

伊豆・小笠原・マリアナ海溝の蛇紋岩海山と西南日本外帯の蛇紋岩帯

Serpentinite seamounts in the Izu-Bonin-Mariana Trenches and serpentinite bodies in the Outer zone of the Southwest Japan

藤岡換太郎¹⁾

Kantaro FUJIOKA¹⁾

Abstract. Serpentinite seamounts in the Mariana forearc region and serpentinite bodies of the outer zone of Southwest Japan were reviewed in the light of the current tectonic point of view. The Mariana trench serpentinite seamounts lie within 90 km from the trench axis and represent a huge seamount. They are composed of serpentine mud flow with chemosynthetic animal communities and carbonate chimneys and low temperature and high pressure type of metamorphic rock fragments which are carried from the depth of 30 km.

On the other hand, serpentinite bodies of the outer zone of SW Japan distribute along the tectonic lines with about 20 km intervals and are parallel to the Nankai Trough axis. The serpentinite bodies have a peculiar magnetic dipole anomaly and sometimes have Paleozoic metamorphic rock blocks called Kurosegawa tectonic zone. Their distances from the Nankai Trough axis are 110 km or more. These two different serpentinite bodies are formed within a similar genetic processes, even they exist different tectonic settings, on land and ocean.

Key words: serpentinite, serpentinite seamount, serpentine flow, carbonate chimney, Mariana Trench, Izu-Ogasawara Trench, Outer zone of Southwest Japan, magnetic dipole anomaly

1. はじめに

日本の蛇紋岩帯の研究は個々の岩体の地質学や岩石学・鉱物学として行われてきた。地質に関しては露頭の悪さや周辺の岩石との関係が明瞭でない場合が多く、ほとんど明らかにはなっていない。岩石学的な研究も鉱物組み合わせや化学組成の単純さから、あまり研究が進んでいない。その中で1960年代に2つの総括的な研究が行われている。一つは都城によって書かれた英文の論文で、造山帯と蛇紋岩との関係である。これはそれ以前に行われた Hess (1955) の論文などのまとめであった (Miyashiro, 1966)。2つ目は団体研究で、蛇紋岩の鉱物組み合わせからその空間的な分布を捉えるものである (Reserch Group of Peridotite Intrusions, 1967)。

1996年にO'HanleyはSerpentinitiesという本を書いて

いる。ここには膨大な文献が挙げられているが、その中で日本人の論文は10もない。一つは日本人が英文で論文を書いていないということとO'Hanleyが日本人の論文を正しく引用していないためかも知れない。それはともかく、上に挙げた2つの論文は引用されていない。Ishiiのドレッジ資料の論文 (Ishii, 1985)、Tatsumiほかの実験の論文 (Tatsumi *et al.*, 1986) そして Sakai ほかの化学に関する論文だけである (Sakai *et al.*, 1990)。

蛇紋岩の研究の新しい側面は1981年にマリアナ海溝陸側斜面から蛇紋岩海山が発見されたことによって開かれた。この研究はその後様々な観測機器を用いて詳しく行われ、蛇紋岩海山の分布や成因に関して一応の解釈がなされている (Fryer, 1992, 1996)。しかし、蛇紋岩海山が陸上の蛇紋岩体とどういう関係にあるのかについてはいまだに明瞭な解釈はなされていない。

小文では伊豆・小笠原海溝やマリアナ海溝の蛇紋岩海山の研究と陸上の西南日本外帯の蛇紋岩体の研究をレビューし、蛇紋岩の成因に関して考察する。また房総半島と三浦半島に露出する蛇紋岩体に関しても言及する。

¹⁾ 海洋研究開発機構

〒236-0001 神奈川県横浜市金沢区昭和町 3173-25
Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology (JAMSTEC)
3173-25 Showa-machi, Kanazawa-ku, Yokohama, Kanagawa,
236-0001, Japan
fujiokak@jamstec.go.jp

2. 蛇紋岩海山群の発見

1981年ハワイ大学の Patricia Fryer と Don Hussong はハワイ大学の研究船「Kana Keoki」によってマリアナ海溝の研究をおこなった。このときマリアナ海溝の軸にきわめて近いところから一連の海山群が発見されたことを東京大学地震研究所の講演で発表した (Hussong and Fryer, 1985; Fryer *et al.*, 1990)。彼らは海溝軸に近いところに海山が出てくるのはプレートテクトニクス理論が間違っているのではないかと思ったという。その後マリアナ海溝のドレッジで海山のほとんどが玄武岩ではなくて蛇紋岩や蛇紋岩化したカンラン岩からなることが判明した (Bloomer & Hawkins, 1983; Ishii *et al.*, 2000; Fryer *et al.*, 1985, 1990, 1992)。これらの海山群を最初から研究してきたハワイ大学の Patricia Fryer たちは1987年米国の潜水調査船「アルビン」でマリアナ海溝のコンカル海山で潜航調査を行い炭酸塩チムニーや蛇

紋岩フローを観察した (Fryer and Fryer, 1987; Fryer *et al.*, 1990)。1988年にはODP (国際深海掘削計画) 第125節の掘削の Pre-site survey のため「Fred Moore」号によるマルチチャンネル音波探査や Sea MARCII による地形調査が行われた (Fryer *et al.*, 1990)。1989年ODP第125節はコンカル海山で778, 779, 780の3地点の掘削を、伊豆・小笠原弧の鳥島海山で783, 784の2地点の掘削を行い蛇紋岩やカンラン岩、高圧の変成岩や MORB 的な玄武岩等が得られた (Fryer, Pearce *et al.*, 1989)。

1992年日米共同で JAMSTEC の「しんかい 6500」による伊豆・小笠原及びマリアナ海溝の横断潜航が行われ、鳥島海山と須明海山に潜航し、1993年には鳥島海山、須美寿海山及びマリアナのコンカル海山、パッケマン海山で潜航調査をおこない映像や写真、堆積物、岩石そして生物の資・試料が得られた (藤岡ほか, 1993, 1994, 1995)。Fryer らはパッケマン海山とコンカ

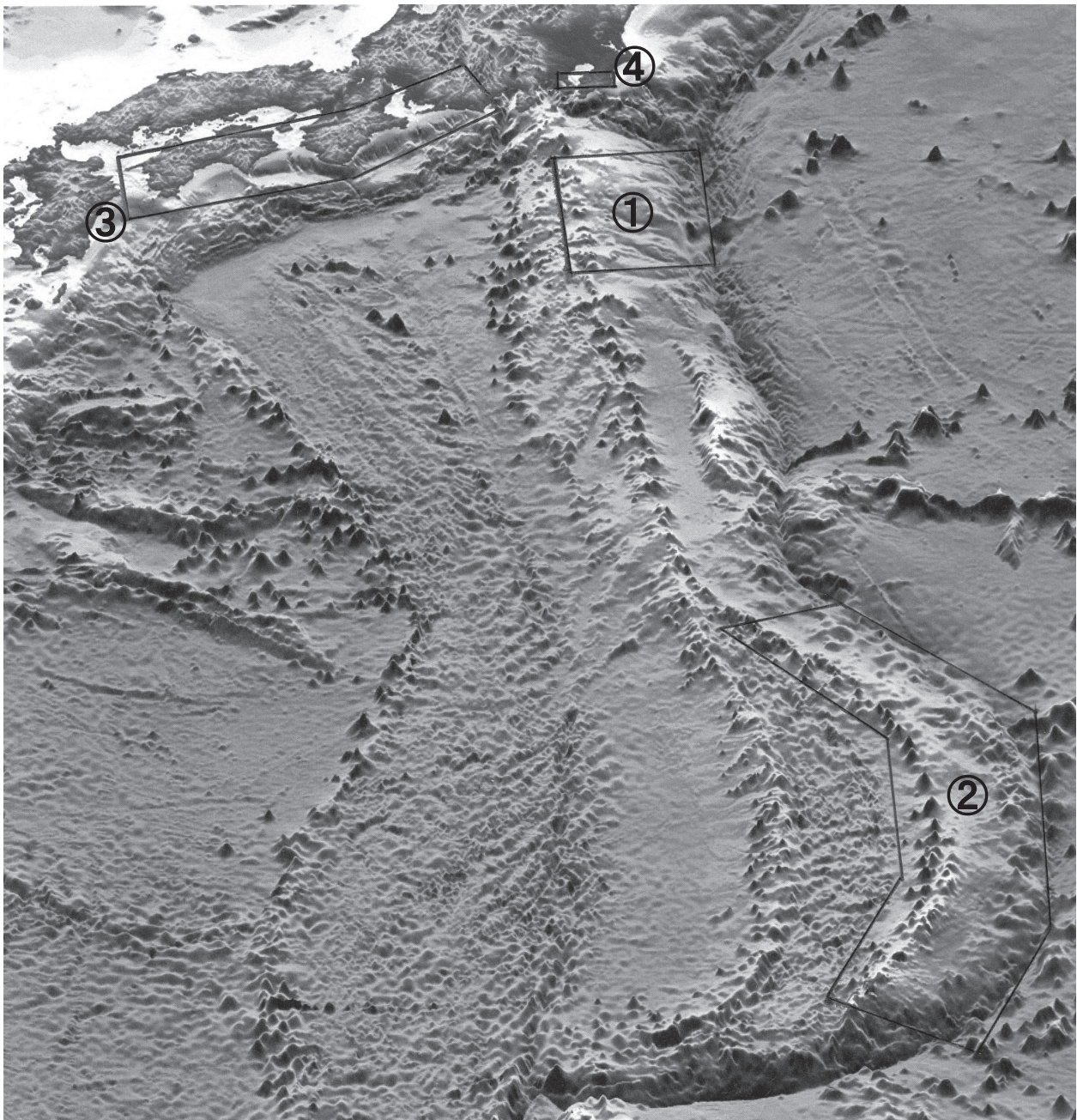


図1. インデックスマップ ①伊豆・小笠原海溝, ②マリアナ海溝, ③西南日本外帯, ④房総・三浦。

Fig. 1. Index map of this study. ① Izu-Bonin Trench, ② Mariana Trench, ③ Outer zone of Southwest Japan, ④ Boso and Miura.

ル海山の間に存在する凹地、コンパクトライアングルに見られる様々な岩石が海側の海洋地殻が付加したものと考えた (Johnson *et al.*, 1990, 1992)。どのように DeBari ほか (DeBari *et al.*, 1999) は須美寿海山の基盤の斜面からフィリピン海由来の MORB 的な玄武岩を見つけていて、これらの岩石が現在の伊豆・小笠原弧にトラップされたと考えた。

前川たち (1989)、Mackawa *et al.* (1993) はマリアナ海溝の蛇紋岩海山の掘削試料から低温・高圧の変成岩の岩片を発見し、蛇紋岩が少なくとも 30 km の深さから由来することを明らかにした。その後は地下生物圏や蛇紋岩生物圏などの生物に関係した研究がなされている (Fujioka, 2000; Yamanaka *et al.*, 2003)。1996 年にチャモロ海山から化学合成生物群集であるシロウリガイやシンカイヒバリガイが発見され、また ODP の掘削孔からの蛇紋岩堆積物の間隙水の pH が極めて高いことから生物の存在などに関する興味が一挙にまってきた (Haggerty, 1993; Mottle, 1990, Kato *et al.*, 2003)。

3. 伊豆・小笠原前弧の蛇紋岩海山

伊豆・小笠原弧の中部の前弧の水深約 6000 m のところには顕著な海山群が南北に並ぶ。火山フロントの並びと比べると丁度火山フロントのスペーシングの半分のスペーシングになる。フロントの火山の東に来るものはそのまま火山の名前を被せ、その間のものに関しては両者の漢字を一字ずつとって北から青ヶ島、明神、須明、須美寿、鳥須、鳥島と名付けられた。(藤岡ほか, 1993)。これらの海山は海溝の軸に近くマリアナの前弧蛇紋岩海山に相当する。これらの海山のうち鳥島、須明、須美寿については蛇紋岩海山であることがわかっているので以下に概略を示す。

1) 鳥島海山

鳥島海山は鳥島の東北東約 150 km の前弧域にある。これは北緯 31°20'N からつながる前弧海山群の南端に位置する。海山は陸側斜面の水深 4700 m 付近の基部から最浅所 3980 m に至る楕円錐の山体を呈しており、比高は約 700 m である。地形調査によれば尾根は 40° ~ 220° の方向に伸びており、頂上には 3 つの小さな嶺がある。頂部から 40° 方向へ伸びる顕著な尾根が 2 本認められ北側の尾根は約 10 km つながる。尾根の南西の端は巨大な崩壊地形となっている (藤岡ほか, 1993)。水深 4400 ~ 4600 m にかけて南西の斜面には幅約 1.5 km の小さな高まりが山体を取り巻くように分布している。斜面には小規模な崩壊地形や小さなステップが認められた。また断層に起因すると考えられる急崖が北西 - 南東方向に認められる。鳥島海山の地質については海山の下部斜面と、西の裾の深海掘削によってそれぞれ 120 m、321 m の鮮新世及び中新世の堆積物に覆われ、その下位には海山の構成物である蛇紋岩が分布する (藤岡, 2003; 藤岡ほか, 1993)。「しんかい 6500」による潜航調査の結果では、鳥島海山は超塩基性岩の円礫や角礫からなる巨礫をふくむ蛇紋岩フローや debris flow の積み重ねで成層構造を呈しており、超塩基性岩は著しくシアーを受け蛇紋岩化している。

蛇紋岩フローの中には薄い炭酸塩と思われる堆積物からなる露頭が観察され、炭酸塩チムニーの壊れた堆積物が固まって岩石になったものと思われる。山頂付近の蛇紋岩の大きな露頭はかなり新鮮であり風化が少ない。このことは斜面の礫や block は堆積物の中で炭酸を含む流体と接触して風化が進み、斜面崩壊に伴い海底面に露出したものである。鳥島海山は古い時代に蛇紋岩を噴出し炭酸塩チムニーを形成したが現在は活動的ではなく、その後厚い堆積物に覆われたものと考えられる。山頂付近の新鮮な露頭は比較的最近の断層運動などテクトニックな活動によって新鮮な露頭表面が露出したのかもしれない (藤岡, 2003)。

2) 須明海山と須美寿海山

須明海山は須美寿島と明神礁との間にある前弧の海山である。この海山は前弧海山群の中では最も小さくかつ水深の大きいところに存在する。須明海山は 6900 m のテラスから聳えており頂上の広さは 1 km × 1.2 km 程度であり 6300 m の水深に 2 つの高まりを持つ。須明海山は火山でもなく熱水も無く、またテクトニックに活動的でもない。冷水も炭酸塩チムニーも蛇紋岩フローも見られなかった。蛇紋岩や玄武岩の巨大なブロック (1 ~ 数 m) が時折観察された。須明海山は古くもはや活動は終わっていると考えられる。

須美寿海山は南北に伸びた比高 500 m の海山 (海丘) である。頂上の水深は約 5500 m で底部は 6000 m であ

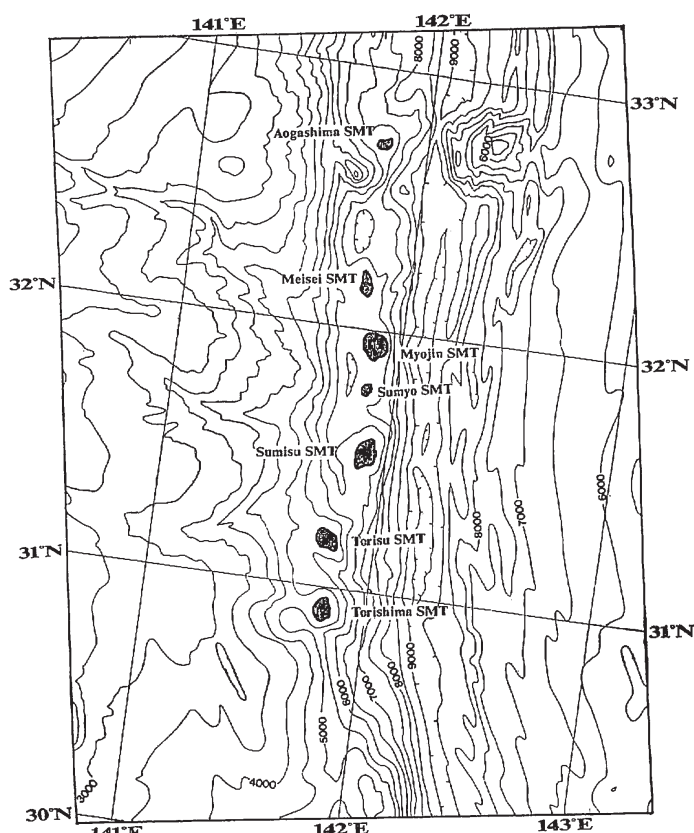


図 2. 伊豆・小笠原海溝の蛇紋岩海山 (藤岡ほか, 1995)。北から青ヶ島海山、明神海山、明神海山、須明海山、須美寿海山、鳥須海山、鳥島海山。

Fig. 2. Serpentinite seamounts in the Izu-Bonin Trench. From north, Aogashima SMT, Meisei SMT, Myojin SMT, Sumyo SMT, Sumisu SMT, Torisu SMT, and Torishima SMT.

る。東の斜面には基盤が露出していると思われる。山体は東経 141°55' 近くの南北に伸びる断層によって 2 分されている。東側斜面は 6250 m から急になり西側の斜面より傾斜がきつい。断層に沿う東の斜面には崩壊地形が見られる。頂上は北西、南、南東方向に伸びた尾根を持つ。陸側から来る堆積物は鳥島海山同様海丘の西側にトラップされている。潜航の結果須美寿海山の内部の層序は概ね蛇紋岩からなるが、フローや泥岩、蛇紋岩以外の土石流堆積物を挟むことから、蛇紋岩ダイアピルの活動は休止期を挟んでいたことが結論される。両海山とも蛇紋岩フローでできたものであるが現在は活動していないものと考えられる (藤岡ほか, 1993, 1994, 1995; 藤岡, 2003)。

4. マリアナ前弧の地形

以下に伊豆・小笠原弧やマリアナ弧に関して現在までに得られた知見を簡単に眺めてみる。図 3 にはマリアナ海溝前弧の蛇紋岩海山の位置を地形図とともに示した。マリアナ前弧にはおよそ 10 の蛇紋岩海山が知られている (Fryer, 1996; 前川ほか, 2007)。横瀬他 (2011, personal communication) は北緯 20 度以北に風神海山と雷神海山を発見しこれらが蛇紋岩海山であることを明らかにした。

マリアナ前弧は米国が熱心に調査してきたところで蛇紋岩海山に関してはかなりよくわかっている。Fryer *et al.*, (1985) によれば Hummocky terrain とされている

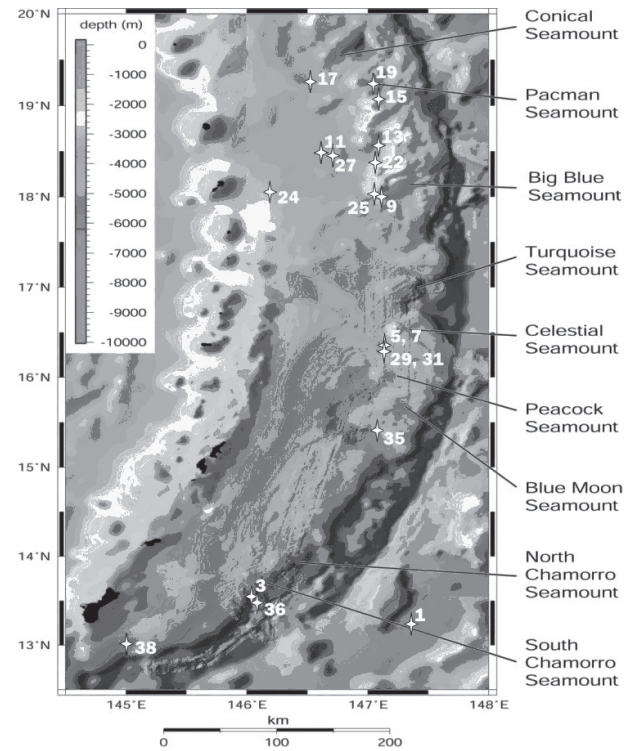


図 3. マリアナ海溝の蛇紋岩海山 (Fryer *et al.*, 1999 による)。北からコニカル海山, パックマン海山, ビッグブルー海山, ターコイズ海山, セレスティアル海山, ピーコック海山, ブルームーン海山, 北チャモロ海山, 南チャモロ海山。

Fig. 3. Serpentine seamounts in the Mariana Trench. From north, Conical SMT, Pacman SMT, Big Blue SMT, Turquoise SMT, Celestial SMT, Peacock SMT, Blue Moon SMT, North Chamorro SMT, and South Chamorro SMT.

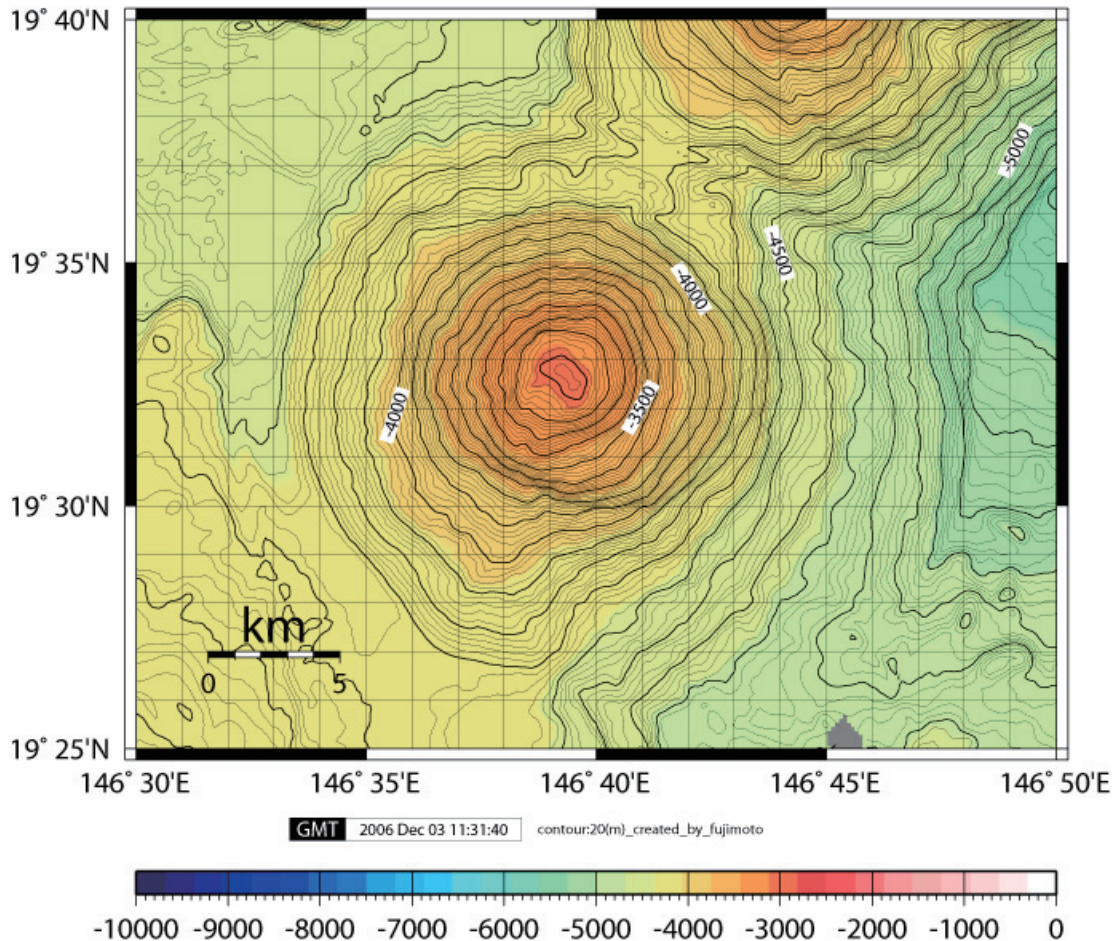


図 4. コニカル海山の地形。

Fig. 4. Topography of Conical seamount.

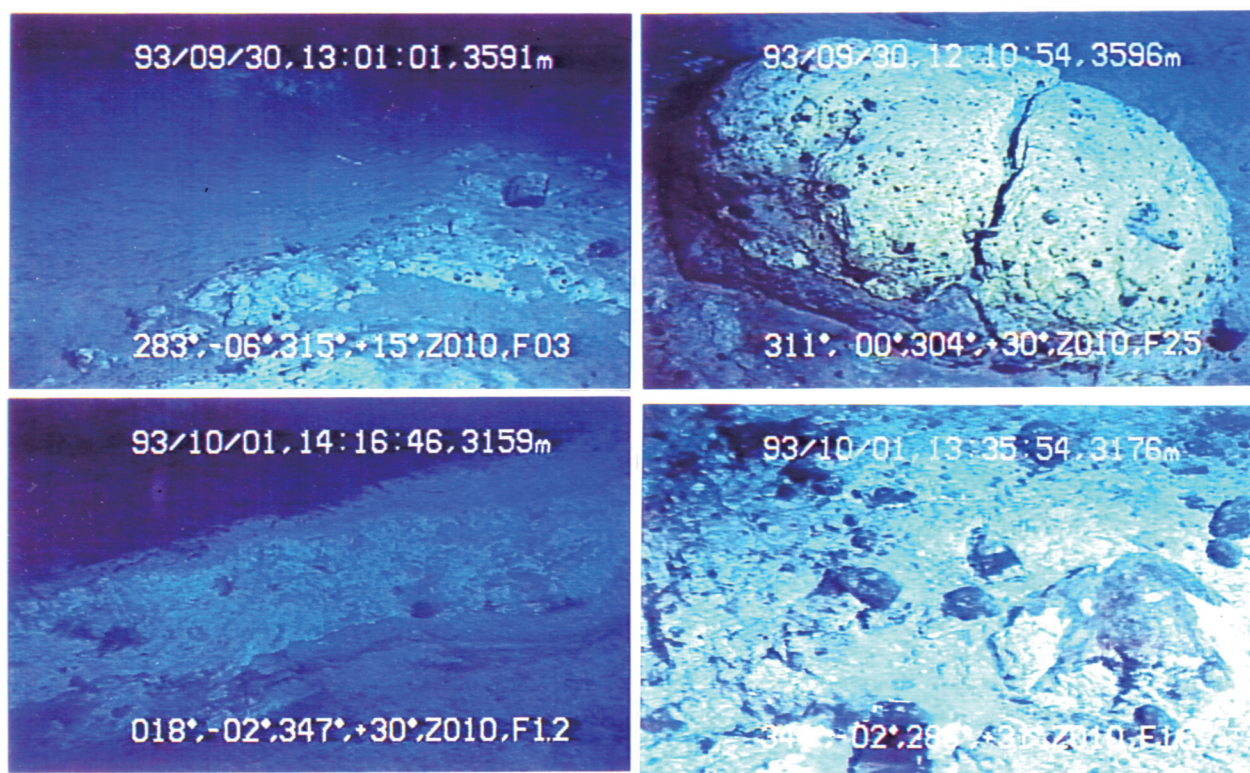


図 5. 蛇紋岩フロー (藤岡, 2003 による).

Fig. 5. Serpentinite flow.

部分は北緯 18° から 23° にかけてが最も多く、蛇紋岩の海山である。海底地形図によれば北緯 18° から 20° にかけての陸側斜面には多くの海山が見られる。海側斜面にも同様に巨大な海山が海溝軸にまで差ししかかっている。海山の基盤は水深 4500 m から 5000 m にあって、比高は 2 km から 3 km ある。底径は大きいもので約 25 マイルある。北緯 19° にあるバックマン海山はその形から東側が崩壊したものと考えられ、実際ドレッジをしてみて多くの蛇紋岩の巨礫が得られている。その北西 20 マイルにあるコニカル海山は名のとおりの富士山型をした海山である。

1) コニカル海山

コニカル海山は名前のとおり円錐形をした海山である (図 4)。水深 4200 m に海山の基盤があり、比高は 1200 m である。コニカル海山の地形は頂上付近の南西部には尾根が中腹まで伸びている他は水深 4400 m から 3000 m まで円錐形を呈している。頂上は平坦で北西—南東方向に伸びた頂部を持つ。4000 m で囲まれた円錐の直径は約 15 km で、比高が 1.3 km であるので完全な円錐形であるとすればその体積は 76.5 km³ になる。

潜航調査の結果、海山は蛇紋岩フローや土石流堆積物からなる成層構造をもち、急崖と平坦面というステップを構成している。正断層で出来たステップは小さな海底谷を形成し平坦面の上には蛇紋岩のフローがロープ状の分布をすることがわかった (図 5)。このロープは高さ 50 cm 程度の高まりを形成しており、古いものは堅く岩石のようにになっている。蛇紋岩のフローは内部におびただしい捕獲岩を含む。大きさは観察された範囲では 2 m 位のものが最大で砂やグラニュールサイズのものは多く含まれている。フローの表面は黒い

マンガンの堆積物で覆われていて厚いところでは数 cm ものクラストをつくっている。堆積物に覆われた表面に高さ 50 cm 程のチムニーの台座を作るクラストが残丘のようになっている。また北西—南東方向にチムニー群が並んでいる。炭酸塩あるいはシリカチムニーが 4 地点で見つかった (図 6)。それらのチムニーの一つには 1987 年に「アルビン」が撮影した写真と同じ巨大なイソギンチャクが付着していた。チムニーは概ね 270° から 280° 方向に線状に分布しているように見える。アルビンの発見した「グレイブヤード」はたくさんのチムニーの林立するところであった。コニカル海山は蛇紋岩フローからなる海山でシリカチムニーが頂上の西側に分布する特異な海山であることが明らかになった。

2) バックマン海山

バックマン海山の名前は米国でかつてはやったゲーム「パックマン (Pacman)」から来ている。この海山



図 6. 炭酸塩チムニー (藤岡, 2003 による).

Fig. 6. Carbonate chimney.

は東側が大きく馬蹄形に崩壊して理想的な円錐からは外れている。ここで行われた潜航の結果は以下の様である。

蛇紋岩フローの中に見られる巨礫は、小～巨礫を含んだ周囲よりも酸化され黄灰色の蛇紋岩の泥に覆われていた。蛇紋岩の泥は明緑灰色で4本の小規模なうねおよび溝をなして露出しており、多様なサイズのクラストを含んでいた。NW-SE 走向のリッジは、ごく最近できたと思われるナイフエッジ開口裂部によっていくつにも破断しており、この裂かから小型の炭酸塩チムニーが成長していた。チムニーは城壁状～孤立するものまであり、大小様々な突起を備えていた。チムニーとその基盤になっている物質は開口裂部からの流体の流出に関連したもので、あるいは ODP Leg 125 でコンカル海山から報告されたものに類似した流体の出口に関係したものであろう。多くのリッジとトラフの地形が識別され、特にリッジ部では炭酸塩チムニーが観察採集された。

3) コニパクトトライアングル

コンカル海山とバックマン海山の間の東側には三角形の地溝構造が見られる。便宜上コニパクトトライアングルと呼ぶ。コニパクトトライアングルは一辺約 35 km の三角形の凹地を形成している。急崖と最深部 (5800 m) との比高は最大 2 km ある。Johnson ら (1992) はここで行われたドレッジから玄武岩やガブロ、蛇紋岩、チャートが得られたため海洋地殻が付加したと考えた。コンカル海山のすぐ東のコニパクトトライアングルを区切る大断層性の崖の基部から斜面を登って大量の蛇紋岩フローの成層構造が観察された。蛇紋岩フローは clast を豊富に含むこともあれば、点在する場合もあった。また debris の層は一般にレンズ状ないしブロック状で不規則であった。急斜面では膨大な debris が断層斜面に直交して崩落しており、これらの中からマンガンに被覆されたシルト岩および火成岩が得られた。

同じ深さの東崖を東に登っていくと成層構造がいくつか見られたが多くが崩壊や埋積堆積物で露頭はあまり見られなかった。得られた試料は変成ガブロや火山岩類がほとんどで蛇紋岩は見つからなかった。しかしその後の薄片観察で蛇紋岩が見つかった。

4) 南チャモロ海山

南チャモロ海山はグアム島の東約 60 マイルの所にあって三つの独立した海山からなる。そのうち北チャモロ海山と南チャモロ海山が大きくその形は円錐形である。詳しい地形図で見ると東西方向が少し長く楕円形であるともいえる。頂上部には2つのピークがあり南東の物が大きい。頂部は 3175 m の等深線で囲まれた楕円形をしており南東部にはそこから約 100 m 高いピークになっている。このことは最近ここで蛇紋岩フローが流れ出した可能性がある。最浅部は 2975 m で海山の底部は約 5000 m である。

南チャモロ海山の頂上部分の潜航。1995 年、ここで化学合成生物群集が発見された (図 7)。伊豆・小笠原—マリアナの前弧では初めての発見である。シロウリガイとシンカイヒバリガイの2種類の化学合成生物群集

が共存する特徴的な冷湧水である。蛇紋岩フローの表面に多くの裂け目が見られた。貝の多くがこれらの裂け目に沿って分布している (Fryer & Mottle, 1997)。

5) その他の孤立する海山

(1) ブルームーン海山

この海山はマリアナの前弧では最も深い所にある。この海山では蛇紋岩のフローの活動は認められなかった。しかし米国の調査では蛇紋岩が得られている。「しんかい 6500」の潜航の結果、露頭は上から現世の堆積物、マンガンの層、遠洋性泥岩の順序であり、蛇紋岩泥岩はみつからなかった。深さ 3617 m の地点には巨大な成層した岩石が露出し、シャープに切られていて断層による変形の影響を受けている。ブルームーン海山は蛇紋岩海山であったとしてもその活動は遠い昔にすでに終わっていると思われる。

(2) セレスティアル海山

この海山は頂上部が変形してあたかも崩壊しているような地形を呈している。全体としてハート型の頂部を持ちその西側が延びたリッジになっている。最浅部は 1950 m で、海山は北側に崩壊しているように見える。頂上付近には炭酸塩のクラストに覆われた岩石がたくさん見られた。堆積物の表面にはリップルマークが見られた。深さ 1954 m の地点では蛇紋岩泥岩のマトリクスの中の岩石が採集された。深さ 1836 m の地点から上はほとんど頂上へとつながる斜面であり、ここは 60° 以上の急崖を形成していて蛇紋岩泥の表面には著しい slickenside が見られた。この面は断層の面と同じで、上に乗っていた堆積物 (岩石) は海山の麓へと滑っていったと考えられる。この海山の北側が大きく崩壊していることと調和的である。1870 m 周辺の地形は尾根の稜線に相当する。平坦で強いリップルマークを持つ遠洋性堆積物に埋積された斜面で顕著な蛇紋岩泥岩の露頭が見られ、ここでは炭酸塩岩とチャートが得られた。特に炭酸塩岩やシリカのしみこんだ堅い岩石の複数個の存在から蛇紋岩フローの噴出や冷湧水があったことは間違いない。しかし現在活動的しているという証拠は得られなかった。またチャートの存在は沈み込み帯における物質循環のシナリオを知る手がかりになる。

(3) ビッグブルー海山

ビッグブルー海山はマリアナでは最も浅く頂上は



図 7. 化学合成生物群集 (藤岡, 2003 による)。

Fig. 7. Chemosynthetic animal community.

1450 mである。山体の上に小さなピークがあって南チャモロのように新しくできたフローの可能性がある。この海山はいくつもの腕を持った複雑な海山である。

潜航調査では上下方向に蛇紋岩フローの流れがあり、3本の東西性の蛇紋岩泥岩のリッジがあることがわかった。古い蛇紋岩のフローが斜面を構成し、礫が洗い出されて礫の谷をつくっていた。これは蛇紋岩フローの繰り返しであると思われる。また Carbonate encrust が見られ、貝殻（シンカイヒバリガイ）の破片が見つかったが生きた生物群集は発見できなかった。蛇紋岩泥岩がかなり Carbonate encrust を受けていたがマニピュレーターで壊れるほど柔らかかった。ビッグブルー海山の特に頂上付近は、堆積物の埋積が少なく、蛇紋岩泥岩が海底に露出しており Carbonate encrust の程度も低いので、かなり近い過去まで冷水水に関連する生物群集が存在していたと思われる。あるいは現在はちょっとした休止期である可能性もある。

5. 潜航結果のまとめ

伊豆・小笠原、マリアナ前弧の潜航によって前弧に分布する蛇紋岩海山の性質の一端がわかった。マリアナと伊豆・小笠原では蛇紋岩海山の活動度に大きな違いがあるように見える。以下に、蛇紋岩海山に特徴的に産出する蛇紋岩フロー、炭酸塩チムニーそしてフローの中に含まれる巨礫についてまとめる。

1) 蛇紋岩フロー

前弧の蛇紋岩海山の地形や地質で最も顕著なものの一つは蛇紋岩のフローである。伊豆・小笠原弧の前弧海山には厚い堆積物がたまっており蛇紋岩のフローの露頭は見られなかった。かわって小さなステップなどで蛇紋岩の露頭や土石流堆積物の断面が見られた。潜水調査船による海底表層の観察でははっきりしないが、掘削船による鳥島海山の掘削点 783/784 での柱状試料からは鳥島海山がほとんど蛇紋岩のフローで形成されていることがわかる。一方、マリアナの前弧ではコニカル海山の蛇紋岩のフローはローブ状の地形をつくっており、幅は数メートルから大きいものでは数十メートル高さ 3～5 m に達する。ローブは出来たときは粘性が低らしく結構な距離を流れているようである。例えばコニカル海山の着定点の下部の斜面がその例である。ローブはリッジ状に盛り上がっており内部には大小様々な捕獲岩が詰まっている。

これらの観察結果から蛇紋岩海山はこのような蛇紋岩フローが何枚も重なって形成されたものと思われる。つまり蛇紋岩海山の基本的な構成物質は蛇紋岩のフローであるといえる。伊豆・小笠原前弧の蛇紋岩海山に顕著な蛇紋岩のフロー構造が見られないのは堆積物の埋積が大きいためであり、それは蛇紋岩フローの活動が現在はほとんど見るべきものがないこと、すなわち蛇紋岩海山は古いことを示しているものと思われる。一方、マリアナのコニカル海山などは、蛇紋岩フローが海底の表面に露出しているため現在も活動していると判断される。また炭酸塩チムニーからも同様のことが言える。

蛇紋岩海山の掘削に関連して、ODP Leg125 のコアの断面には蛇紋岩フローの堆積構造のようなものが認められるが、これが Drilling disturbance か本物の堆積構造であるかは大いに議論があった。いずれにしても蛇紋岩のフローは極めて水分が多くて流動的であることを示しており、付加体に見られる泥火山と基本的には同じと考えられる。

2) 炭酸塩チムニーと化学合成生物群集

蛇紋岩海山で2番目に顕著な性質は炭酸塩チムニーの存在である。伊豆・小笠原弧の前弧海山では形のある炭酸塩のチムニーは発見されていない。かわって白い堆積物が脈として注入されていたり（須美寿海山）、蛇紋岩の上に白い堆積物が乗っていたりする（鳥島海山）。また須明海山は完全に堆積物に被覆されている。一方、マリアナ前弧のコニカル海山には高さ 2 m 程度のチムニーが林立する墓場（Fryer *et al.*, 1992）や孤立したチムニーが存在する。またバックマン海山でもその南翼で高さ 50 cm に満たないベビーチムニーが数多く発見された。これは薄い炭酸塩のプレートの上に成長した霜柱見たいなもので、ある方向性を持つものもある。このような方向性は蛇紋岩海山の定置に関して重要である。炭酸塩チムニーの表面には黄緑色のカビのようなものが付着しているがこれはバクテリアマットであり炭酸塩チムニーが現在も活動していることを示している。逆に活動していない炭酸塩チムニーの表面には黒いマンガンに富んだ薄い被膜が付着している。被覆されない蛇紋岩フローの存在と炭酸塩チムニーの表面に黄緑色のバクテリアマットが付着していることは蛇紋岩海山の活動度を示す指標であると考えられる。

チムニーは線状に分布しており、その並びは場所毎に変動する。これらのチムニーの下には板状の炭酸塩が存在し、その下の岩相は蛇紋岩フローである場合が多く、両者には成因的に因果関係があると思われる（Kato *et al.*, 2003）。

3) 巨大礫

蛇紋岩フローの中に大小様々な礫が含まれることは既に述べた。礫は一種の捕獲岩で大部分が蛇紋岩化したカンラン岩であった。蛇紋岩フローの中に見られるその他の捕獲岩類は、深海掘削やドレッジで得られて記載された物でほぼすべてを尽くしているものと思われる（Maekawa, 1992）。カンラン岩の礫は巨大なものでは、数メートルの径を持ち、蛇紋石の中にこれが含まれる様子は異様である。礫のサイズや形もまちまちで、いかにも蛇紋岩フローの通り道にあったものを取り込んできたという感がする。伊豆・小笠原弧の前弧海山では蛇紋岩フローは発見できず、従って捕獲岩は見られなかったが、蛇紋岩のラプルフローの露頭でも巨大な礫が見つかった。このような巨大な礫が蛇紋岩のフローの中に含まれていることは重要である。カンラン岩の比重は平均すると 3.2 程度であり蛇紋石のそれは含まれる水の量にもよるが 2.7 程度であり、両者の比重の差は極めて大きいにもかかわらず、一体となっているためには何か特殊なメカニズムを考えな

ければならない。すなわちマトリックスを形成する比重の小さい蛇紋石が比重の大きいカンラン岩をゆっくりと持ち上げてくるとすれば、かならず途中で沈んでしまうはずで、フローの中には含まれないであろう。そのため何か落としてしまわないための特殊な条件、例えば非常に高速で上がってくる様なメカニズムが必要になってくる。

4) 地磁気異常

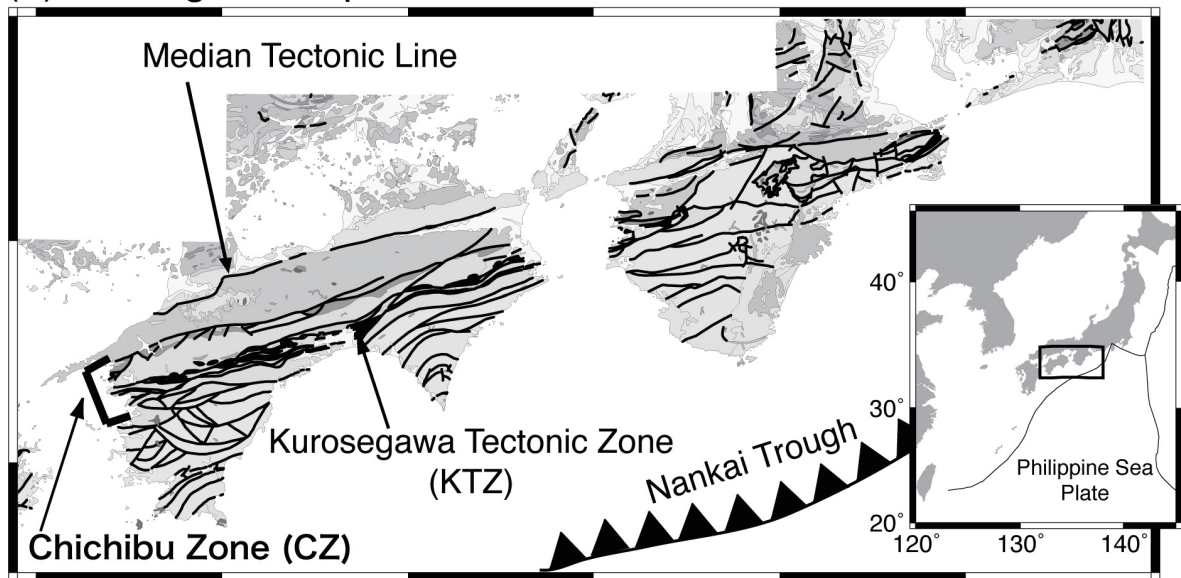
Kido *et al.* (2004) はマリアナの地磁気異常の研究から、蛇紋岩海山が正の双極子磁気異常を持つことを明らかにした。これは蛇紋岩海山が玄武岩でできた海山同様に多くの磁鉄鉱を含む海山であることを示している。この結果から蛇紋岩海山が固体で出てきたとするよりは流動性にとんだ磁鉄鉱を含んだフローが固まる前に磁化したと考えるほうが都合がよい。断層を介し

ての固体貫入ではすでに獲得していた磁化がばらばらになってきれいな双極子異常は得られないであろう。これは以下に述べる西南日本外帯の蛇紋岩体に関してもいえる。

6. 西南日本外帯の蛇紋岩帯

関東山地から九州までの西南日本外帯には秩父帯、三波川帯が帯状につながっている。その中で秩父帯の中には蛇紋岩を介在する構造帯が存在し、黒瀬川構造帯の名前で呼ばれている。西南日本外帯には蛇紋岩の大小さまざまな岩体がほぼ黒瀬川帯や秩父帯とされている部分に露出している (Yoshikura *et al.*, 1990)。これらの蛇紋岩体は著しく変形・蛇紋岩化した蛇紋岩である。一般的には周辺の岩体との関係は不明である。円行寺の採石場で見られる関係は蛇紋岩が周辺の岩体を

(a) Geological map



(b) Magnetic anomaly illuminated from NE

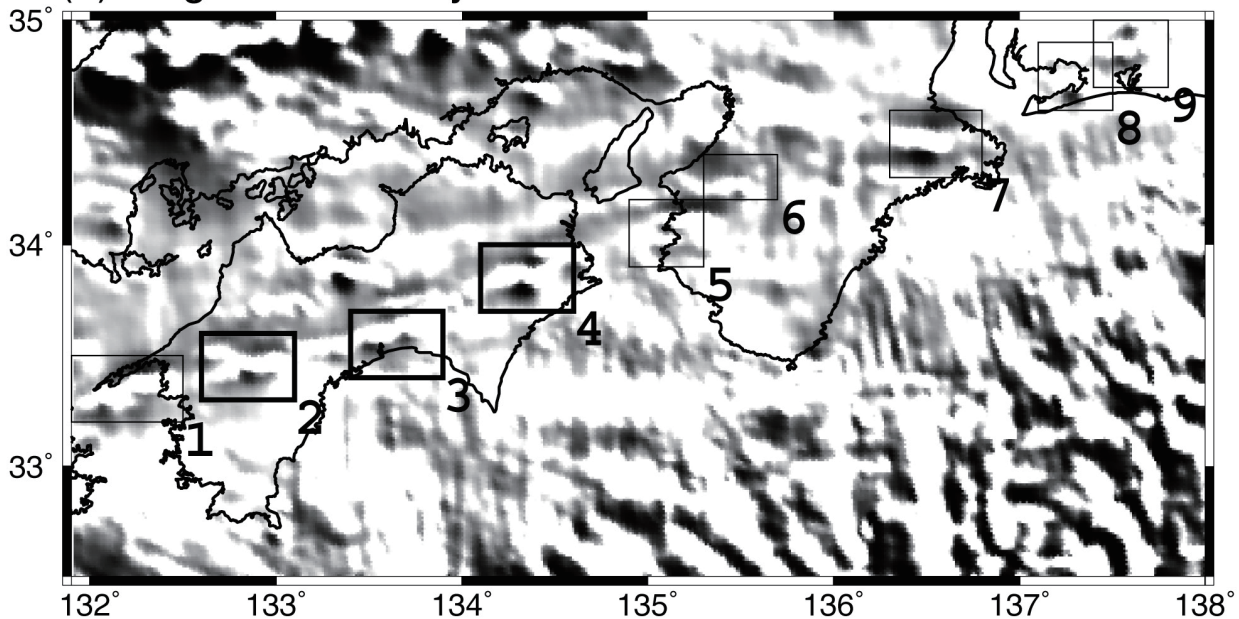


図 8. 西南日本の地質構造図 (a) と地磁気異常 (b) (木戸ほか, 2000 による)。

Fig. 8. Magnetic anomaly in the southwest Japan.



図 9. 四国構原の蛇紋岩体.
Fig. 9. Serpentinite outcrop at Yusuhara, Kochi.

抜いていることが観察されている。地質図で表現されているのは多くが断層関係とされているがあながち間違いではなさそうである

この中には静岡県西部の浜松から四国西部の八幡浜まで、大小いくつかの蛇紋岩体が 20 km 程度のスペーシングで分布している (図 8)。その分布は南海トラフに平行である。海溝からの距離はほぼ 110 km である。これらの蛇紋岩体は顕著な黒瀬川構造帯に属する古生代の岩体をはさんでいるものもある。西南日本外帯の航空磁気測定の結果、地磁気の大極子異常が認められその異常は蛇紋岩体と重なる。大極子異常は正に帯磁している。そのために蛇紋岩がになう地磁気異常に着目した研究がなされてきた (村上・吉倉, 1992; 木戸ほか, 2000; 木戸, 2004)。

陸上の蛇紋岩体は変質や変形が激しいが、多くの場合蛇紋岩体中に白い堆積物が含まれていて、堆積構造を持っていたりすることがある。特に四国山地の構原地域では蛇紋岩帯が約 2 km にわたって連続露頭を形成しており蛇紋岩銀座と呼ばれている (図 9)。その

中で蛇紋岩体の構造を観察した。蛇紋岩は顕著な堆積構造や造構運動を受けて変形した構造を持っている。この状況は前述したマリアナ海溝の蛇紋岩海山の蛇紋岩フローの構造にきわめてよく似ている。

白い堆積物はそのもとの起源が炭酸塩、さらに言うなればマリアナの蛇紋岩海山にみられるような炭酸塩チムニーの残骸であり、堆積構造は蛇紋岩フローの様に流動性に富んだ物質が示す初成の構造であった可能性が考えられる。

伊豆・小笠原やマリアナの前弧海山群を構成する蛇紋岩類と嶺岡帯や三波川変成岩帯の中に産出する蛇紋岩帯を構成する岩石とは極めて類似している (Miyashiro, 1966; Research Group of peridotite intrusion, 1967; Fryer, 1992)。特に西南日本外帯に産出する蛇紋岩体はそうである。このことは両者が成因的に密接な関係を有することを強く示唆する。筆者達は四国の構原、円行寺、坂州の蛇紋岩の研究を行っているが、伊豆・小笠原やマリアナ前弧の蛇紋岩海山との関連に注目している。すでにみたように海底の蛇紋岩海山に特徴的なことは 1) 蛇紋岩フロー、2) 炭酸塩チムニー及び 3) 巨大な捕獲岩の存在、および地磁気の大極子異常であった。陸上の蛇紋岩体も同様の性質を保持している。

7. 蛇紋岩帯の成因

マリアナ海溝の前弧に分布する蛇紋岩海山の成因に関して Fryer たちは沈み込む太平洋プレートからの水がマントルのかんらん岩を変質させて蛇紋岩に変わって、周辺の断層にそって上昇するモデルを提案している。この考えは Metamorphic Sponge Model として紹介された。陸側のマントルがスポンジのように水を吸収して吐き出すモデルである (Fryer, 1992, 1996)。

このプロセスではマントルに存在する高压の変成岩を取り込んで、さらにマントル中のまたは沈み込み帯で形成されたメタンなどのガスも説明できる (Berndt

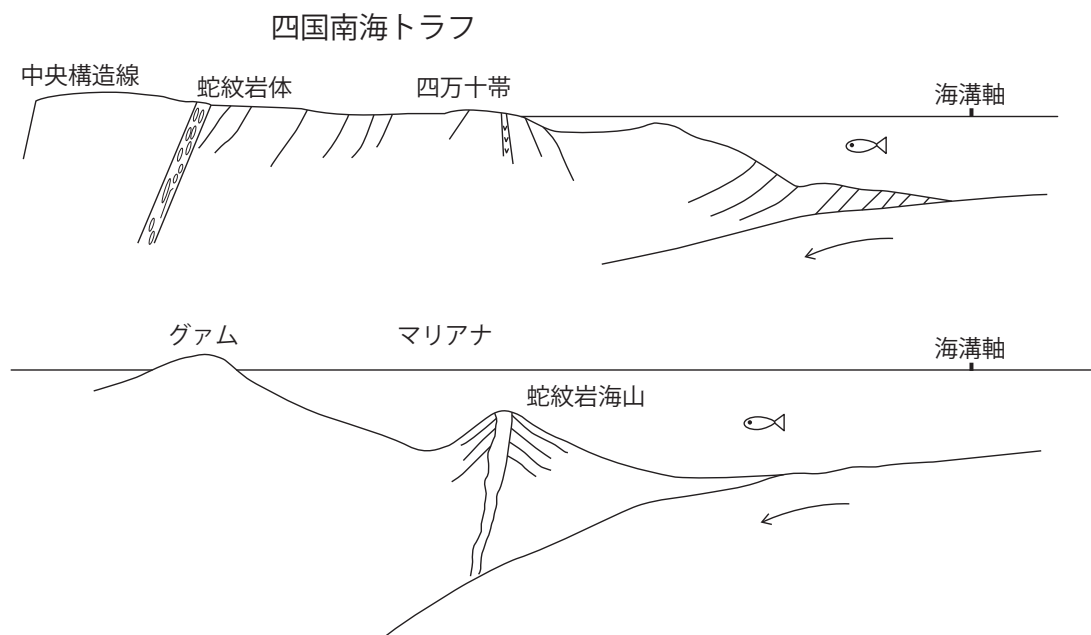


図 10. 蛇紋岩体と蛇紋岩海山のできかた. Taira (1985), Hada & Suzuki (1983), Fryer (1996) からコンパイルした.
Fig. 10. A model for the formation of serpentinite bodies and serpentinite seamounts, compiled from Taira (1985), Hada & Suzuki (1983), Fryer (1996).

et al., 1996; Fujioka, 2000; 藤岡ほか, 2003)。問題は蛇紋岩フローに取り込まれているあまり変質していないかんらん岩の存在である。

一方、西南日本の蛇紋岩帯に関しては様々な考えが出されていて、どれもそれらの成因を十分に説明できていない。構造体として古くから存在した黒瀬川体が構造的に蛇紋岩をもみこんだ考えが有力であったが、藤岡他は現在のマリアナのプロセスと同様の成因を考えている (Fujioka, 2000; 藤岡, 2003)。Hada & Suzuki (1983) はこれに近いモデルを出していたが四国のある岩体だけについての考えであり、蛇紋岩の貫入に関しては明確には述べていない。彼らの描いた地殻の断面の図を解釈すればそのように考えられる。

マリアナは海に、西南日本は陸にあるが、いずれも同様のプロセスで形成されたとする考えである。西南日本の場合には南海トラフからの距離が長いがこれはフィリピン海プレートのスラブの沈み込む角度が小さいことで説明できる。また前弧の海溝に近い部分で蛇紋岩が知られていない理由は大量の付加体とその流出を妨げていると考える。また蛇紋岩化が起こる深さが足りないという考えもある。全体をまとめたモデルを図 10 に示した。

8. 三浦・房総の蛇紋岩

三浦半島の葉山にある衣笠を中心に、蛇紋岩体が線状に分布する。千葉県房総半島の鴨川地域、嶺岡山地に蛇紋岩が分布している。これらは一連のものであると考えられている。そして蛇紋岩体は堆積性の蛇紋岩であるとされている。Fujiwara *et al.* (1999) によれば蛇紋岩を含む房総半島の地磁気の研究からある厚みをもった磁気的な板が房総半島南部の地下に存在することが指摘されている。衣笠の蛇紋岩の地質学的な観察から、この岩体にはマリアナ海溝の蛇紋岩海山と似た堆積構造やかんらん岩のブロックがみられる。周辺の構造との関係から四国に見られる蛇紋岩と同様に構造線に沿って上昇してきた蛇紋岩体と考えられる。三浦の蛇紋岩も嶺岡の蛇紋岩も、四国と同様に沈み込むプレートから放出された水が陸側斜面のマントルのかんらん岩を変質させて蛇紋岩化したものが上がってきたと考えられる。

Kamiya and Kobayashi (1999) は地震波トモグラフィーによって地下の岩帯のポアソン比を求め、関東山地の下に蛇紋岩化したスラブの痕跡があり、それが蛇紋岩体を形成していると考えている。また紀伊半島周辺では沈み込むスラブそのものが蛇紋岩化しているために速度が遅くなっていると考えている。

三浦房総の蛇紋岩帯に関してもそのような可能性は考えられる。しかし、私は西南日本も房総・三浦もマリアナと同様のプロセスで形成されたものであると考えている。

9. まとめと今後の課題

マリアナ海溝前弧蛇紋岩海山と西南日本外帯の蛇紋岩体についてのまとめを行った。マリアナ海溝の蛇紋

岩海山は沈み込むスラブから放出された水が前弧のマントルの蛇紋岩化をひきおこし、断層にそって蛇紋岩フローとして流れて海山と作ったとする説が有力である。

西南日本の蛇紋岩体の地磁気双極子異常については様々な考えがあるが、現在ではマントルの蛇紋岩化によって軽くなったマントル物質が断層にそって出てきたものと考えている。西南日本とマリアナの蛇紋岩体に関して両者のプロセスは基本的には同じとする。

今後の課題として以下のことがあげられる。

まず蛇紋岩体の貫入の年代である。マリアナも西南日本も顕著な正の異常を示しているがこれが現在のブルンヌ正磁極期であるとは断言できない。

黒瀬川帯には多くの古い高圧の変成岩が巻き込まれているがこれらの起源に関しても問題である。マリアナでは低温・高圧の変成岩しか出ていないのに対して西南日本では島弧的な岩石や大陸的な岩石が出ている。

蛇紋岩フローの流出のメカニズムに関しても問題である。観察によれば蛇紋岩フローには巨大なかんらん岩の礫が入っている。単純に蛇紋岩と周辺の岩石の密度差だけで上がってくるのかどうか。

炭酸塩の起源に関してもガスの役割を考える必要があるであろう。

今後これらの疑問が解決すれば蛇紋岩体の問題は明らかになるであろう。

謝辞

小論を書くにあたり多くの共同研究者に方々のお世話になった。本来は共著にすべき所であるがこの文章が筆者の思いつきや独断と偏見が多いため共同で研究している方々にかえって迷惑をかけるといけないと思い一人で書くことにした。

伊豆・小笠原海溝やマリアナ海溝の蛇紋岩の研究を進めるにあたり「しんかい 6500」チームの方々や「よこすか」クルーの方々には現場の海域での作業や潜水調査船の卓抜した運航で大変お世話になった。海洋の調査では和田秀樹、徳山英一、小川勇二郎、パトリシア・フライアー、川手新一、森田澄人、加藤久佳、加藤和浩、三輪哲也、高井研、千葉仁、前川寛和、横瀬久芳、溝田智俊の方々からは様々な段階で有益な議論をして頂いた。

陸上の蛇紋岩の研究に関しては、長い間の共同研究者である小原泰彦、佐藤暢、町田嗣樹、石塚英男、木戸ゆかり、山口はるか、神谷真一郎、前野克尚らの諸氏とは有益な議論ができた。

平田大二氏はこの報告をまとめる機会を与えてくださった。石井利枝氏、増田幸子氏には図の作成をしていただいた。これらの方々に感謝する。

なおこのレビュー論文の作成にあたっては木戸 (2004) や藤岡 (2003) の論文に負うところが多い。

引用文献

- Berndt, M. E., Allen, D. E. And Seyfried, W. E. Jr, 1996. Reduction of CO₂ during serpentinization of olivine at 300°C and 500 bar. *GEOLOGY*, **24**: 351-354.

- 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", *AGU Monograph*, **27**: 294-317.
- DeBari, S., Taylor, B., Spencer, P.K., Fujioka, K., 1999. A trapped Philippine Sea plate origin for MORB from the inner slope of the Izu-Bonin trench. *Earth Planet. Sci. Lett.*, **174**, 1/2: 183-197.
- Fryer, P., 1992a. Mud volcanoes of the Marianas. *Sci. Amer.*, **266**: 46-52.
- Fryer, P., 1992b. A synthesis of Leg 125 drilling of serpentinite seamounts on the Mariana and Izu-Bonin forearcs. In Fryer, P., et al., Proc. ODP, Sci. Results 125, College Station, TX.
- Fryer, P., 1996. Evolution of the Mariana convergent plate margin system. *Rev. Geophys.*, **34**: 89-125.
- Fryer, P., Ambos, E. L., and Hussong, D. M., 1985. Origin and emplacement of Mariana forearc seamounts. *GEOLOGY*, **13**: 774-777.
- Fryer, P. and Fryer, G. J., 1987. Origins of non-volcanic seamounts in a forearc environment. In B. H. Keating, P. Fryer, R. Batiza, and G. W. Boehlert (eds.), Seamounts Islands and Atolls, *Geophys. Monogr. Ser.*, **43**: 61-72. AGU, Washington, D. C.
- Fryer, P. and Mottl, M. J., 1997. "Shinkai 6500" investigation of a resurgent mud volcano on the southeastern Mariana forearc. *JAMSTEC Deep Sea Res.*, **13**: 103-114.
- Fryer, P. and Pearce, J. A., Stokking, L.B., Ali, J.R., Arculus, R., Dean L. Ballotti, D.L. Burke, M.M., Ciampo, Q., Haggerty, J.A., Haston, R.B., Heling, D., Hobart, M.A., Ishii, T., Johnson, L.E., Lagabrielle, Y., McCoy, F.W., Maekawa, H., Marlow, M.S., Milner, G., Mottl, M.J., Murton, B.J., Phipps, S.P., Rigsby, C.A., Saboda, K.L., Stabell, B., Van der Laan, S., and Xu, Y., 1989. Plumbing the Pacific sinks. *Nature*, **339**: 427-428.
- Fryer, P., Saboda, K. L., Johnson, L. E., Mackay, M. E., Moore, G. F., and Stoffer, P., 1990. Conical Seamount: SeaMARC II, ALVIN submersible, and seismic reflection studies. *Proc. ODP, Init. Repts.*, **125**: 69-80.
- Fryer, P., Wheat, C. G., and Mottl, M. J., 1999. Mariana blueschist mud volcanism: Implications for conditions within the subduction zone. *Geology*, **27**: 103-106.
- Fujioka, K., 2000. serpentinites; their tectonic significance and as a capsule of deep biosphere "serpentine biosphere". *EOS Trans Am. Geophys. Union*, **81**, N. 48: F199-200.
- 藤岡換太郎, 2003. 伊豆・小笠原・マリアナ前弧の蛇紋岩海山—潜水調査船による観察結果のまとめ—. 月刊地球号外, **43**: 75-89.
- 藤岡換太郎・田中武男・青池寛, 1995. 伊豆・小笠原・マリアナ前弧の蛇紋岩海山—潜水調査船による観察と陸上蛇紋岩帯との関連—. 地学雑誌, **104**: 473-494.
- Fujioka, K., Yamanaka, T., Gamo, T., Inagaki, F., Miwa, T., and Sato, H., 2002. An introduction to Serpentine Biosphere in the Mariana Forearc - Capsule of the deep subsurface biosphere from the Chamorro Seamount-. *Bull. Earthq. Res. Inst. Univ. of Tokyo*, **76**: 417-424.
- 藤岡換太郎・和田秀樹・沖野郷子・スーザン・デバリ・徳山英一・長沼毅・小川勇二郎・バトリシア・フライアー・青池寛・加藤久佳, 1994. 伊豆・小笠原弧横断潜航—海洋地殻断面、蛇紋岩海山、マンガン舗装—. JAMSTEC 深海研究, **10**: 1-35.
- 藤岡換太郎・和田秀樹・森田澄人・篠原雅尚・小泉聡子, 1993. 伊豆・小笠原海溝の前弧斜面の潜航結果—鯨骨生
物群集—. しんかいシンポジウム報告書, **9**: 133-149.
- Fujiwara, T., Kinoshita, H., and Morijiri, R., 1999. Magnetic structure of the southern Boso Peninsula, Japan, and its implication for the formation of the Mineoka Ophiolite Belt. *Earth Planet. Space*, **51**: 413-424.
- Hada, S., and Suzuki, T., 1983. tectonic environment and crustal section of the outer zone of Southwest Japan. In Hashimoto and Uyeda, S. (eds.), Accretion tectonics the Circum-Pacific regions, pp.207-218. Terra Sci. Pub. Comp.
- Haggerty, J. A., 1993. Evidence from fluid seeps atop serpentinite seamounts in the Mariana Forearc: Clues for emplacement of the seamounts and their relationship to forearc tectonics. *Marine Geology*, **102**: 293-309.
- Hess, H.H., 1955. Serpentinities, orogeny and epirogeny. *Geol. Soc. Amer. Spec. Pap. (crust of the Earth)*, 391-407.
- Hussong, D. M. and Fryer, P., 1985. Forearc tectonics in the northern Mariana arc. In N. Nasu (ed.), Formation of Active Ocean Margins, pp.273-290. Terra Scientific Publishing Company, Tokyo.
- Ishii, T., 1985. Dredged samples from the Ogasawara fore-arc seamount or "Ogasawara Paleoland". In N. Nasu (ed.), Formation of Active Ocean Margins, pp.307-342. Terra Scientific Publishing Company, Tokyo.
- Ishii, T., Sato, H., Haraguchi, S., Fryer, P., Fujioka, K., Bloomer, S. And Yokose, H., 2000. Petrological characteristics of peridotites from serpentinite seamount in the Izu-Ogasawara-Mariana forearc. *J. Geogr.*, **109**: 517-530.
- Johnson, L. E., and Fryer, P., 1990. The first evidence of MORB-like lavas from the outer Mariana forearc: geochemistry, petrography and tectonic implications. *Earth and Planet. Sci. Lett.*, **100**, 304-316.
- Johnson, L. E., Fryer, P., Taylor, B., Silk, M., Sliter, W. V., Jones, D. L., Itaya, T., and T. Ishii, T., 1992. New evidence for crustal accretion in the outer Mariana forearc: Cretaceous Radiolarian Cherts and MORB-like lavas. *GEOLOGY*, **19**: 811-814.
- Kamiya, S., and Kobayashi, Y., 1999. seismological evidence for the existmce of serpentinitized wedge mantle. *Gephys. Res. Lettr.*, **27**: 819-822.
- 兼平慶一郎, 1976. 房総半島南部嶺岡帯における蛇紋岩と玄武岩の産状. 地質学論集, **13**: 43-50.
- Kato, K., Wada, H., and Fujioka, K., 2003. The application of chemical staining to separate calcite and aragonite minerals for micro-scale isotopic analyses. *Geochemical J.*, **37**: 291-297.
- 木戸ゆかり, 2004. 西南日本外帯に見られる地磁気ダイポール異常について. 月刊地球, **26**: 687-695
- 木戸ゆかり・東方外志彦・藤岡換太郎・金田義行・河野芳輝・町田嗣司・佐藤暢, 2000. 南海トラフから四国東部陸域における地球物理学的特徴について. 情報地質, **11**: 157-166
- Kido, Y., Kido, M., and Fujioka, K., 2004. Magnetic dipole anomalies as indicators of mantle wedge serpentinitization. *Geochemistry Geophysics Geosystem*, **5**, doi:10.1029/2004GC000697
- 木戸ゆかり・町田嗣樹・佐藤暢・藤岡換太郎, 2003. 四国蛇紋岩体の調査報告. JAMSTEC 深海研究報告, **22**: 189-198.
- 前川寛和・長田幸久・藤岡換太郎・千葉仁・前田七生・横瀬久芳・藤本悠太・佐藤創・山本鋼志・和田穰隆・平内健一・村田恵子・高江洲盛史, 2007. マリアナ前弧オフィオライト基盤と蛇紋岩海山. 月刊地球号外, **58**: 2-9.
- 前川寛和・勝瑞雅也・石井輝秋, 1989. 前弧オフィオライト. 地学雑誌, **98**: 241-251.

- Maekawa, H., Shouzu, M., Ishii, T., Fryer, P., and Pearce, J. A., 1993. Blueschist metamorphism in an active subduction zone. *Nature*, **364**: 520-523.
- Maekawa, H., Shouzu, M., Ishii, T., Saboda, K. L., and Ogawa, Y., 1992. Metamorphic rocks from the serpentinite seamount in the Mariana and Izu-Ogasawara forearcs. In Fryer, P., Pearce, J. A., and Stokking, L. B. *et al.* (eds.), Proc. ODP, Sci. Results, 125: College Station, TX (Ocean Drilling Program), pp.415-430.
- 村上英記・吉倉紳一, 1992. 空中磁気データからみた西南日本外帯(四国地域)の構造. 月刊地球, **14**: 576-580.
- Murata K., Maekawa H., Yokose H., Yamamoto K., Fujioka K., Ishii T., Chiba H., and Wada Y., 2009. Significance of serpentinitization of wedge mantle peridotites beneath Mariana forearc, western Pacific. *Geosphere*, **5**: 90-104.
- Miyashiro, A., 1966. Some aspect of peridotite and serpentinite in orogenic belt. *J. Jour. Geol. Geogr.*, **37**, 45-61.
- O'Hanley, D. S., 1996. Serpentinites: Records of petrologic and tectonic history. 277pp. New York, Oxford University Press.
- Research Group of Peridotite Intrusion, 1967. Ultramafic rocks in Japan. *J. Geol. Soc. Japan.*, **73**: 543-553.
- Sakai, R., Kusakabe, M., Noto, M. And Ishii, T., 1990. Origin of waters responsible for serpentinitization of the Izu-Ogasawara-Mariana forearc seamounts in view of hydrogen and oxygen isotope ratios. *Earth Planet. Sci. Lett.*, **100**: 291-303.
- Tatusmi, Y., Hamilton, D.L., and Nesbit, R.W., 1986. Chemical characteristics of fluid phase released from a subducted lithosphere and origin of arc magmas: evidence from high-pressure experiments and natural rocks. *J. Volcan. Geotherm. Res.*, **29**: 293-309.
- Toft, P. B., Arkini-Hamed, J. And Haggerty, S. E., 1990. The effect of serpentinitization on density and magnetic susceptibility: a petrophysical model. *Physics Sci. Earth Planet. Int.*, **65**: 137-157.
- Yamanaka, T., Mizota, C., Satake, H., Kouzuma, F., Gamo, T., Tsunogai, U., Miwa, T., and Fujioka, K., 2003. Stable isotope evidence for a Putative endosymbiont-based lithotrophic *Bathymodilus* sp. Mussel community atop a serpentine seamount. *Geomicrobiology J.*, **20**: 185-197.
- Yokose, H., Maekawa, H., Fujioka, K., 2007. Geomorphologic study of the serpentine seamounts in the Mariana forearc region. AGU 2007 Fall Meeting (San Francisco).
- Yoshikura, S., Hada, S., and Isozaki, Y., 1990. Kurosegawa Terrane. In Ichikawa, K. (ed.), Pre-Cretaceous Terranes of Japan. Nihon-insatsu, Osaka.