

令和 2 年 5 月 29 日現在

機関番号：15301

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2016～2019

課題番号：16K05611

研究課題名(和文) 南西インド洋アトランティス・バンクにおける下部地殻岩の熱水変質作用

研究課題名(英文) Hydrothermal alteration in lower crustal rocks from Atlantis Bank, Southwest Indian Ridge

研究代表者

野坂 俊夫 (Nozaka, Toshio)

岡山大学・自然科学研究科・准教授

研究者番号：80252948

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,600,000円

研究成果の概要(和文)：南西インド洋海嶺のアトランティス・バンクから掘削採取された下部地殻斑れい岩類中に、黒雲母と黒雲母-緑泥石混合相が広範囲にわたって産出していることを発見した。詳細な顕微鏡観察と化学分析、熱力学的解析を行った結果、斑れい岩中のかんらん石と斜長石が700-800 程度の高温で、分化したマグマから派生したシリカとカリに富む水溶性流体と反応して黒雲母が生成したことが明らかになった。また東太平洋海膨のヘス・ディープ・リフトの斑れい岩と、大江山オフィオライトのかんらん岩における蛇紋石化作用を解析し、アトランティス・バンクの斑れい岩と比較することにより、地域間や岩相間の低温変質作用の差異を明らかにした。

研究成果の学術的意義や社会的意義

海洋下部地殻を構成する斑れい岩は火成作用による分化の程度が小さく、一般にアルカリ元素に乏しい。海洋下部地殻中に黒雲母のようなアルカリに富む鉱物が産出することは、世界で初めての発見である。これは海洋下部地殻が形成後に広範囲にわたって流体による化学的改変を受けている可能性を示唆するものである。また海洋リソフェアの高温ならびに低温変質作用は、地域間あるいは岩相間で差異があることが明らかになった。これらのことはグローバルな物質循環および地球環境の変遷のプロセスを理解する上で重要な新知見である。

研究成果の概要(英文)：Biotite was found in drill cores of lower oceanic crustal gabbros recovered from Atlantis Bank, SW Indian Ridge. This is the first discovery of such an alkali-rich mineral from the lower oceanic crust. Detailed petrological analyses have revealed that the biotite was formed by reactions of primary olivine and plagioclase with Si- and K-rich aqueous fluids derived from differentiated melts. This finding suggests widespread chemical modification of the lower oceanic crust and provides significant implications for the global-scale geochemical cycle. In addition, serpentinization conditions in gabbroic rocks from Hess Deep Rift near the East Pacific Rise and in peridotites from the Oeyama ophiolite, Southwest Japan were analyzed and compared with that of the Atlantis Bank gabbros. From these studies, it has been revealed that the physico-chemical conditions of low-temperature alteration of the oceanic lithosphere are variable between localities and between lithologies.

研究分野：岩石学

キーワード：海洋リソフェア 下部地殻 斑れい岩 変質作用 アトランティス・バンク

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

海洋地殻は地球の水圏と岩石圏の間の最大の境界層であり、そこでの岩石と水の反応過程、すなわち変質作用を明らかにすることは地球全体にわたる地球化学的物質循環を理解するための重要な鍵となる。しかし海洋地殻深部における変質作用の実態は十分にわかっていなかった。

2003年にはじまった統合国際深海掘削計画 (IODP) によって、低速拡大海嶺である大西洋中央海嶺と高速拡大海嶺である東太平洋海嶺近くから下部地殻を構成する斑れい岩類が採取され、変質作用の研究が行われた。その結果、両海嶺ともに角閃岩相から沸石相に至る広い温度条件で、温度低下に伴って累進的に変質鉱物が生成しているという共通点が明らかにされた。その一方、一部の変質鉱物の種類と分布には地域間の相違点も認められた。

2015年末から2016年初頭にかけて実施されたIODP第360次航海では、超低速拡大海嶺である南西インド洋海嶺近傍の隆起岩体であるアトランティス・バンクにおいて、海洋下部地殻斑れい岩類が掘削・採取された。この岩体の変質鉱物を詳細に観察・分析することにより、超低速拡大海嶺付近の下部地殻における変質作用の実態が明らかになることが期待された。

2. 研究の目的

本研究の主たる目的は、超低速拡大海嶺で形成された海洋下部地殻斑れい岩類における熱水変質作用のプロセスを理解することにあった。変質生成物の種類、量比、生成条件、および変形作用との関連性などを岩石学的手法により分析し、得られた結果を拡大速度の異なる海嶺で形成された深成岩類や各地のオフィオライト深成岩類と比較することにより、海洋底における水-岩石相互作用と海洋リソスフェアの進化過程の多様性と普遍性を浮き彫りにするという目標が立てられた。

3. 研究の方法

IODP第360次航海で採取されたアトランティス・バンクの下部地殻斑れい岩類の試料について、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。さらに電子線マイクロアナライザーと蛍光X線分光分析装置の両方を用いて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。

また過去の掘削によって得られたアトランティス・バンクの斑れい岩や、他の海域あるいは西南日本のオフィオライトから採取された斑れい岩類およびかんらん岩類についても同様の分析を行い、地域間および岩相間の共通点と相違点を比較検討した。

4. 研究成果

(1) アトランティス・バンクの下部地殻斑れい岩類中には火成作用によって生成したかんらん石、単斜輝石、斜方輝石、斜長石および鉄酸化鉱物が含まれる。これらの初生鉱物は局所的な熱水変質作用によって分解し、Ca角閃石、Mg-Fe角閃石、Mg-Fe雲母、緑泥石、滑石、蛇紋石、粘土鉱物などの含水鉱物が生成していることが明らかになった。これらの鉱物のほとんどについて、その産状、組み合わせ、および相対的な新旧関係を確認したところ、基本的に他地域の海洋底斑れい岩類で観察されたものと同じであった。しかし、Mg-Fe雲母が多産することはアトランティス・バンクのみで確認された特徴である。海洋底斑れい岩類は一般的に未分化な玄武岩質マグマが固化したものであり、アルカリなどの不適合元素に乏しい。そのような海洋底斑れい岩類中にアルカリに富む雲母が産することは、世界で初めての発見であり、その成因は非常に興味深い。そこでこの雲母と関連鉱物について詳細な分析を行った。

本研究で見つかった雲母は鉱物学的には“黒雲母”に分類されるが、通常の黒雲母のように岩石顕微鏡下で褐色のものもあれば、緑色や無色のものも多く、滑石等の鉱物と誤って同定されてきた可能性がある。今回見つかった雲母の化学組成は普通の黒雲母同様にカリウムに富むが、中にはナトリウムに富むものも確認された。また、カリウムの含有量が普通の雲母より少ないものも多く見つかった。それらの化学組成と光学的性質は黒雲母と緑泥石の中間的なものであり、ラマン分光分析では両者の散乱ピークが認められたため、それらは黒雲母-緑泥石混合相であると考えられる。この混合相もまた、一見すると粘土鉱物や緑泥石と似ているため、誤って同定されてきた可能性がある。

注意深く黒雲母と黒雲母-緑泥石混合相の検出を試みたところ、アトランティス・バンクの斑れい岩類には予想以上に広範囲にわたってそれらが生成していることが明らかになった。それらは初生斜長石と接する初生かんらん石の周囲を取り巻くようにコロナ状に産することが多い。黒雲母と共存する角閃石と変成斜長石の組成を用いて見積もられた生成温度はおおよそ700-800°Cである。電子線マイクロアナライザーと蛍光X線分析装置による元素濃度マッピングは、斑れい岩を貫く珪長質脈岩や塑性変形した斑れい岩中の石英脈の近傍に、黒雲母が生成してい

ることを示している。以上の観測結果から、塑性変形した斑れい岩に浸透した珪長質マグマ由来の水溶性流体による角閃岩相での交代変質作用によって黒雲母が生成したものと解釈された。このような変質作用は、超低速拡大海嶺で形成された下部地殻の特徴かもしれない。これは重要な発見であるため、国際学術誌 (Q1 ジャーナル) 上で公表した (Nozaka et al., 2019)。

(2) アトランティス・バンクにおける変質作用の研究と並行して行った、高速拡大海嶺近傍のヘス・ディープ・リフトから採取された斑れい岩類の分析では、黒雲母は検出されず、初生かんらん石の周囲には緑泥石+角閃石コロナが確認された。このコロナの形成後、300 以下の低温でかんらん石に蛇紋石が生じている。上部マントルかんらん石の蛇紋岩化作用は、磁鉄鉱の生成に伴って発生する水素が化学合成バクテリアのエネルギー源となることから生物学系の研究者も含めて広く注目を集めている。そこで下部地殻斑れい岩中での蛇紋石化作用と磁鉄鉱の生成過程をかんらん石と比較するために分析を行った。

その結果、斑れい岩中のかんらん石から生じる蛇紋石には、かんらん石と違ってブルース石が生成しておらず、より多くの磁鉄鉱が生成していることが明らかになった。さらに生成時期の異なる蛇紋石脈のクロスカット関係によって、少なくとも3ステージの蛇紋石化作用を識別することができた。各ステージの鉱物組み合わせと鉱物化学組成について熱力学的解析を行い、斑れい岩中の蛇紋石化作用はかんらん石中よりも高いシリカ活動度とより酸化的な条件下で進行したこと、この進行に伴ってシリカ活動度はさらに上昇しより酸化的な条件になっていったこと、そして高いシリカ活動度は斑れい岩中に多く含まれる斜長石の変質作用に起因するものであることが推定された。これは重要な知見であるため、国際学術誌 (Q1 ジャーナル) 上で公表した (Nozaka et al., 2017)。

アトランティス・バンクの斑れい岩中のかんらん石には、おそらく蛇紋石化作用と同等の温度条件で、蛇紋石よりもシリカの多い滑石や粘土鉱物が生成している。アトランティス・バンクの斑れい岩はヘス・ディープ・リフトの斑れい岩類に比べて化学的に分化しており、その結果初生かんらん石は鉄に富み、初生斜長石はナトリウムとシリカに富む。この斜長石の組成に起因するシリカ活動度の違いが、両地域における低温変質生成物の差異を生じているものと考えられる。

(3) 海洋下部地殻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、その下方に存在する上部マントルかんらん石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石における蛇紋石化作用は広く注目されているが、その物理化学条件は必ずしも一様ではない。そこでかつて海洋または島弧のリソスフェアを構成していた陸上のオフィオライトのかんらん石について、蛇紋石化作用の研究を行った。

研究対象として、西南日本に露出する“大江山オフィオライト”と呼ばれる複数の蛇紋岩化かんらん石体を選んだ。このオフィオライトは先行研究によって複数の蛇紋岩化作用を経験していることが分かっている。そのうち“高温蛇紋岩化作用”と呼ばれる、およそ400-600 での蛇紋岩化作用によって高温型蛇紋石であるアンチゴライトが形成されている。アンチゴライトは低温で生じる蛇紋石に比べて鉄を多く含み、ほとんど磁鉄鉱を伴わない。上述したように蛇紋石化作用と同時に生じる磁鉄鉱は水素の発生と関係しているため、その生成条件を明らかにすることは重要である。

分析の結果、かんらん石の変質作用によって生じる後退性アンチゴライトは、昇温変成作用で生じるアンチゴライトよりも鉄に富むこと、そして後退性アンチゴライトと共存するかんらん石は初生かんらん石よりも鉄とマンガンに富むことが明らかになった。アンチゴライトとの接触部からのかんらん石中の鉄とマンガンの含有量は拡散プロファイルを描くように変化している。そこでかんらん石の鉄 マグネシウム相互拡散係数に基づいて計算したところ、大江山オフィオライトは数百~数千万年にわたって高温蛇紋岩化作用の温度条件下に置かれていたものと推定された。この成果は、海洋リソスフェアの変質過程の多様性についての理解に貢献する重要な新知見であるため、国際学術誌上で公表した (Nozaka, 2018)。

アトランティス・バンクでは、今後、IODP 第360次航海の掘削孔をさらに掘り進め、上部マントルかんらん石に到達することが計画されている。この計画が成功したあかつきには、南西インド洋海嶺近傍における下部地殻と上部マントルの変質作用の差異が明らかにされるだろう。そのとき、本研究で得られた斑れい岩類とかんらん石からの知見を参照することにより、海洋リソスフェア深部における変質作用の理解がさらに進むものと期待される。

<引用文献>

- Nozaka, T., Wintsch, R.P. and Meyer, R. (2017) Serpentinization of olivine in troctolites and olivine gabbros from the Hess Deep Rift. *Lithos*, 282-283, 201-214.
- Nozaka, T. (2018) Compositional variation of olivine related to high-temperature serpentinization of peridotites: Evidence from the Oeyama ophiolite. *Journal of Mineralogical and Petrological Sciences*, 113, 219-231.
- Nozaka, T., Akitou, T., Abe, N. and Tribuzio, R. (2019) Biotite in olivine gabbros from Atlantis Bank: Evidence for amphibolite-facies metasomatic alteration of the lower oceanic crust. *Lithos*, 348-349, 105176.

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計8件（うち査読付論文 5件/うち国際共著 8件/うちオープンアクセス 2件）

1. 著者名 Nozaka Toshio, Akitou Tetsu, Abe Natsue, Tribuzio Riccardo	4. 巻 348-349
2. 論文標題 Biotite in olivine gabbros from Atlantis Bank: Evidence for amphibolite-facies metasomatic alteration of the lower oceanic crust	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Lithos	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) 10.1016/j.lithos.2019.105176	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 該当する
1. 著者名 Dick H. J. B., MacLeod C. J., Blum P., Nozaka T. et al.	4. 巻 124
2. 論文標題 Dynamic Accretion Beneath a Slow Spreading Ridge Segment: IODP Hole 1473A and the Atlantis Bank Oceanic Core Complex	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Journal of Geophysical Research: Solid Earth	6. 最初と最後の頁 12631 ~ 12659
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1029/2018JB016858	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 該当する
1. 著者名 Nozaka, T.	4. 巻 113
2. 論文標題 Compositional variation of olivine related to high-temperature serpentinization of peridotites: Evidence from the Oeyama ophiolite	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Journal of Mineralogical and Petrological Sciences	6. 最初と最後の頁 219-231
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.2465/jmps.180420	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 該当する
1. 著者名 Nozaka, T., Wintsch, R.P. and Meyer, R.	4. 巻 282-283
2. 論文標題 Serpentinization of olivine in troctolites and olivine gabbros from the Hess Deep Rift	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 Lithos	6. 最初と最後の頁 201-214
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.lithos.2016.12.032	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 該当する

〔学会発表〕 計14件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 10件）

1. 発表者名 秋藤哲・野坂俊夫・阿部なつ江
2. 発表標題 南西インド洋海嶺アトランティス・バンクのかんらん石斑れい岩に産する黒雲母:角閃岩相の交代変質作用の証拠
3. 学会等名 日本鉱物科学会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 野坂俊夫
2. 発表標題 八方超苦鉄質岩体の蛇紋岩中に産する鉄モンチセライト
3. 学会等名 日本鉱物科学会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 秋藤哲・野坂俊夫
2. 発表標題 南西インド洋海嶺Atlantis Bankの斑レイ岩類中のMg-Fe雲母と変質鉱物
3. 学会等名 日本鉱物科学会2017年年会
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 野坂俊夫
2. 発表標題 高温蛇紋岩化作用に伴う鉄に富むかんらん石の生成：西南日本のオフィオライトかんらん岩体の例
3. 学会等名 日本鉱物科学会2016年会
4. 発表年 2016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
--	---------------------------	-----------------------	----