

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 29 年 6 月 13 日現在

機関番号：82626

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2014～2016

課題番号：26800260

研究課題名(和文)高温沈み込み帯における初期島弧マグマ発生と沈み込み帯発達過程の解明

研究課題名(英文) Production of primary magma and development of incipient arc on a hot subduction zone

研究代表者

草野 有紀 (Kusano, Yuki)

国立研究開発法人産業技術総合研究所・活断層・火山研究部門・研究員

研究者番号：00635972

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 2,400,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、沈み込み帯(海溝)形成初期に発生した火山活動とそのマグマの化学組成変化を解析することにより、沈み込み帯発生・発達過程を以下の3点について明らかにした。(1) オマーンオフィオライトの島弧火山噴出物を調査し、古島弧火山が2-5 km間隔で火道や火口を配列した火山群のような活動であったと推定した；(2) 沈み込みに伴い初期の島弧ソレアイト質マグマから後期の無人岩マグマへと、マグマ組成が変化した点について、スラブ由来流体と堆積物メルトの寄与率の変化によることを定量的に示した；(3) オマーン古島弧の沈み込み帯がマンテルポテンシャル温度約1400 °Cと高温であったことを示した。

研究成果の概要(英文)：Based on the volcanology of infant arc volcanic edifices in the Oman Ophiolite, and the temporal geochemical changes, subduction initiation is revealed as follows: (1) paleo-arc volcanos composed of piled-up volcanos with several vents 2-5 km interval; (2) geochemical change from arc tholeiite to boninite magma was quantitatively explained by contribution rate between slab-derived fluid and sedimentary melt; (3) Mantle potential temperature of the paleo-infant arc magma is estimated to 1400 °C. It is correlated with proto-arc spreading magmatism, and supported by our high-temperature subduction initiation model.

研究分野：火山学、岩石学

キーワード：沈み込み帯 初生マグマ オマーンオフィオライト 無人岩

1. 研究開始当初の背景

40 億年前のプレートテクトニクスの開始以来、沈み込み帯は熱・物質循環を通じて地球内部と表層環境の物質学的進化をもたらすとともに (Schmincke, 2000), 大陸地殻の形成に主要な役割を果たしてきた (巽, 2003)。しかし、海洋プレート境界や内部でどのように沈み込み帯が発生し、進化していくかは、少数の例外を除いてよくわかっていない。例外的に最も理解が進んでいる伊豆小笠原マリアナ (IBM) 弧は、若いフィリピン海プレート下に、古い太平洋プレートが沈降することで沈み込みを開始した (Stern, 2004 など)。この時、前弧域の拡大に伴って中央海嶺玄武岩的マグマを発生し、続いて高 MgO、高 Si で特徴付けられる無人岩マグマの活動を経て、通常の島弧玄武岩マグマへと移化した。同様の層序は世界各地に分布するオフィオライト岩体で知られており、上部地殻が島弧的な火山岩からなるという主張から、オフィオライトは前弧域で形成されたとする“前弧オフィオライト”モデルが提唱された (Shervais, 2001 など)。しかし、島弧マグマを特徴付ける LIL 元素などのスラブ成分は熱水とともに動きやすく、多くのオフィオライトの岩石は熱水変質により全岩化学組成が変化しており、島弧的な火山岩とする根拠に乏しい。

中東のオマーンオフィオライトはネオテーチス海の拡大から閉塞への転換に伴い、海洋プレート同士の沈み込み帯を生じた。オフィオライトの構造的下位には、沈み込み開始時に変成しオフィオライトへ底付けしたスラブとされるメタモフィックソールがあり (Wakabayashi and Dilek, 2000), ソールの変成と島弧火成活動の年代 (<95 Ma) が同時期で、海嶺系火成活動年代 (100-95 Ma) と近いこと、オフィオライト岩体南部には海嶺軸直下に上昇したダイアピル構造がマンテル中に存在することから、沈み込みは海嶺軸部を含む若いプレート間で起きたと考えられる (Nicolas, 1989) (図 1)。研究代表者は、新鮮な火山ガラスの分析から、海嶺期マグマがスラブ由来成分を欠き中央海嶺玄武岩的であることを明らかにした。また、海嶺拡大後期から島弧期を通じて時代が下るにつれてソースマンテルが枯渇したこと、初期の島弧ソレアイトから末期の無人岩へとマグマ組成が変化し、300 万年以内の短期間で島弧活動を終えたことが分かった (Kusano et al., 2012, 2014)。これは、沈み込み開始から最初の 1400 万年間に IBM 弧がたどったソースマンテルの肥沃化 (Kanayama et al., 2012) とは真逆の変化で、オマーンの高温沈み込み帯と IBM 弧はウェッジマンテルの物質学的進化過程が大きく異なることを示す。

2. 研究の目的

以上の点から、“前弧オフィオライト”モデルとは異なるオマーンオフィオライトの

沈み込み帯発生モデルを着想した (Kusano et al., 2014; 図 1) :

ネオテーチス海の拡大から閉塞への転換によって海嶺軸近傍で沈み込みが始まり、海嶺下の高温の上盤マンテル下に沈み込んだスラブは変成されて脱水し、島弧ソレアイト、次いで無人岩マグマを発生した (Ishikawa et al., 2005) ; 緑泥石の安定領域を越える ~ 800 °C で単斜輝石角閃岩となったスラブ上部の変成地殻と上盤マンテルは、潤滑剤となる鉱物相を欠くために固着し、マンテル深部に沈み込むことができず、ウェッジ内にマンテル対流も発生しなかった ; スラブから段階的に放出された流体によって融解を繰り返したウェッジマンテルは易溶成分に枯渇していき、やがて冷却とともに島弧活動は終息した。本研究では海嶺下マンテルから島弧下マンテルへの温度・組成構造の変化とマグマ生成過程の変遷を延長約 100 km の古島弧に沿って明らかにすることで、上記の仮説を検証することを目的とした。

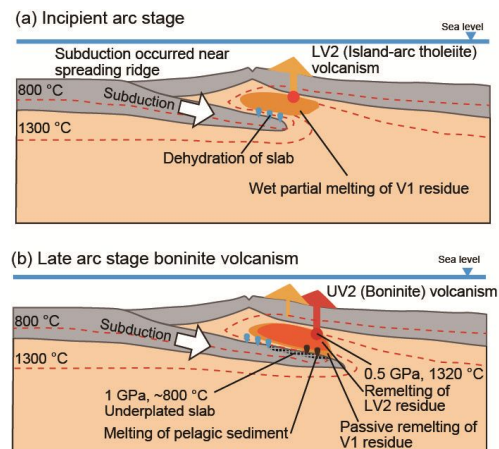


図 1 本研究で明らかとなった高温沈み込み帯モデル (Kusano et al., 2017)

3. 研究の方法

オマーンオフィオライトの初期島弧火成活動について検討し、高温沈み込み帯におけるスラブ由来成分の付加の影響とそれによるマグマ組成の変化、海嶺下マンテルから島弧下マンテルへの地球化学的・物理学的進化過程を明らかにするために、地質学的・地球化学的手法を用いて以下の点を検討した ; (1) 沈み込み軸方向の初期島弧火成活動の火山分布・火山活動の推移と活動年代の変遷、(2) 未変質の火山ガラスやメルト包有物組成から評価した、沈み込み進行に伴ってマグマへ付加したスラブ成分の定量的変化および古島弧方向への変化、(3) Cr スピネル中のメルト包有物組成から計算した初生メルト発生温度・圧力に基づく、海嶺下から島弧下マンテルへの物理学的進化と沈み込み帯発達過程。

課題期間中、合計 50 日間の地質調査を行い、火山噴出物の分布や特徴を記載するとともに、岩石・火山ガラス・鉱物試料を採取し

た．採取した岩石は薄片観察を行い，代表的な試料について，全岩組成および鉱物・火山ガラス組成分析を実施した．調査は金沢大学・新潟大学などからなる合同調査グループとともに，オマーン国地質調査所の協力の下で行った．化学分析は金沢大学自然システム学系および産業技術総合研究所地質調査総合センターで実施した．一部の試料について，琉球大学理学部の質量分析計で Nd-Hf 同位体組成を測定した．

4. 研究成果

(1) 沈み込み軸方向の火成活動の復元

Kusano et al. (2014) では，初期島弧噴出岩層序を詳細に記載し，島弧ソレアイトを主体とし最上部を無人岩が覆うことを明らかにした．これらの島弧火山は，オフィオライトとほぼ並行に存在した沈み込み軸に沿って数 km 間隔で配列していたことが予想された．そこで，南北延長約 100 km の範囲で地質調査を行い，古島弧火山列における火山活動の変化を復元した．

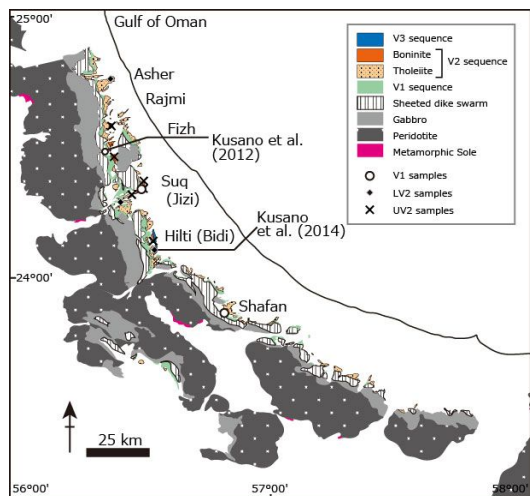


図2 オマーンオフィオライトの地質図
海嶺系火山岩：V1；島弧火山岩：V2
(Kusano et al., 2017)

【図2 Asher-Suq まで】島弧岩脈群やマントル～地殻中に発達するせん断帯が複数報告されている北部地域 (Umino et al., 1990 など) では，地殻上位に島弧ソレアイトの火山断層が複数露出する．島弧岩脈群が島弧火山噴出物に貫入する産状も観察され，火山活動が帯状に広がっていたことが推定される．無人岩の分布もこれらの岩脈群列の延長上に点在して分布することを確認した．しかし，最上部の無人岩は崖錐堆積物に覆われるため，活動の再末期は保存されていなかった．また，島弧岩脈群は無人岩・島弧ソレアイト・流紋岩で構成される．無人岩・島弧ソレアイト岩脈は平均厚さ約 1.5 m である一方，流紋岩脈は厚さ 80m 以上である．したがって，ごく局所的に流紋岩火成活動があったことが明らかになった．

【図2 Suq-Shafan まで】南部地域では，火

山噴出物の分布と産状から，より詳細な火山活動を復元した．島弧ソレアイト火山は，沈み込み軸に沿って 1-3 km 間隔で給源火道が分布し，5 km 以上にわたって噴出物 (溶岩) が連続することから，いくつかの火山が重なるように成長したことがわかる．一方，無人岩火山は 1 つが 2-3 km 程度の広がりを持ち，沈み込み軸に沿って点在することが明らかになった．無人岩火山の噴火エピソードは岩脈貫入と火砕物の噴出に始まり，溶岩流が火砕物を覆い，熱水堆積物がこれを覆うことが確認できた．火砕物の分布は火口近傍に限られる．また，噴火エピソードが 5-7 回以上あったと推定される．

北部・南部地域の結果，初期島弧火山活動は以下のようにまとめられる：沈み込み軸とほぼ直交する岩脈群列に沿って発生し，はじめに島弧ソレアイト溶岩流出を起こした；島弧ソレアイト火山は複数が重なるように成長した；休止期を経て，ほぼ同じ岩脈群列から無人岩火成活動が起こった；無人岩は火砕物を伴うやや爆発的な噴火に始まり，溶岩を流出する火山活動を繰り返して成長した．南部地域の島弧火山地質と活動様式については現在，Kusano and Umino 「Flat-topped volcanic edifices in the paleo-oceanic arc of the northern Oman Ophiolite」として投稿準備中である．

(2) スラブ成分のマグマ組成への影響

海底拡大直後のメルトに富み高温の海嶺軸部へと沈み込んだスラブは脱水し，上盤マントルの再溶融を促進し，島弧火山岩マグマを生じたと考えられる．島弧火成活動後期にはスラブメルトも放出され，無人岩マグマ生成に関与した可能性が高い (Ishikawa et al., 2005)．一方，上盤マントルと固着したスラブはマントル深部へ沈み込むことができず，マントル対流が発生しなかったため，島弧マグマのソースマントルは融解を繰り返し時間とともに枯渇していったと考えられる．そこで未変質の火山ガラスや Cr スピネル中のメルト含有物の化学組成を分析し，主要・微量元素 (Ti, Na, Nb, Ba, Th, Ta など) と Hf-Nd 同位体組成の解析から，プレート沈み込み過程におけるマグマへ付加したスラブ由来成分の影響およびソースマントルの組成変化を明らかにした．

【未変質の火山ガラス・メルト含有物組成】前述のように，海嶺系火成活動はスラブ由来成分を欠く．一方，島弧ソレアイトから無人岩にかけては，海嶺系のマグマと比べて次第に流体由来の微量元素濃度が増加していることが明らかになった．

【全岩 Hf-Nd 同位体組成】海嶺系玄武岩と島弧ソレアイトはほぼ同じ Hf-Nd 同位体組成を示した (図3)．これは，マントル組成とほぼ同じ組成範囲に含まれる．一方，無人岩の Nd 同位体組成は島弧ソレアイトと比べて，有意に低い値を示した．無人岩の低い Nd 同

位体組成は、インド洋の海底堆積物がマントルで発生したマグマに付加することで説明可能である。つまり、島弧ソレイトマグマの発生にはスラブ由来流体のみ、無人岩マグマの発生にはスラブ由来流体および堆積物メルトの付加がそれぞれ必要であることがわかった。

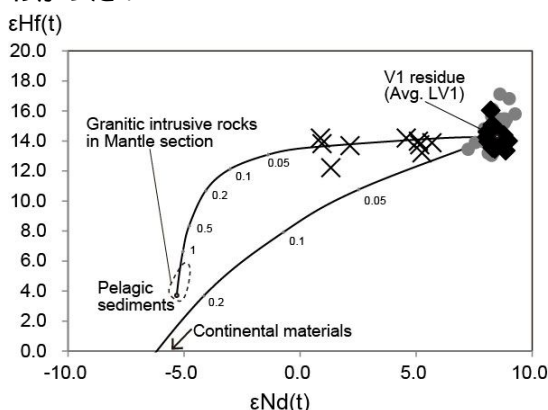


図3 火山岩類の Hf-Nd 同位体組成
無人岩 (x) は、海嶺系溶け残りマントル (V1 residue) に海底堆積物を 0.03% 混合した組成で説明できる。
(Kusano et al., 2017)

火山ガラス組成および全岩 Hf-Nd 同位体組成により制約した島弧マグマ発生条件を、マスバランス計算によって定量的にモデリングした。ソースマントルの溶融度はバッチ溶融によって求めた。島弧ソレイトマグマは 1.7% のスラブ由来流体が付加したマントルが 9% 部分溶融することで形成される。無人岩マグマは 0.005–0.03 wt% の海底堆積物および 0.87–0.88 wt% のスラブ由来流体が付加した島弧ソレイトマントルが 7% 部分溶融することで説明することができた。

(3) 島弧下マントル発達過程の解明

Cr スピネル中のメルト包有物は、マントルと平衡な初生メルトを捕獲していると期待される。そこで、砂質堆積物から抽出した Cr スピネルをスライドガラスに貼り付けたものをメルト包有物が露出するように研磨し組織観察を行い均質なガラスを選別した。これらを EPMA・LA-ICP-MS で分析し、Kelemen et al. (1993) などの分配係数を用いてかんらん石と平衡な初生メルト組成を求めた。未変質の火山ガラスも同様に初生メルト組成を求めた。初生メルト組成に Putirka (2007, 2008) などの地質温度計・圧力計を適用し、マントルからメルトが発生した際の温度・圧力を計算すると、無人岩が発生した温度は 1280–1320 °C、圧力は 0.4–0.6 GPa と推定された。これは、マントルポテンシャル温度 1400 °C に相当する。一方、海嶺系マグマのマントルポテンシャル温度も 1400 °C と見積もられた。計算には先行研究で公表されている Mg# > 60 のシート状岩脈群の全岩化学組成を使用した。以上の結果、海嶺下マントルが島弧下マントルへと変化したという(2)

の化学的な進化過程は、物理学的にも説明された。

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3件)

Kusano, Y., Umino, S., Shinjo, R., Ikei, A., Adachi, Y., Miyashita, S., Arai, S., 2017. Contribution of slab-derived fluid and sedimentary melt in the incipient arc magmas with development of the paleo-arc in the Oman Ophiolite. *Chemical Geology*, 449, 206–225. <http://dx.doi.org/10.1016/j.chemgeo.2016.12.012>, 査読有。

Kusano, Y., Hayashi, M., Adachi, Y., Umino, S., Miyashita, S., 2014. Evolution of volcanism and magmatism during initial arc stage: Constraints for the tectonic setting of the Oman ophiolite, Tectonic Evolution of the Oman Mountains, Special Publications 2014, Geological Society of London, vol. 392, pp. 177–193, 査読有。

Kusano, Y., Umino, S., Kobayashi, J., Mizukami, T., Okuno, M., Arai, S., 2014. Quantitative major element analysis of igneous rocks with X-ray fluorescence spectrometer “RIGAKU ZSX primus II” using a 1:10 dilution glass bead, *Science reports of Kanazawa University*, 学内査読有。

[学会発表](計7件)

海野進, 草野 有紀, 山路敦, 2017. 海洋性島弧火山の岩脈群の古応力解析: オマーン・オフィオライトの V2 島弧火成活動. 日本地球惑星科学連合 2017 年大会, 2017/5/20, 幕張メッセ, 千葉県千葉市。

Kusano, Y., Umino, S., Kanayama, K., Kitamura, K., Nagaishi, K., Ishikawa, T., 2016. Contribution of slab-derived fluids and sediment melt in the incipient arc magma of the Oman Ophiolite. *Goldschmidt 2016*, 2016/6/28, パシフィコ横浜, 神奈川県横浜市。

Kusano, Y., Umino, S., Kanayama, K., Kitamura, K., 2016. Evolutionary processes of submarine volcano in an incipient arc reference from the Oman Ophiolite. 日本地球惑星科学連合 2016 年大会, 2016/5/23, 幕張メッセ, 千葉県千葉市。

海野進, 草野 有紀, 北村啓太郎, 金山恭子, 永石一弥, 石川剛志, 大塚 遼, 2016. オマーンオフィオライトの超高温沈み込み帯の末路: その誕生から死まで. 日本地球惑星科学連合 2016 年大会, 2016/5/23, 幕張メッセ, 千葉県千葉市。

Kusano, Y., Umino, S., Shinjo, R., Adachi, Y., Nagaishi, K., Ishikawa, T. 2015. Contamination of slab components into the incipient arc magmatism in the Oman Ophiolite. Goldschmidt2015, 2015/8/19, プラハ チェコ.

Umino, S., Kusano, Y., Kanayama, K., Kitamura, K., Senda, R., Ishizuka, O. 2015. Was High-Silica Boninite Originated from Ancient Recycled Slab? Goldschmidt2015, 2015/8/19, プラハ チェコ.

Kusano, Y., Umino, S., Shinjo, R., Adachi, Y., Kitamura, K., Miyashita, S. 2015. Evolutionary processes of initial arc magma yield from hot subduction zone reference from the Oman Ophiolite, 日本地球惑星科学連合 2015 年大会, 2016/5/26, 幕張メッセ, 千葉県千葉市.

〔図書〕(計 0 件)

〔産業財産権〕

出願状況 (計 0 件)

名称：
発明者：
権利者：
種類：
番号：
出願年月日：
国内外の別：

取得状況 (計 0 件)

名称：
発明者：
権利者：
種類：
番号：
取得年月日：
国内外の別：

〔その他〕

ホームページ等

6. 研究組織

(1) 研究代表者

草野 有紀 (KUSANO Yuki)
国立研究開発法人産業技術総合研究所・活断層・火山研究部門・研究員
研究者番号：00635972

(2) 研究分担者

なし

(3) 連携研究者

海野 進 (UMINO Susumu)
金沢大学・自然システム学系・教授

研究者番号：30192511

(4) 研究協力者

石塚 治 (ISHIZUKA Osamu)
国立研究開発法人産業技術総合研究所・活断層・火山研究部門・主任研究員