

令和 6 年 6 月 13 日現在

機関番号：15301

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2020～2023

課題番号：20K04107

研究課題名（和文）海洋地殻深部における変質作用の多様性

研究課題名（英文）Variation of hydrothermal alteration in deep levels of the oceanic crust

研究代表者

野坂 俊夫（Nozaka, Toshio）

岡山大学・環境生命自然科学学域・准教授

研究者番号：80252948

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）：海洋地殻深部における典型的な変質鉱物である、蛇紋石、緑簾石、ブドウ石、滑石、およびそれらと共存する鉱物に焦点を絞り、産状と化学組成を分析し、組成・共生関係の解析を行った。その結果次のような有意義な発見があった。かんらん石の蛇紋石化作用と斜長石の緑簾石化の不適合性と、それらが酸化還元状態の指標として有効であること、海洋底掘削試料のカッティングスの分析が平均的変質度の指標として有効であること、蛇紋石化作用に伴うFeモンチセリ石の生成、および変成蛇紋岩中のNaに富む滑石の生成などである。これらはいずれも海洋下部地殻における変質作用の多様性の要因を解明するための有効な指標となる。

研究成果の学術的意義や社会的意義

地球における岩石圏と水圏の間の最大の境界層である海洋リソスフェアの変質作用は、地球システム全体における物質とエネルギーの循環に大きな役割を果たし、人類を取り巻く環境と地球全体の過去・現在・未来の姿を正しく理解するための鍵となる。本研究では蛇紋岩中からモンチセリ石とNaに富む滑石を世界で初めて発見した。これらの鉱物のほか、蛇紋石、緑簾石、ブドウ石など、海洋下部地殻と上部マントル起源の岩石に産する変質鉱物の生成条件を明らかにした。

研究成果の概要（英文）：This study focused on the analyses of mode of occurrence, chemical compositions and the composition-paragenesis relationships between typical alteration minerals including serpentine, epidote, prehnite, talc, and other coexisting minerals in the oceanic lower crust, and mainly obtained some significant findings as follows: Incompatibility between serpentinization of olivine and epidote formation after plagioclase, indicating redox conditions of hydrothermal alteration; usefulness of cuttings formed by onboard sample processing during ocean drilling for revealing the average modal compositions of alteration minerals; formation of Fe-monticellite during serpentinization; and formation of Na-rich talc in meta-serpentinites. They are promising indicators for the cause of variation of hydrothermal alteration in the oceanic lower crust and upper mantle.

研究分野：岩石学

キーワード：海洋リソスフェア 下部地殻 上部マントル 斑れい岩 かんらん岩 蛇紋岩 変質作用

## 様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

### 1. 研究開始当初の背景

海洋地殻は地球における岩石圏と水圏の間の最大の境界層である。この境界層での岩石と水との反応(岩石の変質作用)は、気圏・生物圏をも巻き込んだ地球システム全体における物質とエネルギーの循環に大きな役割を果たす。したがって変質作用の実態を明らかにすることは、人類を取り巻く環境と地球全体の過去・現在・未来の姿を正しく理解するための鍵となる。本研究代表者はこれまでに、情報の乏しい地殻深部の変質作用についての理解を深めるために、様々な地域から採取された海洋下部地殻構成岩の岩石学的研究を実施し、変質鉱物の種類や分布、生成温度などを明らかにし、それらの多様性を示してきた。しかしながらそのような多様性をもたらした要因の解明には至っていなかった。その主な理由として、単に情報が不足しているということに加えて、変質作用の不均質性と多段階性が地域間の比較の妨げとなってきたことが挙げられる。変質作用の不均質性と多段階性の問題については、岩石組織を丹念に観察することで克服できることが本研究代表者のこれまでの研究で示されてきた。そこで本研究では、地殻深部の情報不足を補うために研究事例を増やし、岩石組織と鉱物の組成 - 共生関係の詳細な解析に取り組むことにした。

### 2. 研究の目的

本研究の主たる目的は、海洋地殻深部における変質作用の多様性の主要因を明らかにすることにあつた。変質作用の多様性は一般にミクروسケールの変質鉱物の種類・共生関係・化学組成などのバリエーションとして観測される。それらはより広範囲にわたる熱水性流体の浸透性や岩石の変形様式の影響を受け、さらに大きなスケールの地質作用、地殻変動、地温構造、あるいはテクトニクスの影響を受けているものと考えられる。そこで本研究ではテクトニック・セッティングの異なる様々な地域から採取された海洋下部地殻とその直下の上部マントル起源の岩石を研究対象として、岩石組織と変質鉱物の組成 - 共生関係の相違点と共通点を明らかにし、変質作用を支配する物理化学的および地質学的要因の解明を目指した。

### 3. 研究の方法

国際深海掘削プロジェクトや各地に露出するオフィオライトの野外調査を通して採取された下部地殻斑れい岩類と最上部マントルかんらん岩の試料について、光学顕微鏡、レーザーラマン分光分析装置、および電子線マイクロアナライザー(EPMA)を用いて鉱物を同定し、各鉱物の産状と化学組成を観測した。また必要に応じて蛍光X線分光分析装置を用いて全岩化学組成を分析した。さらにEPMAを用いて鉱物の元素濃度マッピングを行い、様々なスケールでの変質鉱物の空間分布と組成不均質性を把握した。観察された変質鉱物の組み合わせと産状に基づいて変質反応を定式化し、鉱物の化学組成の分析値と既存の熱力学的データベースに基づいて変成反応の物理化学的条件を推定した。このようにして得られた分析結果を岩相間および地域間で比較し、共通点と相違点を検討した。

### 4. 研究成果

#### (1) 海洋下部地殻斑れい岩における緑簾石生成に対する制約条件の解明

本研究代表者はこれまでの海洋底掘削試料の分析経験から、苦鉄質岩の代表的な変質鉱物の一つである緑簾石の偏在に気づいていたが、その原因については未解明であった。一般に海洋地殻上部を構成する玄武岩は緑色片岩相の変質作用を受けて緑簾石、緑泥石、アクチノ閃石、曹長石などを生じていることが多い。海洋下部地殻の斑れい岩も程度の差はあるものの緑色片岩相の変質作用を受けて緑泥石やアクチノ閃石(またはトレモラ閃石)あるいは蛇紋石やブドウ石を生じている。しかし緑簾石は、産出頻度が低く、斑れい岩類に貫入した珪長質岩脈や断層破砕帯中に限定的に産する場合が多い。まれに斑れい岩の初生鉱物の斜長石を置換して緑簾石が産することもあるが、その場合には試料中にかんらん石が欠如しているか、あるいは緑簾石の近傍のかんらん石が完全に分解している。そこでかんらん石の存在と緑簾石の形成に関連があると予想されたが、地域ごとに岩相や熱水の浸透性の差があるため、同一地域の試料を用いて鉱物量比を比較する必要があった。その好機はオマーンオフィオライト掘削プロジェクトによって得られた。本研究ではこの掘削プロジェクトで採取された連続コア試料の観察と分析を行った。

その結果、緑色片岩相の温度条件でかんらん石の残留結晶が存在する場合には、ほとんど緑簾石が生じていないことを明確に示すことができた。かんらん石は緑色片岩相の条件で熱水と反応すると蛇紋石を生じるため、この蛇紋石化作用が緑簾石の生成に影響を及ぼしている可能性が高いと考えられる。そこで例外的にごくまれに出現する、一部蛇紋石化したかんらん石と一部緑簾石化した斜長石の両方を含む試料について、光学顕微鏡とラマン分光装置によって共存鉱物を同定し、EPMAを用いて鉱物の化学組成分析と元素濃度マッピングを行い、その結果について熱力学的モデル計算を行った。その結果、かんらん石の蛇紋石化に比べて斜長石の緑簾石化はより酸化的条件で起き、両反応が同時に同一組成の流体によって起きる可能性はきわめて低いことが明らかになった。つまり同一試料内に産する場合でも、蛇紋石と緑簾石は生成のタイミン

グが異なっており、両者は化学平衡状態にないということになる。一方、蛇紋石化作用と同程度の還元条件では斜長石からブドウ石が生じることがモデル計算によって示されたが、これは蛇紋石化かんらん石の近傍に頻繁にブドウ石が産出するという観察事実と調和的である。本研究によって、かんらん石の蛇紋石化作用によって生じる還元性流体が緑簾石の生成を抑制しているという結論が得られた。

最上部マントルを構成するかんらん岩の蛇紋岩化作用によって生じる強還元性流体は地球環境と生態系に重大な影響を及ぼすという点で多くの注目を集めてきた。一方、海洋下部地殻の斑れい岩中には多かれ少なかれかんらん石が存在するが、広範囲にわたって緑簾石が欠如しているという事実は、かんらん石の蛇紋石化の影響が上部マントルに止まらず下部地殻にも及んでいることを示唆している。その一方で、下部地殻の破碎帯や貫入岩脈近傍に緑簾石が出現することは、酸化的熱水あるいは海水の局所的な浸透を示唆するものであり、テクトニック・セッティングによる浸透率の多様性を裏付ける証拠になるだろう。このように、蛇紋石化作用はこれまでに考えられてきた以上に地殻の酸化還元状態に影響を及ぼすことを解明したことは重要な成果であるため、国際学術誌 (Q1 ジャーナル) 上で公表した (Nozaka and Tateishi, 2023)。

#### (2) 海洋掘削試料のカットングスを利用した鉱物組成分析法の開発

海洋地殻深部における変質作用は、岩石中の割れ目、熱水脈、断層破碎帯、あるいは貫入岩脈の近傍などで特に顕著に進行し、また岩相 (初生鉱物の種類と量比、あるいは岩石の粒度や変形程度) によって進行の程度が変動する。その結果、変質作用の程度と変質鉱物の分布は不均一になる。下部地殻岩中の変質鉱物は初生鉱物に比べて少量かつ細粒であることが多く、試料の肉眼観察では変質作用の程度や変質鉱物の種類を正確に捉えることは難しい。そこで岩石試料の特定箇所の薄片を作製し、顕微鏡で観察することが必要になる。しかしながら、作製可能な薄片の数は限られており、また薄片作製箇所の選定は少数の研究者に一任されるため、サンプリングに偏りが生じることになる。その結果、顕微鏡下での観察事実が岩相や岩体を代表するものであるかどうかという疑問を払拭することは難しい。このような問題を克服するために、太平洋 Hess Deep Rift において海洋掘削船によって回収されたコア試料について、船上でコアを半裁する際に生じた岩砕 (カットングス) を回収し、これを粉末 X 線回折法によって分析することによって鉱物量比 (モード組成) を定量化する方法を開発した。この方法では一定のインターバルにおけるコア試料の平均的な鉱物組成を求めることができる。これと薄片の顕微鏡観察を併用することによって、変質作用の程度や変質鉱物の分布の変化をより詳細かつ正確に把握することが可能になった。この新しい分析手法は地域間の変質作用の共通点と相違点を明らかにするのに大きく貢献するものと期待されるため、その詳細を国際学術誌上で公表した (Wintsch et al., 2022)。

#### (3) 蛇紋岩化かんらん岩からの Fe モンチセリ石の発見

海洋地殻深部の変質作用についての理解を深めるためには、下部地殻の斑れい岩類だけでなく、その直下に存在する上部マントルかんらん岩の変質作用との相違点を明らかにすることも重要である。上述したようにかんらん岩における蛇紋石化作用は広く注目されているが、その進行過程は必ずしも一定ではない。変質作用の多様性を理解するためには様々な地域において研究成果を蓄積していく必要がある。現世の海洋底深部に存在するかんらん岩や蛇紋岩を観察し、採取することは容易ではないため、かつての海洋リソスフェアの断片が陸上に露出したオフィオライトの研究も進めていく必要がある。

本研究では、西南日本に分布する“大江山オフィオライト”に属する蛇紋岩化かんらん岩中に Fe に富むモンチセリ石を発見した。モンチセリ石はこれまでに報告例が比較的少ない造岩鉱物であり、アルカリ火成岩、キンパーライト、炭酸塩岩、隕石など、シリカに乏しい岩石に産することが知られている。しかしこれまでに蛇紋岩化かんらん岩からの産出報告はなく、今回が世界で初めての発見となった。この Fe モンチセリ石は初生かんらん石を置換し、蛇紋石族鉱物のひとつであるアンチゴライトと透輝石と共存している。また多量のアウル鉱 (Fe-Ni 合金) の微小結晶を包有する。産状と化学組成、および熱力学的計算によって、この Fe モンチセリ石は蛇紋石化作用と同時に還元環境下 300-350 °C の温度で生成したことが明らかにされ、その生成にはトレモラ閃石の分解に伴う Ca と Si の移動が寄与したものと解釈された。

蛇紋岩中のモンチセリ石の産出は、世界初の発見であるということだけでなく、海洋地殻深部と最上部マントルにおける蛇紋石化作用の物理化学的条件に対する制約条件になり得るという点で重要であるため、この成果を国際学術誌 (Q1 ジャーナル) 上で公表した (Nozaka, 2020)。

#### (4) 変成蛇紋岩からの Na に富む滑石の発見

西南日本に分布する蛇紋岩化かんらん岩はしばしば花崗岩質マグマの貫入によって熱変成を受けており、その結果広範囲に滑石が生じている。この昇温変成作用で生じた滑石は、熱源である花崗岩に近づくに従って脱水分解し、それに代わって斜方輝石が生じる。このようにして生じた斜方輝石は、変成作用後に低温で水溶性流体と反応 (後退変成) し、再び滑石が生じる。“大江山オフィオライト”に属する変成蛇紋岩体には、このような昇温変成作用と後退変成作用によって生じた 2 種類の滑石が産出する。本研究で変成蛇紋岩中の滑石の化学組成を分析したところ、2 種類の滑石いずれにも、通常の滑石よりも Na に富むものが存在していることが明らかになった。

滑石は海洋地殻深部の岩石中の変質鉱物として比較的産出頻度の高い鉱物である。その多く

は、かんらん石と斜長石の間あるいはかんらん岩と斑れい岩の間に産出し、かんらん石周辺のシリカ交代作用の証拠となっている。また広域変成帯中の蛇紋岩体は、その周辺にはしばしば Na に富む輝石や角閃石が産出するため、古くから交代作用に関する議論の題材になってきた。本研究で明らかになった蛇紋岩中の Na に富む滑石の産出は世界で初めての発見であるが、それだけでなく、滑石の形成に関与するシリカ交代作用に伴って Na が移動し得るという可能性を示した点で、今後の海洋リソスフェアの変質作用に伴う物質移動を理解するうえで重要な知見となる。そこでこの成果を国際学術誌上で公表した (Nozaka and Miyamoto, 2021)。

(5)上記のほかに特筆すべき成果として、大西洋中央海嶺と西南インド洋海嶺に産する下部地殻斑れい岩中の初生かんらん石の組成改変と冷却に伴うラメラ状組織の形成過程の研究(西村・野坂, 2022)と、2023年4-6月に実施されたIODP第399次航海で大西洋中央海嶺付近から採取された斑れい岩類と蛇紋岩化かんらん岩の観察(McCaig et al., 2024など)が挙げられる。これらは低速拡大海嶺における下部地殻の変質作用を理解するうえで重要な事例である。論文の公表までに分析データの追加が必要ではあるが、今後の研究の発展につながる重要な成果である。

#### <引用文献>

- Nozaka, T. (2020) Fe-monticellite in serpentinites from the Happo ultramafic complex. *Lithos*, 374-375, DOI:10.1016/j.lithos.2020.105686.
- Nozaka, T. and Miyamoto, D. (2021) Compositional variation of talc in metamorphosed serpentinites from Southwest Japan. *Journal of Mineralogical and Petrological Sciences*, 116, 314-319.
- Wintsch, R.P., Meyer, R., Bish, D.L., Deasy, R.T., Nozaka, T., and Johnson, C. (2022) A channel sampling strategy for measurement of mineral modal and chemical composition of drill cores: Application to lower oceanic crustal rocks from IODP Expedition 345 to the Hess Deep rift. *Scientific Drilling*, 31, 71-84.
- Nozaka, T. and Tateishi, Y. (2023) Incompatibility between serpentinitization and epidote formation in the lower oceanic crust: evidence from the Oman Drilling Project. *Journal of Metamorphic Geology*, 41, 665-684.
- 西村優之介・野坂俊夫(2022)海洋コアコンプレックス斑れい岩に産するカンラン石の離溶組織. 日本鉱物科学会年会講演要旨.
- McCaig, A., Lang, S.Q., Blum, P., and Expedition 399 Scientists (2024) IODP Preliminary Report: Building Blocks of Life, Atlantis Massif, p1-56, DOI: 10.14379/iodp.pr.399.2024.

## 5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計5件（うち査読付論文 4件/うち国際共著 2件/うちオープンアクセス 2件）

|  |                               |
|--|-------------------------------|
| 1. 著者名<br>Wintsch, R.P., Meyer, R., Bish, D.L., Deasy, R.T., Nozaka, T., and Johnson, C.   | 4. 巻<br>31                    |
| 2. 論文標題<br>A channel sampling strategy for measurement of mineral modal and chemical composition of drill cores: Application to lower oceanic crustal rocks from IODP Expedition 345 to the Hess Deep rift | 5. 発行年<br>2022年               |
| 3. 雑誌名<br>Scientific Drilling  | 6. 最初と最後の頁<br>71-84           |
| 掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子）<br>10.5194/sd-31-71-2022   | 査読の有無<br>有                    |
| オープンアクセス<br>オープンアクセスとしている（また、その予定である）  | 国際共著<br>該当する                  |
| 1. 著者名<br>NOZAKA Toshio, MIYAMOTO Daisuke  | 4. 巻<br>116                   |
| 2. 論文標題<br>Compositional variation of talc in metamorphosed serpentinites from Southwest Japan   | 5. 発行年<br>2021年               |
| 3. 雑誌名<br>Journal of Mineralogical and Petrological Sciences   | 6. 最初と最後の頁<br>314 ~ 319       |
| 掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子）<br>10.2465/jmps.211112   | 査読の有無<br>有                    |
| オープンアクセス<br>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<br>-                     |
| 1. 著者名<br>Nozaka Toshio  | 4. 巻<br>374-375               |
| 2. 論文標題<br>Fe-monticellite in serpentinites from the Happo ultramafic complex  | 5. 発行年<br>2020年               |
| 3. 雑誌名<br>Lithos   | 6. 最初と最後の頁<br>105686 ~ 105686 |
| 掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子）<br>10.1016/j.lithos.2020.105686  | 査読の有無<br>有                    |
| オープンアクセス<br>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<br>-                     |
| 1. 著者名<br>Nozaka Toshio, Tateishi Yamato   | 4. 巻<br>41                    |
| 2. 論文標題<br>Incompatibility between serpentinization and epidote formation in the lower oceanic crust: Evidence from the Oman Drilling Project  | 5. 発行年<br>2023年               |
| 3. 雑誌名<br>Journal of Metamorphic Geology   | 6. 最初と最後の頁<br>665 ~ 684       |
| 掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子）<br>10.1111/jmg.12713   | 査読の有無<br>有                    |
| オープンアクセス<br>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<br>-                     |

|  |                    |
|--|--------------------|
| 1. 著者名<br>McCaig A., Lang S.Q., Blum P., Expedition 399 Scientists                     | 4. 巻<br>399        |
| 2. 論文標題<br>Expedition 399 Preliminary Report: Building Blocks of Life, Atlantis Massif | 5. 発行年<br>2024年    |
| 3. 雑誌名<br>IODP Preliminary Report  | 6. 最初と最後の頁<br>1~56 |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子)<br>10.14379/iodp.pr.399.2024                                  | 査読の有無<br>無         |
| オープンアクセス<br>オープンアクセスとしている(また、その予定である)  | 国際共著<br>該当する       |

[学会発表] 計6件(うち招待講演 0件/うち国際学会 3件)

|  |
|--|
| 1. 発表者名<br>McCaig, A., Lang, S., Blum, P. and Expedition 399 Science Party                               |
| 2. 発表標題<br>IODP Expedition 399: A new deep hole opens a window into mantle processes at spreading ridges |
| 3. 学会等名<br>American Geophysical Union Fall Meeting (国際学会)  |
| 4. 発表年<br>2023年  |

|  |
|--|
| 1. 発表者名<br>Abe, N., Dickerson, K., Deans, J., McCaig, A., Lang, S., Blum, P., and the IODP Expedition 399 Scientists |
| 2. 発表標題<br>The relationship between lithology and physical properties at Atlantis Massif, MAR                        |
| 3. 学会等名<br>American Geophysical Union Fall Meeting (国際学会)  |
| 4. 発表年<br>2023年  |

|  |
|--|
| 1. 発表者名<br>Dickerson, K., Abe, N., Deans, J., McCaig, A., Lang, S., Blum, P., and the IODP Expedition 399 Scientists   |
| 2. 発表標題<br>Petrophysical properties of newly recovered, variably altered lower crustal and upper mantle material from the Atlantis Massif during IODP Expedition 399 |
| 3. 学会等名<br>American Geophysical Union Fall Meeting (国際学会)  |
| 4. 発表年<br>2023年  |

|   |
|---|
| 1. 発表者名<br>吉羽洋紀・高澤栄一・野坂俊夫                             |
| 2. 発表標題<br>オマーンオフィオライト北部サラヒ岩体マントルセクションにおける蛇紋岩化作用の初期段階 |
| 3. 学会等名<br>日本鉱物科学会2023年年会                             |
| 4. 発表年<br>2023年                                       |

|  |
|--|
| 1. 発表者名<br>西村優之介・野坂俊夫                    |
| 2. 発表標題<br>海洋コアコンプレックス斑れい岩に産するカンラン石の融溶組織 |
| 3. 学会等名<br>日本鉱物科学会年会                     |
| 4. 発表年<br>2022年                          |

|                                    |
|------------------------------------|
| 1. 発表者名<br>宮本大輔・野坂俊夫               |
| 2. 発表標題<br>西南日本の熱変成蛇紋岩における滑石の組成多様性 |
| 3. 学会等名<br>日本鉱物科学会                 |
| 4. 発表年<br>2021年                    |

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

|   |
|---|
| <p>岡山大学理学部地球科学研究紹介2020<br/> <a href="https://www.okayama-u.ac.jp/user/earth/ja/research/research/Desc.pdf">https://www.okayama-u.ac.jp/user/earth/ja/research/research/Desc.pdf</a></p> |
|---|

## 6. 研究組織

|  |                           |                       |    |
|--|---------------------------|-----------------------|----|
|  | 氏名<br>(ローマ字氏名)<br>(研究者番号) | 所属研究機関・部局・職<br>(機関番号) | 備考 |
|--|---------------------------|-----------------------|----|

## 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                            |           |  |  |
|---------|------------------------------------|-----------|--|--|
| 米国      | Indiana University                 | IODP-JRS0 |  |  |
| ルクセンブルク | Geological Survey of<br>Luxembourg |           |  |  |
| イタリア    | University of Pavia                |           |  |  |