

# スタグナントスラブ： マントルダイナミクスの新展開 ニュースレター

No.5 Mar.2009



## 目 次

### 計画研究の報告

広帯域地震観測によるスタグナントスラブの微細構造の解明	1
地震波トモグラフィーによる滞留スラブの高分解能イメージング	3
海底広帯域地震観測でスタグナントスラブを診る	7
海底電磁気機動観測でスタグナントスラブを診る	14
スラブ滞留・沈降過程の物質科学的モデリング	18
スラブ滞留・崩落過程の物質科学的モデリング	22
マントル下降流による熱・物質輸送と地球進化過程の数値モデリング	27
マントル下降流に伴う滞留スラブの形成・崩落過程の数値モデリング	34
公募研究の報告	40
最終国際シンポジウム報告	45
PEPI特集号のお知らせ	46

## スタグナントスラブのイメージングのための ロシア極東地域広帯域地震観測網の構築—2008—

笠原 稔 (北海道大学・地震火山研究観測センター)

### [1] 2008年実施内容

図1に、本計画による最終の観測点と周辺で稼働中のIRIS長周期地震観測点を示してある。設置経過は、2005年度には、観測点番号1～5の観測点が、2006年度には、6～7の観測点が、2007年度には、8～9の観測点が設置され順調に稼働している。なお、観測点番号10の観測点は、1994年以降、STS1による日ロ共同観測をしている点である。観測点9は、2007年度の秋に機材の搬入を行い、カムチャッカの都合で設置が遅れていたが、2008年3月中旬から稼働している。

2008年度は、これらの観測点のうち、観測点8 (オホーツク) において、GPSデータの受信が不調とのことで、アンテナ交換を行って、その後は順調に稼働している。観測点7 (ウスリースク) は、設置当初の疑問点であっ

た地震計設置方向の確認を行って見たところ、ずれが認められたので、修正した。それ以外の観測点は、順調に稼働している。各観測点からのデータのサハリンへの郵送もほぼ1ヶ月ごとに届けられ、イベントの編集も順調に進んだ。

### [2] 5年間の成果の概要

この班の目標は、太平洋スラブの最も深部に潜り込んでいる直上に位置する極東地域の観測空白域を出来るだけ早く埋め、データを提供することであった。既存のIRIS観測点、カムチャッカ半島ペトロパブロフスク、マガダン、ヤクーツク、ハルビン、ユジノサハリンスクに囲まれた、おおよそ東西南北2000km×2000kmの範囲である。計画以前の日ロ間の協力関係を基礎においたが、

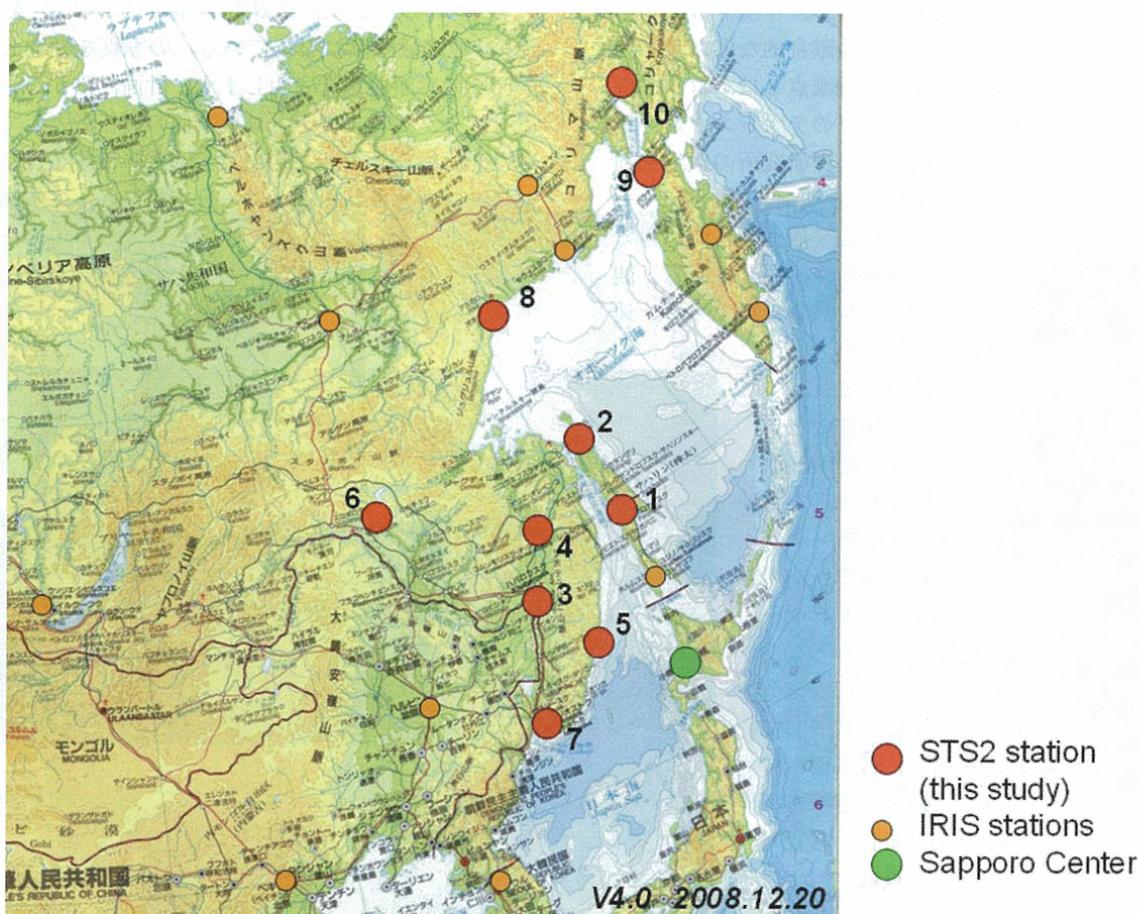


図1 極東ロシアでの広帯域地震観測点分布。(赤色：本計画による設置観測点、観測点番号は表1を参照、緑色：北海道大学観測センター、橙色：IRIS等の既設観測点。

表1 2007年度までに完成した設置観測点リスト、観測開始日。座標値はWGS84系。

No.	Station Name	code	Latitude ° , ' , ''	Longitude ° , ' , ''	Alt m	Start date of observation
1	Tymosk	TYM	50-51-53.9	142-40-33.1	161	2005, Jun. 25
2	Okha	OHA	53-36-06.5	142-56-44.4	26	2005, Jun. 27
3	Khabarovsk	KHA	48-28-23.8	135-03-05.2	111	2005, Aug. 10
4	Gorney	GOR	50-45-47.4	136-26-57.9	528	2005, Aug. 23
5	Terney	TER	45-03-43.2	136-36-02.3	30	2005, Sep. 30
6	Zeya	ZEY	53-45-25.6	127-17-10.0	280	2006, Jul. 28
7	Uslisk	USL	43-42-04.0	132-09-46.4	263	2006, Aug. 23
8	Okhotsk	OKH	59-21-39.6	143-14-06.0	3	2007, Aug. 15
9	Palana	PAL	59-07-37.2	159-59-52.8	30	2008, mid Mar.
10	Kamenskoe	KAM	62-27-21.6	166-12-36.0	64	1994, Oct. 10

観測点設置・データの日本への移送に関するロシア当局の許可の取得、機材の搬送にかかわる通関手続きなどなど、それなりの苦労があった。しかし、初年度に機材の購入・日本での試験観測と設置技術の訓練を進め、次年度の秋までに、5点を稼動させ得たことは、短い計画期間の中で有効なデータを提供できたものと考えている。これには、ロシア科学アカデミー地球物理局サハリン地震観測所の定常観測点（表1の1・2、4～6）の利用が出来たことと、当観測所の職員の献身的な協力があったから出来たものである。なお、観測点3は、ロシア科学アカデミー極東支部ハバロフスクのテクトニクス・地球物理研究所の協力の下、同地の地理研究所の敷地を利用している。また、観測点7は、ロシア科学アカデミー極東支部ウラジオストックの応用数学研究所との協力で、ウスリースク郊外の天文台の敷地内に設置している。観測点8は、ロシア科学アカデミー地球物理局マガダン地震観測所の協力のもと、高層気象台の敷地に新たな地震計台と小屋を設置して行っている。観測点1～8までは、観測保守とデータの管理に関しては、サハリン地震観測所において行っている。各観測点から1月をめぐりCFカードに記録されたデータがサハリンに送付され、サハリン地震観測所では、2人のオペレータが全データのマージを行い、連続記録を保存している。ロシア側の許可しているイベントのデータ部分を切り出し、ハードディスクにコピーしてもらっている。これらを適宜、日本側へ持ち込んでいる。ちなみに、最近の2ヶ月のイベントデータ、2008年10月1日から12月31日までの期間では、上記8点はすべて稼動しており、全世界M>7の地震が2個、全世界M>5.5の地震が112個、千島(40-60N, 130-160E)に範囲を絞った領域での

M>4.5の地震57個は、2009年1月20日にまとめられ、日本側に提供されている。なお、観測点9と10は、ロシア科学アカデミー地球物理局カムチャッカ地震観測所との協力で維持されている。

#### 【謝辞】

最後に、今回の計画で中心的なパートナーであるロシア科学アカデミー・地球物理局・サハリン支部庁舎(1Fは地震観測室になっている)の写真を紹介し、職員一同への感謝の意を表明します。計画段階から地震計設置・データ処理までを、ロシア側の責任者として進めていただいたSen Rak Se氏が、2008年2月26日、ハバロフスクで客死されたことは、日本側にとっても痛恨の悲しみでありました。ここに生前の多大なる協力を感謝いたしますとともに、御霊の安らかなことを祈念いたします。



写真：ユジノサハリンスク市北東に位置するサハリン地震観測所

## 地震波トモグラフィーによる滞留スラブの高分解能イメージング

末次大輔 (独立行政法人海洋研究開発機構・地球内部変動研究センター)

研究計画イでは、特定領域研究によるフィリピン海・極東ロシアの広帯域地震記録取得がはじまり、既存のデータに加えて新たに取得されたデータを用いて主に次の4つの研究を進めた。

- (1) スラブ滞留に先立つスラブ断裂
- (2) 北西太平洋沈み込み帯におけるマントル不連続面の深さマップと滞留スラブ内部の温度・水について
- (3) 波形トモグラフィーによる南太平洋ブルームのイメージング
- (4) スタグナントスラブ・データセンターの運用

### (1) スラブ滞留に先立つスラブ断裂 (大林, 吉光, 深尾)

沈み込むスラブがマントル遷移層で滞留する過程でどのような変形を起こすかという問題は、スラブ滞留メカニズムを解明するために重要な課題である。本研究では、高分解能P波トモグラフィーと深発地震のメカニズム、そしてSP変換波解析によって、日本周辺のスラブが滞

留前に断裂を起こしていることを明らかにした。日本付近では、東北-関東地方下のスラブは西北西に沈み込み、伊豆-小笠原弧から沈み込むスラブは西南西に沈み込んでいる。深発地震の分布から、方向の異なる両スラブの境が中部地方にあることが分かっている。本研究ではまず高分解能トモグラフィーによる日本付近のP波速度モデルから、日本スラブと伊豆-小笠原スラブの境界付近で何が起きているかを調べた。その結果、中部地方では、深さ300-400kmで両スラブの高速度異常の間にギャップが存在することが分かった (図1)。このギャップ周辺で発生した深発地震のハーバードCMT解を調べたところ、ギャップから離れた場所で起きた地震が沈み込み方向の圧縮応力で起きているのに対して、ギャップ周辺ではスラブ走向に平行な水平張力が働いていることが分かった (図1)。これらのことから、日本弧-伊豆・小笠原弧に沈み込む太平洋スラブは中部日本のマントル遷移層の上で水平方向に断裂しつつあると考えられる。また、紀伊半島沖深発地震のHinnet観測網データを用いた解析により、伊豆-小笠原スラブの北端 (深さ400-

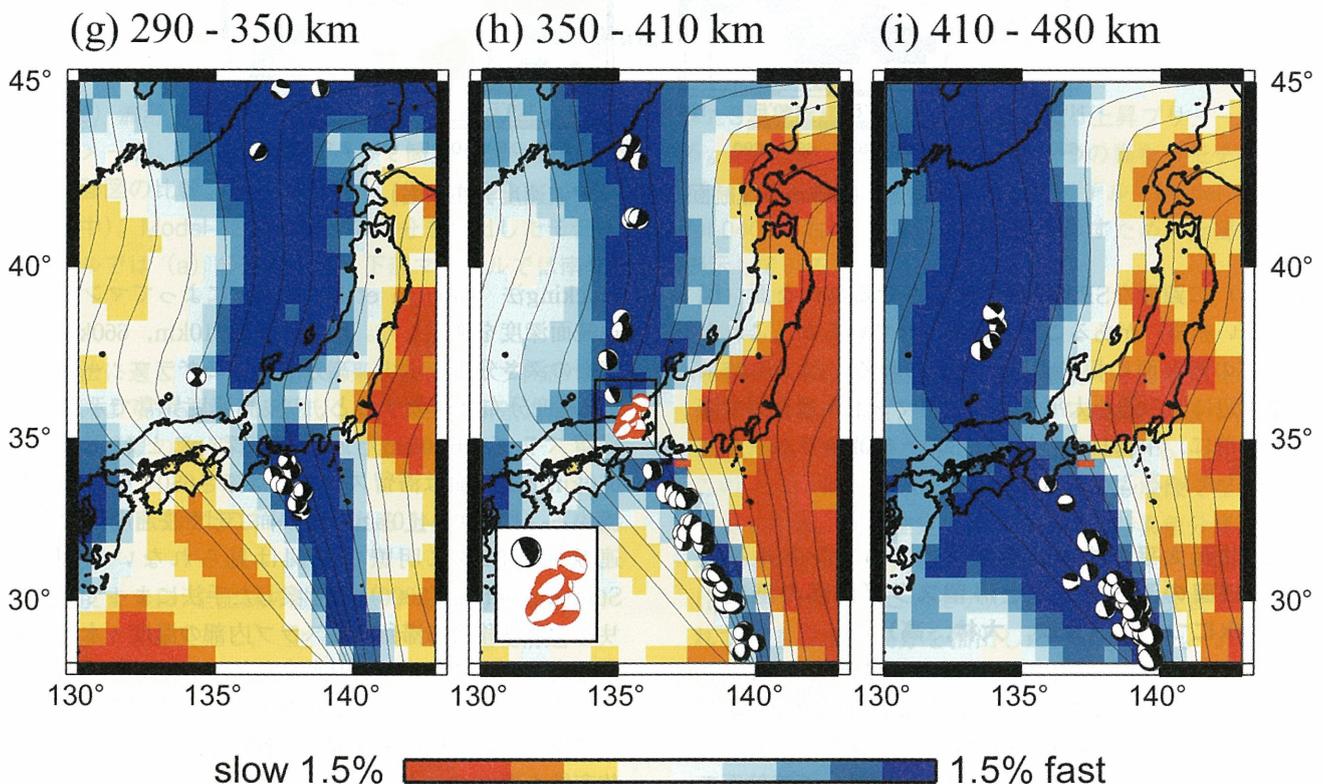


図1 日本付近のP波トモグラフィーモデル。深さ300-500km。それぞれの深さの深発地震震源メカニズム (ハーバードCMT解) とSP変換波の変換面 (赤実線) もプロット。

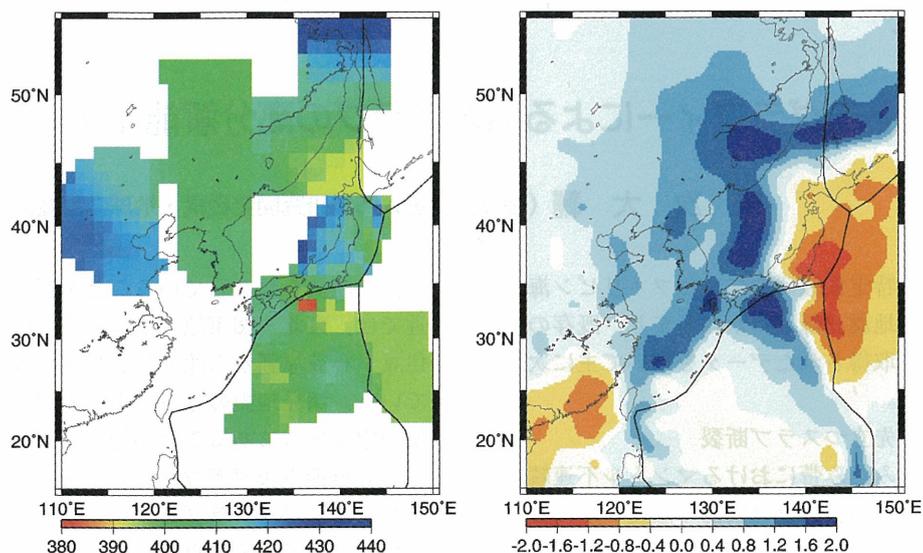


図2 410km不連続面（左）とP波速度分布（右）

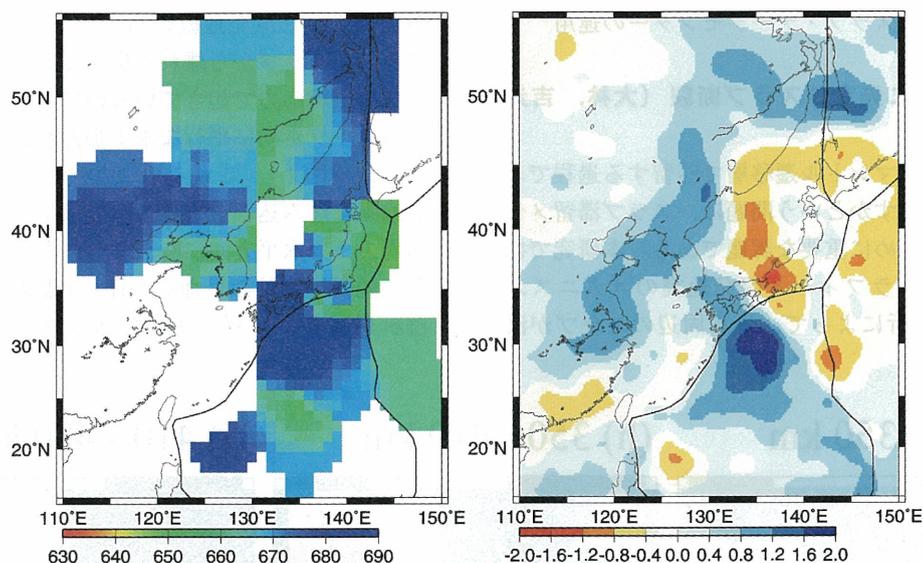


図3 660km不連続面（左）とP波速度分布（右）

500km) に顕著なSP変換波を生じさせる高角な面(図1の短い赤線)があることが指摘されているが、これがスラブの断裂面に相当すると考えられる。以上の結果、日本周辺に沈み込む太平洋スラブがマントル遷移層で滞留する前に、中部日本付近深さ300-400kmで水平方向に断裂していることが明らかになった。

**(2) 北西太平洋沈み込み帯におけるマントル不連続面の深さマップと滞留スラブ内部の温度・水について(末次, 大林, 高)**

フィリピン海北部と西太平洋の広帯域海底地震計(BBOBS)網、極東ロシアに展開している広帯域観測網、および中国地震局の広帯域観測網のデータを用いて、北西太平洋沈み込み帯における410km, 660km不連続面の深さ分布を求めた。本研究では、広帯域波形データのP波レシーバー関数解析をおこない、Velocity Spectrum

Stacking法(Gurrola et al., 1994)によってマントル不連続面深度を推定した。図2, 3に410km, 660km不連続面の深さ分布を示す。高分解能トモグラフィーによるP波速度分布と比較すると、P波高速度異常で示される滞留スラブで660km不連続面が深いことが分かった。660km不連続面は滞留スラブでは深さ680-690kmに位置する(図3)。410km不連続面ではP波速度異常と不連続面の深さに明瞭な相関は見られない(図2)。Suetsugu et al. (2006)で考案した手法によって、フィリピン海遷移層に滞留するスラブ内部の温度・水含有率を推定した。この手法はP波速度と660km不連続面の深さ、そしてオリビンやメジャライトの高温高压実験によって測定された地震波速度と相転移の温度・水含有率依存性を用いて、ポストスピネル相転移深度付近での温度異常と水含有率を推定する手法である。速度異常の強さが精度よく求められているフィリピン海滞留スラブは

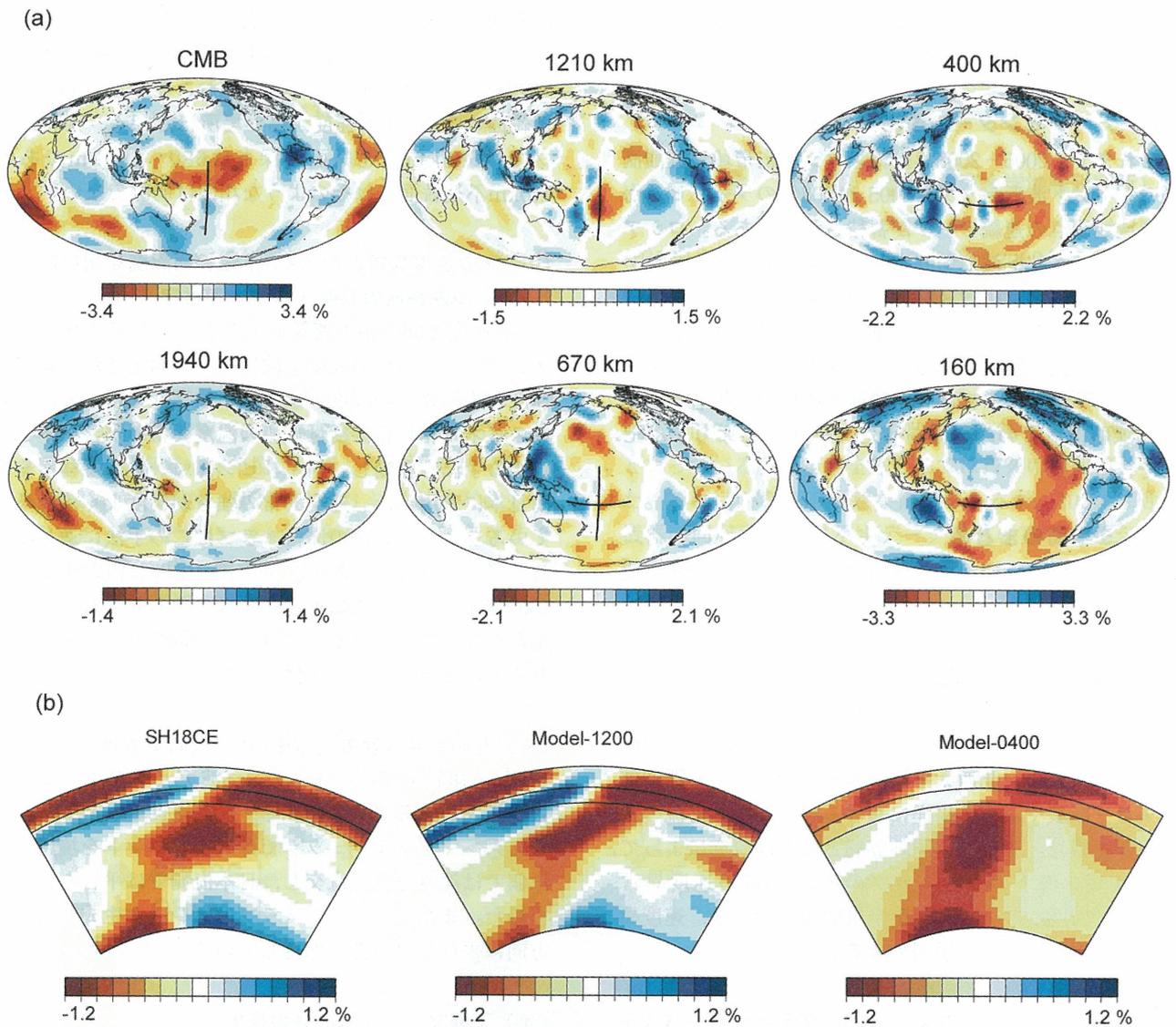


図4 (a) 波形トモグラフィー (Takeuchi 2007, GJI) で得られたS波速度構造モデル中に見られる上昇プリュームのイメージ。図中の黒線に沿って筒状の低速度が確認できる。(b) (a) 中の黒線における3つの異なるモデルの断面図の比較。(a) のモデル (SH18CE; 左)。別のインバージョン手法により求められたモデル (Model-1200; 中)。Model-1200の安定解成分を抽出したモデル (Model-0400; 右)。上昇流の連続性を示すため、上部マントルでは (a) の東西断面、下部マントルでは南北断面を表示している。

この手法に適している。その結果、滞留スラブ内部で温度は周囲よりも500–600度低く、水は推定誤差以下であり、有意な量の水が存在しないことがわかった。

### (3) 波形トモグラフィーによる上昇プリューム像 (竹内)

昨年度までに全記録の波形データを活用する波形トモグラフィーを実施し、全マントルのS波速度構造モデルを推定した (Takeuchi 2007, GJI)。従来のトモグラフィーモデルでは、データサンプリングの不足からマントル対流の上昇流域における解像度が乏しかったが、これまで使われてこなかった後続波データを活用することにより上昇流域の解像度の改善に成功している。得られたモデルには、太平洋の下に上昇プリュームに対応する

と思われる筒状の低速度異常が確認できる (図4 a)。断面図で確認すると、CMB付近から地表付近まで連続的に低速度異常が連なっていることがわかる (図4 b左)。このイメージがモデルの精度不足による虚像でないことを示すため、別の推定アルゴリズム (特異値分解を用いた最小二乗法) を用いた波形トモグラフィーを実施した (図4 b中)。またこのモデルから、特に精度良く制約されている安定解成分を抽出した (図4 b右)。3つのモデルには良い一致が見られ、得られている上昇プリューム像が実像であることを示唆している。

これまでの研究で、CMB近傍の大規模低速度異常 (太平洋とアフリカの下に広がる; 図4 a左上) は、化学組成が周囲とは異なる重い物質の溜まり場であることが示唆されている。本結果は、この溜まり場から、660km

不連続面を突き抜け、地表まで一気に上昇しているプリュームの存在を示唆している。

#### (4) データセンターの運用 (坪井)

これまで、2006-2008年の極東ロシア広帯域地震観測網のイベント波形データと2005-2008年のフィリピン海広帯域観測点の連続データが蓄積されつつある。ロシアデータのイベント波形切り出しは、計画研究アとロシア地球物理測量局の協力によって行われている。記録はmini-SEEDフォーマットに変換され、full-SEEDボリュームとして提供可能である。データセンターには、データセンターのページには特定科研費の研究分担者や公募研究課題担当者のみならず知らせたユーザIDによりアクセスできる。

#### (5) 5年間のまとめ

以下に特定領域研究の5年間における計画研究イの成果を要約する。

##### (a) P波, S波速度構造

P波走時トモグラフィーと波形トモグラフィーによって高分解能P波速度構造とS波速度構造を求めた。これらのモデルから、北西太平洋沈み込み帯における滞留前のスラブ断裂や、南太平洋におけるマントル上昇流のイメージを得た。また、中国地震局との共同研究によって、フィリピン海下の滞留スラブのP波とS波の速度異常(各々2-2.5%, 3-3.5%)を定量的に見積もり、速度異常比が低温起源でよく説明できることを示した。

##### (b) $V_p/V_s$ トモグラフィー手法の開発とグローバル下部マントル $V_p/V_s$ モデルの推定

$V_p/V_s$ を直接求めるトモグラフィー手法を開発し、下部マントルの  $V_p/V_s$  3次元モデルを求めた。その結果、沈み込んだスラブによる高速度異常は温度異常だけで説明できることが分かった。

##### (c) 北西太平洋沈み込み帯のマントル不連続面マッピング

フィリピン海のBBOBSデータ、極東ロシアの広帯域

観測網データ、中国地震局の広帯域観測網データにレシーバー関数を適用し、北西太平洋沈み込み帯全体の410,660km不連続面マッピングをおこなった。660km不連続面の深さはP波速度が高い場所ほど深く、滞留スラブでは660km不連続面の深さは680-690kmである。410km不連続面ではそのような相関は明瞭でない。

##### (d) P波速度異常と660km不連続面深度を用いたマントル遷移層の温度・水含有率推定

P波速度と660km不連続面の深さ、そしてオリビンやメジャライトの高温高压実験によって測定された地震波速度と相転移圧の温度・水含有率依存性を用いて、ポストスピネル相転移深度付近での温度異常と水含有率を推定する手法を開発し、フィリピン海マントル遷移層や西南日本に適用した。速度異常の強さが精度よく求められているフィリピン海の滞留スラブはこの手法に適している。その結果、滞留スラブ内部で温度は周囲よりも500-600度低く、水は推定誤差以下であり、有意な量の水が存在しないことがわかった。滞留スラブに隣接する九州では1重量%の水を検出した。

##### (e) 北西太平洋沈み込み帯のS波偏向異方性

Hinet傾斜計で記録されたScS波データを用いて北西太平洋沈み込み帯のS波偏向異方性分布を推定した。その結果、マントルウェッジでは火山フロントを境に太平洋側では沈み込みに直交し、日本海側では平行な異方性を得た。また、沈み込むスラブはプレート生成時の拡大方向に平行な異方性を保持していることが分かった。

##### (f) 下部マントル散乱体の検出

マリアナ深発地震のHinetデータ解析によって、マリアナ直下の下部マントル反射面を検出した。

##### (g) データセンターの開設と運用

フィリピン海BBOBSデータや極東ロシア広帯域観測網の地震波記録を管理するデータセンターを開設・運用し、特定領域研究者によるデータ利用の便宜を図った。

## 海底広帯域地震観測でスタグナントスラブを診る

金 沢 敏 彦 (東京大学地震研究所)

本研究班では海底電磁気機動観測を実施するエ班と共同の観測研究として2005年10月に開始した、フィリピン海と北西太平洋の領域での長期繰り返し海底広帯域地震観測を実施してきた。本年度は、3年目最終期の観測データを回収するために、海洋研究開発機構の研究船「かいいい」を利用して観測航海を実施した(11月15日~12月2日)。本航海では昨年度に設置した19観測点(図1)で広帯域海底地震計(BBOBS)および海底電磁力計(OBEM),それぞれ15・14台を回収した。昨年度までは全数の長期海底観測機器を無事に回収してきたが、今年度はT01観測点でBBOBSが離底せず唯一の未回収となっている。これには観測データが正常に蓄積されていることが水中音響通信により確認されており、潜水船による機器回収を検討中である。また、広域観測網を維持する目的で、四国海盆南西端のT08観測点にBBOBSと

OBEMを各1台設置した。これらは2009年8月の「かいいい」航海にて回収する予定である。

回収した14台のBBOBSにおいては、うち4台が機器内部のトラブルで記録を得られなかった(T08, T11, T12, T17)ため、データ回収率は71%(T01を含まず)となっている。3年間全体としては77%の回収率となった。これはかなり不本意な値ではあるが、100%に近い機器の回収率と次に示すデータ品質の高さを考えれば、国際的には十分な評価が得られるレベルの観測であったと言える。

過去の2年間と同様に、基礎的データ解析として観測点の質を評価するためにノイズモデルを全観測点で計算した。昨年と同様に、T13観測点は低雑音レベルであり、静かな海洋島の陸上観測点と併せたノイズモデルを図2

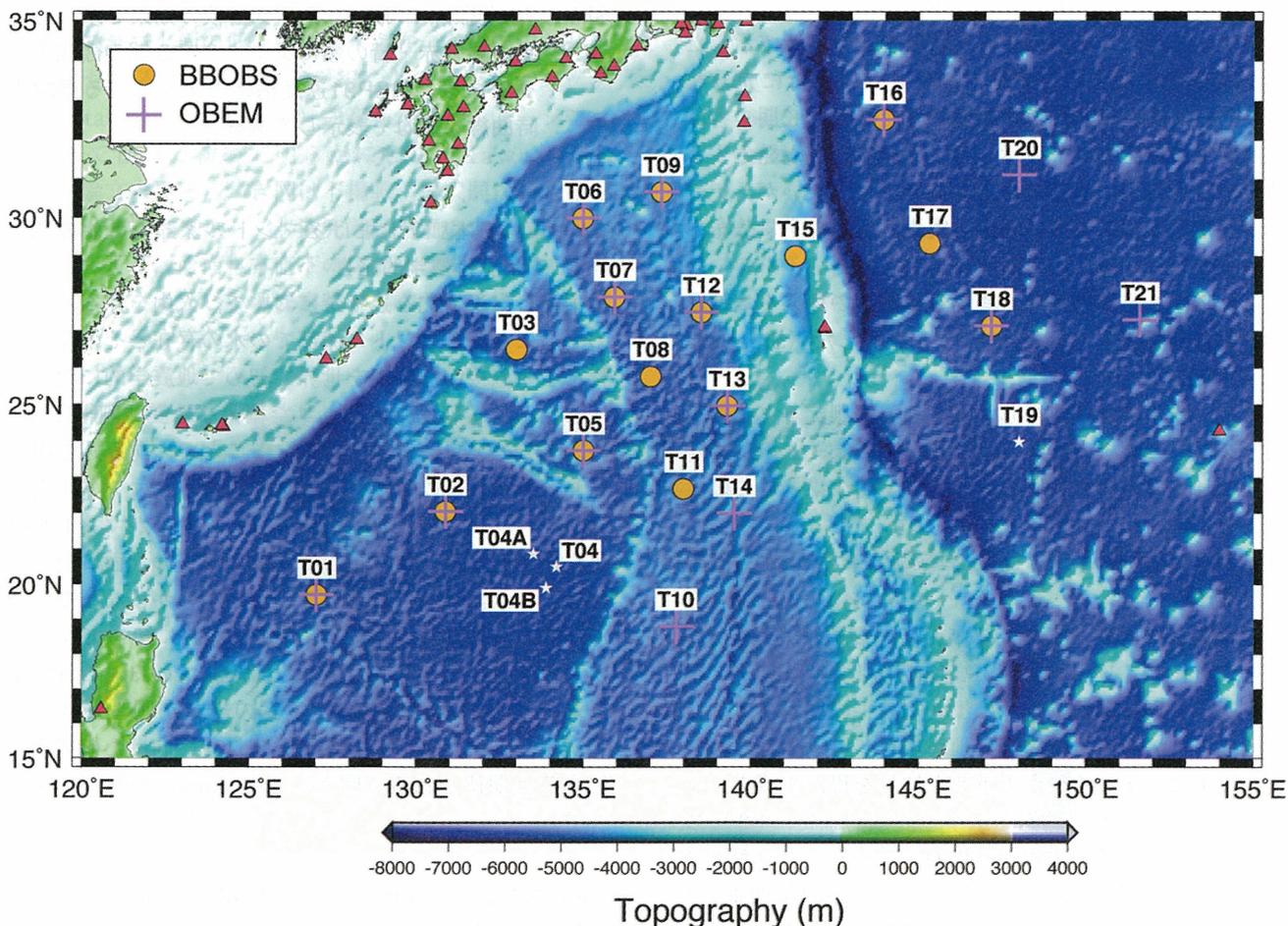


図1 回収した海底地震・電磁気観測点の配置図(●:地震, +:電磁気, ☆:2007年以前の観測点, ▲:陸上広帯域地震観測点)。

T13 All data (2007–2008) vs KIP  
CMG-3T BBOBS

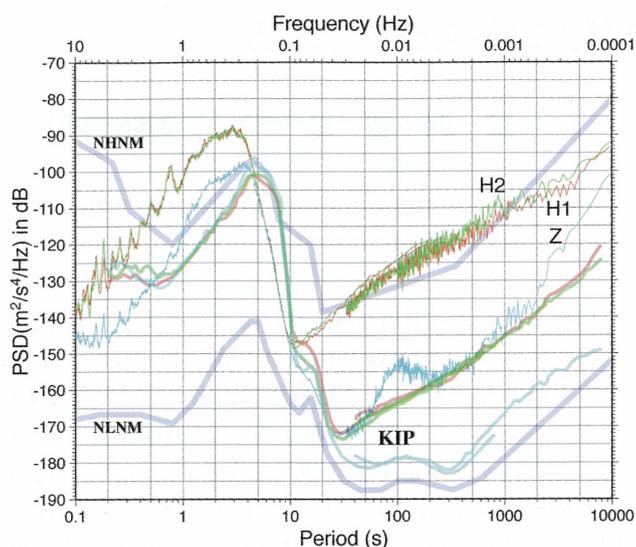


図2 T13観測点のノイズモデル。背景の2曲線は、統計的に得られた陸上観測点でのノイズの上下限を示してある。淡い太線で示したKIPはハワイの陸上観測点でのノイズモデルで、BBOBSの上下動はKIPの水平動と同等のノイズレベルである。

に示す。また、3年間のデータ蓄積を記録として示したのが図3である。ここでは、3成分共に解析に十分なS/N比を見込める大きさの地震のみを選び、3期の各観測期間毎に色を分けて表示した。大きな地震が発生する地域が限られているためによる偏りは仕方ないが、データが蓄積されてより広い範囲（震央距離）を密に分布しているのが分かる。

これら、3年間の長期海底アレイ観測の概要を、地震及び電磁気観測についてまとめて公表した（Shiobara et al., 2009）。

また、昨年までに取得した海底地震観測データの第1期・2期分の解析、既存のネットワークデータの解析から、これまでの研究期間において以下の成果を得ている。

### 1. スラブ沈み込みに伴う水輸送に関する地震学的制約

日本列島に展開されている高密度地震観測網Hi-netのデータを使い、日本列島下の高解像散乱強度イメージング（レシーバー関数解析）により、太平洋プレートの日本列島下への沈み込みに伴う地球深部への水輸送に関して、以下に示すいくつかの重要な知見を得た：（1）マントル深部への水の輸送を示す地震学的証拠、（2）スラブ内オリビン準安定相の直接的イメージング（および深部スラブが水を多量に含まないことの間接的推定）、（3）660km不連続面に対応する相変化のクラペイロン勾配への制約。

T06 Vertical (BPF: 0.01–0.07Hz, Mw=6.5~)

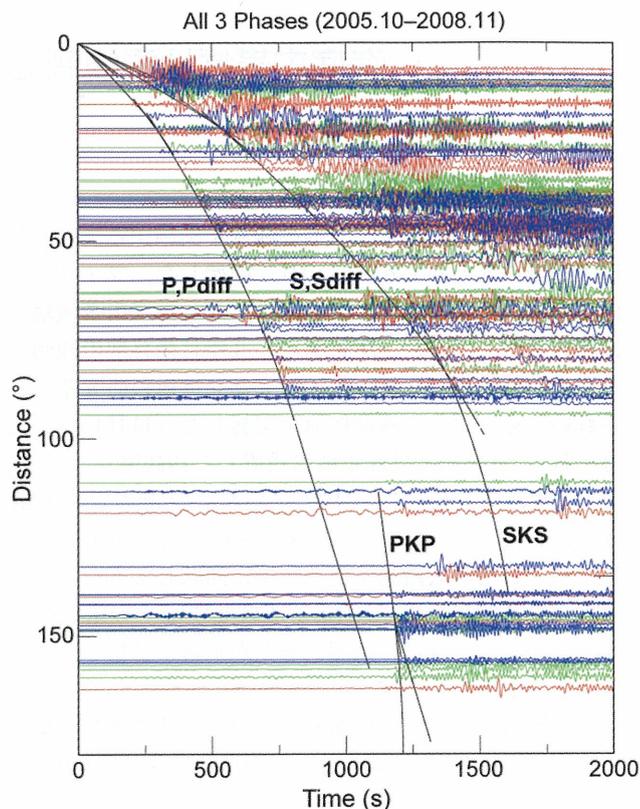


図3 T06観測点におけるデータ蓄積の効果を示した記録。緑・赤・青の順に第1・2・3期の観測データである。IASP91速度構造モデルによる理論走時曲線を重ねて表示してある。

#### （1）東北日本弧下におけるマントル深部への水の輸送を示す地震学的証拠

東北日本下の沈み込み帯において、火山を作るマグマのもとにもなるマントル深部での水の存在とその輸送過程を示す直接的な証拠を世界で初めて地震学的に明らかにした。日本列島に展開された稠密な地震観測網Hi-netの5年分の波形データを解析することで、沈み込む海洋プレート最上部の海洋地殻に含まれた水がマントル内で分離し（50–90kmの深さ）、さらにその水がマントル物質に取り込まれ、沈み込む海洋プレートの上面に沿ってマントル深部へ運ばれている様子が明らかになった（図4）。この結果は、大量の水がこの経路にそってマントルに取り込まれている可能性を示唆している。これにより海洋から地球深部への水輸送の経路が明らかになり、地球システムにおける水循環の定量化へ向けた研究が進展すると期待される（図5、Kawakatsu and Watada, 2007）。

#### （2）スラブ内オリビン準安定相の直接的イメージング

沈み込んだスラブの傾きの情報を先験的に取り込んだ解析手法（vectorial receiver function）を開発し、より深部（約350kmの深さ）への水輸送を示すマントルウェ

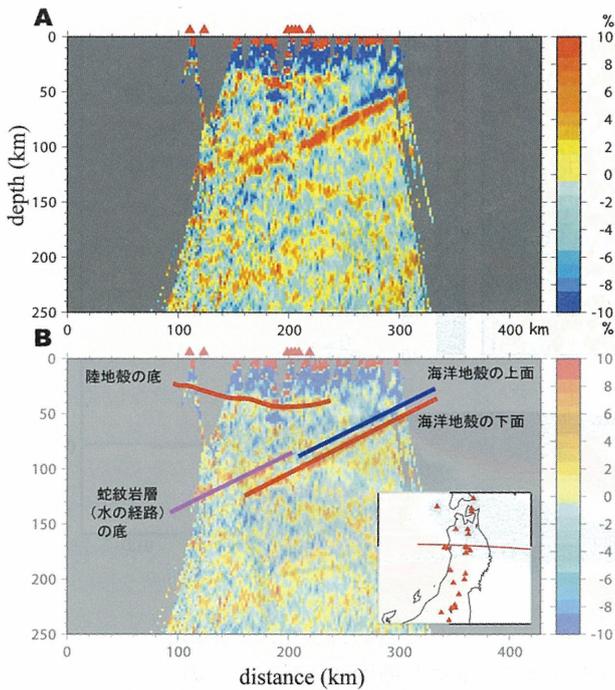


図4 (A) 東北日本下の地震波速度変化率プロフィールと (B) その解釈。赤は上から下に速度が急に増えることに対応 (青はその逆)。

ウッジ内スラブ上面の低速度領域の存在、および深部スラブ内におけるオリビン準安定相による低速度ウェッジ (metastable olivine wedge) の存在を直接イメージングによって世界で初めて明らかにした (Kawakatsu, 2008; 論文未発表につき図は不掲載。模式図は図8を参照)。「計算機モデリング」研究計画ク班の吉岡氏との共同研究により、西南日本直下の深部スラブにここで観測されるようなオリビン準安定相が存在するには、スラブ

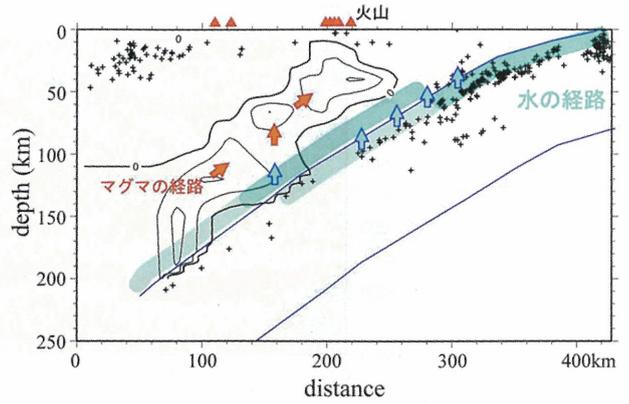


図5 図4の結果と地震波トモグラフィの結果、地震震源分布を重ね合わせ、水の輸送 (水色) を模式的に示したもの。赤の矢印は、トモグラフィから推定されるマグマの上昇経路。コンターはトモグラフィで明らかにされている低速度領域を示す。

内マントルでの含水量が100ppm重量%を超えないことが予想される (温度推定の誤差を考量しても数百ppmを超えることはないであろう)。以上から、西南日本直下のスタグナントスラブは「ドライ」であること (深部ドライスラブ) が示され、下部マントルへの水輸送の可能性の内、スラブそのものが水を輸送する可能性は少ないと考えられる。

### (3) 660km不連続面に対応する相変化のクラペイロトン勾配への制約

(1) (2) のイメージングの成果と地震波トモグラフィから読み取れる西南日本列島直下のスタグナントスラブの様子を模式的にまとめると図8のようになる。ここでオレンジは浅部から深部へ速度が増加する境界、青

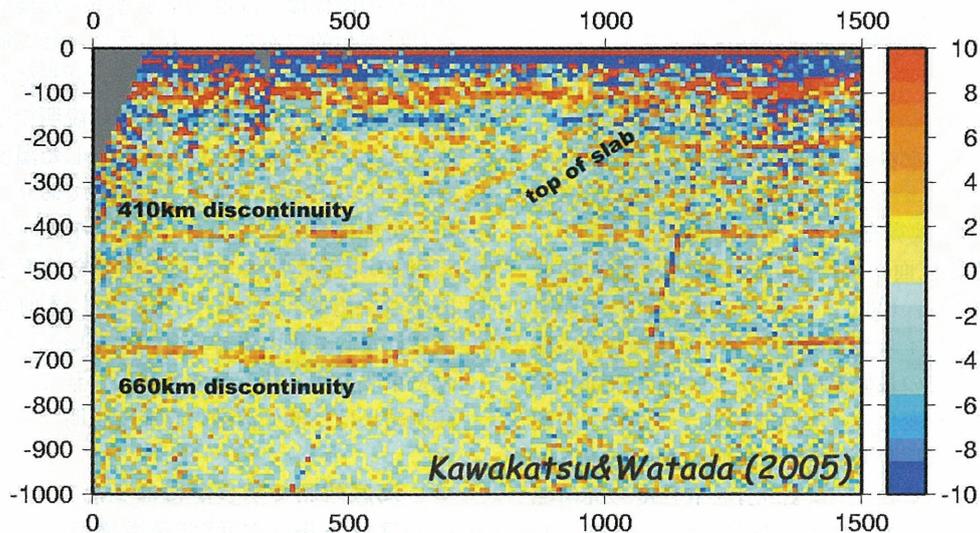


図6 西南日本直下の散乱強度イメージ、色の意味は図4Aと同じ。マントル不連続面 (410kmと660km) とスラブの上面が明瞭にイメージされている。また660km不連続面は40-50kmほど下側に凸になっている (Kawakatsu and Watada, 2005)。

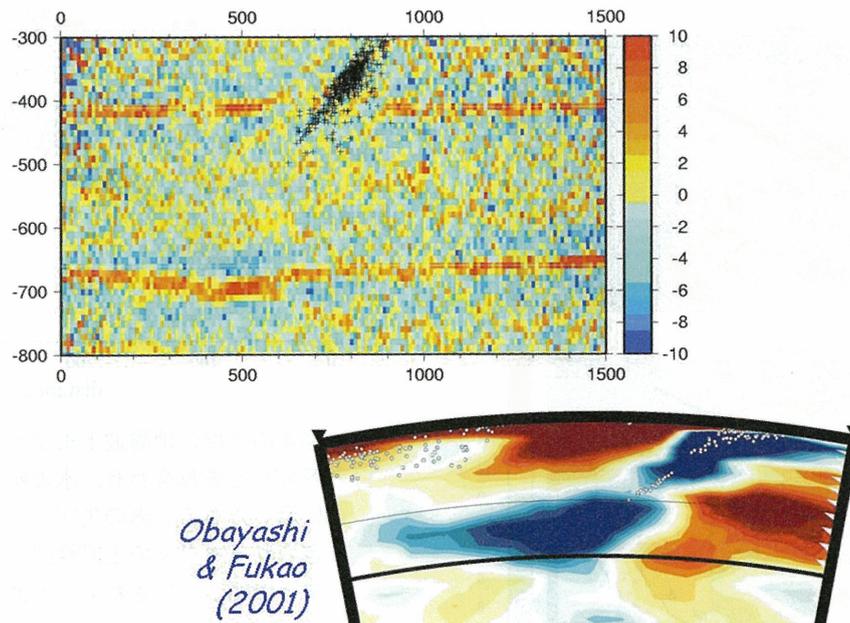


図7 図6をズームアップしたものと大林らのトモグラフィを同じ断面で比較したもの。

## Deep "dry" cold slab beneath SW Japan

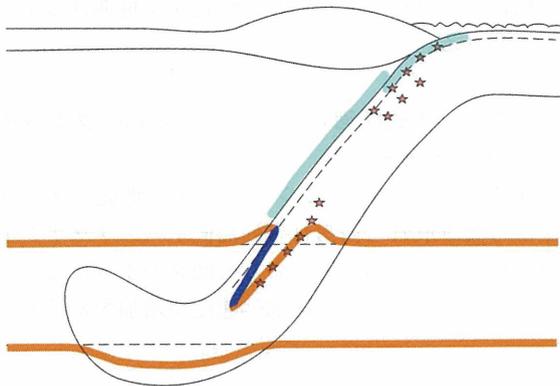


図8 イメージングの結果を模式的にまとめたもの。

はその逆を示す。また水色はイメージングによって明らかになったマンテルウェッジ内低速度領域 (=水の輸送経路と解釈), ★印は地震を示す。散乱強度イメージングからは660km不連続面が幅約500kmにわたり最大40~50km深くなっている(図6, 7)。これと(2)で明らかになった深部ドライスラブの存在, モデリングから期待されるスラブ内での最低温度の推定等から, 660km不連続面に対応する相変化の(実効的)クラペイロン勾配は, 近年の高圧実験が示すような低勾配(-0.5~1.0MPa/K)のものでなく, -2.5MPa/K程度の高勾配である可能性が示唆される。これが実験的に受入難いならば, 観測から明らかになる実効的クラペイロン勾配を大きくするための新たなメカニズムが必要である。

## 2. 広帯域海底地震計データから推定した伊豆-ボニン沈み込み帯の地震学的特性とその解釈

スタグナントスラブプロジェクトの一環として設置された広帯域海底地震計の波形データを用いて, 伊豆-ボニン沈み込み帯周辺の地震学的特性の推定と, その地球物理学的解釈を行い, 国際誌にて成果発表した(Shito et al., 2009)。以下はその引用である(図9)。

2005年11月から2006年11月の約1年間に, 伊豆-ボニンスラブで起こった10個のイベントデータの記録を用いて, 波線平均のP波減衰とP波およびS波の走時異常を測定し, その結果を鉱物物理学の理論と実験データを用いて定量的に評価した。太平洋スラブ内および太平洋スラブ下のマンテルをサンプルするデータのP波の減衰と走時異常の関係は, 温度効果を考慮した場合に予測されるそれに調和的である。一方, フィリピン海のマンテルウェッジをサンプルしたデータは, 減衰に対して正の走時異常が大きく, 温度効果のみでは説明できない。マンテルウェッジデータの減衰から推定した温度異常は, ペリドタイトのドライソリダスを超過しており, メルトが存在する可能性を示している。また, P波の走時異常に対するS波の走時異常は, 温度の効果を補正した場合, 比較的小さな値をとる( $R=0.5-1.2$ )。本研究で観測された, 減衰に対して正の走時異常が大きいという関係は, トンガや東北の沈み込み帯でも報告されている。このような観測結果は, 部分熔融の存在で説明できるかもしれない。

## 3. 海底観測で明らかになったフィリピン海の上部マンテル3次元S波速度構造

フィリピン海域は地震と陸上観測点の地理的制約の為に十分な解像度のある地震波速度構造モデルを求める事が困難であった。しかし, 「海半球ネットワーク」計画

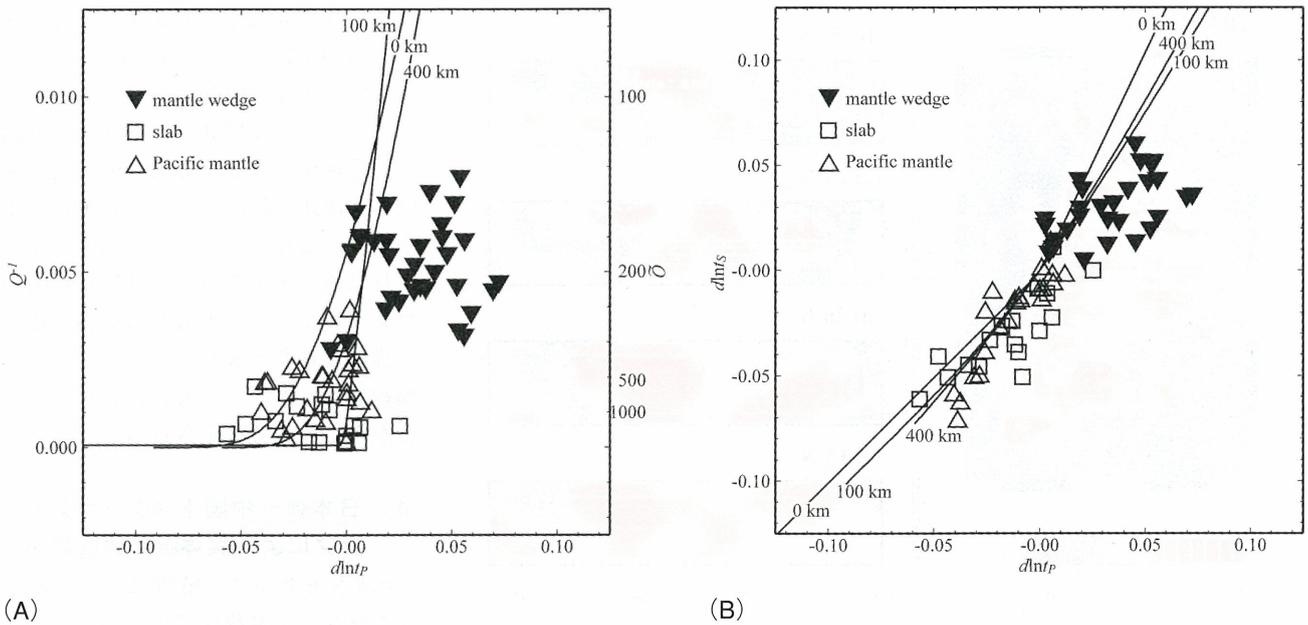


図9 (A) 波線平均のP波減衰とP波走時異常の関係, (B) 波線平均のP波走時異常とS波走時異常の関係。シンボルは観測値, 曲線は異なる深さ (0, 100, 400km) での理論値を表す。

の一環として開発・実用化された広帯域海底地震計による海底地震観測により陸上地震観測のみでは不可能であった高空間分解能な地震波速度構造モデルを構築する事が可能になった。Isse et al. (2006) は「スタグナント・スラブ」プロジェクト開始前の既存の海底地震観測記録と陸上観測記録を用いて、表面波の位相速度解析からフィリピン海域の上部マントルの3次元速度構造モデルを構築した。この際に用いた海底地震観測は主にグアム島・奄美大島を結ぶ線状アレイ観測であったが、海底

地震観測データを加えることによりフィリピン海域の空間分解能が向上する事が明らかになった。

「スタグナントスラブ」プロジェクトは従来を上回る大規模かつ稠密な広帯域海底地震観測であり、これらのデータを加える事でさらに高空間分解能な3次元S波速度構造モデルを構築する事が可能になった。図10に陸上観測点のみ、「スタグナントスラブ」以前の海底地震観測のデータを加えたもの、さらに「スタグナントスラブ」のデータを加えたモデルの分解能テストの結果を示す。

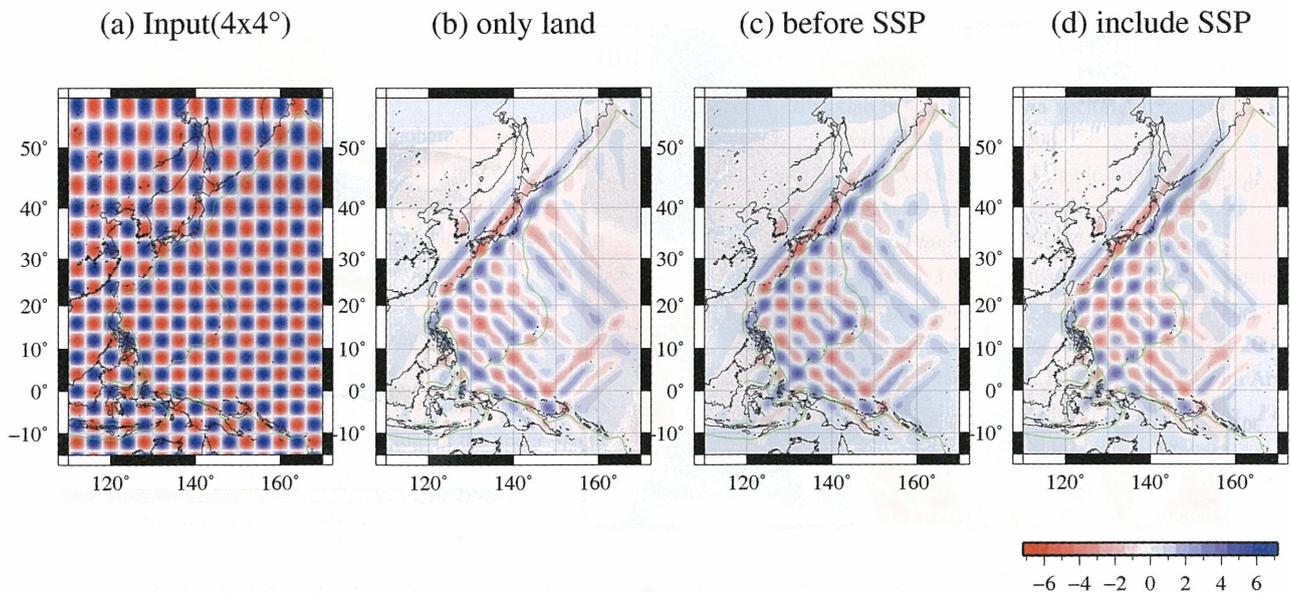


図10 周期42秒での解像度テスト。(a) 市松模様状の仮想速度異常パターン。(b) 既存の陸上観測点のみを用いた結果で、NW-SE方向へのしみ出しが顕著であり市松模様の再現性が悪い。(c) 本プロジェクト以前の海底地震観測のデータも加えた結果で、フィリピン海南部の解像度がまだ悪い。(d) 本プロジェクト最初の2年分のデータをさらに加えた結果、フィリピン海内側での市松模様の再現性が良くなった事がわかる。

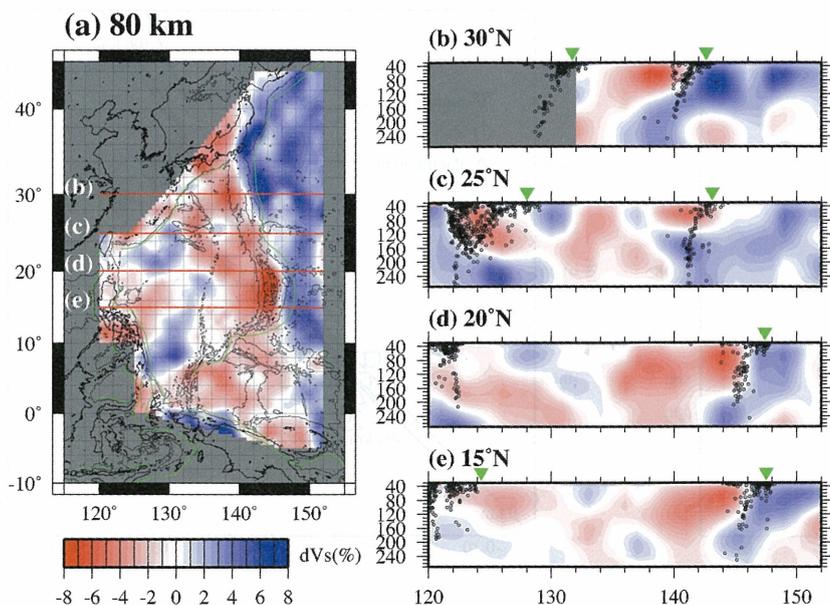


図11 得られた3次元S波速度構造。(a) 深さ80kmにおける速度構造、伊豆・小笠原・マリアナ島弧に沿って3つ低速異常の塊がみられる。北緯30度 (b)、25度 (c)、20度 (d)、15度 (e) での深さ断面。緑の逆三角は海溝の位置を示す。沈み込む太平洋スラブが明瞭に観察される。

陸上観測点だけでは解像度は悪く (図10b)、また「スタグナントスラブ」以前のデータを含めるとフィリピン海北部の解像度が向上するが南部での解像度は悪い (図10c)。しかし、「スタグナントスラブ」の海底観測データを加える事でフィリピン海全域にわたってほぼ一様な解像度で解析を行う事が可能になった事がわかる (図10d)。

得られた高解像度の3次元上部マントルS波速度構造モデル (図11) により、伊豆小笠原マリアナ島弧下のマントルウェッジには3つの独立した低速異常域が存在し、島弧の火山岩の同位体組成比の特徴と良い一致を示す事が明らかになった (Isse et al., 2009)。これは伊豆・小笠原・マリアナ島弧のマントルウェッジの流れは島弧全体で一様な流れを形成しているのではなく、幅約500kmの3つの流れが存在しているからであると推定される。

#### 4. 日本弧～中国下スタグナントスラブによる実体波の速度異常

P波トモグラフィ解析によって示されたマントル遷移層で横たわるスラブの描像に対し、波形解析からもそれに関連する顕著な正の速度異常を検出した。北西太平洋スラブは西南日本～中国東部下のマントル遷移層に広く停留する。これを狙い、小笠原で起きた地震について、

日本列島および韓国、中国における定常観測網で記録された広帯域地震データを解析したところ (図12)、スタグナントスラブに関連した速度異常がP波だけでなく、S波においても存在することを見出した (図13)。この観測事実は、P波速度が異常であるのに対し、S波速度は正常であるという過去の研究結果に反する (例えば、Kennett et al., 2004)。この相違は物性問

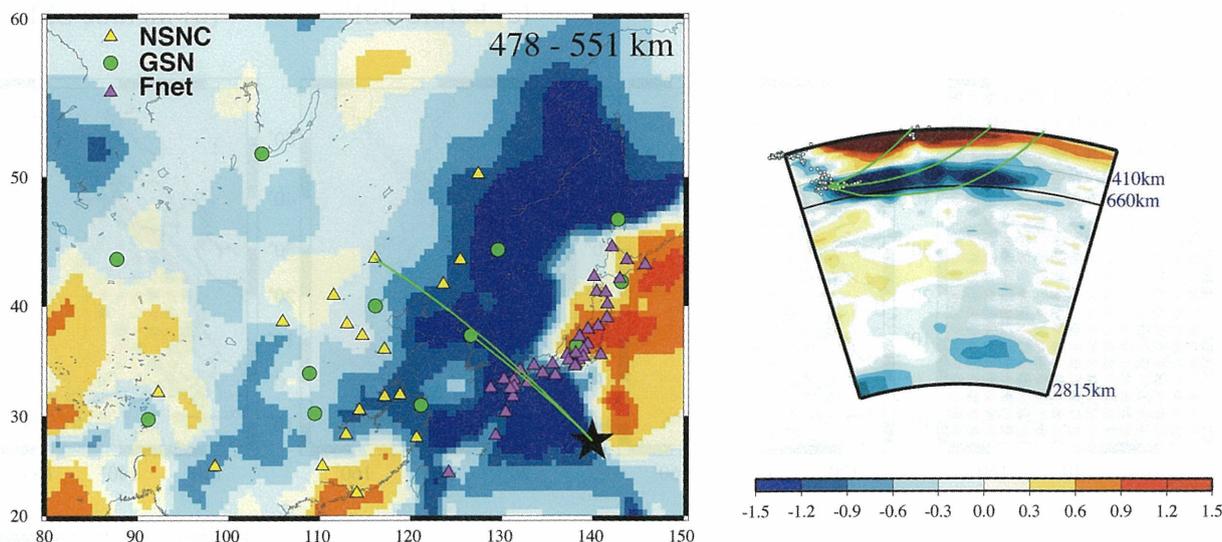


図12 (左) 本研究で使用した広帯域地震観測点の分布。▲, ●, ▲はFnet, GSN, NSNCである。P波トモグラフィのマントル遷移層部分を重ねて表示しており、★は小笠原での深発地震 (2002/6/3, 深さ494km), 緑色の曲線は震央から日本・韓国・中国の観測点への波線経路を示す。(右) その波線経路に沿った鉛直断面、左側が小笠原弧で小さな○は震源。下のカラースケールはP波slownessの偏差 (%) で、深さ660km上面付近に高速度なスタグナントスラブがあり、先の3つの波線はそれを通過している。

題に関わるという点で重要である。

まず、3次元P波速度構造 (Obayashi et al., 2006) に対する理論走時を求め、それが観測走時異常を説明することを示した。その上で、P波速度構造からP波とS波の速度変分比、 $(\delta V_p/V_p) / (\delta V_s/V_s) (=R)$ 、を一定と仮定したS波速度構造を推定し、理論走時を計算したところ、観測との残差は小さいものであった。このとき、最適なRは1.4であった。Rは速度異常のメカニズムによって変化する速度異常の成因を調べる重要なパラメタの一つである。Karato (1993) の非調和効果に加え非弾性効果を考慮した地震波速度の温度変化に関する理論に基づき、この深さでのパイロライト組成に対するRを求めると1.47となり、観測から見積もられた速度異常を良く説明する。即ち、スタグナントスラブにおける速度異常は温度異常によるもので説明され、その温度異常はおよそ300Kと見積もられた。今回求められたRは、過去の地震学的研究による沈み込むスラブにおけるその値が1.1~1.2であるのに比べ有意に大きい。これは、沈み込む冷たいスラブが非調和効果のみ考慮すれば説明されるのに対し、スタグナントしたスラブは非弾性効果も考慮しないと説明されないことを意味する。この事実は、スタグナントしたスラブが時間の経過と共に周囲のマントルへ同化しつつあることを示唆するものである。

参考文献

Isse, T., K. Yoshizawa, H. Shiobara, M. Shinohara, K. Nakahigashi, K. Mochizuki, H. Sugioka, D. Suetsugu, S. Oki, T. Kanazawa, K. Suyehiro and Y. Fukao, Three-dimensional shear wave structure beneath the Philippine Sea from land and ocean bottom broadband seismograms, *J. Geophys. Res.*, 111, B06310, doi:10.1029/2005JB003750, 2006.

Isse, T., H. Shiobara, Y. Tamura, D. Suetsugu, K. Yoshizawa, H. Sugioka, A. Ito, M. Shinohara, K. Mochizuki, E. Araki, K. Nakahigashi, H. Kawakatsu, A. Shito, T. Kanazawa, Y. Fukao, O. Ishizuka and J.B. Gill, Seismic structure of the upper mantle beneath the Philippine Sea from seafloor and land observation: implications for mantle convection and magma genesis in the Izu-Bonin-Mariana subduction zone, *Earth Planet. Sci. Lett.*, 278, 107-119, doi: 10.1016/j.epsl.2008.11.032, 2009.

Karato, S., On the importance of anelasticity in the interpretation if

2002 Bonin earthquake (h = 494 km)

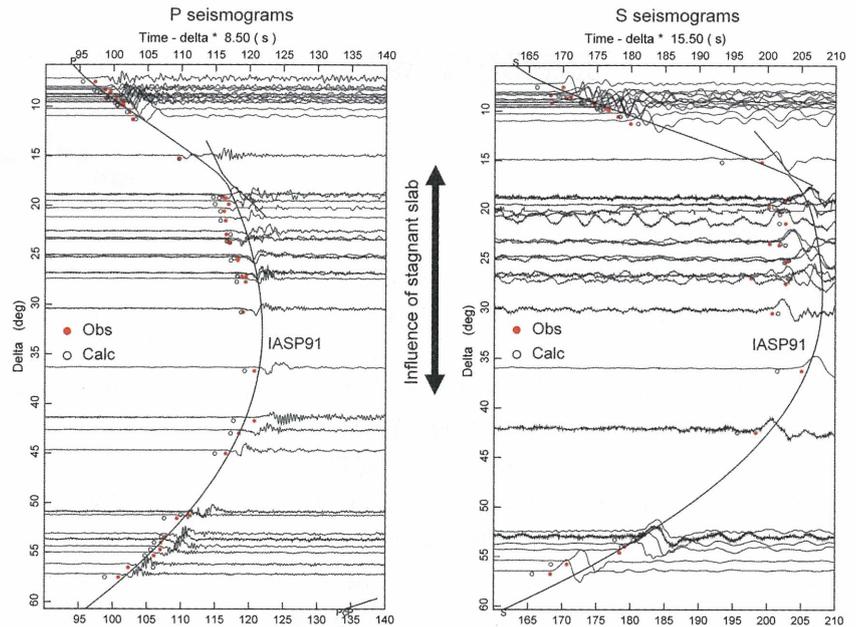


図13 図12で示した小笠原での深発地震のP波（左）及びS波（右）の記録。○と●は、3次元速度構造モデルによる理論走時と観測走時での到着時刻である。S波速度構造はRが一定と仮定してP波速度構造から推定した。曲線はIASP91速度構造モデルによる理論走時を示す。P・S波ともに、スタグナントスラブの影響を受けた走時異常が顕著であり、その残差はそれぞれ4・6秒に及ぶ。

seismic tomography, *Geophys. Res. Lett.*, 20, 1623-1626, 1993.

Kawakatsu, H. and S. Watada, Fine mapping of the mantle discontinuities beneath the Japanese islands using short period Hi-net data, *AGU Fall meeting*, December, 2005.

Kawakatsu, H. and S. Watada, Seismic evidence for deep water transportation in the mantle, *Science*, 316, 1468-1471, 8 June 2007.

Kawakatsu, H., Seismic imaging of meta-stable olivine wedge in the subducting slab beneath Japan via vectorial receiver function, *AGU Fall meeting*, December, 2008.

Kennett, B.L.N., and A. Gorbato, Seismic heterogeneity in the mantle - strong shear wave signature of slabs from joint tomography, *Phys. Earth Planet. Int.*, 146, 87-100, 2004.

Obayashi, M., H. Sugioka, J. Yoshimitsu, and Y. Fukao, High temperature anomalies oceanward of subducting slabs at the 410-km discontinuity, *Earth Planet. Sci. Lett.*, 243, 149-158, 2006.

Shiobara, H., K. Baba, H. Utada and Y. Fukao, Ocean Bottom Array Probes Stagnant Slab Beneath the Philippine Sea, *Eos*, Transactions AGU, 90, 9, 70-71, 2009.

Shito, A., H. Shiobara, H. Sugioka, A. Ito, Y. Takei, H. Kawakatsu, and T. Kanazawa, Physical properties of subducted slab and surrounding mantle in the Izu-Bonin subduction zone based on BBOBS data, *J. Geophys. Res.*, 2009, in press.