

平成22年6月30日現在

研究種目：基盤研究（B）

研究期間：2006～2009

課題番号：18340171

研究課題名（和文） 沈み込み帯形成最初期における角閃岩相スラブマントル間の物質移動とマグマ形成過程

研究課題名（英文） Mass transfer from amphibolite-facies slab to the mantle and magma genesis in the initial stage of subduction

研究代表者

石川 剛志（ISHIKAWA TSUYOSHI）

独立行政法人海洋研究開発機構・高知コア研究所・グループリーダー

研究者番号：30270979

研究成果の概要（和文）：1億年前の海洋底の岩石が大規模に露出しているオマーンオフィオライトについて現地調査と化学分析を行った。現地調査では、高温の沈み込み帯のみで形成される火山岩（ボニナイト）の広範な分布を明らかにした。化学分析からは、沈み込み帯形成最初期に形成されたマグマがいずれも、高温のマントル中に沈み込んだ角閃岩相（500～700℃）の海洋地殻から放出された流体の影響の下に形成されたことを明らかにした。

研究成果の概要（英文）：Field survey and chemical analysis were carried out for the Oman ophiolite, a large fragment of 100 million year-old oceanic lithosphere. The field survey revealed widespread occurrence of boninite which represents the volcanic rock formed in subduction zone with extremely hot thermal structure. The chemical analysis showed that hydrous fluids liberated from subducted, amphibolite-facies oceanic crust (500～700℃) were widely incorporated in magma genesis in the initial stage of subduction.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2006年度	2,600,000	780,000	3,380,000
2007年度	1,800,000	540,000	2,340,000
2008年度	1,400,000	420,000	1,820,000
2009年度	1,200,000	360,000	1,560,000
総計	7,000,000	2,100,000	9,100,000

研究分野：地球化学，岩石学

科研費の分科・細目：地球惑星科学，岩石・鉱物・鉱床学

キーワード：オマーンオフィオライト，島弧，火山岩，ボニナイト，微量元素，同位体，マグマ，流体

1. 研究開始当初の背景

アラビア半島に露出するオマーンオフィオライトは、約1億年前の海洋リソスフェアが長さ500km、厚さ14kmにわたって陸上に乗り上がったもので、この種のものでは世

界最大である。このオフィオライトは海洋リソスフェア深部の研究を行なうためのまたとない場所として注目を集め、これまで数多くの先端的な研究が行なわれている。

筆者は1997～2000年度にオマーンオフィ

オライトの現地調査を行い、2002年に高Mg安山岩（火山岩）の一種であるボニナイトが存在することを世界で初めて明らかにした（Ishikawa *et al.*, *Geology*, 2002）。ボニナイトマグマの形成に必要な熱的条件に基づき、筆者は、海洋拡大軸またはその近傍において海洋リソスフェアの乗り上げ（一方では沈み込み）が生じてオマーンオフィオライトが形成されたことを明らかにした。この過程は、海洋における新しい沈み込み帯の形成に他ならない。筆者はその後、オマーンオフィオライト最下部に付着している変成岩の研究を進め、2005年には、沈み込み最初期に角閃岩相の変成作用を受けたスラブから放出された流体がボニナイトマグマの形成に寄与した可能性を指摘した（Ishikawa *et al.*, *Earth Planet. Sci. Lett.*, 2005）。本研究はこれらの先行研究の延長として、沈み込み帯形成最初期における角閃岩相スラブ-マントル間の物質移動とマグマ形成過程を包括的に理解するために企画された。

2. 研究の目的

沈み込み帯におけるマグマの生産が、大陸地殻の形成・成長・進化に対して大きな役割を果たしていることは、様々な研究によって広く支持されている。しかし一方で、新たなプレートの沈み込みがいかにして始まり、どのような過程でどのような化学組成のマグマが生じ、それが時間と共にどう変化するのか、ということについては、未だ断片的な情報しか得られていない。本研究は、オマーンオフィオライトおよび伊豆小笠原弧の火山岩について岩石学的・地球化学的研究を行うことにより、沈み込み帯形成最初期における、沈み込む海洋リソスフェア（スラブ）からマントルへの物質移動とそれに伴うマグマ形成過程を明らかにすることを目的とする。

3. 研究の方法

本研究の目的を達するため、以下のような方法で研究を推進した。

(1) オマーンオフィオライトの現地調査と試料採取：オマーンオフィオライト火山岩の産状調査を行うとともに、試料を層序ごとに系統的に採取した（火山岩の時間変化を追うことに相当する）。

(2) 分析法の開発：研究の遂行上必要な微量元素・同位体分析法を開発した。

(3) 火山岩の層序ごとの系統的化学分析：沈み込み進行に伴うマグマ組成の変化を明らかにする目的で、オマーンオフィオライト火山岩の微量元素組成・同位体組成の系統的分析を行った。

(4) 海洋地殻断面の系統的化学分析：沈み込む前の海洋地殻の組成を知るために、海洋地殻最上位の枕状溶岩から最下部の層状ガ

ブロまで系統的な化学分析を行った。

(5) 他の海洋性島弧との対比を行うために、伊豆小笠原弧の火山岩の化学分析を行った。

4. 研究成果

(1) ボニナイトの広範な分布の確認

2006年12月にソハール周辺地域で9日間の現地調査を行い97個の試料を採取した。調査の過程でWadi Fizh東ブロックにボニナイト岩脈が多数貫入しているのを発見したのを始め、ボニナイトがこれまで考えられていたよりも広範囲に分布することを明らかにした（図1、図2）。これは、オマーンオフィオライト北部において沈み込み開始時に非常に高温の熱構造が広く存在していたことを意味している。

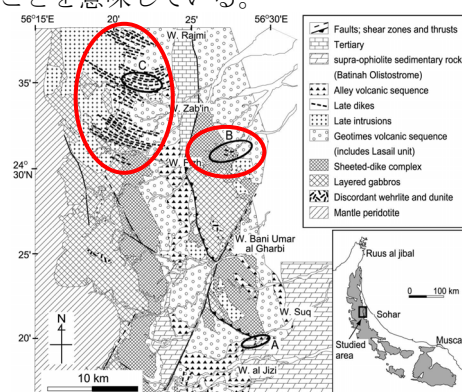


図1 ソハール周辺の地質図(Umino *et al.*, 1990)。赤線で囲われた範囲でボニナイトの産出が確認された。A,B,CはIshikawa *et al.* (2002)で報告されたボニナイト産地。

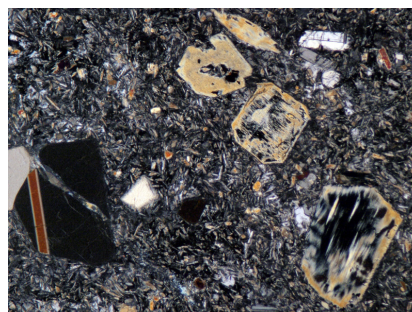


図2 Wadi Fizh東ブロックで発見されたボニナイト岩脈の偏光顕微鏡写真(クロスニコル)。写真の横幅は約3mm。

(2) 分析法の開発

MC-ICP-MSを用い、岩石中の鉛同位体比を迅速かつ高精度に測定する方法を開発した（論文⑤）。また、ホウ素・ジルコニウム・ニオブ・ハフニウム・タンタルの含有率を簡便かつ高精度にICP-MSで測定する方法を開発した（論文②）。従来、岩石中のホウ素含有率の測定には同位体スパイクの添加や耐フッ化水素酸試料導入系の設置が必要で、それが各研究機関での分析の壁となっていた。本研究の方法では、上記2つのいずれもが不要であり、しかもシンプルな内標準法で、TIMSを用いた同位体希釈法（最も精度・確

度の高い方法とされている) なみの高精度を達成した (図3)。これを基礎として TIMS を用いたホウ素同位体比の精密測定法も合わせて開発した (学会発表①)。また, TIMS を用いたストロンチウム, ネオジウム同位体比の測定ルーチンの立ち上げを行い, それらは炭酸塩試料の分析にも適用された (論文①, ③)。

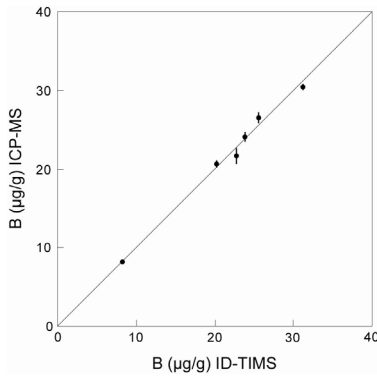


図3 ICP-MS で分析された標準岩石試料のホウ素含有率。同位体希釈法で測定された値(横軸)と5%以内の差で高精度に定量されている。

(3) マグマの化学組成の経時変化とスラブ流体の寄与の評価

オマーンオフィオライトの火山岩類の大部分は熱水変質を受けており, 新鮮な試料はごくわずかである。しかしながら, 熱水変質を受けている試料でも, 単斜輝石斑晶は未変質のまま残っていることが多い (図2の左端の結晶が単斜輝石)。本研究では, 単斜輝石の微量元素組成と, 各元素の単斜輝石/メルト分配係数に基づき変質前の火山岩の微量元素組成を推定した。火山岩を微量元素組成の特徴に基づきタイプA~Eの5種類に分類し, 層序との関係を考察した (図4)。

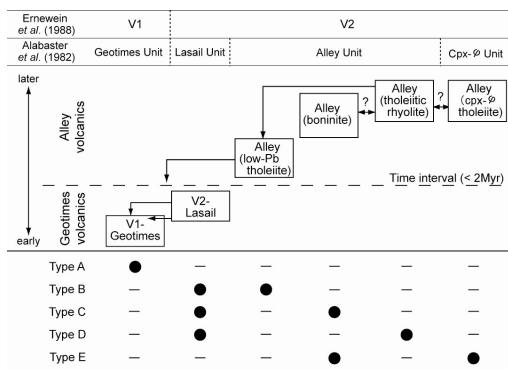


図4 火山岩のタイプと層序との関係

流体で移動しやすい元素 (FM 元素) に富んでいないマグマ (タイプ A) は層序的に最下位 (すなわち時代的に最も古い) の拡大軸ステージ (V1-Geotimes) のみに出現する。これはこの段階ではスラブ由来の流体の寄与が無かったことを意味する。

拡大軸近傍での沈み込みが始まると, その最初期段階 (V2-Lasail と V2-Alley 最下部) に, FM 元素に富んではいるが鉛に乏しい特異的なマグマ (タイプ B) の活動が認められる。沈み込みステージの主体をなす V2-Alley においては, タイプ B マグマの活動に続き, さらにタイプ C マグマ (ボニナイトの大部分がこれに分類される) の活動が大規模に生じている。その後, マグマはタイプを D, E と多様化した後, 活動を終了している。

モデル計算により, タイプ B, C, D は, 角閃岩相の起源物質から放出された流体 (Ishikawa *et al.*, 2005 で推定された値を使用) に汚染されたマントルが部分融解して生じたことが示された (図5)。

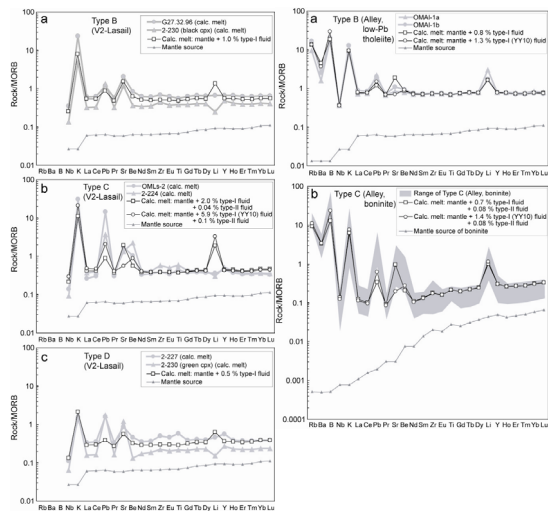


図5 スラブ流体とマントルの組成を用いたモデル計算。

計算されたマグマ組成を黒色の実線で, マグマ組成の実測値を灰色で示してある。

タイプ B における角閃岩相流体形成の温度は 600°C 以上 (タイプ I 流体) と見積もられるが, タイプ C, D ではそれに加え, より高温の角閃岩相流体 (タイプ II 流体: 通常の FM 元素の他に軽希土やニオブに富む。形成温度 ~700 度) の寄与が必要である (学会発表④⑦⑧)。このことは, タイプ B, C, D マグマのストロンチウム・ネオジウム同位体比のデータとも整合的である (図6)。

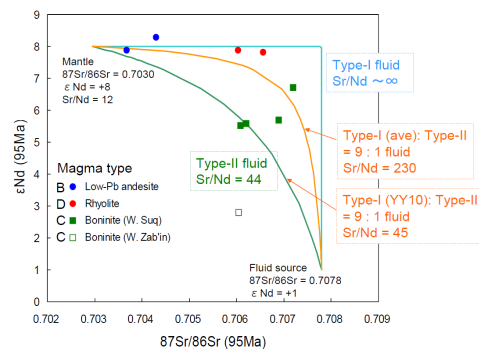


図6 火山岩のストロンチウム, ネオジウム同位体組成およびスラブ流体とマントルの混合モデル

これらのことから、沈み込み帯形成最初期段階のマグマには、角閃岩相の流体の寄与が卓越していることが明らかとなった。流体は、海水起源の熱水がマントル浅部に貫入するか (V2-Lasail), もしくは沈み込んだ角閃岩相スラブから流体が放出されることで (V2-Alley) マントルに付加されたと考えられる (図7)。V2-Alley においては沈み込みの進行に伴うスラブの温度上昇がタイプ B→タイプ C, D への変化をもたらした可能性が高い。

このように、沈み込み開始に伴うマグマの形成過程と角閃岩相流体の寄与の変化を明確な形で示したのは本研究が初めてである。今後、伊豆—マリアナ前弧やトンガ—ケルマディックなどボニナイトの産出を伴う他地域への本研究の成果の応用が期待される。

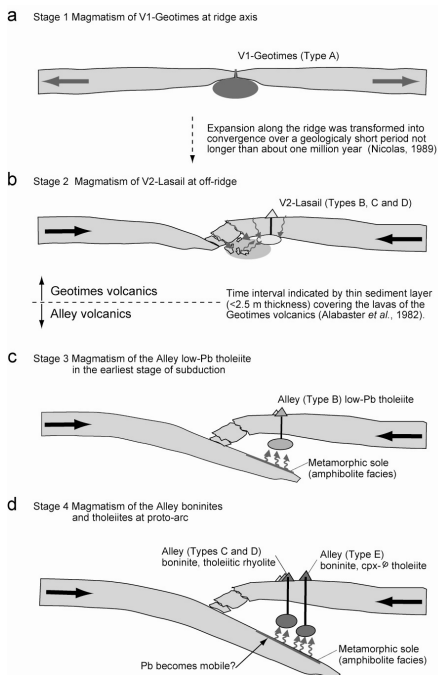


図7 沈み込み帯形成最初期段階の流体移動とマグマ形成の概念図

(4) 海洋地殻断面におけるホウ素・ホウ素同位体の分布の解明

本研究で開発された分析手法を用い、オマーンオフィオライトの海洋地殻最上部 (枕状溶岩) から最下部 (層状ガブロ) に至る断面について、ホウ素含有率、ホウ素同位体比を測定した (図8)。

ホウ素は高温の流体岩石相互作用で非常に移動しやすい元素の1つであり、流体によるスラブ—マントル間の物質移動を理解するために有効な地球化学的トレーサーであることが知られている。しかしながら海洋地殻中のホウ素およびホウ素同位体の分布は従来、深さ 1.3 km 以浅の枕状溶岩、シート状岩脈までしか測定されておらず、議論の基礎となるデータが不十分であった。今回、厚

さ 5 km の海洋地殻全体におけるホウ素・ホウ素同位体の分布が初めて明らかになった (学会発表①)。

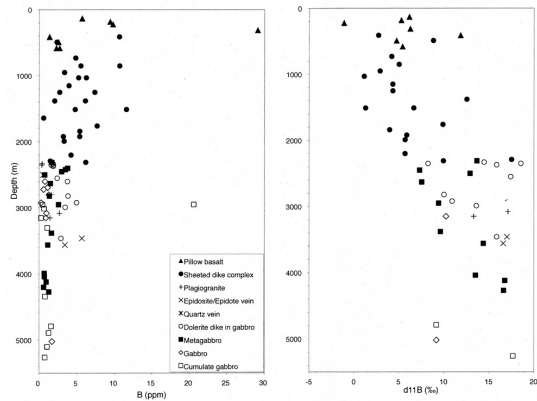


図8 オマーンオフィオライト海洋地殻における深さ方向のホウ素含有率、ホウ素同位体比の変化

注目されることは、ガブロ (2.4~5.2 km) 中のホウ素含有率が新鮮な岩石の値 (<0.1 ppm) に比べてはるかに高く、ホウ素同位体比 ($\delta^{11}\text{B}$ 値) も +6~+17 ‰ と高いことである。これは海洋地殻最深部を構成するガブロにまで熱水循環が到達しており、岩石は高いホウ素同位体比を持つ高温の熱水と平衡になっていることを示唆している。このことは海洋地殻のホウ素含有率・同位体比に対する従来の理解を塗り替えるのみならず、海洋地殻における熱水循環の実態を明らかにする上で大きな成果である。

(5) 沈み込み帯形成最初期におけるスラブ流体の同位体組成の特異性：伊豆弧との比較

オマーンオフィオライトとは対照的に成熟した沈み込み帯に位置する伊豆弧の北部において、火山岩の分析に基づきスラブ流体の同位体組成を推定した。推定されたスラブ流体の Sr 同位体比は 0.7037~0.7038 であった (学会発表②)。一方、オマーンオフィオライトで推定された値は 0.7078 (図6) であり、それに比べてきわめて高い。この高い Sr 同位体比が沈み込み帯形成最初期過程特有のスラブ—マントル物質移動によるものであるか否かに関して今後の研究が待たれる。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計 5 件)

- ① 高柳栄子・中山裕樹・石川剛志・永石一弥・井龍康文, 北大東島の地表に分布するドロマイトの Sr 同位体組成. 地質学雑誌 (査読有), 印刷中.
- ② Nagaishi, K. and Ishikawa, T., A simple

method for the precise determination of boron, zirconium, niobium, hafnium and tantalum using ICP-MS and new results for rock reference samples. *Geochemical Journal*(査読有), 43, 2009, 133-141.

- ③ Kano, A., Ferdelman, T. G., Williams, T., Henriot, J.-P., Ishikawa, T., Kawagoe, N., Takashima, C., Kakizaki, Y., Abe, K., Sakai, S., Browning, E.-L., Li, X., and The IODP Expedition 307 Scientists, Age constraints on the origin and growth history of a deep-water coral mound in NE Atlantic drilled in IODP Expedition 307. *Geology* (査読有), 35, 2007, 1051-1054.
- ④ Ishikawa, T., Nagaishi, K, and Fujisama S., Amphibolite-facies metamorphism of the subducted slab and boninite magma genesis: An inference from the Oman ophiolite. *Geochimica et Cosmochimica Acta* (査読なし), 71, 2007, Supplement 1-A431.
- ⑤ Tanimizu M., and Ishikawa, T., Development of rapid and precise Pb isotope analytical techniques using MC-ICP-MS and new results for GSG rock reference samples. *Geochemical Journal* (査読有), 40, 2006, 121-133.

[学会発表] (計 17 件)

- ① 山岡香子・石川剛志・永石一弥・川幡穂高, オマーンオフィオライトにおける海洋地殻岩のホウ素濃度および同位体組成. 日本地球惑星科学連合 2010 年大会, 幕張, 2010 年 5 月 27 日.
- ② 石川剛志, 北部伊豆弧火山岩の微量元素・同位体組成から見たスラブ脱水・流体移動と元素分別. 2009 年度日本地球化学会年会, 広島, 2009 年 9 月 17 日.
- ③ Yamaoka, K., Kawahata, H., Nagaishi, K., and Ishikawa, T., Boron contents of the altered oceanic crust from the Oman ophiolite. EGU General Assembly, Vienna, Austria, April 18, 2008.
- ④ Ishikawa, T., Nagaishi, K, and Fujisama S., Amphibolite-facies metamorphism of the subducted slab and boninite magma genesis: An inference from the Oman ophiolite. 17th V. M. Goldschmidt Conference, Cologne, Germany, August 23, 2007.
- ⑤ 石川剛志・吉田忍, 神津島面房火山の玄武岩質包有物に見られる顕著な負の Ce 異常. 日本地球化学会第 54 回年会, 岡山, 2007 年 9 月 20 日.
- ⑥ 永石一弥・石川剛志・谷水雅治, ICP-MS

を用いた標準岩石試料中の B および Zr, Nb, Hf, Ta の分析. 日本地球化学会第 54 回年会, 岡山, 2007 年 9 月 20 日.

- ⑦ Ishikawa, T., Origin of boninitic volcanism in the Oman ophiolite. Symposium on the Oman Ophiolite and Oceanic Crust, Ministry of Commerce and Industry, Sultanate of Oman, Muscat, December 19, 2006.
- ⑧ 石川剛志, 永石一弥, 沈み込み帯形成最初期における角閃岩相スラブの脱水とボニナイトマグマ形成. 日本火山学会 2006 年度秋季大会, 熊本, 2006 年 10 月 24 日.

[その他]

本研究の成果は下記の 2 編の博士論文の一部となった。

- ① 永石一弥, Fluid transfer and magmatism in the initial stage of subduction: Inference from the Oman ophiolite (沈み込み帯形成最初期の流体移動とマグマ形成過程: オマーンオフィオライトからの推定). 博士論文, 静岡大学大学院理工学研究科環境科学専攻, 2009 年 3 月.
- ② 山岡香子, Study on hydrothermal alteration of oceanic crust in the Oman ophiolite based on isotope geochemistry (同位体地球化学に基づくオマーンオフィオライト海洋地殻の熱水変質). 博士論文, 東京大学大学院新領域創生科学研究科自然環境学専攻, 2010 年 3 月.

6. 研究組織

(1) 研究代表者

石川 剛志 (ISHIKAWA TSUYOSHI)
独立行政法人海洋研究開発機構・高知コア
研究所・グループリーダー
研究者番号: 30270979

(2) 研究分担者

なし

(3) 連携研究者

なし