

令和 3 年 6 月 15 日現在

機関番号：82626

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2015～2020

課題番号：15K17790

研究課題名（和文）オフィオライト海洋地殻を用いた熱水変質に伴う元素移動モデルの確立

研究課題名（英文）Elemental behavior in the hydrothermal alteration of ophiolite oceanic crust

研究代表者

山岡 香子 (Yamaoka, Kyoko)

国立研究開発法人産業技術総合研究所・地質調査総合センター・主任研究員

研究者番号：30610399

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,100,000円

研究成果の概要（和文）：白亜紀の海洋地殻であるオマーンオフィオライトの主要・微量元素分析を実施し、海洋底からモホ面に至る海洋地殻断面の総括的な化学組成プロファイルを完成させた。この試料セットについてすでに報告されている二次鉱物組成、ストロンチウム・酸素・ホウ素の同位体組成にもとづいて、熱水変質の反応条件と元素の挙動について解析し、低温から高温までの熱水変質における物質収支を定量的に見積もることができた。

研究成果の学術的意義や社会的意義

熱水変質した海洋地殻の化学組成は、海洋及び固体地球の化学進化を理解するために不可欠であるにも関わらず、掘削の困難さから、実際の海洋地殻から得られる情報は断片的であった。本研究ではオフィオライトをアナログとして、海洋地殻層序全体の化学組成プロファイルを明らかにし、全球的な物質循環に関して重要なリファレンスデータを提供することが出来た。

研究成果の概要（英文）：Major and trace element analyses of the Cretaceous oceanic crust, the Oman ophiolite, were carried out to complete a comprehensive chemical compositional profile of a cross section of the oceanic crust from the ocean floor to the Moho surface. Based on the secondary mineral compositions and isotopic compositions of strontium, oxygen, and boron already reported for this sample set, the reaction conditions and elemental behavior of hydrothermal alteration were analyzed, and the mass balance in hydrothermal alteration from low to high temperatures was quantitatively estimated.

研究分野：地球化学

キーワード：海洋地殻 熱水変質 微量元素 同位体

### 1. 研究開始当初の背景

海底熱水系では、海底の割れ目から浸み込んだ海水が海底付近では低温(<50°C)、地下深部では高温(300–500°C)で周囲の岩石と反応することにより、元素のやりとりが行われる。熱水変質した海洋地殻の化学組成は、海洋及び固体地球の化学進化を理解するために不可欠である。しかし、海洋地殻の掘削で得られる情報は断片的であり、もっぱら上部地殻に限られているため、過去の海洋プレートが陸上に露出したオフィオライトは、海洋地殻層序全体の首尾一貫した情報が得られる現在唯一の研究対象である。

オマーンオフィオライトは、白亜紀に高速拡大海嶺で生成した海洋プレートの一部であり、厚さ約 5 km の海洋地殻層序が完全かつ連続的に陸上に露出した世界最大のオフィオライトである。一般的に熱水が循環するのは上部地殻までだと考えられており、これまで下部地殻の元素移動はあまり重視されてこなかった。しかし、オマーンオフィオライト海洋地殻のストロンチウム同位体やホウ素同位体プロファイルは、下部地殻まで高温の熱水が浸透していることを示した (Kawahata et al., 2001; Yamaoka et al., 2012)。従って、一つの熱水系での元素収支を議論するためには、下部地殻も含めた連続的なデータが必要であると考えられる。

### 2. 研究の目的

本研究では、高速拡大海嶺で生成した過去の海洋地殻であるオマーンオフィオライトを用い、海底からモホ面に至る海洋地殻断面の総括的な化学組成プロファイルを完成させる。未変質玄武岩の新規分析データとの比較により、各元素・同位体の挙動を詳細に明らかにし、海洋地殻の熱水変質における物質収支を定量的に見積もることを目的とする。

### 3. 研究の方法

オマーンオフィオライト北部 Fizeh 地域に露出する海洋地殻の断面に沿って、露頭から連続的に採取された岩石サンプルセットを使用した(図 1)。上位から枕状溶岩、シート状岩脈群、ハンレイ岩からなる約 80 試料で、二次鉱物組成及び酸素同位体比にもとづき、変質温度は深度に沿って上昇することがわかっている。これらのサンプルセットについて主要・微量元素組成分析を実施した。主要元素(Si, Al, Fe, Mg, Ca, Na, K, Ti, P)は、XRF を用いて測定を行う。微量元素(Li, Rb, Cs, Ba, U, Pb, Cu, Zn, Mn, REE など)については、硝酸とフッ化水素酸の混酸を用いて酸分解し、ICP-MS を用いて測定を行った。分解に際し、ジルコン及びバデレイイトは通常の方法では十分に分解せず、正確な Zr, Hf, Y, HREE の定量が出来ないため、シート状岩脈群及びハンレイ岩については高压分解容器を用いて、190°C で 12 時間分解を行った。

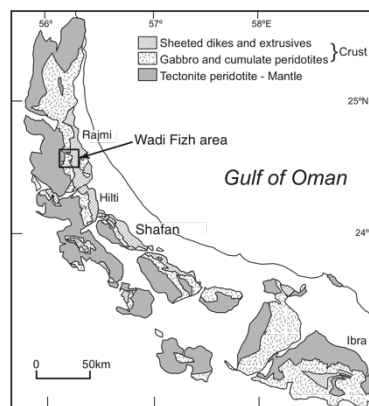


図 1 オマーンオフィオライトの地質図と試料採取地点

### 4. 研究成果

まず、熱水変質で移動しにくい元素に着目し、変質前の岩石組成について検討した。図 2 に、噴出岩(枕状溶岩、シート状岩脈群、ハンレイ岩中ドレイトダイク)の  $FeO^*/MgO$  に対する  $TiO_2$ ,  $P_2O_5$ , Zr, Y の濃度プロット、図 3 に Ti に対する V の濃度を示した。図 4 には、岩相別に希土類元素のコンドライト規格化パターンを示した。いずれのプロットでも、オマーンオフィオライト海洋地殻は N-MORB 的な特徴を示し、かつマグマは非常に枯渇した組成であったことが示唆された。また、 $FeO^*/MgO$  は 1~4 の間で変化し、分化の程度の異なる火山活動があったことが示唆された。

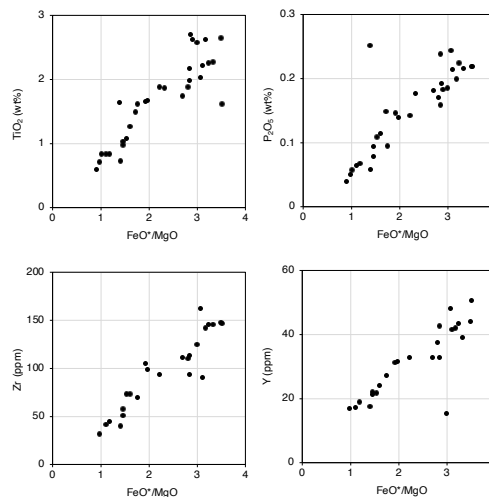


図 2 噴出岩における  $FeO^*/MgO$  プロット

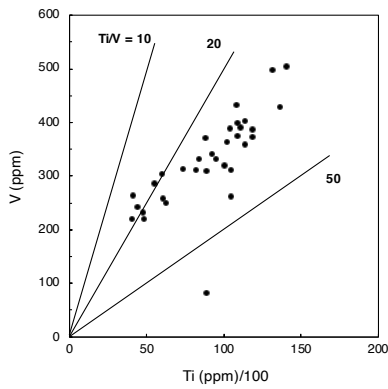


図3 噴出岩におけるTi-V 図

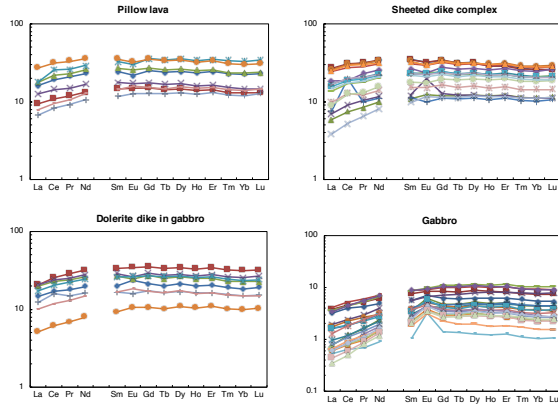


図4 岩相別 REE コンドライト規格化図

次に、熱水変質に伴う元素移動について検討した。図5に、各岩相の元素組成をN-MORBで規格化したパターンを示した。N-MORBの値はSun and McDonough (1989)を使用した。各岩相における元素移動の特徴として、下記のことが明らかとなった。

① 枕状溶岩（海底風化、 $\sim 150^{\circ}\text{C}$ の低温変質）

最上部の海底風化を受けた玄武岩で、Cs, Tl, Rb, Ba, W, U, B, Srが著しく増加する。低温変質を受けた玄武岩では、それら元素の増加は小さくなり、Rbは減少する場合もある。Pbは海底風化よりも低温変質で付加される。Liはほとんどの試料で減少する。

② シート状岩脈群（ $250\text{-}350^{\circ}\text{C}$ の高温変質のうち、 $<200^{\circ}\text{C}$ での変質）

Bは全ての試料で増加する一方、Cs, Ba, Uの増加はばらつきが大きい。Rb, Pb, Liはほとんどの試料で減少する。結果的に、Ba/Rb比、U/Pb比は、N-MORBに比べて大きい値を示す。

③ ハンレイ岩中ドレイトダイク（ $300\text{-}450^{\circ}\text{C}$ の高温変質）

Bは全ての試料で増加する。Rb, Pb, Liはほとんどの試料で減少する。特にLiの減少が顕著となる。

④ ハンレイ岩（上部では $300\text{-}450^{\circ}\text{C}$ 、下部では $>450^{\circ}\text{C}$ の高温変質）

インコンパティブル元素の減少、斜長石の集積によるSr, Eu濃度の増加など、結晶分化作用を反映したパターンを示すが、Bには明らかな増加が見られる。Pbは下部ハンレイ岩で増加する傾向がある。Liの減少は噴出岩類に比べて顕著ではなくなるが、基本的には減少傾向を示す。

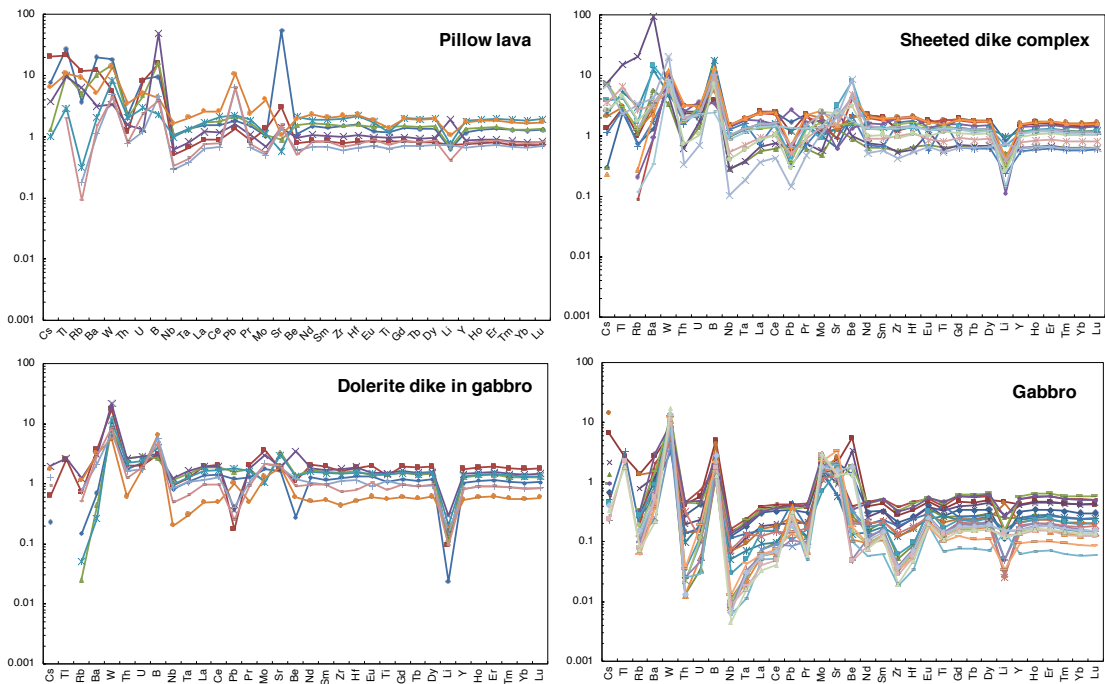


図5 岩相別 N-MORB 規格化図

濃度の深度プロファイルにおいては、Zn, Mn はシート状岩脈群上部～枕状溶岩下部の transition zone で濃集している。Cu も transition zone でやや高い試料もあるがばらつきが大きく、さらにハンレイ岩の中にも高い値を示す試料があり、Zn, Mn に比べると明瞭な濃集傾向を示さない。

熱水変質で移動しにくく、かつインコンパティビリティの近い元素との比にもとづき、いくつかの元素について未変質岩石の濃度を見積り、熱水変質で付加あるいは溶出した元素の収支を計算することが出来る。具体的には、B, Li, Pb について、それぞれ Nb, Y, Ce の濃度から推定を行った。B 濃度についてはすでに、MORB の B/Nb 比 0.3 (Ryan et al., 1996) にもとづき、未変質の玄武岩は  $0.72 \pm 0.47 \mu\text{g/g}$ 、未変質のハンレイ岩は  $0.06 \pm 0.09 \mu\text{g/g}$  と推定されている (Yamaoka et al., 2012)。本研究では、Li 濃度について、MORB の Li/Y 比 0.15 (Sun and McDonough, 1989) にもとづき、未変質の玄武岩は  $4.7 \pm 1.6 \mu\text{g/g}$ 、未変質のハンレイ岩は  $1.1 \pm 0.6 \mu\text{g/g}$  と推定した。また、Pb 濃度については、MORB の Pb/Ce 比 0.04 (Sun and McDonough, 1989) にもとづき、未変質の玄武岩は  $0.45 \pm 0.19 \mu\text{g/g}$ 、未変質のハンレイ岩は  $0.05 \pm 0.04 \mu\text{g/g}$  と推定した(表 1)。各岩相において元素の増減を比較すると、B は全ての岩相で 4～22 倍に増加、Li は全ての岩相で 0.1～0.7 倍に減少することが示された。Pb については、枕状溶岩では 2.4 倍に増加、シート状岩脈群とハンレイ岩中ドレライトダイクでは 0.5～0.6 倍に減少、ハンレイ岩ではほぼ変化しないことが示された。B と Li はどちらも低温変質で岩石に付加し、高温変質で岩石から溶出する元素と考えられてきたが、本研究により挙動の違いが明らかになった。

Table 1. Average boron, lithium, and lead contents and the estimated contents of fresh rock in the Oman ophiolite

	Thickness (km)	[B] <sub>average</sub> ( $\mu\text{g/g}$ )	[B] <sub>fresh</sub> ( $\mu\text{g/g}$ )	[Li] <sub>average</sub> ( $\mu\text{g/g}$ )	[Li] <sub>fresh</sub> ( $\mu\text{g/g}$ )	[Pb] <sub>average</sub> ( $\mu\text{g/g}$ )	[Pb] <sub>fresh</sub> ( $\mu\text{g/g}$ )
<b>Upper oceanic crust</b>							
Pillow lava	0.6	7.9	0.72	3.5	4.7	1.1	0.45
Sheeted dike complex	1.7	5.3	0.72	1.8	4.7	0.22	0.45
<b>Lower oceanic crust</b>							
	<b>3.0</b>	<b>1.7</b>		<b>0.62</b>		<b>0.13</b>	
Dolerite dike in gabbro		2.9	0.72	0.62	4.7	0.25	0.45
Gabbro		1.3	0.06	0.68	1.1	0.08	0.05
<b>Weighted average</b>		<b>3.6</b>		<b>1.3</b>		<b>0.3</b>	

Dolerite dike in gabbro, gabbro, epidote and quartz veins, and epidosite are included in the lower oceanic crust.

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計3件（うち査読付論文 3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 Araoka, D., Nishio, Y., Gamo, T., Yamaoka, K., Kawahata, H.	4. 巻 17
2. 論文標題 Lithium isotopic systematics of submarine vent fluids from arc and back-arc hydrothermal systems in the western Pacific	5. 発行年 2016年
3. 雑誌名 Geochemistry, Geophysics, Geosystems	6. 最初と最後の頁 3835-3853
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1002/2016GC006355	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 Yamaoka, K., Matsukura, S., Ishikawa, T., Kawahata, H.	4. 巻 396
2. 論文標題 Boron isotope systematics of a fossil hydrothermal system from the Troodos ophiolite, Cyprus: water-rock interactions in the oceanic crust and subseafloor ore deposits	5. 発行年 2015年
3. 雑誌名 Chemical Geology	6. 最初と最後の頁 61-73
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1016/j.chemgeo.2014.12.023	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 Yamaoka, K., Hong, E., Ishikawa T., Gamo, T., Kawahata, H.	4. 巻 392
2. 論文標題 Boron isotope geochemistry of vent fluids from arc/back-arc seafloor hydrothermal systems in the western Pacific	5. 発行年 2015年
3. 雑誌名 Chemical Geology	6. 最初と最後の頁 9-18
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1016/j.chemgeo.2014.11.009	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3件（うち招待講演 1件/うち国際学会 1件）

1. 発表者名 Jiwon Eom, 若木重行, 秋澤紀克, 石川剛志, 山岡香子, 高澤栄一, 川幡穂高
2. 発表標題 Strontium isotopic compositions of marine peridotites in the Oman ophiolite
3. 学会等名 JpGU-AGU Joint Meeting 2020
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 山岡香子
2. 発表標題 海底熱水系の固体・流体相互作用に関する同位体的研究
3. 学会等名 2017年度地球化学会年会（招待講演）
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 Araoka, D., Nishio, Y., Gamo, T., Yamaoka, K., Kawahata, H.
2. 発表標題 Lithium isotopic behavior during water-rock interaction at high-temperature deduced from submarine hydrothermal systems
3. 学会等名 Goldschmidt Conference 2015（国際学会）
4. 発表年 2015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
---------------------------	-----------------------	----

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
---------	---------