



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—

海洋地殻の構造と進化： 高速拡大海嶺系

海野 進
草野 有紀
宮下 純夫
足立 佳子

**Architecture and Evolution of the Oceanic
Crust: Fast-spreading ridge system**

**Umino Susumu, Kusano Yuki, Miyashita
Sumio, Adachi Yoshiko**

うみのすすむ : 金沢大学
くさの ゆき : 産業技術総合研究所
みやした すみお : 新潟大学名誉教授,
北海道総合地質研究センター
あだち よしこ : 電力中央研究所

MoHole To Mantle マントル掘削計画の主要な目的の一つは、実質的にプレート拡大を担っている地殻がどのように形成され、拡大していくかを明らかにすることである。地殻の拡大に対して付加したマグマ量の割合によって地殻の拡大の仕方は変化し、異なる地殻構造がつくられる。マグマ供給率の高いセグメント中心では主に噴出岩からなる薄い上部地殻と、ハイパーソリダスで変形した厚い下部地殻ガプロを生じる。セグメント端では岩脈群が厚く発達し、層状ガプロでできた薄い下部地殻を生じる。

1. はじめに

IODP 805- MoHole To Mantle (M2M) マントル掘削計画は、構造的に乱されていない海洋底を掘削し、地殻～モホ面を貫通し、人類史上初めてその場にある対流するマントル物質の回収を目指している(草野・海野, 2013)。同計画では太平洋のハワイ沖、バハカリフォルニア沖、コスタリカ沖の3カ所を候補地に挙げている。その理由は太平洋の海底が比較的均質で、地球の全海底の50%を占めることから、1本の掘削孔で得られる海洋地殻～最上部マントル断面を代表と見なせるからである。さらに太平洋下のプレートは対流するマントルの一部として海溝から地球深部に沈み込み、大気・海洋と地球内部とのエネルギー・物質の大循環を通じて、表層環境と地球内部の物質の進化を促進してきた。対流するマントルは、生命の源であり地球温暖化の要因ともなる炭素や水などの揮発成分の地球最大のリザーバーであり、その地球規模の大循環を解明する上で、対流するマントルの理解はきわめて重要である。

プレートの拡大速度にかかわらず、海洋地殻の平均厚さは6 kmである(Christeson *et al.*, 2019)。掘削候補地の水深3.5～4.3 kmを加えると9.5～10.3 kmとなり、「ちきゅう」で稼働可能なドリルパイプの総延長を12 kmとすると、掘削できるマントルはモホ面下1～2 kmとなる。すなわち、マントルへの道のりの大部分は地殻が占めている。地殻を構成する岩相や構造は、拡大速度や海嶺軸セ

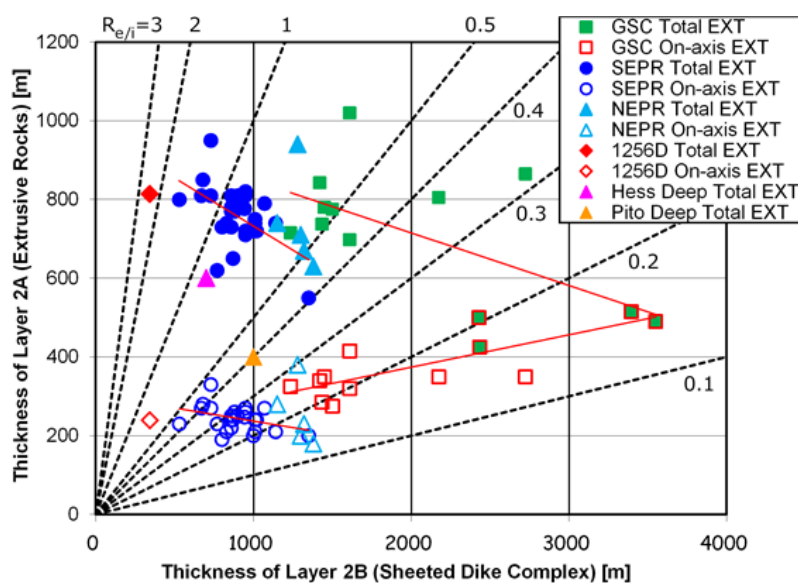


図1 中速拡大海嶺 (ガラパゴス海嶺: GSC) と高速拡大海嶺 (東太平洋海膨 14-20°S: SEPR, 9°N: NEPR; ODP1256D孔; ヘスディーブ; ピトディーブ) の海嶺軸上と全ての第2A層 (噴出岩) と第2B層 (シート状岩脈群) の厚さの関係. 地震波反射法データはHooft *et al.* (1997) と Blacic *et al.* (2004) による. 破線の数値は $R_{e/i} = 2A/2B$ (全噴出岩/岩脈群) 層厚比.

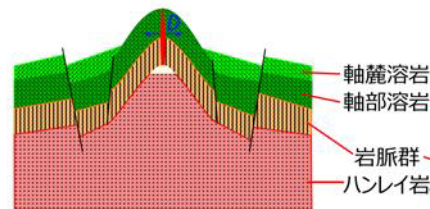
グメント内の位置に応じて変化する (海野・草野, 2021). プレート拡大の担い手である地殻の拡大量に対して付加したマグマ量の割合, M の値に依存して地殻の拡大の仕方が変わるために, 異なる地殻構造がつけられ, それが地形的な特徴の違いとして現れる (Buck *et al.*, 2005). しかし, 海洋地殻深部の露出は限られており, 直接観察できるケースはわずかである. そのため, 地震波速度や重力観測に基づく物理的な地殻構造が, 実際の岩相や岩石物性とのように対応し, 地質構造に対比されるのか, よくわかっていない. 海嶺軸では地殻はマグマの固化による生成と同時にプレート拡大に伴う変形を受け, 断層や開口亀裂に沿った流体との反応・変質を受ける. 流体-岩石反応を通じた変質作用は海嶺軸から離れた場所でも断続的に起こり, 地殻の地球化学的進化を促進する (Umino *et al.*, 2021; 海野ほか, 本号外). この海洋地殻の構造を規制する要因と形成・進化のプロセスの解明も, マントル掘削の重要な目的の一つである.

本小論では, 主として高速拡大海嶺における海洋地殻の構造と形成プロセスを中心に紹介する.

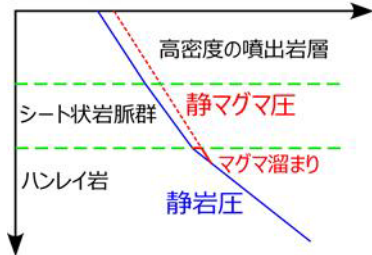
2. 上部地殻の構造を決めるもの

高速拡大 (11 - 14 cm/年) する東太平洋海膨と中速拡大 (4.9 - 5.5 cm/年) するガラパゴス海嶺に沿った地震波構造探査によると, マグマ溜まりが深いほど, また海洋地殻第2B層が厚いほど, 上部地殻が厚く, 下部地殻が薄くなる (図1) (Hooft *et al.*, 1997; Blacic *et al.*, 2004; 海野・草野, 2021). 海洋地殻第2A層, 2B層はおよそ噴出岩と岩脈群に対応すると考えられる. 高速拡大海嶺では, $2A/2B$ 層厚の比, すなわち噴出岩 / 岩脈群の層厚比 $R_{e/i}$ は概ね 0.4 よりも高い. これは高密度の上部地殻の荷重によってマグマ溜まりに常に高い余剰圧がかかっているため, 拡大イベントの度に容易に噴火に至り, 大量の溶岩が噴出して軸麓に厚く堆積するからである (図2). このように地殻はマグマの貫入・付加によってのみ拡大し, $M = 1$ となる. これに対して中速拡大した上部地殻は, マグマよりも低密度の噴出岩層の下位に高密度の岩脈群がくる密度成層のために, 見かけの浮力の中立点が存在する. マグマ溜まりから上昇するマグマは浮力の中立点にトラップされて, シート状岩脈群を発達させる. そのため, 噴出岩層は断層に

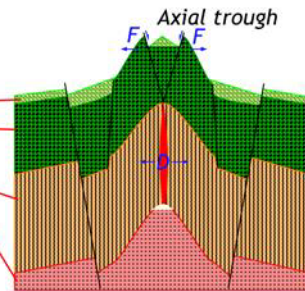
(a) 高速拡大 $M=1$, 高 $R_{e/i}$
東太平洋海嶺



- * シート溶岩 ≫ 枕状溶岩
- * 噴出岩層厚: 軸麓 ≧ 軸部
- * 層厚: 噴出岩 > 岩脈群
- * 厚い下部地殻ハンレイ岩



(b) 中速拡大 $M<1$, 低 $R_{e/i}$
ココス海嶺, ガラパゴス海嶺



- * 枕状溶岩 ≫ シート溶岩
- * 噴出岩層厚: 軸部 ≧ 軸麓
- * 層厚: 岩脈群 > 噴出岩
- * 薄い下部地殻ハンレイ岩

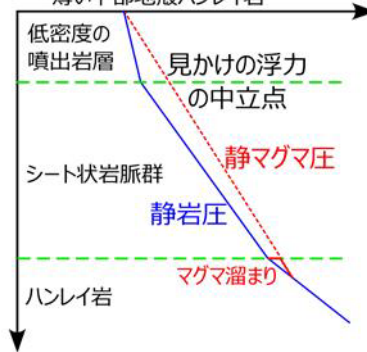


図2 地殻の拡大に占めるマグマ供給量の比率 M と海洋地殻構造の関係。(a) 拡大速度に比してマグマ供給率が高い ($M=1$) 高速拡大海嶺や中速拡大海嶺のセグメント中心では、比較的高密度で薄い上部地殻と高い噴出岩/岩脈群層厚比 $R_{e/i} > 0.4$ を示す。(b) マグマ供給率が相対的に低いセグメント端では、 $M < 1$, $R_{e/i} < 0.6$ となり、上部地殻は厚くなり、岩脈群が発達する。

よって拡大し、それより下の地殻はマグマの貫入・付加によって拡大することになり、 $M < 1$, $R_{e/i}$ はおよそ 0.6 以下となる。

上部地殻の荷重バランスを考えると、噴出岩 / 岩脈群の層厚比 $R_{e/i}$ は、噴出岩、岩脈群、マグマの密度をそれぞれ ρ_e , ρ_b , ρ_m とし、

$$R_{e/i} = (\rho_e - \rho_m) / (\rho_m - \rho_e)$$

で与えられる。発泡していないマグマおよび岩脈の密度には鉄の含有量の違いが最も効く。ODP 504B 孔および 1256D 孔のデータによると、観察されるマグマ組成の変動の範囲内では密度変化はせいぜい 1% で、 $R_{e/i}$ はほとんど変化しない(海野・草野, 2021)。一方、噴出岩層は拡大速度が遅い海嶺ほど高密度のシート溶岩に比して、枕状溶岩や火砕岩の出現頻度が高く、マグマ溜まりは深く、

岩脈群は厚く発達する(図2)。従って、マグマ溜まりが深くなるほど $R_{e/i}$ 比が低下するのは、噴出岩層の全岩密度が低くなるためと考えられる(図1)。

以上のように、中・高速拡大海嶺下のマグマ溜まりの深さは、上部地殻の構造と密接な関係にある。マグマ溜まりの深さは、マグマ供給によってもたらされる熱量と熱水循環によって冷やされる熱量のバランスで規制されると考えられる(Phipps-Morgan and Chen, 1993)。高速拡大海嶺ではマグマ溜まり深度は拡大速度と概ね相関するが、7 cm/年以下の拡大速度ではマグマ溜まり深度の変動幅が大きく、あまり相関しなくなる(海野ほか, 本号外)。これは、熱水循環の効率を決める地殻中の断層や亀裂の発達、単純に拡大速度に依存するわけではなく、地殻の拡大の仕方を決める M の値によって規制されているからである。

同じ拡大速度を有する一つの海嶺軸セグメント内でも、セグメント中心と端とではマグマ供給率が違うために M 値が異なり、それがマグマ溜まり深度や地殻構造の違いとして現れる。高速拡大する東太平洋海膨では同一セグメント内でのマグマ溜まり深度の差は小さいが、中速拡大のガラパゴス海嶺では大きく変化する。セグメント中心では高速拡大軸のように断層が発達せず、中軸トラフがないか、あっても浅い。セグメント端では中軸トラフの深さが 200 m 以上にもなり、軸部で流出した溶岩をトラップして厚い第 2A 層をつくる (Blacic *et al.*, 2004)。このように M 値に応じて地殻の拡大の仕方が決まり、異なる地殻構造を生じる。その構造に依存して流体経路の発達の程度と冷却効率が決まり、マグマ溜まり深度が制約される。

3. 下部地殻の構造と形成プロセス

高速拡大海嶺下の地震波トモグラフィーによれば、上部地殻の直下には地震波反射面として検出されるメルトレンズがあり、その下には深さ、幅ともに数 km に渡って部分溶融体が広がっている。部分溶融体の下方に向けてメルト量は急減し、下半部で 10% 以下となるマグマ溜まり像が描かれている (Dunn *et al.*, 2000)。マグマ溜まり頂部のメルトレンズは海嶺軸に沿って膨縮し、セグメント中心で浅所に厚く拡がり、セグメント端では深所で薄くなったり、途切れたりする (Toomey *et al.*, 1990 ; Kent *et al.*, 1993 など)。部分溶融したマグマ溜まりは側方で固化して下部地殻に付加し、その荷重で地殻を下方に撓ませることで正断層を発生し、軸麓にかけて深海丘 abyssal hill を発達させる (Buck, 2001)。プレート拡大に伴って地殻とマントルアセノスフェアは海嶺軸から離れるように移動し、部分溶融したマグマ溜まりは必然的に変形・流動しつつ、固化していく。これは静的な状態で固化した大陸の層状深成岩体とは決定的に異なる環境であり、高速拡大海嶺下のマグマ溜まりに特有のダイナミックなプロセスである (図 3)。

このように海嶺軸下のマグマ溜まりの規模やおよその部分溶融度については物理観測によって制

約が与えられたが、詳細な内部構造や固化するまでのプロセスについては議論が続いている。特に高速拡大系の下部地殻深成岩体は露出が少なく、ごく一部しか直接調べることができていない。そこで、一種の高速拡大系で生じたと考えられるオマーンオフィオライトの下部地殻ガブロについて精力的な研究が行われてきた。そこでは定向配列した鉱物による cm ~ 数 10 m スケールの褶曲やスランプ状の構造が見られるにもかかわらず (図 3b, c, d)、結晶格子の歪みが小さいガブロが普遍的に存在し、メルトが介在した状態で大規模なハイパーソリダス変形を被ったと考えられている。Nicolas and Boudier (2015) は海嶺軸下の結晶マッシュが地殻・マントルの拡大によって沈降し、流動に伴う変形を被り、最終的に側方へ流れて下部地殻として固化すると考えた。このようなマグマ溜まり形成プロセスはガブロ氷河 Gabbro glacier モデルと呼ばれている。

一方、オマーンの下部地殻最下部~マントルとの境界にかけては、マフィック鉱物とフェルシク鉱物の量比の違いがつくるモード層状構造 modal layering が発達した層状ガブロが見られる。Kelemen and Aharonov (1998) はマントルから下部地殻へと浸透流として上昇するメルトが、部分溶融体の中に生じた浸透率障壁に遮られたために、シルとなって固化して層状ガブロになったと考えた (図 4)。これはシーティッドシル Sheeted sill モデルと呼ばれている。下方からシルへのメルト供給が継続すると、シル内のマグマ圧が上昇するために斜長石の安定領域がカンラン石、単斜輝石に対して相対的小さくなるとともに、リキダスが上昇する。その結果、マグマは過冷却状態となってカンラン石の晶出が起きる。シル内の結晶化に伴ってメルト組成が分化すると、やがて斜長石~単斜輝石が晶出するようになる。そうこうするうちにマグマの余剰圧がシル天井の引張強度を上回ると、天井が破壊し、ほぼ全ての残液は排出され、マッシュ中の亀裂や浸透流となって上昇していく。マグマ圧の低下によって亀裂が閉じると、下方からのメルト供給によって再びメルト

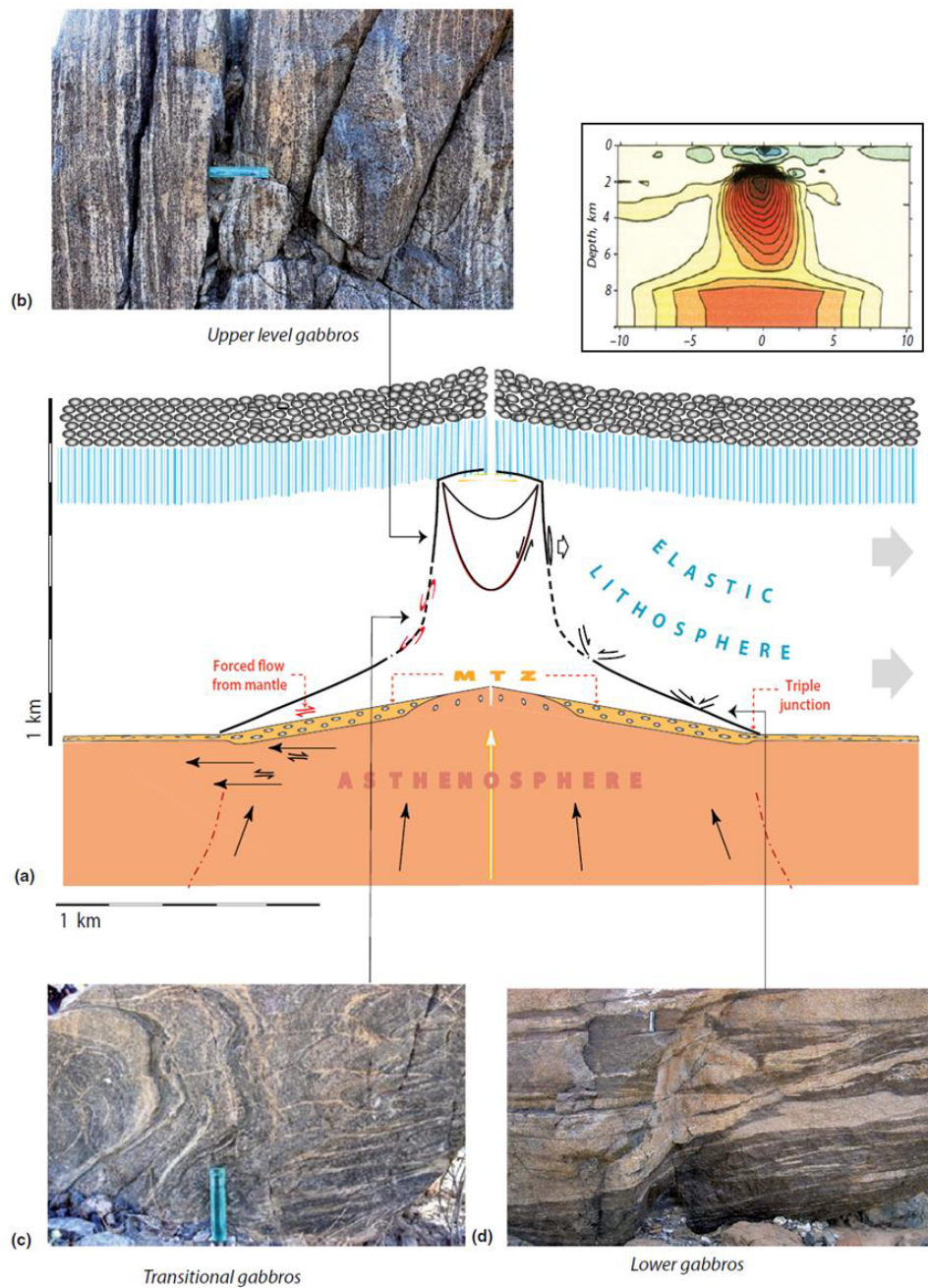


図3 オマーンオフィオライトのマグマ溜まりモデル (Nicolas and Boudier, 2015) . 海嶺軸直下のマグマ溜まりを占める結晶マッシュは、地殻・マンツルの側方への移動・拡大によって沈降・流動し、ハイパーソリダス変形を被り、側方へ流れて固化し、下部地殻の一部となる.

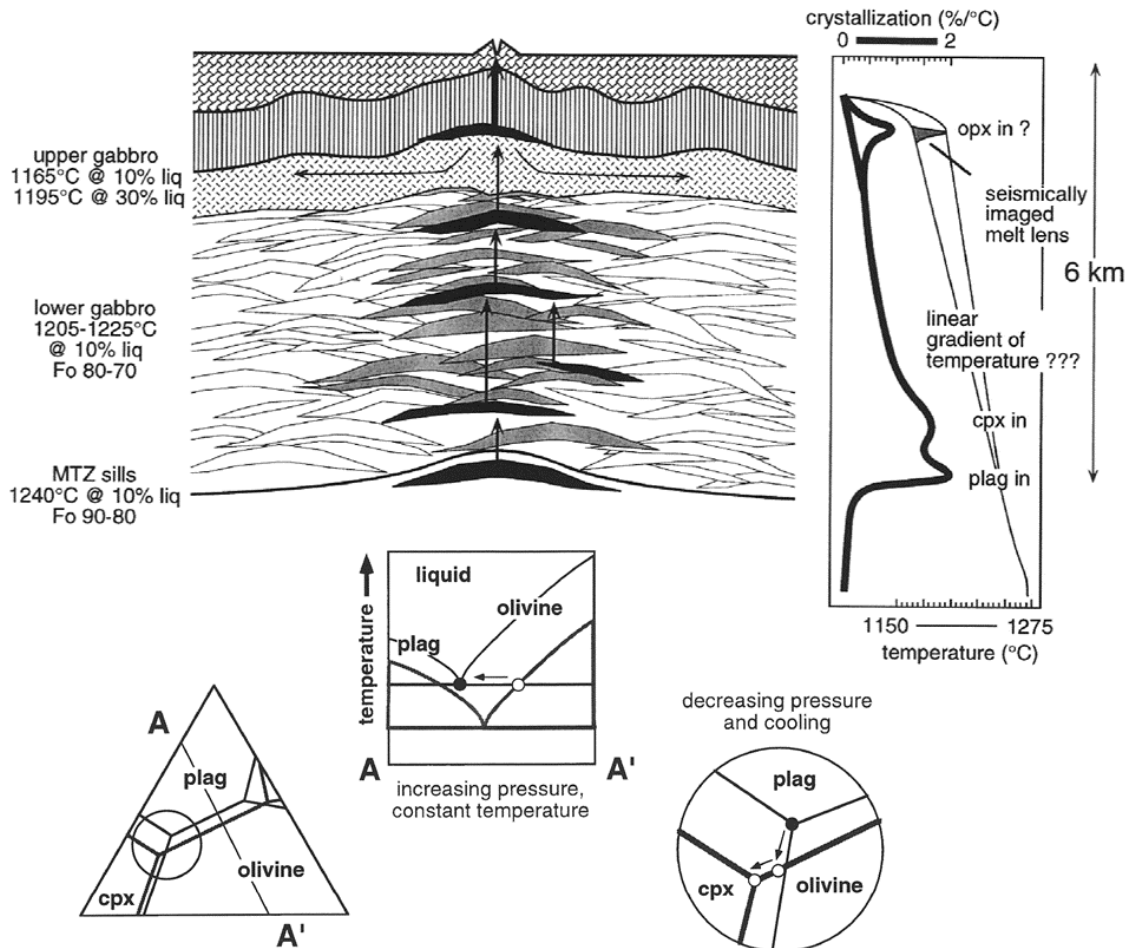


図4 オマーンオフィオライトのマグマ溜まりモデル (Kelemen and Aharonov, 1998) . 海嶺軸直下のマグマ溜まり中に浸透率障壁が形成されると、その下にメルトが滞留してシルとなる。シル内のマグマ圧の上昇によって相関係が変化し、結晶化が促進され、モード層状構造をつくる。シル中のマグマ余剰圧が天井の破壊強度を超えると、メルトが一気に排出され、やがて層状ガブロとして固化する。

シルが形成される。このプロセスの繰り返しによって、モード層状構造が形成される。Kelemenらは、高速拡大海嶺における地殻生産率にもとづく簡単なモデル計算から、複数のシル形成が同時に進行したと推定している。彼らによればマグマ溜まり頂部のメルトレンズも最大のシルの一つである。

ガブロ氷河とシーティッドシルはそれぞれマグマ溜まりモデルの端成分であっても、互いに排他的なわけではない。McLennan *et al.* (2005) は熱収支計算によって、純粋なシーティッドシルモデ

ルでは東太平洋海膨近傍の熱流量と海底の沈降量を同時に満足させることはできないことを示した。彼らはガブロ氷河、あるいはガブロ氷河とシーティッドシルを組み合わせたハイブリッドなマグマ溜まりが妥当であると結論した。オマーンオフィオライトでは下部地殻上部にはハイパーソリダス変形構造が卓越し、顕著なモード層状構造を欠くフォリエーティッド Foliated ガブロが分布し、下部はモード層状構造が発達した層状ガブロからなる。フォリエーティッドガブロ中では集積

鉍物の間隙メルト量が数%以上あり、オーソ集積岩やメゾ集積岩の組織を示すのに対し、層状ガブロでは間隙メルト量が少ないアド集積岩であることが多い(海野ほか, 2021)。従って、上部はガブロ氷河、下部はシーティッドシルからなるハイブリッドなマグマ溜まりであったと考えられる(Kellemen and Aharonov, 1998; Nicolas and Boudier, 2015)。マグマ溜まり頂部のメルトレンズの底で晶出した集積鉍物層はモード層状構造をつくるが、ガブロ氷河として沈降・流動する間に層状構造は変形・破壊されてフォリエーティッドガブロとなる。ただしフォリエーティッドガブロの層準にも局所的にモード層状構造が発達した部分が出現する。Nicolasらはマグマ溜まり側面の固化フロント(ガブロとの境界)付近で浸透率障壁が生まれ、メルトシルを形成したと説明した。問題は、ガブロ氷河とシーティッドシルのそれぞれがどのように分布し、それが何によって決まるのか、ということである。これまでのわれわれの野外調査によると、古海嶺軸セグメントの中心と考えられるワジスクバ Thuqbah やワジギデア Gideah ではフォリエーティッドガブロが厚く、層状ガブロが薄い、セグメント端のワジサダム Sadam では層状ガブロが厚く発達する。すなわち、セグメント中心ではマグマ供給率が高いため地温勾配が高く、間隙メルト量が多いマッシュが厚く発達する(Perk *et al.*, 2007)。一方、セグメント端ではマグマ供給率が低いため冷却が進み、下部地殻中に間隙率障壁を生じてシルを形成しやすかったと考えられる。

4. おわりに

上記のマグマ溜まりモデルはもっぱら(超)高速拡大したとされるオマーンオフィオライトでの観察にもとづいたものである。 $M < 1$ となる中速拡大海嶺では、セグメント端で見られるような地殻構造がセグメント中心に出現することが期待される。であるならば、果たして下部地殻はもっぱら層状ガブロからなるのであろうか。低速拡大海嶺に出現するメガムリオンの露頭観察や深海掘削

の結果では層状ガブロは存在せず、もっぱら分化した不均質な塊状ガブロが分布する(針金, 本号外)。これより低速海嶺下のマグマ溜まりは不均質なマッシュ状であると予想される。間欠的にマグマが供給された時期にのみマグマ溜まりは形成され、下部地殻は貫入時期の異なるいくつもの深成岩体からなる複合岩体となっている(Magde *et al.*, 2000)。このことから中速拡大海嶺ではマントルからのメルト供給が間欠的になるにつれて、部分熔融したマッシュ領域は小さくなり、メルトシルの形成も間欠的となり、従って層状ガブロは発達しにくいと思われる。高速から中速拡大への遷移領域で、どのような下部地殻構造が形成されているのか、将来のマントル掘削によって詳らかになることを期待したい。

謝辞: 本号外を企画・編集した海洋研究開発機構のマントル掘削プロモーション室の皆様には執筆の機会を与えていただいた。ここに謝意を表します。

参考文献

- [1] Blacic, T. M., Ito, G., Canales, J. P., Detrick, R. S. and Sinton, J., 2004. Constructing the crust along the Galapagos Spreading Center 91.3°-95.5°W: Correlation of seismic layer 2A with axial magma lens and topographic characteristics. *J. Geophys. Res.*, 109, B10310, doi:10.1029/2004JB003066p.
- [2] Buck, W. R., 2001. Accretional curvature of lithosphere at magmatic spreading centers and the flexural support of axial highs. *J. Geophys. Res.*, 106, 3953-3960.
- [3] Buck, W. R., Lavier, L. L. and Poliakov, A. N. B., 2005. Modes of faulting at mid-ocean ridges. *Nature*, 434, 719723.
- [4] Christeson, G. L., Goff, J. A., and Reece, R. S., 2019. Synthesis of oceanic crustal structure from two-dimensional seismic profiles. *Reviews of Geophysics*, 57, <https://doi.org/10.1029/2019RG000641>.
- [5] Dunn, R. A., Toomey, D. R., and Solomon, S. C., 2000. Three-dimensional seismic structure and physical properties of the crust and shallow mantle beneath the East Pacific Rise at 9°30'N. *J. Geophys. Res.*, 105, 23537-23555.
- [6] 針金由美子・森下知見, 2022. 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. 号外地球, 72 (本特集), 48-53.
- [7] Hooft, E. E. E., Detrick, R. S. and Kent, G. M., 1997. Seismic structure and indicators of magma budget along the southern East Pacific Rise. *J. Geophys. Res.*, 102, 2731927340.

- [8] Kelemen, P. B., and Aharonov, E. 1998. Periodic formation of magma fractures and generation of layered gabbros in the lower crust beneath oceanic spreading ridges. *AGU Geological Monograph*, 106, 267-289. AGU, USA.
- [9] Kent, G. M., Harding and M. C., Orcutt, 1993. Distribution of magma beneath the East Pacific Rise between the Clipperton Transform and the 9°17'N Deval from forward modeling of common depth point data. *J. Geophys. Res.*, 98, 13945-13969.
- [10] 草野有紀・海野進 (訳) 海野進・ケンニールソン・バーナードウッド, 2013. 月より遠いマントルへの道. *パリティー*, 29, 4-11. 丸善出版, 東京.
- [11] Magde, L. S., Barclay, A. H., Toomey, D. R., Detrick, R. S. and Collins, J. A., 2000. Crustal magma plumbing within a segment of the Mid-Atlantic Ridge, 35°N. *Earth Planet. Sci. Lett.*, 175, 55-67.
- [12] Nicolas, A., and Boudier, F., 2015. Review Structural contribution from the Oman ophiolite to processes of crustal accretion at the East Pacific Rise. *Terra Nova*, 27, 77-96, doi: 10.1111/ter.12137.
- [13] Perk, N. W., Coogan, L. A., Karson, J. A., Klein, E. M. and Hanna, H. D., 2007. Petrology and geochemistry of primitive lower oceanic crust from Pito Deep: implications for the accretion of the lower crust at the Southern East Pacific Rise. *Contrib. Mineral. Petrol.*, 154, 575-590, DOI 10.1007/s004100-007-0210-z.
- [14] Phipps-Morgan, J., and Chen, Y. J., 1993. The genesis of oceanic crust: magma injection, hydrothermal circulation, and crustal flow. *J. Geophys. Res.*, 98, 6283-6297.
- [15] Toomey, D. R., Purdy, G. M., Solomon, S. C. and Wilcock, W. S. D., 1990. The three-dimensional seismic velocity structure of the East Pacific Rise near latitude 9°30'N. *Nature*, 347, 639-645.
- [16] 海野進・草野有紀, 2021. ハワイ沖上部地殻掘削から海洋プレートの形成過程に迫る. *地学雑誌*, 130, no. 4, 599-614, doi:10.5026/jgeography.130.599
- [17] Umino, S., Moore, G. F., Boston, B., Coggon, R., Crispini, L., D' Hondt, S., Garcia, M. O., Hanyu, T., Klein, F., Seama, N., Teagle, D. A. H., Tominagana, M., Yamashita, M., Harrism, M., Ildefonse, B., Katayama, I., Kusano, Y., Suzuki, Y., rembath-Reichert, E., Yamada, Y., Abe, N., Xiao, N., and Inagaki, F., 2021. Workshop report: Exploring deep oceanic crust off Hawai'i. *Scientific Drilling*, 29, 69-82, doi.org/10.5194/sd-29-69-2021.
- [18] 海野進・草野有紀・石塚治・普代貴大・田村明弘・森下知晃, 2021. ICDPオマーン掘削計画による高速海嶺系の下部地殻構造. *日本鉱物科学会 2021 年オンライン年会*, R6-06.
- [19] 海野進, デーモン・ティーン・スティーブン・ドント, グレグ・ムーア, ブノア・イルドフォンス, 2022. ハワイ沖海洋地殻掘削調査: マントル掘削パイロットホールプロジェクト. *号外地球*, 72 (本特集), 22-29.

