平<sup>1</sup>、福士 圭介<sup>2</sup>、徳門 弘都<sup>2</sup> (1. 金沢大・学理、2. 金沢大・院理)

## ポスター | R6: 深成岩・火山岩及び サブダクションファクトリー

9:30 ~ 18:30 | ePoster Session

## R6: 深成岩・火山岩及び サブダクションファクトリー

9:30 ~ 18:30

[R6P-01] 北上山地、堺ノ神深成岩体の形成プロセスの解明：岩石学的研究による貫入・定置プロセスの温度・圧力条件

「発表賞エントリー」

\*鈴木 哲士<sup>1</sup>、浅井 信夫<sup>1</sup>、中島 和夫<sup>1</sup>、湯口 貴史<sup>1</sup> (1. 山形大・院理)

9:30 ~ 18:30

[R6P-02] 阿武隈帯中部、南蔵王地域・栗子地域の白亜紀花崗岩類・変成岩類の岩石学的研究

\*丸山 純一<sup>1</sup>、加々島 慎一<sup>2</sup> (1. 山形大・院理、2. 山形大学)

9:30 ~ 18:30

[R6P-03] 阿武隈山地東部に分布する深成岩類のジルコンU-Pb年代

\*御子柴 真澄<sup>1</sup>、高橋 浩<sup>1</sup>、久保 和也<sup>1</sup>、檀原 徹<sup>2</sup>、岩野 英樹<sup>2</sup>、平田 岳史<sup>3</sup> (1. 産総研、2. (株) 京都フィッシュン・トラック、3. 東大・院理)

9:30 ~ 18:30

[R6P-04] 花崗岩中の割れ目発生・発達プロセスの解明：熱水変質を指標としたアプローチ

\*湯口 貴史<sup>1</sup>、笹尾 英嗣<sup>2</sup>、五十公野 裕也<sup>1</sup> (1. 山形大・理、2. 原子力機構)

9:30 ~ 18:30

[R6P-05] 等粒状花崗岩の他形カリ長石のカソードルミネッセンス オシラトリゾーニングの新知見 —土岐花崗岩体を例に

\*野中 麻衣<sup>1</sup>、湯口 貴史<sup>1</sup>、鈴木 哲士<sup>1</sup>、井村 匠<sup>1</sup>、中島 和夫<sup>1</sup>、西山 忠男<sup>2</sup> (1. 山形大・院理、2. 熊本大)

9:30 ~ 18:30

[R6P-06] 愛媛県四阪島梶島に分布する白亜紀苦鉄質岩類の岩石記載と全岩化学組成

「発表賞エントリー」

\*下岡 和也<sup>1</sup>、斉藤 哲<sup>1</sup> (1. 愛媛大・院理工)

9:30 ~ 18:30

[R6P-07] 大崩山花崗岩体中の石英におけるカソードルミネッセンス像とTi濃度およびAl濃度の関係

\*渡邊 みのり<sup>1</sup>、加藤 丈典<sup>2</sup>、小北 康弘<sup>3</sup>、湯口 貴史<sup>1</sup> (1. 山形大、2. 名古屋大、3. 原子力機構)

## ポスター | S2: 岩石-水相互作用 (スペシャルセッション)

9:30 ~ 18:30 | ePoster Session

## S2: 岩石-水相互作用 (スペシャルセッション)

9:30 ~ 18:30

[S2P-01] 三波川変成帯エクロジヤイト岩体中のマーブルに見られた柘榴石中の溶解再析出反応と微小空隙

\*吉田 健太<sup>1</sup>、沢田 輝<sup>1</sup>、仁木 創太<sup>2</sup>、大柳 良介<sup>3</sup> (1. JAMSTEC、2. 東大、3. 国土館大)

9:30 ~ 18:30

[S2P-02] 岩石の弾性波速度・比抵抗・空隙率の同時測定の開発

\*片山 郁夫<sup>1</sup>、谷本 和優<sup>1</sup> (1. 広島大学・地球惑星システム学)

9:30 ~ 18:30

[S2P-03] 三波川変成帯に記録された変成ステージごとのLILE移動度：原岩組成復元モデルの適用

「発表賞エントリー」

\*松野 哲士<sup>1</sup>、宇野 正起<sup>1</sup>、岡本 敦<sup>1</sup>、土屋 載芳<sup>1</sup> (1. 東北大・院環)

9:30 ~ 18:30

[S2P-04] 熱水環境における花崗岩の弾性波伝搬特性の温度圧力依存性

\*水野 克哉<sup>1</sup>、平野 伸夫<sup>1</sup>、土屋 範芳<sup>1</sup> (1. 東北大・院環境)

9:30 ~ 18:30

[S2P-05] 長石の熱発光減衰速度式と熱伝導モデルの連成モデル

「発表賞エントリー」

\*佐藤 貴啓<sup>1</sup>、平野 伸夫<sup>1</sup>、土屋 範芳<sup>1</sup> (1. 東北大・院環境)

ポスター | R2：結晶構造・結晶化学・物性・結晶成長・応用鉱物

■ 2021年9月16日(木) 9:30 ~ 18:30 | ■ ePoster Session

**R2：結晶構造・結晶化学・物性・結晶成長・応用鉱物**

[現地ポスターコアタイム]

12:30~14:00

17:00~18:30

9:30 ~ 18:30

[R2P-01] 凍結環境がVateriteのCalcite化の抑制に与える影響.

\*古川 登<sup>1</sup>、沖田 ひなこ<sup>1</sup> (1. 千葉大・院理)

---

9:30 ~ 18:30

[R2P-02] メラノフロジャイトと千葉石のゲスト分子の分子ダイナミクス

\*平沼 こうた<sup>1</sup>、門馬 綱一<sup>3</sup>、景山 真帆<sup>2</sup>、白石 柚衣<sup>2</sup>、岡村 英一<sup>1</sup>、野口 直樹<sup>1</sup> (1. 徳島大・院創成、2. 徳島大・理工、3. 国立科学博物館)

## 凍結環境が Vaterite の Calcite 化の抑制に与える影響.

古川 登, 沖田ひなこ (千葉大・理)

### Inhibitory effect of vaterite transition to calcite in the freezing environment.

FURUKAWA Noboru, OKITA Hinako (Chiba Univ.)

炭酸カルシウムの多形の一つである vaterite は、地表の環境では不安定なため、特に水を伴った天然での産出は極めてまれである。しかしパミール高原北部, アライ山域のアイスコアとカナダのエルズミア島 Borup Fiord Pass では、温泉水から沈殿したと考えられる天然の vaterite が見いだされており、1) 温泉水に伴う硫酸塩の存在 (石膏と共存), 2) 氷河に伴う低温環境, が vaterite の保存に影響した可能性が指摘されている。

このうち、溶液中の硫酸塩の存在が vaterite の calcite への転移を抑制する効果があることは実験的に確かめられているが (Fernández-Díaz et al. 2010), 250 時間程度で calcite に変化する。このため、生成時から百数十年が経過しているパミール高原のアイスコアの vaterite は、硫酸塩の存在だけでは説明できない。

そこで、発表者らは、溶液に浸漬した合成 vaterite を 25°C, 4°C, -26°C に設置し、calcite への転移する様子を観察した。

出発物質の vaterite は、攪拌した 60°C の 0.5M

Keyword: vaterite, calcite, degree of frost, glacier

furukawa@faculty.chiba-u.jp

K<sub>2</sub>CO<sub>3</sub> 溶液に 0.1M CaCl<sub>2</sub> 溶液を滴下して作成した。マイクロチューブにこの vaterite と溶液を入れ、3 日, 7 日, 14 日後に回収した。溶液は超純水, 0.5M K<sub>2</sub>CO<sub>3</sub> 溶液, 0.5M K<sub>2</sub>CO<sub>3</sub> + 0.25M K<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> 溶液の 3 種類を用いた。溶液は、25°C, 4°C では液体, -26°C では凍結し固体(氷)であった。生成物は XRD で測定した。

25°C の試料では超純水の 3 日後の試料にわずかに vaterite が残っていた以外はすべて calcite に変化していた。4°C では、14 日後でも vaterite が残っていたが、時間の経過とともに calcite の量が増加していた。-26°C では 14 日後でもすべての試料で出発物質からの変化は見られなかった。各温度において、溶液の種類による結果の差異は、ほとんど見られなかった。

このことから、パミール高原とエルズミア島にみられる vaterite は凍結した環境下に置かれていたため、現在まで保存されたと考えられる。

Fernández-Díaz et al.(2010) *Geochimica et Cosmochimica Acta* 74 6064–6076

## メラノフロジャイトと千葉石のゲスト分子の分子ダイナミクス

平沼こうた\* (徳島大), 門馬綱一 (国立科学博物館), 景山真帆,  
白石柚衣, 岡村英一, 野口直樹 (徳島大)

### Dynamics of Guest Molecules of Melanophlogite and Chibaite

Kouta Hiranuma\* (Tokushima Univ.), Koichi Momma (Nat'l. Mus. Nat. Sci.),  
Maho Kageyama, Yui Shiraishi, Hidekazu Okamura, Naoki Noguchi (Tokushima Univ.)

メラノフロジャイト(MEP)と千葉石は、サイズの異なる複数種類の  $\text{SiO}_2$  ケージ(籠)が組み合わさって、包接化合物構造をとる。このケージ内には、ゲスト分子として様々な気体分子を取り込んでおり、ゲスト分子のサイズと熱振動の温度依存性の相関関係を調べるのに適した研究対象であると言える。本研究ではラマン分光法と赤外分光法を用いて、10K から室温までの低温条件で、それぞれの鉱物のゲスト分子の振動状態がどのように変化するかを調べた。

MEP はイタリアの Fortullino, Livorno 産のものとロシアのサハリンの Zamiraylova Golova 岬で産出したものを、千葉石は長野県で産出したものを測定した。測定の結果、MEP のゲスト分子はメタン、二酸化炭素であり、千葉石のゲスト分子はメタン、エタン、プロパン、イソブタンであることが分かった。両鉱物に含まれる炭化水素の CH 伸縮振動のラマンシフトの温度依存性とケージに対するゲスト分子のサイズの関係を示したのが上図である。比較のために、この図には MEP と同型のメタンハイドレート(MH)と

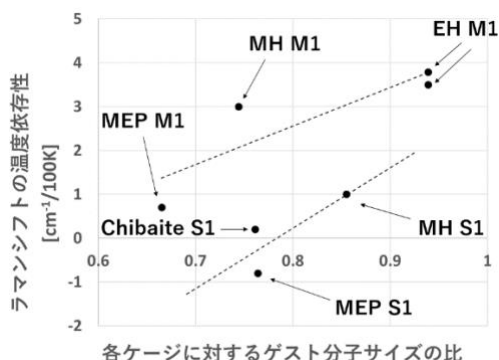


図 ラマンシフトの温度依存性とケージに対するゲスト分子のサイズの関係<sup>[1]</sup>

エタンハイドレート(EH)のデータも載せてある。

S1 ケージのゲスト分子に比べて、M1 ケージのものはラマンシフトの温度依存性が大きい傾向にあると言える。本発表では、ゲスト分子とケージ間の相互作用の温度依存性と、ゲスト分子のケージの占有率について議論する。

#### Reference

[1] G. Fuseya *et al.* *RSC Adv.* **8**, 3237, 2018

Keywords: melanophlogite, chibaite, Raman spectroscopy, infrared spectroscopy

\*Corresponding author: c612133019@tokushima-u.ac.jp

## ポスター | R3: 高圧科学・地球深部

■ 2021年9月16日(木) 9:30 ~ 18:30 | ■ ePoster Session

## R3: 高圧科学・地球深部

[現地ポスターコアタイム]

12:30~14:00

17:00~18:30

9:30 ~ 18:30

[R3P-01] 透過型電子顕微鏡内その場圧縮観察による応力測定

\*三宅 亮<sup>1</sup>、伊神 洋平<sup>1</sup>、松本 徹<sup>1</sup>、甕 聡子<sup>3</sup>、野村 龍一<sup>2</sup> (1. 京都大・理、2. 京都大・白眉、3. 山形大・理)

9:30 ~ 18:30

[R3P-02] ビスマス相転移境界の再評価

\*小野 重明<sup>1</sup> (1. JAMSTEC)

9:30 ~ 18:30

[R3P-03] ラマン分光法によるトリディマイトの圧力誘起相転移研究

\*神崎 正美<sup>1</sup> (1. 岡大・惑星研)

9:30 ~ 18:30

[R3P-04] ステアリン酸からのダイヤモンド生成に伴う炭素同位体分別効果 ~C-H-O流体の炭素同位体組成決定へ向けた予察的検討~

\*川村 英彰<sup>1</sup>、大藤 弘明<sup>1</sup>、サティシュ クマール マドスーダン<sup>2</sup>、鈴木 昭夫<sup>1</sup> (1. 東北大・院理、2. 新潟大・院理)

9:30 ~ 18:30

[R3P-05] Phase boundary between diasporite and  $\delta$ -AlOOH\*鈴木 昭夫<sup>1</sup> (1. 東北大・院理)

9:30 ~ 18:30

[R3P-06] ダイヤモンドアンビルセルを用いたブリッジマナイト単結晶の高圧その場IR観察

\*辻野 典秀<sup>1</sup> (1. 岡山大・惑星研)

9:30 ~ 18:30

[R3P-07] 下部マントル最上部におけるマグマ中の含水量の 温度・圧力依存性の解明

\*奥村 晃太<sup>1</sup>、井上 徹<sup>1</sup>、柿澤 翔<sup>1</sup>、野田 昌道<sup>1</sup>、川添 貴章<sup>1</sup>、佐藤 友子<sup>1</sup>、新名 亨<sup>2</sup>、入船 徹男<sup>2</sup> (1. 広島大・院先進理工、2. 愛媛大・GRC)

9:30 ~ 18:30

[R3P-08] マグマ内に存在するFe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>の高圧下での部分モル体積坂 凜太郎<sup>1</sup>、\*鈴木 昭夫<sup>1</sup>、坂巻 竜也<sup>1</sup> (1. 東北大・院理)

9:30 ~ 18:30

[R3P-09] 高圧下におけるSiO<sub>2</sub>ガラスの屈折率測定\*境 毅<sup>1</sup>、三守 秀門<sup>1</sup> (1. 愛媛大・地球深部研)

# 透過型電子顕微鏡内その場圧縮観察における 電子回折を用いた局所応力測定

三宅亮・伊神洋平・松本徹（京大・理），甕聡子（山形大），  
野村龍一（京大・白眉）

## Measurements of local stress using electron diffraction in in-situ TEM indentation experiments

Akira Miyake, Yohei Igami, Toru Matsumoto (Kyoto Univ.), Satoko Motai (Yamagata Univ.),  
and Ryuichi Nomura (Kyoto Univ.)

### 【はじめに】

材料科学の分野では、透過型電子顕微鏡内で変位または荷重をかけることによる材料の圧縮試験や破壊実験が多く行われている。しかし、これらの多くは、実験装置が制御する荷重と試料の大きさ（面積）より応力を計算していることがほとんどである。そこで、本研究では、電子回折図形から格子の圧縮率を決定し、それをもとに微小領域での応力を求めることを目的としておこなった。

### 【手法】

試料として、シリコンおよびダイヤモンドの単結晶を用いた。集束イオンビーム加工装置（Thermo Fisher Scientific 社製 Helios NanoLab G3 CX）を用いて、晶帯軸がほぼ[01-1]、圧縮面が(001)、圧縮方向が[001]になるような厚さ約 100 nm のシリコン薄膜試料と、太さが約 100 nm のシリコンピラー試料およびダイヤモンドピラー試料を作製した。作製した試料に対して、透過型電子顕微鏡内でのその場圧縮実験を荷重制御により行った。圧縮実験は、電界放射型透過型電子顕微鏡（JEOL 社製 JEM-2100F）内で試料に対してダイヤモンド圧子を押し込むことが可能な専用ホルダ（Bruker 社製 Hysitron PI95 TEM PicoIndenter）を使用して行った。実験は、40 ~ 500  $\mu\text{N}$  の荷重で行った。

電子回折図形は、圧縮実験の前後と、圧縮実験中に取得し、実験終了後に Digital Micrograph (AMETEK Gatan 社製) と ReciPro (Seto, <http://pmsl.planet.sci.kobe-u.ac.jp/~seto/>) を用いて解析を行った。また、得られた圧縮率からの応力（圧力）の推定は、Pandya et al.

(2012)を用いた。

### 【結果と考察】

シリコン薄膜試料を用いた実験では、圧縮方向の(001)の面間隔が縮んでいることがわかった。一方、圧縮方向と垂直な方向である[110]方向は、ほとんど変化がないことがわかった。電子線入射方向の変化については、今回は情報を得ることはできなかった。線膨張係数からの換算で、荷重 40  $\mu\text{N}$  の実験では圧縮方向に約 1.7 GPa、100  $\mu\text{N}$  では約 2.4 GPa、200  $\mu\text{N}$  では約 3.7 GPa の応力を得ることができた。電子線入射方向については結晶格子が伸びている可能性もあるが、今回はほぼ無視できると仮定すると、体積膨張率からの換算では荷重 200  $\mu\text{N}$  で 1.1 GPa の応力がでたことになる。また、インデント（圧子）が接していると思われる場所から、圧縮方向に沿っていくつかの異なる領域で応力を見積もったところ、圧子から離れるに従い応力が徐々に減衰していることがわかった。

ダイヤモンドピラーを用いた荷重 100  $\mu\text{N}$  の圧縮実験では、圧縮方向に約 30 GPa の応力を得ることができた。一方、圧縮方向と垂直な方向には、ほとんど変化がないことがわかった。

今後の課題として、圧子の先端の形状およびどこに接しているかを明らかにするなど挙げられる。

### 【引用文献】

Wang et al., (2015) Scripta Materialia, 98, 40;  
Pandya et al. (2012) J. Phys.: Conf. Ser. 377 012097

Keywords: electron microscope, in-situ experiment, nano-deformation

\*Corresponding author: miya@kueps.kyoto-u.ac.jp

# ビスマス相転移境界の再評価

小野 重明 (海洋研究開発機構)

## Re-evaluation of phase transitions in bismuth

Shigeaki Ono\* (JASTEC)

We investigated the phase transitions in bismuth at high pressures and high temperatures using the multi-anvil press and the synchrotron X-ray diffraction technique. The stability of each phase was identified by observing the powdered X-ray diffraction data. The transition pressure between Bi-III and Bi-V determined in our study was 7.6 GPa at room temperature, which was in general agreement with that observed in previous high-pressure experiments.

量子ビームを利用した高压実験では、装置で発生する圧力は、比較的正確に見積もることができる。一方、量子ビームの併用が困難な研究手法が多々あることや、量子ビームの利用機会が限られていることなどの理由から、今後も精力的に室内実験研究が行われることが予想される。そこで問題となるのは、室内実験における圧力情報の正確さであろう。地球内部科学においては、圧力は深度の情報に対応するからであり、緻密な研究を進める上では、きわめて正確な実験圧力条件を知ることが不可欠である。そこで本研究においては、室内実験で頻繁に利用されるビスマスの圧力校正用相転移反応について、相転移圧力の再決定を行い、従来から使われている相転移圧力データとの比較を行った。

高压実験では、マルチアンビル型装置を用い、放射光X線回折実験を行った。実験はKEKのPFAR-NE7Aビームラインを利用した。実験方法は、これまで我々のグループが行ってきた方法とほぼ同様の手法を用いた。実験の温度圧力履歴は、室温で加圧し、目標圧力に到達した後、加熱を行った。その過程で、試料の粉末X線回折データを取得し、安定相の同定を行った。

Fig. 1 には、実験から得られた相転移境界を示した。過去の研究の中では、室温での相転移圧力は、7~8.2GPa のばらつきがあるが、本研究では、7.6GPaと見積もられた[1]。よく利用されている相転移圧力である 7.7GPa より、若干低い圧力である。しばしば、室温条件での相転移実験では、相転移カイネティクスの影響で、熱力学的な相境界が正確に決定で

きず、カイネティクスに支配された相境界を報告してしまう事例が起こっている。我々の研究の特徴は、高温条件での実験データも利用することにより、相転移カイネティクスの影響を小さくすることができる点である。以上のような理由から、高压実験で圧力定点として利用されているビスマスの III-V 相転移圧力は、7.6GPa を提案する。

### References

- [1] S. Ono (2018) High-pressure phase transition of bismuth, *High Pressure Research*, 38:4, 414-421, DOI: 10.1080/08957959.2018.1541456

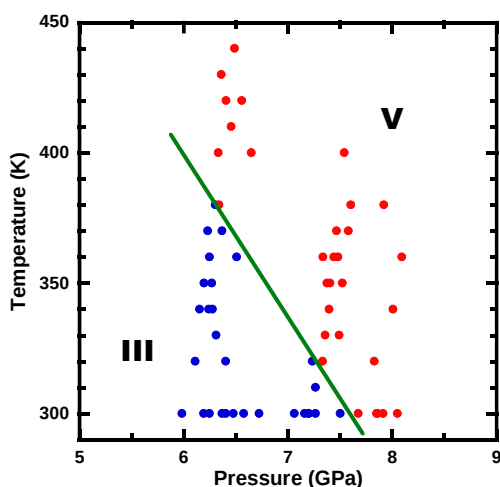


Fig. 1. Experimental results and phase boundary between Bi-III and Bi-V.

**Keywords:** Bismuth, Phase transition, High pressure

\*Corresponding author: sono@jamstec.go.jp

# ラマン分光法によるトリディマイトの圧力誘起相転移研究

神崎正美 (岡大・惑星研)

## Pressure-induced transitions of tridymite by Raman spectroscopy

Masami Kanzaki\* (IPM, Okayama U.)

The pressure-induced phase transitions of tridymite (MC, MX-1, PO-10) were investigated by in-situ Raman spectroscopy. Starting from MC, the phase transition to PO-10 was observed at about 0.3 GPa, and new Raman peaks appeared at 1.5 GPa. The similar transitions were observed for MX-1 and PO-10, and PO-10 was always recovered. This observation suggests that the rare PO-10 in the meteorite may have been altered by shock events from the more common MC.

諸言：トリディマイトには多数の多形があるが、従来隕石からはMCだけが報告されてきた。しかし、最近になってPO-10と思われる多形も報告されるようになってきた。PO-10がMCとは異なる温度履歴により生じた可能性があるが、圧力による転移の可能性もある。貫井・中澤(鉱物学雑誌特別号2,1980)はMCからPO-10への転移を0.5 GPaで報告している。ただ彼らの報告では転移は可逆となっており、PO-10は常圧には回収できない。本研究はこの報告の追試、実験圧力の拡大、他の多形についても調べることを目的で行なった。

実験方法：MCについては合成方法の異なる2種の結晶を、MX-1はMCを粉砕したもの、PO-10については火山岩から得た天然結晶を使った。それぞれ試料をDACを使って室温で加圧した。メタノール・エタノール混合液を圧力媒体とした。顕微ラマン分光法を使って相の同定を行なった。

結果と議論：MCから出発した場合、0.3 GPa付近でMCのラマンピークが消え、PO-10のピークが現れた。その後、425 cm<sup>-1</sup>のピークが圧力とともに強度を増していった。1.5 GPaにおいて、多数のピークが低波数側に現れた(Fig. 1)。このラマンスペクトルは既存のシリカ高压相等のものとは一致しないので、新しい高压相と考えられる。この相は最高実験圧の8.7 GPaまで観察された。減圧時にはこの高压相が0.8 GPa付近まで観察され、徐々にPO-10へ変わっていった。しかしMCへは戻らず、回収されたのはPO-10であった。MX-1もまずPO-10へ転移して、その後はMCと同じ振る舞いをして、PO-10が回収された。

PO-10から始めた場合には、0.2 GPaでMC同様に425 cm<sup>-1</sup>付近のピークの強度が増し始めた。1.6 GPa付近で低周波数領域で似た変化が生じ、高压相に転移したと思われる。減圧時にはPO-10に戻った。

PO-10の回収については貫井・中澤(1980)と異なる結果が得られた。その理由は不明であるが、PO-10が圧力によってMCから生じ得ることが示された。隕石中のPO-10はこのルートで生じた可能性がある。高压相については構造を含めてさらに調べる予定である。

Keywords: tridymite, Raman spectroscopy, pressure-induced phase transition

\*Corresponding author: [mkanzaki@okayama-u.ac.jp](mailto:mkanzaki@okayama-u.ac.jp)

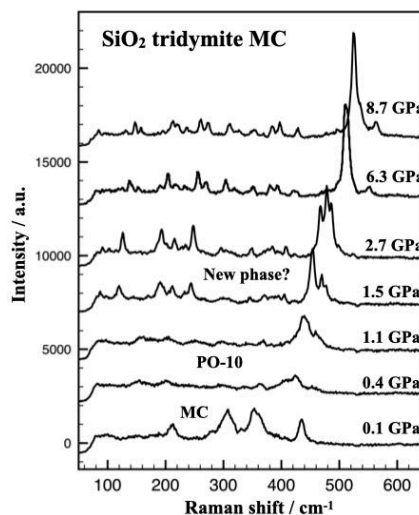


Figure 1. Selected in-situ high-pressure Raman spectra starting from tridymite MC at 24 °C

# ステアリン酸からのダイヤモンド生成に伴う 炭素同位体分別効果 ~C-H-O 流体の炭素同位体組成決定へ向けた予察的検討~

川村英彰<sup>\*1</sup>, 大藤弘明<sup>1</sup>, M Satish-Kumar<sup>2</sup>, 鈴木昭夫<sup>1</sup> (<sup>1</sup>東北大, <sup>2</sup>新潟大)

## Carbon isotope fractionation during the formation of Diamond from Stearic acid under HP-HT condition

Hideaki Kawamura<sup>\*</sup>, Hiroaki Ohfuji, M Satish-Kumar, Akio Suzuki (<sup>1</sup>Tohoku Univ., <sup>2</sup>Niigata Univ.)

We performed a series of high-pressure and high-temperature experiments using multi-anvil apparatus to investigate carbon isotope fractionation between solid carbon (Diamond / Graphite) and C-H-O fluid (mainly composed of CH<sub>4</sub> and H<sub>2</sub>O) fluid as decomposition products of Stearic acid. We aim to indirectly estimate the carbon isotope fractionation by measuring the carbon isotopic composition of solid carbon produced during the decomposition of stearic acid.

### 1. はじめに

ダイヤモンド・炭酸塩鉱物・流体 (C-H-O 流体と呼ばれる CH<sub>4</sub> などを含む流体) の 3 種類の物質は地球表層から深部への炭素の運搬において重要な役割を担う可能性があり、過去に様々な議論がなされてきた。特にダイヤモンドは私たちが実際に手に取れる形として、形成当時の地球深部環境に関する情報を多分に保持すると考えられるため、その形成場や形成プロセスを解明することは極めて重要であると言える。天然ダイヤモンドの記載研究に着目すると、そのバルク炭素同位体組成  $\delta^{13}\text{C}$  はマントル起源の炭素の同位体組成である -5‰ 付近から -30‰ 程度まで大きく変動することが報告されている (Cartigny et al., 2005, Cartigny et al., 2010)。これは異なる同位体組成を持つ炭酸塩鉱物 (無機源) や C-H-O 流体 (有機源) がマントルの炭素に混合している結果を示唆するものであるが、混合によって生じたダイヤモンドが多様な同位体組成を示すその詳細なメカニズムは明らかになっていない。

そこで本研究では、沈み込み帯に沿った地球深部環境下における炭酸塩鉱物-C-H-O 流体の相互作用を、炭素同位体をトレーサーに用いた高温高压実験によって検討することを目指す。今回はその前段階として、実験の出発物質であるステアリン酸 (C-H-O 流体

の発生源) が高温高压下で分解した際の炭素同位体分別効果に関する結果を報告する。

### 2. 実験手法

ステアリン酸 (C<sub>18</sub>H<sub>36</sub>O<sub>2</sub>) は高温高压下で主に C-H-O 流体と固体炭素に分解し (Yamaoka et al., 2004), 固体炭素は温度圧力条件によってダイヤモンドもしくはグラファイトとして回収されることが報告されている。(Kawamura and Ohfuji, 2020)。

高压実験には 1500 t マルチアンビル装置を使用し、ペレット状にしたステアリンを Pt カプセル中に封入した。圧力温度条件は 10 GPa および 17 GPa, 800°C および 1600°C で実施した。回収試料の同位体分析は新潟大学にて同位体比質量分析計を用いて実施した。

### 3. 結果と考察

実験前のステアリン酸試料の  $\delta^{13}\text{C}$  は約 -28‰ であった。炭酸塩の  $\delta^{13}\text{C}$  が約 0‰ であることを考慮すると、炭酸塩が無機源の  $^{13}\text{C}$  に富み、流体が有機源の  $^{12}\text{C}$  に富むような実験を想定した場合、有意な差である。出発物質のステアリン酸と実験回収試料の固体炭素の同位体組成分析結果から、ステアリン酸の分解時に生成した流体の同位体組成を間接的に見積もることを目指す。今後これらの結果を基に、C-H-O 流体-炭酸塩系での高温高压実験のトレーサーとして炭素同位体の導入を実現することが期待される。

Keywords: Diamond, High pressure, C-H-O fluid, Carbon isotope, Carbonate

<sup>\*</sup>Corresponding author: kawamura.hideaki.q7@dc.tohoku.ac.jp

## Phase boundary between diaspore and $\delta$ -AlOOH

鈴木昭夫(東北大院理)

### Phase boundary between diaspore and $\delta$ -AlOOH

Akio SUZUKI (Tohoku Univ.)

Phase boundary between diaspore and  $\delta$ -AlOOH was investigated using in situ X-ray powder diffraction technique and a large volume press. Experiments were carried out using a Kawai-type multi-anvil apparatus (MAX-III) installed at the AR-NE7A station at KEK (High Energy Accelerator Research Organization) in Japan. X-ray diffraction data were collected using a pure-Ge solid-state detector by the energy-dispersive method. Tungsten carbide cubes with 22mm edges were used. The size of the truncated corners was 3 mm. Semi-sintered zirconium oxide was used as the pressure-transmitting medium. A cylindrical heater was manufactured using the BN Composite EC (Denka, Co. Ltd.). The sample temperature was monitored using a W97Re3-W75Re25 thermocouple. The starting material was a mixture of diaspore,  $\delta$ -AlOOH and NaCl.  $\delta$ -AlOOH was synthesized at 18 GPa and 1000 K for 30 min from natural diaspore from Turkey. Pressure was determined using an equation of state of NaCl. Time-resolved X-ray diffraction measurement confirmed the stable phase at the experimental conditions. This study shows that the phase boundary between diaspore and  $\delta$ -AlOOH locates around 15 GPa. The detail is mentioned in the on-site presentation.

Keywords: aluminum oxyhydroxide, high pressure, AlOOH, phase boundary, hydrous phase

\*Corresponding author: akio.suzuki.c5@tohoku.ac.jp

# ダイヤモンドアンビルセルを用いたブリッジマナイト単結晶の高圧その場 IR 観察

辻野典秀 (岡山大学惑星研)

## In-situ IR measurements of bridgmanite single crystal at high pressure using DAC

Noriyoshi Tsujino\* (IPM, Okayama Univ.)

In this study, in-situ IR measurements of bridgmanite single crystal were conducted up to 20 GPa. Wavenumber of OH bands of  $\sim 3390\text{ cm}^{-1}$  is decreasing with increasing pressure.

### 1. はじめに

無水鉱物中に水は OH 基として取り込まれ、極微量でも鉱物物性に大きな影響を与える。この物性の変化は鉱物中の水素位置と密接に関係すると考えられ、無水鉱物中の水素位置に関する研究が行われている。しかしながら、その多くは大気圧下の水素位置を基に議論され、高圧条件下における無水鉱物中の水素位置の変化に言及した例は限られている。そこで、本研究では高圧下でブリッジマナイト単結晶の IR その場観察を行い、IR スペクトルの圧力変化を観察することを試みた。

### 2. 実験手法

その場 IR 測定には高圧発生装置としてダイヤモンドアンビルセル(DAC)を用いた。試料には合成した(Mg,Fe)SiO<sub>3</sub>-ブリッジマナイト単結晶を用いた。ブリッジマナイト単結晶の c 軸が赤外光に対して平行方向となるように試料室内に設置した。圧力媒体には赤外光に対して透明な KBr を用いた。圧力測定にはルビー蛍光法[1]を用い、圧力条件は 0.6~20 GPa の範囲である。

### 3. 結果

加減圧過程でのブリッジマナイトの IR スペクトルを Fig. 1 に示す。、 $\sim 3390\text{ cm}^{-1}$  の OH バンドは圧力とともに大きく低波数側へシフトすることが観察された。また、この圧力依存性は含水ウォズレアイトの同程度波数のものと同程度であることが明らかとなった。また、今回観察された OH バンドは b 軸にそろっていることが単結晶の IR 測定から明らかとなった。

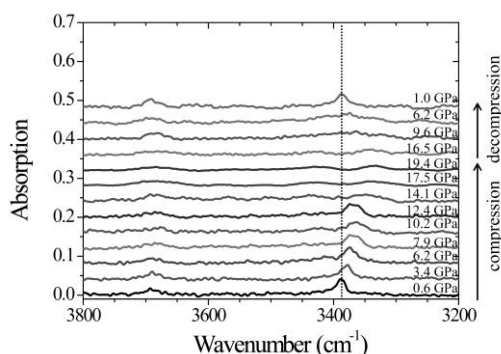


Figure 1. Pressure dependence of IR spectra of hydrous bridgmanite using DAC

Keywords: bridgmanite, in-situ IR measurement, high pressure

Reference: [1] Mao et al.: J. Geophys. Res., (1986).

\*Corresponding author : [tsujino@okayama-u.ac.jp](mailto:tsujino@okayama-u.ac.jp)

## 下部マントル最上部におけるマグマ中の含水量の 温度・圧力依存性の解明

奥村晃太\*、井上徹、柿澤翔、野田昌道、川添貴章、佐藤友子  
(広島大・院先進理工)、新名亨、入船徹男 (愛媛大・GRC)

### Water contents of magma as functions of pressure and temperature at the uppermost lower mantle\_

Kota OKUMURA\*, Toru INOUE, Sho KAKIZAWA, Masamichi NODA, Takaaki KAWAZOE,  
Tomoko SATO (Advanced Science and Engineering, Hiroshima Univ.),  
Toru SHINMEI, Tetsuo IRIFUNE (GRC, Ehime Univ.)

近年の地震学的観測から、660 km 地震波速度不連続面直下に低地震波速度領域の存在が明らかにされており (Schmandt et al. 2014)、高圧含水鉱物の脱水溶融の可能性が指摘されている。ではこの領域で含水マグマが存在するとすれば、その含水量はどの程度になるであろうか。本研究ではこの疑問に答えるべく、下部マントル最上部条件下で生成されるマグマ中の含水量を実験的に明らかにした。

高温高圧実験は愛媛大学GRC及び広島大学超高压研究室設置の川井型高压発生装置 (ORANGE-3000及びMAPLE-600) を使用して行った。下部マントル最上部条件を再現するため圧力は25 GPaに固定、温度は1200~1700°Cの範囲で実験を行った。出発物質にはpyrolite組成に水を加えたものを採用し、SiO<sub>2</sub>、Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>、Fe<sub>2</sub>SiO<sub>4</sub>、CaSiO<sub>3</sub>、MgO、Mg(OH)<sub>2</sub>の混合粉末を用いた。試料の含水量は8.3 wt%と14.8 wt%の2種類を用意した。分析には、EPMAを用いてマグマ及び共存する各固相の化学組成を明らかにした(ただしH<sub>2</sub>Oは除く)。そしてその分析結果から、マスバランス計算により溶融度及びマグマ中の含水量を算出した。

Key words: Water content in magma, Phase diagram, Uppermost lower mantle

Corresponding author: m214267@hiroshima-u.ac.jp

図1に求められた溶融度から見積もったマグマ中の含水量、すなわち含水リキダスラインを示す。例えば下部マントル最上部の温度を1650°Cとすると、マグマ中の含水量は約23 wt%と推定できる。Sakamaki(2017)ではマグマの密度の立場から、この領域で重力的に安定であるためには含水量が8 wt%以下であるべきと報告している。したがってこの領域で含水マグマが重力的に安定に存在することは困難であると考えられる。

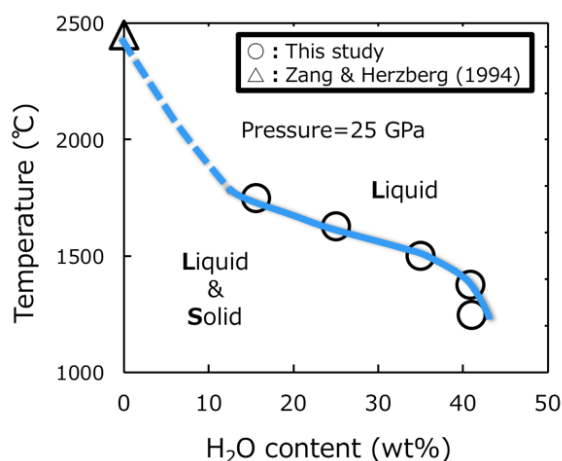


Fig 1: Hydrous liquidus line in pyrolite-H<sub>2</sub>O pseudo-binary system at 25GPa

## マグマ内に存在する $\text{Fe}_2\text{O}_3$ の高圧下での部分モル体積

坂凜太郎, 鈴木昭夫\*, 坂巻竜也 (東北大学・理)

### Partial molar volume of $\text{Fe}_2\text{O}_3$ in magma at high pressure

Rintaro BAN, Akio SUZUKI\*, Tatsuya SAKAMAKI (Tohoku Univ.)

Understanding of the magma behavior is essential for discussing igneous activities not only on the surface but also in the interior of the Earth. Based on geophysical observations, the presence of magma is proposed in the deep mantle. Previous studies indicate the existence of high concentration of  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  in the lower mantle. Although the knowledge of the behavior of  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  in the magma has become essential for discussing in the deep mantle, i.e., at high pressure and temperature, there is no data on it. In this study, we report partial molar volume of  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  in silicate melts calculated from the density of  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ -bearing silicate melt measured by sink-float method.

Keywords: partial molar volume, magma, sink-float method

\*Corresponding author: akio.suzuki.c5@tohoku.ac.jp

## 高圧下における SiO<sub>2</sub> ガラスの屈折率測定

境毅\*, 三守秀門 (愛媛大・地球深部研)

### Refractive index measurement of SiO<sub>2</sub> glass under high pressure

Takeshi Sakai\*, Hideto Mimori (GRC, Ehime Univ.)

Refractive index of SiO<sub>2</sub> glass was successfully measured up to 70 GPa using optical interferometric signals in the diamond anvil cell. The refractive index of SiO<sub>2</sub> glass increases linearly with density up to 20 GPa. At pressures above 20 GPa, however, it begins to deviate from the linear relationship and becomes consistent with that of Stishovite. This trend corresponds to the change in the coordination number of Si in SiO<sub>2</sub> glass from 4 to 6. It shows that refractive index measurements under high pressure can provide insight into the structural changes of SiO<sub>2</sub> glass under high pressure.

#### 1. はじめに

核 - マントル境界のようなマントル深部でもマグマが存在する可能性が議論されており、高圧下におけるマグマ (ケイ酸塩メルト) の物性を知ることはマントルダイナミクスを考える上で重要である。SiO<sub>2</sub> はケイ酸塩メルトの主成分であり、その構造に対し支配的役割を担う。そのため SiO<sub>2</sub> ガラスをモデル物質とした構造や密度に関する研究が数多くなされてきた。しかし、それらの多くは放射光 X 線を用いた回折法 (e. g., Kono et al., 2020) や吸収法 (Petitgirard et al., 2017) によるものが多い。そこで我々は密度と密接な関係のある屈折率に着目し、屈折率から高圧下における非晶質物質の構造変化について知見を得ることを目的として、SiO<sub>2</sub> ガラスの高圧下屈折率測定を試みた。

#### 2. 手法

高圧発生にはダイヤモンドアンビルセル (DAC) を用いた。DAC に可視光を照射すると上下アンビル間で光学的干渉が起こる。この干渉スペクトルは試料厚みと屈折率によって記述されるため、試料厚みが分かれば屈折率を決定することができる。干渉スペクトルを利用した高圧下での屈折率測定には、Cavity 法と標準試料法の 2 つの方法を用いた。Cavity 法は、我々が新たに開発した手

法で、DAC のキュレット面に集束イオンビーム加工装置 (FIB) を用いて窪み (cavity) を作り、この cavity のある場所とない場所の 2 ヲ所で干渉スペクトルを測定し、干渉の条件式を連立方程式として解くことで屈折率を求める方法である。標準試料法では、キュレット面の中心に対して対照的な位置に標準試料と測定試料の 2 つの試料をそれぞれ封入する。標準試料から試料厚みを決定し、光学干渉スペクトルから屈折率を得る方法である。標準試料には高圧下における屈折率が既知である H<sub>2</sub>O (Dewaele et al., 2003) を用いた。

#### 3. 結果と考察

Cavity 法で 60 GPa まで、標準試料法で 70 GPa までの屈折率測定に成功した。屈折率は約 40 GPa まで急速に上昇した後、それ以上の圧力では上昇傾向が緩慢になるという特徴が観察された。各圧力での SiO<sub>2</sub> ガラスの密度を状態方程式 (Petitgirard et al., 2017) から見積もると、比較的低下下では屈折率は密度に対して線形関係にあり Quartz や Coesite と整合的だが、20 GPa 以上で線形関係からずれ始め Stishovite の屈折率と合う方向に変化した。この密度 - 屈折率関係の傾向の変化は、高圧下における Si の配位数変化 (4→6) に対応すると考えられる。

Keywords: Refractive index, Diamond anvil cell, SiO<sub>2</sub> glass, coordination number

Corresponding author: sakai@sci.ehime-u.ac.jp

ポスター | R4：地球表層・環境・生命

📅 2021年9月16日(木) 9:30 ~ 18:30 | 🖨️ ePoster Session

**R4：地球表層・環境・生命**

[現地ポスターコアタイム]

12:30~14:00

17:00~18:30

9:30 ~ 18:30

[R4P-01] サンゴ骨格中のカルサイト-アラゴナイト分布

\*甕 聡子<sup>1</sup>、波利井 佐紀<sup>2</sup>、富岡 尚敬<sup>3</sup>、伊藤 元雄<sup>3</sup> (1. 山形大・理、2. 琉大・熱生研、3. JAMSTEC)

---

9:30 ~ 18:30

[R4P-02] 魚類耳石を構成するvateriteの結晶学的特徴

「発表賞エントリー」

\*高橋 玄<sup>1</sup>、奥村 大河<sup>1</sup>、鈴木 道生<sup>2</sup>、小暮 敏博<sup>1</sup> (1. 東大・院理、2. 東大・院農)

---

9:30 ~ 18:30

[R4P-03] サポナイト層間における陽イオン交換選択係数の測定

\*野路 陽平<sup>1</sup>、福士 圭介<sup>2</sup>、徳門 弘都<sup>2</sup> (1. 金沢大・学理、2. 金沢大・院理)

## サンゴ骨格中のカルサイト-アラゴナイト分布

甕聡子 (山形大・理), 波利井佐紀 (琉大・熱生研),

富岡尚敬, 伊藤元雄 (JAMSTEC)

## Distribution of calcite-aragonite on skeletons of scleractinian coral

Satoko Motai \*(Yamagata Univ.), Saki Harii (Univ. Ryukyus),

Naotaka Tomioka, Motoo Ito (JAMSTEC)

造礁サンゴ（イシサンゴ目）は主に熱帯・亜熱帯の浅海で体内の褐虫藻と共生する動物であり、炭酸カルシウムで構成される外骨格を持つ。これまで骨格はアラゴナイトの多結晶集合体であると考えられてきた。しかし近年になって、南極海に生息する褐虫藻を持たない種や海水の元素組成比が現在と異なる白亜紀には、カルサイトもサンゴ骨格構成鉱物であることが報告されている（Stolarski et al., 2007; Stolarski et al., 2021）。本研究では、サンゴの石灰化における多形選択の過程について検証するため、カルサイトの析出しやすい環境下でサンゴを飼育し、骨格中の鉱物相分布を観察した。

カルサイトを形成させるため、共生藻から隔離した造礁サンゴ幼生（*Acropora* sp.）を Mg/Caモル比=5.0, 2.4の海水中で保持した。その後、ペプチド試薬（Hym-248）を添加し稚ポリプへと変態させ石灰化を開始させ、1~2週間飼育した。生体部は次亜塩素酸ナトリウムで除去した。得られた骨格は、6回対称の隔壁からなる典型的なコラライトと底盤を持つ骨格構造を有することを光学顕微鏡で確認した。骨格を樹脂包埋し、その成長方向に断面が出るように研磨した。高知コア研究所に設置されている分析走査型電子顕微鏡（SEM-EDS）で元素マッピングを行い、骨格中のCa, Mg分布を確かめた。その後、同試

Keywords: reef-building coral, biomineralization  
\*Corresponding author: motai@sci.kj.yamagata-u.ac.jp

料をラマン顕微鏡(RAMANtouch, Nanophoton, Osaka)で測定し、鉱物相の同定を行った。

SEM-EDS分析では、骨格の底盤の一部と隔壁の骨格中心部にMgの濃集が認められた。ラマン分析において、Mg濃集部分はカルサイト、Mg濃度が低い部分はアラゴナイトのスペクトルを示した。カルサイト-アラゴナイト境界の両相混合領域は幅5  $\mu\text{m}$ 以下である。骨格の幅50  $\mu\text{m}$ と8日間の飼育期間から骨格成長速度は $\sim 3 \mu\text{m/day}$ と概算され、遷移は2日以内で起きると推測される。底盤は石灰化初期に形成される。また、隔壁は中心部から外部に向かって骨格が形成されることが知られている(Cuif et al., 2003)。よって、カルサイトは周囲のアラゴナイトより先に析出し、一度サンゴ生体内でアラゴナイト析出条件を満たすとその環境が維持されと考えられる。多形選択に関わる要因として、有機物テンプレート、Mg/Caモル比が提唱されている（Kitano 1962; Cuif et al., 2003）。本研究の結果は両仮説と矛盾しない。そのため、鉱物相遷移部のより詳細な微細組織観察を通じ、仮説の検証を行うことが今後の課題となる。Stolarski et al., 2007, Science, 318, 92–94. Stolarski et al., 2021, Proc. Natl. Acad. Sci., 118, e2013316117. Cuif et al., 2003, Geochim. Cosmochim. Acta., 67, 75–83. Kitano, 1962, Bull. Chem. Soc. Jpn., 35, 1973–1980.

## 魚類耳石を構成する vaterite の結晶学的特徴

高橋玄（東大・院理）、奥村大河（東大・院理）、

鈴木道生（東大・院農）、小暮敏博（東大・院理）

### Crystallographic characteristics of vaterite in fish otolith

Gen Takahashi (Univ. Tokyo, Sci.) \*, Taiga Okumura (Univ. Tokyo, Sci.),

Michio Suzuki (Univ. Tokyo, Agri.) and Toshihiro Kogure (Univ. Tokyo, Sci.)

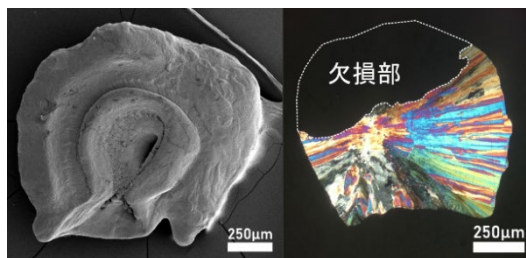
魚類の内耳中には耳石と呼ばれる塊状の炭酸カルシウム結晶が存在し、加速度や音に対するセンサーとしての機能を担っている。一般的な硬骨魚類には礫石、扁平石、星状石と呼ばれる3つの耳石があるが、礫石と扁平石は aragonite、そして星状石は vaterite というように異なる結晶多形を取ることが多い。vaterite は準安定相で溶解度が高く、溶液中では時間と共に calcite などの安定な多形へ相転移する。何故魚類耳石では vaterite が形成され安定に存在し得るのか、その理由はわかっていない。しかし、有機物の寄与などのバイオミネラリゼーション特有のプロセスが重要な役割を果たしていると考えられる。

本研究では魚類耳石における vaterite の形成機構を解明するため、まずその結晶学的特徴を調べた。試料には一般的な硬骨魚類の例として金魚(*Carassius auratus*)の星状石を主に使用し、また3つの耳石全てに vaterite が含まれる特殊な例としてベステルチョウザメ(*Acipenser ruthenus* × *Huso huso*)の扁平石も使用した。

まず、これらの試料を粉末化し XRD と TG-DTA による測定を実施した。魚類耳石の vaterite の XRD におけるピーク位置や TG-

DTA における calcite への転移温度は無機的に合成された vaterite と同じであった。一方、XRD の各ピークの半値幅が耳石由来の vaterite ではより狭くなった。この特徴は金魚とチョウザメの両方で見られた。

金魚の星状石はアスペクト比が概ね3:1の円盤状の形をしている(図1)。その円周を含む面に相当する薄片を作製し、偏光顕微鏡による観察(図2)及びEBSDによる結晶方位測定を行った。尚、EBSDの解析には Kamhi (1963)による vaterite の平均構造 ( $P6_3/mmc$ ,  $a=4.13, c=8.49 \text{ \AA}$ ) を用いた。結果として金魚の星状石を構成する vaterite は中心から半径方向へ放射状に伸長し、それらの結晶は概ね  $a$  軸が半径方向に  $c$  軸は円周方向に向くという特徴が見られた。



(左) 図1: 金魚星状石のSEM像

(右) 図2: 金魚星状石薄片の偏光顕微鏡写真

Keywords: biomineralization, calcium carbonate, otolith

\*Corresponding author: gen\_takahashi@eps.s.u-tokyo.ac.jp

## サポナイト層間における陽イオン交換選択係数の測定

野路陽平\*(金沢大学), 福士圭介(金沢大学), 徳門弘都(金沢大学)

### Measurement of the cation exchange selectivity of saponite

Yohei Noji\* (Kanazawa Univ), Keisuke Fukushi (Kanazawa Univ), Hiroto Tokumon (Kanazawa Univ)

現在の火星は寒冷・乾燥化した惑星であるが、約 40 億年前は温暖な時期があり、表面では大規模な水循環が存在していたことが明らかとなっている。NASA の火星探査ミッション Mars2020 の探査車パーシビアランスはかつて湖沼があったジェゼロクレーターに降り立ち、探査している。ジェゼロクレーターには、湖沼堆積物にサポナイトなどの水の作用で生成した二次鉱物が存在することが確認されている。溶液中でサポナイトは構造内の層間陽イオンを溶液内の陽イオンと交換しやすいという性質を持つ。したがって、サポナイトの層間陽イオン組成からサポナイトの陽イオン交換選択係数を用いることで、かつて接触していた間隙水の水質を制約することが可能である。スメクタイトの陽イオン交換選択係数は古くから測定されているが、その多くは地球上で広範に存在するモンモリロナイトのものであり、火星など地球外天体で普遍的に存在するサポナイトではほとんど測定例がない。そこで本研究ではサポナイトによる陽イオン選択係数を実験的に求め、これまで報告されているスメクタイトの選択係数と比較することを目的とした。

実験はクニミネ工業株式会社の合成サポナイトであるスメクトン-SA を用いた。イオ

ン交換実験に先立ち層間陽イオンが完全  $\text{Na}^+$  型のサポナイト懸濁液を作成した。遠心管に、作成した  $\text{Na}^+$  型サポナイト懸濁液、溶液のカリウムイオン濃度が順に 4~20 mM 程度になるように、KCl 溶液を添加し、その後、全量が 40mL になるようにイオン交換水を添加した。作成した懸濁液を 25°C の温度条件下で、24 時間インキュベーター内でミックスローターにより攪拌し、反応させ、遠心分離機にて固相と液相に分離した。さらに、液相をろ過したものを ICP-OES にて  $\text{K}^+$ ,  $\text{Na}^+$ ,  $\text{Mg}^+$  の濃度測定を行い、測定した  $\text{K}^+$ ,  $\text{Na}^+$  濃度から  $\text{Na}^+$ - $\text{K}^+$  選択係数を求めた。

実験の結果、KCl の添加量を増やすと層間に取り込まれる  $\text{K}^+$  の量が増加し、溶液中の  $\text{Na}^+$  の量も増加するという相関関係がみられた。この測定したイオン濃度の値から求められた  $\text{Na}^+$ - $\text{K}^+$  選択係数は先行研究よりも優位に低い値であった。この結果から、スメクタイト族の中でもサポナイトは層間陽イオンの交換が行われにくいという可能性があることが示唆された。サポナイトは液体の水を持つ太陽系天体に普遍的に存在する。今後サポナイトの層間組成を利用した水質復元を行うにあたって、陽イオン選択係数を再考する必要があるかもしれない。

Keywords: Saponite, Cation selectivity

\*E-mail: y\_noji0219@stu.kanazawa-u.ac.jp

ポスター | R6: 深成岩・火山岩及び サブダクションファクトリー

■ 2021年9月16日(木) 9:30 ~ 18:30 | ㊦ ePoster Session

**R6: 深成岩・火山岩及び サブダクションファクトリー**

[現地ポスターコアタイム]

12:30~14:00

17:00~18:30

9:30 ~ 18:30

[R6P-01] 北上山地，堺ノ神深成岩体の形成プロセスの解明：岩石学的研究による貫入・定置プロセスの温度・圧力条件

「発表賞エントリー」

\*鈴木 哲士<sup>1</sup>、浅井 信夫<sup>1</sup>、中島 和夫<sup>1</sup>、湯口 貴史<sup>1</sup> (1. 山形大・院理)

9:30 ~ 18:30

[R6P-02] 阿武隈帯中部，南蔵王地域・栗子地域の白亜紀花崗岩類・変成岩類の岩石学的研究

\*丸山 純一<sup>1</sup>、加々島 慎一<sup>2</sup> (1. 山形大・院理、2. 山形大学)

9:30 ~ 18:30

[R6P-03] 阿武隈山地東部に分布する深成岩類のジルコンU-Pb年代

\*御子柴 真澄<sup>1</sup>、高橋 浩<sup>1</sup>、久保 和也<sup>1</sup>、檀原 徹<sup>2</sup>、岩野 英樹<sup>2</sup>、平田 岳史<sup>3</sup> (1. 産総研、2. (株) 京都フィッシュン・トラック、3. 東大・院理)

9:30 ~ 18:30

[R6P-04] 花崗岩中の割れ目発生・発達プロセスの解明：熱水変質を指標としたアプローチ

\*湯口 貴史<sup>1</sup>、笹尾 英嗣<sup>2</sup>、五十公野 裕也<sup>1</sup> (1. 山形大・理、2. 原子力機構)

9:30 ~ 18:30

[R6P-05] 等粒状花崗岩の他形カリ長石のカソードルミネッセンス オシラトリゾーニングの新知見 —土岐花崗岩体を例に

\*野中 麻衣<sup>1</sup>、湯口 貴史<sup>1</sup>、鈴木 哲士<sup>1</sup>、井村 匠<sup>1</sup>、中島 和夫<sup>1</sup>、西山 忠男<sup>2</sup> (1. 山形大・院理、2. 熊本大)

9:30 ~ 18:30

[R6P-06] 愛媛県四阪島梶島に分布する白亜紀苦鉄質岩類の岩石記載と全岩化学組成

「発表賞エントリー」

\*下岡 和也<sup>1</sup>、斉藤 哲<sup>1</sup> (1. 愛媛大・院理工)

9:30 ~ 18:30

[R6P-07] 大崩山花崗岩体中の石英におけるカソードルミネッセンス像とTi濃度およびAl濃度の関係

\*渡邊 みのり<sup>1</sup>、加藤 丈典<sup>2</sup>、小北 康弘<sup>3</sup>、湯口 貴史<sup>1</sup> (1. 山形大、2. 名古屋大、3. 原子力機構)

# 北上山地、堺ノ神深成岩体の形成プロセスの解明： 岩石学的研究による貫入・定置プロセスの 温度・圧力条件

鈴木哲士・浅井信夫・中島和夫・湯口貴史（山形大）

## Temperature and pressure conditions of intrusive and emplacement processes of the Sakainokami plutonic body, Northeast Japan

Satoshi Suzuki\*, Nobuo Asai, Kazuo Nakashima, Takashi Yuguchi  
(Yamagata Univ)

北上山地の地質構造は中・古生界の堆積岩類とそれに貫入する深成岩類で構成され(生出ほか, 1989), その深成岩類は斑レイ岩～花崗岩まで広く分布する(片田ほか, 1971). 研究対象である堺ノ神深成岩体は複雑な岩相変化を示すことが報告されており(Kato and Hama, 1976), 堺ノ神岩体は北上山地のミニチュアモデルとして捉えることができる. また, 堺ノ神岩体は Kato and Hama (1976)によって, 野外調査と鏡下観察から3つの岩相に分類されている. 本報告では堺ノ神岩体の形成プロセスを解明するために, 空間的に疎のないようにサンプリングを行い(サンプル112個), 得られた空間的な岩石情報(露頭観察, 鏡下観察, モード, 全岩化学組成)から岩相の再区分を実施した. これに加えて, 再区分した岩相ごとに地質温度計・圧力計を適用し, 貫入・定置プロセスにおけるマグマの固結温度・圧力条件について検討する.

岩相区分では空間的な岩石情報から, 黒雲母含有両輝石普通角閃石斑レイ岩(A岩相), 黒雲母普通角閃石モンゾ斑レイ岩～閃緑岩(B岩相), 黒雲母普通角閃石花崗閃緑岩の優黒質(C岩相)と優白質(D岩相), そしてこれまで報告例のない貫入岩体(E岩相)の5つに分類した. これに加えて, 再区分し

た岩相に対して Schmidt (1992)の Al-in-角閃石圧力計, Blundy and Holland (1990)の斜長石・角閃石温度計を適用した.

地質温度計・圧力計ではコアからは貫入時の温度・圧力, リムからは定置した温度・圧力がそれぞれ得られると仮定し, マグマの固結温度・圧力条件を議論した. その結果, A, B, C, E岩相のコアの温度・圧力では誤差範囲内にプロットされ, およそ温度が880 °C, 圧力は650 MPa ( $\rho=2.7 \text{ g/cm}^3$ と仮定すると深度は約25 km)で結晶化が開始し, 温度・圧力の低下と共に結晶化が進む. 一方でD岩相では, およそ温度が750 °C, 圧力は390 MPaから晶出し始め(深度は約15 km), 温度・圧力の低下と共に結晶化が進むことから, 他岩相とは異なる貫入・定置プロセスを有すると解釈できる. また, リムでは全ての岩相で温度は650～700 °C, 圧力が200～400 MPaの水に飽和した場合の花崗岩のソリダス線(Thompson and Algor, 1977)付近に集中してプロットされた. そこで, 温度・圧力それぞれで全ての岩相の加重平均を求めたところ, 温度  $687 \pm 10 \text{ }^{\circ}\text{C}$ , 圧力  $285 \pm 16 \text{ MPa}$ を示した. つまり, 堺ノ神岩体は深度10～11 kmの水に飽和した環境下に定置したと解釈できる.

Keywords: Skainokami plutonic body, lithofacies, geothermometer, geobarometer.

\*Corresponding author: s211681d@st.yamagata-u.ac.jp

## 阿武隈帯中部，南蔵王地域・栗子地域の 白亜紀花崗岩類・変成岩類の岩石学的研究

丸山純一，加々島慎一（山形大）

### Petrography of the granitic and metamorphic rocks in Minami-Zao and Kuriko areas, central part of Abukuma Belt, Northeast Japan

Jun-ichi Maruyama\* and Shin-ichi Kagashima (Yamagata Univ.)

東北日本の地質帯の一つである阿武隈帯は白亜紀の花崗岩類を主体として構成される。阿武隈帯の花崗岩類は，南部の阿武隈山地にまとまって分布するのに対し，中部では散在して分布する。本研究の対象地域は阿武隈帯中部に位置する南蔵王・栗子地域であり，花崗岩類・変成岩類が露出している。栗子地域では丸山(1979)により花崗岩類の Rb-Sr 含有量について朝日山地のものと比較が行われているが，以降は同地域における岩石学的研究がほとんど行われていない。しかし，阿武隈帯全体の火成活動を解明し，起源物質である下部地殻の特性を明らかにするうえで，阿武隈帯中部の基盤岩類の岩石学的研究は重要である。

本研究は，南蔵王地域・栗子地域の花崗岩類・変成岩類について，岩石記載，全岩化学組成分析を行い，その成因を明らかにすることを目的としている。福島県福島市北西の摺上川，烏川流域において花崗岩類・変成岩類を合計 23 試料採取した。

花崗岩類はモード組成より花崗岩～トータル岩に分類される。烏川では，局所的に花崗岩が花崗閃緑岩に非調和に貫入している。主成分鉱物は石英，斜長石，カリ長石，黒雲母，角閃石，副成分鉱物はアパタイト，ジルコン，白雲母，および二次鉱物として緑簾石

がみられる。一部サンプルは激しく変質しており，黒雲母の緑泥石化，斜長石のソーシユライト化がみられる。変成岩類は黒雲母片麻岩，角閃石-黒雲母片麻岩，ザクロ石-黒雲母片麻岩，珪線石-白雲母-黒雲母片麻岩，堇青石-ザクロ石-黒雲母片麻岩，角閃岩が確認される。鉱物組み合わせは珪線石±白雲母±ザクロ石±堇青石±角閃石±黒雲母±石英±斜長石±カリ長石である。

花崗岩類の全岩化学組成分析の結果，SiO<sub>2</sub> 量は 59.4 wt.%～73.0 wt.%を示す。判別図により火山弧花崗岩，アルミナ飽和度は 0.9 から 1.3 の範囲にプロットされる。阿武隈帯中部に散在する他の花崗岩類との比較を行ったところ，主要元素は他岩体のトレンドと調和的であるが，微量元素のうち Sr においては 3 つの異なるトレンドがみられる。3 つのトレンドごとの地理的な分布をみると，それぞれ蔵王地域，白布～猪苗代地域，南陽～日山の 3 つの地域に分けることができる。これはマグマの起源物質の不均質性，マグマ形成過程の違いが反映されていると考えられる。

#### 引用文献

亀井ほか，2003，地質学雑誌；丸山ほか，1979，地質学論集；吉田ほか，2016，日本地質学会第 123 年学術講演要旨

Keyword: Abukuma Belt, granitic rock

Corresponding author: jm.abcd.223.z@gmail.com

## 阿武隈山地東部に分布する深成岩類の ジルコン U-Pb 年代

御子柴真澄\*・高橋 浩・久保和也（産総研地質調査総合センター）・  
檀原 徹・岩野英樹（京都フィッシュントラック）・平田岳史（東京大学）

### Zircon U-Pb ages of the plutonic rocks in the eastern part of the Abukuma Mountains

M. U. Mikoshiba\*, Y. Takahashi, K. Kubo (GSJ, AIST), T. Danhara,  
H. Iwano (Kyoto Fission-Track), and T. Hirata (Univ. Tokyo)

阿武隈山地には、花崗岩類を主体とする深成岩類が広く分布しており、古くから研究されてきた（渡辺ほか, 1955; 田中, 1989 など）。

近年、阿武隈山地の深成岩類について、ジルコンの U-Pb 年代が数多く報告され（Kon and Takagi, 2012; Kon et al., 2015; Ishihara and Orihashi, 2015; Takahashi et al., 2016 など）、これらは 121–96 Ma の年代を示すことが明らかになった。また、山地東縁の花崗岩類からは石炭紀末の年代も報告された（Tsutsumi et al., 2010; Tsuchiya et al., 2014 など）。しかし、山地東部の深成岩類の年代値の報告はまだ少ない。今回、阿武隈山地東部に分布する花崗岩類のジルコン U-Pb 年代測定を行ったのでその結果を報告し、花崗岩類の貫入時期などについて考察する。

先第三系の地帯構造区分として、阿武隈山地主要部とその北方延長は阿武隈帯、阿武隈山地東縁の畑川破砕帯から東側とその北方延長は北上帯に区分されている（久保・山元, 1990）。畑川破砕帯以西の阿武隈帯の花崗岩類は、貫入関係から古い順に、角閃石黒雲母花崗閃緑岩、角閃石含有黒雲母花崗閃緑岩、黒雲母花崗岩、白雲母黒雲母花崗岩などが分布する。畑川破砕帯とその東方の双葉破砕帯の間の北上帯には、石英閃緑岩、角閃石黒雲母花崗閃緑岩、黒雲母花崗岩などが分布し、複数の岩体に区分されている（久保ほか, 1990, 1994, 2002）。

Keywords: Plutonic rocks, Abukuma Belt, Kitakami Belt, U-Pb age, zircon

\*Corresponding author: [masumi-mikoshiba@aist.go.jp](mailto:masumi-mikoshiba@aist.go.jp)

今回、阿武隈帯の花崗岩類のジルコン U-Pb 年代として、中粒角閃石黒雲母花崗閃緑岩（福島県いわき市及び田村市）で  $112.1 \pm 0.9$  Ma 及び  $103.5 \pm 1.5$  Ma の値が得られた。また、中粒淡紅色黒雲母花崗岩（いわき市）で  $108.7 \pm 1.0$  Ma、細一中粒灰色黒雲母花崗岩（浪江町）で  $111.6 \pm 0.7$  Ma の年代値が得られた。さらに、畑川—双葉破砕帯間の北上帯において、前期白亜紀の火山岩類に貫入する国見山花崗閃緑岩（中粒角閃石黒雲母花崗閃緑岩、南相馬市）で  $118.4 \pm 0.9$  Ma、国見山花崗閃緑岩を貫く八丈石山花崗岩（中—粗粒黒雲母花崗岩、浪江町）で  $111.5 \pm 0.8$  Ma の年代値が得られた。

今回得られた年代は、すべて前期白亜紀に相当する。阿武隈帯の花崗岩類のうち、広く分布する中粒角閃石黒雲母花崗閃緑岩の年代値は幅があり、マグマの活動が比較的長期間続いたことを示す。また、黒雲母花崗岩の年代値はいずれも 110 Ma に近く、これまでの報告と調和的であった。

さらに、今回得られた北上帯の花崗岩類の U-Pb 年代は、貫入関係と調和的であり、鉱物の K-Ar 年代（久保ほか, 1990）に比べ若干若いか誤差の範囲内で一致する。Ishihara and Orihashi (2015) は、南方の花崗閃緑岩から 108–106 Ma の年代値を報告したが、今回の測定ではより古い年代値が得られ、北上山地深成岩類との類似性が示唆された。

## 花崗岩中の割れ目発生・発達プロセスの解明：

### 熱水変質を指標としたアプローチ

湯口貴史 (山形大)\*・五十公野裕也(山形大)・笹尾英嗣 (原子力機構)

Genesis and development processes of fractures in granite:  
petrographic indicators of hydrothermal alteration

Takashi Yuguchi (Yamagata Univ.)\*, Yuya Izumino (Yamagata Univ.), Eiji Sasao (JAEA)

花崗岩体中には普遍的に割れ目が生じており、その割れ目を通路として岩体内の物質移動が生じる。このため、岩体内の割れ目分布の評価は物質移動特性の解明へと繋がる。物質移動特性の解明は、高レベル放射性廃棄物の地層処分や石油などの地下貯蔵の安全性評価において重要な課題である。本研究では、物質移動への寄与が大きく、肉眼で観察可能な割れ目であるラージスケール割れ目と鉱物の熱水変質（黒雲母の緑泥石化・斜長石の変質）の程度、そして鉱物中の微小空隙の3者の関係について解明した。

岩石試料は土岐花崗岩体のボーリング孔である06MI03号孔（瑞浪超深地層研究所）から採取した。06MI03号孔では、ラージスケール割れ目の情報が収集されており、割れ目頻度の異なる24試料を研究対象とした。これらの試料には黒雲母の緑泥石化と斜長石の変質が普遍的に観察される。

変質の程度を試料間で比較するためには変質の程度を定量的に表す基準が必要となる。

今日まで花崗岩の変質の強弱は、変質鉱物の出現や量比（ポイントカウンティングによる薄片のモード）の記載によってその程度が表される。しかし、ポイントカウンティングによるモードは変質鉱物以外の鉱物データも含むため、それだけで変質の程度を十分に評価できているとは言えない。そこで変質の程度の評価のために、対象とする鉱物のBSE像の画像解析により鉱物中の変質領域と鉱物面積を取得し、その比を変質インディケータとして定義した。鉱物中の微小空隙面積もまたBSE像の画像解析によって導出した。

3者の関係は2つの傾向を示す：①変質インディケータと微小空隙が正の相関を有する傾向、そして②ラージスケール割れ目の発達する岩石領域では変質インディケータと微小空隙がともに大きくなる傾向を見出した。①の傾向は、鉱物の変質の発達が、鉱物中の微小空隙の量に支配されているということ、②の傾向は、変質インディケータが割れ目分布の評価に有効な指標となることを示す。

Keywords: Macroscopic fracture; Microvoid; alteration indicator; biotite chloritization; Toki granite.

\*Corresponding author: [takashi\\_yuguchi@sci.kj.yamagata-u.ac.jp](mailto:takashi_yuguchi@sci.kj.yamagata-u.ac.jp)

# 等粒状花崗岩の他形カリ長石のカソードルミネッセンス

## オシラトリゾーニングの新知見 —土岐花崗岩体を例に

野中麻衣（山形大学）\*・湯口貴史（山形大学）・鈴木哲士（山形大学）・  
井村匠（山形大学）・中島和夫（山形大学）・西山忠男（熊本大学）

### Cathodoluminescence oscillatory zoning of anhedral K-feldspar from equigranular Toki granite

Mai Nonaka\*, Takashi Yuguchi, Satoshi Suzuki, Takumi Imura, Kazuo Nakashima (Yamagata Univ.),  
Tadao Nishiyama (Kumamoto Univ.)

花崗岩中の鉱物のカソードルミネッセンス（CL）像解析は、鉱物の形成・成長を明らかにすることができ、花崗岩質マグマの冷却過程の解明に有用である。カリ長石のオシラトリゾーニングはメガクリストやフェノクリストにおいて報告されるものの（Vernon and Paterson, 2008; Vernon, 2010）、等粒状花崗岩において報告例はない。本研究では、等粒状花崗岩である土岐花崗岩中の他形カリ長石において、CL オシラトリゾーニング（波状累帯構造）を新たに見いだした。カリ長石のオシラトリゾーニング形成の知見は、マグマ溜り中の鉱物成長（メルトと鉱物間の元素分配）に加えて、マグマ溜り自体の化学的進化の解明に資するデータを与える。

研究対象である土岐花崗岩体は、白雲母黒雲母花崗岩、ホルンブレンド黒雲母花崗岩、黒雲母花崗岩の3岩相で構成される。ボーリングコア試料からサンプリングを行い、各岩相から3試料（計9試料）の岩石試料を研究対

象とした。これらの試料には他形カリ長石が普遍的に産出する。

研究手法としては、偏光顕微鏡による薄片観察、SEM-CL（JEOL: IT100A+Gatan MiniCL）によるBSE像及びCL像の取得、EPMA（JEOL: JXA-8900）を用いた化学分析（元素マッピングとライン分析）を行った。

土岐花崗岩体の他形カリ長石に対して、以下の2つ知見が得られた。①CL像観察より、これまでに報告例のないオシラトリゾーニングが観察された。このオシラトリゾーニングからカリ長石の成長開始地点が評価できる。②元素マッピングとライン分析の結果より、CL像の高輝度域ではバリウム、チタン、アルミニウム、ナトリウムの含有量が相対的に多く、シリコンとカリウムの含有量が乏しい傾向が得られた。特に、チタンとバリウムの含有量と輝度の正の相関が顕著であり、オシラトリゾーニングの生成は、これらの元素のメルトからの供給に支配される。

**Keywords:** cathodoluminescence; K-feldspar; oscillatory zoning; Toki granite.

\*Corresponding author: [s215046m@st.yamagata-u.ac.jp](mailto:s215046m@st.yamagata-u.ac.jp)

# 愛媛県四阪島梶島に分布する白亜紀苦鉄質岩類の 岩石記載と全岩化学組成

下岡和也・齊藤哲(愛媛大・院理工)

## Petrography and whole-rock geochemical compositions of mafic rocks occurring in the Kajishima, Shisaka Islands, Ehime Prefecture

Kazuya SHIMOOKA\*, Satoshi SAITO (Ehime Univ.)

Mafic rocks have been thought to be genetically related to large igneous activity which forms Cretaceous granitoid batholith in southwest Japan. In this study, we describe petrographic characteristics and newly acquire whole-rock geochemical compositions of mafic rocks in the Kajishima, Ehime prefecture. The mafic rocks can be divided into troctolite, gabbro, gabbro-norite, and mafic dyke based on field observation and petrography. They show whole-rock  $\text{SiO}_2$  contents of 43–50 wt % which are in the range of that of mafic rocks ( $\text{SiO}_2 = 41 - 66$  wt %) associated with Cretaceous granitoid batholith in southwest Japan. The mafic rocks occurring in Kajishima are probably representative of the Cretaceous mafic rocks in southwest Japan.

西南日本白亜紀花崗岩類の成因として、エンリッチマンントル由来苦鉄質下部地殻構成岩の部分溶融が有力視されている(Nakajima et al., 2004)。「フレアアップ期」とも称される白亜紀大規模珪長質火成活動の解明には、花崗岩質マグマの起源物質の候補となる苦鉄質岩類の岩石学的・地球化学的な特徴を把握することが必要不可欠である。

愛媛県新居浜市の北約20kmの瀬戸内海に位置する梶島は、南北800m、東西500mの無人島であり、全島が斑れい岩類や苦鉄質岩脈といった苦鉄質岩類から構成されている。当地域の苦鉄質岩類については、堀内(1985)による詳細な記載岩石学的研究が報告されているが、それ以降はKagami et al. (1988, 2000)による同位体岩石学研究がなされたのみであり、これまでの全岩化学組成データの報告も限られている(Kagami et al., 2000)。そこで本研究では、梶島に分布する苦鉄質岩類について新たに岩石記載と全岩化学組成分析を行い、西南日本内帯の花崗岩類に伴って産する苦鉄質岩類との組成比較を行なった。

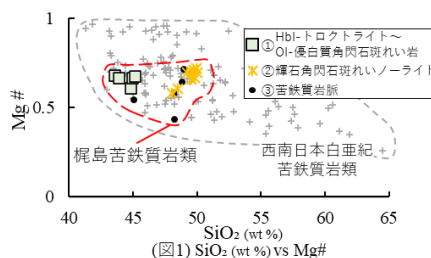
梶島の苦鉄質岩類は、野外産状および記載岩石学的特徴から、①含角閃石トロクトライト～含かんらん石優白質角閃石斑れい岩、②輝石角閃石斑れいノーライト、③苦鉄質岩

Keywords: Gabbro, Cretaceous, Kajishima, Southwest Japan

\*Corresponding author: Shimooka19961213@yahoo.co.jp

脈に大別できる。このうち①含角閃石トロクトライト～含かんらん石優白質角閃石斑れい岩は、ポイキリティックな角閃石を含み、かんらん石と斜長石を包有する。また、③苦鉄質岩脈を除いた斑れい岩類は、少量の半自形～他形を示す黒雲母(1%以下)を含む。

全岩  $\text{SiO}_2$  含有量について、①含角閃石トロクトライト～含かんらん石優白質角閃石斑れい岩は43～45 wt %、②輝石角閃石斑れいノーライトは48～50 wt %、③苦鉄質岩脈は45～49 wt %の範囲を持つ。これら梶島の苦鉄質岩類はハーカー図上では、 $\text{SiO}_2$  の増加に伴い、 $\text{TiO}_2$ 、V、Cr、Cuには増加傾向が、FeO、Co、Znには減少傾向が見られた。また、全岩Mg#( $\text{Mg}/(\text{Mg}+\text{Fe})$ モル比)は0.43～0.72を示す。梶島の苦鉄質岩類の全岩化学組成およびMg#は、西南日本内帯花崗岩類に伴って産する苦鉄質岩類の組成範囲( $n=115$ )にほぼ収まる(図1)。このことから梶島の苦鉄質岩類は西南日本内帯の苦鉄質岩類を代表するものと考えることができる。



(図1)  $\text{SiO}_2$  (wt %) vs Mg#

# 大崩山花崗岩体中の石英における カソードルミネッセンス像と Ti 濃度および Al 濃度の関係

渡邊みのり(山形大)\*, 加藤丈典(名古屋大), 小北康弘(原子力機構),  
湯口貴史(山形大)

## Relationship between cathodoluminescence images and titanium and aluminum concentrations in quartz from the Okueyama granite

Minori Watanabe (Yamagata Univ.)\*, Takenori Kato (Nagoya Univ.), Yasuhiro Ogita (JAEA),  
Takashi Yuguchi (Yamagata Univ.)

石英は珪長質な深成岩に普遍的に産出する鉱物であり、石英の結晶化プロセス解明は深成岩の形成プロセスの解明に寄与する。石英の結晶化プロセスはカソードルミネッセンス(CL)像とチタン(Ti)濃度の関係から論じられている(例えば, Drivenes et al., 2016)。

本研究では、CL 像が示す成長様式と石英中の Ti 濃度およびアルミ(Al)濃度のデータを組み合わせることで、石英の結晶化プロセスについて検討を行う。研究対象は鉛直方向に岩相変化する大崩山花崗岩体の石英である。岩相は高度の低下に伴い黒雲母花崗岩、ホルンブレンド黒雲母花崗岩、ホルンブレンド黒雲母花崗閃緑岩へ変化する。

石英 CL 像の取得には山形大学の SEM-CL (JEOL IT100A+Gatan mini CL) を用いた。また、Ti 濃度および Al 濃度の定量分析には名古屋大学宇宙地球環境研究所の EPMA (JEOL JXA-733) を用いた。石英への含有量がごく微量である Ti の検出には 4 つの分光結晶(PET)を用い、Al には 2 つの分光結晶(TAP)を用いた。それぞれ 1 地点につき照射電流 60 nA, 1 回 200 秒を 8 回繰り返し 1,600 秒で電子線を照射して定量した。

本研究では、CL の明暗が繰り返すオシラトリリーゾニング(OZ)を持つ石英に着目す

る。OZ を持つ石英は粗粒(最大粒径、約 3400  $\mu\text{m}$ )であり、半自形を呈する。黒雲母花崗岩の試料中では OZ の石英が 38 粒子と、他岩相と比較して最も高い頻度で産出する。

結晶のコアを通るようにライン分析を行い、CL の明暗と Ti 濃度(N=31)および Al 濃度(N=10)との関係を評価した。Ti 濃度は  $17 \pm 12$  から  $177 \pm 12$  ppm の幅を有し、TitaniQ 地質温度計(活動度を  $a_{\text{TiO}_2}=1$ )を適用すると  $553 \pm 73$  から  $821 \pm 23^\circ\text{C}$  の結晶化温度を示す。Al 濃度は  $182 \pm 14$  から  $616 \pm 13$  ppm の範囲を示し、Ti よりも高濃度を示す。OZ を持つ石英において CL 明部で Ti および Al が高濃度を示す正の相関が認められる(Fig.1)。累帯に伴い Ti 濃度が増減する結果は、CL パターンがメルト中の局所的な  $\text{TiO}_2$  の活動の変化に依存するとした Yuguchi et al. (2020)とも調和的である。

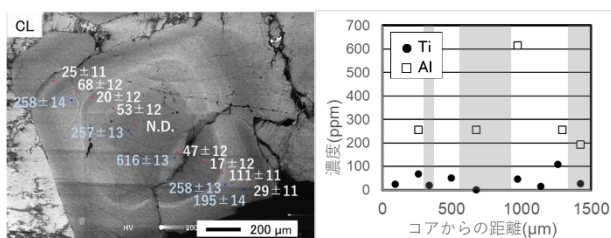


Fig.1 左:石英 CL 像, 右:明暗と濃度の関係

Keywords: Quartz, EPMA, Cathodoluminescence pattern, TitaniQ thermometer, The Okueyama granite

\*Corresponding author: s205006m@st.yamagata-u.ac.jp

## ポスター | S2: 岩石-水相互作用 (スペシャルセッション)

■ 2021年9月16日(木) 9:30 ~ 18:30 | ㊦ ePoster Session

## S2: 岩石-水相互作用 (スペシャルセッション)

[現地ポスターコアタイム]

12:30~14:00

17:00~18:30

9:30 ~ 18:30

[S2P-01] 三波川変成帯エクロジャイト岩体中のマールに見られた柘榴石中の溶解再析出反応と微小空隙

\*吉田 健太<sup>1</sup>、沢田 輝<sup>1</sup>、仁木 創太<sup>2</sup>、大柳 良介<sup>3</sup> (1. JAMSTEC、2. 東大、3. 国士舘大)

9:30 ~ 18:30

[S2P-02] 岩石の弾性波速度・比抵抗・空隙率の同時測定の開発

\*片山 郁夫<sup>1</sup>、谷本 和優<sup>1</sup> (1. 広島大学・地球惑星システム学)

9:30 ~ 18:30

[S2P-03] 三波川変成帯に記録された変成ステージごとのLILE移動度：原岩組成復元モデルの適用  
「発表賞エントリー」\*松野 哲士<sup>1</sup>、宇野 正起<sup>1</sup>、岡本 敦<sup>1</sup>、土屋 載芳<sup>1</sup> (1. 東北大・院環)

9:30 ~ 18:30

[S2P-04] 熱水環境における花崗岩の弾性波伝搬特性の温度圧力依存性

\*水野 克哉<sup>1</sup>、平野 伸夫<sup>1</sup>、土屋 範芳<sup>1</sup> (1. 東北大・院環境)

9:30 ~ 18:30

[S2P-05] 長石の熱発光減衰速度式と熱伝導モデルの連成モデル

「発表賞エントリー」

\*佐藤 貴啓<sup>1</sup>、平野 伸夫<sup>1</sup>、土屋 範芳<sup>1</sup> (1. 東北大・院環境)

## 三波川変成帯エクロジャイト岩体中のマーブルに見られた 柎榴石中の溶解再析出反応と微小空隙

吉田健太\*, 沢田輝 (JAMSTEC), 仁木創太 (東大), 大柳良介 (国土館大)

### Fluid mediated dissolution and reprecipitation process recorded in the garnet of the HP marble collected from the Sanbagawa eclogite mass.

Kenta YOSHIDA\*, Hikaru SAWADA (JAMSTEC),  
Sota Niki (Uni. Tokyo), Ryosuke Oyanagi (Kokushikan Uni.)

四国中央部別子地域の三波川変成帯には、周囲の岩石よりも優位に高压の変成条件を示すエクロジャイト岩体が見られることが知られている。エクロジャイト相変成作用を被っている西五良津岩体からは三波川変成帯全体 (90-80 Ma) の変成作用よりも古い約 116Ma の年代が報告されており、エクロジャイト相変成作用以前の角閃岩相ステージと対応づけられ、「初期変成作用」として認識されている (Endo et al., 2012)。東五良津岩体は、エクロジャイト相変成作用以前のステージとしてグラニュライト相での変成作用が認識されており、初期変成作用時には西五良津岩体と接合していたと考えられている (青矢・遠藤, 2017)。我々の研究グループでは、東五良津岩体東端に産する特異な石灰質岩 (マーブル) を用いて、東五良津岩体が記録する「初期変成作用」以前のステージとして「先三波川変成作用」を見出し、チタン石を用いた温度・圧力・年代推定から約 200Ma のジュラ紀初期年代および 1100°C, 2.5GPa という非常に高い温度圧力を得た (Yoshida et al., 2021a Lithos)。また、同じ試料の石英に富むドメインからは、エクロジャイト相ステージと、それ以降の減圧期の圧力変化と流体活動史を記録しているザクロ石が見出され、エクロジャイト岩体が周囲の非エクロジャイト岩体と接合した際に活動していただろう B に富む流体活動によって形成されたダトー石[CaBSiO<sub>4</sub>(OH)]が見られる (Yoshida et al., 2021b JMPS)。

エクロジャイト相へ減圧期の情報を保存している柎榴石の形成史を評価するために、柎榴石の U-Pb in-situ 年代測定を実施した。柎榴石には二種類のドメインが見られ、ほぼ純粋な Grs からなり霰石を含むエクロジャイト相期の Grt1 と、非エ

Keywords: pre-Sanbagawa metamorphism, dissolution and reprecipitation, fluid infiltration, micro pore  
\*Corresponding author: yoshida\_ken@jamstec.go.jp

クロジャイト岩体との接合時 (～600°C, 1GPa) の流体活動に関連して形成された Adr に富み方解石を含む Grt2 の U-Pb 年代は、ともに約 95Ma となり誤差の範囲で一致した (Niki et al., 2021 JpGU; submitted)。包有される炭酸塩相から両者の形成ステージは明らかに異なる。Grt2 が Grt1 のクラックを埋めるように形成している組織と、Grt2 中に見られるダトー石の存在から、流体流入に伴う柎榴石の溶解再析出反応により Grt2 が形成されたと考えられるが、両者の放射年代が一致したことは、この溶解再析出の際にもともとあった Grt1 に由来する放射起源 Pb がそのまま再析出した Grt2 に取り込まれて、U-Pb 系が溶解再析出反応中に実質的に閉鎖されていたことを示唆する (Niki et al., 2021)。

本研究では、上記の柎榴石の微細組織観察を更に詳細に行い、FIB-SEM による三次元観察を実施した。Grt1 と Grt2 の境界は、FIB-SEM の後方散乱電子像でも観察可能で、三次元的に複雑に入り組んでおり、境界部には微小な空隙が見つかった。微小な空隙は Grt1/2 の境界において、まばらながら境界沿いに面的な分布をしているように見える。空隙の大きさはたかだか 1 μm 程度で、形状の詳細を検討することは出来ない。

流体の関与する溶解再析出の反応フロントでは、マイクロ～ナノメートルスケールの微小な空隙が果たす役割が大きいことが近年明らかになりつつあり、特に長石の交代作用で複数例報告されている (Nurdiana et al., 2021 など)。今回見出した微小空隙は、高压環境 (～1GPa) での柎榴石の交代反応でも空隙による反応促進が働いていることを示唆する。

# 岩石の弾性波速度・比抵抗・空隙率の同時測定の開発

片山郁夫\*, 谷本和優 (広島大学地球惑星システム学)

## Developments of simultaneous measurements for elastic-wave velocity, electrical resistivity, and porosity of rocks

Ikuo Katayama\*, Kazumasa Tanimoto

(Department of Earth and Planetary Systems Science, Hiroshima University)

岩石中の割れ目や空隙は弾性波速度や比抵抗に敏感であることから、それらの物理探査をもとに地下での割れ目などを介した流体の分布や移動が推定されている。なお、弾性波速度は割れ目の密度や形状に敏感であるのに対し、比抵抗は空隙率やその連結度に敏感である特徴をもつ。そのため、両者の同時測定を行うことができれば、地下での流体移動に関するさまざまな性質を制約することが可能である。我々のグループでは、油圧型の加圧試験機に弾性波速度・比抵抗・空隙率の同時測定システムを新規導入したので、その予察的な結果を紹介する。

試験機は、広島大学設置の容器内変形透水試験機を用いた。本試験機の最大圧力は 500 MPa であるが、運用上は 200 MPa までとしている。流体圧はシリンジポンプによって制御し（流体圧の最大は 51 MPa）、シリンジポンプの体積から試料中の空隙率変化を見積もることができる。弾性波速度の測定システムについてはすでに導入しており、岩石の三軸変形中の速度変化やクラック密度の解析を実施している（例えば、Zaima and Katayama 2018）。今回は、新たに比抵抗の測定システムを導入することで、弾性波速度・比抵抗・空隙率の同時測定システムを開発した。

比抵抗の測定は、直径 25mm の試料をステ

ンレスの電極で挟み、交流インピーダンス法（2 端子法）により行った。なお、岩石は NaCl 溶液（0.5 mol/L）で飽和させ、間隙流体圧は 1 MPa での測定を実施した。インピーダンスアナライザー（E4990A）による測定では、20 Hz から 1 MHz までの周波数領域でのデータを取り、インピーダンスと位相差から各周波数での比抵抗を算出した。なお、0.1 kHz から 10 kHz までは周波数依存性がほとんどなく SN 比も高いことから、以下では 1 kHz での比抵抗の結果を示す。

庵治花崗岩を用いた予察的な結果では、比抵抗は圧力の増加とともに系統的に上昇し、封圧 200 MPa では大気圧での測定より 1 桁ほど高い値を示した。なお、庵治花崗岩を用いた先行研究では、流体の組成が違うために比抵抗の値を直接比較することはできないが、封圧 150 MPa では大気圧に比べ抵抗率が 1 桁ほど低下するなど（Watanabe et al. 2019）、本研究と同様の傾向を示す。加圧時の空隙率は若干ではあるが、圧力とともに低下していることから、加圧時の比抵抗の変化は空隙の閉鎖に関係していると考えられる。今後は、弾性波速度の解析を行い、空隙の閉鎖だけでなく、クラック密度や空隙形状（アスペクト比など）との関連性も検討する予定である。

Key words: Elastic-wave velocity, Electrical resistivity, Porosity, Granite

\*Corresponding author: katayama@hiroshima-u.ac.jp

## 三波川変成帯に記録された変成ステージごとの LILE 移動度：原岩組成復元モデルの適用

松野哲士 宇野正起 岡本敦 土屋載芳

### LILE mobility at each metamorphic stage recorded in the Sanbagawa metamorphic belt: Application of Protolith Reconstruction Model

Satoshi Matsuno\*, Masaaki Uno, Atsushi Okamoto, Noriyoshi Tsuchiya

Elemental transfer during prograde and retrograde metamorphism was revealed for metabasaltic rocks of the Sanbagawa metamorphic belt. The elemental transfer was quantified by a novel “Protolith Reconstruction Model” that estimate protolith compositions by machine-learning algorithms trained with global basalt compositional datasets. The results indicate that prograde and retrograde metamorphisms caused systematic depletion and enrichment in Rb, Ba, K, and Sr, respectively. Although the elemental mobility obtained from the metabasalt is integral of prograde and retrograde metamorphism, it can be decomposed into stage-specific element mobility by using a petrological index for each metamorphic stage.

高圧変成岩は、累進変成作用、後退変成作用における沈み込み帯での様々な流体活動を経験しており、それを元素移動として記録している (e.g., Bebout 2007)。これまで、反応に伴う元素移動量の定量的解析は、母岩との違いが明瞭な反応帯に限られており (e.g., Beinlich et al. 2010)、原岩の組成が分からない一般的な広域変成岩への適用が難しかった。著者らは、機械学習アルゴリズムを用いて学習させた玄武岩の原岩組成復元モデル (Protolith Reconstruction Model (PRM)) を提案した (Matsuno et al. under review)。本研究では、この原岩組成復元モデルを三波川変成帯の玄武岩質変成岩に適用し、それぞれの試料から元素移動量を推定し、その空間分布と累進・後退変成作用との関係を検討した結果を報告する。

対象は、三波川変成帯四国中央部の汗見川地域に露出する玄武岩質変成岩である。XRF と ICP-MS 分析から得られた全岩微量元素組成データに対して Protolith Reconstruction Model (PRM) を適用した。(Th, Nb, Zr, Ti) を不動元素と仮定して、

原岩の微量元素濃度の復元を行い、サンプルごとの元素移動度を推定した。また、後退変成作用の指標として、角閃石の組成累帯構造から、角閃石における後退変成作用時(Hbl-Act)の成長割合を  $Y_{\text{mantle}}$  として測定した。

後退変成作用をほとんど受けていないサンプル ( $Y_{\text{mantle}} \approx 0$ ) は、Rb・Ba・K・Sr で 80% 以上の溶脱が発生している場合がある。一方で、Rb・Ba・K・Sr の移動度は、後退変成作用の指標 ( $Y_{\text{mantle}}$ ) と強い正の相関を持っていた。これらの結果は、Rb・Ba・K・Sr の累進変成作用による溶脱と後退変成作用による付加を示唆している。さらに、汗見川に沿った各変成度に応じた元素の溶脱トレンドが定量的に得られつつある。本研究で推定される元素移動度は、海底での変質、累進・後退変成作用の積分値であるが、角閃石などの各変成ステージでの反応進行度の指標を用いることで、ステージごとの元素移動度に分解できると考えられる。

Bebout 2007, Earth Planet. Sci. Lett.

Beinlich et al. 2007, Geochim. Cosmochim. Acta.

Matsuno et al. doi: 10.21203/rs.3.rs-558656/v1

Keywords: Fluid-rock interaction, Protolith reconstruction, Metamorphic rock, Subduction-related metamorphism

\*Corresponding author: [m.s-rakugo@geo.kankyo.tohoku.ac.jp](mailto:m.s-rakugo@geo.kankyo.tohoku.ac.jp)

# 熱水環境における花崗岩の弾性波伝搬特性の温度圧力依存性

水野克哉\*・平野伸夫・土屋範芳（東北大・院・環境科学）

## Temperature and pressure dependencies in elastic wave propagation through granite in hydrothermal environments

Katsuya MIZUNO\*, Nobuo HIRANO, Noriyoshi TSUCHIYA

(Graduate School of Environmental Studies, Tohoku University)

### 1.背景

流体は岩石の様々な特性に影響を与えることが知られているが、これまで高温高压熱水環境下における岩石の弾性波を測定した研究例はない。本研究では、熱水環境下で花崗岩の弾性波を導波棒経由で測定し、熱水環境での花崗岩における弾性波の伝搬特性の温度・圧力依存性について検討した。

### 2.実験

図1に実験装置の概略を示す。熱水環境を再現する耐圧容器内部には2本のステンレス製の導波棒が貫入しており、それらで岩石試料を挟む。導波棒にパルサーの発振・受信機を密着させることで導波棒を経由して弾性波を伝搬させる。試料には稲田花崗岩を使用した。

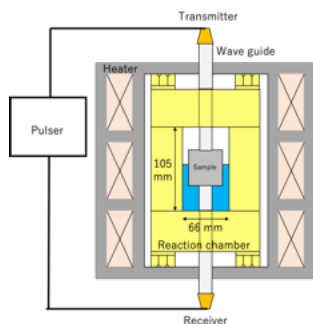


図1：弾性波測定装置

### 3.波形

得られた波形を図2に示す。高温になる程遅延が発生しており、また減衰が顕著である。ノイズの影響で弾性波の到達時間を検出できなかったが、波形が類似していたためピークのずれ $\Delta t$ 、岩石試料  $V_p$  初期値、試料長さ  $L$  から次式を用いて  $V_p'$  を算出する。

$$V_p' = \frac{L}{L/V_p + \Delta t} = \frac{LV_p}{L + \Delta t V_p}$$

Keywords : Elastic wave,  $V_p$ , Granite, Supercritical water, seismic tomography

E-mail address : mizuno@geo.kankyo.tohoku.ac.jp

### 4.結果・考察

図3に本実験で得られた花崗岩の  $\Delta V_p$  を Zhang et al. (2018) にまとめられている乾燥状態で測定された花崗岩の  $\Delta V_p$  とともに示す。常温常圧では高温になる程  $V_p$  の勾配が大きくなる一方で、本研究では高温領域で勾配がむしろ小さくなっている。これは流体の圧力増加の影響であると考えられる。圧力が岩石の  $V_p$  に影響を与える原因として考えられるのは①流体、岩石そのものの  $V_p$  変化、②伝搬経路の変化、③試料内の独立したき裂の閉塞などである。

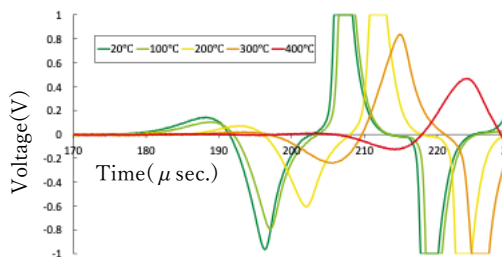


図2：花崗岩中を伝搬した弾性波の波形

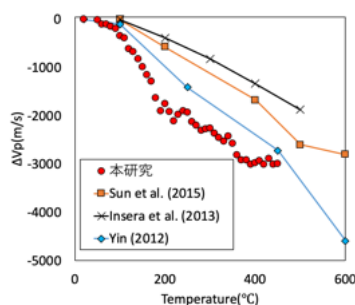


図3： $\Delta V_p$  の温度依存性

Zhang et al. (2018) : Porosity and wave velocity evolution of granite after high- temperature treatment: a review; Environmental Earth Sci. 77:35

# 長石の熱発光減衰速度式と熱伝導モデルの連成モデル

佐藤貴啓\*・平野伸夫・土屋範芳（東北大学・院・環境科学）

## Coupled model of TL decay kinetics and heat conduction model of thermoluminescence of feldspar

Takahiro SATO\*, Nobuo HIRANO, Noriyoshi Tsuchiya

(Graduate School of Environmental Studies, Tohoku University)

### 1. 背景

本研究は長石の熱発光による地熱探査法の開発に向けて、定量的な熱源推定のためのモデルについて検討を行った。

### 2. 熱発光の原理

熱発光は固体結晶中に放射線が入射して電子が励起してトラップされることで蓄積したエネルギーが、熱刺激によって光として放出される現象である。石英や長石などの鉱物の熱発光は複数のトラップによる発光曲線(Grow Curve, 以下 GC)が重複している。

TL 現象は Randall-Wilkins モデル(Randall and Wilkins, 1945)に従うとし、このモデルを実験で得られるパラメータに変換した Kitis らによるモデル(Kitis et al., 1998)を適用して TL 発光曲線を示す式を考案した。

### 3. TL の等温減衰実験と発光曲線の分解

試料は福島県石川産ベグマタイト中の正長石を用いた。これを 90, 125, 150°C の温度で 24, 168, 672, 1512, 3360 時間加熱し、減衰した熱発光を測定して GC を描画した。

Kitis らによるモデルを用いて、減衰前の正長石の GC を 6 つに分解した(図 1)。これを基に、加熱によって減衰させた熱発光の GC も分離した。

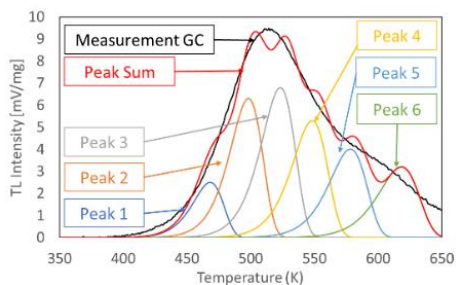


図 1：正長石熱発光のピーク分離

### 4. 熱発光強度のカイネティクスと熱伝導

このモデルでは、熱発光強度の減衰速度式と熱伝導方程式を連成させた。減衰速度式は式(1)のようになる。減衰項と蓄積項で構成され、前者は等温加熱による熱発光の減衰を 2 次また 3 次反応の反応速度式で記述した(図 2)。後者は照射線量あたりの熱発光強度と年間線量から年間蓄積強度を算出して定数とし、時間の関数として記述した。この式を 6 つのピークごとに記述し、それぞれ熱伝導方程式と連成させた。

$$I_{TLi} = \left( (n-1)k(T)\Delta t + \left( \frac{1}{I_{TLi-1}} \right)^{(n-1)} \right)^{-\frac{1}{n-1}} + I_{Gy} \times AD \times \Delta t \quad (1)$$

$$k(T) = A_0 \exp\left(-\frac{E_a}{RT}\right)$$

$I_{TLi}$ : TL 積分強度( $t=t_i$ ),  $k$ : 反応速度定数,  $n$ : 反応次数,  $I_{Gy}$ : 線量あたり強度,  $AD$ : 年間線量,  $E_a$ : 活性化エネルギー,  $A_0$ : 頻度因子

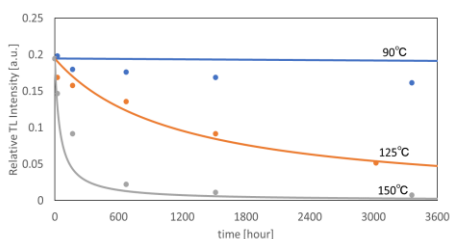


図 2：等温加熱減衰結果と 2 次反応の反応速度式のフィッティングの例(Peak 4)

### 5. 考察

蓄積・減衰温度が最も低い Peak 1 で 21°C となり、通常の地温であれば熱発光のエネルギーが蓄積することから、本研究で検討したモデルに再現性があると考えられる。

Keywords: Thermoluminescence, Grow Curve, Geothermal Exploration, Heat Conduction

E-mail address: [taka.sato@geo.kankyo.tohoku.ac.jp](mailto:taka.sato@geo.kankyo.tohoku.ac.jp)