インドネシア非火山性外弧のオフィオライト

— 世界最若オフィオライトの産状と岩石学的多様性 —

石 川 晃* 金 子 慶 之**
太 田 努*** 磯 崎 行 雄*

Ophiolites in the Non-volcanic Banda Outer Arc of East Indonesia: Field Occurrence and Petrological Variety of the World's Youngest Ophiolite

Akira ISHIKAWA*, Yoshiyuki KANEKO**,
Tsutomu OTA*** and Yukio ISOZAKI*

Abstract

The western Pacific region, where the Eurasia, Australia, and Pacific plates currently interact, has been recognized as an important site for constraining the origins and emplacement of ophiolites (particularly for island-arc or supra-subduction zone types), because the spatial distribution of oceanic micro-plates and numerous ophiolitic rocks along their convergent margins infers possible genetic linkages among them. Mafic-ultramafic rocks distributed in the Timor-Tanimbar island chain, eastern Indonesia may be a good example of the on-going emplacement of the marginal basin lithosphere on the continental margin in the arc-continent collision zone, and are recognized as a possible modern analogue for Mesozoic Tethyan-type ophiolites (*e.g.* Troodos and Oman) in the Alpine-Himalayan orogenic system. Geological occurrence suggests that the buoyant subduction of the Australian continent uplifted fragments of newly formed mantle-crust section, which extends to neighboring pre-emplaced forearc marginal basins. However, from petrological and geochemical points of view, young pillowed basalt, dolerite, and gabbroic cumulate commonly possess island-arc signatures, whereas structurally underlying peridotites are mostly fertile (lherzolitic) in composition. This suggests that the crustal section is not linked to the underlying mantle by a genetic melt-and-residua relationship, as inferred from the lack of complete succession and the presence of abundant crosscutting structures. This inconsistency leads to the emergence of two contrasting models accounting for the unusual occurrence of a fertile mantle in the forearc setting of the Timor-Tanimbar region: (1) thrust-stacked fragments of the subcontinental mantle originally exhumed in the rifting stage of Australia; (2) depth-related heterogeneities in the lithospheric part of the mantle wedge. We note that the current debates on the origins of fertile lherzolites found throughout the Tethyan sutures and western Pacific regions can be settled through a better understanding of Timor-Tanimbar peridotite masses by age-dating studies employing several radiogenic isotope systematics.

Key words : western Pacific region, ophiolite, peridotite, mantle melting degree, forearc

キーワード : 西太平洋地域, オフィオライト, かんらん岩, マントルの部分融解程度, 前弧

* 東京大学大学院総合文化研究科広域システム科学系宇宙地球科学教室

** 明星大学教育学部教育学科

*** 岡山大学地球物質科学研究センター

* Department of Earth Science and Astronomy, The University of Tokyo, Tokyo, 153-8902, Japan

** Department of Education, Meisei University, Tokyo, 191-8506, Japan

*** Institute for Study of the Earth's Interior, Okayama University, Misasa, Tottori, 682-0193, Japan

I. はじめに

プレートテクトニクスが地質学に導入され、プレート収束境界のダイナミクスが議論されはじめた1970年代初頭に、世界中で“オフィオライト”研究の大ブームがおきた。当時、ニューヨーク州立大学にいた英国人地質学者 J.F. Dewey はその最前線にいて、「陸上の造山帯に露出するオフィオライトの存在は、かつてのプレート沈み込み境界すなわち海溝の位置を示す指標岩体となる」という明快な提言を行った (Dewey and Bird, 1970)。1960年代末にプレートテクトニクスが構築された直後は、多くの地質学者がその新しいパラダイムの受け入れに躊躇したが、具体的に野外で観察できる地質体と海洋底との関係を明確に示したこの提言は、速やかに多くの地質学者に受け入れられ、地質学の大変革をもたらすきっかけとなった。欧米でおきたことと同じような動きは、やや遅れて日本でもおきた。例えば、日本列島には蛇紋岩分布域が数列存在するが、堀越 (1972) はそれらがオフィオライト帯として捉えられるということに気づき、素朴ながらもプレート造山論の視点から日本列島形成史の説明を試みた。堀越 (1972) の説明は、陸上に露出する時代の異なる複数のオフィオライト帯を過去の海洋が消費された沈み込み帯と同義とみなし、それぞれの蛇紋岩分布域に対して、例えば舞鶴海溝あるいは黒瀬川海溝という名称をつけた上で、日本列島にはそのような過去のプレート沈み込み境界が複数あったと述べたにすぎなかったが、それまで地向斜概念しか知らなかった日本人地質学者コミュニティに対して、オフィオライトという岩石 (群) の重要性をアピールするには十分であった。このような現象は日本だけに限らず、世界の主要な造山帯についての研究で普遍的にみられた現象で、世界的な研究ブームとなったゆえんである。

その中で顕在化した問題は、オフィオライトの定義の不確かさであった。もともと G. Steinmann がアルプスにおいて超苦鉄質岩 (蛇紋岩)、変玄武岩 (spilite-diabase)、およびチャートという三種の岩石が、しばしば密接に伴って出現すること

を指摘し、その地質学的意義を強調して以降、この三位一体の岩石群 (Steinmann's trinity) に対してオフィオライト (ophiolite) という用語が使用されてきた (Steinmann, 2003)。プレートテクトニクスの枠組みが構築された頃までには、世界中の海洋調査によって典型的な海洋地殻と直下のマントル岩石の全容が明らかになりつつあり、ペンローズ会議において「典型的なオフィオライトは、(1) 表層を覆う遠洋深海堆積物 (チャート)、(2) 枕状溶岩層、(3) 層状岩脈群、(4) 斑れい岩を主体とする沈積岩層、(5) 明瞭な変形組織をもつかんらん岩、が順に積み重なるサクセションをもつ地質体から構成される」とする合意がもたれ (Anonymous, 1972)、オフィオライト = 海洋地殻 + マントルというイメージが広く浸透していったようになった。しかし、現在の岩石学の知識に基づき再整理すると、これまでにオフィオライトとして記載された岩石群は実に多様で、それゆえ改めてより厳密な定義が必要になっている。

オフィオライトの区分において、随伴する他の地質体の特徴が重要である。典型的とされてきたオフィオライトの多くは、欧州西部のアルプスから東部のバルカン半島、中東のザグロス山脈やオマーンを通り、さらに南アジアのヒマラヤにいたる中-新生代の大陸-大陸衝突帯に沿って分布する (図 1)。これらの地帯は、かつて古生代末から中生代はじめに超大陸パンゲアの東側 (ローラシア-ゴンドワナ間) のテーチス海域が存在した領域にあたる。その後、異質な化石群集をもつ南側のゴンドワナの断片が、北側のローラシア側へ衝突してテーチス海は閉じたが、その失われた海域の名残がこれら一連のオフィオライトであると説明されてきた。これらのオフィオライトは、常に大陸起源碎屑物からなる褶曲帯にとりこまれており、環太平洋の付加型造山帯 (磯崎・丸山, 1991) にとりこまれたオフィオライトと明瞭に識別できる。そのため、随伴する地層の種類に基づいて、オフィオライトはそれぞれ“テーチス型”と“コルディレラ (太平洋) 型”に大きく二分されることが多い (例えば, Moores, 1982)。

テーチス型オフィオライトの分布域は、ヒマラ

図 1 世界のプレート配置図。灰色の帯はアフリカ、アラビア、インドがユーラシアに衝突してできたアルプス・ヒマラヤ造山帯、三角で囲まれた領域は西太平洋地域を示す。

Fig. 1 Distribution of plates and their geometry on the Earth. Shaded band indicates the Alpine-Himalayan orogenic belt, which marks the collision sutures of Africa, Arabia, and Indo against Eurasia continents. Open triangle encompasses the western Pacific region.

ヤからさらに東方に追え、スマトラから西太平洋地域を通りパプアニューギニアにまでいたる。しかし、ここで注目すべきことは、ヒマラヤより東方では、ユーラシア（ローラシア）・オーストラリア（ゴンドワナの一部）間にまだ海域が存在しており、アルプスから連続する大陸衝突帯は、この地域ではまだ形成されていないという事実である。インド・オーストラリアプレートは、現在でもユーラシア大陸プレートの下に沈み込み続けており、今後も北上を続けるオーストラリア大陸はおそらく約 5000 万年後に日本へ衝突して、ヒマラヤ-アルプス造山帯の東方延長部を形成すると予想される（磯崎・丸山, 1991）。従来は、このような衝突時点で大陸間に存在した海洋地殻岩が構造的に挟み込まれ、オフィオライトとして造山帯中へ定置されると説明されたが、この説明は明らかな困難を伴う。なぜなら、現在の西太平洋地域の島々には、すでに数多くの海洋地殻やかんらん岩などのオフィオライト様岩が地表に露出しており、単純に大陸-大陸間衝突がおきる時に限ってオフィオライトが陸上に露出するわけではないことが明白だからである。

以上のことから、現在の西太平洋に点在するオ

フィオライトは、オフィオライトの起源や造山帯への一般的搬入機構を解明する上できわめて重要な意味をもっている。そこで本稿では、西太平洋地域のオフィオライト岩体についての知識を簡単にまとめ、(1) 大陸間衝突以前のオフィオライトの衝上、および(2) 低枯渇度かんらん岩の形成場、の二点について、東インドネシア、チモール・タニンバー諸島に産する最も若いオフィオライト搬入場の調査・研究から得られた知見を紹介する。

II. 西太平洋三角地域

現在の西太平洋海域は、主要三大プレートであるユーラシア、インド-オーストラリア、および太平洋プレートの三重会合域に相当し、3つのプレート相互の相対運動を反映して、無数の小海洋プレートが存在することで特徴づけられる（図2）。これらの小海洋プレートのほとんどは新生代に入ってから短期間に形成されたもので、誕生後まもなく拡大を停止した小海盆をなす。現在はいずれも周縁に沈み込み境界を伴う収束段階にある。これらの収束境界では通常の大洋の沈み込み帯と同様に火山弧が発達し、広域変成帯の上昇を伴う造山運動も活発におきている。さらに注目す

図 2 西太平洋地域の縁海マイクロプレート（灰色の領域）の配置と代表的なオフィオライト（黒星）の分布（Komiya and Maruyama, 2007 より改変）。縁海の略号：BA—バンダ海盆，CA—キャロライン海盆，CE—セレベス海盆，CO—珊瑚海，J—日本海盆，K—クリル海盆，LO—ロイヤルティ海盆，M—マリアナトラフ，MK—マカッサル海盆，MN—マヌス海盆，MO—モロッカ海盆，OK—沖縄トラフ，PV—パレスベラ海盆，SH—四国海盆，SC—南中国海盆，SO—ソロモン海盆，SU—スル海盆，W—ウッドラーク海盆，WP—西フィリピン海盆

Fig. 2 Distribution of micro-plates forming marginal basins (gray field) and representative ophiolites (black stars) in the western Pacific region (modified after Komiya and Maruyama, 2007). Abbreviations for marginal basins: BA—Banda, CA—Caroline, CE—Celebes, CO—Coral, J—Japan, K—Kuril, LO—Loyalty, M—Mariana, MK—Makassar, MN—Manus, MO—Molucca, OK—Okinawa, PV—Palace Vela, SH—Shikoku, SC—South China, SO—Solomon, SU—Sulu, W—Woodlark, WP—West Philippine.

べきことは、いたる地域でオフィオライト岩体が造山帯のなかへ搬入されていることである。このような西太平洋に点在するオフィオライトの形成場としては、もともと背弧海盆などの小海盆を構成していた海洋地殻あるいは未成熟島弧地殻および、その直下マントルが想定されることが多く、最近では一括して島弧型あるいは沈み込み帯直上 (supra-subduction-zone; SSZ) 型としてとり扱わ

れる場合が多い（例えば、Bodinier and Godard, 2003）。しかし、世界中で認められるオフィオライト同様に、西太平洋地域に産するオフィオライトの地質学、岩石学および地球化学的性質はきわめて多様で、それらの形成場や造山帯への搬入機構、あるいは改変機構も一樣でない可能性が高い。

西太平洋地域の陸上に産するオフィオライトは、フィリピン海-カロラインプレートの収束域に

沿って産するグループ (Taiwan, Isabela, Zambales, Pujada, Halmahera, Cyclops など) と、それらよりも内陸側に産するグループ (Palawan, Sabah, Bobaris, Meratas, Sulawesi, Timor, Seram, Central, April, Marum, Papuan など) とに大別される。後者は大陸縁にとりこまれたテーチス型に分類される。ただしどちらのグループも中生代から新生代に及ぶ形成年代をもち、形成場と造山帯への搬入場に関しては明瞭な相関がないようにみえる。アジア大陸縁にとりこまれている Meratas, Bobaris, オーストラリア大陸縁にとりこまれているニューギニア島中軸部のオフィオライト帯 (西から Central, April, Marum, Papuan), およびフィリピン東沿岸からハルマヘラ島にかけて南北配列するオフィオライト帯 (北から Isabela, Pujada, Halmahera) はいずれも中生代に形成されたことが知られている。その年代から判断して、これらが現存する近傍の縁海プレートが露出したものとは考えられず、より古い古太平洋およびインド洋 (テーチス海) の海洋底一部をなしていた可能性があり、西太平洋地域の古地理を復元する上で重要な鍵を握っている (例えば, Hall, 2002)。しかしながら、これらのなかでもニューギニアに産するセントラルオフィオライトやパプアオフィオライトなどは通常の大洋底や背弧海盆の構成岩とは似ておらず (1) マントル部が著しく枯渇したハルツバージャイトから構成される, (2) 主要地殻部分にてボニナイト的なマグマ活動が卓越する, 二点において伊豆-小笠原-マリアナ弧の前弧域で得られる岩石群ときわめて類似した化学的特徴をもつ (例えば, England and Davies, 1973; Bloomer and Hawkins, 1983; Ishiwatari, 1985a)。以上の特徴は、含水条件下で著しく高い部分融解度が達成された、あるいは枯渇したマントルが再熔融したために生じた島弧前弧域に特徴的な火成作用と位置づけられる。このような理解の結果, “前弧オフィオライト” という概念が研究者の間で定着するにいたった。

今から 40 年近く前に Miyashiro (1973) がキプロス島のトルドスを例に島弧型オフィオライト説を提唱し、その後の国際的反対運動を巻き起

す契機となったが、トルドス岩体のほかにも世界最大の露出面積を誇るオマーンのサマイルなどのテーチス区に産する代表的オフィオライトも、ボニナイト的なマグマ活動をはじめとし、沈み込みの影響を普遍的に残していることは、いまや世界の共通認識となっている。現時点では、これらの事実が、ほとんどのオフィオライトが前弧域という特殊な場で形成されたことを示しているのか、あるいは基本的に海嶺起源の古海洋リソスフェアが造山帯への搬入時に沈み込みの影響を被ったのかが議論の焦点になっている (例えば, Dilek and Furnes, 2009; Pearce and Robinson, 2010)。

III. チモール・タニンバー諸島の オフィオライト

前述のニューギニア島は、北側に向かって沈み込み続けたオーストラリア大陸と海洋性島弧との間に発達した衝突帯を形成している。中軸部に産するオフィオライトは、見かけ下位に産する大陸棚堆積物とその変成部からなる褶曲帯と、見かけ上位の島弧地殻とにサンドイッチされた産状を示している (図 3, 図 4a-a')。ニューギニア島では、大陸-島弧衝突に伴う一連の地質学的イベント (藍閃石片岩を伴う広域変成帯の上昇, オフィオライトの搬入, 高角な正断層を伴う隆起, 島弧火成活動の停止, 沈み込み境界の転移など) は中新世におおむね完了しており (Richards *et al.*, 2007), 現在ではキャロライン海洋プレートとの間の大規模な横ずれ変位に伴われた構造・変形運動が卓越している。一方、大陸-島弧衝突帯の西縁とみなされるバンダ海周辺域は、上記の衝突に伴う現在進行中の造山運動を直接観察できる希有な地域であり、造山帯に搬入されつつあるテーチス型オフィオライトのモダンアナログにあたる (Harris, 1992)。

北上を続けるオーストラリア大陸が南バンダ海に対して沈み込んでいるバンダ海周辺域は、(1) 活動的な火山性島弧であるスダ・バンダ弧と (2) 前弧域に発達した非火山性外弧を形成するチモール・タニンバー諸島およびセラム島、ブル島が、さらに外側をとりまく海溝の形に沿って南バ

図 3 東インドネシア・バンダ海周辺の地帯構造概略図 (Honthaas *et al.*, 1998; Ishikawa *et al.*, 2007 より改変). オフィオライト様岩体が分布する (黒星) チモール・タニンバー諸島およびセラム島は、火山弧の前弧側に位置する非火山性外弧を形成している。破線は図 4 断面図の位置を示す。

Fig. 3 Tectonic map of eastern Indonesia around the Banda Sea (modified after Honthaas *et al.*, 1998; Ishikawa *et al.*, 2007). Ophiolitic rocks occur in the Timor-Tanimbar island chain and Seram island forming a non-volcanic outer arc in front of the inner volcanic arc. Dashed lines indicate the locations of cross-sections in Fig. 4.

ンダ海をとりまくように馬蹄形 (U 字状) に折れ曲がり、二列の弧状列島を形成している (図 3)。南側の前弧域にあたるチモール・タニンバー諸島の大部分は、第四紀以降の礁性石灰岩や現地性の堆積物で覆われているが、その基盤は、大局的に構造的な下位から順に (1) 非・弱変成のオーストラリア大陸縁被覆岩類からなる褶曲・衝上断層帯、(2) 高圧型変成帯、(3) オフィオライト岩体が累重する (Sopaheluwan, 1990; Kaneko *et al.*, 2007; Kadarusman *et al.*, 2010)。かんらん岩体や枕状玄武岩層が北部海岸線沿いに広く露出するチモール島は、北側に隣接する火山弧との距離が非常に狭いことから推察されるように衝突プロセスが最も進行した地域である。そこでは、ウェーセグメント (スンダ弧とバンダ弧の間) にお

ける島弧火成活動の終焉 (約 3 Ma: Abbot and Chamalaun, 1981; Elburg *et al.*, 2005), 急激なドーム状隆起と高角正断層の発達 (約 2 Ma 以降: De Smet *et al.*, 1990; Kaneko *et al.*, 2007), そして海溝から背弧域への収束境界転移 (Charlton, 1997) が段階を経てすでに完了した (図 4b-b')。また、大規模な隆起が認められないチモール以東の島々においても、チモール島同様の累重関係が低角度のパイルナップ構造として認められる。これらのことから、オフィオライトの搬入に関しては、収束境界転移は重要でないことが示唆される (図 4c-c')。一方、最東に位置するタニンバー島においては褶曲・衝上断層帯にオフィオライトがまだ搬入されていない可能性が高い。また、そのことと対応するように、水深が 7 km に及ぶ異

図 4 オーストラリア大陸北縁に順次発達した海洋性島弧-大陸衝突帯であるニューギニア島西部 (a-a') およびチモール・タニンバー諸島 (その他) の模式的な地質断面図 (Harris, 2003; Ishikawa *et al.*, 2007 より改変).

Fig. 4 Schematic cross-sections of the western New Guinea (a-a') and Timor-Tanimbar regions (others) showing different stages of arc-continent collisional settings developed along the northern margin of Australia (modified after Harris, 2003; Ishikawa *et al.*, 2007).

常に深い前弧海盆 (Weber deep) が活動的火山フロントをなすバンダ弧との間に存在することから、前弧域はむしろ伸張場にあると考えられる (図 4d-d'). このような東西にわたって認められる対照的な地質構造は、非火山性外弧に分布するオフィオライトが、オーストラリア大陸縁に成長した中生代海洋プレートが海溝域に付加したものではなく、沈み込み帯深部に搬入された大陸地塊がその浮力によりもち上げた前弧域地殻およびウェッジマントル部分を構成していたことを暗示している。実際、西チモールに分布する Ocussi ユニットの枕状溶岩層は Ar-Ar 法によって 3-5 Ma の噴出年代が与えられており (Harris, 1992), 地磁気縞から推定される南バンダ海の拡大時期 (3.5-5.5 Ma: Honthaas *et al.*, 1998; Hinschberger *et al.*, 2001) と非常によい一致を示している。

この例をもとにして、大陸衝突型造山帯へのオフィオライトの定置を一般化するならば、オフィオライトが搬入されるタイミングは大陸衝突に関

わる一連のプロセスの比較的早い段階にあると考えられる。すなわち、従来想定されたように、衝突最終段階における収束境界転移に伴ってオフィオライト岩体が能動的に衝上 (オブダクション) するというような現象は実際には起こらないといえそうである (例えば、丸山ほか, 1989)。またこのことは、オフィオライト定置において重要な点は浮揚性物質の沈み込みにあり、テーチス型 (大陸衝突型) とコルディレラ型 (太平洋型) の間に本質的な相違がないことを意味しているのかもしれない (例えば, Ishiwatari *et al.*, 2006; 石渡, 2010)。

IV. 前弧オフィオライトの多様性?

チモール・タニンバー諸島に点在するオフィオライト様岩には、いわゆる“ペンローズ型”と呼ばれる典型的なオフィオライト火成層序 (Anonymous, 1972) が認められない。西チモール北沿ではかんらん岩体 (Atapupu ユニット) の上位に枕状溶岩-ドレイイト層 (Ocussi ユニット) が累

重する、あるいはそれらが交互層をなす関係が一部地域において観察されるが、その境界部は露出していないため両者の関係は必ずしも自明ではない。おそらく、隆起に伴う高角な正断層によりオフィオライトの初生的構造が破壊されているためだと解釈される。同様に Weber Deep の西端部分に位置する Dai 島では沈積ユニットに対応する斑れい岩地殻部分のみが海上に露出しており、上位に存在していたであろう噴出岩類を欠いている。ただし、これらオフィオライトの地殻部分に対応するユニットは共通して島弧的な特徴を有している。地球化学的には火山フロント（スンダ・バンダ弧）に噴出する島弧ソレイト質玄武岩と中央海嶺玄武岩と中間的な組成をもつ点で、背弧拡大の特に拡大初期-中期に形成された玄武岩に類似している。このことは、地質学的に推定されるように年代の若い前弧域地殻が露出した岩体とみなすと理解しやすい。

一方、上記の Atapupu ユニットをはじめとして、さまざまな地域に出現する融け残りマントル部分は、高い Al 含有量（斜方輝石中の $\text{Al}_2\text{O}_3 < 8.8 \text{ wt\%}$; スピネルの $\text{Cr\#} = 0.1 \sim 0.3$ ）をもつスピネルレゾライトを主体としており、部分熔融程度が著しく小さい傾向を示す。この特徴は、伊豆-小笠原-マリアナ前弧域や東延長にあたるニューギニア島のかんらん岩とは決定的に異なっており、従前から考えられていた“著しく枯渇したかんらん岩からなるウェッジマントル”という解釈はまったくそぐわない。以下に、その意味について考察する。

これまで現世の海洋域に産するかんらん岩の研究から、かんらん岩の枯渇程度には明瞭な地域性が認められることはよく知られている（例えば、Bonatti and Michael, 1989）。とりわけ中央海嶺断裂帯で採取される深海底かんらん岩に関しては、海洋底の拡大速度と枯渇度の間に正相関がある（例えば、Niu and Hekinian, 1997）。枯渇度が低いかんらん岩は拡大速度がきわめて遅い大陸分離初期のリフト帯（紅海）や受動的大陸縁（イベリア）に認められるため、チモール・タニンバー諸島に産する低枯渇度マントルは、オーストラリ

ア大陸分裂の際に地表に露出した“大陸下マントル”が大陸縁堆積物や火山岩とともに沈み込み帯にトラップされたものと解釈されている（Harris and Long, 2000; Harris, 2003）。Harris and Long (2000) は、(1) かんらん岩に伴う泥質変岩や角閃岩から一部古い K-Ar, Ar-Ar 冷却年代（35 Ma, 70 Ma）が報告されており（Berry and McDougall, 1986; Sopaheluwakan, 1990）、かんらん岩の固体貫入時期（変成再結晶の開始）が大陸縁の沈み込み開始時（5-8 Ma）よりも古い可能性があること、(2) 地殻-マントル間における成因関係が野外においても岩石学的にも明瞭に認められないこと、などを強調している。一方、Falloon *et al.* (2006) は東チモール北沿に産する蛇紋岩化を免れたかんらん岩体（Hili Manu ユニット）の全岩化学分析（主要・微量元素濃度、Sr-Nd 同位体比）に基づき、沈み込むスラブの影響が認められることを主張し、オーストラリア大陸由来説を否定している。また、Ishikawa *et al.* (2007) は、(1) Atapupu, Hili Manu 両ユニットの低枯渇度かんらん岩体に、非常に枯渇したダナイト（スピネルの $\text{Cr\#} > 0.6$ ）が一部含まれること、(2) チモール島の東側に位置する Moa 島では、かんらん岩体が高 Mg 安山岩質マグマに貫入されていることから、チモール・タニンバー諸島に産するかんらん岩は前弧域リソスフェアに由来するとし、深さ方向に対応する組成の多様性があると解釈した。実際、これらの低枯渇度かんらん岩は、斜長石安定領域での再結晶を被っていない点で、紅海やイベリア沖に産するかんらん岩とは異なる上昇履歴をたどった可能性がある。ただし、上記の議論はいずれも決定的ではないため、かんらん岩体が沈み込み帯の上盤/下盤どちらに由来するのかは未解決といわざるを得ず、今後も検討が必要である。

低枯渇度かんらん岩の起源に関しては、テーチス区に出現するオフィオライトや西太平洋地域に分布するオフィオライトにおいても共通した問題となっている。シュタインマンがオフィオライトに関する三位一体を記載して以来、伝統的にさまざまな検討が重ねられてきた欧州アルプス産オ

フィオライトは、中央海嶺的な化学組成をもつ地殻部分からジュラ紀に形成した証拠が数多く得られるのに対し、かんらん岩からはペルム紀もしくは原生代の Nd モデル年代しか得られていない (Rampone and Piccardo, 2000)。この年代不一致に加え、上述の典型的なオフィオライト火成層序が認められない点から判断して、これらのオフィオライトの地殻とマントルには成因的關係はなく、大陸リフティング時に露出した古い大陸直下由来マントルが、ジュラ紀の火成活動により貫入・被覆されてできた、海洋底拡大の初期段階を示す地質体とみなす二段階形成モデルが有力視されている (Ishiwatari, 1985b; Manatschal and Müntener, 2009; Müntener *et al.*, 2010)。一方で形成場に関しては、その起源として海洋底の低速拡大軸や沈み込み帯前弧域を主張する研究者も少なくない。さらに近年では、低枯渇度かんらん岩の成因として“再肥沃化”が欧州アルプスにおいても普遍的である可能性が指摘されており (Tostalp: van Acken *et al.*, 2008)、解釈は混沌としている。西太平洋地域に産するオフィオライトに関しても、地殻部分は島弧的な地球化学的特徴が多小なりとも認められるのに対し、随伴するかんらん岩の枯渇程度はさまざまであり、チモール・タニンバー諸島と同程度に肥沃な岩体は決して珍しくない (Meratus: Monnier *et al.*, 1999; Sulawesi: Kadarusman *et al.*, 2004; Isabera: Andal *et al.*, 2005)。また、チモール・タニンバー諸島と構造的にほぼ同レベルに出現するセラム島あるいはニューギニア島の中軸部に関しても、低枯渇度＝オーストラリア大陸縁、高枯渇度＝前弧域と単純に解釈する傾向にある (Harris, 2003; Pubellier *et al.*, 2004)。

V. 今後の研究展望

チモール・タニンバー諸島に産するオフィオライト様岩類、とくにかんらん岩の起源に関して上述のような相反する二つの形成モデルがあり、これら二つのモデルの可否は、沈み込み境界のどちら側にその起源を求めるのかという点に集約される。今後の具体的な研究手段として、Nd, Hf あ

るいは Os といった放射性同位体元素を利用した岩体の上昇・融解年代の検討が期待される。もし、かんらん岩体が上盤側の非常に若いプレート (3–5 Ma) に由来するならば、構成鉱物あるいは全岩に記録されている各種同位体比は、親/娘核種の比によらずほぼ均一であると推定される。一方、オーストラリア大陸縁のリフティング (中生代以前) に関連した融解もしくは上昇に由来したかんらん岩が露出しているのであれば、その年代を反映した同位体多様性 (複数の鉱物もしくは全岩アイソクロン) をもつはずである。顕生代のかんらん岩から融解年代を求めた研究例はあまり一般的ではないが、低枯渇度かんらん岩は少量の融解程度の違いに応じて液相濃集性の高い元素の濃度差が大きくなる傾向から、岩石学的に類似する試料群でも Sm/Nd 比や Lu/Hf 比が大きく異なっている場合が多く、原理的にも技術的にもアイソクロンが描ける可能性は十分高い。このような特徴を用いて Ishikawa *et al.* (2005) では、ソロモン諸島に産するかんらん岩捕獲岩から融解年代を求め、ジュラ紀太平洋リソスフェアに起源をもつかんらん岩が存在することを明らかにした (図5)。

ただし、かんらん岩の融解年代を求める上で避けられない問題として、起源マントルの不均質性が年代精度を規定してしまう点があげられる。マントル融解プロセスにおいて、マグマ成分が系からとり去られる側にあたる岩体全域が、同位体的に均質化することは必ずしも期待されず、もとのマントルが保持していた同位体比多様性はそのまま現在値に反映されてしまう可能性が高い。例えば、ごく最近に融解プロセスを経験し、海洋プレートの一部となったばかりの深海底かんらん岩でさえ、同位体的不均質性をもつことはまれではなく、成因的に関連する近傍の中央海嶺玄武岩と比べて、より枯渇した高い Nd 同位体比を示す試料が多い (例えば, Salters and Dick, 2002; Warren *et al.*, 2009)。さらに、深海底かんらん岩に関するデータの蓄積が飛躍的に進んだ Os 同位体比からは、海洋域マントルにおいても過去の融解イベント (少なく見積もっても 10 億年前に相当) を反映した不均質性が明示されている (例えば,

図5 ソロモン諸島(マライタ島捕獲岩: 白丸)およびチモール島(Hili Manu 岩体: 黒丸)に産するスピネルレルゾライトの $^{147}\text{Sm}/^{144}\text{Nd}$ - $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$ ダイアグラム(データはそれぞれ Ishikawa *et al.*, 2005; Falloon *et al.*, 2006 より抜粋).

Fig. 5 $^{147}\text{Sm}/^{144}\text{Nd}$ vs. $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$ diagram of spinel lherzolites from Solomon Islands (Malaita xenoliths: open circles) and Timor (Hili Manu massif: filled circles). Data sources are from Ishikawa *et al.*, 2005 and Falloon *et al.*, 2006, respectively.

Pearson *et al.*, 2007; Rudnick and Walker, 2009)。すなわち、これまで対流による攪拌効果を反映し均質化が進行していると漠然と信じられてきたマンタルのイメージは崩れつつある一方で、不均質性の成因を過去のイベントや地域性との対応に求めることが可能となりつつあるのが現状といえる。

このような視点から Falloon *et al.* (2006) で報告されているチモール島かんらん岩の $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$ 比データを眺めると、 $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$ 比バリエーションはおもに起源マンタルの不均質性を反映しているのに対し、比較的大きな $^{147}\text{Sm}/^{144}\text{Nd}$ バリエーションはごく最近の融解イベントによってもたらされたようにみえる(図5)。すなわち若い上盤側マンタルに由来することを示していることが期待される。もちろんこれだけの少量データに年代学的意義を与えるのは無謀であるが、他の同位体

(Os や Hf) システマティクスを利用しつつ、さらに試料数を増やすことによって起源マンタルの不均質性に系統性が見いだされれば、かんらん岩体の上昇・融解年代を決定することは十分可能であると考えられる。例えば、上述のソロモン諸島産のかんらん岩において著しく高い $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$ 比をもつ一試料は、他の試料に比べて明瞭に低い $^{187}\text{Os}/^{188}\text{Os}$ 比をもつ($^{187}\text{Os}/^{188}\text{Os}=0.1174$; その他は 0.1234 - 0.1332 ; Ishikawa *et al.*, 2011)。このことは、起源マンタルに部分的に存在している過去の枯渇マンタルを抽出したとして調和的であり、年代値の推定から除外する強い根拠となっている。

VI. おわりに

西太平洋地域には中生代以降の比較的若いオフィオライトが数多く存在するが、そのなかでも東インドネシア、チモール・タニンバー諸島には、島弧-大陸衝突に伴い造山帯へ搬入しつつあるオフィオライト様岩体が多数分布している。周囲のテクトニックな状況からは、これらの岩体が前弧域の地殻-マンタルが大陸物質の浮揚性沈み込みにより衝上したものであることが示唆されるが、どのような造構場で融解を経験したマンタルが最終的に露出しているのかはいまだ議論が分かれるところである。この問題の解決には今後の年代学的検討の結果が重要な役割を握っているが、本地域が前弧域の海洋リソスフェアの肥沃な一端を示す典型例になる可能性は十分高く、最終的にはウェッジマンタルがどの程度多様性をもっているかという問題に帰着され则认为している。

新井田ほか(2005)は高枯渇度かんらん岩が主体と考えられてきた伊豆-小笠原-マリアナ弧周辺に産するかんらん岩の特徴をまとめ、(1)火山フロントにやや近い位置にある蛇紋岩海山(大町海山)あるいは(2)マリアナトラフ、パレスペラ海盆といった背弧海域では、比較的肥沃なかんらん岩が産することを指摘している。さらに最近では、マリアナ前弧域からも同様に肥沃なかんらん岩の産出が報告されている(柳田ほか, 2007)。また Arai and Ishimaru (2008) による島弧火山岩から得られる捕獲岩のコンパイルには、伊豆-

小笠原-マリアナ前弧域に匹敵するような高枯渇度のもの（例えばカムチャッカ半島）から、大陸下マントルと呼べる低枯渇度のもの（例えば隠岐島後）まで、多様性が大きいことが明瞭に示されている。以上のことから、やはりウェッジマントルはかなり不均質であると考えた方がよさそうであり、古い時代のオフィオライトの起源を求めることはいまだ容易ではないことを暗示しているのかもしれない。

日本列島には古生代から新生代に及ぶ複数列のオフィオライト帯が産し、それらは付加型（太平洋型）造山帯の基本的構造と調和的に、大陸側から大洋側（構造的上位から下位）に向かって若くなることが知られている（石渡, 1989）。これらのなかでも、超塩基性岩と随伴する変斑れい岩を主体とする前期古生代のオフィオライト列（大江山-飛騨外縁, 早池峰-宮守など）は、日本列島の誕生場を議論する上で重要と考えられ、かつて磯崎・丸山（1991）はこれらを一括して、楊子地塊縁辺の受動的大陸縁が活動的大陸縁に転化した際に大陸側にとり残された海洋リソスフェアの断片と説明した。しかし、大江山-飛騨外縁, 早池峰-宮守, さらには北方延長とみなされる極東ロシアに分布する古生代オフィオライトの、かんらん岩の初生的性質は多岐にわたっており、超大陸分裂によって生じた初期太平洋プレートとの関連性や、島弧的環境下での改変あるいは形成過程の詳細に関しては、いまだ統一の見解は得られていない（例えば, Yoshikawa and Ozawa, 2007; Ishiwatari *et al.*, 2010; 梶屋・後藤, 2010; 町・石渡, 2010）。このような状況下で、本稿で紹介した前弧域オフィオライトの産状と岩石学的性質を包括的に理解することは重要で、世界の主要な造山帯のみならず日本列島構造発達史を紐解く上での重要な鍵になると考えられる。

謝 辞

本研究を進めるにあたり東京工業大学の丸山茂徳教授ほか、同大学のインドネシア調査隊メンバーの方々には大変お世話になった。また、東北大学の石渡 明教授からは本稿を改訂する上で有益なコメントをいた

だいた。これらの方々に感謝する。

文 献

- Abbot, M.J. and Chamalaun, F.H. (1981): Geochronology of some Banda Arc volcanics. in *The Geology and Tectonics of Eastern Indonesia* edited by Barber, A.J. and Wiryosujono, S., *Geological Research and Development Centre, Special Publications*, 253–268.
- Andal, E.S., Arai, S. and Yumul JR, G.P. (2005): Complete mantle section of a slow-spreading ridge-derived ophiolite: An example from the Isabela ophiolite in the Philippines. *The Island Arc*, **14**, 272–294.
- Anonymous (1972): Penrose field conference on ophiolites. *Geotimes*, **17**, 24–25.
- Arai, S. and Ishimaru, S. (2008): Insights into Petrological characteristics of the lithosphere of mantle wedge beneath arcs through peridotite xenoliths: A review. *Journal of Petrology*, **49**, 665–695.
- Berry, R.F. and McDougall, I. (1986): Interpretation of $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ and K/Ar dating evidence from the Aileu Formation, East Timor, Indonesia. *Chemical Geology*, **59**, 43–58.
- Bloomer, S.H. and Hawkins, J.W. (1983): Gabbroic and ultramafic rocks from the Mariana Trench: An island arc ophiolite. in *The Tectonic and Geologic Evolution of Southeast Asian Seas and Islands, Part 2* edited by Hayes, D.E., *Geophysical Monograph, American Geophysical Union*, 294–317.
- Bodinier, J.-L. and Godard, M. (2003): Orogenic, ophiolitic, and abyssal peridotites. in *Treatise on Geochemistry, Volume 2* edited by Carlson, R.W., Elsevier, Amsterdam, 103–170.
- Bonatti, E. and Michael, P.J. (1989): Mantle peridotite from continental rifts to ocean basins to subduction zones. *Earth and Planetary Science Letters*, **91**, 297–311.
- Charlton, T.R. (1997): Backthrusting on the BIRPS deep seismic reflection profiles, Banda Arc, Indonesia, a response to changing slab inclination?. *Journal of the Geological Society, London*, **154**, 169–172.
- De Smet, M.E.M., Fortuin, A.R., Troelstra, S.R., van Marle, L.J., Karmini, M., Tjokrosapoetro, S. and Hadwisatra, S. (1990): Detection of collision-related vertical movements in the outer Banda arc (Timor, Indonesia) using related micropaleontology data. *Journal of Southeast Asian Earth Sciences*, **4**, 337–356.
- Dewey, J.F. and Bird, J.M. (1970): Mountain belts and new global tectonics. *Journal of Geophysical Research*, **75**, 2625–2647.
- Dilek, Y. and Furnes, H. (2009): Structure and geochemistry of Tethyan ophiolites and their petrogenesis in subduction rollback systems. *Lithos*, **113**, 1–20.
- Elburg, M.A., Foden, J.D., Van Bergen, M.J. and Zulkarnain, I. (2005): Australia and Indonesia in

- collision: Geochemical sources of magmatism. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, **140**, 25–47.
- England, R.N. and Davies, H.L. (1973): Mineralogy of ultramafic cumulates and tectonites from eastern Papua. *Earth and Planetary Science Letters*, **17**, 416–425.
- Falloon, T.J., Berry, R.F., Robinson, P. and Stolz, A.J. (2006): Whole-rock geochemistry of the Hili Manu peridotite, East Timor: Implications for the origin of Timor ophiolites. *Australian Journal of Earth Sciences*, **53**, 637–649.
- Hall, R. (2002): Cenozoic geological and plate tectonic evolution of SE Asia and the SW Pacific: Computer-based reconstructions, model and animations. *Journal of Asian Earth Sciences*, **20**, 353–431.
- Harris, R.A. (1992): Peri-collisional extension and the formation of Oman-type ophiolites in Banda Arc and Brooks Range. in *Ophiolites and Their Modern Oceanic Analogues* edited by Parson, L.M., Murton, B.J. and Browning, P., *Geological Society of London, Special Publications*, 301–325.
- Harris, R.A. (2003): Geodynamic patterns of ophiolites and marginal basins in the Indonesian and New Guinea regions. in *Ophiolites in Earth History* edited by Dilek, Y. and Robinson, P.T., *Geological Society, London, Special Publications*, 481–505.
- Harris, R.A. and Long, T. (2000): Timor ophiolite, Indonesia: Model or myth?. in *Ophiolites and Oceanic Crust: New Insights from Field Studies and the Ocean Drilling Program* edited by Dilek, Y., Moores, E.M., Elthon, D. and Nicolas, A., *Geological Society of America, Special Papers*, 321–330.
- Hinschberger, F., Malod, J.-A., Dymant, J., Honthaas, C., Réhault, J.-P. and Burhanuddin, S. (2001): Magnetic lineations constraints for the back-arc opening of the Late Neogene South Banda Basin (eastern Indonesia). *Tectonophysics*, **333**, 47–59.
- Honthaas, C., Rehault, J.P., Maury, R.C., Bellon, H., Hemond, C. Malod, J.A., Cornee, J.P., Villeneuve, M. Cotton, J., Burhanuddin, S., Guillou, H. and Arneud, N. (1998): A Neogene back-arc origin for the Banda Sea basins: Geochemical and geochronological constraints from Banda ridges (East Indonesia). *Tectonophysics*, **298**, 297–317.
- 堀越 毅 (1972): 日本列島の造山帯とプレート. 科学, **42**, 665–673. [Horikoshi, E. (1972): *Science Journal Kagaku (Kagaku)*, **42**, 665–673.]
- Ishikawa, A., Nakamura, E. and Mahoney, J.J. (2005): Jurassic oceanic lithosphere beneath the southern Ontong Java Plateau: Evidence from xenoliths in alnöite, Malaita, Solomon Islands. *Geology*, **33**, 393–396.
- Ishikawa, A., Kaneko, Y., Kadarusman, A. and Ota, T. (2007): Multiple generations of forearc mafic-ultramafic rocks in the Timor-Tanimbar ophiolite, eastern Indonesia. *Gondwana Research*, **11**, 200–217.
- Ishikawa, A., Pearson, D.G. and Dale, C.W. (2011): Ancient Os isotope signatures from the Ontong Java Plateau lithosphere: Tracing lithospheric accretion history. *Earth and Planetary Science Letters*, **301**, 159–170.
- Ishiwatari, A. (1985a): Igneous petrogenesis of the Yakuno ophiolite (Japan) in the context of the diversity of ophiolites. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, **89**, 155–167.
- Ishiwatari, A. (1985b): Alpine ophiolites: Product of low-degree mantle melting in a Mesozoic transcurrent rift zone. *Earth and Planetary Science Letters*, **76**, 93–108.
- 石渡 明 (1989): 日本のオフィオライト. 地学雑誌, **98**, 104–117. [Ishiwatari, A. (1989): *Journal of Geography (Chigaku Zasshi)*, **98**, 104–117.]
- 石渡 明 (2010): オフィオライト研究の新展開. 地学雑誌, **119**, 841–851. [Ishiwatari, A. (2010): *Journal of Geography (Chigaku Zasshi)*, **119**, 841–851.]
- Ishiwatari, A., Yanagida, Y., Li, Y.B., Ishii, T., Haraguchi, S., Koizumi, K., Ichiyama, Y. and Umeka, M. (2006): Dredge petrology of the boninite- and adakite-bearing Hahajima Seamount of the Ogasawara (Bonin) forearc: An ophiolite or a serpentinite seamount?. *Island Arc*, **15**, 102–118.
- Ishiwatari, A., Machi, S., Hayasaka, Y., Ledneva, G.V., Sokolov, S.D., Palandzhyan, S.A., Bazylev, B.A. and Morishita, T. (2010): Extremely fertile lherzolite: Petrologic evidence for continental rifting and subsequent subduction from Ust'-Balaya ophiolite in the circum-Pacific belt of NE Russia. *EOS Trans. AGU Western Pacific Geophysics Meeting*, **91**, V43C-06.
- 磯崎行雄・丸山茂徳 (1991): 日本におけるプレート造山論の歴史と日本列島の新しい地帯構造区分. 地学雑誌, **100**, 697–761. [Isozaki, Y. and Maruyama, S. (1991): *Journal of Geography (Chigaku Zasshi)*, **100**, 697–761.]
- Kadarusman, A., Miyashita, S., Maruyama, S., Parkinson, C.D. and Ishikawa, A. (2004): Petrology, geochemistry and paleogeographic reconstruction of the East Sulawesi Ophiolite, Indonesia. *Tectonophysics*, **392**, 55–83.
- Kadarusman, A., Maruyama, S., Kaneko, Y., Ota, T., Ishikawa, A., Sopaheluwakan, J. and Omori, S. (2010): World's youngest blueschist belt from Leti Island in the non-volcanic Banda outer arc of Eastern Indonesia. *Gondwana Research*, **18**, 189–204.
- Kaneko, Y., Maruyama, S., Kadarusman, A., Ota, T., Ishikawa, M., Tsujimori, T., Ishikawa, A. and Okamoto, K. (2007): On-going orogeny in the outer-arc of Timor-Tanimbar region, eastern Indonesia. *Gondwana Research*, **11**, 218–233.
- Komiya, T. and Maruyama, S. (2007): A very hydrous mantle under the western Pacific region: Implications for formation of marginal basins and style of Archean plate tectonics. *Gondwana Research*, **11**, 132–147.

- 梶座圭太郎・後藤 篤 (2010): 日本列島の誕生場—古太平洋の沈み込み開始を示す飛騨外縁帯の 520 Ma の熱水活動—. 地学雑誌, **119**, 279-293. [Kunugiza, K. and Goto, A. (2010): *Journal of Geography (Chigaku Zasshi)*, **119**, 279-293.]
- 町 澄秋・石渡 明 (2010): 飛騨外縁帯, 小滝地域の苦鉄質岩: 大江山オフィオライトかんらん岩とその変成作用について. 地質学雑誌, **116**, 293-308. [Machi, S. and Ishiwatari, A. (2010): *Journal of the Geological Society of Japan*, **116**, 293-308.]
- Manatschal, G. and Müntener, O. (2009): A type sequence across an ancient magma-poor ocean-continent transition: The example of the western Alpine Tethys ophiolites. *Tectonophysics*, **473**, 4-19.
- 丸山茂徳・寺林 優・藤岡換太郎 (1989): 総説—オフィオライトの起源とエンブレイスメント. 地学雑誌, **98**, 319-349. [Maruyama, S., Terabayashi, M. and Fujioka, K. (1989): *Journal of Geography (Chigaku Zasshi)*, **98**, 319-349.]
- Miyashiro, A. (1973): The Troodos complex was probably formed in an island arc. *Earth and Planetary Science Letters*, **122**, 218-224.
- Monnier, C., Polve, M., Girardeau, J., Pubellier, M., Maury, R.C., Bellon, H. and Permana, H. (1999): Extensional to compressive Mesozoic magmatism at the SE Eurasia margin as recorded from the Meratus ophiolite (SE Borneo, Indonesia). *Geodinamica Acta*, **12**, 43-55.
- Moores, E.M. (1982): Origin and emplacement of ophiolites. *Reviews of Geophysics and Space Physics*, **20**, 735-760.
- Müntener, O., Manatschal, G., Desmurs, L. and Pettker, T. (2010): Plagioclase peridotites in ocean-continent transitions: Refertilized mantle domains generated by melt stagnation in the shallow mantle lithosphere. *Journal of Petrology*, **51**, 255-294.
- 新井田清信・五十公野貴弘・石井 勇・石井輝秋 (2005): 海洋性かんらん岩の鉱物科学組成変化—伊豆-小笠原-マリアナ弧~背弧海盆の上部マントルかんらん岩の特性—. 月刊地球, **52**, 165-173. [Niida, K., Izumino, T., Ishii, I. and Ishii, T. (2005): *Chikyū Monthly (Gekkan Chikyū)*, **52**, 165-173.]
- Niu, Y.L. and Hekinian, R. (1997): Spreading-rate dependence of the extent of mantle melting beneath ocean ridges. *Nature*, **385**, 326-329.
- Pearce, J.A. and Robinson, P.T. (2010): The Troodos ophiolitic complex probably formed in a subduction initiation, slab edge setting. *Gondwana Research*, **18**, 60-81.
- Pearson, D.G., Parman, S.W. and Nowell, G.M. (2007): A link between large mantle melting events and continent growth seen in osmium isotopes. *Nature*, **449**, 202-205.
- Pubellier, M., Monnier, C., Maury, R. and Tamayo, R. (2004): Plate kinematics, origin and tectonic emplacement of supra-subduction ophiolites in SE Asia. *Tectonophysics*, **392**, 9-36.
- Rampone, E. and Piccardo, G.B. (2000): The ophiolite-oceanic lithosphere analogue: New insights from the Northern Apennines (Italy). in *Ophiolites and Oceanic Crust: New Insights from Field Studies and the Ocean Drilling Program* edited by Dilek, Y., Moores, E.M., Elthon, D. and Nicolas, A., *Geological Society of America, Special Papers*, 21-34.
- Richards, S., Lister, G. and Kennett, B. (2007): A slab in depth: Three-dimensional geometry and evolution of the Indo-Australian plate. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, **8**, 11.
- Rudnick, R.L. and Walker, R.J. (2009): Interpreting ages from Re-Os isotopes in peridotites. *Lithos*, **112S**, 1083-1095.
- Salters, V.J.M. and Dick, H.J.B. (2002): Mineralogy of the mid-ocean-ridge basalt source from neodymium isotopic composition of abyssal peridotites. *Nature*, **418**, 68-72.
- Sopaheluwakan, J. (1990): *Ophiolite Obduction in the Mutis Complex, Timor, Eastern Indonesia: An Example of Inverted, Isobaric, Medium-high Pressure Metamorphism*. Ph.D Thesis, Vrije Universiteit, Amsterdam, 226 p.
- Steinmann, G. (2003): Die ophiolitischen Zonen in den mediterranen Kettengebirgen (The ophiolitic zones in the Mediterranean mountain chains). in *Ophiolite Concept and the Evolution of Geological Thought* edited by Dilek, Y. and Newcomb, S., *Geological Society of America Special Paper*, 77-91.
- van Acken, D., Becker, H. and Walker, R.J. (2008): Refertilization of Jurassic oceanic peridotites from the Tethys Ocean—Implications for the Re-Os systematics of the upper mantle. *Earth and Planetary Science Letters*, **268**, 171-181.
- Warren, J.M., Shimizu, N., Sakaguchi, C., Dick, H.J.B. and Nakamura, E. (2009): An assessment of upper mantle heterogeneity based on abyssal peridotite isotopic compositions. *Journal of Geophysical Research*, **114**, 36.
- 柳田祐樹・石渡 明・石井輝秋 (2007): マリアナ海溝南部の陸側斜面に露出する前弧~背弧のマントル: 白鳳丸 KH03-03 航海の成果. 月刊地球, **29**, 615-627. [Yanagida, Y., Ishiwatari, A. and Ishii, T. (2007): *Chikyū Monthly (Gekkan Chikyū)*, **29**, 615-627.]
- Yoshikawa, M. and Ozawa, K. (2007): Rb-Sr and Sm-Nd isotopic systematics of the Hayachine-Miyamori ophiolitic complex: Melt generation process in the mantle wedge beneath an Ordovician island arc. *Gondwana Research*, **11**, 234-246.

(2010 年 7 月 13 日受付, 2010 年 9 月 16 日受理)