プレート沈み込みにおける水の意義と伊豆・小笠原 海溝の serpentine ダイアピルを横切る速度構造

上 村 彩* 笠 原 順 三* 日 野 亮 太**
篠 原 雅 尚* 塩 原 肇* 金 沢 敏 彦*

The Significance of Water on Plate Subduction and the Seismic Velocity
Structure Across the Serpentine Diapir in the Izu-Bonin Trench

Aya KAMIMURA*, Junzo KASAHARA*, Ryota HINO**,
Masanao SHINOHARA*, Hajime SHIOBARA* and Toshihiko KANAZAWA*

Abstract

To predict earthquakes, huge efforts have been devoted to monitoring earthquakes, crustal deformations and water level during past decades, however, has been found to be extremely difficult. A new approach in marine seismic studies on earthquake prediction proposes focusing on the nature of the subducting plate boundary. Some Ocean Drilling Program (ODP) drillings and seismic reflection studies show fluid flows and the existence of hydrous minerals in the decollement zone. Considering that the subducting plate might contain much water, a number of hydrous minerals might be stable down to 150-300 km, in particular, serpentines and lawsonite.

In 1998, the authors carried out a seismic experiment at the Izu-Bonin trench using Ocean Bottom Seismometers (OBSs) and controlled sources. The 130 km long E-W line crosses the Torishima forearc seamount, one of the serpentine diapirs at the eastern terminus. The velocity structure obtained along the line shows a relatively high velocity at the top and a low velocity at the bottom of the serpentine diapir. The velocity of the mantle wedge is slower than that of normal mantle. The dip of the subducting slab is initially quite gentle and abruptly becomes steep around 100 km from the trench axis. Hydration of peridotite in the mantle wedge might occur close to the Izu-Bonin trench axis and serpentines seem to be raised upward to the ocean bottom.

Key words : hydrous minerals, water, serpentine, Izu-Bonin subduction zone, earthquake generation mechanism

キーワード : 含水鉱物, 水, serpentine, 伊豆・小笠原沈み込み, 地震発生メカニズム

* 東京大学地震研究所

** 東北大学理学部

* Earthquake Research Institute, University of Tokyo

** Faculty of Science, Tohoku University

I. はじめに

過去の地震予知研究では地震の発生現象をとらえるために陸上での地震、地殻変動、地下水、地殻構造に関する観測と研究が長年行われてきたが、地震の予知という観点からは決定的な結果は得られなかった。前兆現象として観測されるような前震や地下水異常、ラドン異常、地殻変動異常などは皆無ではないが、その例はあまりにも少ない。この事実は前兆的変動が全くないということではなく、今まで行われてきた観測方法が前兆現象をとらえるという観点からは必ずしも適切ではなかった可能性を示唆している。また、巨大地震を起こしているプレートの沈み込み面に沿った地震発生では、被害地震に至らないような「ゆっくり地震 (slow earthquake)」としての地殻変動が本震の後で観測されている (たとえば, Heki *et al.*, 1997)。この事実は、プレート境界型の地震発生メカニズムが陸上のそれとやや違った特性を持っていることを意味する。

海溝沿いのプレートの沈み込みに伴う巨大地震の発生については、プレート境界の性質や場の性質が地震発生を決めていると考えられる。このプレート境界の特性を地震発生の観点から明らかにしていくことが今後の地震予知において重要な要素であり、特に海域の地震学的研究では新たな戦略が必要になってくる (笠原ほか, 1998)。

以下、いくつかの領域でのプレート境界についての観測結果とそこから読みとれる地震学的性質と、それと流体 (水) や含水鉱物との関係について述べる。また, serpentine (蛇紋石) ダイアピルは地震発生現象と密接に関係すると考えられるが、それらが存在する伊豆・小笠原で 1998 年に行われた海底地震計・制御震源を用いた実験結果について議論する。

II. プレート沈み込みに伴う含水鉱物

1) 沈み込みに伴う含水鉱物

浅い部分から深い部分まで、沈み込むスラブにそった地震発生には水が深く関与すると考えられるので、以下に重要な含水鉱物 (Hyndman *et*

al., 1997; 岡本ほか, 1997; 小野, 1999) を簡単にまとめる。

蛇紋石 (serpentine) ($(\text{Mg}_3\text{Si}_2\text{O}_5(\text{OH})_4)$)

金雲母 (phlogopite) ($(\text{KMg}_3\text{AlSi}_3\text{O}_{10}(\text{OH})_2)$)

角閃石 (amphibole) ($(\text{K}_{3.2}\text{Mg}_{6.5}\text{Al}_{0.5}\text{Si}_{0.7}\text{O}_{22}(\text{OH})_2)$)

緑泥石 (chlorite) ($(\text{Mg}, \text{Fe}, \text{Al})_6(\text{Si}, \text{Al})_4\text{O}_{10}(\text{OH})_8$)

滑石 (talc) ($(\text{Mg}_3\text{Si}_4\text{O}_{10}(\text{OH})_2)$)

ブルーサイト (brucite) ($(\text{Mg}(\text{OH})_2)$)

ローソン石 (lawsonite) ($(\text{CaAl}_2\text{Si}_2\text{O}_7(\text{OH})_2\text{H}_2\text{O})$)

Phase A ($\text{Mg}_7\text{Si}_2\text{O}_8(\text{OH})_6$)

Phase B ($\text{Mg}_{24}\text{Si}_8\text{O}_{38}(\text{OH})_4$)

10Å-phase ($\text{Mg}_3\text{Si}_4\text{O}_{14}\text{H}_6$)

3.65Å-phase

フェンジャイト (phengite) ($(\text{K}_2(\text{Al}, \text{Fe}, \text{Mg})_4(\text{Si}, \text{Al})_8\text{O}_{20}(\text{OH})_4)$)

スメクタイト (smectite) (きわめて複雑な化学式)

などであろう。

2) Smectite-illite

中米カリブ海の北部バルバドスの海溝周辺の沈み込み域で 3D 地震反射法探査が行われた (Shipley *et al.*, 1994)。その結果、沈み込みプレート境界付近のデコルマ面では地震波の反射強度が強く、そこで地震反射波の位相反転が起きている部分があることが明らかになった。位相反転があったり強い地震反射強度が観測されたりすることは、反射面の上側に比べてその下側に著しい低地震波速度の物質が存在していることを示唆すると考えられる。地震波速度が小さいことはポアソン比が大きいことにはほぼ等しく、また密度が小さいことに相当する。そのような性質の物質であれば、変形しやすくそこで定常的な滑りが起こり得ると考えられる。国際深海掘削計画 (ODP) 156 航海ではこの場所の深海掘削が行われた。掘削孔 671B はデコルマ面に達し、そこでは約 15-20 m の厚さの高い流体圧の層が見つかった (Shipley *et al.*, 1994, 1995)。ほぼ同じ地域で行われた ODP171 航海では、デコルマ面は厚さ 20 m ほどの流体を

含んだ層であり、それらは放散虫（ラジオラリア）などを大量に含んだスメクタイト（smectite）・ラジオラリア・クレイストーンであることがわかった（Moore *et al.*, 1998）。このデコルマ層の中では密度が周囲より低下していた。ここでの地震反射波の位相は場所により正になったり負になったりする。デコルマ面を通して水などの流体が流れ、滑りを起こしているのだと考えられた。

室戸沖の南海トラフでの反射記録は、デコルマが明らかに存在することを示す（Moore and Shipley, 1993）。ODP131での掘削坑808ではデコルマの厚さは19.2 mであった。南海トラフのデコルマの構成物はバルバドスのものと異なり、タービダイト（深海泥流堆積物）であるが、デコルマ面付近に粘土鉱物でのsmectiteが増加していることがわかった（Underwood *et al.*, 1993）。掘削ではデコルマ面でP、Sとも地震波速度が不連続的に減少し、空隙率も35%から45%へ増加する（Byrne *et al.*, 1993）。しかし最近、高精度の3D反射法探査が実施されたが、デコルマでの位相反転が明瞭に観測されなかった。デコルマ面はトラフ軸からせいぜい50 kmしか追跡できない（倉本ほか, 2000）。バルバドスと南海トラフの例は同じ様な地震波反射特性や力学的なデカップルゾーンがあり、そのデコルマ面はどちらも流体の通路になっていたり、そこに含水粘土鉱物であるsmectiteが存在したりした。Smectiteは100-150℃の温度で脱水しillite（イライト）へ相変化する（Hyndman *et al.*, 1997）。彼らは沈み込むプレートの年代の違いによるスラブの温度の違いによってsmectite→illite, serpentine→olivine（かんらん石）の脱水反応を用い、沈み込み帯の地震発生様式の差を説明した。smectiteの脱水反応は浅い部分で起き、無水のilliteは脆性的な性質を持ち地震を発生するような性質を持つ（Moore *et al.*, 1989）。

3) serpentine（蛇紋石）とその他の含水鉱物

serpentineはolivine+水により含水鉱物化したものであり、serpentineが脱水反応を起こすとolivineとtalcになる。serpentineは温度圧力に

より3つの安定な状態 lizardite（リザーダイト）、chrysotile（クリソタイル）、antigorite（アンチゴライト）を持ち（O'Hanley, 1996）、Ulmer and Trommsdorff（1995）によればもっとも高温・高圧で安定なantigoriteの脱水反応は620-720℃付近で起きる。Ulmer and Trommsdorff（1995）はantigoriteが620℃以下の様な温度の場合、きわめて高圧（5GPa：約150 km）まで安定であることを実験的に示した。しかしserpentineをMgO-SiO₂-H₂O系としてみたとき安定領域は異なる。antigoriteは400-450℃でbruciteと反応し、forsterite（フォーステライト、Mg-richかんらん石）と水を生じる（Berman *et al.*, 1986）。また、H₂O分圧によりも変化する（Sanford, 1981）。

Raleigh and Paterson（1965）はserpentineの変形実験から延性的なserpentineが500-700℃で再び脆性的になることを示した。Raleigh（1967）は高温高圧になるにつれて延性的になり地震発生の説明が困難なことをserpentineの再脆性化によって説明した。Murrell and Ismail（1976）もRaleigh and Paterson（1965）と同様な結果を得たが、Brodie and Rutter（1987）はこれらの結果は反応の過渡的な状態を見ているにすぎないとした。

地球内部でserpentineが重要な理由は、その含水率である。serpentineは13%程度の水を含み、安定である限りマントル深部まで大量の水を運ぶことができる点である。

岡本ほか（1997）、Okamoto and Maruyama（1999）はMORB+H₂Oの高圧相としてlawsonite-eclogiteがきわめて高い温度・圧力条件下まで安定に存在することを示した。Lawsonite単体は11.5%の水を含み得る。また、800℃、10GPaまで安定に存在しserpentineとともにマントル中に水を運ぶ有力な候補である。

沈み込むプレートの温度が高い場合serpentineは浅い部分で脱水するし、lawsoniteもそれほど深くまで存在しない。この場合はamphibole（角閃石）がマントルウェッジへ水を運ぶと考えられている（Tatsumi, 1989; 巽, 1995）。彼は、脱水

反応はマントルウェッジで完結し、マグマの溶融は無水で起きるとした。

III. 沈み込みと serpentine ダイアピル

地震発生という現象は同じであっても、それを支配する要素（場と物性）はそれぞれの沈み込み境界で異なる可能性が高い。伊豆・小笠原海溝での沈み込み境界では、南海トラフ、日本海溝、千島海溝などとは違った特徴がある。

伊豆・小笠原海溝では、海溝軸から陸側へ10~40 kmの前弧に直径30 kmほどの海山が点々と存在する。これらはマリアナ海溝の前弧まで続いており、ドレッジ、潜水艇調査、深海掘削の結果から、この海山はserpentine化したかんらん岩からなることがわかった(Fryer *et al.*, 1990; Ishii *et al.*, 1992)。上述のようにserpentineはマントルの主要構成物質である超塩基性岩のかんらん岩が水により含水鉱物となったものである。Serpentine化の程度により密度や地震波速度は大きく変化する。おおむねserpentineの密度は2.2程度より小さい。沈み込みによって運ばれた水によってマントルウェッジのかんらん岩がserpentine化すると、その密度と流動性のためにダイアピルとしてマントル中を、あるいはプレート境界に沿って上昇すると考えられる。

1989年のODP125航海では、マリアナ前弧域のコンカル海山と伊豆・小笠原前弧域の鳥島前弧海山で深海掘削が行われた（たとえば、Ishii *et al.*, 1992; Pearce *et al.*, 1992）。前川ほか(1992)は、その掘削から低温高压型の変成岩片が多数回収されたことから、沈み込む太平洋プレートの上盤側にあったマントルウェッジのかんらん岩と、沈み込むプレートの岩石がもたらす水が反応してserpentine化し、それが浮力によって上昇しダイアピルになったとした。一方、石井ほか(1992)は掘削から得られた岩石の化学的特徴から次のように推定した。(1) マントル(Lherzolite+Harzburgite+dunite)ダイアピルが発生・上昇したのち火成活動が起こり、上部マントル内にダイアピルの溶け残りの「かんらん岩体(Harzburgite+dunite)」が形成、(2) テクト

ニックエロージョンにより(1)が海溝方向へ移動、(3)(2)が沈み込むプレートがもたらす水によりserpentine化し、それが浮力によって上昇してserpentineダイアピルになった。

1990年から1992年までの3年間に、伊豆・小笠原北部領域では海底地質・地形サーベイ、反射法地震探査、屈折法地震探査が行われた(Suyehiro *et al.*, 1996; Takahashi *et al.*, 1998)。彼らは1992年に行われた屈折法地震探査で、北緯32°付近の、海溝から鳥島全体を東西に横断する全長480 kmの地殻および上部マントルの地震学的速度構造を求めた。その結果、上部マントルの速度構造は背弧地域とリフト地域の下とともに7.8 km/sであるが、その速度は前弧地域に近づくにつれ徐々に遅くなり、ついには下部地殻の速度とあまり区別がつかなくなるとしている。ここでは海溝のすぐ陸側にserpentineダイアピルが露出している。

IV. 伊豆・小笠原における海底地震計・制御震源を用いた実験とデータ解析

1998年秋に伊豆・小笠原海溝、陸側斜面域において海底地震計と制御震源を用いた実験を行った。実験は東京大学地震研究所、東北大学、千葉大学、東京大学海洋研究所、富山大学、九州大学の共同研究として行い、各機関のデジタル式の海底地震計23台を用いた。うち6台は4.5 Hzの地震計、7台は2 Hzの地震計を用いた。人工震源としては薬量20 kgの火薬106発と17リットルエアガンを用い、1835発のショットを実施した。また、シングルチャンネル・ストリーマケーブル(SCS)を船から曳航した。

口絵2-1に実験領域と測線を示した。実験は鳥島の北東、北緯31°東経141°付近で行い、海溝軸に沿った南北測線と、それに直交する東西測線の2本の測線を引いた。南北測線はいくつかの海底谷を横切るようにし、東西測線はserpentineダイアピルの直上(観測点11)を通過するようにした。両測線ともにほぼ130 kmの長さである。南北測線に12台(うち1台は未回収)、東西測線に12台の海底地震計を設置した(1台は南北・東西

の交点)。南北測線では火薬 53 発, エアガン 880 発 (約 150 m 間隔), 東西測線では火薬 53 発, エアガン 955 発 (約 150 m 間隔) のショットを行った。震源位置は DGPS 測位とトランスポンダーによる測距により, 震源位置については 10 m 程度, 観測点については 50 m 程度の精度で決定した。

本論文では, serpentine に関する議論を行う関係上, 東西測線の結果についてのみ示す。浅部の構造のモデル化には船尾から曳航した SCS 反射波の結果と海底地震計記録の p - τ 法解析を併用したが, 浅部のエアガン反射強度が必ずしも明瞭でない部分があること, p - τ スラントスタックにおける海底地形の影響が大きいために, 最終的には地震屈折法を用い海底地震計で得られた走時と波形を説明することを試みた。海底地震計の走時解析には距離 40 km 程度まではエアガン, 火薬の走時と波形を併用し, これを超える距離では火薬のみを使用した。また構造モデルを作るに際し, ODP 掘削事前調査, 掘削の結果を参照した (Cooper *et al.*, 1990; Horine *et al.*, 1990; Fryer *et al.*, 1990; Ishii *et al.*, 1992; Maekawa *et al.*, 1992; Pearce *et al.*, 1992)。

V. 伊豆・小笠原構造の結果

現在までの伊豆・小笠原リッジの北緯 31° を東西に横切る測線上の解析を満足する地震波速度構造モデルを口絵 2-2 に示した。図中コンターは地震波速度に対する 0.25 km/s 毎の等速度線を示している。このモデルによると, 低速度の物質が serpentine ダイアピルの直下から西にシル状に存在し, 徐々に厚みと速度を増してマントルウェッジにつながっているように見える。その最上部の速度は海溝軸から陸側へ約 110 km のところで 7.3 km/s である。海洋性スラブの沈み込みの角度は海溝軸から陸側 (西) へ約 100 km まではきわめて低角であるが, その後西側で急に沈み込みが急になる。ただし現在までの結果はフォワードモデリングによる構造であるが, この結果は主観的初期モデルに基づいているため, 南北測線との相補正, インバージョンを用いた客観的評価を加味した解析を行うことにより, 今後モデルを修正する

可能性があることを付け加えておく。特に沈み込み角度は, そこを通った波が少ないため確定したものではない。

図 1 と図 2 の上は東西測線の最西端に位置する観測点 1 と, ほぼ中央に位置する観測点 6 の観測波形 (火薬発破) と速度構造から波線追跡 (Zelt and Smith, 1992) して計算した走時を重ねたもの, 下は計算した波線である。そのうち灰色の曲線はマントルウェッジ内で屈折した波の計算結果であり観測波形をよく説明している。また観測点 1 において沈み込むスラブのモホ面で反射した波を計算すると, これは図 1 (上) の横軸 -10 km ~ +10 km で観測された大きな振幅の波の相をうまく説明できた。

図 3 と図 4 は観測点 10 と 11 の観測波形 (火薬発破) と速度構造から波線追跡して計算した走時を重ねたものである。観測点 10 は serpentine ダイアピルのすぐ西の観測点であり, 11 は直上の観測点である。11 の観測波形では西半分の反射・屈折波がよく見えていないが, 10 の観測波形ではよく見えている。図には示していないが, ダイアピルの東山麓に設置した観測点 12 でも西半分の反射・屈折波がよく見えていない。また図 1 や図 2 ではダイアピルに相当する東端のところで地震波の減衰が激しい。他の観測点でも同じ現象が確認された。口絵 2 の速度構造では serpentine ダイアピル下の幅 10 km の範囲で速度が周囲と異なっている。頂上では薄く遅い層, その下に上から 3.3-3.8 km/s 層, 4.0-5.0 km/s 層, 5.5-6.0 km/s 層があり, 最下部には 6.5 km/s 層がレンズ状に存在している。

VI. 議論と結論

伊豆・小笠原の実験結果で得られた口絵 2-1, 2 および図 1~4 の距離 17~30 km において見られる serpentine ダイアピルでの地震波の減衰は serpentine がきわめて柔らかい物質であることによると考えられる。また, 減衰範囲が狭いことから減衰に影響を与える部分も狭く, 口絵 2-2 に示した速度異常のある幅 10 km の部分がそれに相当すると考えられる。

図 1 上図：観測点 1 での火薬発破に対する観測波形と口絵 2-2 の構造モデルから計算した理論走時（太線）。
 灰色で示した線はその中でもマントルウェッジ内で屈折した波線に対する走時。横軸は距離、縦軸は 8.0 km/s に対する相対走時。
 下図：観測点 1 に対する計算した波線。

Fig. 1 Top: Paste-up waveforms for chemical explosions observed by OBS 1 and theoretical travel times for the structure shown in Pictorial 2-2.
 Gray line shows the travel times for rays through mantle wedge. Horizontal axis: distance. Vertical axis: reduced travel time with 8.0 km/s.
 Bottom: theoretical ray-diagram at OBS 1 using the structure shown Pictorial 2-2.

伊豆・小笠原の serpentine ダイアピルを東西に横切る測線に対して得られた構造モデルではマントルウェッジの最上部の速度は典型的なマントル速度よりも遅く、この部分ですでに沈み込むプレートがもたらす水によって少し serpentine 化しているものと考えられる。さらに serpentine 化したか

んらん岩は沈み込むスラブに沿ってほぼ水平に移動し、ダイアピル直下に一度たまり、そこから浮力によって柱状に上昇したものと考えると、この 10 km 幅の速度異常が説明できる。この構造は ODP の事前調査から推定された密度モデル (Horine *et al.*, 1990) と矛盾しない。

図 2 上図：観測点 6 での火薬発破に対する観測波形と口絵 2-2 の構造モデルから計算した理論走時（太線）。
灰色で示した線はその中でもマントルウェッジ内で屈折した波線に対する走時。横軸は距離、縦軸は 8.0 km/s に対する相対走時。
下図：観測点 6 に対する計算した波線。

Fig. 2 Top: Paste-up waveforms for chemical explosions observed by OBS 6 and theoretical travel times for the structure shown in Pictorial 2-2.
Gray line shows the travel times for rays through mantle wedge. Horizontal axis: distance. Vertical axis: reduced travel time with 8.0 km/s.
Bottom: theoretical ray-diagram at OBS 6 using the structure shown in Pictorial 2.

過去の地震記録を見ると、伊豆・小笠原地域では $M7 \sim 8$ クラスの深発地震が多発している。しかし深さ 100 km 以浅で $M7$ 以上の地震は、八丈島東方沖に 2 回（ともに 1972 年、 $M7.0$ と $M7.2$ ）だけである¹⁾。浅いところに巨大地震が起きないこと、serpentine ダイアピルが海溝軸に平行に点々

と存在していることは、どちらも伊豆・小笠原地域特有の特徴である。

沈み込みに伴う含水鉱物とその脱水反応の考察は多くの人（たとえば、Iwamori, 1999）によって行われている。中でも Serpentine は重要である。Serpentine の低温安定相である chrysotile は

図 3 観測点 10 での火薬発破に対する観測波形と口絵 2-2 の構造モデルから計算した理論走時 (太線).
横軸は距離, 縦軸は 8.0 km/s に対する相対走時.

Fig. 3 Paste-up waveforms for chemical explosions observed by OBS 10 and theoretical travel times for the structure shown in Pictorial 2-2.
Horizontal axis: distance. Vertical axis: reduced travel time with 8.0 km/s.

200-300℃で lizardite, antigorite へ相変化し, 最終的に 600-700℃付近で脱水反応を起こす (O'Hanley, 1996)。Moore *et al.* (1997) は約 200℃で上述の3種類の serpentine 鉱物について断層ガウジの実験を行った。そのうち chrysotile だけがきわめて小さな摩擦係数 ($\mu=0.2$) を示した。一方, antigorite や lizardite は摩擦係数が 2 倍以上 ($\mu>0.4$) 大きくスティックスリップを示した。Moore *et al.* (1997) の結果は主として含水鉱物の内部構造に起因しているから, 高温での antigorite にも適用できると考えられる。もしプレート境界上に serpentine の低温安定相である chrysotile があれば, プレート境界での摩擦を減らしそれにより地震が起きにくくなる。深くなって温度が 200-300℃になり antigorite が安定相になると, 摩擦係数が大きくなりプレート境界は固

着し地震を起こし得るような状態になると考えられる。この結果から, 伊豆・小笠原の serpentine は比較的浅部の低温の条件下では安定滑りを起こし, 地震を発生しにくく, 深部になると固着し地震を起こすようになる。また, さらに深部の温度 600-700℃になると脱水反応を起こし, 水の関与によってマグマ生成温度が低くなり, 放出される水が逃げにくい場合には地震発生に寄与すると推定される。

地震発生のメカニズムを解明するため, 1996 年に藤江ほか (2000) は三陸沖において海底地震計を用いた人工地震実験を行った。解析の結果, 東経 143, 北緯 38° 45' ~ 39°, 深さ 13 km の沈み込みプレート境界に相当する部分の地震活動空白域では強い地震反射波が観測された。また従来の地震波初動走時に加えて反射波を用いた走時トモグ

図 4 観測点 11 での火薬発破に対する観測波形と口絵 2-2 の構造モデルから計算した理論走時 (太線).

横軸は距離, 縦軸は 8.0 km/s に対する相対走時. 図 3 (観測点 10) では横軸の -70 ~ -105 km に大きな振幅の波群が見られるが, この図 (観測点 11) ではきわめて弱い.

Fig. 4 Paste-up waveforms for chemical explosions observed by OBS 11 and theoretical travel times for the structure shown in Pictorial 2-2.

Horizontal axis: distance. Vertical axis: reduced travel time with 8.0 km/s. Note: In Fig. 3 (OBS 10), the large amplitude waves are clear at -70 to -105 km of horizontal axis, but those are extremely attenuated at this figure (OBS 11).

ラフィと反射波の強度から, この部分のプレート境界には薄い低速度物質が存在する可能性が明らかにされた (Fujie *et al.*, 1999; 藤江ほか, 2000). 深さから考えて, この高い地震波反射係数を持つ部分がバルバドスや南海トラフの浅部に見られた様なデコルマやその中の smectite と同じである可能性は低い, 低地震波速度を密度が小さいと考えるとこのような層はプレート境界での流動と変形を容易にするであろう. このような特性を持つ層を作る原因として, 流体を含んだ地層や serpentine などの含水鉱物層が提案された (藤江ほか, 2000). このようなプレート境界では沈み込みに伴う歪みは解消され, 大地震は起きないことになる.

本論文では, 地震発生という観点から重要な沈み込みに伴うプレート境界の性質を知る上で主要な含水鉱物に関する過去の研究をまとめた. また, 伊豆・小笠原海溝斜面の存在する serpentine ダイアピルを横切る地震探査の結果を示し, 沈み込み境界における水と serpentine の重要性を議論した. 得られた地震波速度構造から沈み込んだ水によって serpentine 化したマントルウェッジの位置と地震波速度, そこから海底付近まで上昇する serpentine 物質 と serpentine ダイアピルの構造に関する知見が得られた.

含水鉱物の力学特性と脱水反応を起こしたときの水の存在の影響はまだそれほどわかっていない (たとえば金川のレビュー: 金川, 1998). 特に超

低速度での serpentine の流動特性はプレート境界での摩擦構成則に深く関わり、ひいては地震発生の研究にきわめて重要であろう。

謝 辞

本研究は東京大学の地震予知研究経費を用いて行った。船上での実験に際し是沢定之氏、渡邊智毅博士、石山知英氏、瀧下孝明氏、宮林美香氏の援助を得たこと、また解析に際し藤江 剛博士、早川正亮氏の援助を得たことに大変感謝する。また観測には新日本海事の作業船「新辰丸」を用いた。船長および乗組員のみなさまには大変感謝する。

注

- 1) 国立大学観測網地震カタログ震源ファイル (Japan University Network Earthquake Catalog Hypocenters File) を利用した。

文 献

- Berman, R.G., Engi, M., Greenwood, H.J. and Brown, T.H. (1986): Derivation of internally-consistent thermodynamics data by the technique of mathematical programming: A review with application to the system $\text{MgO-SiO}_2\text{-H}_2\text{O}$. *J. Peterol.*, **27**, 1331-1364.
- Brodie, K.H. and Rutter, E.H. (1987): The role of transiently fine-grained reaction products in syntectonic metamorphism: Natural and experimental examples. *Can. J. Earth Sci.*, **24**, 556-564.
- Byrne, T., Bruckmann, W., Owens, W.H., Lallemand, S. and Maltman, A.J. (1993): Structural synthesis; correlation of structural fabrics, velocity anisotropy, and magnetic susceptibility data. *Proc. ODP, Sci. Res.*, **131**, 365-375.
- Cooper, P.A. and Shipboard Scientific Party (1990): Underway geophysics data collected on Leg. 126. *Proc. ODP, Initial Reps.*, **126**, 43-50.
- Fryer, P., Saboda, K.L., Johnson, L.E., Mackay, M.E., Moore, G.F. and Stoffers, P. (1990): Conical seamount: SeaMARC II, ALVIN submersible, and seismic-reflection studies. *Proc. ODP, Initial Reps.*, **125**, 69-80.
- Fujie, G., Kasahara, J., Ito, S., Hino, R., Shinohara, M. and Suyehiro, K. (1999): Heterogeneous crustal structure in forearc slope of the Japan Trench using Ocean Bottom Seismometers. *IUGG XXII General Assembly. Abs. B*, 193.
- 藤江 剛・笠原順三・日野亮太・佐藤利典・篠原雅尚 (2000): 三陸沖プレート沈み込み帯における不均質地殻構造と地震活動度—地震波反射強度分布と地震活動度との関係—. *地学雑誌*, **109**, 497-505.
- Heki, K., Miyazaki, S. and Tsuji, H. (1997): Silent fault slip following an interplate thrust earthquake at the Japan Trench. *Nature*, **386**, 595-598.
- Horine, R.L., Moore, G.F. and Taylor, B. (1990): Structure of the outer Izu-Bonin forearc from seismic-reflection profiling and gravity modeling. *Proc. ODP, Initial Reps.*, **125**, 81-94.
- Hyndman, R.D., Yamano, M. and Oleskevich, D.A. (1997): The seismogenic zone of subduction thrust faults. *The Island Arc*, **6**, 244-260.
- Ishii, T., Robinson, P.T., Maekawa, H. and Fiske, R. (1992): Petrological studies of peridotites from diapiric serpentinite seamounts in the Izu-Ogasawara-Mariana forearc, Leg 125. *Proc. ODP, Sci. Res.*, **125**, 445-485.
- 石井輝秋・ポール ロビンソン・前川寛和・リチャード フィスケ (1992): 島弧前縁部の上部マントルに至る地質断面. *月刊地球*, 号外, **6**, 184-190.
- Iwamori, H. (1999): Transportation of H_2O and melting in subduction zones. *Earth Planet. Sci. Lett.*, **160**, 65-80.
- 金川久一 (1998): 岩石の摩擦と流動に対する熱水および化学反応の影響: 主要未解決問題. *地質学論集*, **50**, 47-57.
- 笠原順三・末広 潔・金沢敏彦 (1998): 海溝型巨大地震予知の戦略的研究提案. *月刊地球*, 号外, **20**, 77-80.
- 倉本真一・平 朝彦・Bangs, N.L.・Shipley, T.H.・Moore, G.F.・EW99-07, 08 航海乗船研究者 (2000): 南海トラフ付加帯の地震発生帯—日米 3D 調査概要—. *地学雑誌*, **109**, 531-539.
- 前川寛和・勝瑞雅也・石井輝秋 (1992): マリアナ海溝前弧域, 蛇紋岩質海山からの低温高压型変成岩類の発見—沈み込み帯における藍閃変成作用の検証—. *月刊地球*, 号外, **6**, 191-195.
- Maekawa, H., Shozui, M., Ishii, T., Saboda, K.L. and Ogawa, Y. (1992): Metamorphic rocks from the serpentinite seamounts in the Mariana and Izu-Ogasawara forearcs. *Proc. ODP, Sci. Res.*, **125**, 415-430.
- Moore, D.E., Summers, R. and Byerlee, J.D. (1989): Sliding behavior and deformation textures of heated illite gouge. *J. Struct. Geol.*, **11**, 329-342.
- Moore, D.E., Lockner, D.A., Ma, S., Summers, R. and Byerlee, J.D. (1997): Strengths of serpentinite gouges at elevated temperatures. *J. Geophys. Res.*, **102**, 14787-14801.
- Moore, G.F. and Shipley, T.H. (1993): Character of the decollement in the Leg 131 area, Nankai Trough. *Proc. ODP, Sci. Res.*, **131**, 73-82.

- Moore, J.C., Klaus, A. *et al.* (1998): Consolidation patterns during initiation and evolution of plate-boundary decollement zone: Northern Barbados accretionary prism. *Geology*, **26**, 811-814.
- Murrell, S.A.F. and Ismail, I.A.H. (1976): The effect of decomposition of hydrous mineral on the mechanical properties of rocks at high pressures and temperatures. *Tectonophysics*, **31**, 207-258.
- O'Hanley, D.S. (1996): *Serpentinities: records of tectonic and petrological history*. Oxford University Press, New York, 277p.
- Okamoto, K. and Maruyama, S. (1999): The high-pressure synthesis of lawsonite in the MORB+H₂O system. *Amer. Mineralogist*, **84**, 362-373.
- 岡本和明・Max Schmidt・丸山茂徳 (1997): 海水をマントルに運ぶ. *科学*, **67**, 478-479.
- 小野重明 (1999): 地球マントル中の水, 高圧力の科学と技術, **9**, 3-10.
- Pearce, J.A., van der Laan, S.R., Arculus, R.J., Mruton, B.J., Ishii, T., Peate, D.W. and Parkinson, I.J. (1992): Boninite and harzburgite from leg. 125 (Bonin-Mariana forearc): A case study of magma genesis during the initial stages of subduction. *Proc. ODP, Sci. Res.*, **125**, 623-659.
- Raleigh C.B. and Paterson, M.S. (1965): Experimental deformation of serpentinite and its tectonic implications. *J. Geophys. Res.*, **70**, 3965-3985.
- Raleigh, C.B. (1967): Tectonic implications of serpentinite weakening. *G.J.R. Astron. Soc.*, **14**, 113-118.
- Sanford, R.F. (1981): Mineralogical and chemical effects of hydration reactions and applications to serpentinitization. *Amer. Mineral.*, **66**, 290-297.
- Shipley, T.H., Moore, G.F., Bangs, N.L., Moore, J.C. and Stoffa, P.L. (1994): Seismically inferred dilatancy distribution, northern Barbados Ridge decollement: Implications for fluid migration and fault strength. *Geology*, **22**, 411-414.
- Shipley, T., Ogawa, Y. and Blum, P. *et al.* (1995): *Proc. ODP, Init. Reps.*, **156**. College Station TX, ODP, 301p.
- Suyehiro, K., Takahashi, N., Ariie, Y., Yokoi, Y., Hino, R., Shinohara, M., Kanazawa, T., Hirata, N., Tokuyama, H. and Taira, A. (1996): Continental crust, crustal underplating, and low-Q upper mantle beneath an oceanic island arc. *Science*, **272**, 390-392.
- Takahashi, N., Suyehiro, K. and Shinohara, M. (1998): Implications from the seismic crustal structure of the northern Izu-Bonin arc. *The Island Arc*, **7**, 383-394.
- Tatsumi, Y. (1989): Migration of fluid phases and genesis of basalt magmas in subduction zones. *J. Geophys. Res.*, **94**, 4697-4707.
- 巽 好幸 (1995): 沈み込み帯のマグマ学: 全マントルダイナミクスに向けて. 東京大学出版会, 186p.
- Ulmer, P. and Trommsdorff, V. (1995): Serpentine stability to mantle depths and subduction-related magmatism. *Science*, **268**, 858-861.
- Underwood, M.B., Orr, R., Pickering, K. and Taira, A. (1993): Provenance and dispersal patterns of sediments in the turbidite wedge of Nankai Trough. *Proc. ODP, Sci. Res.*, **131**, 15-34.
- Zelt, C.A. and Smith, R.B. (1992): Seismic travelttime inversion for 2-D crustal velocity structure. *Geophys. J. Int.*, **108**, 16-34.

(2000年4月18日受付, 2000年6月19日受理)