

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 26 年 6 月 2 日現在

機関番号：13301

研究種目：基盤研究(B)

研究期間：2010～2013

課題番号：22403004

研究課題名(和文) オフリッジ火山から高速拡大海嶺のモホ遷移帯マグマプロセスを探る

研究課題名(英文) Magma processes in the Moho Transition Zone: an insight from volcanoes off the fast-spreading ridges

研究代表者

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

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 12,700,000円、(間接経費) 3,810,000円

研究成果の概要(和文)：オマーンオフィオライト及び深海掘削サイト1256の最上部を構成するオフリッジ巨大溶岩の岩相、全岩化学組成、鉱物組成および組織を解析し、巨大溶岩流の定置過程とマグマの成因について考察した。巨大溶岩流は低噴出率の噴火によって水底パホイホイ溶岩からなる複合溶岩流として流下し、ローブの融合が進んだ高温の溶岩体中心部では、後から噴出した溶岩が未固結の中心部に貫入し、内成的に溶岩流が成長する。噴火中にマグマ組成が変化し、マグマ混合が起きている。大洋島玄武岩とエンリッチした中央海嶺玄武岩(EMORB)の中間的なアルカリ玄武岩を伴い、オフリッジ巨大溶岩流が比較的浅いマントルで発生したことを示唆する。

研究成果の概要(英文)：Off-ridge large lava flows in the Oman Ophiolite and in ODP site 1256 were investigated to understand the emplacement process and the magma genesis by analyzing the bulk-rock and mineral compositions and textures. Both lava flows were extruded at low extrusion rates as compound flow lobes, which were merged into thick large lobes. Merged flow lobes thicken endogenously as subsequent lava was injected into the molten core of the lobes. Magma compositions changed during the eruptions, resulted in mixing of magmas. Associated alkali basalts showing intermediated characteristics between ocean island basalts and enriched mid-ocean ridge basalts indicate that the sources for the large lava flows are shallower than ocean island basalt magmas.

研究分野：数物系科学

科研費の分科・細目：固体地球惑星物理学

キーワード：オフリッジ火山 巨大海底溶岩流 深海掘削 1256深海掘削孔 オマーンオフィオライト 複合溶岩流  
定置過程 内成的成長

## 1. 研究開始当初の背景

高速拡大海嶺である東太平洋海膨 (EPR) 周辺には、海嶺軸から数 km 以上離れたオフリッジで噴火した新しい溶岩原や火山体が数多く存在する。これらのオフリッジ溶岩は枯渇した通常の中央海嶺玄武岩 (NMORB) から不適合元素 (アルカリ元素や軽希土類元素など) に富んだ玄武岩 (EMORB)、両者の中間的な遷移型玄武岩 (TMORB) など海嶺軸上の NMORB よりも幅広い組成変化を示す。また、海嶺軸直下マグマ溜りを越える 7-30 立方 km の体積を有する巨大溶岩原も少なくない。これらは地球全体の年平均マグマ噴出量 4-5 立方 km の数倍に達し、18 世紀末の気候変動をもたらした史上最大の陸上玄武岩溶岩噴火に匹敵する規模から、海洋環境や生態系に与えた影響も甚大であると予想される。アセノスフェアのカンラン岩は上昇するマグマとの反応によって主にカンラン石からなるダナイトに変化し、最終的に地殻とマン托ルの境界をなすモホ遷移帯を構成する。モホ遷移帯反応によって最終的なマグマ組成は決まる。高速拡大海嶺下では上部マン托ルが高温のためマグマとカンラン岩が大規模に反応し、厚いモホ遷移帯を生じる。海嶺軸で地殻形成に寄与しなかった余剰のマグマはモホ遷移帯に残存し、深部マグマ溜りを形成する可能性がある。オフリッジマグマ組成の多様性は、モホ遷移帯の不適合元素に富む EMORB 成分とオフリッジで上昇した NMORB、あるいは深部マグマ溜りの NMORB マグマとオフリッジ EMORB マグマの混合が考えられる。高速拡大海嶺系のオフリッジ火山群の産状はほとんど未知であり、定置過程や大量のマグマ発生、海嶺軸部と組成の異なるオフリッジマグマ生成プロセスの解明は、マン托ルダイナミクスの包括的理解に不可欠である。

## 2. 研究の目的

本研究の目的は、1) オフリッジ巨大溶岩

流の産状・定置過程、2) オフリッジマグマの特徴と成因、3) マグマ溜りの分布と規模を明らかにすることである。

## 3. 研究の方法

目的 3 を達成するために地殻深部～モホの電気伝導度探査等の深部構造探査を計画していたが、航海日程を確保できなかった。そこで、代替案として既にコア試料のある深海掘削サイト 1256 の最上部を構成するオフリッジ巨大溶岩と、オマーンオフィオライトのオフリッジ巨大溶岩の調査・岩石試料の解析を行い、その他の海底と陸上の地質体双方からオフリッジ巨大溶岩流の定置過程とマグマの成因について検討した。また、地殻深部～モホの構造探査を実現するための準備として電気伝導度探査方法について検討を重ね、その検証実験を行った。

## 4. 研究成果

(1) 深海掘削サイト 1256 では、1500 万年前に東太平洋海膨軸から～10 km で噴火したオフリッジ巨大溶岩を掘削した。1256C 孔では、290 mbsf (海底下基盤岩からの深さ) から 300 mbsf にかけて、全岩化学組成のカリウムが高い値を示す高  $K_2O$  層が出現する。高  $K_2O$  層の直上の 290~291 mbsf は斜長石粒径、単斜輝石粒径が最大となり、普通輝石の  $Mg\#$  が低い。またこの層は、最終分化物である石英と斜長石が同時成長したインターグロース組織や石英がほかの層準よりも多く含まれる。このことから結晶分化が進んで生じた残液中にシリカと水が濃集したと考えられる。水に富む残液は低粘性であるために、結晶の成長速度が速く、斜長石粒径、単斜輝石粒径が粗粒化した可能性がある。これらより、NMORB からなる本体とは異なる高  $K_2O$  の溶岩が岩体形成末期に未固結の岩体中心部に貫入したと考えられる。そこで、高  $K_2O$  層が後から貫入したとして、貫入前のかんらん石斑晶の粒径分布と数密度分布を再

現し、結晶沈降モデルと比較したところ、結晶沈降が起きた場合と類似した結晶粒径分布がみられた(図1)。このことから、NMORB からの溶岩流が固化する過程でカンラン石斑晶の重力沈降が起こり、固化フロントに捕獲されたと考えられる。

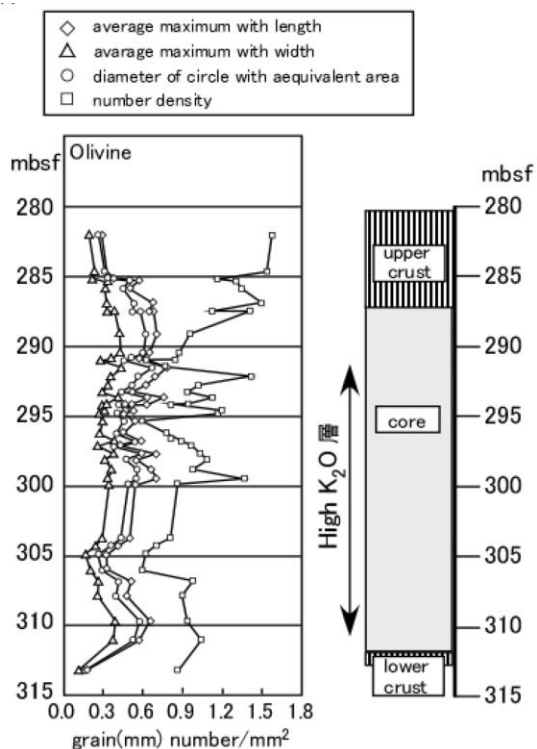


図 1. 1256C 孔のカンラン石粒径と数密度

Table. Compositional domains of pyroxene

	Stratigraphic zone					
	Low-K	Mg#	La/Yb	High-K	Mg#	La/Yb
Augite	Aug_L-1	57-76	M	Aug_H-1	74-80	M-H
	Aug_L-2	44-76	L	Aug_H-2	59-66	L-M
	Aug_L-3	66-77	H	Aug_H-3	38-77	L-M
Pigeonite	Pig_L-1	64-68	L	Pig_H-1	64-74	L
	Pig_L-2	60-68	H	Pig_H-2	30-72	H

表 1. 1256C 孔の単斜輝石のタイプ

普通輝石、ピジョン輝石の面分析を行い、1 粒子の  $Al_2O_3$ ,  $CaO$ ,  $MgO$  の含有量の差により見られる組織に基づいて分類した(表1)。低  $K_2O$  層では、AugiteL-1, AugiteL-2, AugiteL-3 の 3 種類の普通輝石と PigeoniteL-1, PigeoniteL-2 の 2 種類のピジョン輝石が確認できる。高  $K_2O$  層では、AugiteH-1, AugiteH-2, AugiteH-3 の 3 種類の普通輝石と PigeoniteH-1, PigeoniteH-2

の 2 種類のピジョン輝石が確認できる。単斜輝石の EPMA 元素分布図にもとづく主要元素組成変化, LA-IPC-MS による微量元素組成変化から低  $K_2O$  層では、PigeoniteL-1 晶出→液相濃集元素に富むマグマ混入→PigeoniteL-2 晶出→少量の液相濃集元素に枯渇したマグマ混入→AugiteL-3 晶出→大量の液相濃集元素に枯渇したマグマ混入→AugiteL-1 晶出→オフリッジで噴出, 定置→AugiteL-2 晶出。

高  $K_2O$  層では、PigeoniteH-1 晶出→液相濃集元素に富むマグマ混入→PigeoniteH-2 晶出→AugiteH-1 を晶出したマグマと混合→AugiteH-2 晶出→オフリッジで噴出, 低  $K_2O$  層へ貫入→AugiteH-3 晶出, という経路だった可能性が考えられる。

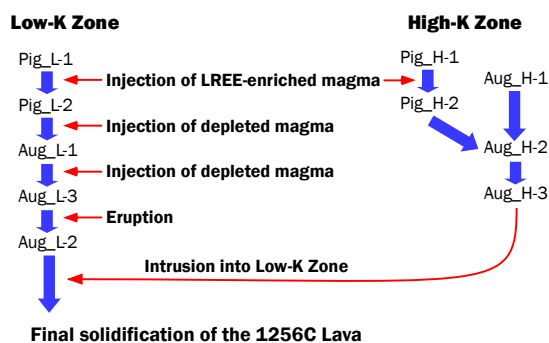


表 2. 1256C 巨大溶岩の定置過程

(2) オマーンオフィオライトの V3 溶岩流はおよそ 9000 万年前に噴火し、海嶺軸と平行に並ぶ地溝帯を埋積して、南北 11 km, 東西 1.5 km, 最大厚さ 270 m に渡って分布する。現在地表に露出する部分だけで  $1.2 \text{ km}^3$  の体積を有するが、大部分は浸食によって失われている。給源と考えられる岩脈の延長から考えて、元は東西 5 km 以上に渡って広がり、河川堆積物に埋積された部分を考慮すると、元の体積は  $10 \text{ km}^3$  クラスの巨大溶岩流であったと思われる。サイト 1256 の巨大溶岩流など東太平洋海膨の拡大軸近傍のオフリッジ溶岩は、拡大軸と平行に延びる割れ目火口から噴出するものが多く、これらのオフ

リッジ溶岩は拡大系の応力場の支配下にあったことを示している。一方、拡大軸から数 10 km 以上離れたところに分布するオフリッジ溶岩は拡大軸と直交する割れ目火口から噴火し、応力場が 90 度変化している。V3 溶岩流では、給源岩脈と古拡大軸が高角をなすことから、拡大軸から遠く離れた場で噴火したことが示唆される。このことは、オマーンの拡大期の基盤岩年代が 9500 万年よりも古く、拡大軸から少なくとも 500 万年以上離れた海底に V3 溶岩が定置したことと調和的である。

洪水玄武岩に代表される陸上の巨大溶岩流は、塊状溶岩からなるコアを挟んで上下に柱状節理の発達した溶岩クラストからなる構造を示す。一方、V3 溶岩では溶岩流最上部と最下部のクラストの他に、柱状節理の発達したクラストがドレライト質の塊状コアがに挟まれる二階建て構造をなす。コア中には溶岩ローブが融合した痕跡が細粒玄武岩レンズとして数 10 センチ～1 m 間隔の層状構造を形成する。このことは、溶岩ローブが完全にひとつのチューブとして一体化してはいないことを示唆しており、陸上の巨大溶岩流よりも複雑な定置過程を示している。これは、陸上に比べて海水による冷却によって、ローブ同士の融合が十分に進む前に急冷固化したためと考えられる。

全岩化学組成は、噴火初期には未分化であり、次第に分化した組成に変化し、噴火末期に再び未分化になった。同様の全岩化学組成変化は溶岩体が最も暑く発達した部分の層序方向の変化と調和的である。

このことから 1256 掘削孔と同様に、内成的に溶岩流が成長したと考えられる。また、主要・微量元素組成は大洋島玄武岩(OIB)と EMORB の中間的な特徴を示すことから、V3 溶岩流はザクロ石かんらん岩の安定領域ではなく、比較的浅いスピネルかんらん岩の安定領域で発生したと考えられる。

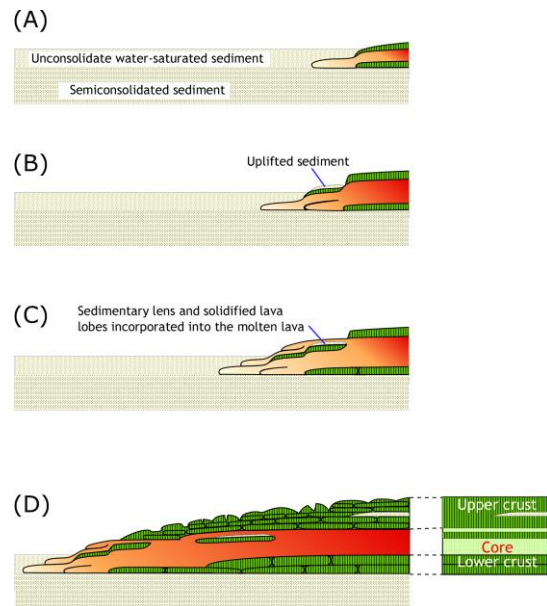


図 2. オマーンオフィオライト V3 溶岩の定置モデル (Umino, 2012)

(3) 海嶺軸における地殻・マントル構造把握のためには、浅部から 10km 程度までの構造を得ることが重要である。Kasaya and Goto (2009)で開発された OBEM を用いる自然信号による電磁探査では 1km より浅い構造を深海域で得ることは難しい。一方、浅部構造へのアプローチとして曳航式の電気探査法の技術を確認し、メタンハイドレードに対応する構造異常を検出したが(笠谷ほか (2006; Goto et al., 2008), 探査深度が 100m 程度に限られていた。海嶺軸における地殻・マントル構造把握のためには、浅部から 10km 程度までの構造を得ることが重要であるので、人工電流源を用いた探査法の検討を行った。残念ながら EPR への航海が取得できなかったため、日本近海で取得された熱水域に関連する航海時に試験的な実験を行い、データ取得の電流源については既存の電流源および別途開発された電流源を用いた。また、有人潜水船や ROV で取り回しのしやすい小型の海底電位計についても検討を行い、その製作と海域試験を行った。

コントロールソース電磁法(CSEM 法)の

海域試験はベヨネースカルデラにおいて YK11-11 航海で実施され、電流源は AUV に搭載して送信を行った。CSEM 探査を目的として AUV に電源を搭載して電流を送信したのは、このオペレーションが世界で初めてである。今回のオペレーションでは AUV をプラットフォームとしたが、曳航体や ROV でも搭載可能でプロットフォームを選ばない設計となっている。受信機として、Kasaya and Goto (2009) で開発された OBEM を用いた。調査は棚橋ほか (2006) で報告されている白嶺鉱床周辺で実施した。

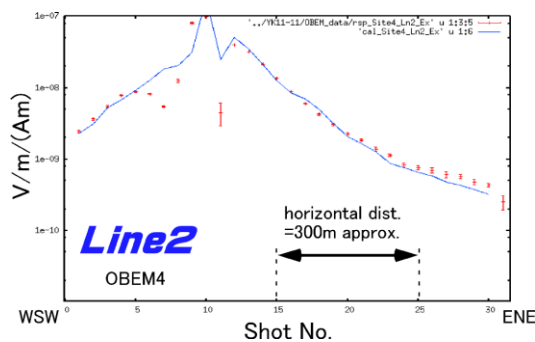


図 3. 一様大地のレスポンス (青線) と観測で得られたデータ (赤)

図 3 は一つの測線上で観測されたデータの一例である。横軸はショットナンバーで、10 ショットで約 300m となる。この測線ではショットナンバー 10 付近が OBEM のおおよその位置であるので、最大で約 600m 程度の距離からの信号を受信できていることが分かる。しかしながら、150m より近い位置ではミスフィットが大きい。これは AUV と OBEM との位置精度の誤差が大きい事が、お互いの距離の近いためにミスフィットが大きくなっていると推測される。これを考慮してエラーの小さい送受信間の距離が 150m から 900m までのデータに関して見かけ比抵抗を算出し平面分布図を作成した。得られた分布図の北東側は棚橋他 (2006) で指摘されている白嶺鉱床の位置とほぼ一致するので熱水鉱床で生じる低比抵抗と考えられる (Goto et al., 2013 研究業績 7)。しかしながら、こ

の見かけ比抵抗分布図はその地点での平均的な比抵抗値を表しているだけであるため、構造解析が可能な逆解析の手法を確立して議論をする必要がある。

#### 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 7 件)

1. 宮下純夫・海野 進, 2014. 海洋下部地殻への挑戦: 1256D 掘削孔での成果 (Exps 309/312/335). 月刊地球号外, **64**, 74-80.
2. Kaneko, K., Adachi, Y. and Miyashita, S., 2014. Origin of large wehrlitic intrusions found from Wadi Barghah to Salahi area in the northern Oman ophiolite. In Rollinson, H.R., Searle, M.P., Abbasi, I.A., Al-Lazki, A. and Al Kindi, M.H. (eds.), Tectonic Evolution of the Oman Mountains. *Geological Society, London, Special Publications*, **392**, 205–220, <http://dx.doi.org/10.1144/SP392.8>.
3. Kaya, T., Kasaya, T., Bulent Tank, S., Ogawa, Y., Kemal Tuncer, M., Oshima N., Honkura, Y. and Matsushima, M., 2013. Electrical characterization of the North Anatolian Fault Zone underneath the Marmara Sea, Turkey by ocean bottom magnetotellurics. *Geophysical Journal International*, **193**, 2, 664 – 677.
4. Kusano, Y., Adachi, Y., Miyashita, S. and Umino, S., 2012. Lava accretion system around mid-ocean ridges: Volcanic stratigraphy in the Wadi Fizeh area, northern Oman ophiolite. *Geochem. Geophys. Geosyst.*, **13**, Q05012, doi:10.1029/2011GC004006.
5. 澤 隆雄・笠谷貴史・八木原寛, 2011. 合成開口ソナーを用いた海底熱水噴出域のマッピング, 2011. 物理探査, **64**,

279-290.

6. Tominaga, M. and Umino, S., 2010. Lava deposition history in ODP Hole 1256D: Insights from log-based volcanostratigraphy. *Geochem. Geophys. Geosyst.*, **11**, Q05003, doi: 10.1029/2009GC002933.
7. Umino, S., 2012. Emplacement mechanism of off-axis large submarine lava field from the Oman Ophiolite. *J. Geophys. Res.*, **117**, B11210, doi:10.1029/2012JB009198.

[学会発表] (計 8 件)

1. Goto, T., Kasaya, T., Iwamura, N., Mikada, H., Takekawa, J., Sayanagi, K., 2013. Electromagnetic survey around the seafloor massive sulfide using autonomous underwater vehicle. The 11th SEGJ International Symposium, Yokohama.
2. Kasaya, T., Ichihara, H., Goto, T., 2013. Developing new magnetometer system for marine EM survey. The 11th SEGJ International Symposium, Yokosuka.
3. Miyashita, S. and Adachi, Y., 2013. Magma system along fast-spreading ridges controlled by segmentation: Evidence from the northern Oman ophiolite. EGU General Assembly 2013, Vienna.
4. Ozaki, Y., Bradford, J.H., Mikada, H., Goto, T. and Takekawa, J., 2013. The estimation of hydraulic conductivity structure by means of SP inversion to dipole pumping test data. The 11th SEGJ International Symposium, Yokohama.
5. Tani, M., Mikada, H., Goto, T., Takekawa, J. and Siripunvaraporn, W., 2013. Removability of galvanic distortion on 3-D MT inversion. The 11th SEGJ International Symposium, Yokohama.
6. Umino, S., Kusano, Y., Kanayama, K. and Kitamura, K., 2013. Emplacement processes of off-axis large submarine lava field in the Oman Ophiolite. IAVCEI 2013 Scientific Assembly, Kagoshima, Japan, 3H-P5.
7. Umino, S. and Okugawa, A., 2012. Insight Into the Thermal Structure of the Upper Oceanic Crust Using Crystal-size

Geothermometer—Method. AOGS - AGU (WPGM) Joint Assembly 2012, SE87-A008. (Invited)

8. Umino, S., 2011. Emplacement mechanism of submarine large sheet flows from the Oman Ophiolite. Abstracts of XXV IUGG General Assembly, Melbourne, IAVCEI - V07, #4636.

[その他]

ホームページ :

<http://earth.s.kanazawa-u.ac.jp/~umino/GiantLavaFlow/GiantLava.html>

#### 6. 研究組織

##### (1)研究代表者

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

##### (2)研究分担者

宮下純夫 (MIYASHITA, Sumio)

新潟大学・自然科学系・フェロー

岸本清行 (KISIMOTO, Kiyoyuki)

産業技術総合研究所・地質情報研究部門・研究員

研究者番号 : 70356872

石塚 治 (ISHIZUKA, Osamu)

産業技術総合研究所・地質情報研究部門・研究員

研究者番号 : 90356444

下司信夫 (GESHI, Nobuo)

産業技術総合研究所・地質情報研究部門・研究員

研究者番号 : 90356444

笠谷貴史 (KASAYA, Takafumi)

海洋研究開発機構・地震津波海域観測研究開発センター・主任技術研究員

研究者番号 : 90373456

##### (3)連携研究者

熊谷英憲 (KUMAGAI, Hidenori)

海洋研究開発機構・海底資源研究開発センター・主任技術研究員

研究者番号 : 10344285

後藤忠徳 (GOTO, Tadanori)

京都大学・大学院工学系研究科・准教授  
研究者番号 : 90303685