

海洋マントルの岩石学的構造と海洋掘削

荒井章司* 阿部なつ江**

Petrological Model of Sub-oceanic Mantle and its Bearing on the Scientific Strategy for IODP

Shoji ARAI * and Natsue ABE **

Abstract

Petrological constitution of the upper mantle beneath the ocean floor has been poorly known except for oceanic fracture zones of slow-spreading ridges. Information from ophiolites may supplement the paucity of data to some extent; however, the ophiolites should be treated carefully because of their polygenetic nature. The abyssal peridotite varies from lherzolite with Cr# of spinel of 0.1 to harzburgite with Cr# of spinel of 0.6. Dunite is relatively rare from the ocean floor. An exotic lherzolite with continental mantle signatures appears in mid-oceanic areas. The refractoriness of the abyssal peridotite has been proposed to correlate with the spreading rate of the ridge system, but this is false. The upper mantle beneath the ocean floor changes downwards from dunite to lherzolite via harzburgite, being independent of spreading rate. The lithological change is more abrupt in a slow-spreading system than in a fast-spreading one, so it is around ridge segment boundaries rather than around the segment center on the same spreading ridge. The thin harzburgite layer in slow-spreading ridges has resulted in its rarity there, and the deep seat of lherzolite in fast-spreading ridges has caused its apparent absence. The primitive MORB can be in equilibrium with dunite, which is formed along the melt conduit beneath the ridge via peridotite/melt reaction, and the dunite part is laid down by the corner flow of the mantle just below the lowermost gabbro layer as it leaves the ridge axis.

We proposed the following deep ocean-floor drilling to explore scientific problems concerning the abyssal upper mantle: (1) non-riser drilling on the "continental peridotite" to know the relationship with abyssal peridotite, and (2) non-riser or riser drilling on the ocean floor where deep-seated rocks have already been exposed to examine the deep constitution of the upper mantle. The "21st Century Mohole" drilling through the oceanic Moho should primarily be directed to the segment center of a fast-spreading ridge system. The back-arc basin such as the Sea of Japan will be the alternate for Mohole drilling because we have had relatively little information on the petrological nature of the back-arc basin lithosphere despite its importance. We can solve the "ophiolite problem" simultaneously if we are careful

* 金沢大学理学部地球学教室

** 海洋科学技術センター深海研究部

* Department of Earth Sciences, Kanazawa University

** Deep Sea Research Department, Japan Marine Science and Technology Center (JAMSTEC)

in choosing the drilling sites. We also propose a close linkage between the ophiolite study and ocean drilling in the coming IODP.

Key words: ocean floor, ophiolite, upper mantle, petrological model, dunite, lherzolite, harzburgite, IODP

キーワード：海洋底，上部マントル，オフィオライト，岩石学的構成，ダナイト，レールズライト，ハルツバーガイト，統合国際深海掘削計画

I. はじめに

海洋底マントルの岩石学的性質は MORB の成因，海洋地殻の生成過程などの重要な問題を解く際に不可欠な情報である。しかるに海洋底マントル物質への直接的アプローチは極めて不完全であり偏りがあるため，全貌の理解には程遠い状況である。海洋底のマントルの露出の多くが海洋断裂帯であり，断裂帯が低速拡大系に比較的よく発達することを考えれば，我々の海洋底マントルの物質的な情報は非常に偏ったものであることがわかる。すなわち，我々は今まで主として低速拡大系の断裂帯に露出しているかんらん岩を見て来たことになる。断裂帯や海嶺セグメント境界は熱的な異常点であり，噴出物にも「断裂帯効果」とでも言うべき影響が現れている。マントルの部分溶融度が低く，マフィック岩層（地殻）も比較的薄いとされる。このように，マントルの岩石学的構造は拡大速度に依存し，また，拡大軸沿いに考えるとセグメント境界に影響された大変不均質なものであることが予想される。また，ブルーム付近ではマントルの部分溶融度が高くなることが確認されている (Dick *et al.*, 1984)。

この海洋底マントルへのアクセスの不完全さを補うものとしてオフィオライトのマントルが研究されて来た。オマーンオフィオライトでは厚さ十数 km におよぶ地殻-マントル断面が得られ，モホ遷移帯～マントル部分に関しても厚さ十 km におよぶセクションについて詳細な三次元的調査が可能である (Lippard *et al.*, 1986)。オフィオライトの起源に関しては，ある種の海洋底であることは確実なものの，通常の海洋リソスフェアの完全

なアナログではない可能性が高い (荒井, 1995 参照)。すなわち，海洋リソスフェアの断片の大規模なオブダクション (=大規模なオフィオライトの形成) は，その「対のプロセス」としての一種のサブダクションを必然的に伴う。これにより海嶺で形成された岩石群は陸上へ進入する時に島弧的な岩石の付加により改変される。言い換えれば，我々は無傷の海洋リソスフェアを陸上で観察することができないのである。これはオフィオライトに固有の問題であり不可避である (荒井, 1995)。従って，オフィオライトにおいて海洋底の物質構成および海嶺下過程についての情報を得るためには注意が必要である。

このように考えると海洋底のマントルにからむ諸問題を直接的に明らかにする唯一の手段は海洋掘削，特に超深度掘削 (21 世紀モホール計画) であることが明らかである。本論では，今までにわかっている海洋底マントル像を著者の解釈を交えながら解説する。また，オフィオライトのマントル部との比較も試みる。そして，来る IODP (統合国際深海掘削計画) 特に 21 世紀モホール計画に対して海洋マントル岩石学の立場からの提言を行いたい。海洋底かんらん岩の岩石学的性質の総括は稿を改めて行いたい。

II. 海洋底から得られるかんらん岩の性質

前述のような状況のもとで，海洋底から得られる上部マントルかんらん岩を検討して以下のことが明らかにされている。

かんらん岩の岩相はレールズライトからハルツバーガイトへと変化が大きいことが知られている (例えば, Dick and Bullen, 1984; Arai, 1994a;

Niu and Hekinian, 1997)。またダナイトやウェールライト、クロミタイトなどは海洋底マントルでは比較的まれであるとされるが、東太平洋海嶺ヘス・ディープでは比較的大量のダナイトとともに少量のウェールライト、クロミタイトが発見された (Dick and Natland, 1996; Arai and Matsukage, 1996, 1998; Matsukage and Arai, 1998)。マントルかんらん岩の性質に関しては、その枯渇度に拡大速度依存性があると言われている。すなわち、拡大速度が大きいほどかんらん岩の枯渇度が高くなるとされている (例えば、Niu and Hekinian, 1997)。例えば、大西洋やインド洋で得られるかんらん岩はレールゾライトが多く (Dick *et al.*, 1984; Dick, 1989)、太平洋のヘス・ディープで得られるものはハルツバーガイトである (Arai and Matsukage, 1996; Dick and Natland, 1996)。しかし、この結論は不完全なサンプリングによる不十分な認識の結果である可能性が高い。例えば、最近の南西インド洋海嶺のアトランティス・バンクのアトランティス II 断裂帯の壁面の無人潜水艇「かいこう」の調査 (松本ほか, 2003, 本号) によると、最上部マントルには深さ方向に岩相の変化が認められた。すなわち、水深 5000 メートルから上方に、スピネル・レールゾライト→斜長石-スピネル・レールゾライト (+ハルツバーガイト) である。よって、海洋底の上部マントルでは深さ方向に岩相変化が存在する可能性が大変高い。海洋底マントルの岩石学的モデルに関しては後述する。

海洋底かんらん岩の岩相 (組成) 変化は主として異なる部分溶融度の溶け残り物質として説明されている (例えば、Dick *et al.*, 1984)。最近、refertilization (再富化) 過程が注目されている (Elthon, 1992)。すなわち、溶け残りハルツバーガイトにメルトが加わればレールゾライトができるという部分溶融/メルト除去とは逆の現象である。

III. 海洋域に存在する「大陸性マントル」

大洋の真ん中に通常の海洋底マントル物質とは明らかに性質が異なるマントル物質が露出していることがある。その岩石学的性質は造山帯に露出

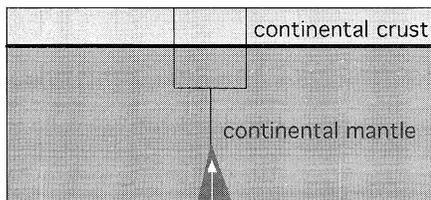
する大陸性のマントル物質と考えられている非オフィオライト的なレールゾライトを主とするかんらん岩と類似する (Bonatti, 1990)。典型的なものに大西洋の St. Peter-Paul 岩礁と紅海の Zabargad 島がある。

赤道大西洋 St. Paul 断裂帯に差渡し 40 メートル、高さ 20 メートル程度の岩礁が存在する。かの C. Darwin もビーグル号で訪れており、その特異性に言及している。古くは Tilley (1947) や Melson *et al.* (1972) などにより岩石が記載された。その後 Roden *et al.* (1984) や Bonatti (1990) による岩石学的、地球化学的研究がある。最近では Hekinian *et al.* (2000) により岩礁周囲の潜水調査が行われている。この岩礁は断裂帯中の S 字形の形状をした高まりで、岩石は強く変形しマイロナイト化している。かんらん岩はスピネルの Cr# (= Cr/(Cr + Al) 原子比) が 0.2 以下のレールゾライトで、含水鉱物を含むのが特徴である。ホルンブレンダイトやガプロを伴う。周囲の海底の玄武岩はアルカリ玄武岩～E-MORB である。かんらん岩は強い交代作用を受けているが、その年代は 155 Ma (Roden *et al.*, 1984) とされている。

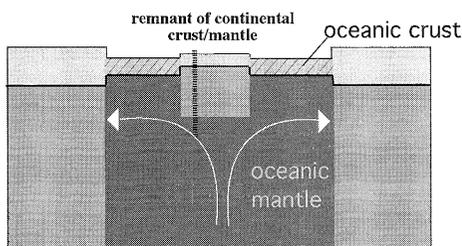
Zabargad 島は紅海の拡大中心よりエジプトよりある一辺約 3 km の三角形をした島である。古来ペリドートの産地として有名であるが、かんらん岩のほかに原生代パンアフリカン帯に属するとされる変成岩、ガプロなどを伴っている (Bonatti *et al.*, 1981, 1986)。かんらん岩は含水鉱物 (21% まで) や斜長石 (16% まで) を含むレールゾライトで、スピネルの Cr# は 0.3 以下である (斜長石を欠くものでは 0.1 前後) (Bonatti *et al.*, 1986)。エジプトの紅海沿いに分布するパンアフリカンオフィオライトのかんらん岩類 (ハルツバーガイト、ダナイトが主で、スピネルの Cr# は 0.5 以上) (Ahmed *et al.*, 2001) とは全く異なった性質を持つ。

海洋底かんらん岩は単斜輝石の Na 含有量が低いのが特徴である (Arai, 1991) が、これらのかんらん岩では Na₂O を 1 から 2 wt% 含む (Bonatti *et al.*, 1986; Bonatti, 1990)。交代作用

(a) Splitting continent



(b) Spreading ocean



Bonatti's hypothesis

図 1 海洋地域に露出する「大陸性かんらん岩」の起源 (Bonatti, 1990).

大陸が割れ (a), 海洋ができる際にアセノスフェアの上昇流の真上に大陸性リソスフェアが取り残される (b). 太い点線は提案する掘削. 2 種類のマントルかんらん岩の関係やアセノスフェアと大陸かんらん岩の相互反応などが解明できる.

Fig. 1 Illustration of the genesis of "continental peridotite" within the mid-oceanic areas after Bonatti (1990).

Block of continental lithosphere has stagnated at the center of the mantle plume that caused the continent to split and spread away. Drilling (thick dotted line) through the remnant continental lithosphere to underlying oceanic mantle is proposed to explore the relationship and the interaction between the two kinds of mantle.

や含水鉱物, 斜長石の生成などがあるので注意が必要であるが, 大陸性のかんらん岩 (例えば大陸リフト帯のかんらん岩捕獲岩) に類似する。Bonatti (1990) は, 大陸が分裂し大洋が生まれる時にマントル上昇流の真上で停滞した大陸のリソスフェアの断片が, 中央海嶺付近に残留したものとした (図 1)。St. Paul かんらん岩に記憶され

ている 155 Ma のマントル過程 (交代作用) は大西洋生成以前の大陸下での出来事として説明される。

IV. 海洋底かんらん岩の微量元素組成

海洋底に露出するかんらん岩は, 海水との反応によって, 多かれ少なかれ蛇紋岩化を受けており, 時には 100% 蛇紋岩化し, 初生マントル鉱物が残っていないことがある。その中では, 単斜輝石とクロムスピネルは比較的蛇紋岩化を免れ残存している。

単斜輝石は, それが含まれるかんらん岩の希土類元素やその他のインコンパティブル元素の主要な貯蔵鉱物である。そのため, 濃度の違いはあるにせよ, 単斜輝石のコンドライト規格化希土類元素パターン (以下 REE パターン) は全岩のものとはほぼ同じである (例えば, Salters and Shimizu, 1988)。斜長石を含まない場合の Sr などの LILEs もまた, 単斜輝石に最も多く分配される。そこで, 海嶺下のかんらん岩がおもに部分溶融しメルト成分が抽出されるスピネル安定領域では, この単斜輝石から希土類元素を中心とした微量元素が放出される。そのため, 単斜輝石中の微量元素を測定することによって, そのかんらん岩が受けた様々なプロセスに対する有益な情報を得ることができる。

1980 年代後半に二次イオン質量計が, また 1990 年代後半にはレーザーアブレーション ICP-MS が固体地球科学の分野に応用・普及されたことにより, これまで非常に手間がかかったかんらん岩の微量元素測定を, 薄片上で容易にできるようになった。これまでに, 多くの著者がこれら「その場分析」によって単斜輝石中の微量元素組成を測定し, その部分溶融プロセスや交代作用について議論している。例えば, 中央海嶺系に産する海洋底かんらん岩に関してだけでも, Johnson *et al.* (1990), Dick and Natland (1996), Ross and Elthon (1997), Seyler and Bonatti (1997), Hellebrand *et al.* (2001) などがある。またそれらの測定結果を用いた部分溶融プロセスのモデル計算が, Elthon (1992), Hellebrand *et al.* (2001) などによって出されている。

一般に、軽希土類元素 (LREE) は、重希土類元素 (HREE) よりもインコンパティビリティが高いため、より枯渇しやすい。そのため、REE パターンはメルト成分の枯渇に伴い、左下がりが強調される。つまり、かんらん岩を単純に部分溶解しメルトを抽出していくと、LREE も HREE も濃度が下がり、かつ LREE/HREE 比は小さくなっていく。Ti や Zr などの HFSE もまた、メルトに分配され、かんらん岩中 (単斜輝石中もしかり) の濃度は下がるが、Zr の方が Ti よりもインコンパティビリティが高いために、Ti/Zr 比は上がる。

Hellebrand *et al.* (2001) では、Johnson *et al.* (1990) や Dick and Natland (1996) の結果と、自ら測定した中央インド洋海嶺地域の海洋底かんらん岩についてまとめ、単斜輝石中の微量元素濃度とスピネルの Cr# との間に、良い相関があることを示した。それによると、単斜輝石中の REE や Sr などの微量元素濃度は、Cr# と正の相関を持つが、インコンパティビリティが高い元素 (LREE, Sr など) ほど相関係数は小さい。インコンパティビリティがそれほど高くはない HREE は、非常に良い相関を示す。

ところで海洋底かんらん岩のような無水のかんらん岩は、部分溶解程度が上がって単斜輝石が消滅すると、ソリダス温度が 1400℃ 以上になり、それ以上溶解するためには非常に高温が必要なため、最上部マントル (リソスフェア-アセノスフェア境界付近) でさらに溶解するのは困難になる。つまり無水のスピネルかんらん岩を最上部マントルで溶かすと、単斜輝石が消失するまでのスピネル Cr#=0.6 程度までにしかならない。Hellebrand *et al.* (2001) からわかるとおり、単斜輝石が消失する直前の HREE 濃度は、せいぜいコンドライトの約 1.5 倍 (0.3 ppm) である。

一方、大陸や島弧に噴出するマグマに捕獲されているかんらん岩捕獲岩や、固体貫入型かんらん岩体 (溶け残りかんらん岩) 中の単斜輝石には、LREE が著しくエンリッチした左上がりのパターンが存在する。

海洋底かんらん岩中の単斜輝石は、報告されて

いるほぼすべてが LREE が HREE よりも枯渇した全体的に左下がりのパターンを示す。メルト注入 (melt impregnation) を受けて斜長石などの二次鉱物が形成されている海洋底かんらん岩中の単斜輝石は、軽希土類元素 (LREE) にエンリッチしたスプーン状 (U-shape) パターンを示すが、それでも全体として左下がりの REE パターンであることは間違いない。つまり、著しく微量元素を付加するような物質は、海洋底下 (少なくとも海嶺下) には存在しないと考えて良い。

V. MORB の成因とかんらん岩

未分化な MORB は海洋底から実際得られるマントルかんらん岩と化学的に平衡ではないと言われている。マントルかんらん岩中の単斜輝石希土類元素含有量から推定される平衡メルトの組成は MORB とは異なる (Johnson *et al.*, 1990)。また、未分化 MORB のクロムスピネルの Cr# は 0.4 ~ 0.6 の場合が多く、海洋底かんらん岩のスピネルの幅広い Cr#, 0.1 ~ 0.6 と合わない (Arai, 1994b)。

MORB の起源に関しては Johnson *et al.* (1990) の複合部分溶解メルトの考えがある。すなわち海嶺下のマントル・ダイアピル中で、ざくろ石かんらん岩からスピネルかんらん岩安定領域までの幅広い条件で生成した多段階の極微小度部分溶解メルトが混合すると希土類元素含有量の点からは未分化 MORB ができる。Kelemen *et al.* (1995) はオマーンオフィオライトのダナイトがやはり希土類元素に関して未分化 MORB と平衡でありうるとした。ただし、彼の検討したオマーンオフィオライトのダナイトがどのようなものなのか不明である (上杉ほか, 2003, 本号参照)。Arai and Matsukage (1996) および Dick and Natland (1996) は東太平洋海嶺の Hess Deep から得られたかんらん岩~ガブロの掘削試料からマントル最上部でのメルトとかんらん岩 (ハルツバーナイト) との反応を認めた。反応生成物はダナイト~トロクトライトであり、いわゆる未分化 MORB は最終的には深部でダナイトやトロクトライトと平衡にあることになる。これは Hess

Deep (高速拡大軸) や Mid Cayman Trough (低速拡大軸) のダナイト〜トロクトライトと MORB を比較することによりさらに明確になった (荒井, 1999)。すなわち, クロムスピネルの Cr# がダナイトでは 0.4 ~ 0.6 であり, MORB 中のものと一致する。このモデルに従えば, 海嶺の下の MORB の通り道と壁岩であるかんらん岩の間にはダナイトが存在することになる。マンツルの流れを考えるとこの部分は海嶺から離れるに連れ, マンツル最上部 (オフィオライトで言うともホ遷移帯) に相当するようになる。

VI. オフィオライトかんらん岩との比較

オフィオライトかんらん岩としてはハルツバーガイトが卓越している (荒井, 1989)。オフィオライトのかんらん岩は時に極めてマグマ成分に枯渇しており, クロムスピネルの Cr# は 0.9 におよぶ (Jaques, 1981; 田村ほか, 1999)。これらいわゆる高枯渇度かんらん岩 (田村ほか, 1999) は海洋底かんらん岩 (クロムスピネルの Cr# はおおむね 0.6 以下) とは明らかに異なり, 前弧などの沈み込み帯上のセッティング起源である (田村ほか, 1999)。オマーンオフィオライト (図 2) では噴出岩には MORB 的なものとボニナイトに代表される島弧的なものがある (Alabaster *et al.* 1982; Ishikawa *et al.*, 2002) (図 2)。上部マンツル構成岩でもダナイト, ハルツバーガイト, クロミタイトなどに非海洋的なものが見出されている (Ahmed and Arai, 2002; Matsukage *et al.*, 2002; 荒井ほか, 未公表) (図 2)。オマーンオフィオライトにおける非海洋的岩石は海洋的岩石より後に形成されているのが特徴である (図 2)。また, オマーンオフィオライトのマンツル部分はハルツバーガイトが圧倒的に優勢であるが, 最下部にのみレールゾライトが出現する (Lippard *et al.*, 1986) (図 2)。

オマーンオフィオライトのマンツル部の主要なハルツバーガイトは海洋底のハルツバーガイト (例えば EPR の Hess Deep のもの) に鉱物化学組成の点では類似していると言える (Kadoshima, 2002)。ただし, 一部のハルツバーガイトは海洋

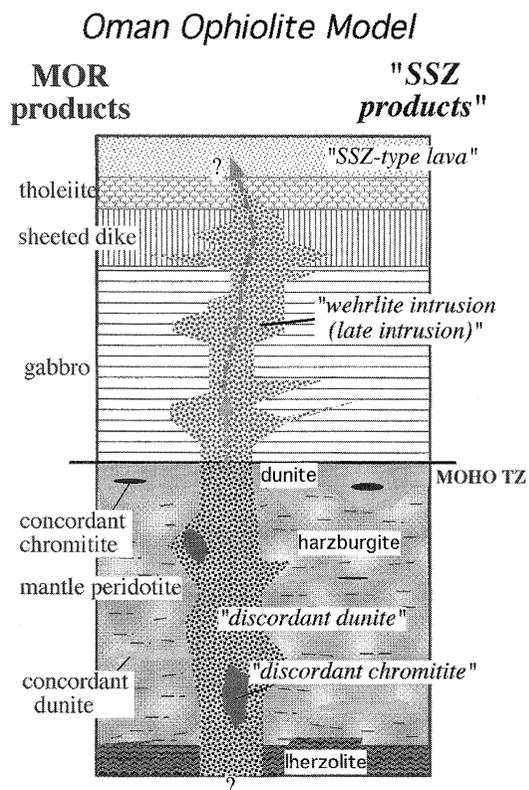


図 2 オマーンオフィオライトの岩石学的構成図。中央海嶺での産物である古い岩石群 (左側のローマン字体) を新しい島弧的環境で生成された岩石群 (右側イタリック字体) が貫いているのが特徴である。いわゆる後期貫入岩類や非調和性ダナイトはスプラ・サブダクション帯溶岩の通路であった可能性がある。

Fig. 2 A lithologic column illustrating the petrological constituents of the Oman ophiolite.

Note that it is composed of older mid-ocean ridge (MOR) products (left side; in roman) and younger supra-subduction zone (SSZ) products (right side; in italic). The late intrusives including discordant dunite may be a remnant of melt conduit for the SSZ-type lava.

底のもの (Dick, 1989) と比べて斜方輝石に富んでいる。この点では島弧下のハルツバーガイト, 例えば西南日本弧の黒瀬や野山岳のハルツバーガイト捕獲岩 (Arai and Hirai, 1983) と類似している。

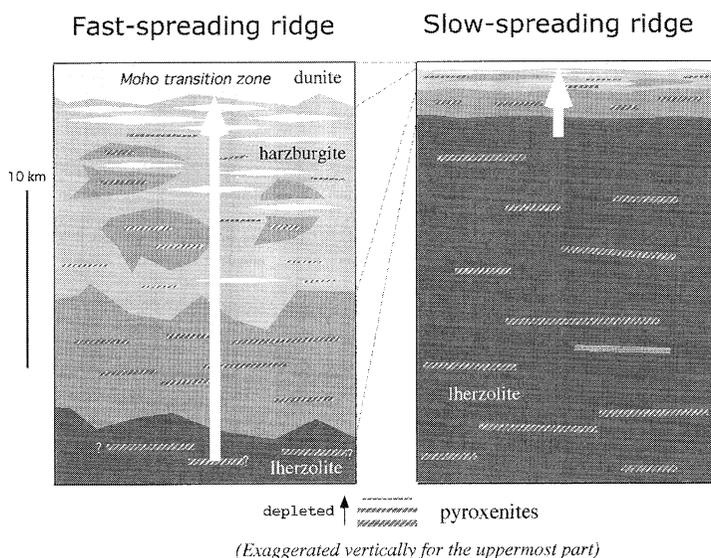


図 3 海洋底の上部マントルの岩石学的モデル。
 ダナイト、ハルツパーガイト、レールゾライトの構成岩石は基本的に拡大速度を問わず同様である。ただし、ダナイトからハルツパーガイトを経てレールゾライトへの岩相変化は低速拡大軸の方が急である。白矢印はかんらん岩の岩相変化（枯渇度の上昇）を示す。

Fig. 3 Petrological model of the upper mantle beneath the ocean floor.

Note that the constituents (dunite, harzburgite and lherzolite) are basically the same at the fast- and slow-spreading ridges. The lithological variation is more abrupt in the latter than in the former. See text for more detailed explanation. White arrows indicate the lithological change from lherzolite to harzburgite (increase of refractoriness of peridotite).

VII. 海洋底マントルの岩石学的モデル

前述のMORBの成因を考慮し、また実際の海洋底のかんらん岩の不十分なサンプリングをオフィオライトのデータにより補完すると、図3および図4のような海洋底マントルの岩石モデルが考えられる。すなわち、ガブロ（地殻最下部）の直下にはダナイト（またはトロクトライト、ウェールライト、かんらん石ガブロ）よりなる部分が存在する。オフィオライトでモホ遷移帯と呼ばれる部分である（図4）。その下部にはハルツパーガイトが存在するであろう。ハルツパーガイトは深部でレールゾライトに移行する。これに関してはハル

ツパーガイトが卓越するオマーンやニューファンドランドのオフィオライトのマントル部でも最深部にはレールゾライトが出現する（Malpas and Strong, 1975; Lippard *et al.*, 1986）ことを根拠にしている。この深さ方向の岩相変化は基本的に拡大速度によらず同一であると考えられる。ただし、低速拡大軸下ではレールゾライトが最上部マントルまで存在し、ハルツパーガイト～ダナイトの部分が相対的に薄い（図3）。すなわち岩相変化が最上部マントルで急激に起こる（図3）。低速拡大軸でハルツパーガイトの報告が少ない（Niu and Hekinian, 1997）のはハルツパーガイトの部分が薄く、サンプリングの機会が少ないためであろう。

Possible Along-Ridge Section

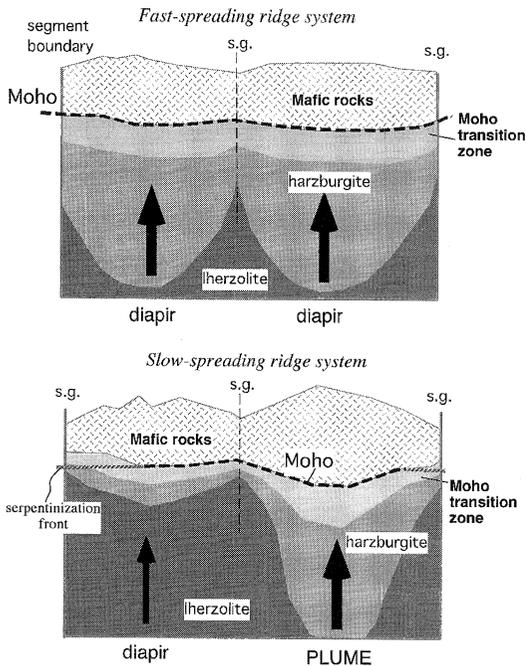


図 4 海嶺軸沿いの地殻-マントルの岩石学的モデル。

マフィック岩とモホ遷移帯はリッジ・セグメント境界部で薄い。蛇紋岩化前線は低速拡大軸の、特にリッジ・セグメント境界付近のみ出現するであろう。

Fig. 4 Along-ridge petrological model of the crust and upper mantle beneath the ocean floor.

The mafic rock layer and Moho transition zone are thinner around the ridge segment boundaries. The serpentinization front appears within the peridotite layer only from the slow-spreading ridge system, especially along their ridge segment boundaries.

また、太平洋（高速拡大系）ではレーンズライトはハルツバーライトより深部に存在しているため、ドレッジやドリリングでは得ることができない。また、岩石学的構成は拡大軸沿いでも変化する (Cannat, 1996)。すなわち、マフィック岩層やモホ遷移帯は拡大軸のセグメント境界付近で薄くなる (図 4)。

前述の南西インド洋海嶺付近のアトランティス II 断裂帯斜面のマントル部分で観察された深さ方向のかんらん岩の岩相変化は、ここであげた岩石学的モデルと整合的である。アトランティス II 断裂帯では深さ 5000 メートルから上方に向かい、スピネル・レーンズライト→含斜長石スピネル・レーンズライトとなる。また後者に混じってハルツバーライトも確認された。この調査（潜航）ではガプロ層との境界面まで達しておらず、さらに上部のガプロ層直下ではハルツバーライト、ダナイトなどの岩相が出現すると予想している。

Hess (1962) はモホがかんらん岩中の蛇紋岩化前線に相当すると述べた。彼は海洋での余りにも一定なモホの深さに注目し、それが定温面であると予想し、地球内部からの水による蛇紋岩化が起こる最深部がモホであると考えた。その後、オフィオライトの観察から、海洋底のモホは集積岩層の最上部のパイロクシナイトとガプロの境界であるとされた (Moore and Vine, 1971)。Clague and Straley (1977) は、やはりオフィオライトの観察から部分的に（約 35%）蛇紋岩化したかんらん岩（上位）と新鮮なかんらん岩（下位）の境界が海洋底のモホであるとした。言わば、修正 Hess モデルの提案である。基本的な構造が高速拡大系の海嶺で形成された (Nicolas, 1989) とされるオマーンオフィオライトではかんらん岩中に蛇紋岩化前線のようなものは存在しない (上杉ほか, 2003, 本号参照)。従って、Hess モデルは低速拡大系、特にそのセグメント境界や断裂帯付近で成り立っている (例えば, Cannat, 1993; Muller *et al.*, 1997) ものと思われる (図 4)。

VIII. 海洋底掘削への提案

来る IODP での日本の役割は飛躍的に拡大する。我々は有力な科学的提案を用意してこれに備える必要がある。ここで上部マントル岩石学にかかわりのある案をいくつか提案する。

1) 大陸性かんらん岩の起源と海洋底かんらん岩の関係

とりあえず、今まで海洋底掘削の対象となっていなかった上述の「大陸性かんらん岩」露出地周

辺の海底のノン・ライザー掘削を提案したい(図1)。Zabargad 島はエジプトの軍事地域であり、周辺での掘削は当面困難であるので Pt. Peter-Paul 岩礁付近が当面の検討対象となるであろう。この掘削が実現すれば大陸性かんらん岩と海洋性かんらん岩の関係が明確となる。ここではアセノスフェアとリソスフェアの相互反応の観察も期待できるであろう。また、オマーンオフィオライトのマントル部の最下部にレールゾライトが存在する(Lippard *et al.*, 1986)。Takazawa *et al.* (2003)によりその成因が検討されているが、海洋地域にあるこれらの「大陸性かんらん岩」との比較検討は興味深い。この St. Peter-Paul 岩礁周辺の掘削案を具体的に検討してみたいと思っている。

2) 海洋底マントルの岩石学的モデルの検証

図1, 2のようなマントルの岩石学的モデルは断裂帯や Hess Deep のようなかんらん岩露出地においてノン・ライザー掘削やライザー掘削により検証可能である。ただし一般的な検証は遠い将来のライザーによるかんらん岩露出地の超深度掘削を待たねばならないであろう。例えば、Hess Deep のかんらん岩露出地を深く(5 km 程度?)掘削したらレールゾライトが出現するのであるか? 興味は尽きない。Hess モデル的な蛇紋岩化前線の有無は低速拡大軸の断裂帯の深部岩露出地(例えば、南西インド洋海嶺、アトランティス海台)での超深度掘削により可能である。

3) 21 世紀モホール計画

IODP Planning Sub-Committee (2001)によれば、海洋底をマントルまで掘削する「21 世紀モホール」は IODP の重要な目標の一つである。海洋底の深部の一般的な性質を知り、オフィオライト問題の解決をも目ざすとしたら、高速拡大系のセグメント中心部をマントルまで掘抜くのが最優先のターゲットとなるであろう(図5c)。図2のようなオフィオライトの岩石学的モデルにおける「後期貫入岩体」の起源(海洋底でのオフ・リッジマグマ活動か、オフィオライト化する際の島弧的環境下でのマグマ活動か?)もこの掘削によってのみ解決可能であろう。

また、日本独自のモホール掘削対象として背弧

海盆も検討の対象となろう(図5b)。背弧海盆は島弧や大陸の形成にとって重要な場所であるにもかかわらず、物質的には比較的未知である。また、スプラ・サブダクション帯オフィオライトを背弧海盆起源と考える人も多く(例えば、Pearce *et al.*, 1984)、同オフィオライトとの比較も興味深い。例えば、オマーンオフィオライトでは海嶺的な岩石に島弧的な岩石が後から加わって、全体として海洋と島弧の中間的な地質体をなしている(図2, 図5a)。背弧海盆も海洋と島弧の中間的な環境を有するが、岩石学的な構成はどうなっているのであるか?(図5b)。仮に日本海のモホールが実現したとすると、日本列島に関連した地球科学、環境科学面でのメリットは極めて大きい。また、科学の進歩の象徴として、日本の科学界のみならず一般社会に与えるインパクトは大きいであろう。

ここで注意せねばならないのは「モホ」なる概念の混乱である(上杉ほか, 2003 本号参照)。モホは元来地震波伝播速度という物性の不連続面として地震学的に定義されたものである。近年、「岩石学的モホ」なる用語が登場し(George, 1978 参照)、モホの概念に混乱を招いた。岩石学的モホは、地震学的には検知できない、岩石成因論的な不連続面を指す。例えば、下位の超マフィック溶け残り岩(いわゆるマントルかんらん岩)と上位の超マフィック集積岩(ダナイトなど)の境界として用いられる(George, 1978)が、最近では他の用法(エクロジャイトとかんらん岩の境界)も現れ、混乱している。岩石成因論的な不連続面を「岩石学的モホ」と言うのならば、Hess 流の蛇紋岩化前線としての不連続面は「変質(変成)岩石学的モホ」と言わねばならない。この場合従来の「岩石学的モホ」は「火成岩石学的モホ」と言わねばならない。我々は「岩石学的モホ」なる用語の不使用を訴えたい。「岩石学的不連続面」とか「岩石成因論的不連続面」などと表現すべきである。ここで、地球科学の多くの分野の研究者の間での「モホ」の概念の摺り合わせの必要性を主張したい。

最近の日本人研究者によりオマーンオフィオライトの組織的な研究が開始され、成果が出始めて

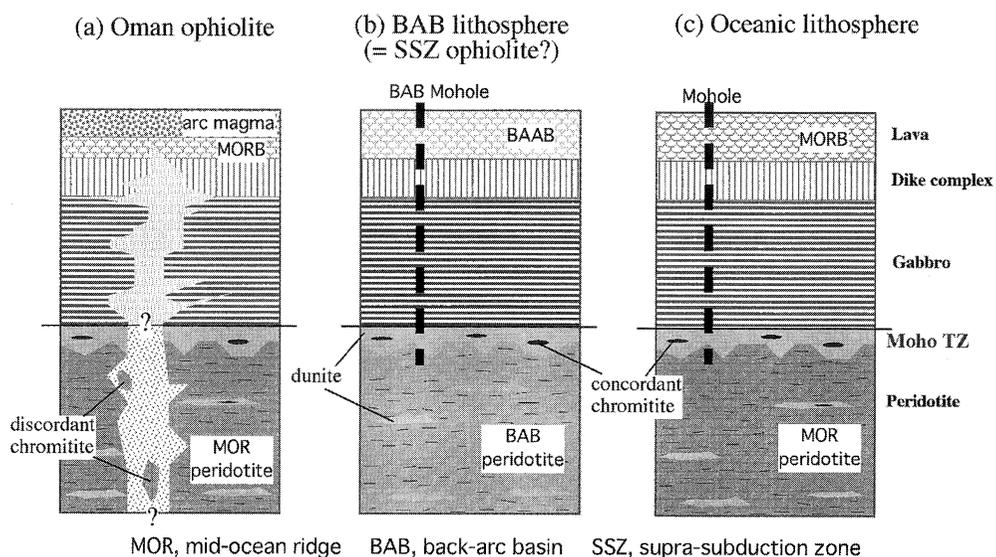


図 5 3つの模式的岩石構成図。

(a) オマーンオフィオライト (図 2), (b) 背弧海盆リソスフェア, および (c) 海洋リソスフェア. オマーンオフィオライトなどのスプラ・サブダクションオフィオライトは背弧海盆リソスフェアに似ているのであろうか. (b) (c) の太い破線は 21 世紀モホール計画において提案される掘削.

Fig. 5 Three possible lithological columns, (a) Oman ophiolite (Fig. 2), (b) back-arc basin lithosphere, and (c) oceanic lithosphere.

Deep drilling at the segment center of a fast-spreading ridge (thick broken line of (c)) may have first priority in the future IODP. Drilling down to the mantle in a back-arc basin (e.g., the Sea of Japan) (thick broken line of (b)) may be an alternate for IODP. The differences between the Oman ophiolite, back-arc basin lithosphere, and oceanic lithosphere are very important for solving the ophiolite problem and exploring otherwise impossible deep petrological constitutions of the ocean floor and back-arc basin.

いる (例えば, 宮下, 1999; 荒井, 2001; Ishikawa *et al.*, 2002; Ahmed and Arai, 2002)。我々は IODP とこれらオフィオライトの研究をうまくリンクさせて行かねばならないと考えている。オフィオライトは複雑であるとは言え, その海洋底研究における価値は何ものにも代えがたいからである。特に, 上部マントルのような深部物質の研究においてはオフィオライトの重要性はさらに増すであろう。

IX. まとめと結論

海洋底の上部マントルの岩石学的構造および, 海洋掘削に関して以下のようにまとめることができる。

1. 海洋底の上部マントルの情報に関しては, 現在は低速拡大系のしかも海洋断裂帯に偏っており, オフィオライトからの情報を取り入れる必要がある。ただし, オフィオライトは複数のテクトニック・セッティングを記憶しているので注意が必要である。
2. 海洋底のかんらん岩はガブロ層直下から, ダナイト, ハルツバーガイト, レールゾライトと岩相変化する。この変化傾向は拡大速度を問わないが, 低速拡大系ではガブロ層直下で急速にレールゾライトに移行する。また断裂帯や海嶺セグメント境界では岩相変化は急になる。
3. かんらん岩層中の蛇紋岩化前線をモホとする

Hess (1962) のモデルは低速拡大系の特に断裂帯近傍でのみ成り立つであろう。

4. これらの諸問題や諸モデルを決定的に解決するのは海洋底の超深度掘削をおいてない。掘削地点を注意深く選定することによりオフィオライト問題(オフィオライトの起源)をも同時に解決することができる。
5. 将来の上部マントル関連の掘削としては、1) 「大陸性かんらん岩」周辺の掘削(ノン・ライザー)、2) かんらん岩露出地でのマントル内部掘削(ノン・ライザーおよびライザー)、3) 高速拡大系のセグメント中心部のモホール(ライザー)、そして4) 日本海などの背弧海盆のモホール(ライザー)などが挙げられる。

謝 辞

宮下純夫(新潟大学)、海野 進(静岡大学)の両氏には海洋底およびオフィオライトの研究に関して常々御協力いただいている。木川栄一、川幡穂高の両氏にはオマーンオフィオライトの研究を始めるにあたってお世話になった。海洋底の研究に際しては東京大学海洋研究所および海洋科学技術センターの皆様は大変お世話になった。2名の査読者の御指摘は本稿を改定する上で有用であった。

文 献

- Ahmed, A.H. and Arai, S. (2002): Unexpectedly high-PGE chromitite from the deeper mantle section of the northern Oman ophiolite and its tectonic implications. *Contrib. Mineral. Petrol.*, **143**, 263-278.
- Ahmed, A.H., Arai, S. and Attia, A.K. (2001): Petrological characteristics of the Pan African podiform chromitites and associated peridotites of the Proterozoic ophiolite complexes, Egypt. *Mineral. Deposita*, **36**, 72-84.
- Alabaster, T., Pearce, J.A. and Malpas, J. (1982): The volcanic stratigraphy and petrogenesis of the Oman Ophiolite complex. *Contrib. Mineral. Petrol.*, **81**, 168-183.
- 荒井章司 (1989): オフィオライトかんらん岩の成因. 地学雑誌, **98**, 231-240.
- Arai, S. (1991): Petrological characteristics of the upper mantle peridotites beneath the Japan Island Arcs—Petrogenesis of spinel peridotites—. *Soviet Geol. Geophys. (Geologiya i Geofizika)*, **32**, 8-26.
- Arai, S. (1994a): Characterization of spinel peridotites by olivine-spinel compositional relationships: Review and interpretation. *Chem. Geol.*, **113**, 191-204.

- Arai, S. (1994b): Compositional variation of olivine-chromian spinel in Mg-rich magmas as a guide to their residual spinel peridotites. *J. Volcanol. Geotherm. Res.*, **59**, 279-294.
- 荒井章司 (1995): 海洋リソスフェアとオフィオライト; 類似点を相違点. 地学雑誌, **104**, 361-380.
- 荒井章司 (1999): 海洋底およびオフィオライトの深部岩石からみた MORB の成因. 月刊地球, **21**, 333-338.
- 荒井章司 (2001): 海洋地殻-マントル系の生成と改編: オマーン・オフィオライトを例として. 平成 11 ~ 12 年度科学研究費補助金(基盤研究 A2) 研究成果報告書.
- Arai, S. and Hirai, H. (1983): Petrographical notes on deep-seated and related rocks (1) Mantle peridotites from Kurose and Noyamadake alkali basalts, southwestern Japan. *Ann. Rep. Inst., Geosci. Univ. Tsukuba*, **9**, 65-67.
- Arai, S. and Matsukage, K. (1996): Petrology of the gabbro-troctolite-peridotite complex from Hess Deep, equatorial Pacific: Implications for mantle-melt interaction within the oceanic lithosphere. *Proc. ODP, Sci. Results*, **147**, 135-155.
- Arai, S. and Matsukage, K. (1998): Petrology of a chromitite micropod from Hess Deep, equatorial Pacific: A comparison between the abyssal and alpine-type podiform chromitites. *Lithos*, **43**, 1-14.
- Bonatti, E. (1990): Subcontinental mantle exposed in the Atlantic Ocean on St Peter-Paul islets. *Nature*, **345**, 800-802.
- Bonatti, E., Hamlyn, P.R. and Ottonello, G. (1981): The upper mantle beneath a young oceanic rift: Peridotites from the island of Zabargad (Red Sea). *Geology*, **9**, 474-479.
- Bonatti, E., Ottonello, G. and Hamlyn, P.R. (1986): Peridotites from the island of Zabargad (St. John), Red Sea: Petrology and geochemistry. *J. Geophys. Res.*, **91**, 599-631.
- Cannat, M. (1993): Emplacement of mantle rocks in the sea floor at mid-ocean ridges. *J. Geophys. Res.*, **98**, 4163-4172.
- Cannat, M. (1996): How thick is the magmatic crust at slow spreading oceanic ridge? *J. Geophys. Res.*, **101**, 2847-2857.
- Clague, D.A. and Straley, P.F. (1977): Petrologic nature of the oceanic Moho. *Geology*, **15**, 133-136.
- Dick, H.J.B. (1989): Abyssal peridotites, very slow spreading ridges and ocean ridge megmatism. *Geol. Soc. Special Pub.*, **42**, 71-105.
- Dick, H.J.B. and Bullen, T. (1984): Chromian spinel as a petrogenetic indicator in abyssal and alpine-type peridotites and spatially associated lavas. *Contrib. Mineral. Petrol.*, **86**, 54-76.
- Dick, H.J.B. and Natland, J.H. (1996): Late-stage

- melt evolution and transport in the shallow mantle beneath the east Pacific Rise. *Proc. ODP, Sci. Results*, **147**, 103-134.
- Dick, H.J.B., Fisher, R.L. and Bryan, W.B. (1984): Mineralogic variability of the uppermost mantle along mid-ocean ridges. *Earth Planet. Sci. Lett.*, **69**, 88-106.
- Elthon, D. (1992): Chemical trends in abyssal peridotites: Refertilization of depleted suboceanic mantle. *J. Geophys. Res.*, **97**, 9015-9025.
- George, R.P., Jr. (1978): Structural petrology of the Olympus ultramafic complex in the Troodos ophiolite, Cyprus. *Geol. Soc. Amer. Bull.*, **89**, 845-865.
- Hekinain, R., Juteau, T., Gracia, E., Sichler, B., Sichel, S., Udintsev, G., Apprioual, R. and Ligi, M. (2000): Submersible observations of Equatorial Atlantic mantle: The St. Paul's Fracture Zone region. *Marine Geophys. Res.*, **21**, 529-560.
- Hellebrand, E., Snow, J.E., Dick, H.J.B. and Hofmann, A.W. (2001): Coupled major and trace elements as indicators of the extent of melting in mid-ocean-ridge peridotites. *Nature*, **410**, 677-681.
- Hess, H.H. (1962): History of ocean basins. In Engel, A.E. et al. eds.: *Petrologic Studies (Buddington Volume)*. Geol. Soc. Amer., Boulder, 599-620.
- IODP Planning Sub-Committee (2001): *Earth, Oceans and Life: IODP Initial Science Plan*. International Working Group Support Office, Washington, D.C.
- Ishiwaka, T., Nagaishi, K. and Umino, S. (2002): Boninitic volcanism in the Oman ophiolite: Implications for thermal condition during transition from spreading ridge to arc. *Geology*, **30**, 899-902.
- Jaques, A.L. (1981): Petrology and petrogenesis of cumulate peridotite and gabbro from the Marum ophiolite complex, Northern Papua-New Guinea. *J. Petrol.*, **22**, 1-40.
- Johnson, K.T.M., Dick, H.J.B. and Shimizu, N. (1990): Melting in the oceanic mantle: An ion microprobe study of diopsides in abyssal peridotites. *J. Geophys. Res.*, **95**, 2661-2678.
- Kadoshima, K. (2002): *Petrological Characteristics of the Mantle Section of the Northern Oman and Lizard Ophiolites: An Approach from In-situ Rocks and Detrital Chromian Spinel*. Ph.D. thesis, Kanazawa Univ.
- 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.
- Lippard, S.J., Shelton, A.W. and Gass, I.G. (1986): *The Ophiolite of Northern Oman*. Geological Society Memoir, **11**.
- Malpas, J. and Strong, D.F. (1975): A comparison of chrome-spinels in ophiolites and mantle diapirs of Newfoundland. *Geochim. Cosmochim. Acta*, **39**, 1045-1060.
- Matsukage, K. and Arai, S. (1998): Jadeite, albite and nepheline as inclusions in spinel of chromite from Hess Deep, equatorial Pacific: Their genesis and implications for serpentine diapir formation. *Contrib. Mineral. Petrol.*, **131**, 111-122.
- Matsukage, K., Arai, S., Abe, N. and Yurimoto, H. (2002): Two contrasting melting styles of mantle peridotite in the northern Oman Ophiolite; An indication of a switch of tectonic setting. *Abst. 4th International Workshop on Orogenic Lherzolites and Mantle Processes, Hokkaido*, 82.
- 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, Henly 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, **102**, 705-719.
- Melson, W.G., Hart, S.R. and Thompson, G. (1972): St. Paul's Rocks, equatorial Atlantic: Petrogenesis, radiometric ages, and implications on seafloor spreading. *Geol. Soc. Amer. Memoir*, **132**, 241-272.
- Moores, E.M. and Vine, F.J. (1971): Troodos massif, Cyprus and other ophiolites as oceanic crust: Evaluation and implications. *Phil. Trans. Roy. Soc. London*, **A268**, 443-466.
- 宮下純夫 (1999): 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—。平成9～10年度科学研究費補助金 (国際学術調査) 研究成果報告書.
- Muller, M.R., Robinson, C.J., Minshull, R.S. and Bickle, M.J. (1997): Thin crust beneath ocean drilling program borehole 735B at the Southwest Indian Ridge? *Earth Planet. Sci. Lett.*, **148**, 93-107.
- Nicolas, A. (1989): *Structures of Ophiolites and Dynamics of Oceanic Lithosphere*. Kluwer Academic Pub.
- Niu, Y. and Hekinain, R. (1977): Spreading-rate dependence of the extent of mantle melting beneath ocean ridges. *Nature*, **385**, 326-332.
- Pearce, J.A., Lippard, S.J. and Roberts, S. (1984): Characteristics and tectonic significance of supra subduction zone ophiolites. *Geol. Soc. Special Pub.*, **16**, 77-94.
- Roden, M.K., Hart, S.R., Frey, F.A. and Melson, W.G. (1984): Sr, Nd and Pb isotopic and REE geochemistry of St. Paul's Rocks: The metamorphic and metasomatic development of an alkali basalt mantle source. *Contrib. Mineral. Petrol.*, **85**, 376-390.
- Ross, K. and Elthon, D. (1997): Extreme incompatible trace-element depletion of diopside in residual mantle from south of the Kane fracture zone. *Proc. ODP, Sci. Results*, **153**, 277-284.

- Salter, V.J.M and Shimizu, N. (1988): World-wide occurrence of HFSE-depleted mantle. *Geochim. Cosmochim. Acta*, **52**, 2177-2182.
- Seyler, M. and Bonatti, E. (1997): Regional-scale melt-rock interaction in lherzolitic mantle in the Romanche fracture Zone (Atlantic Ocean). *Earth Planet. Sci. Lett.*, **146**, 273-287.
- Takazawa, E., Okayasu, T. and Satoh, K. (2003): Geochemistry and origin of the basal lherzolites from the northern Oman ophiolite (northern Fizh block). *Geochem. Geophys. Geosyst.*, **4**, 1021, doi:10.1029/2001GC000232.
- 田村明弘・牧田宗明・荒井章司 (1999): 北海道, 神居古潭帯のかんらん岩の成因. 地質学論集, **52**, 53-68.
- Tilley, C.E. (1947): Dunite maylonites of St. Paul's Rocks (Atlantic). *Amer. J. Sci.*, **245**, 483-490.
- 上杉次郎・荒井章司・森下知晃・松影香子・角島和之・田村明弘・阿部なつ江: オマーンオフィオライトにおけるマントル-地殻境界の実体と多様性. 地学雑誌, **102**, 750-768.
- (2003年5月13日受付, 2003年7月22日受理)