

海洋地殻の構造と形成プロセス

宮 下 純 夫* 足 立 佳 子** 海 野 進***

Architecture of Oceanic Crust and its Formation Process

Sumio MIYASHITA*, Yoshiko ADACHI** and Susumu UMINO***

Abstract

Recent progress of studies on oceanic crust is reviewed focusing on the architecture and its formation process. Although crustal thickness does not vary with spreading rates with the exception of very-slow spread oceanic crust, architectures vary with spreading rates. The thickness of the upper oceanic crust (lava and sheeted dike complex) decreases with increasing spreading rates at intermediate to ultra-fast spread oceanic crusts. This implies that the gabbroic section thickens with spreading rates. The lava layer seems to become thicker, while sheeted dike complex becomes thinner with spreading rates. Thus, a systematic change of the crustal structures is expected with spreading rates for intermediate to ultra-fast spread oceanic crusts.

However, such systematics are not followed at a slow to ultra-slow spread oceanic crust, where the sheeted dike complex might occur only locally. Therefore, the magmatic systems controlling the formation of the crustal architecture differ significantly between slow to ultra-slow and intermediate to ultra-fast spread oceanic crusts. The difference is also shown in lower oceanic crusts, *i.e.*, small and isolated numerous gabbroic intrusions at slow to ultra-slow spread crusts, and thick successive gabbroic layer at intermediate to ultra-fast spread oceanic crusts.

Recent dense sampling from extensive areas near the East Pacific Rise and drilling at Hole 1256D show that off-axis magmatism plays an important role to in making the lava layer thicker. It should be emphasized that the upper succession in the lava layer might correspond to magmatism from on-axis to off-axis toward the upside. Therefore, vertical variations in the upper portion of the lava layer show a lateral igneous variation from on-axis to off-axis magmatism.

Another important result obtained at Hole 1256D is the appearance of granoblastic dikes that are recrystallized under high temperature conditions up to pyroxene hornfels facies. Petrographical and petrological observations suggest that dehydration partial melting occurred in the metamorphosed dikes due to invasion by gabbros.

Gabbroic rocks recently obtained from Hole U1309D of the Atlantis massif near the Mid-Atlantic Ridge, give a new constraint for the formation process of slow spread oceanic crusts. Down hole variation at this site confirms that the lower crusts of slow spread crusts are composed of many gabbroic intrusions. However, it is noted that the most primitive gabbroic rocks such as troctolite occur in the upside of the drill hole as was the case for Hole 735B of the Atlantis bank. It is not understood yet what mechanism produces such primitive gabbros at the upside.

The accretion fashion of the lower crust beneath intermediate to ultra-fast spreading ridges

* 新潟大学自然科学研究科

** 新潟大学超域研究機構

*** 静岡大学理学部

* Graduate School of Science and Technology, Niigata University

** Center for Transdisciplinary Research, Niigata University

*** Institute of Geosciences, Shizuoka University

is still controversial with two end models proposed, gabbro glacier model and sheeted sill model. Hybrid models based on thermal analyses and petrological data have also been proposed. Segmentation structures might also affect also for the accretion style of the lower crust. Much deeper drillings and detailed studies of ophiolites are required to solve the accretion style of lower oceanic crusts beneath intermediate to ultra-fast spreading ridges.

Key words : ocean ridge, oceanic crust, magma, spreading rate, crustal structure

キーワード : 海嶺, 海洋地殻, マグマ, 拡大速度, 地殻の構造

I. はじめに

20 世紀に成し遂げられた科学技術の偉大な成果として、月への人類到達などに示される宇宙開発がある。人類は初めて宇宙から地球を眺めることによって、生命のオアシスとしての地球を客観的に再認識することとなった。また、宇宙開発は月の岩石を人類にもたらすとともに、火星や金星などの様相を生々しく明らかにした。こうしたことを通じて、地球に代表される固体型惑星の成因やその後の変遷、そしてなぜ地球のみが生命、緑、水にあふれる惑星となったのかを明らかとした。このようにアポロに象徴される宇宙開発は、我々人類が嘗々と歴史を刻んできた地球に対する理解を深めるとともに、宇宙船地球号がかけがえのない存在であることを広く認識させることとなったのである。

一方、我々の直接の足下にある地下については、人類はどれほどのことを知っているのだろうか。20 世紀の地球科学者たちは「モホール計画」という壮大なプロジェクトを掲げた。人類がその上で生活している地殻は、卵にたとえるとその殻よりも薄く、その下には地下 2900 km の深さまでマントルが広がっている。地殻を突き抜けてマントルまでの穴を掘ること、そして地殻深部からマントルの実体をその場で正確に知ることが地球科学者の渴望であった。しかし、順調に進んだ宇宙開発とは裏腹に、我々の直接の足下ははるかに遠く、旧ソ連がコラ半島において大陸地殻の半ばにも達しない地下 13 km までの掘削に到達したにすぎなかった。

海洋底に関する地球科学的研究は第二次大戦後

に本格的に開始されたが、アメリカが中心となった深海掘削プロジェクトは当初の DSDP から IPOD, ODP を経て、2003 年 10 月からは日本で建造された巨大ライザー掘削船「ちきゅう」を中心とした「統合国際深海掘削プロジェクト (IODP)」へと発展した。海洋底に関するこれまでの研究において、日本は必ずしもその中心としての役割を果たしてきたわけではないが、これからはその中心に据わり、IODP の中心的役割を果たす「ちきゅう」を、最大限有効に活用する責務が生じたのである。

ところで、海洋底では地殻の厚さは大陸や島弧よりはるかに薄く、わずか 6 km 前後の厚さしかない。大陸や日本列島では 35 km 前後の彼方にあるマントルは、深海底ではわずか 6 km 付近にある。ゆえに、この薄い海洋地殻を完全掘削し、マントルまで到達する目的の「モホール計画」が開始されたわけだが、20 世紀には達成できなかった。IODP では、このモホール計画が再び最終的な目的の 1 つに掲げられている。20 世紀に挫折した「モホール計画」はいわば「21 世紀モホール計画」として現実的な目標として蘇りつつある。

モホール計画を実現していく上で、標準的な海洋地殻で掘削を実現することが重要であることはいうまでもないが、その場合には薄いとはいえ 6 km にもわたる地殻の中を延々と掘り進めることになる。マントルを目指す上で、その途中にある地殻に関する問題点を整理し、どのような課題が残されているかを十分に検討しておくことが重要である。小論では、これまでの海洋底掘削などの結果、海洋地殻に関して我々はどこまで理解しており、どのような問題が残されているかについて

て検討する。

なお、深海掘削に関するレビューは海野 (2003) によって行われており、とくに溶岩層に関しては詳しく紹介されている。また、拡大速度の違いによる海洋地殻の構成やマグマシステムの違い、MORB の不均質性などに関しては、宮下・前田 (2003) によって、80 年代までの状況に関しては宮下 (1989) にレビューされている。小論ではそれらとの重複をなるべくさけ、とくに地殻の構造とその形成プロセスに関連した問題に関する最近の動向について紹介する。

II. 海洋地殻の実体と形成プロセス に関する問題点

図 1 に海洋地殻に関する模式的な地殻断面図を示す。図に明らかのように、拡大速度の違いによって海洋地殻の構造は大きく変化しているというのは多くの研究者の一致する見解となっている (宮下・前田, 2003)。しかし、形成プロセスまでを含めて検討してみると、いまだに見解の一致していない多くの問題がある。その最大の問題は、海洋地殻の 3 分の 2 以上を占める下部地殻 (海洋地殻第 3 層) の問題で、厚さ数キロメートルに達する厚いガブロ層がどのようにして形成されるのかという問題である。1980 年代までは、オフィオライトに層状分化岩体の研究手法を適用して、巨大なマグマ溜まりを想定したモデルが支配的であったが、80 年代後半に入って地震波などをを用いた観測結果から、そうした巨大なマグマ溜まりが高速拡大海嶺下にも存在しておらず、薄いメルトレンズとその下に広がるクリスタルマッシュとからなっていることが明らかとなった (Detrick *et al.*, 1987 など)。したがって、その薄いメルトレンズからいかにして厚いガブロ層が形成されるかが次の問題として浮かび上がってきた (宮下ほか, 2002 参照)。高速拡大海嶺下での地殻形成モデルとしてはこれまでに 2 つの端的に異なったモデルが提唱されている。マントルから上昇してきたメルトが地殻浅部のメルトレンズまで一挙に上昇し、その初生マグマからガブロが晶出するが、その場で固結・固定化するのではなく、

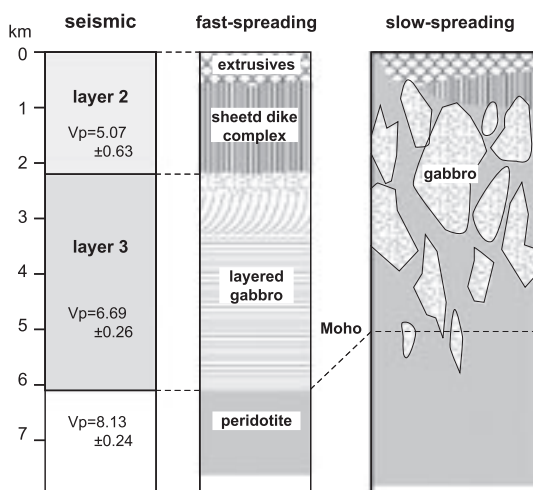


図 1 海洋地殻の模式的柱状図 (Cannat, 1993 および Juteau and Maury, 1999 を一部改訂)。高速拡大軸はオフィオライト層序と一致しているが、低速拡大軸は変化が大きく、シート状岩脈群を欠如していたり、蛇紋岩化したかんらん岩が最上位付近まで上昇したりしている。

Fig. 1 Schematic lithologic column of oceanic crust modified from Cannat (1993) and Juteau and Maury (1999).

Crustal structures beneath fast-spreading ridges are similar to ophiolite sequence while those produced at slow-spreading ridges are complicated and heterogeneous.

メルトレンズの下に広がるクリスタルマッシュ中を流動・沈降していくという gabbro glacier モデル (Quick and Denlinger, 1993; Phipps Morgan *et al.*, 1994; Coogan *et al.*, 2002a, b など) と、モホ面付近から順次シルとして貫入してガブロを形成しながらメルトが上昇していき、分化したメルトがメルトレンズに供給されるという sheeted sill モデル (Keleman *et al.*, 1997) である。これら 2 つの折衷的なモデルも提案されている (Boudier *et al.*, 1996; MacLennan *et al.*, 2004)。図 2 にこれらのモデルの概要を、図 3 には 2 つの両極モデルによって期待される様々なパラメーターの垂直変化について示す。

この図に示されているように、ガブロ層における様々なパラメーターは 2 つのモデルによって大きく異なる。gabbro glacier モデルではマント

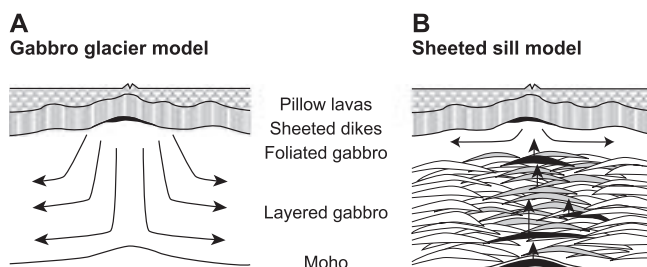


図 2 高速拡大海嶺下でのガブロ層の形成モデル (MacLennan, *et al.*, 2004 を一部変更).
 (A) gabbro glacier モデル: ガブロはシート状岩脈群の下にあるメルトレンズで晶出し、そこから流動・沈降して形成される。
 (B) sheeted sill モデル: ガブロは下位から順次シルを形成しながら形成される。

Fig. 2 Simplified models of accretion of the lower crust (modified from MacLennan *et al.*, 2004).
 (A) Gabbro glacier model where all crystallization of the lower crust takes place in the melt lens.
 (B) Sheeted sill model of in situ formation of the lower crust with sill intrusions.

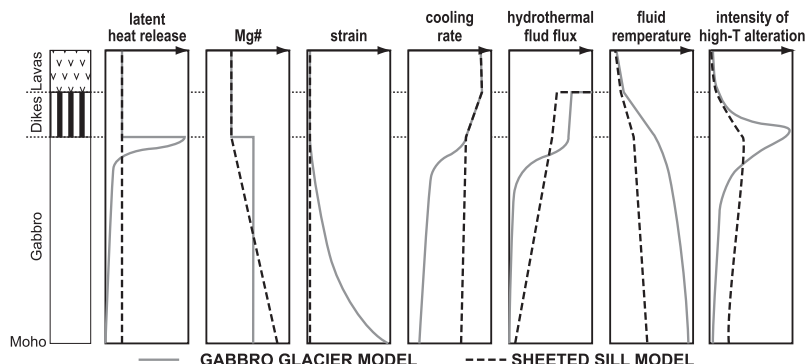


図 3 2つの両極的モデルによるパラメーター模式的な垂直変化 (Ildefonse *et al.*, Unpublished data).

Fig. 3 Schematic variations of latent heat release, bulk Mg#, strain rate, cooling rate, hydrothermal fluid flux, fluid temperature, and intensity of high-temperature alteration with depth after Ildefonse *et al.* (Unpublished data).

ルからのメルトがシート状岩脈群の直下のメルトレンズまで上昇し、そこで晶出したものが流動・沈降していくので、ガブロ層内には垂直的組成変化が生じず、また、ガブロ層のより下部のものほど流動・沈降量が大きいため、歪みが下位に向かって大きくなる。一方、sheeted sill モデルでは、下位から順次貫入シートを形成してクリスタルマッシュ内をメルトが上昇していくので、ガブロ層全体を通して上位へ向かって組成が分化していく一方、流動・沈降を被らないので歪みが位置によって異なることはない。また熱構造という観点でみると、gabbro glacier モデルではメルトレ

ンズで大部分の結晶作用が生じるので、熱の解放もそこで大きなピークを示すのに対し、sheeted sill モデルではガブロ層全体を通して熱解放が生じることになる。ガブロ層内での冷却速度という観点からみると、gabbro glacier モデルのほうがsheeted sill モデルよりもはるかに小さいことが予想される (Coogan *et al.*, 2002a, b; MacLennan *et al.*, 2004 など)。

このように、多くのパラメーターにおいて異なった挙動となるので、問題解決は一見簡単のように見える。しかし、これら2つのモデルのどちらがより適切であるかに関しては意見の一致が

得られておらず、いまだに議論が続いている。また、両方のプロセスが作用しているという見解もある (Boudier *et al.*, 1996 など)。MacLennan *et al.* (2004) は、熱構造解析からクリスタルマッシュの下部 25% 程度では sheeted sill モデルが、メルトレンズ直下のクリスタルマッシュの上部 25% 程度では gabbro glacier モデルが、中間では 2 つのモデルの混合が成立しているとする、もっともよく観察結果と合うとしている。

一方、ガブロを特徴づける層状構造の成因やその空間的变化 (層状構造が海嶺軸側へ傾斜しているのかあるいはその逆か) に関してもいくつかの異なったモデルが提案されている。1 つはメルトレンズからの沈降・流動の過程で形成されたとする考えで (Quick and Denlinger, 1993; Buck, 2000 など)、このモデルでは層状構造は海嶺軸側へ傾斜しているとされている例が多い。初生的には垂直的な構造であっても、沈降・流動の過程でクリスタルマッシュの中心部を通過するものほど強い剪断・変形を被り、水平な構造へと変化していき、層状構造が形成される、つまり、ガブロの層状構造は初生的火成構造ではなく剪断・変形によっていることになる。ただし、こうした剪断・変形はメルトが結晶粒界に存在している状況の下で進行するので、固体状態で剪断・変形を受けて形成されるマイロナイトとは異なった組織を示す (Nicolas, 1992)。冷却した海洋プレートが引張るモデル、つまりマントルが受動的に挙動する場合、上記の剪断・変形による歪み楕円体は、モホ面に近づくほど扁平になり、かつその長軸方向が海嶺軸側へ傾斜する結果となるので (Quick and Denlinger, 1993; Buck, 2000)、層状構造は海嶺軸側へ傾斜することになる。また、その歪み楕円体の扁平度はモホ面に近いほど大きくなるので、モホ面付近ではほぼそれに調和的な水平に近い層状構造が、上位へ向かってシート状岩脈群へと近づくと、層状構造は次第に急立して垂直に近くなっていく結果となる。

しかし、剪断・変形を強調するモデルにおいても、マントル湧昇流が静的ではなく活動的であるとするモデルでは、形成される層状構造の傾斜は

逆になる (Chenevez *et al.*, 1998)。Nicolas *et al.* (1988) はオマーンオフィオライトではマントル湧昇流が活動的であった、つまり、層状構造が海嶺軸側とは反対側へ傾斜していると主張している。一方、層状構造はメルトレンズへのメルトの浮力上昇の過程で形成されたとする主張もある (MacLeod and Yaouancq, 2000)。Kelemen and Aharonov (1998) は、層状構造の形成にはシル内部での結晶作用によって説明されると主張している。このへんの詳細は宮下ほか (2002) に紹介されている。

以上、みてきたように、海洋地殻の構造とその形成プロセスに関しては、基本的な問題で見解が大きく分かれている状況にある。次章以降では地殻上部から順に最近の研究の進展や問題点を紹介する。

III. 海洋地殻上部に関する最近の研究の進展

1960 年代から開始された深海掘削に関するレビューは海野 (2003) によって行われており、とくに 500 m を超える溶岩層に関しては詳しく紹介されている。ここでは、その後になされた深海掘削における進展と新たに明らかになってきた問題点などについて述べる。

構造的に乱されていない正常な海洋地殻において、基盤の溶岩層を 50 m 以上掘削したサイトは現在までに 46 カ所であるが、200 m 以上掘削したサイトは 13 カ所しかない。図 4 に年代と拡大速度の違う海洋地殻におけるこれまでの基盤における掘削深度を示してある。これまでの最深記録は 7 回もの航海を通じて掘削された Hole 504B で、海底下 2012 m (基盤深度では 1820 m) である。このサイトでは溶岩層が 550 m ほどの厚さで、230 m 前後の漸移部を経て 1000 m 以上のシート状岩脈群が続いている。あとで述べる Hole 1256D を除けば、シート状岩脈群まで掘削されたのは Hole 504B のみであり、海洋地殻上部のレファレンスとなる典型例とされてきた。しかし、このサイトの玄武岩は N-MORB よりも著しく枯渇した組成的特徴を有しており、典型的海洋地殻とするには問題がある (海野, 2003)。

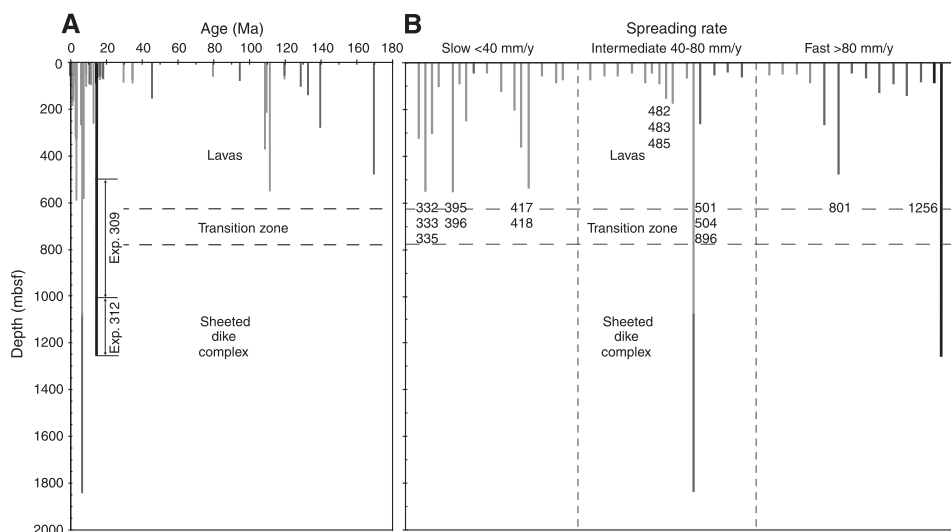


図 4 深海底掘削における基盤掘削深度と年代 (A), 拡大速度 (B) との関係。
玄武岩基盤を 50 m 以上掘削した例について示してある。Teagle *et al.* (2006) による。

Fig. 4 Penetration depth versus age of ocean crust (A) and spreading rates (B). After Teagle *et al.* (2006).

2005 年から 2006 年にかけて行われた IODP Exp. 309/312 は, ODP Leg 206 に引き続いてなされた Hole 1256D における掘削によって, 最上部の溶岩層からシート状岩脈群を経てガブロ層までの掘削に, 深海底掘削史上初めて成功した (Wilson *et al.*, 2006; Teagle *et al.*, 2006)。掘削地点は, 地磁気の縞模様解析から, 15 Ma 頃に赤道付近の東太平洋海膨 (EPR) で 20 cm/year を超える超高速で拡大していた時期に形成された海洋地殻で (図 5), この拡大速度は現在の EPR よりもはるかに大きい。本地点が掘削地点として選ばれたのは, 地震学的データから拡大速度が大きくなるとメルトレンズの深度が浅くなるという傾向があり (Purdy *et al.*, 1992), ガブロ層への到達がもっとも浅い深度で期待されていたためである (図 6)。

Hole 1256D における掘削深度は, 海底下 1507 m (基盤深度 1250 m) と Hole 504B よりも 500 m も浅いにもかかわらず, ガブロ層までに到達したのは, 地球物理学的データからの予想が基本的には正しかったことが立証されたことになる (Wilson *et al.*, 2006)。ただし, あとで述べる

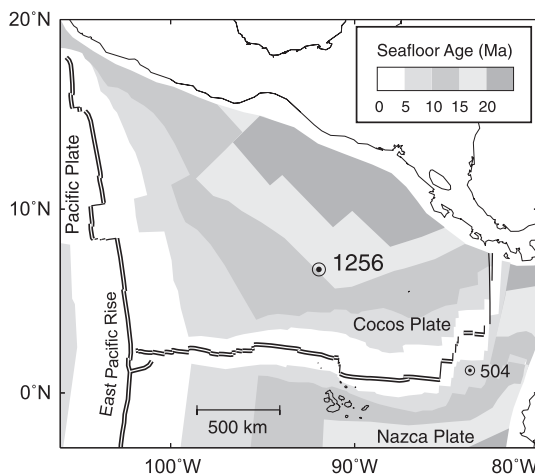


図 5 5 Ma 間隔のアイソクロンによるココスプレート年代。

サイト 1256D と 504B の位置が示してある。10–20 Ma のアイソクロンが広い間隔になっているのは, 当時の東太平洋海膨の拡大速度が超高速であったことによる (Wilson *et al.*, 2006)。

Fig. 5 Age map of the Cocos plate and East Pacific Rise with isochrons at 5 Ma intervals (Wilson *et al.*, 2006).

The wide spacing of 10–20 Ma isochrons reflects the extremely fast (200–220 mm/y) full spreading rate. The locations of deep drill holes into the oceanic crust at Sites 1256D and 504B are shown.

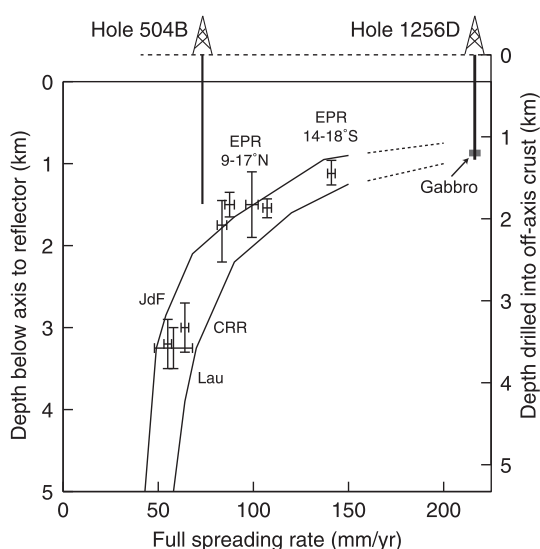


図6 拡大速度とメルトリレンズレフレクターの深度との関係 (Wilson *et al.*, 2006)。

Hole 504B と 1256D における掘削深度は実線で、黒四角はガブロが出現した位置を示してある。コア観察により、オフアキス溶岩の厚さを 300 m としてある。EPR = East Pacific Rise, JdF = Juan de Fuca Ridge, Lau = Valu Fa Ridge in Lau Basin, CRR = Costa Rica Rift。

Fig. 6 Depth to axial low-velocity zone plotted against spreading rate after Wilson *et al.* (2006)。

Penetrations to date in Holes 504B and 1256D are shown by solid vertical lines, with the depth at which gabbros were intersected indicated by the red box. Following core descriptions a thickness of ~300 m of off axis lavas is shown for Hole 1256D and assumed for Hole 504B. EPR = East Pacific Rise, JdF = Juan de Fuca Ridge, Lau = Valu Fa Ridge in Lau Basin, CRR = Costa Rica Rift。

ように、ガブロ層の本体にまで到達しているかどうかについては問題が残されている。

本掘削孔の概要は以下のである (図 7)。最上部の溶岩層はおよそ 800 m の厚さがあるが、その上部の 280 m ほどは海嶺軸上で噴出したものではなく、海嶺軸翼部のオフアキス火成活動で噴出したものと考えられる。溶岩層の下位は 50 m 前後の漸移帯を経てシート状岩脈群へと移行するが、その厚さは 350 m 以下で Hole 504B よりもはるかに薄く、また、特異なハイアロクラ

スタイトも出現することが明らかとなった。シート状岩脈群にハイアロクラスタイトが出現することはこれまで知られておらず、その出現は岩脈群の深部まで海水が循環していたことを示している。このことは超高速拡大海洋地殻を特徴づけている可能性がある (海野, 2007)。最深部の 105 m は、2 枚のガブロシートとその間に挟まれる 2 つのダイクスクリーン (変成岩脈群) とから構成されており、最深部はオフアキスでのダイクと解釈された低変成度の玄武岩で掘削は終了した。ガブロはオフィオライトの上部ガブロを特徴づける塊状で不均質な岩相のいわゆるバリテクスチャーガブロで、多様な岩相から構成されているが、今回の掘削ではガブロ層下部を特徴づけるような集積岩組成のものは得られていない。本掘削孔における変質作用は、浅い深度におけるガブロ層の出現と調和的に、極めて高い地温勾配を示す変質・変成作用を被っている。緑色片岩相から角閃岩相への変化は海底下 1350 m 付近で生じている。さらに特筆すべきは、その付近より深部では輝石ホルンフェルス相に達する高温変成作用を被っており、グラノブラスティックダイクと命名されている。これらの一部は部分熔融を被っている。

玄武岩の全岩主要成分や微量成分組成は N-MORB としての特徴を示すが、EPR の玄武岩よりも高度不適合元素により枯渇している。EPR に沿っては拡大速度が南方へ向かって大きくなることが良く知られているが、玄武岩の高度不適合元素の枯渇の程度が拡大速度が増大すると大きくなる傾向が認められ、超高速拡大が推定されている Hole 1256D の玄武岩がその延長上にあることから、拡大速度の増大に伴う部分熔融度の増大とみなす見解 (根尾・宮下, 2007) と、マントルがより枯渇していたとする 2 つの可能性が現在議論されている。

ところで海洋地殻の成層構造は地震波速度 (V_p) の速度構造によって定義されており、海洋地殻第 2 層-3 層境界はシート状岩脈群とガブロとの境界に一致すると一般に思われている。しかし、Hole 504B では、シート状岩脈群の中間に

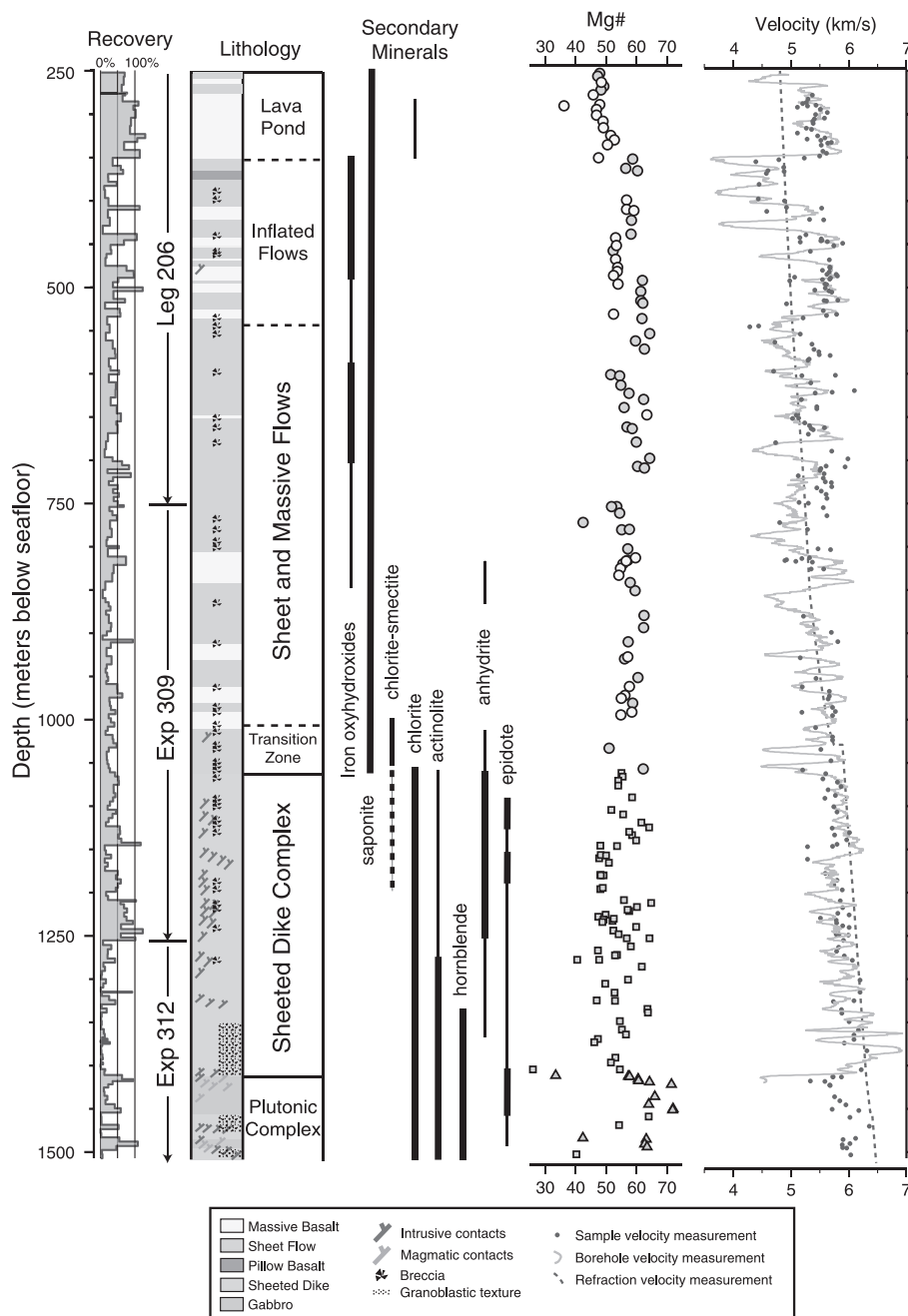


図 7 Hole 1256D の掘削結果の概要。

コア回収率，主要岩相，変質鉱物の出現状況（太線はより多量，細線は少量），Mg 値，そして地震波速度 (V_p) の垂直方向での変化が示されている。

Fig. 7 Summary of lithostratigraphic column of the basement drilled to date at Hole 1256D showing recovery, major lithologies, downcore index alteration mineral distribution (thick lines = abundant; thin lines = rare), downcore distribution of Mg-number, and seismic velocity (V_p) measured for discrete samples, wireline tools, and seismic refraction.

第2層-3層境界が認定されており (Detrick *et al.*, 1994), その境界が必ずしも岩相境界ではなく、むしろ変質・変成作用が重要であることを示した。本掘削孔での地震波の V_P 速度構造は、船上での観測・測定結果では、ガブロ層へ入ると減少した。つまり Hole 504B ではシート状岩脈群の中間に第2層-3層境界が認定されたのに対し、本ホールでは、シート状岩脈群-ガブロ層との境界部よりもさらに深部に海洋地殻第2層-3層境界があると推定された (図7)。しかし、その後の研究によると、海底下と同じ圧力下で測定すると、ガブロの V_P 速度は著しく増大する結果が得られている、すなわち、本ホールでは、第2層-3層境界は岩脈群-ガブロの岩相境界にほぼ一致している可能性がある。

さて、以上の結果からいくつかの重要な問題点が浮かび上がってくる。以下に海洋地殻の構造形成という観点から、問題を取り上げてみる。

1) 溶岩層の構成とオフアクシス火成活動

従来、海洋底における掘削で得られた溶岩層は、基本的に海嶺軸上で形成されたもの、つまり、海嶺火成活動そのものと考えられてきた。しかし、最近、高速拡大海嶺である EPR では、海嶺翼部でオフアクシス火成活動が広範囲に生じており、海嶺軸の溶岩よりも幅広い組成範囲をもつことが報告されており (Macdonald *et al.*, 1989; Perfit *et al.*, 1994; Scheirer and Macdonald, 1995; Alexander and Macdonald, 1996; Perfit and Chadwick, 1998; White *et al.*, 1998, 2002, 2006; 海野ほか, 2008), その厚さは溶岩層全体の半分にも満たないという主張もされている (Hoofst *et al.*, 1996)。つまり、海洋地殻最上部の溶岩層は、海嶺軸上で形成されたものの上にオフアクシスでその上に累重していくものがあることになる。ただし、この場合注意が必要なのは、オフアクシスにおいて溶岩層が厚くなる要因としては2つの可能性があることで、海嶺軸から流れ下って来た溶岩が海嶺翼部で累重する場合と海嶺軸火成活動とは異なるオフアクシス火成活動による場合である (例えば, Sims *et al.*, 2003)。前者の場合には海嶺軸上で噴出した溶岩がオフアクシスで定

置したというだけで、成因的には海嶺軸の火成活動とみなして構わない。後者の場合は、海嶺軸火成活動を直接もたらしめている海嶺下のメルトレンズとは異なった供給システムによっている可能性がある (Perfit and Chadwick, 1998; Sims *et al.*, 2003; 海野ほか, 2008 など)。

Hole 1256D では、溶岩層は火山地質学的観点から詳しく検討され、最上部の 100 m 弱の厚い溶岩流は海嶺軸から 5-10 km 離れたオフアクシスの地溝を埋めたオフアクシス火成活動による可能性が指摘されている (Crispini *et al.*, 2006)。その下位にはオフアクシスから翼部へかけて噴出した一部枕状溶岩を伴ったシートフローが累重していると解釈された。つまり、溶岩層上部における垂直変化は、大局的には海嶺軸近傍での側方変化を示していることを明らかにした点で重要である。

玄武岩の組成では、Hole 1256D の上部、すなわちオフアクシス火成活動によるものが全般に分化した特徴を示しているのに対し、下位の玄武岩はそれらよりはやや未分化な特徴が認められる (図7)。海嶺軸上に噴出する玄武岩類は、メルトレンズでの滞留の後に噴出しているので、もし、マントルソースが不均質であったとしても、混合・均質化を被って、マントルソースの不均質性は隠されてしまう (Casey, 1997; Coogan *et al.*, 2002a)。一方、オフアクシス火成活動では、メルトレンズを経ずに噴出するので、マントルソースの不均質性を反映した多様なメルトが噴出することが予想される。Geshi *et al.* (2007) は、EPR14°S における巨大なオフアクシス溶岩流が、海嶺軸の N-MORB よりも著しく枯渇したマグマや、E-MORB や T-MORB などの肥沃なマグマなどの多様な成因のものからなっていることを報告している。Niu and Batiza (1997) は、オフアクシスの単成火山の岩石組成を検討し、マントルソースが超枯渇から超肥沃にわたっており、起源マントルが極めて不均質であることを示している。

海嶺軸に対して直交する方向のマグマ組成の変化は、海嶺火成活動の時間的変化を示すものとす

る議論がある (Regelous *et al.*, 1999)。しかしながら、これらのサンプルはいずれも海洋底の表面から得られたものであり、上の結果から考えると、海嶺軸上での産物ではなく、オフアクシス火成活動によるものをみている可能性があり、そうした観点からも検討が必要と思われる。なお、オフアクシス火成活動に関する詳細なレビューは海野ほか (2008) によって示されているので参照されたい。

ところで、拡大速度が大きくなると海嶺軸付近の溶岩における枕状溶岩の比率が少なくなり、シート溶岩流が卓越する (Bonatti and Harrison, 1988)。これは、低速拡大海嶺では地形が陰しく、溶岩は急斜面を流れ下ることが多いため枕状溶岩の形態をとりやすいのに対し、高速拡大軸ではほぼ水平な平坦面上に定置するためにシート溶岩を生じやすいと考えられる (Umino *et al.*, 2002)。Perfit and Chadwick (1998) は拡大速度による同様の傾向を指摘しているが、同じ高速拡大海嶺でみると海嶺軸付近ではシート溶岩流が卓越しているのに対し、オフアクシス火成活動によるものでは枕状溶岩が卓越しているとしている。その理由としてはオフアクシス火成活動による溶岩は噴出割合が低かったためと推定している。なお、Smith *et al.* (2001) は EPR の 9°37'N 付近における精密な地形探査や潜水調査によって 3 次と 4 次のセグメント構造を識別しているが、枕状溶岩は 3 次のセグメント境界である規模の小さな重複海嶺付近にのみ出現していることを報告している。このことは、溶岩流の形態を決定づける地形的違いの要因として、海嶺セグメント構造での位置も重要であることを示唆している。

Hole 1256D では、全体としてみるとシート溶岩流が卓越しており、従来からの拡大速度による違いを大局的には示しているように見える。しかし、上位のオフアクシス溶岩はほとんどがシート溶岩からなり、その下位には軸付近の火成活動によるシート溶岩が厚く累重しているが、両者の中間に枕状溶岩が出現するゾーンが存在している。これは、海嶺軸近傍での地形変化を反映しており、平坦な海嶺軸付近から翼部へ向かって少し傾

斜の急な斜面を経て、平坦な翼部での溶岩流といった変化を示していると考えられる。つまり、溶岩層における精密な火山地質学的な解析により、海嶺軸上から翼部への変化を追跡することが可能であり、岩石学的検討ともあわせることによって海嶺火成活動からオフアクシス火成活動への変化を解明することが可能と思われる。

2) 溶岩層、シート状岩脈群、ガブロ層の厚さと拡大速度との関係

中速拡大海洋地殻である Hole 504B では 1 km 以上もシート状岩脈群の厚さがあるのに対し、超高速拡大海洋地殻である Hole 1256D でははるかにその厚さが薄くなっている (350 m) ことは先に紹介した。一方、拡大速度と海嶺直下のメルトレンズの深さに相関があり、拡大速度が大きくなるとメルトレンズの位置は次第に浅くなることが予想されていたが、Hole 1256D における結果はそれを裏付ける結果となった。メルトレンズとガブロ層との関係については、あとで詳しく議論するが、それよりも上位が溶岩層とシート状岩脈群で、それより下位でガブロ層が形成されることに関しては議論の余地がない。したがって、溶岩層とシート状岩脈群とを合わせた厚さは拡大速度の増大に伴って減少することになる。超高速拡大海洋地殻が露出しているヘスディープでは、上部地殻の厚さは 1.5 km 以下と見積もられていることも (Karson *et al.*, 2002)、その予想と調和的である。一方、地震学的なデータからは、拡大速度が極めて小さくなると海洋地殻の厚さは 3-8 km と多様であるが、中速から高速拡大においては、拡大速度が大きくなっても地殻の厚さはほとんど変化しないと考えられている (Chen, 1992)。したがって上に述べたことは、拡大速度の増大に伴ってガブロ層の厚さが増大することを意味している。

Buck *et al.* (1997) は、地球物理学的探査結果から、メルトレンズの深度が深くなると (すなわち拡大速度が減少すると) 溶岩層の厚さが増すと主張した。しかし、Hole 504B と Hole 1256D における溶岩層の厚さを比べると、シート状岩脈群の厚さとは逆に、Hole 1256D のほうが 200 m ほど厚い。この事実は、Buck *et al.* (1997)

の予想とは逆に、拡大速度の増大に伴って溶岩層が厚くなることを示唆しているように見える。これは、中速から高速拡大にかけては、拡大速度が増大するとオフアキス火成活動が増大することによって溶岩層の厚化が生じているためかもしれない。しかし、低速拡大海洋地殻においても、少なくとも Hole 504B と同じくらいの厚さの溶岩層が3カ所（サイト 418A, 395A, 332B）で掘削されていることからみて（海野, 2003 参照）、溶岩層の厚さと拡大速度の違いとの関係については、今後の検討が必要である。

シート状岩脈群の厚さについては、ピトディープでの調査結果（Perk *et al.*, 2007: Fig. 2）からみると、Hole 504B と Hole 1256D との中間的な厚さ（数 100 メートル）と思われる。ピトディープに露出する海洋地殻は Hole 504B と Hole 1256D の中間的拡大速度（ ~ 14.5 cm/year）であることを考慮すると、中速から超高速拡大海洋地殻においては、拡大速度の増大に伴って、シート状岩脈群の厚さは薄くなるという関係が成立しているように思える。ほぼ同様な高速拡大速度（ ~ 13.5 cm/year）で形成されたヘスディープでは、シート状岩脈群の厚さはほぼ 500 m 前後で局所的には最大 1 km に達する（Karson *et al.*, 2002）。このことも上記の議論と調和的である。拡大速度とシート状岩脈群の厚さとが相関をもつ可能性を指摘したが、シート状岩脈群まで到達した掘削はわずか2例のみであり、その確定のためには今後の掘削や潜水調査などの進展を待つ必要がある。

拡大速度の減少に伴い、シート状岩脈群の厚さが厚くなることを機械的に低速拡大海洋地殻まで当てはめると、それらではさらに厚いシート状岩脈群が発達していることが予想される。しかし、マグマ溜まりから上昇するマグマは、大きな差応力の元では岩脈を形成し、地殻の差応力を解消してなお余剰のマグマがある場合にのみ噴火することが可能となる（Rubin, 1990）。比較的低速で拡大する海嶺では、マグマの供給率をプレート拡大に伴う地殻の変形速度が上回るため、大きな差応力下で岩脈貫入が起きると期待される。また、

地殻最上部は枕状溶岩が主な構成物であるため、上部地殻中に浮力の中立点がある（Umino, 2006）。そのため、マグマは岩脈として地殻中に留まりやすく、シート状岩脈群が発達することが期待される。超低速拡大海嶺のようにマグマ供給率よりも地殻の変形速度が大きく上回る場合には、マグマによる地殻形成よりも脆性地殻の断層による変位や下部地殻の塑性流動が卓越するため、マグマ供給が潤沢な中速～高速拡大海嶺とはまったく異なる構造となると考えられる。

超低速～低速拡大海嶺の断裂帯や海嶺中軸谷、海洋コアコンプレックスなどの地質学的データや、岩脈群を構成しているドレライトの産出頻度などからみて（例えば、Bonatti and Honnorez, 1976; Fox *et al.*, 1976; 松本ほか, 2003）、低速拡大海洋地殻に厚いシート状岩脈群が発達しているとは考えづらい（Cannat, 1993; Karson, 1998）。つまり、拡大速度と上部地殻の厚さ（溶岩層およびシート状岩脈群）との相関は中速から高速拡大地殻においては成立しているが、低速拡大地殻では、むしろシート状岩脈群が欠如ないしは薄いことが予想される（宮下・前田, 2003）。つまり、中速から低速の間で、シート状岩脈群の厚さが劇的に変化する、あるいはそれまでとは逆に変化する転換が生じていることになる。

シート状岩脈群の厚さの変化によって示されるマグマシステムの変化は、中速～高速拡大海洋地殻における連続的なガブロ層の発達から、低速拡大海洋地殻におけるガブロの多数の貫入岩体へと、下部地殻の構造が大きく変化することによっても示される。その要因は、地殻浅部に定常的なメルトレンズが存在している高速～中速拡大海嶺と、冷却速度が大きいためにメルトレンズが存在していない低速拡大海嶺との違いによっている。

3) 岩脈群とガブロとの境界部における 高温変成作用と部分溶融

Hole 1256D において驚きをもって迎えられたのは、岩脈群の下部が輝石ホルンフェルス相に達する高温変成作用を被っていたことである。しかも、最深部では部分溶融を被っていると考えられる事実も明らかとなった（宮下ほか, 2007）。以

下にその概略を示す。

Hole 1256D では、海底下 1404 m 付近から深成岩セクションに突入した。ガブロは 1404–1457 m と 1482–1495 m 付近の 2 層が出現した（上位をガブロ 1、下位をガブロ 2 と呼ぶ）。ガブロ 1 の上位 50 m の 1358 m 付近から、ホルンフェルス組織を有するドレライトへと変化する。これらの岩石には、比較的再結晶度が弱い場合は、原岩のドレライト組織を残存しながらも、微細で粒状の単斜輝石、斜方輝石が出現しているが、再結晶度が高い岩石では原岩組織を失い、細粒・粒状のガブロノーライト様の岩石となる。以上の岩石組織の特徴からこれらの岩石はグラノブラスティックダイクと命名された (Teagle *et al.*, 2006)。グラノブラスティックダイクは、上位から下位へ向かってガブロ 1 が出現する上位のシート状岩脈群基底部、ガブロ 1 とガブロ 2 との間に挟まれるダイクスクリーン 1、ガブロ 2 の下位のダイクスクリーン 2 という順に分類される。なお、ガブロ 2 にはダイクの包有物が多数含まれており、それらも細粒のガブロノーライト様の岩石へと変成されている。

図 8 に海底下 1240 m より深部での鉱物消長関係を示す。ガブロ 2 の部分は包有物についての鉱物組み合わせである。岩脈群基底部のグラノブラスティックダイクは斜長石、単斜輝石、斜方輝石、ホルンブレンドから主になり、石英も普遍的に含まれる。より深部のダイクスクリーン 1 では石英やホルンブレンドの出現頻度が少なくなり、まったく含まれないものも観察される。この傾向はダイクスクリーン 2 でより顕著となり、ガブロ 2 の包有物においては、石英、ホルンブレンドは観察されない。

以上の鉱物組み合わせの変化から、ダイクスクリーン 1 より深部ではホルンブレンドも分解していること、また一部では脱水溶融反応が生じたことが示唆される。包有物と接するガブロ 2 の接触部付近には石英やホルンブレンドが形成されており、部分溶融した包有物から放出されたシリカや水にとむメルトによる影響と考えられる。つまり、その包有物はメルトが抜き去られたレスタ

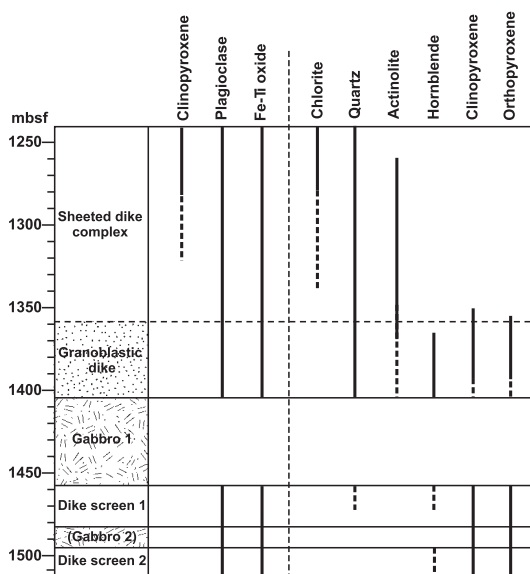


図 8 Hole 1256D のグラノブラスティックダイクにおける変成鉱物消長関係。

左側は初生火成鉱物を示す。石英、角閃石は下位へ向かって消滅しており、脱水部分溶融が生じたことを示唆している。

Fig. 8 Metamorphic mineral assemblage for the granoblastic dike in Hole 1256D.

Left-side panel shows primary igneous rocks. Disappearance of quartz and hornblende with increasing depth suggests that granoblastic dikes underwent dehydrated partial melting.

イトとみられる。全岩分析の結果からも、ダイクスクリーン 2 はレスタイトとしての組成的特徴を示している (宮下ほか, 2007)。

以上の結果から、Hole 1256D では、シート状岩脈群基底部は輝石ホルンフェルス相に達する高温変成作用を被っていること、ガブロに包有される変成ダイクやダイクスクリーンの一部はさらに脱水部分溶融を被り、シリカに富むメルトを放出したと考えられる。この理由としては、活発なメルト供給により、ダイクの基底部が大規模にストーピングを被ったことが考えられる。活発なメルト供給の成因は、海嶺火成活動の時間的变化、あるいは海嶺セグメント構造に起因する（大規模な海嶺伝播）と思われる。

高速拡大海嶺で形成されたオフィオライトの典

型例として知られているオマーンオフィオライトにおいても、巨大な斜長花こう岩体の基底部付近において、下位のガブロの中に大量の変成岩脈の巨大なブロックが多数捕獲されており、それらが細粒ガブロノーライト様の岩石となっていること。上位の斜長花こう岩体の下部に含まれる捕獲ブロックにおいては石英の濃集部が形成されており、変質したドレライト岩脈が脱水溶融反応を起こしていることが明らかとなった（足立ほか, 2007）。全岩組成やメルトが抜き去られたとみられるレスタイトの鉱物組成などから、部分熔融度は20-30%と見積もられている（Miyashita *et al.*, 2007）。Hole 1256Dにおける産状やグラノプラスチックダイクの特徴は、オマーンオフィオライトの捕獲ブロックと酷似しており、同様の現象が生じたと考えられる。小規模ではあるが上記と類似した部分溶融現象はトルダスオフィオライトからも報告されている（Gillis and Coogan, 2002）。

以上の事実は、いわゆる斜長花こう岩と呼ばれる優白岩の成因に重要な示唆を与えている。

IV. 下部地殻の構成とその形成プロセス

1) 低速拡大海洋地殻の下部地殻

中速～高速海洋地殻の主要部分は第3層が占めており、その実体は玄武岩マグマが深部で固結したガブロであるということには異論がない。一方、低速拡大海洋地殻の第3層はかんらん岩とガブロとが複雑に入り組んだり、あるいは蛇紋岩からなる可能性も議論されている（宮下・前田, 2003 参照）。しかし、深海掘削においては中速～高速拡大海洋地殻ではその最上部の片鱗に触れたのみで、3-5 km 前後の厚いガブロ層の実体に関しては、テクトニックウインドウであるヘスディーブ（Karson, 1998; 宮下・前田, 2003 参照）や後述するピトディーブでの研究に依存している。一方、低速拡大海洋地殻に関しては、インド洋と大西洋のそれぞれ1カ所で1.5 km 前後の掘削に成功しており、ガブロ層の実体と地殻深部でのマグマプロセスが解明されつつある。超低速拡大海嶺である南西インド洋海嶺南方のアトラン

ティスバンクにおける Hole 735B に関する詳しい紹介は宮下・前田（2003）に示されている。その特徴を要約すると、上部ほどバイモーダルな特徴を示し、比較的未分化なガブロと著しく分化したフェロガブロとからなっているのに対し、深部は比較的均質な組成となっていること、著しく分化したガブロはその場の閉鎖系での結晶分化作用によるのではなく、結晶作用末期にガブロの粒間の著しく分化した液が剪断帯に沿って侵入したこと、全体としての組成はマントルかんらん岩と平衡にあったメルトより著しく分化している（Dick *et al.*, 2000; Natland and Dick, 2002 など）。ガブロが全体として分化した組成を有している要因としては、現在得られている下部に未分化な集積岩がある（Dick *et al.*, 2000）、あるいは低速拡大海嶺ではマントル上部での熱伝導的冷却が進行しているため、マントル内部で結晶分化作用を被っている（Niu *et al.*, 2002; Coogan *et al.*, 2002b など）との2つの考えが提案されている。アトランティスバンク周辺で得られている地質学的・岩石学的データからみると、前者の可能性は低く、かんらん岩-ガブロの境界部、すなわちモホ直上のガブロでもかんらん石の Fo 71-72、斜長石の An 組成は50前後と著しく分化しており、マントル内部で結晶分化作用を被ったメルトから晶出したものと考えられる（松本ほか, 2003）。この場合、マントルかんらん岩中には大量のガブロの貫入岩が存在しているはずであるが、それを確かめるためにはマントルかんらん岩を深く貫く掘削が必要である。

2004-2005 年にかけて、IODP Exp. 304/305 は大西洋中央海嶺 30°N のアトランティスランスフォーム断層の北側に位置するアトランティスマッシフの Hole U1309D において、ガブロを1400 m ほど掘削した（Blackman *et al.*, 2006）。このホールではマントルかんらん岩の掘削を目指していたが、得られたサンプルの大部分はガブロであり、結果として Hole 735B とならぶ超低速～低速拡大海洋地殻の下部地殻のリファレンス地点となった。Hole U1309D では図9に示すように Mg# の高いかんらん石に富むトロクトライ

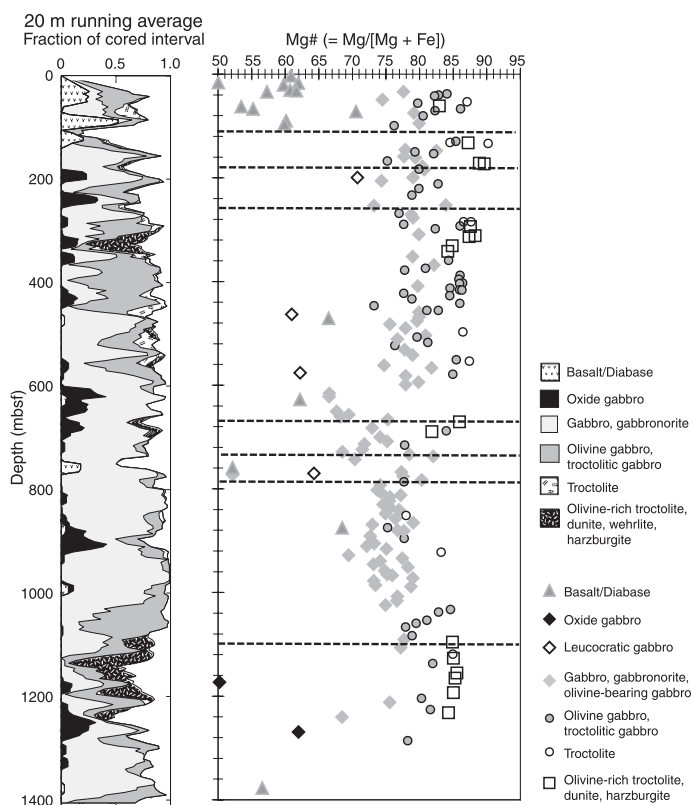


図 9 Hole U1309D における全岩 Mg# のダウンホール変化 (Blackman *et al.*, 2006 による)。破線は断層帯を示す。ホールの上部ほど、Mg# の高い未分化な岩石が出現している。

Fig. 9 Downhole variations in whole-rock Mg# for Hole U1309D after Blackman *et al.* (2006). Dashed lines show fault zones.

トやトロクトライト、かんらん石ガブロが出現している。また、Hole 735B で特徴的にみられたバイモダルな特徴も顕著ではない。このほか、ホールの基底部付近まで玄武岩ないしドレライト岩脈が観察されていることも、Hole 735B とは異なっている。以上のような違いはあるものの、ガブロの各岩相（トロクトライト、かんらん石ガブロ、ガブロノーライト、ガブロ、オキサイドガブロ）の出現様式や全岩化学組成変化などからみると、Hole 735B と同様に、多数のマグマバッチに起因する多くの貫入岩体からなっているように思われる。しかし、上に述べたような Hole 735B との違いが拡大速度依存によって説明されるのか、あるいはそれぞれの場におけるテクトニックな違い（例えば海嶺セグメント構造の中での位置）などによって説明されるのか、今後の研究の進展が期待される。また、重要な共通点として、ホール全体を通して見たときに、上部へ向

かって結晶分化作用が進行しているような傾向が認められず、むしろ上位でより未分化な岩石が出現することが注目される。こうした傾向が低速拡大海洋地殻で普遍的な現象であるのかどうか、もしそうであるのなら、なぜそうした「逆転」現象が生じるのか、構造的要因によって説明されるのか（デタッチメント断層によって見かけ上の上位に構造的低位が位置している）、あるいは低速拡大海洋地殻におけるマグマシステムの何らかの要因によってもたらされるのかなど、疑問が残されている。

低速拡大海洋地殻における 2 カ所での掘削の成功は、それらの下部地殻の実体と形成プロセスに大きな理解の前進をもたらしたが、一方で新たな問題点を投げかける結果となり、さらなる深部への掘削が要請されているといえよう。

2) 高速拡大海洋地殻の下部地殻

高速拡大海嶺で形成された下部地殻に関する直

接的な情報は、低速拡大海洋地殻と比べてはるかに乏しい状況（宮下・前田, 2003）は大きくは変化していないが、上に述べたサイト 1256D における掘削（Teagle *et al.*, 2006）と、東太平洋海膨南部のナスカプレートと太平洋プレートに挟まれるイースターマイクロプレートのピトディープでの研究（Perk *et al.*, 2007）が、最近の新たな進展を示している。ヘスディープに関する詳しい紹介は宮下・前田（2003）に述べられているので、ここでは主に 1256D の概要とピトディープにおける研究を紹介する。

1256D では、ガブロは 1404–1457 m と 1482–1495 m 付近に出現した。上位のガブロは、厚さが 50 メートル前後で、塊状な極めて不均質な岩相が特徴的であり、多様な岩石から構成されている。オマーンオフィオライトなどでよく観察されるガブロの最上部の岩相と酷似しているが、このガブロの下位にもダイクスクリーンが続くことから、このガブロは下位に存在すると考えられる厚いガブロ層の上部ではなく、オフアクシス火成活動による貫入岩と思われる。下位のガブロは上位のガブロと同様に塊状な岩石であるが、斜方輝石がより大量に出現することや上位のガブロよりはやや均質な岩相を示す。このガブロの下位にもダイクスクリーンとされた岩石が得られているが、コア回収率が極めて悪かったことから、そのダイクスクリーンは下位のガブロの包有物で、このガブロがガブロ層最上部である可能性が残されており、さらなる掘削が待たれる。

ピトディープは水深 6100 m に達するテクトニックウインドウで、イースターマイクロプレートの東側リフトが、北方へ海嶺伝播している先端部で生じた大規模なリフト帯である（図 10）。ピトディープに露出する地殻は 3 Ma 前後に 14 cm/year 以上の高速で拡大していた EPR で形成されたものと考えられている（Francheteau *et al.*, 1988）。ピトディープの周囲では、東側リフトの海嶺伝播に伴って 20°時計方向へ回転したと考えられている（Naar and Hey, 1991 など）。イースターマイクロプレート周囲のピトディープやテレバカトランスフォーム断層などからは、マントル

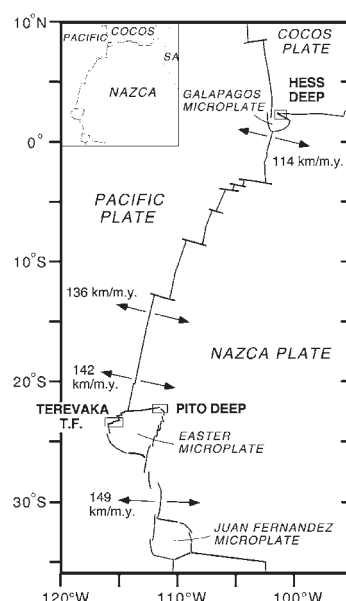


図 10 東太平洋のプレート分布図とピトディープの位置（Constantin *et al.*, 1996 による）。

Fig. 10 Map showing the Eastern Pacific region plate boundaries and the location of the Pito Deep after Constantin *et al.* (1996).

かんらん岩やガブロ、ドレライト、玄武岩が露出していることは以前から知られていた（Constantin *et al.*, 1995, 1996; Hékinian *et al.*, 1996）。2005 年にアルビンなどによる潜航調査が行われ、水深 4400–3400 m の範囲からガブロが採取された。以下に Perk *et al.* (2007) による概要を紹介する。

溶岩層とシート状岩脈群とを合わせた厚さはおよそ 1.5 km 以下で、場所により変化する。ガブロはシート状岩脈群の直下の 900 m のセクションから得られており、未分化なトロクトライトやかんらん石ガブロが大部分を占めている。いくつかのサンプルは鉱物量比の違いによる層状構造を示しており、斜長岩質トロクトライト中に 2–3 cm 幅のかんらん石濃集バンドをもっている例が示されている。大部分のガブロは斜長石の定向配列による面構造を示している。これらの方向は、上位のシート状岩脈群の走向方向（北東–南西）と同一走向を示し、傾斜はほとんど直立に近

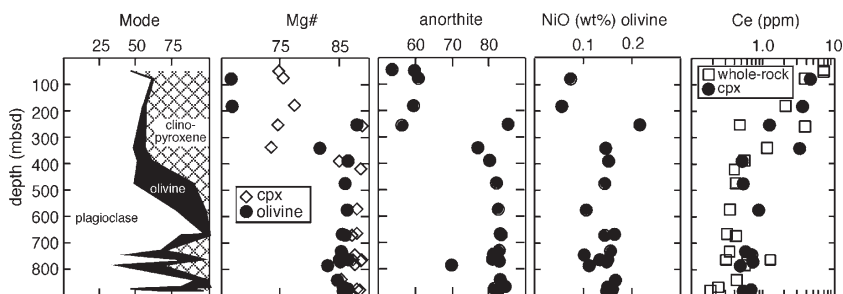


図 11 ピトディーブにおけるシート状岩脈群の下のガブロの深度 (mbsd) と鉱物量比、鉱物組成、全岩組成の変化 (Perk *et al.*, 2007 による)。

Fig. 11 Modal and compositional variation with depth beneath the sheeted dike complex (mbsd) after Perk *et al.* (2007).

い。つまり、ガブロの構造はシート状岩脈群の構造と調和的であり、オマーンオフィオライトなどで認められているガブロ層上部のフォリエイテッドガブロの構造と類似している。また、斜長石結晶が湾曲したり楔形双晶を示すことなどから、塑性変形を被っており、その強さは深度が増すにつれて強くなる傾向がある。ガブロの垂直組成変化を図 11 に示すが、シート状岩脈群基底部の 300 m は狭義のガブロないしかんらん石ガブロでやや分化している特徴を示し、その下位の 600 m はかんらん石ガブロないしトロクトライトで、全般的に未分化な組成を有している (かんらん石 Fo 88-83, 斜長石 An % 85-77)。以上の結果をヘスディーブと比較すると、ヘスディーブでは上部のガブロは著しく分化しており、また、塑性変形を示すサンプルは報告されていない点で、大きく異なっている。

Perk *et al.* (2007) は、さらに gabbro glacier モデルと sheeted sill モデルとにおけるガブロ層内の結晶分化作用についてのモデル計算を行い、図 12 に示すような結果を示している。以上の結果に基づいて、Perk *et al.* (2007) はピトディーブとヘスディーブとでは、同じような高速拡大海洋地殻であるにもかかわらず、ガブロ層の形成メカニズムが異なっていること、ピトディーブでは gabbro glacier モデルが成立しているのに対し、ヘスディーブでは sheeted sill モデルにより近いモデルで説明され、gabbro glacier が生じ

ているのはガブロの最上部付近に限定されていたこと、こうした違いが生じるのは、ヘスディーブではより冷却速度が大きい状況にあり、ピトディーブではそれよりも小さかったためとした。彼らによるモデルを図 13 に示す。ヘスディーブの冷却速度が大きかった理由としては、同じ緯度の EPR の水深が深く、多数の小さなセグメントからなっているのに対し、ピトディーブでは海嶺セグメントの中心部であったためと結論している。

以上、Perk *et al.* (2007) による研究を紹介したが、問題点としては、シート状岩脈群の基底部 900 m というセッティングがそもそも正しいのかである。もし、岩脈群との間に断層が存在しているとすると、上記の議論の前提が崩れてしまう。詳細な調査結果についての公表が待たれる。また、層状構造の空間的变化に関しては、海嶺軸方向と平行で垂直な構造とされており、層状構造の傾斜方向については不明である。

V. まとめ

海洋地殻に関する最近の研究の進展状況と問題点について、地殻の構造とその形成プロセスに焦点をおいてレビューした。従来、海洋底における掘削で得られた溶岩層は、基本的に海嶺軸上で形成されたもの、つまり、海嶺火成活動そのものと考えられてきた。しかし、最近、高速拡大海嶺では、溶岩層上部における垂直変化は大局的には海

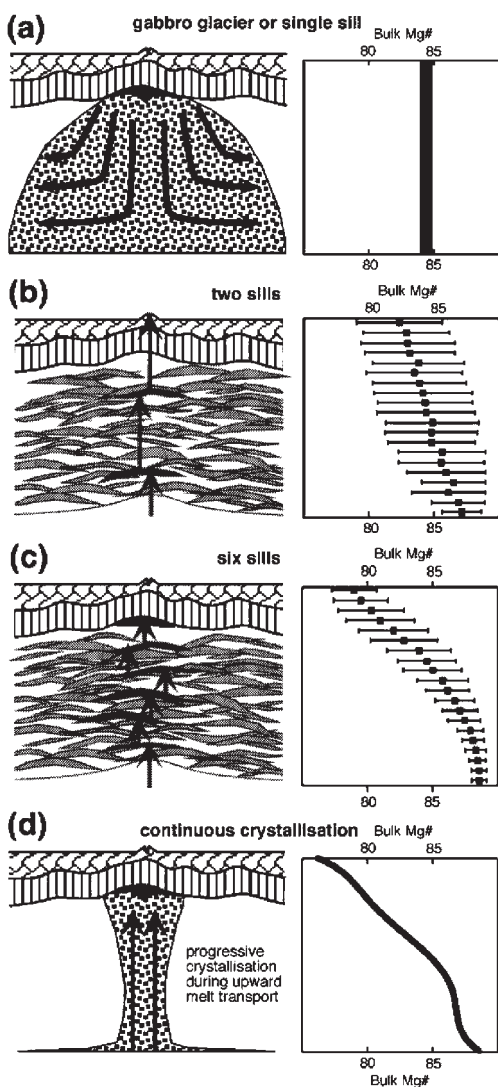


図 12 異なった下部地殻形成モデル（左側）における全岩組成の Mg# のモデル計算結果（右側）(Perk *et al.*, 2007 による). (a) gabbro glacier モデル. 深さにもなう系統的な組成変化は形成されない. (b), (c) 深部でガブロスルを形成して上昇するモデル. (b) と (c) ではシルの枚数が異なり (b は 2 枚, c は 6 枚), シルの枚数が多いほど, より系統的に上部に向かって分化していく. (d) シルが無数にある場合. 下部地殻は系統的に上部に向かって分化.

Fig. 12 Modeled variations in bulk-rock Mg# versus depth in the lower crust for different styles of lower crustal accretion by Perk *et al.* (2007). (a) Vertical variations are not produced in the gabbro glacier model. (b) and (c) Sheeted sill model results in an evolved composition with height. Degree of fractionation increases as the number of sills increases, (d) if melt ponds in an infinite number of sills, progressive crystallization occurs during upward melt transport.

嶺軸近傍での側方変化を示していることが明らかになってきた。したがって、溶岩層上部における枕状溶岩やシートフローなどへの産状の変化は、海嶺軸近傍での地形変化を反映していると考えられる。つまり、溶岩層における精密な火山地質学的な解析により、海嶺軸上から翼部への変化を追跡することが可能であり、岩石学的検討ともあわせることによって海嶺火成活動からオフアキス火成活動への変化を解明することが可能と思われる。

拡大速度の違いによって、海洋地殻の厚さは全体としてはほとんど変化しないが、その構成は大きく変化している可能性が高い。中速～超高速拡大海洋地殻においては、溶岩層とシート状岩脈群をあわせた厚さは拡大速度の増大に伴って減少し、逆にガブロ層の厚さは増大する。シート状岩脈群の厚さは、拡大速度の増大に伴って減少する傾向が明瞭であるが、溶岩層の厚さについては逆に増大する傾向がある。この溶岩層の厚さの増大はオフアキス火成活動によっている可能性がある。

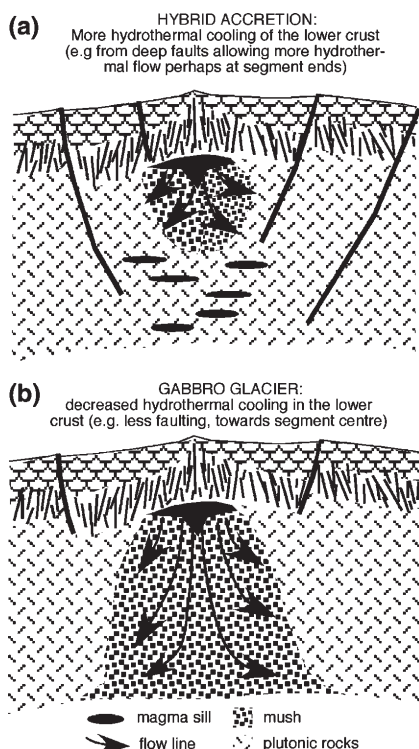


図 13 高速拡大海嶺における下部地殻の形成モデル (Perk *et al.*, 2007 による)。

- (a) 下部地殻から熱が効率的に排出されると、メルトがその場で貫入シルとして固結する。メルトレンズから沈降するマッシュは急速に冷却されて空隙液を保持したまま固結する。ヘスディープはこのハイブリッドモデルに近い。
- (b) 下部地殻から熱が効率的に除去されないと、大部分の結晶作用はメルトレンズで起こり、それがクリスタルマッシュの中を沈降・流動していく。ピトディープはこのモデルが適合している。

Fig. 13 Models of lower crustal accretion at fast-spreading ridges by Perk *et al.* (2007).

- (a) Hydrothermal cooling of the lower crust efficiently removes heat, so that melt can crystallize *in situ* as sills. The mush subsiding from the melt lens cools rapidly and solidifies. This hybrid model might be applicable to Hess Deep.
- (b) When heat is not removed efficiently from the lower crust, most crystallization occurs within the melt lens and a subsiding mush forms over most of the lower crust. This gabbro glacier model may be applicable at Pito Deep.

る。しかし、以上の規則性は低速拡大海洋地殻まで単純に連続していない、低速拡大海洋地殻では、海洋地殻の構造は複雑でシート状岩脈群の発達は極めて不均質である。つまり、中速～低速拡大海洋地殻の間には、マグマシステムにおける大きな変換点が存在していると思われる。しかし、シート状岩脈群まで掘削した例はわずか2カ所のみであり、とくに低速拡大海洋地殻においてはまだ溶岩層を貫通した掘削例はない。海洋地殻上部の構造と拡大速度との関係を解明するためには、少なくとも溶岩層を貫通する掘削が強く求められている。

シート状岩脈群の厚さの変化によって示される転換点は、中速～高速拡大海洋地殻における連続的なガブロ層の発達から、低速拡大海洋地殻におけるガブロの多数の貫入岩体へと、下部地殻の構造が大きく変化することによっても示される。その要因は、地殻浅部に定常的なメルトレンズが存在している高速～中速拡大海嶺と、冷却速度が大きいためにメルトレンズが定常的には存在していない低速拡大海嶺との違いによっている。

最近の Hole 1256D における掘削結果は、シート状岩脈群の基底部付近が輝石ホルンフェルス相に達する高温変成作用や部分溶融も被っていることを明らかにした。このことは、海洋地殻にしばしば産出する斜長花こう岩の成因に重要な示唆を与えている。この成因に関しては、海嶺火成活動における時間変化によるメルトレンズの上昇・膨張、もしくは海嶺伝播によるガブロのストーピングが考えられるが、その解決のためにはオフィオライトにおける精密な解析が重要である。また、岩脈群基底部付近まで達している掘削例がまだ1カ所しかない現状を考えると、今回観察されたような高温変成作用や部分溶融現象が、どの程度の普遍性をもっているかなどを解明するためには、さらなる掘削が必要なことは言うまでもない。

高速拡大海洋地殻の下部地殻の実体とその形成プロセスについては、ピトディープやヘスディープにおける最近の研究から、ほぼ同一の拡大速度の海洋地殻においても gabbro glacier モデルと sheeted sill モデルが空間的に不均質に生じてい

るらしいということが注目される。しかし、それらの研究は主に潜航調査によっており、前提とされている事実（シート状岩脈群基底部からガブロ層へと構造的な不連続がない）が正しいのかどうかを確認するためには、両者の連続関係をより詳細に潜航調査を行う、あるいは掘削によって確かめる必要がある。

低速拡大海洋地殻の下部地殻に関しては、IODP Exp. 304/305 による U1309D の結果が加わることによって、その実体はかなり明瞭となってきた。低速拡大海嶺下では、ガブロは著しく分化した岩石（オキサイドガブロなど）が地殻深部にも出現することなどから、下部地殻がガブロの多数の貫入岩体から構成されていることは確実となってきた。しかし、ホール全体を通して見たときに、上部へ向かって結晶分化作用が進行しているような傾向が認められず、むしろ上位でより未分化な岩石が出現することの理由や、マントル内での結晶分化作用の程度など、重要な問題が残されており、これらを解明するためにはさらなる掘削が求められている。

以上に述べてきたように、海洋地殻の構造とその形成プロセスに関する理解は着実に進んでいるが、基本的な重要な問題においても多くの問題が未解決のまま残されている。その解決のために2点を強調したい。1つは Hole 1256D や低速拡大海洋地殻におけるより深部への掘削の実現など、現在の海洋地殻深部からのその場でのサンプルを採取することである。なお、Hole 1256D や 735B などに関してはマントルを目指した掘削のプロポーザルが行われており、その実現が待たれている。ヘスディープやピトディープにおける調査研究が重要であることを示したが、残念ながら世界でも最高の潜水調査システムを有している日本は、いまだ一度もそれらの地域への調査を実施していない。海洋地殻を理解する上で、実際の岩石を手に入れることが決定的に重要である。もう1つは、オマーンを始めとするオフィオライトに関する精密な調査研究を実施することである。Hole 1256D は欧米の研究者によって将来のモホールを意識して提案された掘削孔であった。そ

こでの研究で日本が大きく貢献できたのは、オフィオライトや海洋底溶岩などに関する研究で世界をリードするような成果を有していたためであり、1256D で遭遇した高度変成岩類の出現にあっても、オフィオライトで偶然にも同様の岩石を発見し、詳しく調査・解析していたことが大いに役立った。全面露出のオフィオライトでは、海洋底における調査よりも、はるかに精度の高い調査を行うことが可能であり、こうした分野での研究を推進することによって、海洋底から得られた実際の岩石に関する理解も相乗的に進むこととなるだろう。

構造的に乱されていない海洋地殻での掘削による地殻-マントル境界の突破には長い時間を要するであろう。しかし、オフィオライトでは実際にその境界を詳細に観察・研究することが現在でも可能であり、マントル-地殻境界で生じている現象を詳細に解明できる可能性がある。海洋底における掘削が実現したとしてもその数は極めて限定されることを考えると、実際のオフィオライトにおいて空間的変化を、垂直方向はもとより横方向における変化も含めて詳細に解析しておくことが極めて重要で、それがなされるなら来るべき海洋モホールを大きくリードすることができるであろう。

謝 辞

本論文を投稿する機会を与えていただいた笠原順三博士に感謝します。根尾夏紀、山崎秀策氏（新潟大学自然科学研究科）とは、Hole 1256D の共同研究を行っている。本研究の費用の一部は、新潟大学プロジェクト推進経費「日本地球掘削科学の拠点形成：海洋底地球科学分野の強化と21世紀海洋モホールの実現目指して」および科学研究費基盤研究B（課題番号17340162）によって賄われた。本論文は前田仁一郎博士による査読と本論文を担当された阿部なつ江博士の指摘により大いに改善された。ここに感謝します。

文 献

足立佳子・宮下純夫・田中真二・竹内一将（2007）：ガブローシート状岩脈群境界部における部分溶融とレスタイトの出現—オマーンオフィオライトにおける例—。月刊地球，29，650-655。

- Alexander, R.T. and Macdonald, K.C. (1996): Small off-axis volcanoes on the East Pacific Rise. *Earth and Planetary Science Letters*, **139**, 387–394.
- Blackman, D.K., Ildefonse, B., John, B.E., Ohara, Y., Miller, D.J., MacLeod, C.J. and the Expedition 304/305 Scientists (2006): *Proceedings of the Integrated Ocean Drilling Program*. **304/305**, College Station TX (Integrated Ocean Drilling Program Management International, Inc.), doi:10.2204/iodp.proc.304305.2006.
- Bonatti, E. and Harrison, C.G.A. (1988): Eruption styles of basalt in oceanic spreading ridges and seamounts: Effects of magma temperature and viscosity. *Journal of Geophysical Research*, **93**, 2967–2980.
- Bonatti, E. and Honnorez, J. (1976): Sections of the earth's crust in the equatorial Atlantic. *Journal of Geophysical Research*, **81**, 4104–4116.
- Boudier, F., Nicolas, A. and Ildefonse, B. (1996): Magma chambers in the Oman ophiolite: Fed from the top and the bottom. *Earth and Planetary Science Letters*, **144**, 239–250.
- Buck, W.R. (2000): Can downward flow of dense cumulate slurry through mushy upper gabbros produce lower gabbros at a fast-spreading center? in *Ophiolites and Oceanic Crust: New Insights from Field Studies and the Ocean Drilling Program* edited by Dilek, Y., Moores, E.M., Elthon, D. and Nicolas, A., *Geological Society of America, Special Paper*, **349**, 121–127.
- Buck, W.R., Carbotte, S.M. and Mutter, C. (1997): Controls on extrusion at mid-ocean ridges. *Geology*, **25**, 935–938.
- Cannat, M. (1993): Emplacement of mantle rocks in the seafloor at mid-ocean ridges. *Journal of Geophysical Research*, **98**, 4163–4172.
- Casey, J.F. (1997): Comparison of major- and trace-element geochemistry of abyssal peridotites and mafic plutonic rocks with basalts from the Mark region of the Mid-Atlantic Ridge. in *Proceedings of the Ocean Drilling Program, Scientific Results* edited by Karson, J.A., Cannat, M., Miller, D.J. and Elthon, D., **153**, 181–241.
- Chen, Y.J. (1992): Oceanic crustal thickness versus spreading rate. *Geophysical Research Letters*, **8**, 753–756.
- Chenevez, J., Machetel, P. and Nicolas, A. (1998): Numerical model of magma chambers in the Oman ophiolite. *Journal of Geophysical Research*, **103**, 15443–15455.
- Constantin, M., Hékinian, R., Ackermann, D. and Stoffers, P. (1995): Mafic and ultramafic intrusions into upper mantle peridotites from fast spreading centers of the Easter microplate (South East Pacific). in *Mantle and Lower Crust Exposed in Oceanic Ridges and in Ophiolite* edited by Visser, R.L.M. and Nicolas, A., Kluwer Academic Publishers, Netherlands. 71–120.
- Constantin, M., Hékinian, R., Bideau, D. and Hébert, R. (1996): Construction of the oceanic lithosphere by magmatic intrusions: Petrological evidence from plutonic rocks formed along the fast-spreading East Pacific Rise. *Geology*, **24**, 731–734.
- Coogan, L.A., Gillis, K.M., MacLeod, C.J., Thompson, G.M. and Hekinian, R. (2002a): Petrology and geochemistry of the lower ocean crust formed at the East Pacific Rise and exposed at Hess Deep: A synthesis and new results. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, **3**, doi:10.1029/2001GC000230.
- Coogan, L.A., MacLeod, C.J., Dick, H.J.B., Edwards, S.J., Kvassnes, A., Natland, J.H., Robinson, P.T., Thompson, G. and O'Hara, M.J. (2002b): Whole-rock geochemistry of gabbros from the Southwest Indian Ridge: Constraints on geochemical fractionations between the upper and lower oceanic crust and magma chamber processes at (very) slow-spreading ridges. *Chemical Geology*, **178**, 1–22.
- Crispini, L., Tartarotti, P. and Umino, S. (2006): Microstructural features of a subaqueous lava from basaltic crust off the East Pacific Rise (Odp Site 1256, Cocos Plate). *Ophiolite*, **31**, 117–127.
- Detrick, D.S., Buhl, P., Vera, E., Mutter, J., Orcutt, J., Madsen, J. and Brocher, T. (1987): Multi-channel seismic imaging of a crustal magma chamber along the East Pacific Rise. *Nature*, **326**, 35–41.
- Detrick, R.S., Collins, J., Stephen, R. and Swift, S. (1994): In situ evidence for the nature or seismic layer 2/3 boundary in oceanic crust. *Nature*, **370**, 288–290.
- Dick, H.J.B., Natland, J.H., Alt, J.C., Bach, W., Daniel, B., Gee, J.S., Haggas, S., Hertogen, J.G.H., Hirth, G., Holm, P.M., Ildefonse, B., Iturrino, G.J., John, B.E., Kelley, D.S., Kikawa, E., Kingdon, A., LeRoux, P.J., Maeda, J., Meyer, P.S., Miller, D.J., Naslund, H.R., Niu, Y.L., Robinson, P.T., Snow, J., Stephen, R.A., Trimby, P.W., Worm, H.U. and Yoshinobu, A. (2000): A long in situ section of the lower ocean crust: Results of ODP Leg 176 drilling at the Southwest Indian Ridge. *Earth and Planetary Science Letters*, **179**, 31–51.
- Fox, P.J., Schreiber, E., Rowlett, H. and McCamy, K. (1976): The geology of the Oceanographer fracture zone: A model for fracture zones. *Journal of Geophysical Research*, **81**, 4117–4128.
- Francheteau, J., Patriat, P., Segoufin, J., Armijo, R., Doucoure, M., Yelles-Chaouche, A., Zúñiga, J., Calmant, S., Naar, D.F. and Searle, R.C. (1988): Pito and Orongo Fracture Zones: The Northern and Southern boundaries of the Easter microplate (southeast Pacific). *Earth and Planetary Science Letters*, **89**, 363–374.
- Geshi, N., Umino, S., Kumagai, H., Sinton, J.M., White, S.M., Kisimoto, K. and Hilde, T.W. (2007): Discrete plumbing systems and heterogeneous

- magma sources of a 24 km³ off-axis lava field on the western flank of East Pacific Rise, 14°S. *Earth and Planetary Science Letters*, **258**, 61–72.
- Gillis, K.M. and Coogan, L.A. (2002): Anatectic migmatites from the roof of an ocean ridge magma chamber. *Journal of Petrology*, **43**, 2075–2095.
- Hékinian, R., Francheteau, J., Armijo, R., Cogné, J.P., Constantin, M., Girardeau, J., Hey, R., Naar, D.F. and Searle, R. (1996): Petrology of the Easter microplate region in the South Pacific. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, **72**, 259–289.
- Hooft, E.E.E., Schouten, H. and Detrick, R.S. (1996): Constraining crustal emplacement process from the variation in seismic layer 2A thickness at the East Pacific Rise. *Earth and Planetary Science Letters*, **142**, 289–309.
- Juteau, T. and Maury, R. (1999): *The Oceanic Crust, from Accretion to Mantle Recycling*. Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, New York, 390p.
- Karson, J.A. (1998): Internal structure of oceanic lithosphere: A perspective from tectonic windows. in *Faulting and Magmatism at Mid-Ocean Ridges* edited by Buck, R.W., Delaney, P.T., Karson, J.A. and Lagabriele, Y., *AGU Geophysical Monograph*, **106**, 177–218.
- Karson, J.A., Klein, E.M., Hurst, S.D., Lee, C.E., Rivizzigno, P.A., Curewitz, D., Morris, A.R. and Hess Deep '99 Scientific Party (2002): Structure of uppermost crust exposed at the Hess Deep Rift: Implications for subaxial processes at the East Pacific Rise. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, **3**, doi:10.1029/2001GC000155.
- Kelemen, P. and Aharonov, E. (1998): Periodic formation of magma fractures and generation of layered gabbros in the lower crust beneath oceanic spreading ridges. in *Faulting and Magmatism at Mid-Ocean Ridges* edited by Buck, R.W., Delaney, P.T., Karson, J.A., Lagabriele, Y., *AGU Geophysical Monograph*, **106**, 267–289.
- Kelemen, P.B., Koga, K. and Shimizu, N. (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.
- Macdonald, K.C., Haymon, R. and Shor, A. (1989): 220 km² recently erupted lava field on the East Pacific Rise near lat 8°S. *Geology*, **17**, 212–216.
- MacLennan, J., Hulme, T. and Singh, S.C. (2004): Thermal models of oceanic crustal accretion: Linking geophysical, geological and petrological observations. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, **5**, doi:10.1029/2003GC000605.
- MacLeod, C.J. and Yaouancq, G. (2000): A fossil melt lens in the Oman ophiolite: Implications for magma chamber processes at fast spreading ridges. *Earth and Planetary Science Letters*, **176**, 357–373.
- 松本 剛・宮下純夫・荒井章司・森下知晃・前田仁一郎・熊谷英憲・大友幸子・Dick, H. (2003): 南西インド洋海嶺アトランティス海台に見られる下部地殻・上部マントル層序と「岩石学的モホ面」の実態. 地学雑誌, **112**, 705–719.
- 宮下純夫 (1989): 海嶺下のマグマチェンバーモデル—拡大速度と結晶分化作用の様式との関連. 地学雑誌, **98**, 212–230.
- 宮下純夫・前田仁一郎 (2003): 海洋地殻の構成と火成活動. 地学雑誌, **112**, 668–683.
- 宮下純夫・海野 進・足立佳子 (2002): オフィオライト研究の新局面: オマーンオフィオライトを例として. 地質学雑誌, **108**, 520–535.
- Miyashita, S., Adachi, Y. and Tanaka, S. (2007): Partial melting of oceanic crust: Anatectites in the gabbro-dike transition of Oman ophiolite. *Goldschmidt Conference 2007, Cologne, Germany. Geochimica et Cosmochimica Acta*, **71**, A675.
- 宮下純夫・山崎秀策・根尾夏紀・海野 進・統合国際深海掘削計画第312次航海研究者一同 (2007): 1256D 掘削孔におけるグラニュライト様岩について. 日本地球惑星科学連合 2007 年大会, K129-008.
- Naar, D.F. and Hey, R.N. (1991): Tectonic evolution of the Easter microplate. *Journal of Geophysical Research*, **96**, 7961–7993.
- Natland, J.H. and Dick, H.J.B. (2002): Stratigraphy and composition of gabbros drilled in Ocean Drilling Program Hole 735B, southwest Indian Ridge: A synthesis of geochemical data. in *Proceedings of the Ocean Drilling Program, Scientific Results* edited by Natland, J.H., Dick, H.J.B., Miller, D.J. and Von Herzen, R.P., **176**, 1–69.
- 根尾夏紀・宮下純夫 (2007): 拡大速度と海洋地殻組成. 東京大学海洋研究所共同利用研究集会「海底拡大形の総合研究」, 講演要旨集, 14.
- Nicolas, A. (1992): Kinematics in magmatic rocks in special reference to gabbros. *Journal of Petrology*, **33**, 891–915.
- Nicolas, A., Reuber, I. and Benn, K. (1988): A new magma chamber model based on structural studies in the Oman ophiolite. *Tectonophysics*, **151**, 87–105.
- Niu, Y. and Batiza, R. (1997): Trace element evidence from seamounts for recycled oceanic crust in the Eastern Pacific mantle. *Earth and Planetary Science Letters*, **148**, 471–484.
- Niu, Y., Gilmore, T., Mackie, S., Greig, A. and Bach, W. (2002): Mineral chemistry, whole-rock compositions, and petrogenesis of Leg 176 gabbros: Data and discussion. in *Proceedings of the Ocean Drilling Program, Scientific Results* edited by Natland, J.H., Dick, H.J.B., Miller, D.J. and Von Herzen, R.P., **176**, 1–60.
- Perfit, M.R. and Chadwick, W.W., Jr. (1998): Magmatism at mid-ocean ridges: Constraints from volcanological and geochemical investigations. in *Faulting and Magmatism at Mid-Ocean Ridges* edited by Buck, R.W., Delaney, P.T., Karson, J.A. and Lagabriele, Y., *AGU Geophysical Monograph*, **106**, 59–115.

- Perfit, M.R., Fornari, D.J., Smith, M.C., Bender, J.F., Langmuir, C.H. and Haymon, R.M. (1994): Small-scale spatial and temporal variations in mid-ocean ridge crest magmatic processes. *Geology*, **22**, 375–379.
- 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. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, **154**, 575–590.
- Phipps Morgan, J., Harding, A., Orcutt, J. and Chen, Y.J. (1994): An observational and theoretical synthesis of magma chamber geometry and crustal genesis along a mid-ocean ridge spreading center. in *Magmatic Systems* edited by Ryan, M.P., Academic Press, Inc., 139–178.
- Purdy, G.M., Kong, L.S.L., Christeson, G.L. and Solomon, S.C. (1992): Relationship between spreading rate and the seismic structure of mid-ocean ridges. *Nature*, **355**, 815–817.
- Quick, J.E. and Denlinger, R.P. (1993): Ductile deformation and the origin of layered gabbro in ophiolites. *Journal of Geophysical Research*, **98**, 14015–14028.
- Regelous, M., Niu, Y., Wendt, J.I., Batiza, R., Greig, A. and Collerson, K.D. (1999): Variations in the geochemistry of magmatism on the East Pacific Rise at 10°30'N since 800 ka. *Earth and Planetary Science Letters*, **168**, 45–63.
- Rubin, A.M. (1990): A comparison of rift-zone tectonics in Iceland and Hawaii. *Bulletin of Volcanology*, **52**, 302–319.
- Scheirer, D.S. and Macdonald, K.C. (1995): Near-axis seamounts on the flanks of the East Pacific Rise, 8°N to 17°N. *Journal of Geophysical Research*, **100**, 2239–2259.
- Sims, K.W.W., Blochert-Toft, J., Fornari, D.J., Perfit, M.R., Golstein, S.J., Johnson, P., DePaolo, D.J., Hart, S.R., Mirrell, M.T., Michael, P.J., Layne, G.D. and Ball, L.A. (2003): Aberrant youth: Chemical and isotopic constraints on the origin of off-axis lavas from the East Pacific Rise, 9°–10°N. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, **4**, 8621, doi:10.1029/2002GC000443.
- Smith, M.C., Perfit, M.R., Fornari, D.J., Ridley, W.I., Edwards, M.H., Kurras, G.J. and Damm, K.L. (2001): Magmatic processes and segmentation at a fast spreading mid-ocean ridge: Detailed investigation of an axial discontinuity on the East Pacific Rise crest at 9°37'N. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, **2**, doi:10.1029/2000GC000134.
- Teagle, D.A.H., Alt, J.C., Umino, S., Miyashita, S., Banerjee, N.R., Wilson, D.S. and the Expedition 309/312 Scientists (2006): *Proceedings of the Integrated Ocean Drilling Program*. **309/312**, Integrated Ocean Drilling Program Management International, Inc., doi:10.2204/iodp.proc.309312.101.2006.
- 海野 進 (2003): 海洋地殻深度掘削の成果と課題. 地学雑誌, **112**, 650–667.
- Umino, S. (2006): Contrasting upper crustal structures revealed by deep ocean crust drilling —Insights into shallow magma plumbing systems beneath intermediate versus superfast spreading ridges. *19th General Meeting IMA*, Abstract, 90348.
- 海野 進 (2007): The origin of the sheeted dike complex beneath the intermediate- versus superfast-spread mid-ocean ridges. 日本地球惑星科学連合 2007 年大会予稿集, K129–007.
- Umino, S., Obata, S., Lipman, P., Smith, J.R., Shibata, T., Naka, J. and Trudsdell, F. (2002): Emplacement and inflation structures of submarine and subaerial pahoehoe lavas from Hawaii. in *Hawaiian Volcanoes: Deep Underwater Perspectives* edited by Takahashi, E., Lipman, P.W., Garcia, M.O., Naka, J. and Aramaki, S., *AGU Geophysical Monograph*, **128**, 85–101.
- 海野 進・下司信夫・熊谷英憲・岸本清行 (2008): 東太平洋海膨のオフリッジ火山活動はモホ遷移帯起源か? 地学雑誌, **117**, 190–219.
- White, S.M., Macdonald, K.C., Scheirer, D.S. and Cormier, M.-H. (1998): The distribution of isolated volcanoes on the flanks of the Southern East Pacific Rise, 15.3°–20°S. *Journal of Geophysical Research*, **103**, 30371–30384, doi:10.1029/98JB02791.
- White, S.M., Macdonald, K.C. and Sinton, C.M. (2002): Volcanic mound fields on the East Pacific Rise, 16°–19°S: Low effusion rate eruptions at overlapping spreading centers for the past 1 Myr. *Journal of Geophysical Research*, **107**, 2240, doi:10.1029/2001JB000483.
- White, S.M., Umino, S. and Kumagai, S. (2006): Transition from seamount chain to intraplate volcanic ridge at the East Pacific Rise. *Geology*, **34**, 293–296.
- Wilson, D.S., Teagle, D.A.H., Alt, J.C., Banerjee, N.R., Umino, S., Miyashita, S., Acton, G.D., Anna, R., Barr, S.R., Belghoul, A., Carlut, J., Christie, D.M., Coogan, R.M., Cooper, K.M., Cordier, C., Crispini, Durand, L., Einudi, S.R., Galli, F.L., Gao, Y., Geldmacher, J., Gilbert, L.A., Hayman, N.W., Herrero-Bervera, E., Hirano, N., Holter, S., Ingle, S., Jiang, S., Kalberkamp, U., Kernekin, M., Koepke, J., Laverne, C., Lledo Vasquez, H.L., MacLennan, J., Morgan, S., Neo, N., Nichols, H.J., Park, S., Reichow, M.K., Sakuyama, T., Sano, T., Sandwell, R., Scheibner, B., Smith-Duque, C.E., Swift, S.A., Tartarotti, P., Tikku, A.A., Tominaga, M., Veloso, E.A., Yamasaki, T., Yamazaki, S. and Ziegler, C. (2006): Drilling to gabbro in intact ocean crust. *Science*, **312**, 1016–1020.

(2007 年 10 月 15 日受付, 2008 年 1 月 24 日受理)