

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

令和 4 年 6 月 15 日現在

機関番号：32689

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2019～2021

課題番号：19K04037

研究課題名（和文）高圧～超高压変成岩に適用可能な新しいラマン地質圧力計の開発

研究課題名（英文）Development of the new Raman geobarometer for high-pressure and ultrahigh-pressure metamorphic rocks

研究代表者

田口 知樹（Taguchi, Tomoki）

早稲田大学・教育・総合科学学術院・専任講師

研究者番号：60791704

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,300,000円

研究成果の概要（和文）：変成岩をはじめとする天然岩石の圧力解析は、熱力学を応用した手法に依存している。しかし、岩石は複雑な系であるため、熱力学解析を適用できない場合も多々ある。本研究では顕微ラマン分光分析を軸に、高圧型変成岩の形成圧力条件を推定できる「新たなラマン地質圧力計」の開発を目指した。解析試料は主に三波川帯権現地域の石英エクロジヤイトであり、基質の藍晶石に包有された石英を対象に、ラマンスペクトルの網羅的検証を行った。その結果をもとに、残留圧力の数値計算モデルを精査し、藍晶石-石英系における新たなラマン地質圧力計の構築に成功した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

熱力学モデルに基づく地質圧力計は固体地球科学分野で広く使用されてきたが、鉱物組み合わせの制限や、その選択の妥当性検証など難点もあった。ラマン分光学に基づく地質圧力計の大きな特徴は、原理的に熱力学から独立して圧力情報が取得できる点にある。また、藍晶石と石英は高圧型変成岩でよく認められる鉱物であり、本研究は汎用的な地質圧力計を提案したものと見える。本ラマン地質圧力計の実用化は、世界各地の様々な地質体における変成進化プロセスの理解に貢献できると期待される。

研究成果の概要（英文）：Pressure estimation of metamorphic rocks generally depends on the thermodynamic approach. However, this approach may not be applicable in some cases because the natural rock is a complex system. In this study, we challenged to develop a new Raman geobarometer for high-pressure and ultrahigh-pressure metamorphic rocks, using a micro-Raman spectroscopy. The studied samples were kyanite-bearing quartz eclogites from the Gongen area (Sanbagawa belt, southwest Japan). We comprehensively verified the Raman spectra of quartz inclusions in matrix kyanite grains. Based on the results, we examined minutely numerical models of residual pressures, and constructed a new Raman geobarometer for the quartz-inclusions-in-kyanite system.

研究分野：岩石学

キーワード：ラマン分光分析 藍晶石 石英 残留圧力 地質圧力計 変成岩

### 1. 研究開始当初の背景

高压型変成岩の形成温度圧力条件は、プレート収束境界深部の温度構造や変成帯上昇メカニズムなどの究明に不可欠なデータとなる。一般に、地球内部の深度方向に換算できる岩石の圧力解析は、熱力学的手法が広く用いられている。とりわけ鉱物間の化学平衡を用いる地質圧力計は、岩石試料の形成圧力値を明らかにできる有力な手法である。しかし、固溶体の効果や熱力学的平衡の仮定によっては、推定圧力値に大きな誤差を生む危険性がある。天然岩石は複雑な系であり、不確定要素を多く含む熱力学の変数を用いた圧力解析のみで、変成岩の形成条件を決定することは難しい。

近年、岩石の圧力見積もり手法として、ラマン分光分析に基づく地質圧力計（ラマン地質圧力計）が注目を集めている（e.g. Moulas et al., 2020 Lithos）。変成作用時に成長した高剛性のホスト鉱物とそれに取り込まれた包有鉱物の間には、地表に至るまでの体積変化の違いによって「残留圧力」が発生する（図1）。ザクロ石-石英系の鉱物組み合わせを用いたラマン地質圧力計は、特に有用な手法として提案されており、多くの研究成果が報告されている。しかし、ザクロ石は固溶体組成により物性値が変化する特徴があり、端成分を仮定した計算では理論的誤差が生じることも指摘されている。

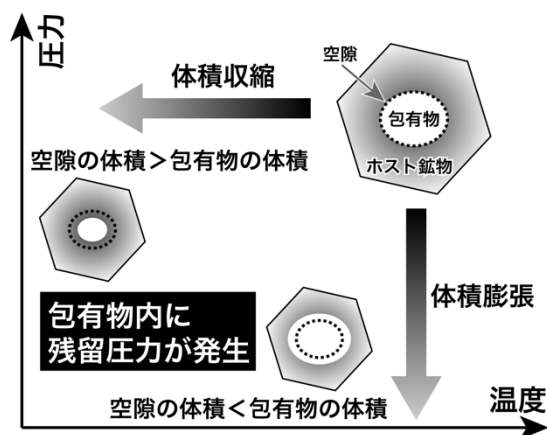


図1. 残留圧力の発生機構の概念図

### 2. 研究の目的

本研究では汎用的なラマン地質圧力計の構築を目指すため、藍晶石内に存在するシリカ包有物（石英）の残留圧力に焦点を当てる。高压型変成岩中の藍晶石に認められる石英包有物の残留圧力を検出し、その形成由来深度を簡便に決定できる新しいラマン地質圧力計の開発を目指す。

### 3. 研究の方法

汎用的なラマン地質圧力計の構築にあたって、高压型変成岩で普遍的に認められる藍晶石とシリカ鉱物（石英）に着目した。これら鉱物を使用する利点は、広い圧力温度範囲で安定的に存在し、かつラマン地質圧力計の開発で難点となる固溶体の影響を無視できることにある。また、ホスト鉱物と包有鉱物の熱膨張係数と体積弾性率のパラメータが決まれば、基本方程式(数値計算モデル)を用いて包有物内の残留圧力が求まる。本研究課題では、解析試料として三波川帯権現地域の藍晶石を含む石英エクロジャイトを用いて、石英包有物の網羅的なラマン分析と数値計算モデルの改良を実施した。

### 4. 研究成果

#### (1) 藍晶石-石英系のラマン地質圧力計の構築

石英エクロジャイトを対象に、基質藍晶石に包有された石英 200 粒子以上のラマン分光分析を

実施した。各粒子について、取得した全ラマンスペクトルのピーク解析を行った結果、残留圧力値のばらつき (0.12–0.76 GPa) を確認した。残留圧力値のばらつきの原因を特定するため、石英包有物の粒径を測定したが、残留圧力との間に有意な相関は認められなかった。そこで藍晶石の微細組織観察を行った結果、クラックヒーリングにより形成されたと考えられる低残留圧力の石英を確認した。これは残留圧力のばらつきを生む原因の一つと考えられる。これら成果をもとに、藍晶石-石英系における残留圧力の数値計算モデルを精査し、新たなラマン地質圧力計を提案した (Tomioka et al., 2022 *The Canadian Mineralogist*)。本ラマン地質圧力計をプログレード変成作用下に取り込まれた石英包有物に適用した結果、熱力学的解析によって推定された石英エクロジイトのピーク変成条件 (Miyamoto et al., 2007 *Journal of Mineralogical and Petrological Sciences*) とおおよそ一致することも確認された (図2)。今後、本研究で実用化された新たなラマン地質圧力計は、世界各地の様々な地質体における変成進化プロセスの理解に貢献できると期待される。

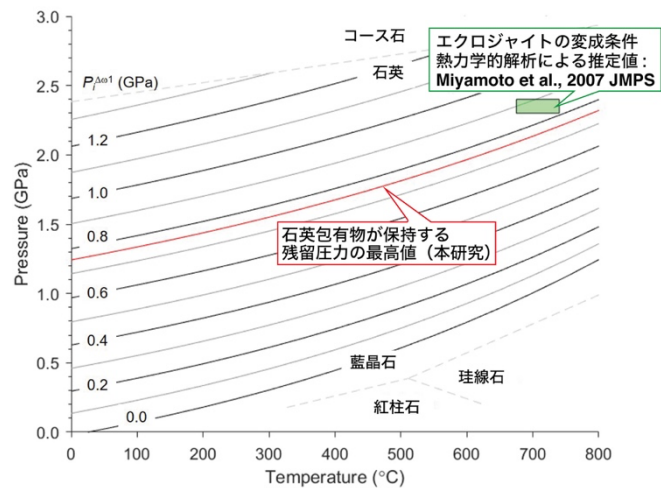


図2. 藍晶石-石英系における残留圧力値と変成圧力温度条件の関係

## (2) 関連する研究成果

世界各地で採取された超高压変成岩に関して、シリカ鉱物 (石英、コース石) に焦点を当て、ラマン分光光学と電子顕微鏡鉱物学に基づく研究を進めている。イタリア産の超高压変成岩については、シリカ鉱物内の残留圧力分布とナノレベルの界面観察を実施し、超高压鉱物の保持機構やその地質学的意義についてまとめた (Taguchi et al., 2021 *Earth and Planetary Science Letters*)。これら成果は、藍晶石-コース石系のラマン地質圧力計を構築する上で、今後重要なデータとなり得ることが期待される。

## 5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計6件（うち査読付論文 6件/うち国際共著 0件/うちオープンアクセス 0件）

1. 著者名 Enami Masaki, Taguchi Tomoki, Kouketsu Yui, Michibayashi Katsuyoshi, Nishiyama Tadao	4. 巻 -
2. 論文標題 Formation process of Al-rich calcium amphibole in quartz-bearing eclogites from the Sulu belt, China	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 American Mineralogist	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.2138/am-2022-7996	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -
1. 著者名 Tomioka Yuki, Kouketsu Yui, Taguchi Tomoki	4. 巻 60
2. 論文標題 Raman Geobarometry of Quartz Inclusions in Kyanite: Application to Quartz Eclogite from the Gongen Area of the Sanbagawa Belt, Southwest Japan	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 The Canadian Mineralogist	6. 最初と最後の頁 121 ~ 132
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.3749/canmin.2000097	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -
1. 著者名 Kouketsu Yui, Sadamoto Kazushi, Umeda Hayato, Kawahara Hirokazu, Nagaya Takayoshi, Taguchi Tomoki, Mori Hiroshi, Wallis Simon, Enami Masaki	4. 巻 39
2. 論文標題 Thermal structure in subducted units from continental Moho depths in a palaeo subduction zone, the Asemigawa region of the Sanbagawa metamorphic belt, SW Japan	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Journal of Metamorphic Geology	6. 最初と最後の頁 727 ~ 749
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1111/jmg.12584	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -
1. 著者名 Taguchi Tomoki, Kouketsu Yui, Igami Yohei, Kobayashi Tomoyuki, Miyake Akira	4. 巻 558
2. 論文標題 Hidden intact coesite in deeply subducted rocks	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Earth and Planetary Science Letters	6. 最初と最後の頁 116763
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1016/j.epsl.2021.116763	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Yoshida Takumi, Taguchi Tomoki, Ueda Hayato, Horie Kenji, Satish Kumar M.	4. 巻 39
2. 論文標題 Early Carboniferous HP metamorphism in the Hida Gaien Belt, Japan: Implications for the Palaeozoic tectonic history of proto Japan	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Journal of Metamorphic Geology	6. 最初と最後の頁 77~100
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1111/jmg.12564	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Taguchi Tomoki, Endo Shunsuke, Igami Yohei, Miyake Akira	4. 巻 28
2. 論文標題 A new occurrence of retrogressed eclogite from the Sanbagawa belt of southwest Japan and its significance	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Island Arc	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1111/iar.12317	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

〔学会発表〕 計10件 (うち招待講演 0件 / うち国際学会 2件)

1. 発表者名 纈織佑衣, 富岡優貴, 田口知樹
2. 発表標題 ラマン分光法で探る石英包有物の歪
3. 学会等名 日本地球惑星科学連合2021年大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 田口知樹, 纈織佑衣, 伊神洋平, 小林記之, 三宅 亮
2. 発表標題 Hidden intact coesite in deeply subducted rocks and its geological implications
3. 学会等名 日本地球惑星科学連合2021年大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 富岡優貴, 額織佑衣, 田口知樹
2. 発表標題 石英-藍晶石系を用いたラマン地質圧力計: 四国三波川帯・石英エクロジヤイトの例
3. 学会等名 日本鉱物科学会2020年オンライン年会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Yuki Tomioka, Yui Kouketsu, Tomoki Taguchi
2. 発表標題 Raman spectroscopy of quartz eclogite in the Sanbagawa metamorphic belt: Potential of Raman geobarometry using kyanite-quartz system
3. 学会等名 JpGU - AGU Joint Meeting 2020 (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Yui Kouketsu, Kazushi Sadamoto, Hayato Umeda, Hirokazu Kawahara, Takayoshi Nagaya, Tomoki Taguchi, Hiroshi Mori, Simon Richard Wallis, Masaki Enami
2. 発表標題 Thermal structure near the continental Moho of subduction zone: Natural example of the Asemigawa region of the Sanbagawa metamorphic belt, SW Japan
3. 学会等名 JpGU - AGU Joint Meeting 2020 (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 田口知樹, 額織佑衣, 伊神洋平, 三宅亮
2. 発表標題 ザクロ石中の相転移を伴わないコース石の発見とその意義: イタリア・西アルプスLago di Cignana Unitの例
3. 学会等名 日本地質学会第126年学術大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 田口知樹, 遠藤俊祐, 伊神洋平, 三宅亮
2. 発表標題 Petrological implications of a new occurrence of retrogressed eclogite from the Sanbagawa belt of southwest Japan
3. 学会等名 日本地球惑星科学連合2019年大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Satish-Kumar, M., Yoshida, T., Taguchi, T., Ueda, H., Horie, K.
2. 発表標題 Early Carboniferous HP metamorphism in the Hida Gaien Belt, Japan: Implications for the Paleozoic tectonic history of proto-Japan
3. 学会等名 日本地質学会第126年学術大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 纈纈佑衣, 貞本和志, 梅田隼人, 河原弘和, 永治方敬, 田口知樹, 森宏, ウォリス サイモン, 榎並正樹
2. 発表標題 四国中央部三波川帯汗見川地域における沈み込み帯モホ面境界とその近傍における温度構造及び変形構造
3. 学会等名 日本地質学会第126年学術大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 榎並正樹, 纈纈佑衣, 道林克禎, 田口知樹
2. 発表標題 SiO <sub>2</sub> 相を含む蘇魯超高压エクロジャイト中に産する定永閃石
3. 学会等名 日本鉱物科学会2019年年会
4. 発表年 2019年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究 分担 者	纈纈 佑衣  (Kouketsu Yui)  (20726385)	名古屋大学・環境学研究科・講師    (13901)	

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------