

〔総説〕 フィリピン海背弧拡大系のマントルカンラン岩[†]

小原泰彦*

Reviews on mantle peridotites from the Philippine Sea backarc spreading systems[†]

Yasuhiko OHARA*

Abstract

This article presents a review on mantle peridotites from the Philippine Sea backarc spreading systems. Reports of peridotite exposures in the Philippine Sea backarc spreading systems are only known in the Parece Vela Rift, the Mariana Trough, the Central Basin Fault, and the Nishi-no-shima Rift. Distinct mantle processes occur beneath the Parece Vela Rift and the Mariana Trough. These are named the "Parece Vela Rift-type mantle process" and the "Mariana Trough-type mantle process", respectively. The Parece Vela Rift-type mantle process is an extraordinary process beneath a segment mid-point, basically accompanying fertile peridotite, plagioclase-bearing peridotite, and dunite. On the other hand, the Mariana Trough-type mantle process is an ordinary process at a ridge-transform intersection of a typical slow-spreading ridge, basically accompanying abundant wall-rock peridotite and subordinate impregnated peridotite with gabbroic vein. The present review shows that the Philippine Sea backarc basin peridotites are essentially undepleted and are more similar to slow-spreading ridge abyssal peridotites, and unlike peridotites from most arcs and forearcs.

1. はじめに

大西洋中央海嶺に代表される、世界の海底拡大系は、海洋底の大構造を形成しており、1960年代から科学的な研究の対象となってきた。海底拡大系は、海洋プレートの生産の場として、体積比として地球全体の相当部分の火成活動を担っており、また地球内部からの熱発散の場として地球進化の歴史の中で重要な役割を占めてきた。海底拡大系における火成活動は、海洋や、大気の大循環や、地球システム全体の物質循環、さらには、生物の進化に対しても重要な影響を与えてきたと考えられている。従って、海底拡大系を理解するこ

とは、地球システムを理解することの重要なステップの一つである。

中央海嶺玄武岩 (Mid-Oceanic Ridge Basalt; MORB) は、海洋性地殻の主要構成物であり、地球上で最も大量に存在しているマグマである。このMORBマグマは、マントル物質の部分融解によって生じた初生マグマであることが、様々な研究によって明らかになっている。そこでMORBを理解することによって、中央海嶺の海底拡大ダイナミクスを理解できるのではないかと、という期待の下に、MORBについての多種多様な研究がこれまでになされている。しかし、MORBは上部マントルで生成した初生マグマで

[†] Received January 6, 2003 ; Accepted March 18, 2003.

* 技術・国際課海洋研究室 Ocean Research Laboratory, Technology Planning and International Affairs Division

あるが、地殻内でのマグマ分化や、マグマ混合の影響を被っており、MORBのみで海底拡大ダイナミクスを支配するマントルにおける諸現象を理解することは困難である。中央海嶺の海底拡大ダイナミクスをより直接的に探るためには、マントル物質を研究する手法が必要である。1940年代から大西洋中央海嶺を始めとする低速拡大海嶺の多くの断裂帯から上部マントル物質である蛇紋岩化したカンラン岩の産出が知られており、「海洋底カンラン岩 (abyssal peridotite)」と呼ばれて来た (Miyashiro et al., 1969 ; Aumento and Loubat, 1970 ; Dick and Bullen, 1984 ; Michael and Bonatti, 1984 ; Dick, 1989)。

西太平洋は、伊豆・小笠原海溝、マリアナ海溝を始めとする沈み込み帯の存在に伴い、一般に海

底拡大によって形成される背弧海盆が島弧の背後に発達し、背弧-島弧-海溝系を形成している。西太平洋の中でも、特にフィリピン海 (Fig.1) は、複数の背弧海盆で構成され、それらの海底拡大ダイナミクスを理解することで、世界の海底拡大系の海底拡大ダイナミクスに対する理解をより深めることができるはずである。世界の海底拡大系において、背弧海盆に対する理解は、中央海嶺のそれに対して未だ遅れている。特に背弧海盆のカンラン岩については、これまで詳しいことは未詳であった。しかし、海上保安庁海洋情報部の大陸棚調査プロジェクトの進展によってフィリピン海背弧海盆のテクトニクスの詳細が明らかになり (Kasuga and Ohara, 1997 ; Ohara et al., 1997 ; 2001 ; Okino et al., 1994 ; 1998 ; 1999),

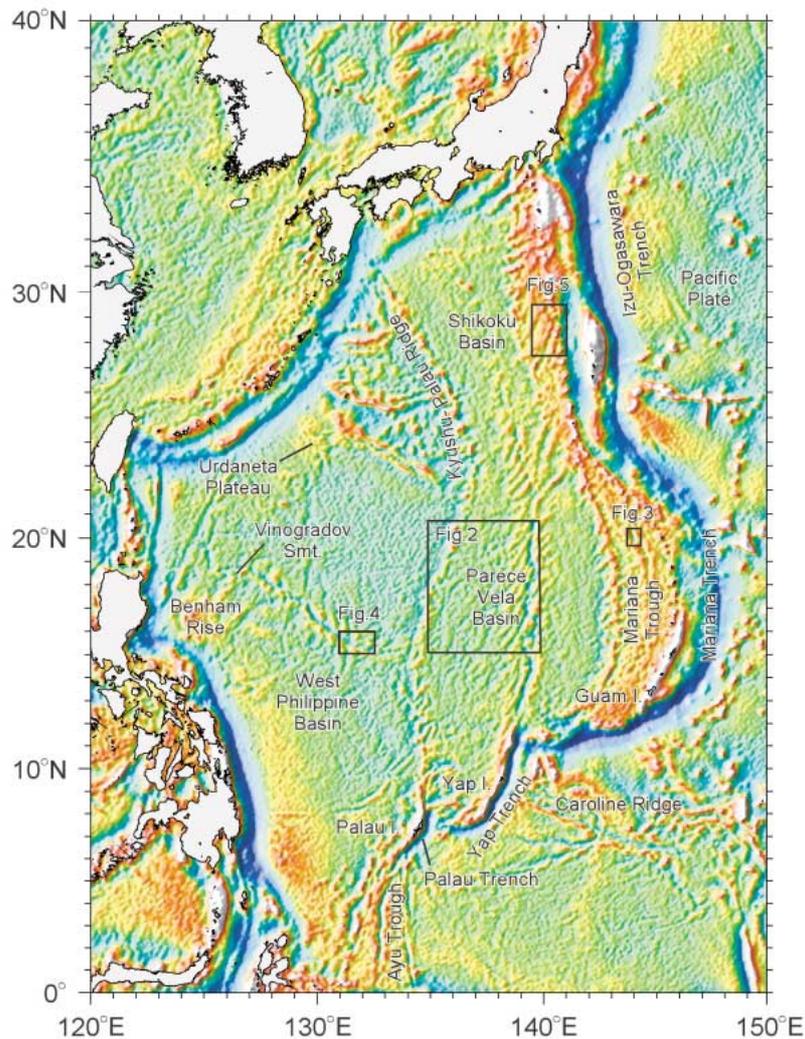


Fig. 1 Satellite altimetry map showing the tectonic feature of the Philippine Sea (data from Sandwell and Smith, 1997). The rectangles show the locations of Figs. 2-5. The locations of the Benham Rise, the Urdaneta Plateau, and the Vinogradov Seamount are indicated (see section 4-3).

Ohara and othersの最近の研究により、限られた数の背弧海盆カンラン岩について詳細が明らかにされつつある (Ohara et al., 1996; 2002a; 2002b; submitted; Ohara and Stern, submitted).

本論ではそれらの結果を踏まえ、現在明らかになっているフィリピン海背弧拡大系カンラン岩の特徴を紹介する。2003年から我が国が主導するIODP計画が始動し、新しいMohole計画が期待されている。また国連大陸棚限界委員会への我が国からの大陸棚調査資料の提出期限が2009年に決定した。このような状況の下で、フィリピン海背弧拡大系リソスフェア研究をまとめておくことは有意義であると考え。なお、これまでの海洋底カンラン岩研究については、荒井 (1989・1995・1997・1999)、小沢 (1986)・小沢ほか (1990) に既にレビューされている。

2. 海洋底カンラン岩の岩石学

上部マントルの構成物質は、地殻のものとは大きく異なり、Mgに富む超マフィック岩類であることが知られている。それらの代表的なものが、カンラン岩類である。カンラン岩は、主にカンラン石・斜方輝石・単斜輝石・スピネルの4つの鉱物組成からなり、斜長石・角閃石を含む場合もある。カンラン岩は比較的単純な化学組成を持ち、 SiO_2 ・ MgO ・ FeO ・ CaO ・ Al_2O_3 が主要成分で、微量成分として、 Cr_2O_3 ・ TiO_2 などを含む。カンラン石・斜方輝石・単斜輝石のモード組成 (体積比) によって、カンラン岩類の名称が決まっている。海洋底カンラン岩は、これまでの研究により、主にレールゾライト・ハルツパーガイトから成ることが知られている。

MORBマグマはある初生的なカンラン岩が部分融解することによって生じるが、マグマが抜けた後の融け残りカンラン岩は、一般に残留岩 (refractory residue) と呼ばれている。レールゾライト・ハルツパーガイトから成る海洋底カンラン岩のほとんどは、このような残留岩であると考えられている。ある初生的なカンラン岩の部分融解の進行につれて、その残留岩のモード組成では、

まず単斜輝石が減少し、次に斜方輝石に減少し、ついには輝石類が消失する。それら鉱物の化学組成は、部分融解の進行につれて、インコンパティブル元素に乏しくなり、コンパティブル元素に富むようになる。これらの関係を容易に見ることのできる「岩石学的インディケーター」として、スピネルのCr # ($\text{Cr}/(\text{Cr} + \text{Al})$ 比) が広く用いられている (Dick and Bullen, 1984)。すなわち、部分融解度の高い残留岩ほど、コンパティブル元素であるCrに富むので、そのスピネルのCr # は高くなる。イオンマイクロプローブを用いると、カンラン岩の部分融解に関するさらに有用な情報を単斜輝石から得ることができる。希土類元素 (Rare Earth Element; REE) はカンラン岩の構成鉱物中では単斜輝石に濃集することが知られている。Johnson et al. (1990) は海洋底カンラン岩の研究に初めてイオンマイクロプローブを用いて、単斜輝石に濃集したREEの代表的なパターンを求め、実験で既知となっている各REEの固液分配係数を用いた理論的な計算から、海洋底カンラン岩の部分融解度を定量的に計算することに成功した。

大西洋中央海嶺・南西インド洋海嶺を中心として、海嶺軸に沿った海洋底カンラン岩の組成変化を論じた最初の研究はDick et al. (1984) と Michael and Bonatti (1985) である。これらの研究では、カンラン岩のモード組成やスピネル・輝石の化学組成に、海嶺軸に沿って長波長 (約1000kmのオーダー) の組成変化が存在することが示された。これらの組成変化は、カンラン岩に伴って産するMORBの組成や、海嶺軸の水深、残留ジオイド異常と密接に関係しており、大西洋中央海嶺下の上部マントルの部分融解がアゾレスホットスポット・アイスランドホットスポットの影響を強く受けていることが示唆された。すなわち、大西洋中央海嶺の北緯34度-45度の地域は、大西洋中央海嶺のその他の地域に比べ、より高い部分融解度を被っている (より「枯渇」している) ことがカンラン岩・MORBのデータから示された。Niu and Hekinian (1997) は、低速拡大海嶺と高速拡

大海嶺のカンラン岩と MORB の組成をコンパイルし、海嶺の拡大速度と上部マントルの枯渇度に明瞭な正の相関関係があることを示した。一方 Bonatti and Michael (1989) は、世界の海洋底のカンラン岩の岩石学的特徴をコンパイルし、前海洋性リフト (紅海), 受動的大陸縁辺部 (イベリアマージン), 中央海嶺 (大西洋中央海嶺), 沈み込み帯 (マリアナ前弧), の順にカンラン岩が枯渇して行くことを明らかにした。

3. 背弧拡大系におけるカンラン岩の分布

大西洋を中心とする低速拡大海嶺およびそれに

伴う断裂帯沿いから非常に数多くのマントルカンラン岩の産出が知られているのに対し、背弧海盆からの報告は極めて限られている。世界のその他の中央海嶺系に比べ、西太平洋に主に分布する背弧海盆においては調査の絶対数が少ないことが、一つの理由であると思われる。

西太平洋のフィリピン海 (Fig.1) は幾つかの背弧海盆と古島弧・島弧から構成されているが、そのうち、既に活動を停止したパレスベラ海盆 (Fig.2) (Ohara et al, 1996; submitted; Ohara and Stern, submitted) と、現在背弧拡大中のマリアナトラフ (Fig.3) (Ohara et al, 2002b; Ohara and

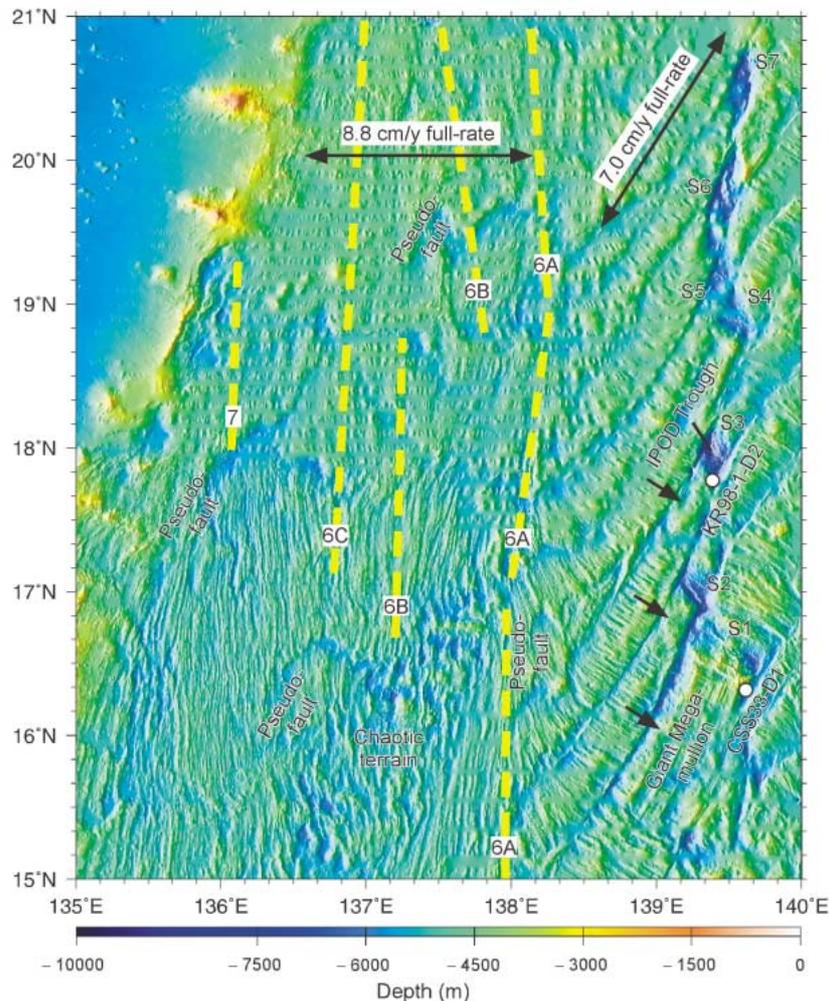


Fig. 2 Interpreted shaded structural image of the Parece Vela Basin illuminated from 270° (after Ohara and Stern, submitted). Dotted yellow lines are magnetic anomaly isochrons with anomaly number taken from Okino et al. (1998). The short, first-order segments are labeled as S1-S7 (Ohara et al., 2001). Distinct mullion structures indicated by short arrows, are developed along the full-length of each segment (S1-S3) (Ohara et al., 2001). The chaotic terrain characterized by rough bathymetry is identified in the western Parece Vela Basin, also suggesting amagmatic extension occurred there (see discussion for Ohara et al. (2001)). Some notable pseudofaults are indicated. The dredge haul CSS33-D1 by S/V Takuyo recovered peridotites and gabbros, whereas KR98-1-D2 by R/V Kairei only peridotites (Ohara et al., 1996; submitted).

Stern, submitted) からのマンタルカンラン岩について、詳細な岩石学的な検討が成されている。パレスベラ海盆と同様に既に活動を停止している西フィリピン海盆のかつての拡大軸であるセントラルベースンフォールト (Fig.4) からもロシア

船によるマンタルカンラン岩のドレッジの記録がある (Shcheka et al., 1995)。伊豆・小笠原弧内の活動的島弧内リフトである、西ノ島リフト (Fig.5) からも最近カンラン岩が発見された (湯浅ほか, 1999a, b)。

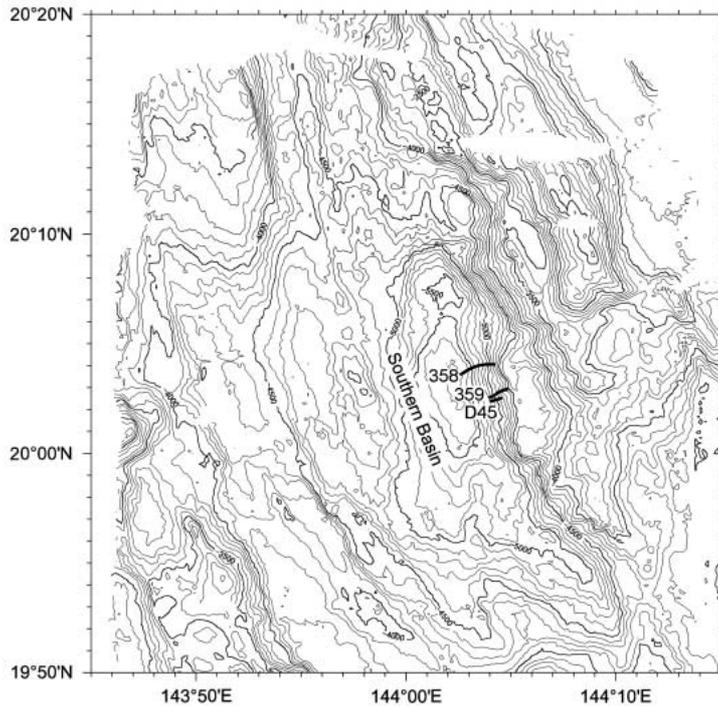


Fig. 3 Bathymetry of the Southern Basin of the Central Graben, Mariana Trough, and track lines of DSV Shinkai 6500 dives 358 and 359 (after Ohara et al., 2002b). D45 represents the approximate line of the Tunes 7 dredge 45 by R/V Thomas Washington (Stern et al., 1996). Contours in 100 m intervals.

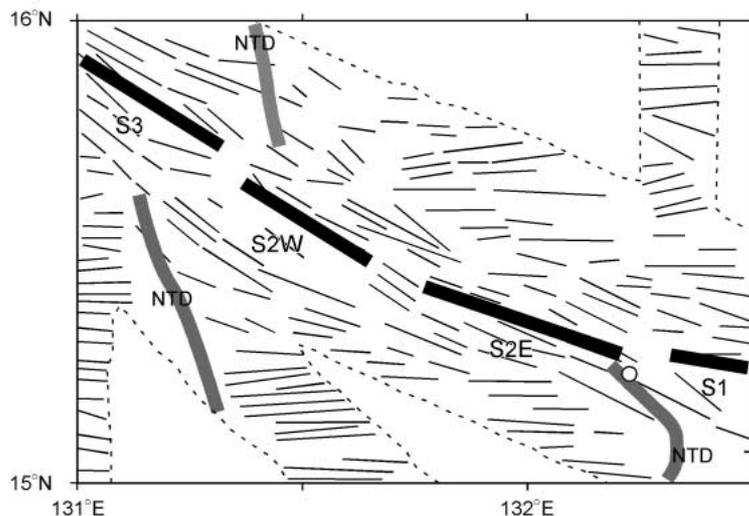


Fig. 4 Tectonic interpretation of the Central Basin Fault after the base bathymetric map of Deschamps et al. (2002). The rift valleys are indicated by thick black lines, lineaments by thin black lines, and non-transform discontinuities (NTD) are thick gray lines. Segment names (S1, S2E, S2W, and S3) are after Okino and Fujioka (2003). The small circle indicates the dredge location by R/V Academic Alexander Nesmeyanov (Shcheka et al., 1995). Note that the approximately NW-SE aligned rift valleys cut the E-W tectonic fabrics off-axis (Deschamps et al., 2002; Okino and Fujioka, 2003).

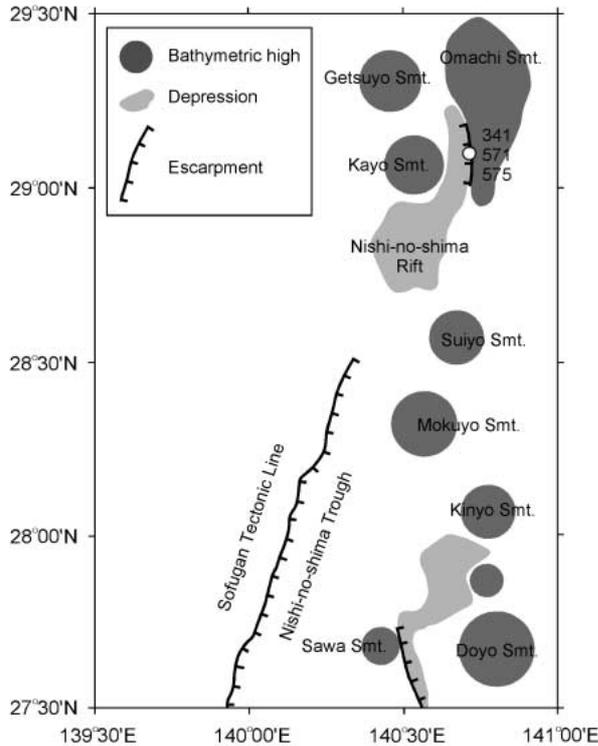


Fig. 5 Schematic tectonic map showing the location of the Nishi-no-shima Rift after the base bathymetric map of Sakamoto et al. (2001). Approximate location of DSV Shinkai 6500 dives 341, 571, and 575 is indicated by a small circle. The Shichiyo Seamounts Chain (Getsuyo, Kayo, Suiyo, Mokuyo, Kinyo, and Doyo Seamounts) represents a part of the volcanic front of the present Izu-Ogasawara (Bonin) arc.

西大西洋のカリブ海の中央ケイマンライズからマンタルカンラン岩およびガブロが報告されている (Perfit and Heezen, 1978; Elthon, 1987; Arai et al., 1997) が, 中央ケイマンライズは背弧拡大系のテクトニックセッティングではないようである (Tamaki and Honza (1991) では背弧海盆に分類されている). 地中海のティレニア海 (バビロフ海盆) では, ODP Leg 107による深海掘削が実施されている. 地球物理学的データはティレニア海が背弧海盆であることを示しているが (Faccenna et al. 2001), ティレニア海カンラン岩は極めて枯渇しており (Bonatti et al., 1990), 岩石学的には沈み込み帯 (前弧) のものと類似している.

4. フィリピン海背弧拡大系のカンラン岩

4-1. パレスベラリフトカンラン岩

パレスベラ海盆 (Fig.2) は, 29 – 12 Maに背弧拡大を行った背弧海盆であり (Okino et al., 1998; 1999), その拡大中心は, パレスベラリフトと呼ばれている (Mrozowski and Hayes, 1979). パレスベラリフトは, 右横ずれ雁行配列の短い1次セグメントとそれらを密に挟む北東 – 南西方向の断裂帯から形成される (Kasuga and Ohara, 1997; Ohara et al., 1997; 2001; Okino et al., 1998; 1999). それらのセグメントは, 低速拡大海嶺に見られるような, ラフな地形・深い水深 (最大水深約7500m) で特徴付けられ (Ohara et al., 2001), ドレッジによってマンタルカンラン岩・ガブロが採取されている (Ohara et al., 1996; submitted). 大西洋中央海嶺では, 下部地殻 – 上部マントルが非マグマ的拡大により低角デタッチメント断層の下盤ブロックとして, 海嶺軸・トランスフォーム断層会合点 (Ridge-Transform Intersection ; RTI) に位置した「メガマリオン」と呼ばれる構造が最近発見された (Cann et al., 1997; Blackman et al., 1998; Mitchell et al., 1998; Tucholke et al., 1998). パレスベラリフトにおいて, 背弧海盆拡大系では初めてメガマリオンが発見された (Ohara et al., 2001; 小原ほか, 2001). パレスベラリフトのメガマリオンは大西洋中央海嶺のものに比べ約10倍の空間的スケールを持つ世界最大のメガマリオンであって, 「ジャイアントメガマリオン」と命名されている (Ohara et al., 2001; 小原ほか, 2001). パレスベラ海盆は, 拡大前期として29 – 21 Maまでは, 年間8.8cm (両側拡大速度) で東西方向にリフティング・拡大を行った (Okino et al., 1998). この時期はスムーズな海底地形と拡大軸のジャンプやプロパゲーションで特徴付けられ, マントルフロー (あるいはメルトの供給) が活発であったことが示唆される (Ohara et al., 2001). 拡大後期は, 拡大軸の反時計回りの回転が生じ, 19 – 12 Maまで, 年間7cm (両側拡大速度) で北東 – 南西方向に拡大を生じた (Ohara et al.,

2001). 拡大後期はパレスベラリフトの形成で代表される, 基本的には非マグマ的拡大で特徴付けられる. パレスベラ海盆のテクトニックな特徴は以下の点で大西洋中央海嶺と顕著に異なっている (Ohara et al., 2001; submitted) :

- (1) 年間両側拡大速度8.8 – 7cmという比較的高速な拡大環境の下で非マグマ的拡大が生じた (大西洋中央海嶺では低速拡大環境である),
- (2) 「メガマリオン」はセグメントの全長に渡って発達している (大西洋中央海嶺では一般にRTIに出現している (Tucholke et al., 1998)),
- (3) カンラン岩が1次のセグメント中央部に露出している (大西洋中央海嶺のモデルではセグメント中央部はマグマ活動が活発である (Lin et al., 1990)).

パレスベラリフトカンラン岩は1976年にロシアのR/V Dmitry Mendeleevによりドレッジされ (Bogdanov et al., 1977; Dietrich et al., 1978), 1984年にもR/V Akademik Vinogradovによりドレッジされた (Shcheka et al., 1995) が, いずれも詳細な岩石学的な記載はなされていない. その後, Ohara and othersによって, ジャイアントメガマリオンと1次セグメントのセグメント中央からドレッジがなされ, 詳細な岩石記載が行われた (Fig. 2; Ohara et al., 1996; submitted; Ohara and Stern, submitted). カンラン岩は, 一般的な海洋底カンラン岩と同様に著しく蛇紋岩化を被り, 特にダナイトは風化程度も激しい. 特にカンラン石はすべて変質し, 初生的な部分が残存していない. 変質を免れた単斜輝石・斜方輝石の組織から推定すると, パレスベラリフトカンラン岩の多くはポーフィロクラスティック組織を示し, カンラン岩のモード組成はレールズライトあるいはハルツパーサイトであることを示している.

パレスベラリフトカンラン岩の岩石学的な特徴を以下の通りまとめることができる (Ohara and Stern, submitted; Ohara et al., submitted) :

- (1) 1つのドレッジ中に3種の異なった岩相 (F・P・D-type) が混在する,
- (2) F-type (Fertile-type) のスピネルやマフィ

ック鉱物の組成は, 最も肥沃な海洋底カンラン岩の組成にはほぼ一致し, スピネルはCr # = 0.17に組成集中がある (Fig.6),

- (3) Interstitialな斜長石を含むP-type (Plagioclase bearing-type; 含斜長石カンラン岩) が多い (Fig.7a),
- (4) D-type (Dunite; ダナイト) が多い,
- (5) F-typeとP・D-typeはマフィック鉱物の組成が, 顕著なバイモーダルな分布を示し, 特にP・D-typeのスピネルはTiO₂に富んでいる (Fig.6),
- (6) P-typeの一部はinterstitialなフログサイト・パーサイトを含み, F-typeの一部はinterstitialなパーサイトを含む.

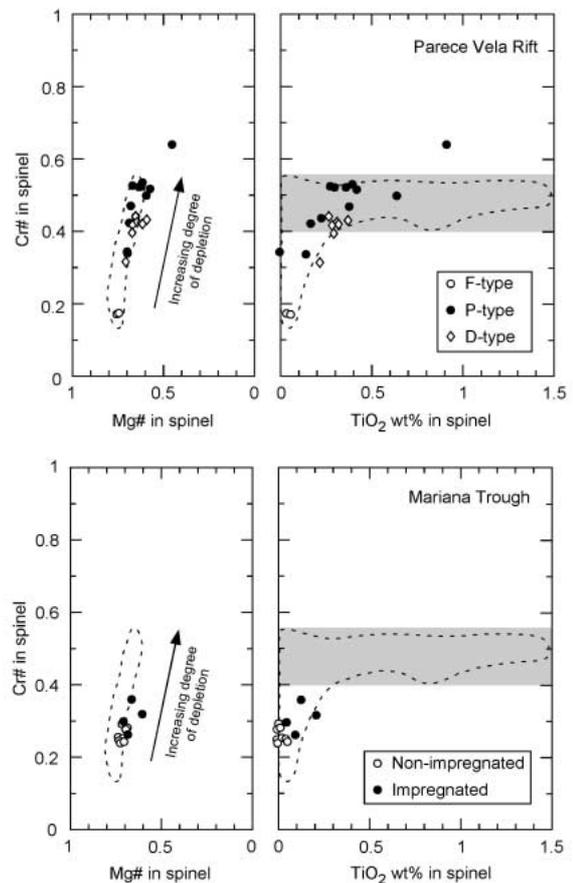


Fig. 6 Spinel compositional plots for Parece Vela Rift (upper) and Mariana Trough (lower) peridotites (after Ohara and Stern, submitted), with fields for abyssal peridotites indicated by dotted line for comparison (Dick and Bullen, 1984). Hatched area is the TiO₂ compositional range for most abyssal plagioclase-bearing peridotites (Dick and Bullen, 1984).

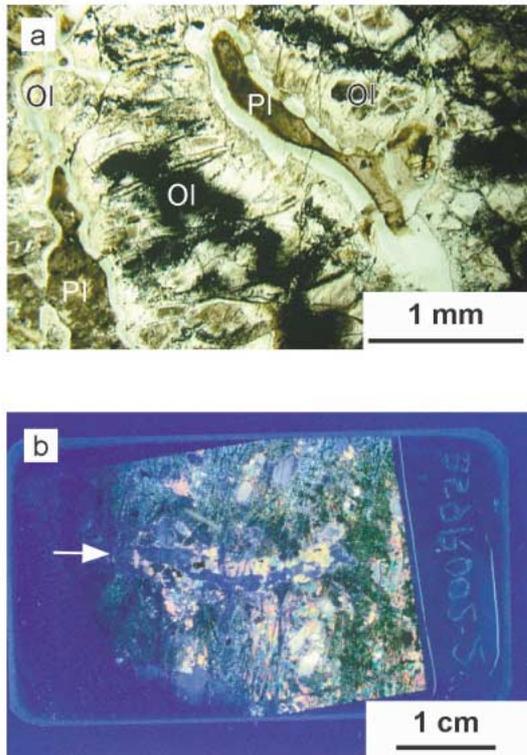


Fig. 7 Microphotograph of thin section and enlarged photo of thin section, all taken with transmitted light. (a) Altered plagioclase in P-type peridotite from the Parece Vela Rift (after Ohara et al., submitted). Open polarizers. Ol, olivine; Pl, plagioclase. (b) Veined harzburgite from the Mariana Trough (after Ohara et al., 2002b). Crossed polarizers. The vein (indicated by white arrow) clearly cuts the original porphyroclastic texture.

F-type が厳密な意味の残留岩としてのパレスベラリフトカンラン岩であって、MORB タイプソースマンタルの3-4%のnear-fractional meltingによって形成されたとモデリングが可能である。一方、D-typeは上部マンタル中のメルトの抽出チャンネル (Kelemen et al., 1995) として解釈でき、斜長石がinterstitialであるP-typeはF-typeに比較的大量のメルトが浸透的に反応した(メルト-マンタル相互反応を行った) ことにより形成された、と解釈できる (Ohara et al., submitted; Ohara and Stern, submitted).

F-typeの低い部分融解度とP-typeが大量に存在する事実は、パレスベラリフト下の上部マンタルが「冷たかった」ということを示唆している。

上記 (1) - (5) のパレスベラリフトカンラン岩の岩石学的特徴は、大西洋中央海嶺の一般的な海洋底カンラン岩とは顕著に異なり、超低速拡大海嶺である南西インド洋海嶺 (Dick et al., 2002) やマンタルコールドスポットの存在が議論されている赤道大西洋中央海嶺のRomanche断裂帯 (Seyler and Bonatti, 1997) の海洋底カンラン岩に類似している。

海洋底カンラン岩からフロゴサイト・パーガサイトなどのinterstitialな「初生的」含水鉱物が記載された例は極めて限られている。特にフロゴサイトについては、前海洋性リフトのセッティングである紅海Zabargad島のレールズライト (Bonatti et al., 1986) を除くと、大西洋中央海嶺アトランティス断裂帯でドレッジされたハルツバーサイト (Arai and Takahashi, 1987) と、ODP Leg 125で掘削された鳥島前弧海山のハルツバーサイト (Parkinson and Pearce, 1998) の2点があるのみである。ただしArai and Matsukage (1996) とArai et al. (1997) は、ヘスディーブと中央ケイマンライズのハルツバーサイトのスピネル中のインクルージョンとしてのフロゴサイトとパーガサイトを記載している。パレスベラリフトの個々のフロゴサイトは組成のばらつきが大きく、またその出現が一部の試料に限られていること、メルト-マンタル相互反応を免れたF-typeにパーガサイトが出現していることから、パレスベラリフトカンラン岩中の「初生的」含水鉱物は、マンタルメタソマティズムによるものではなく、海底近傍における熱水活動によるものであると結論された (Ohara et al., submitted).

4-2. マリアナトラフカンラン岩

マリアナトラフは、北に向かって拡大軸の伝播が起こっているために、トラフの伸長方向(南北)に沿って、その地球物理学的特徴およびマグマの組成が顕著に異なっている (Martinez et al., 1995; Gribble et al., 1998). そのうち、北緯21-19度40分付近はセントラルグラーベンと呼ばれる4個の非対称な凹地(ハーフグラーベン)から構成さ

れる、背弧リフティングによって形成された地域である (Martinez et al., 1995). セントラルグラーベン内の4つの凹地の一つは、最大水深が5700 mに達し、ドレッジ・潜水船によってカンラン岩・ガブロが採取されている (Fig.3; Southern Basin; Stern et al., 1996, 1997; Ohara et al., 2002b). マリアナトラフではセントラルグラーベンを境にして、その北部では火山弧の影響を受けたリフティングが進行中であり、その南部では背弧海底拡大が進行中である。最新の調査結果によれば、セントラルグラーベン近傍の北緯20 - 19度では、西側へ年間1 cm, 東側へ年間0.6 cmの非対称な拡大が生じていることが明らかになった (Yamazaki et al., 1999). 非マグマ的なリフティングは、セントラルグラーベンのみで進行していると考えられる (Stern et al., 1996). Yamazaki et al. (1999)・山崎俊嗣 (私信) では、セントラルグラーベンを1次のセグメント境界に位置している、と考えている。しかし、現在公表されている地形図 (Yamazaki et al., 1993; Martinez et al., 1995) ではセントラルグラーベンは、非トランスフォーム境界 (non transform discontinuity) (2次セグメント) のセグメント端に位置しているように見える。

マリアナトラフは、活動的背弧海盆の典型として、背弧海盆玄武岩についての多くの研究がなされて来た (Hart et al., 1972; Hawkins and Melchior, 1985; Hawkins et al., 1990; Sinton and Fryer, 1987; Volpe et al., 1987; 1990; Stern et al., 1990; Stolper and Newman, 1994; Gribble et al., 1996; 1998). 一方、カンラン岩・ガブロはセントラルグラーベンでドレッジされ、簡単な報告がなされた (Stern et al., 1996). その結果を受け潜水船による潜航調査が行われ、背弧海盆では初めてとなるカンラン岩の露頭が目視観察され (Stern et al., 1997), カンラン岩・ガブロについて詳細な岩石学的な検討がなされた (Ohara et al., 2002b).

カンラン岩は、一般的な海洋底カンラン岩と同様に著しく蛇紋岩化を被っているが、その多くはポーフィロクラスティック組織を示し、構成鉱物

であるカンラン石・斜方輝石・単斜輝石・スピネルのいずれもが変質を免れたレリクな部分が残されている。カンラン岩のモード組成・鉱物化学組成とも、マリアナトラフカンラン岩は典型的なハルツバーガイトであることを示しているが、パレスベラリフトカンラン岩とは異なり、マリアナトラフカンラン岩は岩相の変化に乏しいことが特徴である。すなわち、マリアナトラフカンラン岩は、多量に存在するハルツバーガイト (壁岩ハルツバーガイト) に、ガブロ質の貫入脈を持つハルツバーガイト (Fig.7b) が少量伴うことが大きな特徴となっている。Ohara et al. (2002b) ではダナイトは発見されていない。

マリアナトラフカンラン岩の岩石学的な特徴を以下の通りまとめることができる (Ohara et al., 2002b) :

- (1) 壁岩ハルツバーガイトのスピネルやマフィック鉱物の組成は、比較的肥沃な海洋底カンラン岩の組成に一致し、スピネルのCr # = 0.25付近に組成集中が見られる (Fig.6),
- (2) 貫入脈を持つハルツバーガイトのスピネルはCr # = 0.25 - 0.35に分布し、TiO₂含有量が有意に高い (Fig.6),
- (3) 壁岩ハルツバーガイトと貫入脈を持つハルツバーガイトのマフィック鉱物を比べると、前者に比べ後者のMg # が有意に小さい。

壁岩ハルツバーガイトが残留岩としてのマリアナトラフカンラン岩であって、MORBタイプソースマンタルの約7%のnear-fractional meltingによって形成されたとモデリングが可能である (Ohara et al., 2002b). 貫入脈の近傍では分化した少量のメルトが壁岩に一方通行的に付加する形態の反応が起こっていると解釈できる (Ohara et al., 2002b). これら (1) - (3) の岩石学的特徴は、大西洋中央海嶺 (特にMARK地域; Mid-Atlantic Ridge Kane) で一般的に記載されている事実 (Niida, 1997) と良く類似している。

4-3. セントラルベースンフォールトカンラン岩

現在既に活動を停止した西フィリピン海盆は、フィリピン海で最大の背弧海盆である。その起源については、「背弧拡大説 (Karig, 1975)」と「トラップされた太平洋底説 (Uyeda and Ben-Avraham, 1972; Hilde and Lee, 1984)」があり、論争が続いていたが、最近の調査結果は背弧拡大説を支持している (Fujioka et al., 1999; Deschamps et al., 2002; Okino and Fujioka, 2003)。西フィリピン海盆の拡大軸は、Hess (1948) によって最初に記載され、「セントラルベースンフォールト」と名づけられた。いずれの起源説にせよ、地磁気異常の同定に基づく解釈では、西フィリピン海盆ではセントラルベースンフォールトにおけるNE-SW拡大が生じた後 (60-45 Ma), N-Sの拡大が生じた (45-35 Ma) された (Hilde and Lee, 1984)。

セントラルベースンフォールトにおいて、潜水船による潜航調査および詳細なマッピング調査が最近行われ、西フィリピン海盆の拡大末期のテクトニクスが明らかになってきた (Fujioka et al., 1999; Deschamps et al., 2002; Okino and Fujioka, 2003)。それら調査結果によれば、セントラルベースンフォールトでは、その伸張方向 (ほぼ東西) に沿って、ジオダイナミックな特徴が大きく変化することが明らかとなった。拡大末期の拡大速度は、低速拡大である年間3.6 cm (両側拡大速度) (Hilde and Lee, 1984) が得られている。しかし、海盆の西部では低速拡大を行ったにも関わらず、重複拡大軸の存在で代表されるように高速拡大軸の特徴を示している (Okino and Fujioka, 2003)。一方、海盆の東部では非トランスフォーム境界による拡大軸のセグメンテーションが見られ、低速拡大を行った事実と調和的である (Okino and Fujioka, 2003)。海盆西部の「高速拡大軸的な特徴」は、ベンナム海台・ウルダネタ海台・ビノグラードフ海山 (Fig. 1) の存在から示唆されるように、小規模なマンテルプルームによる、比較的大規模なマグマ活動によって生じた (Okino and Fujioka, 2003)。現在のセントラルベースンフォ

ールトを形作る深い水深のリフトバレー (最大水深7900 m) はN-S拡大で生じた東西方向の地形のリニアメントを切っており、Deschamps et al. (2002) と Okino and Fujioka (2003) では、N-S拡大の時期の後に再びNE-SWの非マグマ的拡大が生じたことが議論されている。

セントラルベースンフォールトでは、1984年にロシアのR/V Academic Alexander Nesmeyanovによって、カンラン岩をはじめ、玄武岩・ガブロ・角閃岩等の変成岩などがドレッジされた記録があるが詳細な岩石記載はなされていない (Shcheka et al., 1995)。そのドレッジ点は、非マグマ的拡大を行った海盆東方のセグメントS2E (2次セグメント) のセグメント端に位置している (Fig. 4; Okino and Fujioka, 2003)。セグメントS2Eはマンテルブーゲー異常の極大地点に相当し (Okino and Fujioka, 2003)、カンラン岩がドレッジされていることと調和的である。

Shcheka et al. (1995) では、2個のカンラン岩のスピネルの組成のみがリストされている。それによれば、スピネルのCr #は0.3程度であり (Fig. 8), TiO_2 含有量はほとんどゼロである。しかし、これ以上の詳細な岩石学的情報は皆無である。

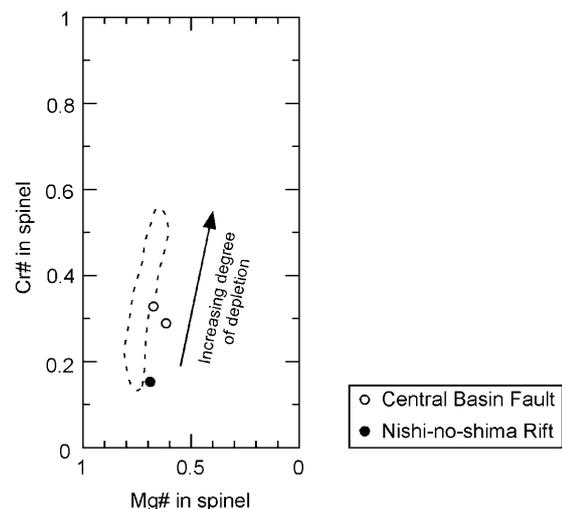


Fig. 8 Spinel compositional plots for Central Basin Fault (after Shcheka et al., 1995) and Nishi-no-shima Rift (after Yuasa et al., 1999a) peridotites, with field for abyssal peridotites indicated by dotted line for comparison (Dick and Bullen, 1984).

4-4. 大町海山カンラン岩（西ノ島リフトカンラン岩）

伊豆・小笠原弧は、孀婦岩構造線（Yuasa, 1985）を境に、その南北でジオダイナミックな特徴に大きな相違が存在する。孀婦岩構造線近傍の火山フロント（七島・硫黄島海嶺）の海山として七曜海山列が分布するが、大町海山は火曜海山の北東約30kmに、火山フロントからやや前弧側に外れて位置する（Fig.5；湯浅ほか, 1999a, b）。大町海山においては、ドレッジが3回、潜水船による潜航調査が4回実施され、そのうち海山南部を切る西落ちの急崖における潜航調査によってカンラン岩が得られている（湯浅ほか, 1999a, b; 富士原ほか, 2001; 新井田ほか, 2001）。

伊豆・小笠原弧の大きな特徴の一つは、火山フロント直近の西方に数個の凹地が存在することである。それらは背弧凹地（backarc depression）として島弧内リフティングの可能性が指摘された（玉木ほか, 1981）。それらの背弧凹地の一つ、スミス凹地（スミスリフト）では掘削前の事前調査（Taylor et al., 1991）、およびODP Leg 126による深海掘削（Fujioka et al., 1992）、によって島弧内リフティングの発達過程が明らかにされた。大町海山は、「海山本体」と、本体から「南方へ延びる地形的高まり」の2つのメンバーから構成され、それらはいずれも西方を西落ちの正断層によって切られている（Fig.5；湯浅ほか, 1999a, b）。大町海山直近の南西方、火曜海山と水曜海山の間にも水深3400mの凹地が発達し、西ノ島リフトと名付けられている（Fig.5；Taylor et al., 1991）。

大町海山の海山本体からドレッジされた安山岩の年代は、32-33Maであり（湯浅ほか, 1999a）、パレスベラ海盆拡大以前の古九州・パラオ海嶺（古伊豆・小笠原弧）の上に形成された火山体であると解釈されている（湯浅ほか, 1999a）。南方へ延びる地形的高まりからは弱変成岩もドレッジされ、パレスベラ海盆のリフティングに先立って存在した海洋性島弧の基盤岩の一部であったと解釈された（Yuasa et al., 1992）。潜航調査によっ

て、南方へ延びる地形的高まりからレーolzライト・ウェールライト・カンラン石単斜輝岩・単斜輝岩・角閃岩が採取された（湯浅ほか, 1999a, b; 新井田ほか, 2001）。

ソノブイを用いた地殻構造データによれば、西ノ島トラフ（Fig. 5; 孀婦岩構造線の東方に沿う谷地形）の北緯27度50分では、モホ面を与える7.9 km/s層の上面が地下約10 kmという浅所に存在しているようである（宮崎, 1985）。Tamaki (1995) は、背弧拡大の開始の前段階として、島弧地殻の伸長が必要であると議論している。湯浅ほか (1999a, b) は、大町海山カンラン岩を「パレスベラ海盆の初期リフティングの際に断片化された海洋性島弧リソフェアの破片」と考えた。しかし、大町海山カンラン岩は、西ノ島リフトを構成する西落ちの正断層（低角デタッチメント断層）沿いに、島弧内リフティングに伴って露出しているのが合理的であろう。その意味で、「大町海山カンラン岩」ではなく、「西ノ島リフトカンラン岩」と記載すべきであろう。

レーolzライトは、一般的な海洋底カンラン岩と同様に著しく蛇紋岩化を被っているが、その多くはプロトグラニューラー組織を示し、カンラン石・斜方輝石・単斜輝石・スピネルのいずれもが変質を免れたレリックな部分が残されている（新井田ほか, 2001）。ウェールライト・カンラン石単斜輝岩・単斜輝岩は、明瞭な集積岩の組織を示す（新井田ほか, 2001）。レーolzライト中には、カンラン石単斜輝岩の貫入脈を認めることができる（新井田ほか, 2001）。貫入脈には角閃石を伴う場合があり、その場合は角閃石単斜輝岩の貫入脈となっている（新井田ほか, 2001）。角閃岩とレーolzライトの露頭における関係は不明であるが、鏡下における観察では、角閃岩の角閃石と、レーolzライトに貫入した角閃石単斜輝岩の角閃石とは区別できない（新井田ほか, 2001）。

西ノ島リフトカンラン岩の岩石学的特徴は次の通りまとめることができる：

(1) レールolzライトのスピネルの組成は最も肥沃

- な海洋底カンラン岩の組成に一致し, Cr # = 0.15である (Fig. 8; 湯浅ほか, 1999a),
- (2) レールズライトのその他のマフィック鉱物も比較的肥沃な組成を示す. 単斜輝石の組成は, ほぼ大西洋中央海嶺カンラン岩に一致するが, TiO₂量は広いばらつきが存在する (新井田ほか, 2001),
 - (3) 角閃石単斜輝岩脈を持つレールズライトのカンラン石にはMg #の減少が認められる (最小約Mg # = 0.88) (新井田ほか, 2001),
 - (4) ウェールライトのカンラン石は, 鉄に富み (Mg # = 0.87-0.89) (新井田ほか, 2001), やや分化した集積岩であることを示している,
 - (5) レールズライトのカンラン石は cleavable olivine (Hawkes, 1946) である場合が多い (新井田ほか, 2001),
 - (6) 角閃岩や角閃石単斜輝岩の角閃石は, エデナイト質である (新井田ほか, 2001). これらは, Naに富む, 高温・高圧タイプの角閃石 (Niida and Green, 1999) で, 上部マントルカンラン岩と平衡共存可能であることを示している (新井田ほか, 2001).

上記 (1) - (4) の岩石学的特徴は, マリアナトラフカンラン岩のものに類似している. 一方, cleavable olivineやエデナイト質角閃石の存在は, マリアナ海溝前弧蛇紋岩海山 (Ishii et al., 1992) や, 南部マリアナ海溝陸側斜面 (Ohara and Ishii, 1998) から報告されている. 大江山カンラン岩体において, 宇田 (1984) は cleavable olivineの成因を花崗岩の貫入による接触変成作用に求めた. マリアナ海溝前弧蛇紋岩海山・南部マリアナ海溝陸側斜面や西ノ島リフトにおいて, そのような熱源を求めることは困難であり, 接触変成作用以外にも cleavable olivineが生成することを示している. Cleavable olivineやエデナイト質角閃石は, 純粋な「背弧拡大系」に比べ, より流体 (水) の付加の影響があったことを示しているのかも知れない. その成因の説明は今後の課題である.

5. 議論

5-1. 背弧拡大系におけるマントルプロセスとそのグローバルな意義

パレスベラリフトの顕著なテクトニックな特徴 (メガマリオンがセグメント全体に発達していること・カンラン岩がセグメント中央に露出していること) と, パレスベラリフトカンラン岩の岩石学的特徴が, 大西洋中央海嶺の一般的な海洋底カンラン岩とは顕著に異なることから, Ohara and Stern (submitted) はパレスベラリフトにおけるマントルプロセスは, 「特殊な」セグメント中央におけるプロセスであると解釈した. 一般にセグメント中央部は, 海嶺システム全体の中でマグマ活動が最も活発な箇所である (Lin et al., 1990). しかし, 超低速拡大海嶺である南西インド洋海嶺では, セグメント中央部におけるカンラン岩の露出が報告されており (10° -16° Eの "oblique supersegment"; Dick et al., 2002), セグメント中央が非マグマ的に拡大する時期が存在していることを示している. 南西インド洋海嶺で知られる一般に肥沃な組成のカンラン岩は, そのような時期を代表するものであろう. 一方, セグメント中央部においてマグマ活動が再開したときに, 肥沃な組成のカンラン岩と比較的大量のメルトが浸透的に反応し, 含斜長石カンラン岩が形成され, メルトの抽出通路はダナイトとして残ったと解釈できる.

すなわち「パレスベラリフト型マントルプロセス」は, 一般的には超低速拡大海嶺に期待される, セグメント中央における特殊なマントルプロセスであり, 基本的には, 肥沃な組成のカンラン岩・含斜長石カンラン岩・ダナイトという岩相で代表される (Ohara and Stern, submitted).

パレスベラリフトにおいては, 短い1次セグメントが密に分布する断裂帯に挟まれたセッティングが顕著である (Fig. 2; Ohara et al., 2001; submitted; Ohara and Stern, submitted). そのような短い1次セグメントは, トランスフォーム断層効果 (e.g., Phipps Morgan and Forsyth, 1988;

Ghose et al., 1996) がより一層顕著に作用したことにより、「冷たい」上部マントルが出現したことが予想される(トランスフォームサンドイッチ効果仮説; Ohara et al., submitted; Ohara and Stern, submitted). パレスベラリフトにおいては、比較的高速拡大を行ったにも関わらず、トランスフォームサンドイッチ効果によって、短い1次セグメント全長に渡り非マグマ的に拡大する時期が出現したのであろう。この仮説によって、セグメント全長に発達するメガマリオンが存在や、セグメント中央部に産出するカンラン岩と、その肥沃な組成を合理的に説明可能である。一方、超低速拡大海嶺と同様に、セグメント中央部においてマグマ活動が再開したときに、肥沃な組成のカンラン岩と比較的大量のメルトが浸透的に反応し、含斜長石カンラン岩が形成され、メルトの抽出通路はダナイトとして残ったと解釈できる(Ohara et al., 2001; submitted; Ohara and Stern, submitted). パレスベラリフトにおける、再開したマグマ活動の痕跡は、幾つかのセグメント(S1, S2, S6; Fig. 2)に見られる neovolcanic zone (Ohara et al., 2001) として残されている。

ヘスディーブでは高速拡大海嶺である東太平洋海膨の上部マントルが露出していると考えられ、ハルツバーガイト・トロクトライト・ダナイトという岩相で特徴付けられる(Arai and Matsukage, 1996; Dick and Natland, 1996). 西方へ伝播性拡大を行っているココス・ナスカ海嶺の先端部が東太平洋海膨のセグメント中央に衝突している地点にヘスディーブが存在していると考えられる(Hey et al., 1972). トランスフォーム断層効果は、伝播性拡大軸の先端部においても存在することが議論されている(Sinton et al., 1983). すなわち、ヘスディーブは、定常的にマグマ活動が活発な東太平洋海膨のセグメント中央に伝播性拡大軸が衝突することによって生じた、特殊なセグメント中央のセッティングであり、それゆえパレスベラリフト型マントルプロセスが作用していると解釈できる(Ohara and Stern, submitted). ヘスディーブにおけるトロクトライトは、含斜長

石カンラン岩に対応すると解釈可能であり、ヘスディーブはパレスベラリフト型の岩相で代表されている。

一方、マリアナトラフカンラン岩は、MARK地域の海洋底カンラン岩の岩石学的特徴(Niida, 1997)に良く類似している(Ohara and Stern, submitted). MARK地域は1次セグメント末端部として、RTIの典型的な特徴を示す(Karson et al., 1987; Cannat et al., 1995; Tucholke et al., 1998). セグメント末端部は、セグメント中央部に比べ、一般にマグマ生産量が小さい(Lin et al., 1990). すなわち「マリアナトラフ型マントルプロセス」は、一般的な低速拡大海嶺のRTIにおける伝導的に冷却されたリソスフェリックな上部マントルにおける、マグマに乏しいプロセスを示している(Ohara and Stern, submitted). マリアナトラフにおいては、トランスフォーム断層は認められないので、マリアナトラフカンラン岩は、実際には非トランスフォーム境界の2次セグメント末端部におけるそのようなマントルプロセスを代表していると解釈できる。セグメント末端部では、未熟かつ一時的なマグマ溜りを構成する分化した少量のメルトが、マグマ溜りを囲む壁岩であるカンラン岩に貫入し、限られた範囲のみに一方通行的な組成変化をもたらすと考えられる。すなわちマリアナトラフ型マントルプロセスは、基本的には、大量に存在する組成の一樣なカンラン岩(壁岩カンラン岩)・分化したガブロ質の貫入脈を持つ少量のカンラン岩という岩相で代表される(Ohara and Stern, submitted).

セントラルベースンフォールトカンラン岩のデータは極めて限られているが、非トランスフォーム境界に産出しているようであり、マリアナトラフ型マントルプロセスが支配していたことが予想できる。また、新井田ほか(2001)のデータによれば、西ノ島リフト下のマントルプロセスがマリアナトラフ型であることを示している。

高速拡大海嶺である東太平洋海膨の上部マントルは、ヘスディーブ以外にはギャレー断層帯に産出しており(Constantin, 1999), マリアナトラフ

型マントルプロセスに期待される岩相を示す (Ohara and Stern, submitted). ギャレー断裂帯では, 高速拡大海嶺である東太平洋海膨が, トランスフォーム断層効果によって, 低速拡大海嶺の RTI と同様なセッティングが達成され, マリアナトラフ型マントルプロセスが発生しているのであろう (Ohara and Stern, submitted).

5-2. フィリピン海ウェッジマントルの組成

Bloomer and Hawkins (1983), Ishii (1985), Ishii et al. (1992), Ohara and Ishii (1998), Parkinson and Pearce (1998) などによって, 沈み込み帯 (前弧) のカンラン岩は, 一般にスピネルの Cr # = 0.6 を超える枯渇した組成であることが明らかになっている. Bonatti and Michael (1989) のコンパイルでは, 背弧海盆カンラン岩のデータが欠落しており, 背弧海盆カンラン岩が, 沈み込み帯 (前弧) の性質を持つのか, あるいは海底拡大系の性質を持つのか, 不明であった. 現状ではデータの数が極めて限られており確定的なことを断言できる段階にはないが, 本論で概観して来たように, フィリピン海背弧海盆のカンラン岩は第一次近似的には, 枯渇の程度が小さく, 低速拡大海嶺の上部マントルカンラン岩に類似する, と結論できる (Ohara and Stern, submitted).

本レビューによって明らかになった事実は, フィリピン海背弧海盆のオリジナルなウェッジマントルの組成は相当に均質である可能性がある, ということである. すなわち, ウェッジマントルの組成は, 前弧域のみ枯渇度が高いが, 島弧下あるいは背弧拡大系下の上部マントルは基本的に枯渇の程度は低い. すなわち, ウェッジマントルは, 一般には肥沃な上部マントルから構成されており, 見掛け上の枯渇程度の変化は, マントルカンラン岩とメルト・流体との相互反応や, リソスフェア浅部におけるテクトニクスによってもたらされる, と結論できるであろう.

6. 結論

現段階では限られたデータしか存在しないが,

フィリピン海背弧拡大系のマントルカンラン岩研究をレビューし以下のことが明らかになった:

- (1) フィリピン海背弧拡大系のカンラン岩は, パレスベラリフト, マリアナトラフ, セントラルベースンフォールト, 西ノ島リフト (大町海山) から得られている. それらは, いずれもスピネルの Cr # が小さく (0.15 - 0.5), 第一次近似としては, 枯渇の程度は小さく, 低速拡大海嶺の上部マントルカンラン岩に類似する, と結論できる.
- (2) パレスベラリフトにおいては, 「トランスフォームサンドイッチ効果」によって, 「冷たい」上部マントルが達成され, マントルはほとんど部分融解をしていない.
- (3) パレスベラリフトにおいては, 「トランスフォームサンドイッチ効果」のために, 1次セグメント中央部において, カンラン岩が露出している. セグメント中央部において, カンラン岩はメルトと浸透的に反応し含斜長石カンラン岩を形成し, 上部マントル中のメルトの抽出チャンネルとしてダナイトが形成された, と解釈できる (パレスベラリフト型マントルプロセス). パレスベラリフト型マントルプロセスは, 一般的には超低速拡大海嶺に期待される, セグメント中央におけるマントルプロセスである.
- (4) マリアナトラフにおいては, 一般的な低速拡大海嶺と同様のマントルプロセスが進行中である. すなわち, RTI におけるローカルに「冷たい」環境の下で, 分化した少量のメルトが壁岩のカンラン岩に一方通行的に付加する形のマントルプロセスが起こっている (マリアナトラフ型マントルプロセス).
- (5) セントラルベースンフォールトカンラン岩のデータは極めて限られているが, 非トランスフォーム境界に産出しているようであり, マリアナトラフ型のマントルプロセスが支配していたことが予想できる.
- (6) 西ノ島リフト (大町海山) カンラン岩は, 火山フロント近傍の「島弧内リフティング」の

セッティングを表わしている。岩石学的性質は、マリアナトラフ型マントルプロセスによる結果として理解できる一方で、cleavable olivineやエデナイト質角閃石の存在は、マリアナ海溝前弧蛇紋岩海山・南部マリアナ海溝陸側斜面のカンラン岩に極めて類似している。Cleavable olivineやエデナイト質角閃石は、純粋な「背弧拡大系」に比べ、より流体(水)の付加の影響があったことを示しているのかも知れない。

謝 辞

玉木賢策・石井輝秋・徳山英一・沖野郷子(東京大学海洋研究所)・小澤一仁(東京大学)・荒井章司(金沢大学)・Robert J. Stern(テキサス大学ダラス校)・Henry J. B. Dick・Nobumichi Shimizu(ウッズホール海洋研究所)・藤岡換太郎(海洋科学技術センター)・吉田剛・加藤幸弘(海上保安庁海洋情報部)・山崎俊嗣(産業技術総合研究所)・坂本尚義(東京工業大学)各博士らに、本論に関連して日々の励まし・議論を頂いた。西澤あずさ博士(海上保安庁海洋情報部)には、伊豆・小笠原弧の地殻構造について議論して頂いた。新井田清信博士(北海道大学)の査読により、本論は改善された。

要 約

フィリピン海背弧海盆拡大系のマントルカンラン岩についてのレビューを行った。現在までにカンラン岩試料が得られているフィリピン海背弧海盆拡大系は、パレスベラリフト・マリアナトラフ・セントラルベースンフォールト・西ノ島リフトである。パレスベラリフトとマリアナトラフ下のマントルプロセスには顕著な相違が存在し、それぞれパレスベラリフト型・マリアナトラフ型マントルプロセスと名付けられている。前者は、超低速拡大海嶺に期待される、拡大セグメント中央における特殊なプロセスで、基本的に肥沃なカンラン岩・含斜長石カンラン岩・ダナイトという岩相で特徴づけられる。後者は、低速拡大海嶺の海

嶺軸・トランスフォーム断層会合点における一般的なプロセスで、基本的に大量に存在する組成の一般的なカンラン岩(壁岩カンラン岩)・分化したガブロ質の貫入脈を持つ少量のカンラン岩という岩相で特徴づけられる。いずれにせよ、フィリピン海背弧海盆のカンラン岩は第一次近似的には、枯渇の程度が小さく、低速拡大海嶺の上部マントルカンラン岩に類似する、と結論できる。

引 用 文 献

- 荒井章司, オフィオライトかんらん岩の成因, 地学雑誌, 98, 45-54, 1989.
- 荒井章司, 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, 1995.
- 荒井章司, マントル/マグマ相互反応の重要性, 火山, マグマ特別号, 42, S87-S95, 1997.
- 荒井章司, 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, 1999.
- Arai, S., and K. Matsukage, Petrology of the gabbro-troctolite-peridotite complex from Hess Deep, Equatorial Pacific: implications for mantle-melt interaction within the oceanic lithosphere, in Proc. ODP Sci. Results, 147, edited by C. Mével, K. M. Gillis, J. F. Allan, and P. S. Meyer, pp. 135-155, Ocean Drilling Program, College Station, TX, 1996.
- Arai, S., K. Matsukage, E. Isobe, and S. Vysotskiy, Concentration of incompatible elements in oceanic mantle: effect of melt/wall interaction in stagnant or failed melt conduits within peridotite, Geochim. Cosmochim. Acta, 61, 671-675, 1997.
- Arai S., and N. Takahashi, Phlogopites in the solid intrusive peridotites; their modes of occurrence and chemical characteristics, Sci. Rept. Inst. Geosci. Univ. Tsukuba, Sec. B, 8, 75-92, 1987.
- Aumento, F., and H. Loubat, The Mid-Atlantic Ridge near 45° N, XVI: serpentinized ultra-

- mafic intrusions, *Can. J. Earth Sci.*, 8, 631-663, 1970.
- Blackman, D., J. R. Cann, B. Janssen, and D. Smith, Origin of extensional core complexes: evidence from the Mid-Atlantic Ridge at Atlantis Fracture Zone, *J. Geophys. Res.*, 103, 21315-21333, 1998.
- Bloomer, S.H., and J. W. Hawkins, 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 D. E. Hayes, pp. 294-317, *Geophys. Monogr.*, 27, AGU, Washington, D. C., 1983.
- Bogdanov, N. (Ed.) (Shipboard Party), Initial report of the geological study of the oceanic crust of the Philippine Sea floor: investigations by the international working group on the IGCP project "Ophiolites" (R/V Dmitry Mendeleev cruise 17, June-August 1976), *Ophiolites*, 2, 137-168, 1977.
- Bonatti, E., and P. Michael, Mantle peridotites from continental rifts to ocean basins to subduction zones, *Earth Planet. Sci. Lett.*, 91, 297-311, 1989.
- Bonatti, E., M. Seyler, J. Channell, J. Giraudeau, and G. Mascle, Peridotites drilled from the Tyrrhenian Sea, ODP Leg 107, in *Proc. ODP Sci. Results*, 107, edited by K. A. Kastens, J. Mascle et al., pp. 37-47, Ocean Drilling Program, College Station, TX, 1990.
- Bonatti E., G. Ottonello, and P. R. Hamlyn, Peridotites from the island of Zabargad (St. John), Red Sea: petrology and geochemistry, *J. Geophys. Res.*, 91, 599-631, 1986.
- Bonatti, E., A. Peyve, P. Kepezhinskas, N. Kurentsova, M. Seyler, S. Skolotnev, S., and G. Udintsev, Upper mantle heterogeneity below the Mid-Atlantic Ridge, 0° -15° N. *J. Geophys. Res.*, 97, 4461-4476, 1992.
- Cann, J. R., D. K. Blackman, D. K. Smith, E. McAllister, B. Janssen, S. Mello, E. Avgerinos, A. R. Pascoe, and J. Escartín, Corrugated slip surfaces formed at ridge-transform intersections on the Mid-Atlantic Ridge, *Nature*, 385, 329-332, 1997.
- Cannat, M., C. Mével, M. Maia, C. Deplus, C. Durand, P. Gente, P. Agrinier, A. Belarouchi, G. Dubuisson, E. Humler, and J. Reynolds, Thin crust, ultramafic exposures, and rugged faulting patterns at the Mid-Atlantic Ridge (22° -24° N), *Geology*, 23, 49-52, 1995.
- Constantin, M., Gabbroic intrusions and magmatic metasomatism in harzburgites from the Garrett transform fault: implications for the nature of the mantle-crust transition at fast-spreading ridges, *Contrib. Mineral. Petrol.*, 136, 111-130, 1999.
- Deschamps, A., K. Okino, and K. Fujioka, Late amagmatic extension along the central and eastern segments of the West Philippine Basin fossil spreading axis, *Earth. Planet. Sci. Lett.*, 203, 277-293, 2002.
- Dietrich, V., R. Emmermann, R. Oberhansli, and H. Puchelt, Geochemistry of basaltic and gabbroic rocks from the west Mariana Trench, *Earth Planet. Sci. Lett.*, 39, 127-144, 1978.
- Dick, H. J. B., Abyssal peridotites, very slow spreading ridges and ocean ridge magmatism, in *Magmatism in the ocean basins*, edited by A. D. Saunders, and M. J. Norry, pp. 71-105, *Geol. Soc. Spec. Pub.* 42, 1989.
- Dick, H. J. B., and T. Bullen, Chromian spinel as a petrogenetic indicator in abyssal and alpine-type peridotites and spatially associated lavas, *Contrib. Mineral. Petrol.*, 86, 54-76, 1984.
- Dick, H.J.B., R. L. Fisher, R.L., and W. B. Bryan, Mineralogic variability of the uppermost

- mantle along mid-ocean ridges, *Earth Planet. Sci. Lett.*, 69, 88-106, 1984.
- Dick, H. J. B., J. Lin, and H. Schouten, Amagmatic and magmatic spreading in an ultra-slow-spreading environment, in *InterRidge Southwest Indian Ridge Workshop (Southampton) Abstr.*, 2002.
- Elthon, D., Petrology of gabbroic rocks from Mid-Cayman Rise spreading center, *J. Geophys. Res.*, 92, 658-682, 1987.
- Faccenna, C., F. Funiciello, D. Giardini, and P. Lucente, Episodic back-arc extension during restricted mantle convection in the Central Mediterranean, *Earth Planet. Sci. Lett.*, 187, 105-116, 2001.
- Fujioka, K., K. Okino, T. Kanamatsu, Y. Ohara, O. Ishizuka, S. Haraguchi, and T. Ishii, An enigmatic extinct spreading center in the West Philippine backarc basin unveiled, *Geology*, 27, 1135-1138, 1999.
- 富士原敏也・湯浅真人・渡辺暉夫・新井田清信・西村昭・坂本泉・石塚治・今村牧子・佃薫・伊豆・小笠原弧, 孀婦岩構造線周辺の潜航調査, *JAMSTEC 深海研究*, 18, 71-82, 2001.
- Ghose, I., M. Cannat, and M. Seyler, Transform fault effect on mantle melting in the MARK area (Mid-Atlantic Ridge south of the Kane transform), *Geology*, 24, 1139-1142, 1996.
- Gribble, R.F., R. J. Stern, S. H. Bloomer, D. Stuben, T. O'Hearn, and S. Newman, MORB mantle and subduction components interact to generate basalts in the southern Mariana Trough backarc basin, *Geochim. Cosmochim. Acta*, 60, 2153-2166, 1996.
- Gribble, R.F., R. J. Stern, S. Newman, S. H. Bloomer, and T. O'Hearn, Chemical and isotopic composition of lavas from the northern Mariana Trough: implications for magmagenesis in backarc basins, *J. Petrol.*, 39, 125-154, 1998.
- Hart, S. R., W. E. Glassley and D. E. Karig, Basalts and sea floor spreading behind the Mariana Island Arc, *Earth Planet. Sci. Lett.* 15, 12-18, 1972.
- Hawkes, H. E., Jr., Olivine from northern California showing perfect cleavage, *Am. Mineral.* 31, 276-283, 1946.
- Hawkins, J. W., J. D. Macdougall, and A. M. Volpe, Petrology of the axial ridge of the Mariana Trough backarc spreading center, *Earth Planet. Sci. Lett.*, 100, 226-250, 1990.
- Hawkins, J. W., and J. T. Melchior, Petrology of Mariana Trough and Lau Basin basalts, *J. Geophys. Res.*, 90, 11431-11468, 1985.
- Hey, R. N., K. S. Deffeyes, G. L. Johnson, A. Lowrie, The Galapagos triple junction and plate motions in the East Pacific, *Nature*, 237, 20-22, 1972.
- Hess, H. H., Major structural features of the western north Pacific, and interpretation of H.O. 5989 bathymetric chart, Korea to New Guinea, *Geol. Soc. Am. Bull.*, 59, 417-446, 1948.
- Hilde, T. W. C., and C. S. Lee, Origin and evolution of the West Philippine Basin: a new interpretation, *Tectonophysics*, 102, 85-104, 1984.
- Ishii, T., Dredged samples from the Ogasawara fore-arc seamount, or "Ogasawara paleoland"- "Fore-arc ophiolite", in *Formation of active ocean margins*, in *Formation of active ocean margins*, edited by n. Nasu, K. Kobayashi, S. Uyeda, I. Kushiro, and H. Kagami, pp. 307-342, Terra Sci. Pub. Co. (Terrapub), Tokyo, 1985.
- Ishii, T., P. T. Robinson, H. Maekawa, and R. Fiske, Petrological studies of peridotites from diapiric serpentinite seamounts in the Izu-Ogasawara-Mariana forearc, Leg 125, in *Proc. ODP Sci. Results*, 125, edited by P. Fryer, J. A. Pearce, L. B. Stokking et al., pp.

- 445-485, Ocean Drilling Program, College Station, TX, 1992.
- Johnson, K. T. M., H. J. B. Dick, and N. Shimizu, Melting in the oceanic upper mantle: an ion microprobe study of diopsides in abyssal peridotites, *J. Geophys. Res.*, 95, 2661-2678, 1990.
- Karson, J. A., G. Thompson, S. E. Humphris, J. M. Edmond, W. B. Bryan, J. R. Brown, A. T. Winters, R. A. Pockalny, J. F. Casey, A. C. Campbell, G. Klinkhammer, M. R. Palmer, R. J. Kinzler, and M. M. Sulanowska, Along-axis variations in seafloor spreading in the MARK area, *Nature*, 328, 681-685, 1987.
- Kasuga, S., and Y. Ohara, A new model of back-arc spreading in the Parece Vela Basin, northwest Pacific margin, *The Island Arc*, 6, 316-326, 1997.
- Kelemen, P. B., N. Shimizu, V. J. M. Salters, Extraction of mid-ocean-ridge basalt from the upwelling mantle by focused flow of melt in dunite channels, *Nature*, 375, 747-753, 1995.
- Lin, J., G. M. Purdy, H. Schouten, J.-C. Sempere, and C. Zervas, Evidence from gravity data for focused magmatic accretion along the Mid-Atlantic Ridge, *Nature*, 344, 627-623, 1990.
- Martinez, F., P. Fryer, N. A. Baker, and T. Yamazaki, Evolution of backarc rifting: Mariana Trough, 20°-24° N, *J. Geophys. Res.*, 100, 3807-3827, 1995.
- Michael, P. J., and E. Bonatti, Peridotite composition from the North Atlantic: regional and tectonic variations and implications for partial melting, *Earth Planet. Sci. Lett.*, 73, 91-104, 1984.
- Mitchell, N., J. Escartín, and S. Allerton, Detachment faults at mid-ocean ridges garner interest, *EOS Trans. AGU*, 79, 127, 1998.
- Miyashiro, A., F. Shido, and M. Ewing, Composition and origin of serpentinites from the Mid-Atlantic Ridge near 24° and 30° north latitude, *Contrib. Mineral. Petrol.*, 23, 117-127, 1969.
- 宮崎光旗, 4) ソノブイによる屈折法探査, 海底熱水活動に伴う重金属資源の評価手法に関する研究 (昭和59年度研究報告書), 地質調査所, 23-25/70-71/99, 1985.
- Mrozowski, C. L., and D. Hayes, The evolution of the Parece Vela Basin, eastern Philippine Sea, *Earth Planet. Sci. Lett.*, 46, 49-67, 1979.
- Niida, K., Mineralogy of MARK peridotites: replacement through magma channeling examined from Hole 920D MARK area, in *Proc. ODP Sci. Results*, 153, edited by J. A. Karson, M. Cannat, D. J. Miller, and D. Elthon, pp. 265-275, Ocean Drilling Program, College Station, TX, 1997.
- 新井田清信・湯浅 真人・西村昭・富士原敏也・渡辺暉夫, 大町海山の蛇紋岩-伊豆・小笠原弧の基盤リソスフェアの性質, *JAMSTEC 深海研究*, 19, 77-86, 2001.
- Niu, Y., and R. Hekinian, Spreading-rate dependence of the extent of mantle melting beneath ocean ridges, *Nature*, 385, 326-329, 1997.
- Ohara, Y., K. Fujioka, T. Ishii, and H. Yurimoto, submitted.
- Ohara, Y., and T. Ishii, Peridotites from the southern Mariana forearc: heterogeneous fluid supply in mantle wedge, *The Island Arc*, 7, 541-558, 1998.
- Ohara, Y., S. Kasuga, and T. Ishii, Peridotites from the Parece Vela Rift in the Philippine Sea: upper mantle material exposed in an extinct backarc basin, *Proc. Japan Acad., Series B* 72, 118-123, 1996.
- Ohara, Y., S. Kasuga, K. Okino, and Y. Kato, Survey maps Philippine Sea structure, *EOS*

- Trans. AGU, 78, 555, 1997.
- Ohara, Y., and R. J. Stern, submitted.
- Ohara, Y., J. E. Snow, K. Okino, and K. Fujioka, Kairei KR03-01: mantle peridotite in a backarc basin setting, *InterRidge News*, 11 (2), 34-37, 2002a.
- Ohara, Y., R. J. Stern, T. Ishii, H. Yurimoto, and T. Yamazaki, Peridotites from the Mariana Trough: first look at the mantle beneath an active backarc basin, *Contrib. Mineral. Petrol.*, 143, 1-18, 2002b.
- Ohara, Y., T. Yoshida, Y. Kato, and S. Kasuga, Giant megamullion in the Parece Vela backarc basin, *Mar. Geophys. Res.*, 22, 47-61, 2001.
- 小原泰彦・吉田剛・加藤幸広・春日茂, パレスベラ海盆の特異な地形, *水路部研究報告*, 37, 9-18, 2001.
- Okino, K., and K. Fujioka, The Central Basin Spreading Center, the Philippine Sea: structure of an extinct spreading center and implications for marginal basin formation, *J. Geophys. Res.*, 108 (B1), 2040, DOI:10.1029/2001JB001095, 2003.
- Okino, K., S. Kasuga, and Y. Ohara, A new scenario of the Parece Vela Basin Genesis, *Mar. Geophys. Res.*, 20, 21-40, 1998.
- Okino, K., Y. Ohara, S. Kasuga, and Y. Kato, The Philippine Sea: new survey results reveal the structure and the history of the marginal basins, *Geophys. Res. Lett.*, 26, 2287-2290, 1999.
- Okino, K., Y. Shimakawa, and S. Nagaoka, Evolution of the Shikoku Basin, *J. Geomag. Geoelectr.*, 46, 463-479, 1994.
- 小沢一仁, 超苦鉄質岩から見た海嶺下の上部マントル, *月刊地球*, 8, 476-479, 1986.
- 小沢一仁・川幡穂高・中西正男, 海洋底形成論と拡大速度, *科学*, 60, 661-669, 1990.
- Parkinson, I. J., and J. A. Pearce, Peridotites from the Izu-Bonin-Mariana forearc (ODP Leg 125): evidence for mantle melting and melt-mantle interaction in a supra-subduction zone setting, *J. Petrol.*, 39, 1577-1618, 1998.
- Perfit M. R., and B. C. Heezen, *Geol. Soc. Am. Bull.*, 89, 1155-1174, 1978.
- Phipps Morgan, J., and D. W. Forsyth, Three-dimensional flow and temperature perturbations due to a transform offset: effects on oceanic crustal and upper mantle structure, *J. Geophys. Res.*, 93, 2955-2966, 1988.
- 坂本泉・富士原敏也・石塚治, 伊豆・小笠原弧, 孺婦岩構造線地域の地形・地質的特徴, *JAM-STECC 深海研究*, 18, 55-69, 2001.
- Sandwell, D.T., and W. H. F. Smith, Marine gravity anomaly from Geosat and ERS 1 satellite altimetry, *J. Geophys. Res.*, 102, 10039-10054, 1997.
- Seyler, M., and E. Bonatti, Regional-scale melt-rock interaction in lherzolitic mantle in the Romanche Fracture Zone (Atlantic Ocean), *Earth Planet. Sci. Lett.*, 146, 273-287, 1997.
- Shcheka, S. A., S. V. Vysotskiy, V. T. S'edin, and I. A. Tararin, Igneous rocks of the main geological structures of the Philippine Sea floor, in *Geology and geophysics of the Philippine Sea*, edited by H. Tokuyama, S. Shcheka, N. Isezaki, S. Vysotskiy, R. Kulinich, B. Karp, E. Lelikov, K. Fujioka, and G. Liu, pp. 251-278, Terra Sci. Pub. Co. (Terrapub), Tokyo, 1995.
- Sinton, J. M., and P. Fryer, Mariana Trough lavas from 18°N: implications for the origin of back arc basin basalts, *J. Geophys. Res.*, 92, 12782-12802, 1987.
- Sinton, J. M., D. S. Wilson, D. M. Christie, R. N. Hey, J. T. Delaney, Petrologic consequences of rift propagation on oceanic spreading centers, *Earth Planet. Sci. Lett.*, 62, 193-207, 1983.
- Smith, W. H. F., and D. T. Sandwell, Global seafloor topography from satellite altimetry

- and ship depth soundings, *Science*, 277, 1957-1962, 1997.
- Stern, R. J., S. H. Bloomer, F. Martinez, T. Yamazaki, and T. M. Harrison, The composition of backarc basin lower crust and upper mantle in the Mariana Trough: a first report, *The Island Arc*, 5, 354-372, 1996.
- Stern, R. J., P. Lin, J. D. Morris, M. C. Jackson, P. Fryer, S. H. Bloomer, and E. Ito, Enriched backarc basin basalts from the northern Mariana Trough: implications for the magmatic evolution of backarc basins, *Earth Planet. Sci. Lett.*, 100, 210-225, 1990.
- Stern, R. J., T. Yamazaki, S. Danishwar, and C.-H. Sun, Backarc basin lower crust and upper mantle in the northern Mariana Trough studied with "Shinkai 6500", *JAMSTEC J. Deep Sea Res.*, 13, 47-61, 1997.
- Stolper, E. and S. Newman, The role of water in the petrogenesis of Mariana Trough magmas, *Earth Planet. Sci. Lett.*, 121, 293-325, 1994.
- 玉木賢策・井上英二・湯浅真人・棚橋 学・本座 栄一, 小笠原弧の第四紀背弧拡大活動の可能性について, *月刊地球*, 3, 421-431, 1981.
- Tamaki, K., Opening tectonics of the Japan Sea, in *Backarc basins: tectonics and magmatism*, edited by B. Taylor, pp. 407-420, Plenum Press, New York, 1995.
- Tamaki, K., and E. Honza, Global tectonics and formation of marginal basins: role of the western Pacific, *Episodes*, 14, 224-230, 1991.
- Taylor, B., A. Klaus, G. R. Brown, G. F. Moore, Y. Okamura, and F. Murakami, Structural development of Sumisu Rift, Izu-Bonin arc, *J. Geophys. Res.*, 96, 113-129, 1991.
- Tucholke, B., J. Lin, and M. Kleinrock, Megamullions and mullion structure defining oceanic metamorphic core complexes on the Mid-Atlantic Ridge, *J. Geophys. Res.*, 103, 9857-9866, 1998.
- 宇田聡, 大江山超塩基性岩体のカコウ岩による接触変成作用および"cleavable olivine"の成因について, *地質雑*, 90, 393-410, 1984.
- Uyeda, S., and Z. Ben-Avraham, Origin and development of the Philippine Sea, *Nature*, 240, 176-178, 1972.
- Volpe, A. M., J. D. Macdougall, and J. W. Hawkins, Mariana Trough basalts (MTB): trace element and Sr-Nd isotopic evidence for mixing between MORB-like and arc-like melts, *Earth Planet. Sci. Lett.*, 82, 241-254, 1987.
- Volpe, A. M., J. D. Macdougall, G. W. Lugmair, J. W. Hawkins, and P. Lonsdale, Fine-scale isotopic variation in Mariana Trough basalts: evidence for heterogeneity and a recycled component in backarc basin mantle, *Earth Planet. Sci. Lett.*, 100, 251-264, 1990.
- Yamazaki, T., F. Murakami, and E. Saito, Mode of seafloor spreading in the northern Mariana Trough, *Tectonophys*, 221, 207-222, 1993.
- Yamazaki, T., K. Okino, Y. Hasegawa, H. Saitake, and M. Ito, Geophysical mapping of Mariana Trough and West Philippine Basin: a preliminary report of Kairei KR98-12 cruise, *JAMSTEC J. Deep Sea Res.*, 15 (II), 63-72, 1999.
- Yuasa, M., Sofugan Tectonic Line, a new tectonic boundary separating northern and southern parts of the Ogasawara (Bonin) arc, northwest Pacific, in *Formation of active ocean margins*, edited by N. Nasu, K. Kobayashi, S. Uyeda, I. Kushiro, and H. Kagami, pp. 483-496, Terra Sci. Pub. Co. (Terrapub), Tokyo, 1985.
- 湯浅真人・西村昭・新井田清信・石塚治, 伊豆・小笠原弧中央部, 火山フロント近傍の第三系一大町海山の地質, *月刊地球*, 号外23, 107-115, 1999a.
- 湯浅真人・西村昭・新井田清信・石塚治, もう一

つの島弧蛇紋岩海山 (しんかい6500 # 341 潜航), JAMSTEC 深海研究, 14, 269-277, 1999b.

Yuasa, M., and M. Nohara, Petrographic and geochemical along-arc variations of volcanic rocks on the volcanic front of the Izu-Ogasawara (Bonin) arc, Bull. Geol. Surv. Japan, 43, 421-456, 1992.