

## 海洋地殻の構成と火成活動

宮下純夫\* 前田仁一郎\*\*

### Constitution of Oceanic Crust and Ocean Ridge Magmatism

Sumio MIYASHITA \* and Jin-ichiro MAEDA \*\*

#### Abstract

Volumetrically, magmatism at spreading axes occupies more than 60% of present day volcanism, and oceanic crust generated there covers more than two thirds of earth surface. Therefore, studies of the oceanic crust and magmatism at spreading axes yield significant insights to understanding earth evolution. Recent studies on oceanic crust through drilling, submersible surveys, dredging and geophysical exploration indicates that there is considerable variation in lithologic composition and stratigraphic sequences in oceanic crust that is dependent on the spreading rate. Typical ophiolitic stratigraphic sequences are expected to occur at fast-spreading ridges, while complicated and variable stratigraphic successions are encountered at slow-spreading ridges. Mid-Ocean Ridge Basalts (MORBs) are generally regarded as having comparatively uniform compositions. Major element compositions of MORB corrected for low-pressure fractionation show a global systematic variation correlated to axial highs, which can be ascribed to the degree of partial melting. However, the composition of MORB should represent a final product of magmas whose compositions have been greatly modified during ascent through mantle peridotite, by crustal fractionation that produced lower crust (ultramafic to gabbroic cumulates), and by mixing in a melt lens in shallow crust. Therefore, to fully understand MORB petrogenesis it is necessary to study the total magmatic system, which includes surface lavas, dike complexes, plutonic cumulates extracted from melts, and residual mantle. Recent results from the MARK area of the Mid-Atlantic Ridge, the Atlantis bank of the Southwest Indian Ridge and Hess Deep near the East Pacific Rise strongly suggest that source mantle is heterogeneous and that the magmatic system differs significantly depending on the spreading rate.

**Key words** : ocean ridge , magmatism , MORB , spreading rate , oceanic crust

**キーワード** : 海嶺 , 火成作用 , 海嶺玄武岩 , 拡大速度 , 海洋地殻

---

\* 新潟大学理学部地質科学教室

\*\* 北海道大学大学院理学研究科

\* Department of Geology, Faculty of Science, Niigata University

\*\* Division of Earth and Planetary Sciences, Graduate School of Science, Hokkaido University

## I. はじめに

地球表面の60%以上を構成している海洋底に関する知識の飛躍的な増大は、地球科学における新たなパラダイムであるプレートテクトニクスをもたらした。海洋プレートは海嶺で生成され、沈み込み帯で再び母なるマントルへと戻っていく。海嶺での火成活動は地球上におけるマグマ生産量の3分の2以上を占めており(Crisp, 1983)、地球システムにおける物質循環を考える上で極めて重要である。海嶺における海洋プレートの形成プロセスを理解するためには、その上部を占める海洋地殻の地質学的・岩石学的実体を詳細に解明することが必要である。そのために、深海掘削や潜水船による調査などが精力的に行われ、その実体についてはかなり明らかになってきたが、まだ未解決の問題も多い。例えば、マントル湧昇流の形態(ダイヤピル=3次元あるいはシート状=2次元)、マントルの性質(均質あるいは不均質)、マグマの特徴と成因、その上昇プロセスに関連した問題、海嶺下のマグマ溜まりの大きさや形態、海洋地殻の形成プロセス、特に下部地殻の形成プロセス、海水と海洋地殻との相互作用(海水の侵入深度とマグマへの混入による影響)などである。

海嶺下における上部マントルでのメルトの発生、移動、上昇、地殻内での固結プロセスといった一連のマグマシステムに対する研究は、これまでは主に海洋地殻の表面を覆っている海嶺玄武岩(MORB)を中心になされてきた。しかしMORBの組成は、上部マントルで生成されてから様々なプロセスをたどった最終産物であることに注意する必要がある。最近、ガブロやシート状岩脈群なども含めて、全体としてのマグマシステムを解明しようとする研究が開始されている。今回はこうした最近の研究動向についてレビューし、今後の展望について議論する。本論文では、海洋地殻の構成と主として地殻内での火成作用に関連した問題について述べる。なお、80年代までの海嶺火成活動に関する議論や、マグマ溜まりモデルや拡大速度との関係などは、宮下(1989)によって紹介されている。また、90年代前半までのオフィオラ

イトと海洋リソスフェアの関係に関する研究は荒井(1995)によって紹介されている。

## II. 海洋地殻の構成

### 1) 海洋地殻の構成と海嶺の拡大速度との関係

海洋地殻の構成に関する初期の研究は、海洋底の岩石に関する情報が乏しかったことから、主に海洋底の地震学的構造(Raitt, 1963など)とオフィオライトからの情報(Moores and Vine, 1971; Coleman, 1977)に頼らざるを得なかった。海洋地殻の構成は、海洋リソスフェア=オフィオライト層序(Penrose Conference Participants, 1972)とみなされ、上部から玄武岩溶岩層、シート状岩脈群、塊状ガブロ/層状ガブロ、モホ遷移帯といった順に成層構造しているとみなされた。Karson(1998)はこの時期の状況について、地球物理学者はオフィオライト層序を念頭に置いて地震学的データを解釈し、一方、地質学者はその地震学的構造との類似を根拠にオフィオライトを海洋地殻であると考えたという、一種の循環論に陥っていたと指摘している。

1970年代以降、DSDP/ODPによる掘削や潜水船による観察、海底マッピングの精度の著しい向上、地球物理学的探査の進展などによって、海洋地殻の構成に関する知識は著しく増大した。そして、海嶺の地形的特徴や海洋地殻の構成はそれを生み出した海嶺の拡大速度に依存しているということが共通の認識となってきた(Cannat, 1993; Karson, 1998; Dilek *et al.*, 1998; Juteau and Maury, 1999)。つまり、高速~中速拡大軸(> 6 cm/yr)では海洋地殻層序(=オフィオライト層序)が成立していて、厚さもほぼ6 km前後と一定であり、溶け残りマントルはハルツバージャイトであるのに対し、低速~超低速拡大軸(< 6 cm/yr)ではその層序が不完全で、シート状岩脈群を欠如したり、マントルかんらん岩が直接玄武岩に覆われていたり、さらに極端な場合にはマントルかんらん岩が直接海嶺中軸谷に露出している例など、複雑な様相を示している(Cannat, 1993; Karson, 1998)。溶け残りマントルは、レルゾライトである最上位の溶岩層にも

特徴的な違いが認められている。拡大速度が小さくなるにつれて枕状溶岩の占める割合が増加し、高速拡大軸では塊状なシートフローが卓越する。これは噴出の割合が拡大速度に伴って大きくなることによって説明されている (Perfit and Chadwick, 1998)。図 1 に高速拡大海嶺と低速拡大海嶺の模式的柱状図を示す。低速～超低速拡大軸での複雑な様相は、マントルからもたらされるメルトが定常的ではなく間欠的で、メルトが供給されない時期にも構造的に拡大が進行するため、海嶺の中軸谷に直接上部マントルが露出すると考えられている。

地震学的な海洋地殻構造と海洋地殻層序は、図 1 の様に対応づけられている。つまり、海洋地殻第 2 層は溶岩～シート状岩脈群、第 3 層は塊状ガブロ～層状ガブロとみなされてきた。しかし、コスタリカ海嶺の南側の ODP サイト 504B の結果は、地震学的な境界が岩相境界には対応しておらず、シート状岩脈群の中間にその境界が位置していることを示した (Detrick *et al.*, 1994)。この結果は、地震学的な境界が同一の岩相内における変成度の上昇に伴う孔隙率の減少という物性変化によっていること、すなわち、それまでの地震学的境界＝岩相境界という常識が覆されたことになる。サイト 504B は海洋地殻ではもっとも深い掘削孔であり、溶岩層～シート状岩脈群という、オフィオライトから予想されていた地殻層序を示している。そのため、この掘削孔は高速～中速拡大の海洋地殻のスタンダードとされている。しかし、一度溶融したマントルが再溶融したとするモデルが提案されるほど、504B を構成している玄武岩は MORB としては異常に不適合元素に枯渇しており (Autio and Rhodes, 1983; Sparks, 1995)、ここでの結果をスタンダードとして扱って良いのか問題が残されている。

一方、低速拡大軸の海洋地殻は複雑な構成からなっていることを上記で紹介したが、インド洋アトランティスパーク海洋地殻第 3 層の下半部が蛇紋岩化したかんらん岩からなっており、地殻マントル境界としてのモホ面は蛇紋岩化作用の前線を示しているとの提案がなされている (Muller *et*

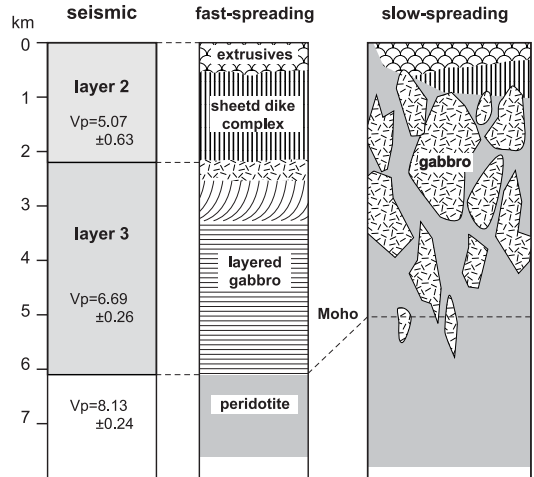


図 1 海洋地殻の模式的な柱状図 (Cannat, 1993 および Juteau and Maury, 1999 を一部変更)。高速拡大軸はオフィオライト層序と一致しているが、低速拡大軸は変化が大きく、シート状岩脈群を欠如していたり、蛇紋岩化したかんらん岩が最上位付近まで上昇したりしている。

Fig. 1 Schematic lithologic column of oceanic crust modified from Cannat (1993) and Juteau and Maury (1999). Crustal structures produced at fast-spreading ridges is similar as ophiolite sequence while those produced at slow-spreading ridges are complicated and heterogeneous.

*al.*, 1997)。10～40%蛇紋岩化したかんらん岩の地震波速度はガブロと全く区別できないのである (Horen *et al.*, 1996)。プレートテクトニクス成立以前にヘスによって提唱されていた海洋地殻の構成に関する古典的考え (下部地殻は蛇紋岩によって構成されており、モホ不連続面は蛇紋岩化の前線を表している: Hess, 1962) が、低速拡大軸に関しては一部成立している可能性もある。

ところで、海洋地殻の表層を形成している溶岩層については、よく知られていると一般的には思われている。しかし、溶岩層全体が掘削された例はまだ極めて少ない。特に高速拡大軸で形成された海洋地殻ではまだ溶岩層全体を掘削した例は殆どない。こうした状況については海野 (2003: 本特集) によって詳しく紹介されている。

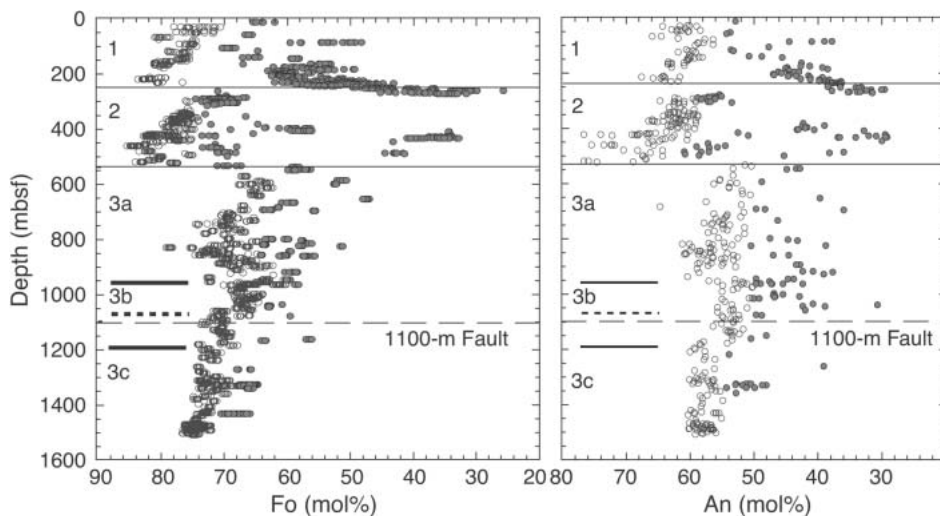


図 2 南西インド洋アトランティスバンクにおける ODP サイト 735B におけるかんらん石と斜長石の垂直的な組成変化 (Natland and Dick, 2002 による)。数百 m オーダーの大きな単位のユニットに別れており、それぞれはさらに細かいオーダーのユニットの出現のために、複雑な変化を示している。著しく分化した岩石は剪断帯に沿って貫入している。白丸：ガブロ、灰色の丸：オキサイドガブロ。

Fig. 2 Vertical compositional variations of olivine and plagioclase for the gabbroic section at Site 735B after Natland and Dick (2002).

This succession is composed of five major units of primitive gabbro (open circle), each more differentiated toward the top, and each some hundreds of meters thick, which are subsequently intruded by numerous more differentiated gabbros (gray circle). The differentiated gabbros intrude along shear zone.

海洋地殻におけるシート状岩脈群の例は、サイト 504B のほかに、東太平洋のヘスディーブで確認されている。一方、低速拡大軸ではシート状岩脈群を欠く例が多い (Karson, 1998)。

シート状岩脈群よりも深部の地殻深部～上部マントルの実体の解明は、これまで主としてトランスフォーム断層に沿った急崖に露出する岩石に基づいていた。しかし、トランスフォーム断層に隣接した海嶺では、マントルの部分溶融度が低く、また、海洋地殻の厚さも通常より薄くなっている (Karson and Elthon, 1987)。したがって、トランスフォーム断層にそって観察されている地殻深部やマントル物質は、必ずしも通常の見られる海嶺下の地殻深部～上部マントルを代表していない可能性に注意する必要がある。

## 2) 海洋地殻下部～マントルの実体：低速～超低速拡大海嶺

低速～超低速拡大軸のトランスフォーム断層に沿って、海洋地殻～上部マントルが構造的に上昇している例 (oceanic core complex と呼ばれている) が知られており、そこでは海底にガブロや超苦鉄質岩が直接露出している。南西インド洋のアトランティスバンクや大西洋中央海嶺の北緯 22° 付近の MARK 地域がその典型である。南西インド洋海嶺のアトランティス II 断裂帯の東側に位置するアトランティスバンクは、水深がわずか 700 m 前後と浅く、2 回の ODP での掘削によりサイト 735B において 1.5 km にわたってガブロが掘削された。図 2 に鉱物組成の垂直的な組成変化を示すが、ガブロの組成範囲が著しく広い、すなわち結晶分化作用が顕著に進行している、上部ほどパイモダルな特徴を示し、比較的未分化なガブロと著しく分化したフェログャブロとからなっているのに対し、深部の岩石は比較的均質な組成と

なっているなどの特徴が示されている。また、数百メートル単位のスケールの大きなユニットが認められており、大局的には上部へ向かってそれぞれ分化が進行していくが、かなりばらつきを示している。これは、さらに小さなスケールの貫入岩体から構成されているためである (Natland and Dick, 2002)。また、著しく分化したガブロは、その産状や垂直的 (層序的) 変化の検討などから、その場での閉鎖系での結晶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玄武岩液が剪断帯に沿って侵入したためと解釈されている。Dick *et al.* (2000), Natland and Dick (2002) は、これらの全体としての組成がマントルかんらん岩と平衡にあったメルトよりは著しく分化していることを指摘し、より未分化な集積岩がガブロ層の深部に存在していると考えた。Niu *et al.* (2002) や Coogan *et al.* (2002b) などは、低速拡大軸では最上部マントルで熱伝導的冷却が進行しているため (Bown and White, 1994), マントル上部で結晶分化作用を被ったやや分化したメルトがモホより上部には供給されたためとしている。

アトランティスバンク周辺に関しては、海洋科学技術センターとウッズホール海洋研究所との共同調査が1998年から2002年にかけて行われており、同地域の精密な地形や地球物理学的探査、岩石の分布状況などが詳細に明らかとなった (松本ほか, 2003: 本特集)。また、マントルかんらん岩の上に層状ガブロが「整合」的に覆っている露頭 (=モホ面) が見いだされた。ガブロの最下部のみ2 m程にわたって見事なりズミック層状構造が発達しているが、すぐに塊状なガブロに移化する。しかしこのガブロのかんらん石や斜長石の組成は、かなり分化しており、直下のマントルかんらん岩と平衡にあったメルトから晶出したとはとても考えられない。海嶺セグメント構造との関係やメルトの横方向への移動なども考慮しなければならないが、この事実は、マントル内である程度分化したメルトがモホより上に供給されていることを示唆している (宮下ほか, 2003)。

海洋底での変成作用は、変形作用を殆ど伴わず、

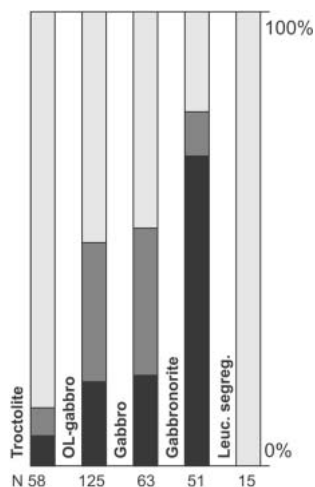


図 3 大西洋 MARK 地域 ODP サイト 921-923 における各岩石タイプ毎の変形作用の頻度図 (Cannat *et al.*, 1997 による)。

右側へ向かってより分化した岩石の順に配列してある。より分化した岩石ほど強く変形作用を被っていることが明瞭であるが、分化した残液から形成されたとみられる優白質な岩石は変形作用を被っていない。N はサンプル数を示す。黒色部: 強変形, 暗灰色部: 中変形, 灰色部: 弱 ~ 非変形。

Fig. 3 Histogram showing the proportion of recrystallized plagioclase in the different gabbroic lithologies at Site 921-923 after Cannat *et al.* (1997).

More differentiated rocks (toward right) suffer more intensive deformation, but the most evolved rocks of leucocratic segregation are free from the deformation. N = numbers of samples of each lithology. Light gray: less than 30% of plagioclases recrystallized; dark gray: 30-70%; black: >70%.

高温の変形作用はトランスフォーム断層付近で生じると思われてきた (例えば, 都城, 1994)。しかし, サイト 735B のガブロはかなりの頻度 (コアの 20%前後) でマイロナイト化しており, また分化したガブロほど変形作用を強く被っている。同様の結果は, 大西洋中央海嶺のケーン断裂帯の南側で行われた掘削 (ODP Leg 153: サイト 921-923) でも確認されている, 図 3 にサイト 921-923 で得られた各岩石タイプにおける変形岩の出現頻度を示すが, 図の右側, すなわちより分化し

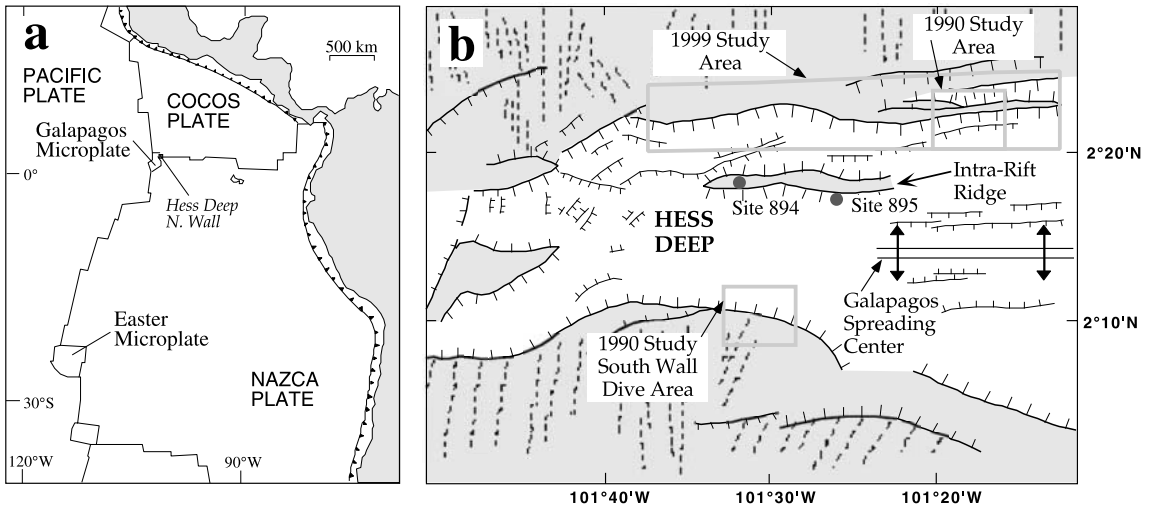


図 4 東太平洋ヘスディーブの位置 (a) と構造的特徴 (b) (Stewart *et al.*, 2002 による)。  
ヘスディーブはガラパゴス拡大軸の海嶺伝播の先端部分で EPR で形成された海洋リソフェアが割れて形成された。

Fig. 4 (a) Tectonic map of the southwestern Pacific ocean showing the location of the Hess Deep. (b) Tectonic map of the Hess Deep after Stewart *et al.* (2002).

The Hess Deep was formed at the leading tip of the westward propagating ridge axis. Extension of the EPR lithosphere ahead of the propagating ridge has produced rifting of ~ 1 m. y. old oceanic crust accreted at fast spreading EPR.

た岩相ほど変形岩の出現頻度が高くなっている。また、もっとも分化した残液から形成されたと思われる優白岩では逆に変形作用は殆ど認められていない。こうした事実から、その変形作用はトランスフォーム断層による剪断運動によるのではなく、ガブロの固結末期にまだメルトが一部存在していた高温条件下から変形作用が開始されたときみなされている (Cannat *et al.*, 1997)。

こうした変形作用が生じるのは、海嶺拡大が非対称に (= 斜めに) 生じるためとされている (Karson, 1998)。拡大が斜めに生じると、海嶺軸部には地殻深部からマントルに達するような大規模な剥離断層が発達するようになり、一方の翼部に oceanic core complex が上昇するというモデルである。言葉を変えると、oceanic core complex が形成されるのは、海嶺拡大が非対称に生じるためということになる。もしガブロの変形作用が非対称拡大に起因しているとする、大部分の海嶺拡大は対称的に生じており、その下部地殻におい

て、同様の変形作用が生じているかは疑わしい。つまり、典型的な低速～超低速拡大軸の海洋地殻の実体が、735B や MARK 地域で代表されるかどうかについては、まだ問題が残っている。

### 3) 高速拡大海嶺の海洋地殻

高速拡大海嶺で形成された地殻深部の岩石は、低速拡大海嶺に比べるとはるかに情報が乏しい。これは、高速拡大海嶺では oceanic core complex が見いだされていないためである。例外的に深部物質が露出しているのは東太平洋海嶺の東側に位置するヘスディーブである (図 4)。ここではコスタリカ海嶺が西側へ向かって海嶺伝播を行っているために、東太平洋海嶺で形成された海洋プレートが楔形に割れて地殻深部や上部マントルが露出したと考えられている (Lonsdale, 1988)。ヘスディーブは、通常の高速海嶺で形成された海洋地殻～マントルが露出しているとみられる点で、重要な場所である (図 4)。

本地域では、潜航調査により超苦鉄質岩、ガブ

口が広く分布していることが確かめられており (Francheteau *et al.*, 1990), Hekinian *et al.* (1993) によってこれらの岩石学的特徴が報告されている。ODP Leg147 では、モホ遷移帯 (Hole 895: 95 m), ガブ口 (Hole 894: 130 m) が掘削されている (Gillis *et al.*, 1993)。サイト 894 のガブ口はその岩相的特徴や斜長石の正累帯構造の発達などにより、ガブ口層の上部とみられている (Natland and Dick, 1996)。サイト 895 で得られた成果については荒井 (1995) によって詳しく紹介されている。1999 年には潜水艇アルビンなどにより北側の壁上部について 30 km にわたるトラバースが観察され、ガブ口層上部～シート状岩脈群～枕状溶岩層の断面とともに、0.5 Ma の年代変化に沿った海洋地殻の変化が検討された (Karson *et al.*, 2002)。以上の研究によって、本地域では典型的な海洋地殻層序を示すことが明らかとなった。Coogan *et al.* (2002a) は、上記のガブ口全体について再検討し、低速拡大軸のガブ口が高温での塑性変形を被っているのと異なり、マグマの流動による鉱物の定向配列を示した。また、その出現位置などから浅部ガブ口と深部ガブ口とに大別し、それぞれオマーンの上部ガブ口と層状ガブ口に類似していることを示した。また、斜方輝石が比較的早期から出現しているガブ口が存在することを指摘し、MORB の晶出順序と一致していない岩石が存在することを示した。つまり、ガブ口には噴出した MORB よりもより多様なメルトの記録が保存されていることを強調した。この問題は、上部地殻の岩石学 (Stewart *et al.*, 2002) も含めて後でもう一度触れる。

一方、噴出岩層の厚さが横方向に変化に富んでいることやシート状岩脈群が複雑な構造をしていることが明らかにされ、高速拡大軸における経時変化、つまりマグマ供給が活発な時期と不活発な時期によるものと説明されている (Karson *et al.*, 2002)。また、高温の熱水流体の侵入深度やその意義などが検討されつつある (Coogan *et al.*, 2002a)。

### III. マントルでのメルト生成から 噴出までのプロセス

上部マントルで発生したマグマが地表に到達するまでに、メルトの組成をコントロールする様々なプロセスがあり、それによってメルトの組成が変化している。こうした問題を扱っている研究は非常に多数に上り、本論文の範囲内ではそれらすべてを紹介するのは困難である。ここでは、どうい問題が議論されているかをレジメ的に紹介するに留める。

#### 1) マントル内でのプロセス

マントルの不均質性の程度：比較的均質なソースマントルがこれまでは想定されていたが、最近、マントルが不均質であることを強調する研究が増えている (Niu and Batiza, 1997 など)。

マントル内でのメルトの濃集・上昇プロセス：ポーラスフローかあるいはクラックが連結した空間を上昇したのか。メルトと壁岩マントルとの反応の程度により液の組成が変化する (Kelemen *et al.*, 1995)。

マントルの上昇がアクティブかパッシブか：低速拡大軸下ではフォーカスされたダイヤモンド状マントル湧昇、高速拡大軸下ではシート状のマントル湧昇という見方が多いが (Phipps Morgan *et al.*, 1994), 拡大速度が大きくてもダイヤモンド状という見解もある (Barth *et al.*, 1996; Nicolas and Boudier, 2000)。

マントル内での結晶分化作用：拡大速度が小さければ、熱伝導冷却が作用してマントル上部で高圧結晶分化作用を被り、モホより上位にはマントルと平衡には存在しえない分化したメルトが供給される (Niu *et al.*, 2002 など)。

#### 2) 地殻内でのプロセス

地殻内でのメルトレンズの存在の有無とその効果：地球物理学的データから高速拡大軸では、シート状岩脈群の直下に薄いメルトレンズ (厚さ 50 ~ 数百 m, 幅 1 km 前後) が存在していると考えられている (Detrick *et al.*, 1987)。低速拡大軸では、そうしたメルトレンズは存在しないか存在していたとしてもごく小さなメルトレンズが一

時的に形成されるのみと考えられている。メルトレンズが存在していると、そこでの結晶作用がメルトの組成変化をコントロールする。メルトレンズが大きかつ長期にわたって存続すれば、結晶分化作用とマグマ混合が無数に繰り返される結果、定常状態が達成され、比較的幅狭い組成となる (O'Hara, 1977)。一方、メルトレンズが小さく一時的な場合には、結晶分化作用は閉鎖系に近い形で進行し、著しく分化した岩石が形成されることになる。

ガブロ層の形成場：海洋地殻の3分の2を占めているガブロ層が、メルトレンズへの上昇の途中で形成された(複合シルモデル)、あるいはいったんメルトレンズまで上昇したメルトから晶出して現在ある位置へと運ばれた(ベルトコンベヤーモデル)、という2つのモデルが提案されている (Kelemen *et al.*, 1997; MacLeod and Yaouancq, 2000; Coogan *et al.*, 2001)。

海嶺軸方向のメルトの移動：海嶺軸方向に沿ったメルトの移動がどの程度効率的に行われるか。岩脈は海嶺軸方向と平行に貫入するとみなされているが、海嶺軸方向に沿った20 kmにもわたって、すなわちメルトレンズや海嶺セグメントの第3～4次構造を越えて岩脈内をメルトが移動するという見解が最近提出されている (Stewart *et al.*, 2002)。従来の議論では玄武岩はその直下から噴出したことが前提となっているが、メルトが効率的に海嶺軸方向へ移動するのならば、精密なレベルでの海嶺軸方向に沿った玄武岩組成の変化に関する議論に注意が必要である。

熱水流体のマグマへの混入：メルトへ熱水が流入すると酸素分圧が上昇し、メルト組成と結晶分化作用が変化する。海嶺伝播の先端などでは、こうしたプロセスにより、ガブロノーライトが生成されることが提唱されている (Boudier *et al.*, 2000)。

地殻の再溶融：マグマチェンバーの上部が上昇するとストーピングが生じるが、上位のシート状岩脈群が熱水循環により加水化しているためその基底部分が部分溶融して斜長花こう岩質メルトが生成される (Gillis and Coogan, 2002)。一方、地殻

深部からマントル上部でも、新たなダイヤビルなどにより蛇紋岩の再溶融が生じて「島弧」的な枯渇したガブロや集積岩が形成されることが報告されている (Benoit *et al.*, 1999; Bédard, 2000)。

ガブロの層状構造の成因：結晶集積、変形作用による効果 (Nicolas, 1992)、脈動的な圧力変化 (ガブロシルにおいて、メルト供給が続くと圧力が次第に増大し、限界を超えるとフラクチャーが発生して圧力開放が生じる。そのために相境界の位置が変化し、リズムック層状構造が形成される) による効果 (Kelemen and Aharonov, 1998)、一枚一枚が貫入シートを表している (Kelemen *et al.*, 1997) など、多様な成因が考えられると報告されている (宮下ほか, 2002 参照)。

海嶺火成活動の時間的変化：海嶺軸に対して直交する方向でのマグマ組成の変化がEPRで報告されており、海嶺火成活動の時間的変化が示されている (Perfit and Chadwick, 1998; Regelous *et al.*, 1999)。

オフアクシス火成活動の意義：海嶺軸近傍におけるホットスポットによらない多数の小海山の存在 (Gomez and Briaies, 2000) や、海嶺軸から数 km 離れた場所で噴出した溶岩流が見いだされていること (Perfit *et al.*, 1994; Perfit and Chadwick, 1998) から、オフアクシス火成活動も海洋地殻の形成にとって重要であることが指摘されているが、その深部での実体は不明である。

#### IV . MORB の広域的变化と不均質性

海嶺玄武岩 (MORB) の広域的組成変化の実体やその成因に関する理解は、80 90 年代に大きく前進した。MORB には、液相濃集元素に枯渇した N-MORB とそれに富んだ E-MORB の2つのタイプが存在している (BVSP, 1981; Sun and McDonough, 1989 など)。N-MORB は通常海嶺に出現するが、E-MORB は海嶺とホットスポットとが重複している場所に出現し、それらの広域的变化が大西洋中央海嶺などで検討された (Schilling *et al.*, 1983 など)。80 年代後半以降 MORB の成因論やその世界的な組成変化などに関する研究が進展し、世界全体の海嶺の系統的な



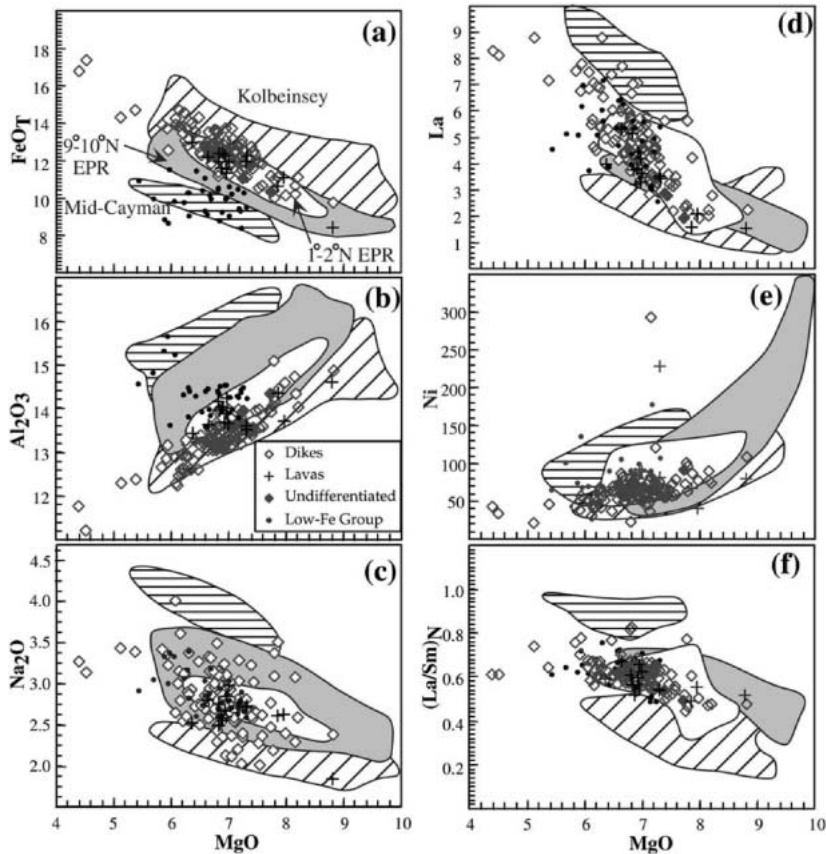


図 5 ヘスディープのシート状岩脈群，溶岩層の主成分および微量元素組成の MgO 変化図 (Stewart *et al.*, 2002 より)。  
ヘスディープのシート状岩脈群，溶岩層の主成分組成は EPR1°-2°N の玄武岩とかなり重複しているが，ヘスディープの岩石の方が組成変化の幅がかなり大きい。

Fig. 5 MgO variation diagram of major elements (a, b and c) and minor elements (d, e and f) for samples from the Hess Deep Rift after Stewart *et al.* (2002).

The basaltic rocks of the Hess Deep Rift show a wide compositional variation though they are considerably overlapped with those from 1°-2°N EPR.

組成変化 (グローバルトレンド) が明らかとなった (Klein and Langmuir, 1987)。また，低速拡大海嶺では，グローバルトレンドに直交するローカルトレンドを示すことや，均質と思われていた N-MORB が海嶺毎に組成が異なることも明瞭になってきた。グローバルトレンドについては，部分溶融度の違いとする見方が支配的である (Langmuir *et al.*, 1992)。一方，ローカルトレ

ドに関しては，高圧結晶作用による効果で説明可能なことが示されている (Grove *et al.*, 1992)。これらの議論では，低下下での結晶分化作用の影響を除去するために，MgO 変化図において  $MgO = 8 \text{ wt}\%$  へと分析値を規格化し，その値を例えば Na8 として表す方法が用いられている。このようにして得られた Na8-Ti8 の関係でみると，同じ Na8 で比較すると，太平洋 MORB は大西洋

MORB にかなり類似しているが Ti8 がやや高く、インド洋 MORB は Ti8 が低い (Langmuir *et al.*, 1992)。N-MORB がそれぞれの大洋毎に個性を有しているということは、それらを生み出したソースマンツルの組成が異なっていたことを示している。このことは同位体組成からも示されている (例えば, Mahoney *et al.*, 1998)。また、インド洋 MORB においては主成分組成が異なる 3 つのタイプ、通常の N-MORB に類似するもの、Na<sub>2</sub>O に高いタイプおよび低いタイプが識別されている (Natland, 1991)。Niu and Hekinian (1997) は、Ca8/Al8 や Al8 が拡大速度に依存しており、拡大速度が大きくなるほど部分熔融深度のインターバルが広がり、拡大速度が大きくなるほど部

分熔融度が高くなると主張している。

以上の議論は、広域的な MORB の組成変化を対象としている。以下では、ある特定の場所における、ガブロや岩脈群なども含めた議論からのアプローチについて紹介する。Stewart *et al.* (2002) は、ヘスディーブの岩脈群の全岩組成が隣接する EPR の玄武岩と比較的類似してはいるが、より幅広く多様であること、結晶分化作用で殆ど変化しないインコンパチブル元素比の変化幅が大きく、同一の起源のメルトからは説明できないことを示した (図 5)、また、隣り合うダイクにおいても結晶分化作用から期待されるトレンドと大きく斜交している例があり (図 6 の線で結ばれたペア)、隣接するダイクにおいても異なった起源のメルトから由来している例があることを示した。その起源は、インコンパチブル元素に枯渇したマンツルとそれに肥沃なマンツルの 2 つの起源物質から由来したメルトの混合によって説明されている (図 7)。彼らはダイク内では横方向にメルトが最大 20 km も移動しうること、その移動のスケールは海嶺セグメント構造の最小の単位 (第 4 次のセグメント

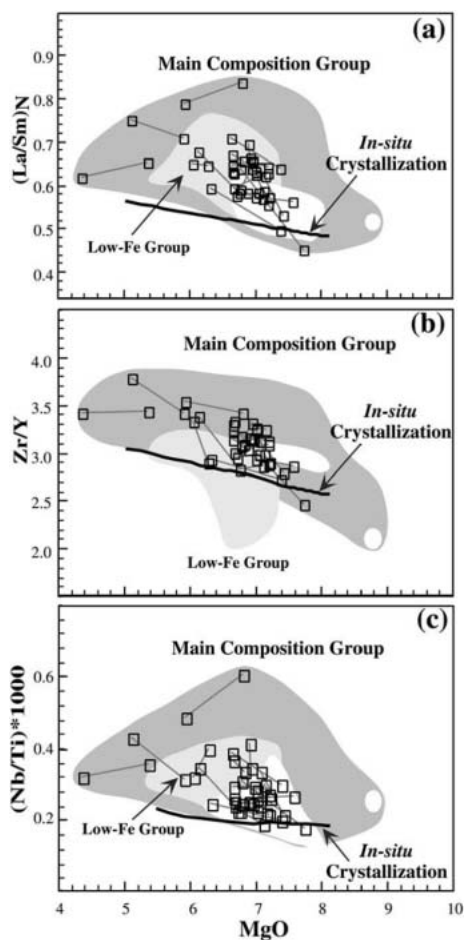


図 6 ヘスディーブのシート状岩脈群の不適合元素比の MgO 変化図 (Stewart *et al.*, 2002 より)。

太実線は結晶分化作用による変化のトレンド、細実線で結合しているサンプルは近接するダイク。白抜き領域は同地域の溶岩組成範囲で、ダイクの組成よりも均質な組成範囲を示す。ダイクの組成はばらついた広い組成範囲を示しており、近接するダイクにおいても不適合元素比がかなり異なる例や、結晶分化作用のトレンドとは逆のトレンドを示すなどから、ダイクを形成したマグマが多様な起源物質 (マンツル) に由来していることを示している。

Fig. 6 MgO versus trace element ratios of the sheeted dikes at the Hess Deep after Stewart *et al.* (2002).

The solid curve represents the *in situ* fractional crystallization trend. Open squares represent closely spaced sample pairs connected by tie lines. Note that some of tie lines are highly oblique to the fractional crystallization trend, suggesting that they are derived from heterogeneous source mantle.

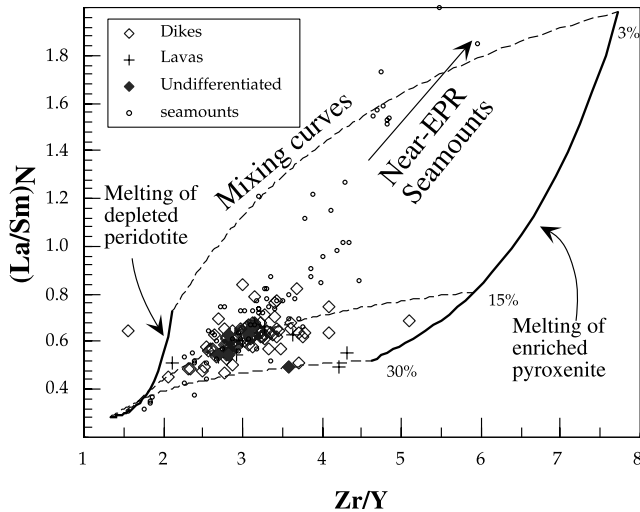


図 7 La/Sm-Zr/Y 図 (Stewart *et al.*, 2002 より)。  
 ヘスディーブのダイクの組成変化は、均質なマンツルの部分熔融程度の違いでは説明できず、不均質なマンツルの溶融と混合によって説明される。seamounts のデータは Niu and Batiza (1997) による。

Fig. 7 La/Sm versus Zr/Y diagram of basaltic rocks from the Hess Deep after Stewart *et al.* (2002).  
 The solid curves show incremental melting models of depleted peridotite and enriched pyroxenite. Small open circles are near-EPR seamount data from Niu and Batiza (1997). The compositional variability of the basaltic rocks from the Hess Deep suggests mixing between melts from a heterogeneous mantle.

構造：Macdonald *et al.*, 1991) よりも大きいことから、その場で噴出したことを前提としてなされてきた海嶺軸方向の玄武岩の組成変化の議論に慎重であるべきと指摘している。

一方、Coogan *et al.* (2002a) は、ヘスディーブのガブロについて未分化なガブロにおいても斜方輝石が出現することや、単斜輝石の希土類元素成分組成から、EPR の玄武岩とは異なった組成のメルトから晶出したものがあること、そのあるものは海嶺軸下のメルトレンズで混合することなく、地殻下部で固結していることを示した。同様の主張は、MAR の MARK 地域のモホ遷移帯やガブロの単斜輝石の微量成分組成から Casey (1997) によってもなされている。そこでは超枯渇から超肥沃にわたる異なる特徴を示すデータが示されて

おり、Casey (1997) は、地表に噴出している MORB は、起源の異なったメルトが混合・均質化された結果であることを強調している。

海嶺下での混合・均質化を被らなかった例として、海嶺軸近傍の単成火山の岩石組成を検討した Niu and Batiza (1997) は、起源マンツルが超枯渇から超肥沃にわたっており、起源マンツルが極めて不均質であったと主張している。

## V. 討論とまとめ

海洋プレート上部は、地震学的データからみるとかなり均質に見えるが、実際の地殻の構成は拡大速度の違いによりかなり異なることが明らかになってきた。高速拡大軸では海洋地殻層序 = オフィオライト層序が成立しているが、低速拡大軸

では複雑な様相を示している。そうした違いがあるものの、上部マントル、ガブロ、シート状岩脈群、溶岩層は全体として1つのシステム、すなわちそれぞれがメルトが発生し取り去られたソースマントルの溶け残り、メルトから抜き去られた集積岩、メルトが固結した岩石（ダイクと溶岩）を示している。海嶺火成活動を理解していく上で、これら全体を1つのシステムとして解明することが重要と思われるが、まだ、そうした観点からの研究は少ない。

最近の研究は、ドレライトやガブロが上を覆っている玄武岩と必ずしも同一のマグマに起因しない例が報告されていることを上に紹介した。我々が、これまで比較的均質と考えてきたMORBは広域的にも組成が系統的に変化するが、ある特定の場所においても、もともと不均質であったメルトが混合・均質化したものである可能性がある。このことはMORBの起源マントルが不均質であったことを示唆する。一個のサンプルのかんらん石斑晶に含まれるメルト包有物の同位体組成から、地球上のあらゆる岩石にみられる組成範囲の半分以上の変化を検出したとする例も報告されている（清水、個人的談話）。これまで、海嶺火成活動は主にその表面に露出しているMORBを対象に検討されてきた。しかし、地表に噴出する玄武岩は、上に紹介したように海嶺下での様々なプロセスを経た最終的な産物であることに注意を払う必要がある。特に高速拡大軸では、地殻浅部にメルトレンズが比較的定常的に存在していることから、地表に噴出するマグマは、メルトレンズでの混合・均質化を被らざるを得ない。メルトレンズでは、新たに注入されるメルトとのマグマ混合、塊状の上部ガブロを形成するその場での分化作用、そして一方ではダイクとして地殻上部へとメルトが抜き去られる場となっている。しかも、その下部に海洋地殻の3分の2近くを占めるガブロ層を分別しているはずである。したがってそこから噴出するメルトは初生マグマの組成を示すことはあり得ない。実際、高速拡大軸の玄武岩は、低速拡大軸に比べて比較的分化した組成が卓越している事実（例えば、Morel and Hekinean, 1980）は、この

ことと調和的である。

一方、低速拡大軸では、メルトレンズが存在しないかあるいは小さな一時的なものしか存在しない。メルトレンズが欠如していると深部からのメルトは地殻の様々な位置に貫入あるいは噴出することが予想され、地殻内では閉鎖系に近い著しく分化した岩石が形成されるであろう。一方、メルトレンズが極めて小さいあるいは存在しないため、マントルから上昇してきたマグマが海底上に直接噴出することが期待される。超低速拡大軸で形成された下部地殻とみられる735Bでは、著しく分化したガブロ（Fe-Ti oxide gabbro）が出現する一方、アトランティスパンクの周囲の玄武岩溶岩には、かんらん石のFoが85を超えるようなかんらん石斑晶を持つ未分化な岩石が出現する（根尾・宮下, 2003）。著しく分化した深成岩が一方で出現する一方、極めて未分化な玄武岩が出現するというパラドックスは、低速拡大軸でのマグマシステムを考えれば、容易に理解することができる。一方、高速拡大軸では定常的にメルトレンズが形成されやすいため、それより下位の層状ガブロは比較的狭い組成範囲となることが予想されるが、事実、ヘスディーブでのデータは低速拡大軸に出現するガブロよりもはるかに組成範囲が狭くなっている（Coogam *et al.*, 2002b）。

以上の議論に基づき、低速拡大軸と高速拡大軸とでのマグマシステムは表1のようにまとめられる。ソリダス付近での高温塑性変形を著しく被っているかどうかは低速と高速拡大軸との重要な違いと思われる。しかし、低速拡大軸に出現するoceanic core complexが一般的な低速拡大軸で形成された海洋地殻～マントルを代表しているかどうかについては、まだ問題が残されているし、高速拡大軸に関しても、ヘスディーブのデータが大部分であり、それぞれについての一層系統的な掘削や調査・研究が強く求められている。

海洋底の岩石に関する日本での研究は、アメリカなどに比べるとはるかに少なかったが、インド洋アトランティスパンクは3回のJAMSTECによる調査により、世界でもっともよく理解される地域となりつつあり、現在急速に研究が進展してい

表 1 高速拡大海嶺と低速拡大海嶺におけるマグマシステムの比較。

Table 1 Comparison of a magmatic system at fast- and slow-spreading ocean ridges.

	高速拡大海嶺	低速拡大海嶺
溶岩層の形態	シートフローが卓越	枕状溶岩が卓越
溶岩組成	比較的分化した組成が卓越 低圧結晶作用が卓越	比較的未分化な組成が卓越
シート状岩脈群	発達	欠如していることもある
メルトレンズ	長期間存続 メルトレンズ内でのマグマ 混合と結晶分化作用	欠如もしくは一時的に小さな ものが存在
ガプロ	厚いガプロ層が発達	多数の貫入岩体からなる
結晶作用の特徴	狭い組成範囲でジグザグした 組成変化を示す	閉鎖系に近い結晶分化作用 著しく分化したガプロが多産
構造的特徴	マグマの流動による面構造 は発達するが、高温の塑性 変形作用は殆ど被らない 鉱物量比の違いによる層状 構造が発達	オキサイドガプロと剪断変形 作用とが関連して出現 鉱物量比の違いによる層状 構造はほぼ欠如
マントル	溶け残りかんらん岩はハル ツバージャイト	溶け残りかんらん岩はレール ゾライト
メルトの挙動	高圧結晶作用は生じない	高圧条件下での結晶作用 マ ントル内の貫入岩 結晶粒間 での結晶作用：impregnation
マントル湧昇流	2 次元的カーテン状( 3 次元 的との見解もある )	3 次元的ダイヤピル

る。また、海洋地殻～上部マントルのアナローグとして、陸上に露出するオフィオライト研究は、海嶺下でのマグマプロセスを理解していく上で極めて重要である。特に海嶺深部で生じている現象を3次元的に解析する上で、オフィオライトが果たす役割は大きい。事実、海嶺下のマグマプロセスを解明する上で、オマーンやベイオブアイランドオフィオライト研究が果たしている役割は大きい(宮下ほか, 2002)。深海掘削船「ちきゅう」の運行の開始が目前に迫りつつある今、オフィオライトや海洋底の岩石に関する研究の発展が強く望まれている。

## 謝 辞

本論文の背景には、国際学術研究「海洋地殻生成のダイナミクス オマーンオフィオライトを例として」(代表：宮下純夫)、基盤研究A「海洋地殻 マントル系の成立と改編：オマーンオフィオライトの例」(代表：荒井章司)とインド洋アトランティスバンクにおける共同研究の進行がある。海野 進・荒井章司・高澤栄一・増田俊明・石川剛志・道林克禎・水田敏夫博士、足立佳子氏らのオマーン研究グループ、松本 剛・森下知晃・熊谷英憲・荒井章司博士らのアトランティス研究グループの皆様との議論は大いに有益であった。田村芳彦博士と匿名の査読者による指摘は本原稿を改善する上で有益であった。以上の皆様に厚く感謝します。

## 文 献

- 荒井章司 (1995) 海洋リソスフェアとオフィオライト：類似点と相違点. 地学雑誌, **104**, 361-380.
- Autio, L.K. and Rhodes, J.M. (1983) Cost Rica Rift Zone basalts: Geochemical and experimental data from a possible example of multistage melting. *Init. Repts. DSDP*, **69**, 729-745.
- Barth, G.A., Kastens, K.A. and Klein, E.M. (1996) The origin of bathymetric highs at ridge-transform intersections: A multi-disciplinary case study at the Clipperton fracture zone. *Marine Geophys. Res.*, **16**, 1-50.
- VSP (Basaltic Volcanism Study Project) (1981) *Basaltic Volcanism in the Terrestrial Planets*. Pergamon Press.
- Bedard, J.H. (2000) Syntaxis and the genesis of lower oceanic crust. In Dilek, Y., Moores, E.M., Elthon, D. and Nicolas, A. eds.: *Ophiolites and Oceanic Crust: New Insights from Field Studies and the Ocean Drilling Program*. Geol. Soc. Amer., Special Paper, **349**, 105-119.
- Benoit, M., Ceuleneer, G. and Polve, M. (1999) The remelting of hydrothermally altered peridotite at mid-ocean ridges by intruding mantle diapirs. *Nature*, **402**, 514-518.
- Boudier, F., Godard, M. and Armbruster, C. (2000) Significance of gabbro occurrence in the crustal section of the Semail ophiolite. *Marine Geophys. Res.*, **21**, 307-326.
- Bown, J.W. and White, R.S. (1994) Variation with spreading rate of oceanic crustal thickness and geochemistry. *Earth Planet. Sci. Lett.*, **121**, 435-449.
- Cannat, M. (1993) Emplacement of mantle rocks in the seafloor at mid-ocean ridges. *J. Geophys. Res.*, **98**, 4163-4172.
- Cannat, M., Ceuleneer, G. and Fletcher, J. (1997) Localization of ductile strain and the magmatic evolution of gabbroic rocks drilled at the Mid-Atlantic Ridge (23°N). *Proc. ODP, Sci. Results*, **153**, 77-98.
- 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. *Proc. ODP, Sci. Results*, **153**, 181-241.
- Coleman, R.G. (1977) *Ophiolites*. Springer-Verlag.
- Coogan, L.A., Thompson, G. and MacLeod, C.J.A. (2001) Textural and geochemical investigation of high level gabbros from the Oman ophiolite: Implications for the role of the axial magma chamber at fast-spreading ridges. *Lithos*, **63**, 67-82.
- 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. *Geochem. Geophys. Geosys.*, **3**, 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.
- Crisp, S.A. (1983) Rates of magma emplacement and volcanic output. *J. Volc. Geotherm. Res.*, **20**, 177-217.
- 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 of 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., Ildfense, 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 Planet. Sci. Lett.*, **179**, 31-51.
- Dilek, Y., Moores, E. and Furnes, H. (1998) Structure of modern oceanic crust and ophiolites and implications for faulting and magmatism at oceanic spreading centers. In Buck, R.W., Delaney, P.T., Karson, J.A. and Lagabriele, Y. eds.: *Faulting and Magmatism at Mid-Ocean Ridges*. AGU Geophys. Monogr., **106**, 219-265.
- Francheteau, J., Armijo, R., Cheminee, J.L., Hekinean, R., Lonsdale, P. and Blum, N. (1990) 1 Ma East Pacific rise oceanic crust and uppermost mantle exposed by rifting in Hess Deep (equatorial Pacific Ocean). *Earth Planet. Sci. Lett.*, **101**, 281-295.
- Gillis, K.M. and Coogan, L.A. (2002) Anatectic migmatites from the roof of an ocean ridge magma chamber. *J. Petrol.*, **43**, 2075-2095.
- Gillis, K.M., Mével, C., Allan, I. et al. (1993) *Proc. ODP, Init. Repts.*, **147**. College Station, TX (Ocean Drilling Program)
- Gomez, O. and Briais, A. (2000) Near-axis seamount distribution and its relationship with the segmentation of the East Pacific Rise and

- northern Pacific - Antarctic Ridge, 17°N-56°S. *Earth Planet. Sci. Lett.*, **175**, 233-246.
- Grove, T.L., Kinzler, R.J. and Bryan, W.B. (1992) Fractionation of mid-ocean-ridge basalts (MORB). In Phipps Morgan, J. et al. eds.: *Mantle Flow and Melt Generation at Mid-Ocean Ridges*. Geophys. Monogr., **71**, 281-310.
- Hékinian, R., Bideau, D., Francheteau, Cheminée, J.-L., Armijo, R., Lonsdale, P. and Blum, N. (1993) Petrology of the East Pacific Rise crust and upper mantle exposed in Hess Deep (Eastern equatorial Pacific). *J. Geophys. Res.*, **98**, 8069-8094.
- Hess, H.H. (1962) History of ocean basins. In Engel, E.A.J. et al. eds.: *Petrologic Studies: A Volume in Honor of A. F. Buddington*. GSA, New York, 599-620.
- Horen, H., Zamora, M. and Dubuisson, G. (1996) Seismic waves velocities and anisotropy in serpentinized peridotites from Xigaze ophiolite: Abundance of serpentine in slow-spreading ridge. *Geophys. Res. Lett.*, **23**, 9-12.
- Juteau, T. and Maury, R. (1999) *The Oceanic Crust, from Accretion to Mantle Recycling*. Springer-Verlag.
- Karson, J.A. (1998) Internal structure of oceanic lithosphere: A perspective from tectonic windows. In Buck, R.W., Delaney, P.T., Karson, J.A. and Lagabrielle, Y. eds.: *Faulting and Magmatism at Mid-Ocean Ridges*. AGU Geophys. Monogr., **106**, 177-218.
- Karson, J.A. and Elthon, D. (1987) Evidence for variations in magmatic production along oceanic spreading centers: A critical approach. *Geology*, **14**, 127-131.
- Karson, J.A., Klein, E.M., Hurst, S.D., Lee, C.E., Rivizzigno, P.A., Curewitz, D., Morris, A.R., Miller, D. J., Varga, R.G., Christeson, G.L., Cushman, B., O'Neill, J.M., Brophy, J.G., Gillis, K.M., Stewart, M. A. and Sutton, A.L. (2002) Structure of uppermost crust exposed at the Hess Deep Rift: Implications for subaxial processes at the East Pacific Rise. *Geochem. Geophys. Geosys.*, **3**, 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 Buck, R.W. et al. eds.: *Faulting and Magmatism at Mid-Ocean Ridges*. AGU Geophys. Monogr., **106**, 267-289.
- Kelemen, P.B., Shimizu, N. and Salters, V.J.M. (1995) Extraction of mid-ocean-ridge basalt from the upwelling mantle by focused flow of melt in dunite channels. *Nature*, **375**, 747-753.
- 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 Planet. Sci. Lett.*, **146**, 475-488.
- Klein, E.M. and Langmuir, C.H. (1987) Global correlations of ocean ridge basalt chemistry with axial depth and crustal thickness. *J. Geophys. Res.*, **92**, 8089-8115.
- Langmuir, C.H., Klein, E.Y. and Plank, T. (1992) Petrological systematics of mid-ocean ridge basalts; Constraints on melt generation beneath ocean ridges. In Phipps Morgan, J. et al. eds.: *Mantle Flow and Melt Generation at Mid-Ocean Ridges*. Geophys. Monogr., **71**, 183-280.
- Lonsdale, P. (1988) Structural pattern of the Galapagos microplate and evolution of the Galapagos triple junctions. *J. Geophys. Res.*, **93**, 13551-13574.
- Macdonald, K.C., Scheirer, D.S. and Carbotte, S.M. (1991) Mid-ocean ridges: Discontinuities, segments and giant cracks. *Science*, **253**, 986-994.
- 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 Planet. Sci. Lett.*, **176**, 357-373.
- Mahoney, J.J., Frey, R., Tejada, M.L.G., Mo, X.X., Leat, P.T. and Nagler, T.F. (1998) Tracing the Indian ocean mantle domain through time: Isotopic results from Old West Indian, East Tethyan, and South Pacific seafloor. *J. Petrol.*, **39**, 1255-1284.
- 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, Henry J.B. (2003) 南西インド洋海嶺アトランティス海台に見られる超低速拡大軸の火成活動と「地殻・マントル境界」. 地学雑誌, **112**, 705-719.
- 都城秋穂 (1994) 変成作用. 岩波書店.
- 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・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.
- 宮下純夫・根尾夏紀・前田仁一郎・森下知晃・松本剛・Henry Dick・YK01-14 乗船研究 (2003) インド洋アトランティスバンクのマントル 地殻セクションの特徴: 予察的報告. ブルーアースシンポジウム, 横浜, 講演要旨, 21-22.
- Moore, E.M. and Vine, F.J. (1971) The Troodos massif, Cyprus, and other ophiolites as oceanic crust: Evaluation and implication. *Phil. Trans. R. Soc. Lond.*, **A268**, 443-466.
- Morel, J.M. and Hékinian, R. (1980) Compositional variations of volcanics along segments of recent spreading ridges. *Contrib. Mineral. Petrol.*, **72**, 425-436.
- Muller, M.R., Robinson, C.J., Minshull, T.A., White, R.S. and Bickle, M.J. (1997) Thin crust beneath ocean drilling program borehole 735B at the

- Southwest Indian Ridge? *Earth Planet. Sci. Lett.*, **149**, 93-108.
- Natland, J. (1991) Indian oceanic crust. In Floyd, P.A. ed.: *Oceanic Basalts*. Blackie & Son Ltd., 289-310.
- Natland, J.H. and Dick, H.J.B. (1996) Melt migration through high-level gabbroic cumulates of the East Pacific Rise at Hess Deep: Inferences from rock textures and mineral compositions. *Proc. ODP, Sci. Results*, **147**, 21-58.
- 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. *Proc. ODP, Sci. Results*, **176**, 1-69.
- 根尾夏紀・宮下純夫 (2003) インド洋アトランティスバンクにおける地殻セクションの岩石学的特徴. 地球惑星科学関連学会 2003 年合同大会 (幕張), J029-005.
- Nicolas, A. (1992) Kinematics in magmatic rocks in special reference to gabbros. *J. Petrol.*, **33**, 891-915.
- Nicolas, A. and Boudier, F. (2000) Large mantle upwellings and related variations in crustal thickness in the Oman ophiolite. In Dilek, Y. et al. eds.: *Ophiolites and Oceanic Crust: New Insights from Field Studies and the Ocean Drilling Program*. Geol. Soc. Amer., Special Paper, **349**, 67-73.
- Niu, Y. and Batiza, R. (1997) Trace element evidence from seamounts for recycled oceanic crust in the Eastern Pacific mantle. *Earth Planet. Sci. Lett.*, **148**, 471-484.
- Niu, Y. and Hékinian, R. (1997) Spreading-rate dependence of the extent of mantle melting beneath ocean ridges. *Nature*, **385**, 326-329.
- 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. *Proc. ODP, Sci. Results*, **176**, 1-60.
- O'Hara, M.J. (1977) Geochemical evolution during fractional crystallization of periodically refilled magma chamber. *Nature*, **266**, 503-507.
- Penrose Conference Participants (1972) Penrose filed conference on ophiolites. *Geotimes*, **17**, 24-25.
- Perfit, M.R. and Chadwick, W.W., Jr. (1998) Magmatism at mid-ocean ridges: Constraints from volcanological and geochemical investigations. In Buck, R.W., Delaney, P.T., Karson, J.A. and Lagabrielle, Y. eds.: *Faulting and Magmatism at Mid-Ocean Ridges*. AGU Geophys. Monogr., **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.
- 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 Ryan, M. P. ed.: *Magmatic Systems*. Academic Press, 139-178.
- Raitt, M. (1963) The crustal rocks. In Hill, M.N. ed.: *The Sea*, vol. 3. Wiley Interscience, 85-102.
- 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 Planet. Sci. Lett.*, **168**, 45-63.
- Schilling, J.-G., Zajac, M., Evans, R., Johnston, T., White, W., Devine, J.D. and Kingsley, R. (1983) Petrology and geochemical variations along the Mid-Atlantic Ridge from 29°N to 73°N. *Amer. J. Sci.*, **283**, 510-586.
- Sparks, D.W. (1995) Geochemistry of the lower sheeted dike complex, Hole 504B, Leg 140. *Proc. ODP, Sci. Results*, **137/140**, 81-97.
- Stewart, M.A., Klein, E.M. and Karson, J.A. (2002) Geochemistry of dikes and lavas from the north wall of the Hess Deep Rift: Insights into the four-dimensional character of crustal construction at fast spreading mid-ocean ridges. *J. Geophys. Res.*, 10.1029/2001JB000545.
- Sun, S.S. and McDonough, W.F. (1989) Chemical and isotopic systematics of oceanic basalts: Implications for mantle composition and processes. In Saunders, A.D. and Norry, M.J. eds.: *Magmatism in the Ocean Basins*. Geol. Soc. Spec. Pub., **42**, 313-345.
- 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.

(2003年5月13日受付, 2003年7月22日受理)