



海洋科学掘削によるマントル到達への挑戦
—地球最大のフロンティアに挑む—

低速拡大海嶺系の海洋下部地殻・上部マントル由来物質解析による海洋下部地殻の変遷とその重要性

針 金 由美子
森 下 知 晃

Evolution and importance of the lower oceanic crust inferred from the lower crust and upper mantle-derived rocks in the slow-spreading ridge system

Harigane Yumiko, Tomoaki Morishita

はりがね ゆみこ : 産業技術総合研究所
地質情報研究部門
もりした ともあき : 金沢大学理工学域地球社会基盤学類
地球惑星科学コース
/ 海洋研究開発機構

低速拡大海嶺系ではマントル深度まで達する大規模なデタッチメント断層によって海洋プレート深部起源物質が海洋底に露出した海洋コアコンプレックスが多く存在する。この岩体を精査することで低速拡大系における海洋下部地殻の構造と変遷を読み取ることができる。これまでの研究成果から、低速拡大系の海洋下部地殻・最上部マントルはこれまでの大規模マグマだまりの結晶化という静的な形成ではなく、小規模マグマなどに伴う様々な条件での既存岩石-メルト/流体の移動・反応による変遷が普遍的に起きており、メルト・流体フィルターとして重要な役割を担っていることがわかってきた。

1. はじめに

海洋プレートを生成する場である中央海嶺は世界の海洋底に分布する。この中で、拡大速度が両側拡大速度で 20-40 mm/year 程度である現在の低速拡大系の中央海嶺総延長は全体の 50% 程度の距離を占めている (例えば Sinha and Evans, 2004)。大西洋・インド洋は低速拡大海嶺系で形成された海洋である。

大西洋中央海嶺やインド洋海嶺といった低速拡大系における海洋プレート構造の模式図については Dick et al. (2006) などが提案している。アメリカやヨーロッパの研究者によって多くの海洋プレート構造に関連するドレッジ・Remote Operated Vehicle などによる研究航海が行われてきた (例えば Dick, 1989 ; Cannat, 1993 ; Tucholke and Lin, 1994 など)。さらに国際的な掘削科学プロジェクトである DSDP (Deep Sea Drilling Project) ~ ODP (Ocean Drilling Program) ~ IODP (Integrated Ocean Drilling Program/International Ocean Discovery Program) を通じて、海洋プレート物質解明を目的とした研究掘削が行われてきた (c.f., Michibayashi et al., 2019)。

海洋コアコンプレックスは低速拡大系の海洋下部地殻・マントルを構成していた物質が海洋底に露出している。玄武岩質の海洋地殻で構成される高速拡大系に比べて、低速拡大系に発達する海洋コアコンプレックスは得られることができない

海洋下部地殻・マントル起源の岩石群を得られる貴重な機会を与えてくれる。海洋プレートの深部を構成する海洋下部地殻であるはんれい岩は、陸上のオフィオライト研究から、大規模なマグマだまりの結晶化と解釈されてきた (Pallister and Hopson, 1981)。しかし、近年では中央海嶺の浅部に小規模なマグマだまりを形成、結晶化し下降するモデル (Quick and Denlinger, 1993)、小規模なマグマが様々な深さに貫入するシルの積み重ねモデル (Kelemen et al., 1997) の論争が続いている。このモデルはより深部への海水浸透が必要であるため、海洋プレート含水量の見積りに重要な海水到達深度とその制約条件の解明につながっている。低速拡大系における地殻・マントルの物質学的実態の解明はこれらの岩石群の形成、海水との反応、変形構造・レオロジー変化など多くの未解明問題への基礎情報となる。

本論では低速拡大系における海洋下部地殻の構造と変遷についてについて議論するため、最初に海洋コアコンプレックスの概要について説明する。次にここ数年の低速拡大系の海底地質調査や掘削航海から得られた海洋下部地殻由来の岩石群の知見について簡単にレビューする。なお、ここで紹介する大西洋中央海嶺やインド洋海嶺などの海洋コアコンプレックス研究結果の詳細については森下 (2017) や小原 (2012) が総説を出しているため、こちらもぜひ参照されたい。

2. 海洋コアコンプレックス

海洋コアコンプレックスは、低速拡大系にて1990年代後半から報告されてきた海洋下部地殻・マントル物質が海洋底にドーム状に露出する岩体を示し、その特徴から形成過程まで、全体を示す名称である (Escartín and Canales, 2011)。当初は、中央海嶺拡大軸と断裂帯の交差する場所に、ドーム状の地形の高まりとその表面には拡大軸と垂直な方向にコルゲーションと呼ばれる畝構造が見つかり、この畝構造が建築様式のマリオン構造に似ていたため、巨大なマリオン構造という意味でメガマリオン地形と名付けられた。その後の試料採

取でメガマリオン地形から海洋下部地殻・マントル物質であるはんれい岩とかんらん岩で構成されるマイロナイトやウルトラマイロナイトなどの断層岩が多く見つかったことから、こうした地形は火成作用があまり活動的でない拡大軸において、拡大軸近辺に発達した大規模正断層であるデタッチメント断層によって海洋下部地殻・マントル物質が露出したと解釈されている (Tucholke et al., 1998)。

その後、海洋コアコンプレックスは、大西洋、インド洋、カリブ海や北極海などといった、低速・超低速拡大系と四国海盆やパレスベラ海盆といった背弧拡大系にて発見・報告されてきた (一箇所だけ高速拡大軸でも発見されている) (Whitney et al., 2013)。また、海洋コアコンプレックスの核であるデタッチメント断層の発達によって、様々な地形的特徴が生じることも報告されている (detachment morphologies, Smith et al., 2014 ; chaotic morphology, Okino et al., 2004)。

また、海洋コアコンプレックスによる海洋地殻の形成は通常中央海嶺を対称中心として、玄武岩質の海洋地殻を形成する海底拡大様式とは異なる非対称的な拡大様式であることを意味する。この非対称拡大はこれまで報告されてきた対称的な拡大よりもマイナーな事象であると考えられてきた。しかし、Escartín et al. (2008) は約 2,500 km に及ぶ大西洋中央海嶺の海底調査から、対称的に拡大した地形よりも海洋コアコンプレックスを代表とする非対称的に拡大した地形の方が多いことを示し、非対称拡大が低速拡大系の中央海嶺では一般的な事象であることを明らかにした。加えて海洋コアコンプレックスは拡大軸周辺だけでなく、拡大軸から離れた断裂帯沿いや活動終了した拡大セグメント内でも発見されている (Cann et al., 2015)。このことは低速拡大系において海洋コアコンプレックスは、海洋下部地殻・マントル由来の岩石群が低速拡大系の海洋プレート上部に位置し、広く露出している可能性を示す。

3. 大西洋

大西洋中央海嶺において、海洋コアコンプレッ

クスと明確に示されていないものや地形的特徴から海洋コアコンプレックスと認定されたものを含めて、海洋下部地殻・マントル物質が露出する場所が数多く存在する (Escarín et al., 2008 ; Smith et al., 2014).

15°20' N 断裂帯周辺では大量のマントル物質が海底下に露出するような海洋プレートの構造解明を目的とした ODP Leg 209 (Kelemen et al., 2004) で行われ、Cannat (1993) で提案された海洋下部地殻を構成する代表的なはんれい岩が岩脈状もしくは small intrusive body としてマントル内に不均質に分布するような「magma starved」な海洋プレート構造のモデルが妥当であることを示した。Kelemen et al. (2004) では掘削孔から得られたかんらん岩やはんれい岩の量比と構造から、15°20' N 断裂帯周辺全体がマントル由来のかんらん岩で約 20-40% のはんれい岩類の貫入や周囲のかんらん岩-メルト反応によるはんれい岩化が生じていることを示している。

新鮮なかんらん岩の採取を目指して行われた IODP Expedition 304/305 は、30°N にある Atlantis 断裂帯と拡大軸の交差点に存在する海洋コアコンプレックスである Atlantis Massif で実施された。この Atlantis Massif の中心にある Central Dome の掘削において、かんらん岩ではなく 1.4 km もの連続的なはんれい岩層序を得ることに成功した (Blackmann et al., 2011)。Atlantis Massif で掘削されたはんれい岩層序は、はんれい岩から、Fe-Ti oxide gabbro、かんらん石はんれい岩、トロクトライト質はんれい岩、トロクトライト、かんらん石に富むトロクトライトまでの組成を持つ何百もの岩石ユニットで構成される。

Grimes et al. (2008) では、掘削孔 U1309D から得られたはんれい岩類(特に felsic なはんれい岩や Fe-Ti oxide gabbro) のジルコン U-Pb 年代解析から、最低でも 10-20 万年に及ぶはんれい岩類の付加がデタッチメント断層の下盤側に生じていたことを明らかにした。Grimes et al. (2008) はジルコン U-Pb 年代解析と岩石学的観察から少なくとも 2 つの大きな貫入活動の時期があったことと掘削孔

U1309D の上位と下位で年代が異なる (上位に若いはんれい岩、下位に古いはんれい岩) ことから、拡大軸下のランダムな深さでマグマが貫入しシルが形成される「multi sill」モデルを示唆した。

Godard et al. (2009) では、掘削孔 U1309 地点のはんれい岩類の全岩化学組成や鉱物化学組成の結果から、掘削孔 U1309 地点のはんれい岩類は一般的な中央海嶺玄武岩メルトからの集積岩と一致することを示した。ただし、掘削孔全体を通してこれらのはんれい岩類には系統だった層序構造がほとんど無いことから複数回のマグマ注入によって形成したことを示唆した。同時にかんらん石に富むトロクトライトは岩石-メルト反応により形成したという Drouin et al. (2010) による結果を支持している。Suhr et al. (2008) では掘削コアの下部に分布するかんらん石に富むトロクトライト・かんらん石はんれい岩・はんれい岩ノーライトの岩石学研究から、地殻-マントル遷移帯に相当する部分で厚さ数百 m のメルトが分化してはんれい岩層序を形成、その下部に新たにメルトが挿入・分化してはんれい岩を形成、ここで残存したメルトが周囲の岩石と反応してかんらん石に富むトロクトライトを形成するというモデルを提示した。Suhr et al. (2008) では初生的なはんれい岩から分化したはんれい岩までの組み合わせが掘削コアの浅部と深部に繰り返して産出すると解釈している。Ferrando et al. (2018) では Drouin et al. (2010) の研究成果を発展させ、かんらん石に富むトロクトライトはマントル物質であるハルツバージャイトに初生的な MORB メルトが流入し、直方輝石を溶解し、かんらん石の同化と斜長石・単斜輝石の結晶化が生じるような reactive porous flow process での岩石-メルト相互作用で形成したとした。このことは、かんらん岩 (マントル) がはんれい岩化 (地殻化) したといえ、地殻-マントル境界であるモホ面が火成活動にともなって変動するダイナミックな場であることを示唆する。

Kane 断裂帯周辺に発達している Kane Megamullion において、詳細な地質調査から、Dick et al. (2008) は Kane Megamullion を形成したデタッチメ

ント断層の下盤側に付加した海洋下部地殻の形成過程について議論し、オフィオライト研究で提案されてきた「通常の」玄武岩質の上部地殻とはんれい岩質の海洋地殻をもつ Penrose モデルではなく、「gabbro-pudding」モデルが低速拡大系の海洋地殻モデルに合っていることを示した。Kane Megamullion を構成する6つのドーム状地形の露頭観察や岩相比較から、マントルから供給されるメルトは海嶺セグメント内で局所化したマグマだまりに集中し、その場所で複合的なはんれい岩体を形成していることを示唆した。これらのはんれい岩体から外れると連続したはんれい岩層序は存在せず、マグマだまりから水平方向に供給された岩脈群の上に薄い枕状溶岩が覆っていると考えられる。また、Dick et al. (2008) は Kane Megamullion には少なくとも2つの独立したマグマだまりからなるはんれい岩体が存在し、これらは一つの2次拡大セグメントにおいて空間的・時間的にずれて存在していたことを明らかにした。これは火山活動の時間的な盛衰とも一致しており、マグマからはんれい岩体を形成するサイクルが一点に集中するというより、ある一定の時間スケールや空間スケールでもって各々発生することも示唆している。

4. インド洋

インド洋海嶺における海洋コアコンプレックスについては、南西インド洋海嶺にある Atlantis Bank が代表的である (Dick et al., 2019a, b; Ferrando et al., 2021)。また、中央インド洋海嶺からは中速拡大海嶺ではあるが 25°SOCC (Morishita et al., 2009) が報告されている。

Atlantis Bank は日本・欧米の調査船による地質調査に加え、これまで3度の掘削 (ODP Leg 118, 176 と IODP Expedition 360) が実施され、最長で約 1.5 km の連続したはんれい岩類 (Hole 735B) を採取した (詳しくは Dick et al., 2019a, b を参照)。この岩体は拡大軸からは 73 km ほど南に位置し、Atlantis II 断層帯沿いに ~ 600 km² の規模のはんれい岩類を主とする。Atlantis Bank はその表面にデタッチメント断層運動に関連した断層岩、内部に

はんれい岩類が分布する。Atlantis Bank におけるはんれい岩はかんらん石はんれい岩や oxide-rich gabbro から構成され、多数の microgabbro, felsic vein やまれに diabase dike によって切られている。露頭観察や岩石学的研究の結果から、地殻の組成と厚さは垂直方向と海嶺方向に対して大きく変動しているが、はんれい岩層序の連続性が拡大方向に対して平行に存在していることが明らかになった (Dick et al., 2019a)。また、初生的なはんれい岩がほとんどなく、貫入してきた間隙メルトとはんれい岩が反応した痕跡 (Lissenberg and MacLeod, 2017) やメルトが介在した結晶塑性変形の痕跡が多いことから、こうした層序は大規模なマグマだまりでの結晶沈降作用では説明できないとし、周期的なメルトの貫入、間隙メルトの大規模な上昇移動や高温-超高温下での結晶塑性変形を伴う tectonic extension が連続的に生じる「dynamic accretion」の結果であることを示唆した (Dick et al., 2019a, b)。

Ferrando et al. (2021) では IODP Expedition 360 の掘削孔 U1473A から得られたかんらん石はんれい岩を使って、初期マグマ形成史における圧密・メルト移動・集積の関係について議論している。かんらん石はんれい岩を構成する斜長石やかんらん石の粒径と結晶方位の関係から、クリスタルマッシュの段階からメルトに乏しくなる段階まで弱い圧密が継続したこと、この過程がクリスタルマッシュからのメルト抽出と分離した melt-rich zone の形成・細粒粒子の結晶化に寄与したことを示唆した。圧密過程は全体のクリスタルマッシュのような大きなスケールでのメルト移動に大きく関与しないものの、海洋下部地殻の局所的な化学組成・粒径の不均質性を引き起こすことを示す。

5. 低速拡大系の海洋下部地殻物質が明らかにする海洋下部地殻の役割と重要性

海洋コアコンプレックスによる海洋下部地殻・マントル物質が海洋底に露出することで、海洋下部地殻の構造についての物質科学的な研究が進んできた。これらの研究結果から、低速拡大系における海洋下部地殻の構造は、高速拡大系にあるよ

うな大規模マグマだまりを介したはんれい岩の連続的な層序の形成はまれで、むしろ小規模マグマだまりからはんれい岩が形成し、このはんれい岩へ後期に形成されたメルトが浸透し、新たに反応することによって、既存のはんれい岩が改変し、多様なはんれい岩層序を形成することがわかってきた。

さらにマントル物質とメルトの反応によって形成したトロクトライトのようにマントル物質の地殻化も含め、海洋下部地殻はマグマだまりからの結晶集積のみにとどまらず、周期的に貫入するメルトによる物質的な変化やマグマの化学組成にも影響を与えることは明らかである。同時にこうした現象は中央海嶺から島弧へと環境変遷する際にも起きていることが予想される。

通常、海洋上部地殻である玄武岩の化学組成から、マントルの熔融度（プレート生産量）を推定する。もし、はんれい岩層で玄武岩質メルト組成が変化するならば、海洋プレートの生産率（マグマ源熔融度）・プレート構成岩石種と量に関する海洋プレートの根本的な“常識”を再検討する必要が出てくるかもしれない。そして、はんれい層のメルト・流体反応素過程とその絶対量（メルト・流体フィルター性能）の評価結果（海水浸透深度、含水形態の検討）は、海洋プレート含水量推定にも新しい制約条件を与えるだろう。

謝辞：本稿を執筆する機会を与えていただいたマントル掘削ワーキンググループの皆さま、特に金沢大学の海野進博士、JAMSTECの稲垣史生博士、肖楠博士に深く感謝いたします。

参考文献

[1] Blackman et al., 1998. Origin of extensional core complexes: Evidence from the Mid-Atlantic Ridge at Atlantis Fracture Zone. *Journal of Geophysical Research* 103, 21315-21333.
[2] Blackman et al., 2011. Drilling constraints on lithospheric accretion and evolution at Atlantis Massif, Mid-Atlantic Ridge 30 degrees N. *Journal of Geophysical Research*, 116, B07103.
<https://doi.org/10.1029/2010JB007931>

[3] Cann et al., 2015. Tectonic evolution of 200 km of Mid-Atlantic Ridge over 10 million years: Interplay of volcanism and faulting. *Geochemistry Geophysics Geosystems*, 16, 2303-2321, doi:10.1002/2015GC005797.
[4] Cannat, 1993. Emplacement of mantle rocks in the seafloor at mid-ocean ridges. *Journal of Geophysical Research* 98:4,163-4,172, <https://doi.org/10.1029/92JB02221>.
[5] Dick et al., 2006. Past and future impact of deep drilling in the oceanic crust and mantle. *Oceanography* 19 (4):72-80, <https://doi.org/10.5670/oceanog.2006.06>.
[6] Dick et al., 2008. Plutonic foundation of a slow-spreading ridge segment: The oceanic core complex at Kane Megamullion, 23°30'N, 45°20'W. *Geochemistry Geophysics Geosystems*, 9, doi: 10.1029/2008GC002063.
[7] Dick, 1989. Abyssal peridotites, very slow spreading ridges and ocean ridge magmatism. Pp. 71-105 in *Magma-tism in the Ocean Basins*. A.D. Saunders and M.J. Norry, eds, Geological Society Special Publication London, vol. 42, <https://doi.org/10.1144/GSL.SP.1989.042.01.06>.
[8] Dick et al., 2019a. The Atlantis Bank Gabbro Massif, Southwest Indian Ridge. *Progress in Earth and Planetary Science*, 6(1), 1-70.
[9] Dick et al., 2019b. Dynamic accretion beneath a slow-spreading ridge segment: IODP Hole 1473A and the Atlantis Bank Oceanic Core Complex. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 124(12), 12631-12659.
[10] Drouin et al., 2010. A microstructural imprint of melt impregnation in slow spreading lithosphere: Olivine-rich troctolites from the Atlantis Massif, Mid-Atlantic Ridge, 30 N, IODP Hole U1309D. *Geochemistry Geophysics Geosystems*, 11(6), doi.org/10.1029/2009GC002995.
[11] Escartin and Canales, 2011. Detachments in oceanic lithosphere: Deformation, magmatism, fluid flow, and ecosystems (Conference report). EOS, Transactions American Geophysical Union, 92, doi.org/10.1029/2011EO040003
[12] Escartín et al., 2008. Central role of detachment faults in accretion of slow-spreading oceanic lithosphere. *Nature*, 455 (7214), 790-794. <https://doi.org/10.1038/nature07333>
[13] Ferrando et al., 2018. Melt transport and mantle assimilation at Atlantis massif (IODP site U1309): Constraints from geochemical modeling. *Lithos*, 323, 24-43.
[14] Ferrando et al., 2021. Role of compaction in melt extraction and accumulation at a slow spreading center: Microstructures of olivine gabbros from the Atlantis Bank (IODP Hole U1473A, SWIR). *Tectonophysics*, 815, 229001.
[15] Godard et al., 2009. Geochemistry of a long in-situ section of intrusive slow-spread oceanic lithosphere: Results from IODP Site U1309 (Atlantis Massif, 30°N Mid-Atlantic-Ridge). *Earth and Planetary Science Letters*, 279 (1-2), 110-122.
[16] Kelemen et al., 2004. Proceedings of the Ocean Drilling Program, Initial Reports., 209: College Station, TX (Ocean Drilling Program). doi:10.2973/odp.proc.ir.209.2004.
[17] Kelemen et al., 1997. Geochemistry of gabbro sills in

the crust-mantle transition zone of the Oman ophiolite: implications for the origin of the oceanic lower crust. *Earth and Planetary Science Letters*, 146, 475-488.

[18] Lissenberg and MacLeod, 2017. A reactive porous flow control on mid-ocean ridge magmatic evolution. *Journal of Petrology*, 57, 2195-2219.

[19] Michibayashi et al., 2019. What lies beneath: The formation and evolution of oceanic lithosphere. *Oceanography*, 32 (1):138-149, <https://doi.org/10.5670/oceanog.2019.136>.

[20] Morishita et al., 2009. Igneous, Alteration and Exhumation Processes Recorded in Abyssal Peridotites and Related Fault Rocks from an Oceanic Core Complex along the Central Indian Ridge, *Journal of Petrology*, 50, 7, 1299-1325, <https://doi.org/10.1093/petrology/egp025>

[21] 森下 2017. 中央海嶺産海洋プレート深部起源岩石掘削の成果と展望. *地質学雑誌*, 123:185-205, <https://doi.org/10.5575/geosoc.2016.0063>.

[22] 小原 2012. 背弧海盆における海洋コアコンプレックスの発達: 最近のゴジラメガムリオン研究から分かってきたこと. *岩鉱*, 41, 193-202.

[23] Okino et al., 2004. Development of oceanic detachment and asymmetric spreading at the Australian - Antarctic Discordance. *Geochemistry Geophysics Geosystems*, 5(12).

[24] Pallister and Hopson, 1981. Samail ophiolite plutonic suite: Field relations, phase variation and layering and a model of a spreading ridge magma chamber. *Journal of Geophysical Research*, 86, 2661-2672.

[25] Quick and Denlinger, 1993. Ductile deformation and the origin of layered gabbro in ophiolites. *Journal of Geophysical Research*, 98, 14015-14027.

[26] Sinha and Evans, 2004. Geophysical constraints upon the thermal regime of the ocean crust. Washington DC American Geophysical Union Geophysical Monograph Series, 148, 19-62.

[27] Smith et al., 2014. Development and evolution of detachment faulting along 50 km of the Mid-Atlantic Ridge near 16.5 degrees N. *Geochemistry Geophysics Geosystems*, 15, 4692-4711. <https://doi.org/10.1002/2014GC005563>

[28] Suhr et al., 2008. Stacked gabbro units and intervening mantle: A detailed look at a section of IODP Leg 305, Hole U1309D. *Geochemistry Geophysics Geosystems*, 9(10).

[29] Tucholke, B.E., and J. Lin. 1994. A geological model for the structure of ridge segments in slowspreading ocean crust. *Journal of Geophysical Research* 99:11,937-11,958, <https://doi.org/10.1029/94JB00338>.

[30] Tucholke et al., 1998. Megamullions and mullion structure defining oceanic metamorphic core complexes on the Mid-Atlantic Ridge. *Journal of Geophysical Research* 103, 9857-9866.

