

モホの岩石学的実体を探る

— 21 世紀モホールを目指して —

荒井章司^{*,**} 阿部なつ江^{**}

Investigation of the Petrologic Nature of the Moho toward the Mohole

Shoji ARAI^{*,**} and Natsue ABE^{**}

Abstract

This article reviews interpretations of the geological and petrological nature of the Moho, which is defined as a discontinuity in terms of V_p , with a view to preparing for the Mohole on the ocean floor in IODP. We strongly propose discarding non-seismic terms for the Moho, such as "petrologic Moho". The nature of the Moho has been controversial for a long time; an isochemical phase transition boundary between gabbro (crust) and eclogite (mantle) was favored for the Moho by some researchers, while a chemical boundary between mafic rocks (crust) and peridotite rocks (upper mantle) is now favored by a majority of researchers. Boundaries between completely or partially serpentinized peridotite and fresh peridotite may be applicable as the Moho at some parts of the ocean floors of a slow-spreading ridge origin. Antigorite serpentinite can be expected to be observed at the lowermost crust if the Moho is the serpentinization front at the stability limit of serpentine. The Moho beneath the Japan arcs can be estimated using mafic-ultramafic xenoliths in Cenozoic volcanics. Peridotitic rocks scarcely mix with feldspathic rocks, indicating that the Moho at that location is the boundary between feldspathic rocks (mostly mafic granulites; crust) and spinel pyroxenites (mantle). Possible fossil Mohos are observed in well-preserved ophiolites, such as the Oman ophiolite. Two types of Moho are distinct in the Oman ophiolite; gabbro-in-dunite Moho, where a gabbro band network in dunite changes upward to the layered gabbro within a few to several tens of meters, and dunite-in-gabbro Moho, where late-intrusive dunites intruded into gabbros. The former is of a primary origin at a fast-spreading ridge, and the latter is of a secondary origin at a subduction-zone setting in the obduction of the oceanic lithosphere as an ophiolite. The gabbro/peridotite (dunite) boundary as the primary Moho forms in embryo as a wall of melt conduit at fast-spreading ridges as well as at the segment center of slow-spreading ridges. The oceanic primary Moho is modified to various degrees by magmatism, metamorphism and tectonism in subsequent arc and continental environments. The gabbro-in-dunite Moho formation in the Oman ophiolite is an embryo of this modification.

We expect *in-situ* sampling across the primary oceanic Moho formed at a fast-spreading ridge through the Mohole of IODP. Ultra-deep drilling at gabbro/peridotite complexes exposed on the ocean floor is indispensable for our understanding of the suboceanic upper mantle. Studies on appropriate ophiolites and deep-seated xenoliths from oceanic areas should complement the Mohole and other ultra-deep drillings to grasp the whole picture of the oceanic upper mantle.

* 金沢大学自然科学研究科地球学教室

** 海洋研究開発機構地球内部変動研究センター

* Department of Earth Sciences, Graduate School of Natural Science and Technology, Kanazawa University

** Institute for Research on Earth Evolution (IFREE), Independent Administrative Institution/Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology (JAMSTEC)

Key words : Moho, ocean floor, crust, mantle, ophiolite, xenoliths, serpentinite, peridotite, Mohole

キーワード：モホ、海洋底、地殻、マントル、オフィオライト、捕獲岩、蛇紋岩、かんらん岩、モホール

I. 序 論

モホ（モホロビッチ不連続面）は、上方の地殻と下方のマントルを分ける境界であり、ほぼ全地球的に存在する重要な固体地球内部の不連続面のうち、最も浅所に存在するものである。それは地震波の伝播速度という岩石物性に関する不連続面（下部地殻、 $V_p = 6 \sim 7$ km/秒；上部マントル、 $V_p = 8$ km 前後/秒）であり、地震学的に定義されたものである。では、その岩石学的実体は何であろうか？ また、どのように形成されたものであろうか？（図1）。モホは海洋底で5～8 km（海底下）、大陸地域で30～40 km という深さにあり、人類のテクノロジーでは直接観察することは現時点では不可能である。従って、モホの岩石学的実体に関しては、マントルの岩石学的実体と関連し数多くの議論があった（例えば、Jarchow and Thompson, 1989）。代表的なものに、下部地殻～最上部マントルの化学組成は同一（玄武岩質）で、モホ＝玄武岩（ガブロ）/エクログナイト転移面という解釈があった（例えば、Lovering, 1958）。玄武岩（ガブロ）は、圧力上昇に伴い、ざくろ石グラニュライトを経てエクログナイトに転移する（例えば、Green and Ringwood, 1972）。この解釈は、観察されるモホが不連続面として認識できる程度にシャープであること、モホ下のマントルにエクログナイトでは期待できない V_p に関する異方性があること、などから否定された（Jarchow and Thompson, 1989 参照）。次第に、モホは、上位の玄武岩質（地殻）と下位のかんらん岩質（マントル）の化学組成的な境界であるという解釈が一般的に受け入れられるようになった（例えば、Kuno, 1969）。一方 Hess (1962) は、海洋底のモホの深さ（＝地殻の厚さ）の一樣さに注目し、海洋底モホは定温面であり、蛇紋岩（地殻）/かん

らん岩（マントル）境界であるとした。この説も、一樣に完全な加水化を起こすメカニズムが考えにくいこと、海洋底深部の完全な蛇紋岩に伴う化学的および熱的な収支が成立しないこと、などから次第に下火になった。しかし、このヘス・モデルはその後一部形を変えて提唱され続けている。例えば、Clague and Straley (1977) は、海洋モホは35%蛇紋岩化したかんらん岩（地殻）と新鮮なもの（マントル）の境界であるとした。ヘス・モデルは、後述するように一部の海洋底では成立するという考えが浸透しつつある。IODPにおける21世紀モホールが現実味を帯びようになった現在、我々は海洋底のモホに対する岩石学的なモデルを持つ必要がある。このモデルは、将来モホールにより確認されるかもしれないし、否定され修正されるかもしれない。本稿では、モホの岩石学的実体についての今までの議論をまとめ、それを理解するために我々は何をすべきかを論ずる。そして、21世紀モホールに対する備えをしたい。なお、海洋底やオフィオライトの「モホ」に関しては、地学雑誌の特集号「海洋岩石学の新しい局面」（宮下ほか, 2003）のいくつかの論文で扱われている。また、海洋底のモホ付近で重要な岩石であると予想されるダナイトに関しては小澤（2008, 本特集号）を参照されたい。

II. 用語「モホ」について

モホ（＝モホロビッチ不連続面）の定義はSteinhart (1967) によれば、「地球内部で、 V_p が7.6～8.6 km/秒へと急激に、または不連続的に増加する面」であり、不連続面が見られない場合は「 V_p が最初に7.6 km/秒を超える面」を言う。深部の、 V_p 以外の物性に関する不連続面に「モホ」を冠してよぶことは、定義を無視したものであり、用語の混乱を招くものである。その典型的

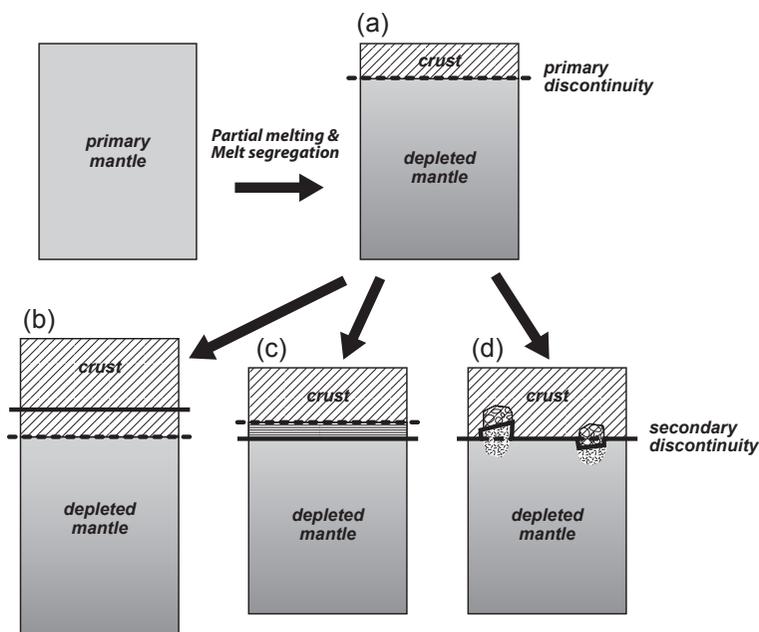


図 1 モホの生成および改変の概念図。太い実線および破線は、それぞれ初生的なモホ、二次的なモホを示す。(a) マントルの部分溶融によるマグマにより地殻の岩石が形成され、初生的なモホができる。中央海嶺でのモホ形成が代表例。(b) 地殻の岩石が付加され、初生的な下部地殻物質の一部が變成作用等によりマントルの物性を獲得(例えば、ガブロのエクログイト化)し、モホが改変される。(c) 冷却、加水作用などで、マントル最上部が変質(例えば、かんらん岩の蛇紋岩化)し、地殻の物性を獲得することによりモホが下方に移動する。(d) マグマが初生的モホ付近に付加され、超マフィック集積岩などが形成されるなどしてモホが改変される。

Fig. 1 Illustration of a general model of the primary Moho formation and subsequent modification processes. Thick dotted and solid lines denote the primary Moho and the secondary Moho, respectively. (a) Formation of the primary Moho by partial melting and melt segregation, e.g., at mid-ocean ridges. (b) Modification of the primary Moho by a transformation of lower crustal rocks into denser rocks with mantle properties. Eclogitization of gabbroic rocks due to cooling and thickening of the crust is a good example. (c) Thickening of the crust by a transformation of the uppermost mantle peridotite into less dense rocks such as serpentinite due to cooling and hydration. (d) Modification of the primary Moho by the underplating of magmatic rocks. The primary Moho may be complicated due to addition of ultramafic and mafic cumulates.

なものが「岩石学的モホ (petrologic Moho)」(例えば, George, 1978; Karson and Elthon, 1987)であろう。この言葉は、詳細な岩石の積み重なり(オフィオライト層序)が観察可能なオフィオライトにおいて、下位のマントルかんらん岩(主としてハルツバーグイト; 溶け残り岩と見なされる)と上位のダナイト(マグマからの結晶集積岩)の境界(超マフィック岩中に存在する)を指すために作られた。岩石成因論的な不連続面であり、この種の面の汎地球的な存在も自明ではなく、

Vpの不連続性が存在する訳ではない。そもそも、最近の解釈では、この種のダナイトはマントルかんらん岩とマグマとの反応生成物(例えば, Arai and Matsukage, 1996)であり、溶け残りかんらん岩と結晶集積岩の中間的な性格を持つものである。従って、ハルツバーグイト/ダナイト境界も、当初考えられたほど大きな不連続面ではないはずである。さらに、「岩石学的モホ」を、上述の岩石成因論的不連続面と異なる意味に使用され、大きな混乱が生じている。上杉ほか(2003)でも

述べたが、ここで再び、「岩石学的モホ」という用語の不使用を強く提唱したい。また、岩石学者により書かれた論文の題名として「Is the continental Moho the crust-mantle boundary?」(Griffin and O'Reilly, 1987)のような表現が現実に使用されているのである。この表現には地殻とマンツルの境界はマフィック岩とかんらん岩の境界であるという暗黙の了解が含まれている。しかし、「モホ」は地殻とマンツルの境界であるべきである。また、「モホ」はVpにより定められる面であり、それ以外に使用してはならないのではなかろうか。「岩石学的モホ」に関しては、小澤(2008, 本特集号)を参照されたい。

III. 捕獲岩から探る日本列島下のモホ

捕獲岩(xenoliths)はマグマによって運ばれた地下深部からの礫であり、地下深部を構成する岩石の直接的な情報をもたらすものとして重要である(例えば, Takahashi, 1978; 荒井ほか, 2005)。捕獲岩には上部マンツルや下部地殻起源のものがあるとされ、モホの岩石学的実体に関する情報も提供する。日本列島を例にとり、捕獲岩からモホを探ってみよう。捕獲岩は径数十cm以下の岩片であり、岩石相互の関係をj知ることは難しい。おおまかには、適当地質温度圧力計を用いて岩石の平衡条件を推定し、岩石の積み重なりを予想することはできる。ただし、火成岩的なもの、変成岩的なものが混在している場合はこの方法は慎重に行う必要がある。最も直接的で有効なのは、複合捕獲岩とよばれる複数種の岩石からなる捕獲岩により、岩石生成の前後関係をj知ることである。

我々の知る限り、最も単純な岩石種の相互関係を示すのは黒瀬(北九州博多湾)の捕獲岩である(Arai *et al.*, 2000)。黒瀬でアルカリ玄武岩(1.1 Ma)中に捕獲岩として見いだされる主要な岩石は、かんらん岩(ハルツバーナイト、レールズライト、およびダナイト~ウェールライト)、ウェブスタライト(斜方輝石+単斜輝石+Alスピネル)、スピネル・グラニュライト(斜方輝石+単斜輝石+斜長石+Alスピネル)、花崗岩である(図2)。ハルツバーナイトにはしばしば輝石に富

むバンドがあり、ウェブスタライトとグラニュライトが互層した複合捕獲岩がしばしば見いだされる。花崗岩は基盤を含む上部地殻起源であり、かんらん岩類は上部マンツル起源、グラニュライトは下部地殻起源であろう。含スピネル・ウェブスタライトのVpはおそらく7.6 cm/秒を超えられ、黒瀬の捕獲岩からは、モホはグラニュライトを主とする部分と、ウェブスタライトを主とする部分の境界に相当すると思われる。

西南日本各地の新生代アルカリ玄武岩中の捕獲岩には、グループIIと総称される若い岩石(主として、比較的鉄に富むパイロクシナイト~ウェールライト)が認められる(例えば, Arai *et al.*, 2000)。これらのアルカリ玄武岩類は単成火山群を形成しており(例えば, Iwamori, 1991)、同一地域で時間的に少しずつ異なるマグマ活動があった。グループIIの岩石は、母岩のアルカリ玄武岩に先行した同類のマグマからの結晶集積岩であると考えられ、既存の超マフィック~マフィック岩中(すなわち、その時のモホ周辺)に形成されている。この、やや後で形成された鉄に富むパイロクシナイトのVpは、おそらく典型的なマンツル、地殻物質の中間的であり、グループIIの岩石の生成は既存のモホを改変した(しばしば不明瞭にした)であろう。

一方、東北日本弧の目黒火山(約1万年前)の捕獲岩はかんらん岩~パイロクシナイト~ガブロと多様である。最大の特徴は、含水鉱物であるホルンブレンドを様々な割合で含むことであろう(例えば, Takahashi, 1986; Aoki, 1987)。ホルンブレンドの形成はマグマからの晶出(ホルンブレンド・ガブロ)のほか、交代作用によっている(Arai, 1986)。交代作用(加水作用)は極めて不均質に進行しており(荒井ほか, 2005)、無水のマフィック鉱物と斜長石の中間的なVpを有するホルンブレンド(例えば, Christensen and Salisbury, 1975)の局所的な形成により、既存のモホはやはり改変されるだろう。

IV. 海洋底のモホ

海洋底は地殻が比較的薄く(5~8 km)、マン

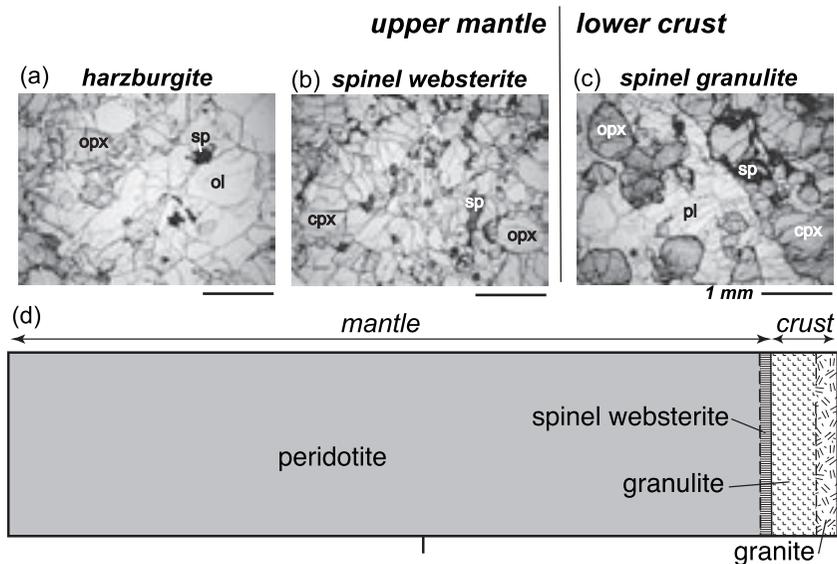


図 2 黒瀬(博多湾)の捕獲岩から推定されるモホ付近の構成。ol, opx, cpx, sp および pl は、それぞれ、かんらん石、斜方輝石、単斜輝石、スピネルおよび斜長石。偏光顕微鏡写真はいずれも下方ポラーのみで撮影。スケールは 1 mm。(a) ハルツバーガイトの顕微鏡写真。日本列島の上部マントルを代表する岩相である (Arai *et al.*, 2000)。(b) スピネル・ウェブスタライトの顕微鏡写真。(c) スピネル・グラニュライトの顕微鏡写真。(d) 黒瀬における捕獲岩の岩石種の量比(体積比) (Arai *et al.*, 2000 を簡略化)。黒瀬付近のモホはグラニュライトとウェブスタライトの境界であると思われる。

Fig. 2 Rocks possibly derived from around the Moho beneath the Japan arcs observed in the xenolithic suite in alkali basalt from Kurose at the Hakata Bay, Southwest Japan. ol, opx, cpx, sp and pl denote olivine, orthopyroxene, clinopyroxene, spinel and plagioclase, respectively. Photomicrographs were taken under plane-polarized light. Scale bar is 1 mm. (a) Photomicrograph of harzburgite characteristic of the uppermost mantle beneath the Japan arcs (see Arai *et al.*, 2000). (b) Photomicrograph of spinel websterite. (c) Photomicrograph of spinel granulite. (d) Frequency by volume of xenolithic rock species from Kurose (modified from Arai *et al.*, 2000). The Moho is possibly a boundary between granulite and websterite beneath Kurose.

トルへの「窓」とであるという側面がある。この点がマントルまでの掘削(モホール)の強い動機となっている。海洋底への最長のボーリングが約 2.1 km の現状では、地殻の構造そのものでさえ、その場で明らかにできるのにはほど遠い(図 3)。従って、海洋底モホの岩石学的実体を明らかにするのはいまだに遠い夢なのである。海洋地殻の主要構成要素がマフィック火成岩であることは間違いないが、マフィック火成岩の部分の厚さはもちろん実際に確かめられてはいない。マフィック地殻の厚さは、海嶺における熱的な状態(例えば, Lin and Phipps Morgan, 1992)と密接に関係している。また、海洋底深部にかんらん岩が存在す

ることは、MORB の生成条件やテクトニックに擾乱を受けた場所での蛇紋岩化されたかんらん岩の存在などから間違いないであろう(荒井・阿部, 2003)。従って、マフィック火成岩層が 5~8 km あれば、海洋底におけるモホはガプロ(地殻)とかんらん岩(マントル)の境界に一致する可能性が高い(図 3a)。Cannat (1993, 1996) は、断片的に得られている深部起源の岩石から、海洋地殻の岩石学的モデルを提唱した(図 3c)。低速拡大軸では、海嶺セグメントの境界(断裂帯など)と中心部にかけて不均質性が著しい。一方、高速拡大軸では、ほぼ前者のセグメント中心と同等の構造を有し、不均質性は小さい。

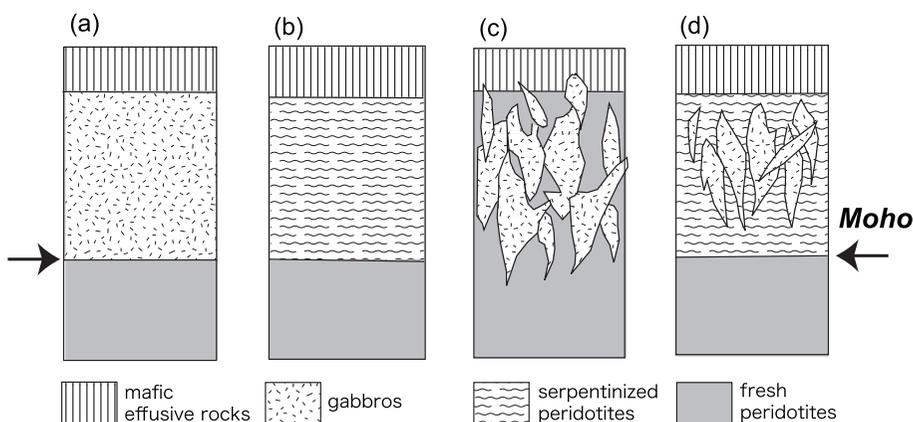


図 3 海洋地殻-最上部マントルの地質学的モデル (Cannat (1993) および Minshull *et al.* (1998) を改変). (a) 上部地殻がマフィック噴出岩, 下部地殻がガブロ, 上部マントルがかんらん岩よりなるモデル (いわゆるペンローズ型オフィオライトモデル). モホはガブロとかんらん岩の境界である. (b) 下部地殻が蛇紋岩化したかんらん岩であるという Hess (1962) のモデル. モホは蛇紋岩化前線である. (c) 下部地殻はガブロが貫入したかんらん岩 (一部蛇紋岩化) であるという Cannat (1993) のモデル. ガブロ層の下部がモホに相当する. (d) (c) と同様であるが, ガブロ貫入岩体の周囲は蛇紋岩化しており, モホは蛇紋岩化前線であるというモデル (Minshull *et al.*, 1998).

Fig. 3 Four possible geologic models for crust to uppermost mantle of the ocean floor (modified from Cannat (1993) and Minshull *et al.* (1998)). (a) Penrose-type ophiolite model, in which crust and mantle are composed of mafic rocks and peridotite, respectively. The Moho is a gabbro/peridotite boundary. (b) The Hess model (Hess, 1962), in which serpentinized peridotite comprises the lower crust. The Moho is a serpentinite/peridotite boundary and a serpentinization front. (c) A model of Cannat (1993), in which the lower crust is composed of partially serpentinized peridotite with gabbroic intrusive bodies. The Moho is around the base of the gabbro-rich layer. (d) As (c), but the Moho is clearly defined by the serpentinization front (Minshull *et al.*, 1998).

Cannat モデルのポイントの一つは, マフィック火成岩の層 (部分) が薄い場合には, 下部地殻は蛇紋岩 (+小規模なガブロの貫入岩体) よりなると解釈したことである (図 3c)。これはやや改変されたヘス・モデル (Hess, 1962) (図 3b) とも言える。低速拡大軸の, 特にセグメント境界近くはマフィック岩に乏しいとされ, ヘス・モデルが適応できる (すなわち, モホはかんらん岩の蛇紋岩化前線) のではないかと信じられつつある (例えば, Muller *et al.*, 1997)。例えば, 超低速拡大軸である南西インド洋海嶺のアトランティス II 断裂帯では蛇紋岩 (かんらん岩) が大規模に露出しており (例えば, 松本ほか, 2003), 薄いマフィック地殻の下に蛇紋岩/かんらん岩境界が存在する可能性は高い。

ただし, この場合の蛇紋岩/かんらん岩境界の実体は何であるのかは大変興味深い。もし, Hess (1962) の言うように, この境界が定温面で, 蛇紋石の安定領域の上限であるとする (図 4a) と, 蛇紋岩層の最下部はアンチゴライトという蛇紋石 (高温で安定な蛇紋石) (図 4b) で構成されていないといけない。アンチゴライト岩は変成帯などに普通に産するが, 通常の海洋底からの報告はない。もし, より定温で安定な蛇紋石 (クリソタイルやリザーダイト) (図 4c) よりなる蛇紋岩が新鮮なかんらん岩と接してモホを形成しているとしたら, この境界は温度によって制限されているのではなく, 何らかの機械的な理由で, 海水がより下方にもたらされないことにより形成されていることになる。例えば, 水を有効に

運ぶ亀裂がより下方には（高圧では）形成されにくいというようなことがあるのかもしれない。

V. オフィオライトに見られる「モホ」

オマーン・オフィオライトなどの露出の良好なオフィオライトでは、主としてマフィック岩よりなる部分（厚さ数 km）の下位にかんらん岩（様々に蛇紋岩化）（厚さ 10 km 程度以下）が存在している。多くの人がこの境界を「モホの化石」と考えている。また、境界付近には主としてダナイトよりなる部分があり、モホ遷移帯（Moho transition zone）とよばれている（例えば、Boudier and Nicolas, 1995）。変質したかんらん岩中の蛇紋石にはアンチゴライトは稀であり、ヘス・モデルで期待されるアンチゴライトよりなる下部地殻岩に相当するものは見いだされていない。モホ遷移帯～地殻（下部～中部）には後期貫入岩体と総称される比較的若い深成岩が貫入しており、古い構造は様々に乱されている。後期貫入岩体は主としてウェールライト～ダナイトであり、最高で地殻の 3 割程度を占めていると言われている（Juteau *et al.*, 1988）。ダナイト（またはウェールライト）には初生的なもの（マフィック岩と同時に形成）と二次的（後期）なものがあり、従って、二種類のダナイト/ガブロ関係が認められる（上杉ほか, 2003）。一つは「gabbro-in-dunite」とも言うべき関係で、ガブロのバンドがダナイト中に貫入しているように見えるものである（図 5）。ガブロはネットワークをなし、ガブロバンドの密度は上方に向かって増加し、ダナイトからガブロへの変化が「漸移的」とも言えるものである（図 5；上杉ほか, 2003）。他は「dunite-in-gabbro」とも言うべきもので、ダナイト～ウェールライトがガブロ中に貫入しているものである（図 6；上杉ほか, 2003）。ダナイトは前者が初生的、後者は二次的（後期貫入岩類）であろう。これら二種類のダナイト/ガブロ関係は、二種類のモホを作り得る。「gabbro-in-dunite モホ」は、初生的なモホであり（図 5）、「dunite-in-gabbro モホ」は、後期貫入岩のダナイト～ウェールライトのガブロ中への貫入により二次的に形成されたモホである（図

6）。

北海道神居古潭帯の幌加内オフィオライトは、「地殻部」を構成するマフィック岩類が MORB の性質を持ち、「マントル部」を構成するかんらん岩の枯渇度が著しく高く（スピネルの $Cr/[Cr + Al]$ 原子比 > 0.7 ）、非海嶺的であるのが特徴である（Ishizuka, 1981, 1985）。また、マフィック岩は様々に変成され、「下部地殻」に相当するガブロは主として角閃岩～ホルンブレンド・グラニュライトとなっている（石塚, 1980; Ishizuka, 1985）。一方、かんらん岩は低温の蛇紋岩化作用以外の加水作用は受けておらず、ガブロ～閃緑岩質のネットワーク状の貫入岩も非変形である。つまり、「地殻部」は中央海嶺で形成された後、ホルンブレンド・グラニュライト相以下の変成作用を被っている。一方、「マントル部」は島弧的な場での生成を示唆している。従って、幌加内オフィオライトの「モホ」は、変形、加水化、形成場などの不連続を示唆し、二次的に形成された可能性が大きい（荒井, 1995 参照）。例えば、幌加内オフィオライトは二種類のオフィオライトまたはリソスフェア（海洋および島弧起源）から形成されたテクトニックな複合体ではないだろうか（図 7）。

VI. 議論およびまとめ

しばしば複雑な地史を持つ大陸地域におけるモホには多様性があり得る（例えば、Eaton, 2005）。典型的なモホ形成と多様化プロセスとしては、海嶺での初生的モホ形成から、火成作用、変成/交代作用およびテクトニズムによる改変がある（Eaton, 2005）。

海嶺での初生的なモホ形成は、現状では、海嶺でのマグマ生成（例えば、MORB の成因）からの制約を考慮した上で、海嶺起源のオフィオライトから類推するのが最良であろう。オマーン・オフィオライトなどではモホの化石と思われるものが露出しており、モホを地質学的に調査可能である。オマーン・オフィオライトの主要な部分が海嶺（もしかしたら背弧海盆の海嶺かもしれない）で生成したことは広く受け入れられている（例え

ば, Pearce, 1975; Nicolas, 1989; Miyashita *et al.*, 2003)。オマーンでは, 前述のように「gabbro-in-dunite」モホが初生的なものであり, 海嶺 (特に, 高速拡大軸または低速拡大軸のセグメント中心) で形成された可能性が高い (図 8)。モホ遷移帯をなすこのダナイトは, ハルツバーガイトとメルトの反応生成物であり (Arai and Matsukage, 1996; Dick and Natland, 1996), 海嶺直下でのメルト上昇中に形成されたものであろう (Arai, 2005 参照)。ダナイト中のガブロはおそらく MORB メルトの通路であり (Kelemen *et al.*, 1997), 海嶺直下で, 反応生成物のメルトが既に生成されていたダナイト中を上昇した結果であろう (図 8)。この場合のモホはメルト通路 (ガブロ・バンド) の密度が十分に増すと, 全体が層状ガブロと言えるものになる。層状ガブロとダナイトとは, ガブロ・バンドの密度という点で漸移的である。この漸移帯の厚さは, 北部オマーン・オフィオライトでの我々の観察では数十 m ~ 数十 m である。

前述のようにオマーン・オフィオライトではかんらん岩層中に Hess (1962) や Clague and Straley (1977) の示唆する蛇紋岩化の程度の規則的な変化 (深さ方向の現象または蛇紋岩化前線) は認められない。オマーン・オフィオライトは基本的に高速拡大海嶺起源であるとされており (例えば, Nicolas, 1989), マフィック岩地殻の十分厚い高速拡大海嶺起源の海洋底には下部地殻岩としての蛇紋岩は存在していないのであろう。低速拡大海嶺起源の海洋底, 特に海嶺セグメント境界付近ではマフィック岩地殻が薄く (例えば, Muller *et al.*, 1997), マフィック岩-かんらん岩コンプレックスは海水の循環により急速に変質するであろう。かんらん岩部分は蛇紋岩化し, 地殻的な物性を有するようになるであろうが, 蛇紋岩化程度の空間的分布, 蛇紋岩の岩石化学, 蛇紋石の種類とその分布などが興味深い。このような場所では, 蛇紋岩/かんらん岩境界がモホを形成している可能性が十分ある (Muller *et al.*, 1997)。これらの問題は近い将来, 南西インド洋海嶺の海洋コア・コンプレックス (アトランティス・バンクなど)

の超深度掘削で解明されるであろう。高速拡大軸でもヘス・ディープのようにガブロ, かんらん岩が海底に露出している場所では事情は同様であろう。

初生的な海洋性モホは, その後のテクトニックなセッティングの変化により様々な改変を受ける (図 1 参照)。オマーン・オフィオライトの「dunite-in-gabbro」モホの形成はその一つの例を我々に示す (上杉ほか, 2003 参照)。海洋リソスフェアがオフィオライトとしてへい入するために島弧的環境を経験することは不可避であり, オマーン・オフィオライトは島弧的火成岩が付加された海洋リソスフェアの断片である (Arai *et al.*, 2006)。後期貫入岩のダナイト~ウェールライトは北部オマーン・オフィオライトでは, 島弧的な性質を示す; すなわち, (1) クロムスピネルの Cr# はやや高く (> 0.6 以上のものがある) (上杉ほか, 2003), (2) 単斜輝石から類推される関与したメルトの性質は, 同オフィオライトの島弧的な噴出岩と類似し (Takemoto, 2007MS), (3) しばしば初生的と思われるホルンブレンドを含む。ただし, 南部オマーン・オフィオライトでは, 同様のウェールライトは MORB との成因的關係を示唆し, 海洋的であるとされている (Koga *et al.*, 2001)。海洋性島弧は, 通常海洋地域に沈み込みが発生することにより生じる。その過程で, 海洋地殻-マントルに島弧性の火成岩が付加することにより, 島弧化が進行し, 海洋性モホは次々と改変され, 島弧性モホになるであろう (例えば, Kay and Kay, 1986; Arai *et al.*, 2006 参照)。島弧性のモホは, 日本列島の捕獲岩から推定されるようにマグマ活動や変成作用 (交代作用) により常に改変されているはずである (荒井ほか, 2005 参照)。西南日本弧は日本海拡大時のマグマ活動 (例えば, Iwamori, 1991) により, 大幅に改変されている可能性がある (Arai *et al.*, 2000) (図 1d 参照)。

プレートの衝突帯などの活発なテクトニクスの場合では, 完全なテクトニックな二次的なモホが形成されることがあるであろう (Eaton, 2005)。地殻とマントルが物性の違いからテクトニックに分

图 4
Fig. 4

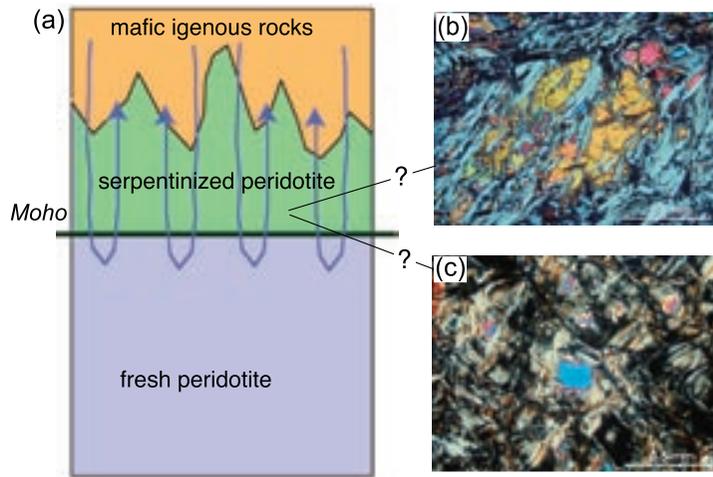


图 5
Fig. 5

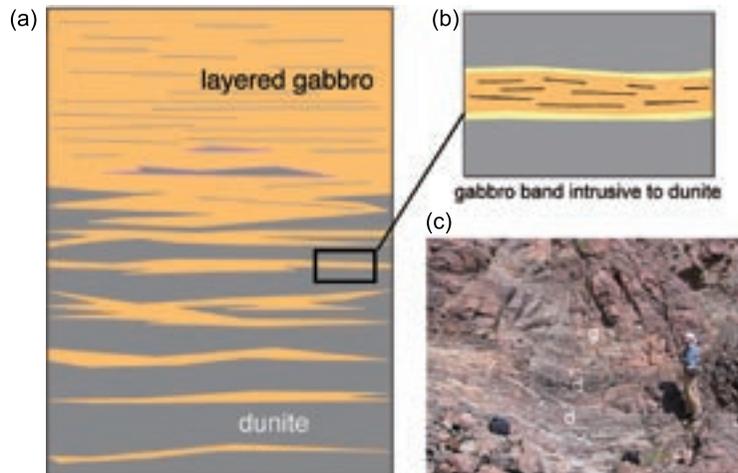
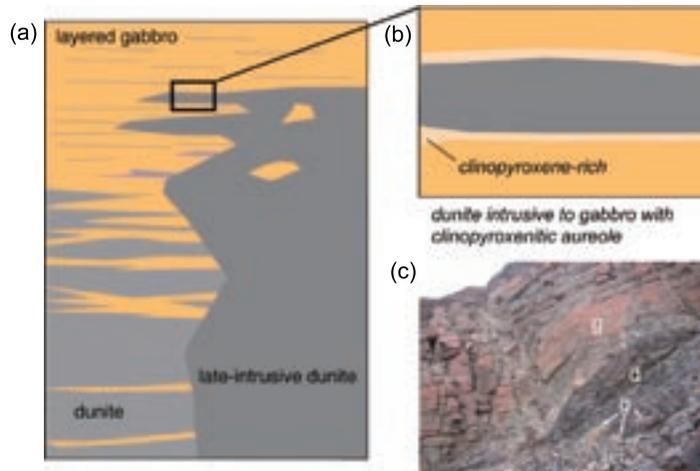


图 6
Fig. 6



離することは十分ありうることである (Meissner and Mooney, 1998)。前述した幌加内オフィオライトの「モホ」に相当する境界が、もしかつて実際にモホであったとしたら、テクトニックな二次的モホの極端な例であろう (図 7)。

来るべき 21 世紀モホールは、上記の初生的な海洋性モホを掘抜き、その構成と成因をその場観察をもとに解明する機会となることを期待したい。そのためには、従来から言われているような技術的革新はもちろん必要であるが、それが可能であるサイトを選定することが重要である。多くの人々の賛同が得られているとおり、高速拡大軸起源の海洋底を是非対象としたい。これにより、

「オフィオライトの起源」という古くて新しい地質学的難問にも解答を与えることが可能となるであろう。岩石学者としては、さらにモホ遷移帯を掘抜き、溶け残りマントルかんらん岩であるハルツバーガイトのその場採取を期待したい。願わくば新鮮なハルツバーガイトであって欲しい。新鮮な海洋底溶け残りかんらん岩が入手できれば、その微量元素特性が明らかになり、地球最大のマグマ活動である MORB の成因解明の新たな局面を迎えることができるに違いない。モホールのほかに、ヘス・ディーブ (東太平洋海嶺) (例えば、Dick and Natland, 1996; Arai and Matsukage, 1996)、アトランティス・バンク (南西インド洋

図 4 蛇紋岩化前線としての海洋底モホと蛇紋石鉱物。(a)ヘス・モデルによる海洋底地殻-マントルのモデル。矢印は水の循環を示す。モホは蛇紋石鉱物の安定領域の上限を示し、いわゆる蛇紋岩化前線である。生成されている蛇紋石の種類 (アンチゴライトかクリソタイル/リザーダイト) が重要である。(b) アンチゴライト蛇紋岩の顕微鏡写真 (直交ポーラー; スケールは 0.5 mm)。かんらん石 (鮮やかな干渉色) が残存する。長野県八方尾根。(c) クリソタイル/リザーダイト蛇紋岩 (直交ポーラー; スケールは 0.5 mm)。かんらん石 (鮮やかな干渉色) が残存する。千葉県嶺岡山地。

Fig. 4 The Moho as a serpentinization front beneath the ocean floor and serpentine mineral species problem. (a) Illustration of Hess model of the oceanic crust/mantle. Arrows indicate water circulation. (b) Photomicrograph of antigorite serpentinite with relic olivine (vivid interference colors) from Happo-One, Japan. Crossed-polarized light. Scale bar is 0.5 mm. (c) Photomicrograph of chrysotile/lizardite serpentinite with relic olivine (vivid interference color) from Mineoka, Japan. Crossed-polarized light. Scale bar is 0.5 mm.

図 5 オマーン・オフィオライトで観察される「gabbro-in-dunite」モホ。(a) 模式図。層状ガブロとダナイトの境界は漸移的であり、ダナイトから上方に向かい、ダナイト中のガブロ・バンドが密になり、層状ガブロに移行する。(b) ダナイトとガブロ・バンドの関係を示す模式図。ガブロしばしば変形し、縁辺部はやや細粒となっている。(c) 露頭写真。層状ガブロ (g) は下方に向かい、ダナイト (d) 中のバンドとなり、次第に疎になって行く。

Fig. 5 Gabbro-in-dunite Moho observed in the Oman ophiolite. (a) Illustration showing the relationship between gabbroic rocks and dunite. Gabbroic bands decrease downward in frequency within the Moho-transition zone dunite. (b) Illustration showing the intrusive nature of the gabbroic rock to the dunite, The gabbro is frequently deformed and has relatively fine-grained margins. (c) Photograph of an exposure of the gabbro-in-dunite Moho.

図 6 オマーン・オフィオライトで観察される「dunite-in-gabbro」モホ。(a) 模式図。後期貫入性のダナイト (またはウェールライト) が貫入し、ガブロとダナイトの関係が複雑となり、部分的に新たな「モホ」が形成される。(b) ダナイトとガブロの関係を示す模式図。接触部でガブロはややクリノパイロクシナイト的になる。(c) 露頭写真。層状ガブロに下方からダナイト (d) が貫入し、ガブロ層 (g) を挟ませ、キンクさせている。ダナイト中には捕獲されたガブロのブロックが存在する。

Fig. 6 Dunite-in-gabbro Moho observed in the Oman ophiolite. (a) Illustration showing the complicated relationship between gabbroic rocks and dunites. Intrusion of the new dunite made a new contact with gabbros. (b) Illustration showing the intrusive nature of dunite to the gabbro, of which the margins are sometimes clinopyroxene-rich. (c) Photograph of an exposure of the dunite-in-gabbro Moho, in which the late-intrusive dunite (d) was emplaced within the gabbro-in-dunite Moho and the layered gabbros (g). Note the gabbroic blocks within the dunite.

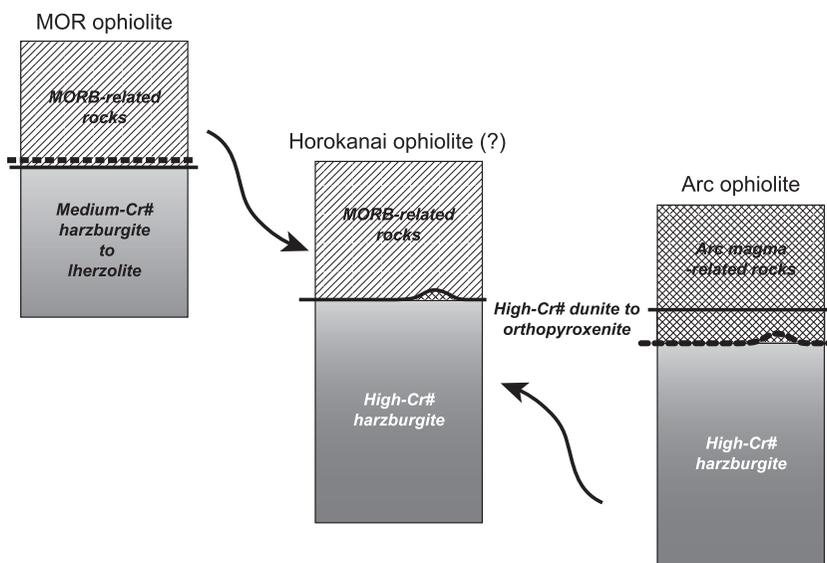


図 7 幌加内オフィオライトの形成モデル。地殻部は MORB およびそれ由来の岩石であり、中央海嶺 (MOR) 起源のオフィオライトまたはリソスフェアの地殻部に由来する。一方、マントル部は島弧的な性質を有し、島弧起源のオフィオライトまたはリソスフェアの最上部マントルに由来する。太い実線はモホを、太い波線はそれぞれの源オフィオライトの可能な切断面を示す。

Fig. 7 Illustration showing the formation of the Horokanai ophiolite, Hokkaido, Japan. The crustal and mantle members were derived from a mid-ocean ridge ophiolite (or lithosphere) and an arc ophiolite (or lithosphere), respectively. Thick solid and dotted lines indicate the Moho and the detachment plane for each source ophiolite (or lithosphere).

海嶺) (例えば, Dick *et al.*, 2000), アトランティス・マッシューフ (大西洋中央海嶺) (Ildefonse *et al.*, 2006) などのガプロ/かんらん岩の露出地域での超深度掘削は、多少特殊な海洋底ではあるものの、下部地殻~最上部マントル物質の組織的なサンプリングには極めて有効であり、待ち望まれるものである。

ただ、いかに超深度掘削が進もうと、海洋底上部マントルのより深部の物質の情報を得るためには、オフィオライトや捕獲岩の研究が必須である。オマーン (Lippard *et al.*, 1986; Takazawa *et al.*, 2003) やニューファンドランド (Malpas and Strong, 1975) のオフィオライトのマントル部ではハルツバーガイトの下にレールズライトが見いだされる。また、フィリピンのイサベラ・オフィオライト (Andal *et al.*, 2005) のマントル部はレールズライトが卓越するが、最下部には海

洋底でいままで見いだされたレールズライトよりもさらに枯渇度の低いレールズライトが存在する。これらは海洋マントルの深さ方向の不均質性を示すものである。さらに深部の上部マントルの情報は海洋地域に噴出したマグマ中のかんらん岩捕獲岩からもたらされる。多くのマグマはホットスポットを構成するものであり、捕獲岩の情報はホットスポットのマグマ活動で改変されたマントルのものであろう (例えば, Nixon, 1987)。最近カナリー諸島で蛇紋岩が脱水分解して生じたかんらん岩の捕獲岩が発見された (Abu El-Rus *et al.*, 2006)。これは、海洋リソスフェアの蛇紋岩の情報を与えるものとして興味深い。また、太平洋のプチ・スポットの玄武岩中のかんらん岩捕獲岩は、太平洋の上部マントル深部の情報を与えるものであり重要である (Hirano *et al.*, 2006)。これらの情報は、21 世紀モホールを補完するもの

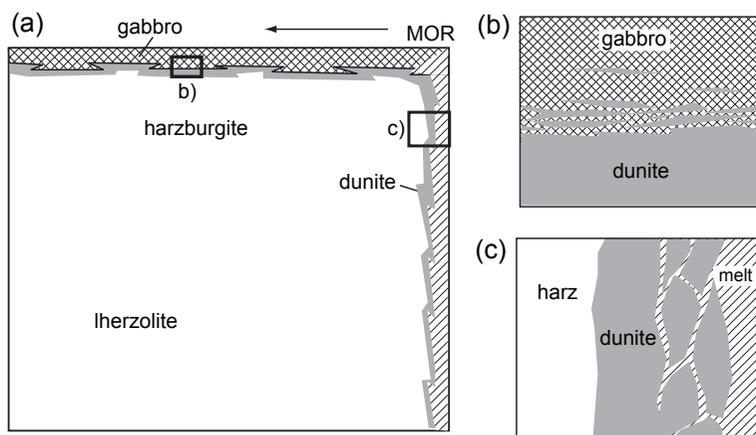


図 8 中央海嶺 (MOR; 特に, 高速拡大軸または低速拡大軸のセグメント中心部) における初生的なモホの生成モデル図. (a) 中央海嶺に直交する海洋リソスフェアの断面のモデル図. 矢印は拡大方向を示す. (b) 海洋底における初生的なモホのモデル図. オマーン・オフィオライトの「gabbro-in-dunite」モホと同等 (図 5). (c) 海嶺の下でのマンツルマグマ過程. ダナイトはメルトとハルツバーガイトの相互反応で形成される (Arai and Matsukage, 1996; Dick and Natland, 1996). また, ダナイトにはネットワーク状のメルトの通路が形成され, 冷却してガブロ・バンドとなる.

Fig. 8 Illustration showing the primary oceanic Moho and its formation at mid-ocean ridges (MOR; especially at fast-spreading ridges or segment centers of slow-spreading ridges). (a) Petrologic model of the oceanic lithosphere parallel to the plate motion (arrow). (b) Model of the primary oceanic Moho, equivalent to the gabbro-in-dunite Moho observed in the Oman ophiolite (Fig. 5). (c) Illustration showing the mantle magmatic processes beneath the ridge, in which dunite formed through an interaction between melt and mantle harzburgite (Arai and Matsukage, 1996; Dick and Natland, 1996). Network of melt conduit forms within the dunite to become gabbroic bands on cooling.

(スーパー・モホール) として考慮されなければならないであろう。

謝 辞

本稿は, 種々のモホールおよびミッション・モホに関係した集会で発表した内容をもとに書かれた。それらの機会に議論していただいた巽 好幸博士をはじめとする多くの方々に感謝する。石丸聡子博士には論文原稿の準備の過程でお世話になった。また, 石渡 明教授, 森下知晃博士, 田村明弘博士には日常から議論していただいている。笠原順三博士および匿名の査読者からは改訂にあたって有益なコメントをいただいた。この研究は, 学術創成研究費 (19GS0211) より支援された。

文 献

Abu El-Rus, M.A., Neumann, E.-R. and Peters, V.

(2006): Serpentinization and dehydration in the upper mantle beneath Fuerteventura (eastern Canary Islands): Evidence from mantle xenoliths. *Lithos*, **89**, 24-46.

Andal, E.S., Arai, S. and Yumul, G.P., Jr. (2005): The Isabela Ophiolite (Philippines): A complete mantle section of a slow spreading ridge-derived ophiolite. *Island Arc*, **14**, 272-294.

Aoki, K. (1987): Japanese Island arc: Xenoliths in alkali basalts, high-alumina basalts, and calc-alkaline andesites and dacites. in *Mantle Xenoliths* edited by Nixon, P.H., John Wiley & Sons, New York, 319-333.

Arai, S. (1986): K/Na variation in phlogopite and amphibole of upper mantle peridotites due to fractionation of the metasomatic fluids. *Journal of Geology*, **94**, 436-444.

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.

Arai, S. (2005): Role of dunite in genesis of primitive MORB. *Proceedings of the Japan Academy, Series B*, **81**, 14-19.

- 荒井章司・阿部なつ江 (2003): 海洋マンタルの岩石学的構造と海洋掘削. 地学雑誌, **112**, 692-704.
- 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. *Proceedings of the Ocean Drilling Program, Scientific Results*, **147**, 135-155.
- Arai, S., Hirai, H. and Uto, K. (2000): Mantle peridotite xenoliths from the Southwest Japan arc and a model for the sub-arc upper mantle structure and composition of the Western Pacific rim. *Journal of Mineralogical and Petrological Sciences*, **95**, 9-23.
- 荒井章司・平井寿敏・阿部なつ江 (2005): かんらん岩捕獲岩の地質学的側面—日本列島の例—. 岩石鉱物科学, **34**, 133-142.
- Arai, S., Kadoshima, K. and Morishita, T. (2006): Widespread arc-related melting in the mantle section of the northern Oman ophiolite as inferred from detrital chromian spinels. *Journal of Geological Society, London*, **163**, 869-879.
- Boudier, F. and Nicolas, A. (1995): Nature of the Moho transition zone in the Oman ophiolite. *Journal of Petrology*, **36**, 777-796.
- Cannat, M. (1993): Emplacement of mantle rocks in the sea floor at mid-ocean ridges. *Journal of Geophysical Research*, **98**, 4163-4172.
- Cannat, M. (1996): How thick is the magmatic crust at slow spreading ridges. *Journal of Geophysical Research*, **101**, 2847-2857.
- Christensen, N.I. and Salisbury, M.H. (1975): Structure and constitution of the lower oceanic crust. *Reviews of Geophysics and Space Physics*, **13**, 57-86.
- Clague, D.A. and Straley, P.F. (1977): Petrologic nature of the oceanic Moho. *Geology*, **5**, 133-136.
- Dick, H.J.B. and Natland, J.H. (1996): Late-stage melt evolution and transport in the shallow mantle beneath the east Pacific rise. *Proceedings of the Ocean Drilling Program, Scientific Results*, **147**, 135-155.
- Dick, H.J.B., Natland, J.H., Alt, J.C., Bach, W., Bideau, D., 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., Stepen, 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.
- Eaton, D.W. (2005): Multi-genetic origin of the continental Moho: Insights from Lithoprobe. *Terra Nova*, **18**, 34-43.
- George, R.P., Jr. (1978): Structural petrology of the Olympus ultramafic complex in the Troodos ophiolite, Cyprus. *Geological Society of America Bulletin*, **89**, 845-865.
- Green, D.H. and Ringwood, A.E. (1972): A comparison of recent experimental data on the gabbro-garnet granulite-eclogite transition. *Journal of Geology*, **80**, 277-288.
- Griffin, W.L. and O'Reilly, S.Y. (1987): Is the continental Moho the crust-mantle boundary? *Geology*, **15**, 241-244.
- Hess, H.H. (1962): History of ocean basins. in *Petrologic Studies: A Volume in Honor of A.E. Buddington* edited by Engel, A.E.J., James, H.L. and Leonard, B.F., Geological Society of America, Boulder, 599-620.
- Hirano, N., Takahashi, E., Yamamoto, J., Abe, N., Ingle, S.P., Kaneoka, I., Hirata, T., Kimura, J., Ishii, T., Ogawa, Y., Machida, S. and Suyehiro, K. (2006): Volcanism in response to plate flexure. *Science*, **313**, 1426-1428.
- Ildefonse, B., Blackman, D., John, B.E., Ohara, Y., Miller, D.J., MacLeod, C. and the IODP Expeditions 304-305 Scientists (2006): IODP Expeditions 304 & 305 characterize the lithology, structure, and alteration of an oceanic core complex. *Scientific Drilling*, **3**, 4-11.
- 石塚英男 (1980): 北海道, 神居古潭帯に分布する幌加内オフィオライトの地質. 地質学雑誌, **86**, 119-134.
- Ishizuka, H. (1981): Geochemistry of the Horokanai ophiolite in the Kamuikotan tectonic belt, Hokkaido, Japan. *Journal of Geological Society of Japan*, **87**, 17-34.
- Ishizuka, H. (1985): Prograde metamorphism of the Horokanai ophiolite in the Kamuikotan Zone, Hokkaido, Japan. *Journal of Petrology*, **26**, 391-417.
- Iwamori, H. (1991): Zonal structure of Cenozoic basalts related to mantle upwelling in southwest Japan. *Journal of Geophysical Research*, **96**, 6157-6170.
- Jarchow, C.M. and Thompson, G.A. (1989): The nature of the Mohorovičić discontinuity. *Annual Review of Earth and Planetary Sciences*, **17**, 475-506.
- Juteau, T., Buerrier, M., Dahl, R. and Nehlig, P. (1988): Segmentation at a fossil spreading axis: The plutonic sequence of the Wadi Haymikiyah area (Haylayn Block, Sumail Nappe, Oman). *Tectonophysics*, **151**, 167-197.
- Karson, J.A. and Elthon, D. (1987): Evidence for variations in magma production along oceanic spreading centers: A critical appraisal. *Geology*, **15**, 127-131.
- Kay, S.M. and Kay, R.W. (1986): Role of crystal cumulates and the oceanic crust in the formation of the lower crust of the Aleutian arc. *Geology*, **13**, 461-464.
- Kelemen, P.B., Koga, K. and Shimizu, N. (1997): Geochemistry of gabbro sills in the crust-mantle tran-

- sition zone of the Oman ophiolite: Implications for the origin of the oceanic lower crust. *Earth and Planetary Science Letters*, **146**, 475-488.
- Koga, K.T., Kelemen, P.B. and Shimizu, N. (2001): Petrogenesis of the crust-mantle transition zone and the origin of lower crustal wehrlite in the Oman ophiolite. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, **2**, doi: 2000GC000132.
- Kuno, H. (1969): Mafic and ultramafic inclusions in basaltic rocks and the nature of the upper mantle. in *The Earth's Crust and Upper Mantle* edited by Hart, P.J., *Geophysical Monograph*, **13**, American Geophysical Union, Washington, D.C., 507-513.
- Lin, J. and Phipps Morgan, J. (1992): The spreading rate dependence of three-dimensional mid-ocean ridge gravity structure. *Geophysical Research Letters*, **19**, 13-16.
- Lippard, S.J., Shelton, A.W. and Gass, I.G. eds. (1986): *The Ophiolite of Northern Oman*. *Geological Society Memoir*, **11**, Blackwell Scientific Publications.
- Lovering, J.F. (1958): The nature of the Mohorovičić discontinuity. *Transactions of American Geophysical Union*, **39**, 945-955.
- Malpas, J. and Strong, D.F. (1975): A comparison of chrome-spinels in ophiolites and mantle diapirs of Newfoundland. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, **39**, 1045-1060.
- 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.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.
- Meissner, R. and Mooney, W. (1998): Weakness of the continental lower crust: A condition for delamination, uplift and escape. *Tectonophysics*, **296**, 47-60.
- Minshull, T.A., Muller, M.R., Robinson, C.J., White, R.S. and Bickle, M.J. (1998): Is the oceanic Moho a serpentinization front? in *Modern Ocean Floor Processes and the Geological Record* edited by Mills, R.A. and Harrison, K., *Geological Society, London, Special Publication*, **148**, 71-80.
- Miyashita, S., Adachi, Y. and Umino, S. (2003): Geology and petrology of the plutonic complexes in the Wadi Fihz area: Multiple magmatic events and segment structure in the northern Oman ophiolite. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, **4**. doi: 10.1029/2001GC000272.
- 宮下純夫・荒井章司・鳥海光弘編 (2003): 海洋岩石学の新しい局面. *地学雑誌*, **112**, 647-810.
- 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 and Planetary Science Letters*, **148**, 93-107.
- Nicolas, A. (1989): *Structures of Ophiolites and Dynamics of Oceanic Lithosphere*. Kluwer Academic Publishers.
- Nixon, P.H. (1987): *Mantle Xenoliths*. John Wiley & Sons.
- 小澤一仁 (2008): 海洋モホ面形成におけるダナイトの役割. *地学雑誌*, **117**, 146-167.
- Pearce, J.A. (1975): Basalt geochemistry used to investigate past tectonic environments on Cyprus. *Tectonophysics*, **25**, 41-67.
- Steinhart, J.S. (1967): Mohorovičić discontinuity. in *International Dictionary of Geophysics* edited by Runcorn, S.K., **2**, Pergamon, Oxford, 991-994.
- Takahashi, E. (1978): Petrological model of the crust and upper mantle of the Japanese Island Arcs. *Bulletin Volcanologique*, **41**, 529-547.
- Takahashi, E. (1986): Genesis of calc-alkali andesite magma in a hydrous mantle-crust boundary: Petrology of lherzolite xenoliths from the Ichinomegata crater, Oga Peninsula, Northeast Japan, Part II. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, **29**, 355-395.
- Takazawa, E., Okayasu, T. and Satoh, K. (2003): Geochemistry and origin of the basal lherzolites from the northern Oman ophiolite (northern Fihz block). *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, **4**, 1021, doi: 10.1029/2001GC000232.
- Takemoto, Y. (2007MS): *Significance of Peridotite/Melt Reaction in Genesis of the "Late Intrusive Rocks" in the Oman Ophiolite*. Master Thesis, Kanazawa University.
- 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 (2003): 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*, **112**, 750-768.

(2007年6月4日受付, 2007年11月6日受理)