

## Poster presentation | S2: Water Rock Interaction (Special Session)

📅 Thu. Sep 16, 2021 9:30 AM - 6:30 PM JST | Thu. Sep 16, 2021 12:30 AM - 9:30 AM UTC | 🏠 ePoster Session

**S2: Water Rock Interaction (Special Session)**

[現地ポスターコアタイム]

12:30~14:00

17:00~18:30

9:30 AM - 6:30 PM JST | 12:30 AM - 9:30 AM UTC

[S2P-01] Fluid mediated dissolution and reprecipitation process recorded in the garnet of the HP marble collected from the Sanbagawa eclogite mass.

\*Kenta Yoshida<sup>1</sup>, Hikaru Sawada<sup>1</sup>, Sota Niki<sup>2</sup>, Ryosuke Oyanagi<sup>3</sup> (1. JAMSTEC, 2. Uni. Tokyo, 3. Kokushikan Uni.)

---

9:30 AM - 6:30 PM JST | 12:30 AM - 9:30 AM UTC

[S2P-02] Developments of simultaneous measurements for elastic-wave velocity, electrical resistivity, and porosity of rocks

\*Ikuo Katayama<sup>1</sup>, Kazumasa Tanimoto<sup>1</sup> (1. Hiroshima Univ., Earth and Planetary Systems Sci.)

---

9:30 AM - 6:30 PM JST | 12:30 AM - 9:30 AM UTC

[S2P-03] LILE mobility at each metamorphic stage recorded in the Sanbagawa metamorphic belt: Application of Protolith Reconstruction Model

[Presentation award entry]

\*Satoshi Matsuno<sup>1</sup>, Masaoki Uno<sup>1</sup>, Atsushi Okamoto<sup>1</sup>, Noriyoshi Tsuchiya<sup>1</sup> (1. Tohoku Univ. Env.)

---

9:30 AM - 6:30 PM JST | 12:30 AM - 9:30 AM UTC

[S2P-04] Temperature and pressure dependencies in elastic wave propagation through granite in hydrothermal environments

\*Katsuya Mizuno<sup>1</sup>, Nobuo Hirano<sup>1</sup>, Noriyoshi Tsuchiya<sup>1</sup> (1. Tohoku Uni. Env.)

---

9:30 AM - 6:30 PM JST | 12:30 AM - 9:30 AM UTC

[S2P-05] Coupled model of TL decay kinetics and heat conduction model of thermoluminescence of feldspar

[Presentation award entry]

\*Takahiro Sato<sup>1</sup>, Nobuo Hirano<sup>1</sup>, Noriyoshi Tsuchiya<sup>1</sup> (1. Tohoku Uni. Env.)

## 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 柘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ー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柘榴石の形成史を評価するために、柘榴石の U-Pb in-situ 年代測定を実施した。柘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、流体流入に伴う柘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、上記の柘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) での柘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。

Keywords: pre-Sanbagawa metamorphism, dissolution and reprecipitation, fluid infiltration, micro pore

\*Corresponding author: yoshida\_ken@jamstec.go.jp

# 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。

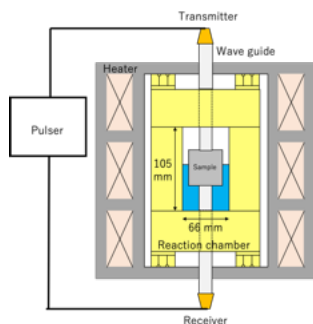


図1：弾性波測定装置

### 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。

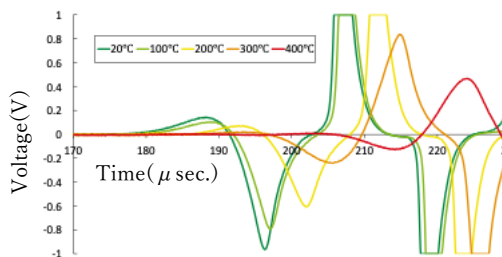


図2：花崗岩中を伝搬した弾性波の波形

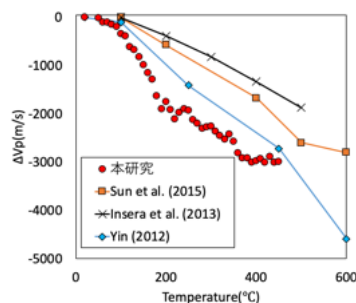


図3： $\Delta V_p$ の温度依存性

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。

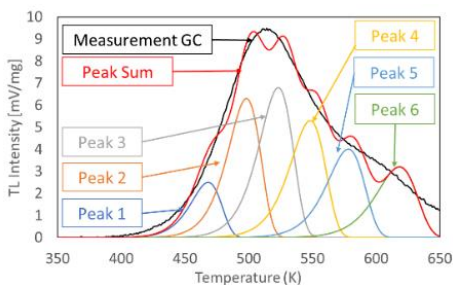


図 1：正長石熱発光のピーク分離

### 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

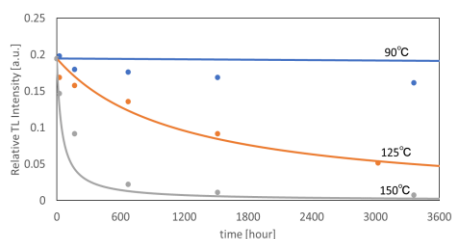


図 2：等温加熱減衰結果と 2 次反応の反応速度式のフィッティングの例 (Peak 4)

### 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)