

# 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

表紙写真：国際シンポジウム *DEEP SLAB and MANTLE DYNAMICS* 参加者集合写真  
於 京都御所・蛤御門

## 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動している。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月中旬から稼動している。

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、その後は順調に稼動している。観測点7（ウスリースク）は、設置当初の疑問点であつ

た地震計設置方向の確認を行ってみたところ、それが認められたので、修正した。それ以外の観測点は、順調に稼動している。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ルスク、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、

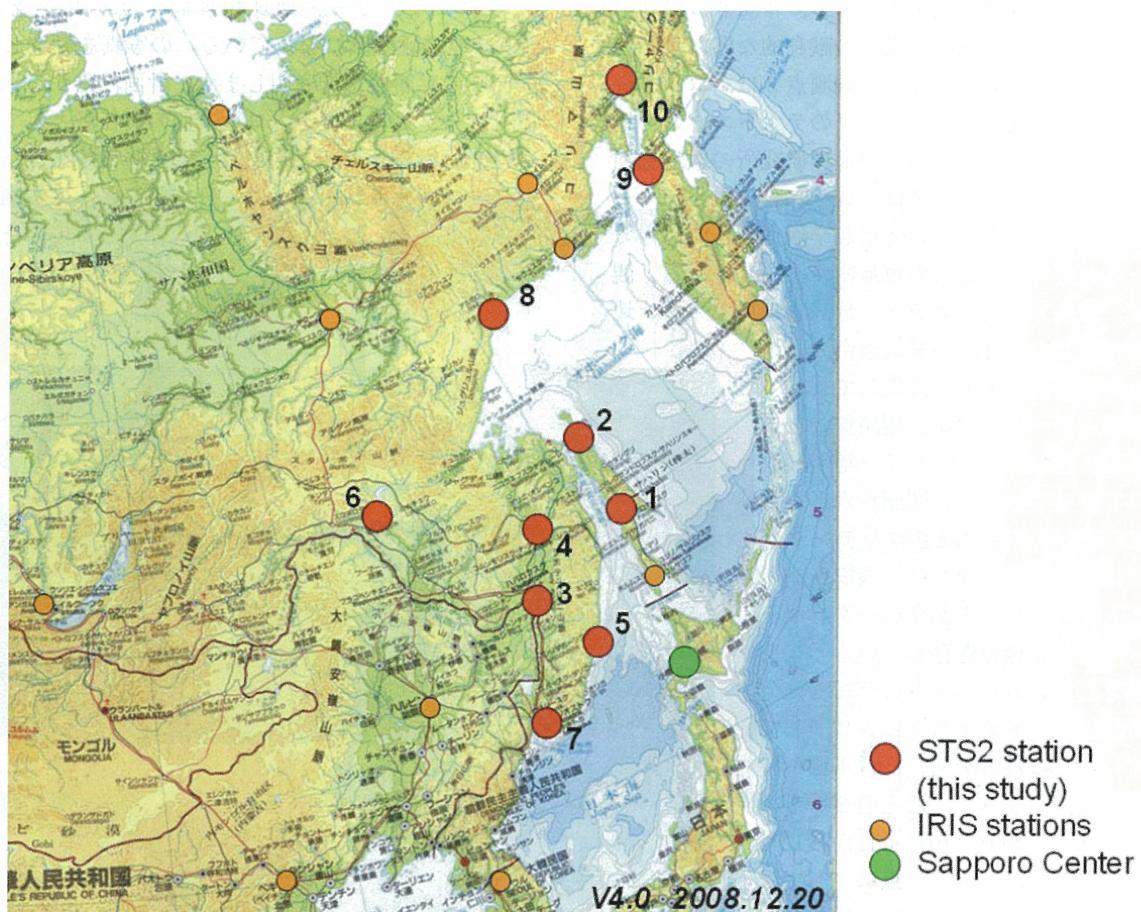


図1 極東ロシアでの広帯域地震観測点分布。(赤色：本計画による設置観測点、観測点番号は表1を参照、緑色：北海道大学観測センター、橙色：IRIS等の既設観測点。)

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月をめどに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、御靈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Hinet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-

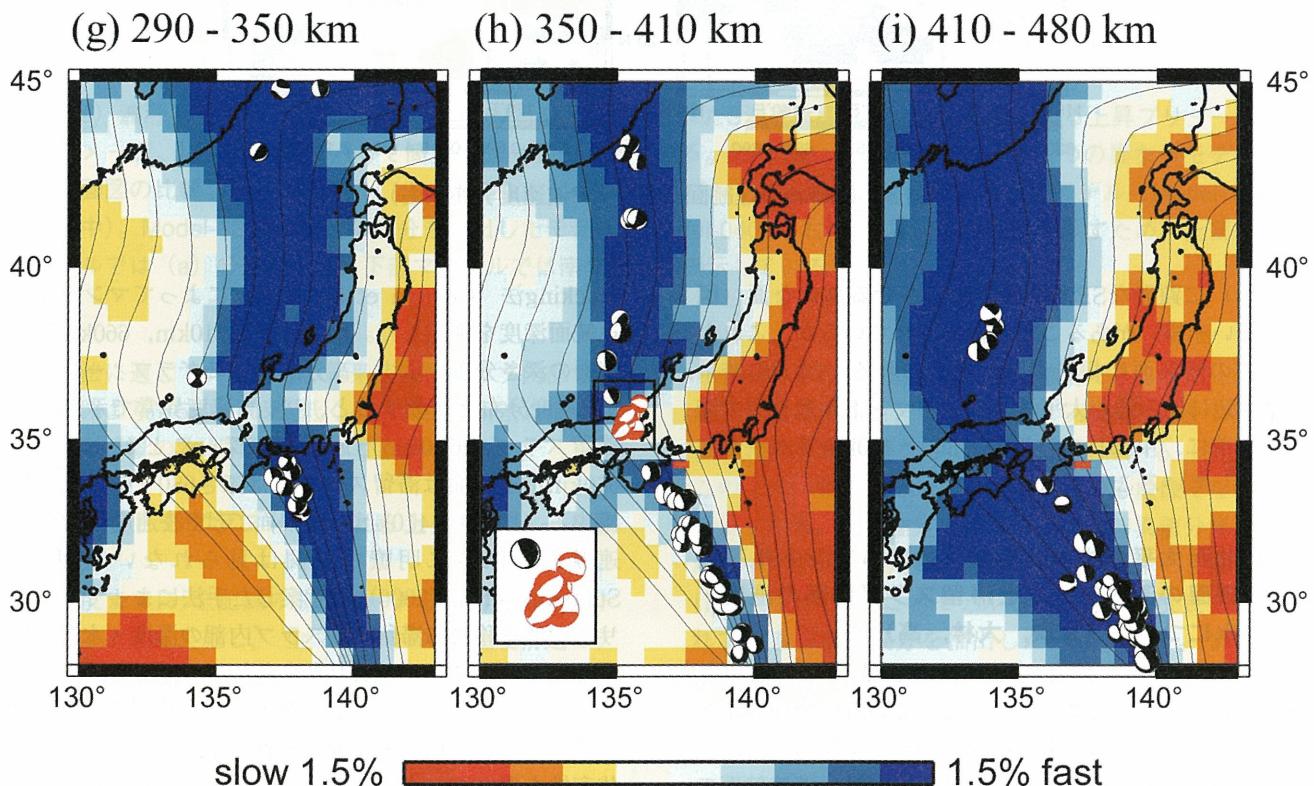


図1 日本付近のP波トモグラフィーモデル。深さ300-500km。それぞれの深さの深発地震震源メカニズム(ハーバードCMT解)とSP変換波の変換面(赤実線)もプロット。

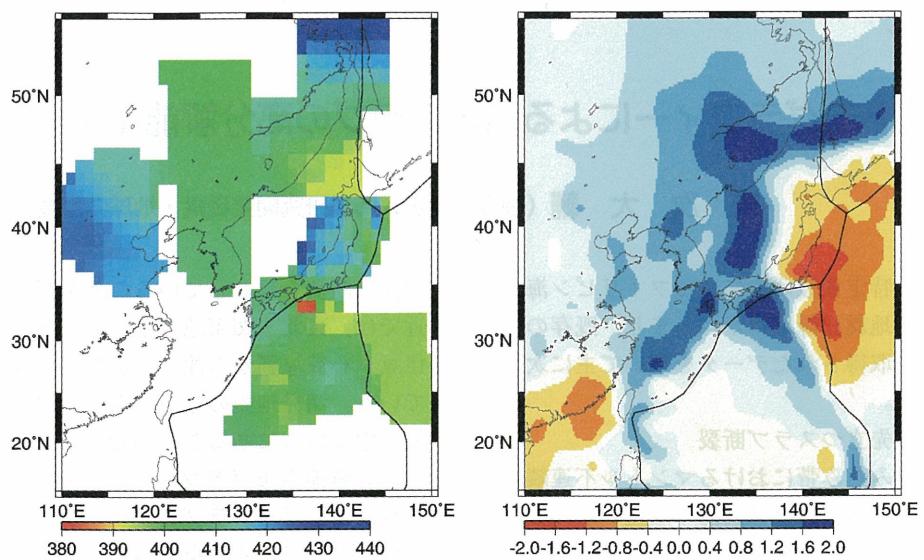


図2 410km不連続面（左）とP波速度分布（右）

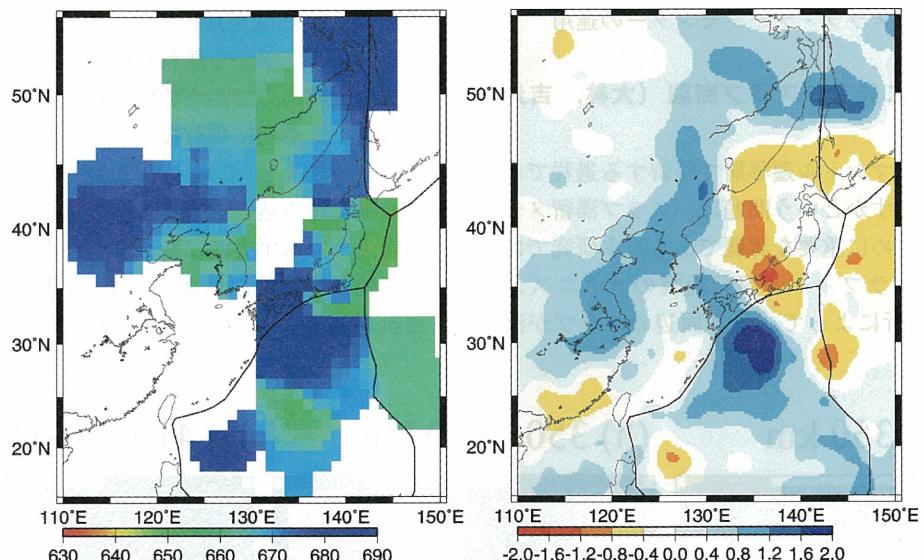


図3 660km不連続面（左）とP波速度分布（右）

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圧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

(a)

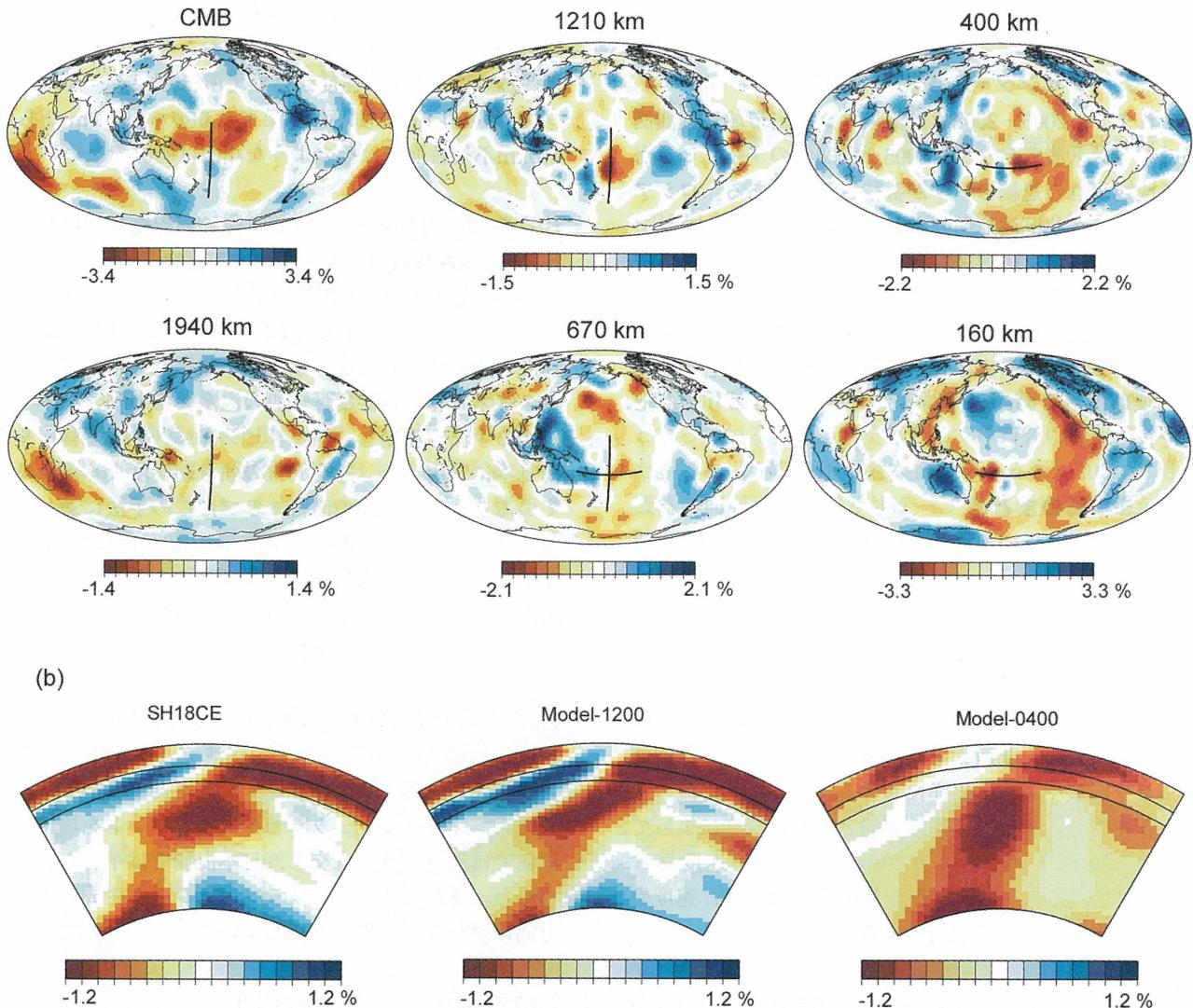


図4 (a) 波形トモグラフィー (Takeuchi 2007, GJI) で得られたS波速度構造モデル中に見られる上昇プリュームのイメージ。図中の黒線に沿って筒状の低速度が確認できる。(b) (a) 中の黒線における3つの異なるモデルの断面図の比較。(a) のモデル (SH18CE; 左)。別のインバージョン手法により求められたモデル (Model-1200; 中)。Model-1200の安定解成分を抽出したモデル (Model-0400; 右)。上昇流の連続性を示すため、上部マントルでは (a) の東西断面、下部マントルでは南北断面を表示している。

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ブ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、計画研究アソシエイション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に知らせたユーザ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ヤライトの高温高圧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工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「かいれい」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「かいれい」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%の回収率となつた。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、国際的には充分な評価が得られるレベルの観測であったと言えよう。

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

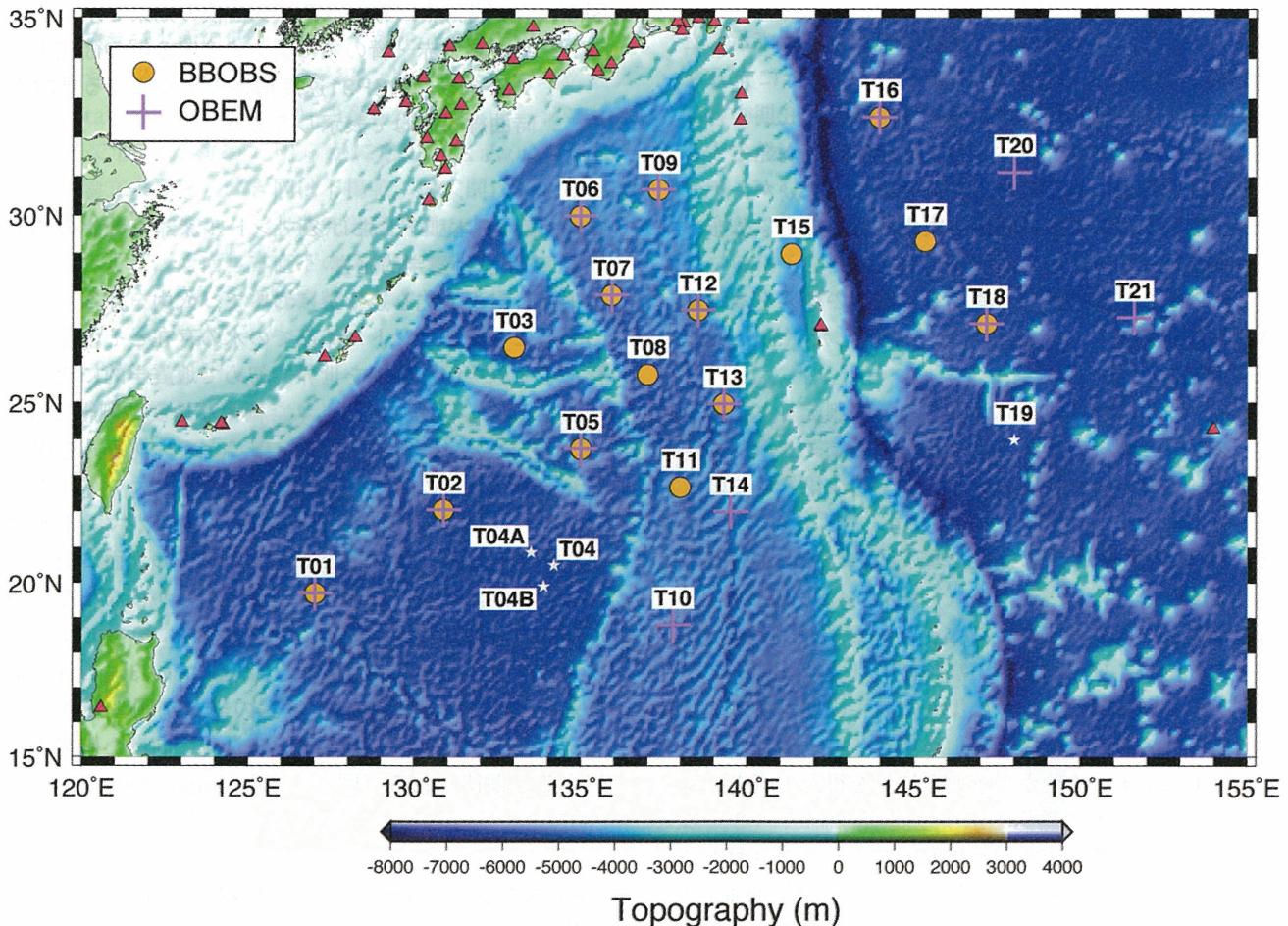


図1 回収した海底地震・電磁気観測点の配置図（●：地震、+：電磁気、☆：2007年以前の観測点、▲：陸上広帯域地震観測点）。

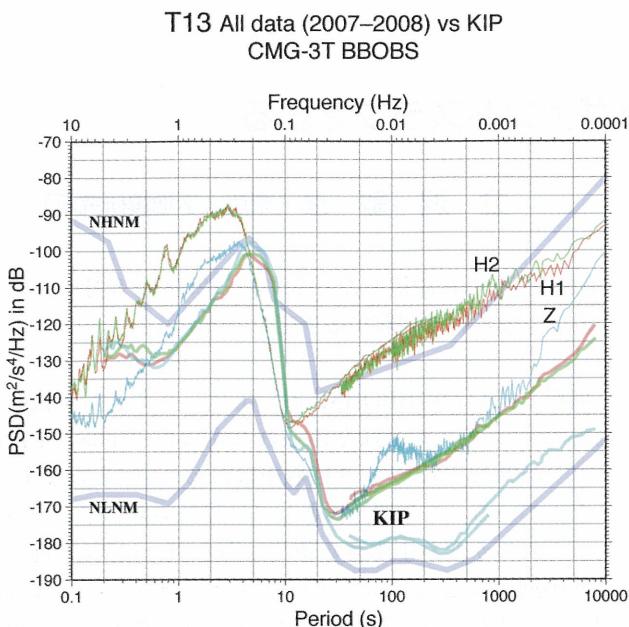


図2 T13観測点のノイズモデル。背景の2曲線は、統計的に得られた陸上観測点でのノイズの上下限を示してある。淡い太線で示したKIPはハワイの陸上観測点でのノイズモデルで、BBOBSの上下動はKIPの水平動と同等のノイズレベルである。

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成分共に解析に充分な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む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~)

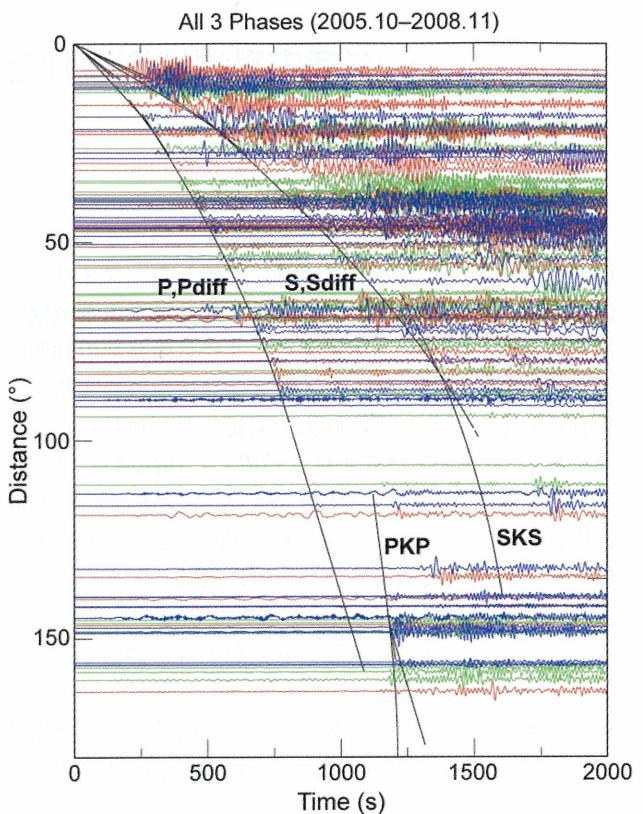


図3 T06観測点におけるデータ蓄積の効果を示した記録。緑・赤・青の順に第1・2・3期の観測データである。IASP91速度構造モデルによる理論走時曲線を重ねて表示してある。

### (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、沈み込む海洋部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駆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

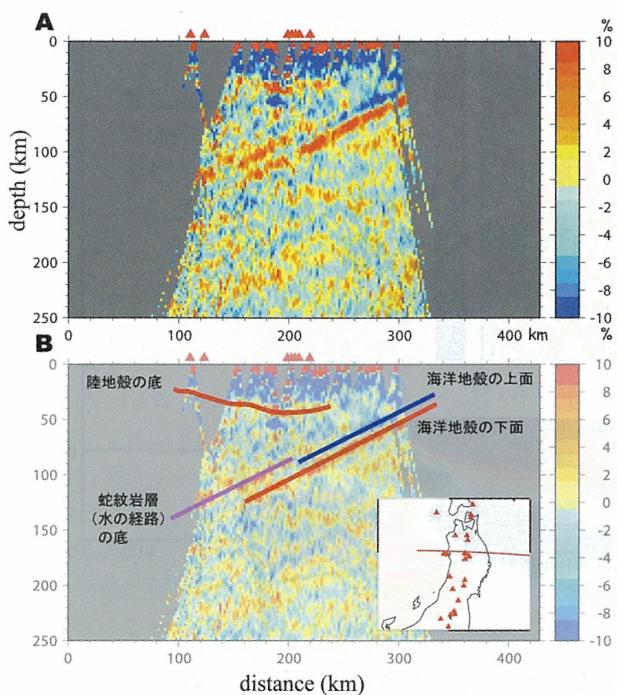


図4 (A) 東北日本下の地震波速度変化率プロファイルと (B) その解釈。赤は上から下に速度が急に増えることに対応 (青はその逆)。

ツ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

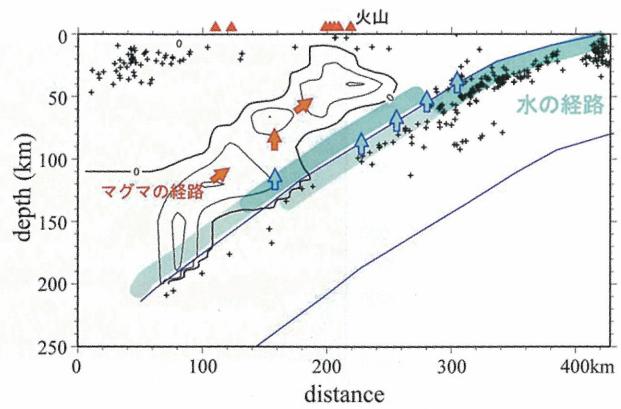


図5 図4の結果と地震波トモグラフィの結果、地震震源分布を重ね合わせ、水の輸送 (水色) を模式的に示したもの。赤の矢印は、トモグラフィから推定されるマグマの上昇経路。センターはトモグラフィで明らかにされている低速度領域を示す。

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慮しても数百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

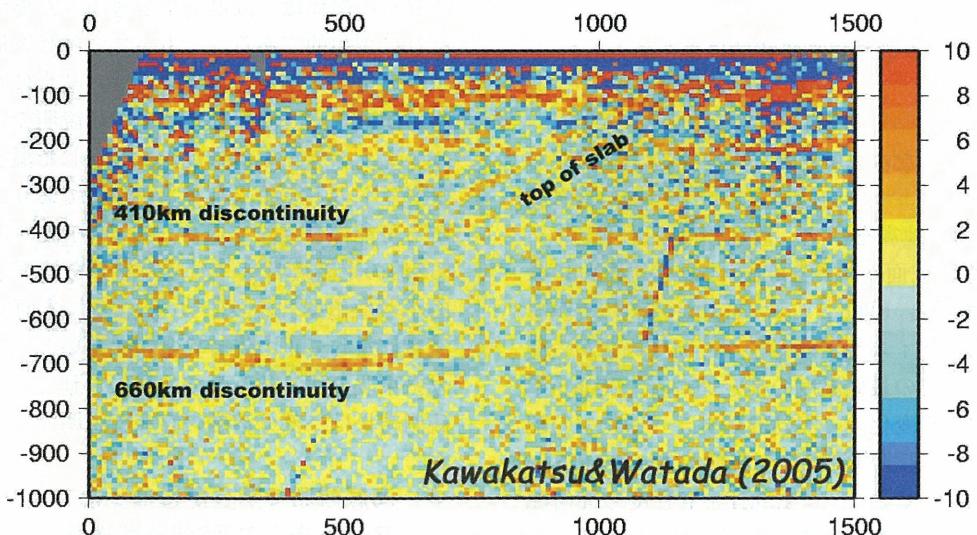


図6 西南日本直下の散乱強度イメージ、色の意味は図4 Aと同じ。マントル不連続面 (410kmと660km) とスラブの上面が明瞭にイメージされている。また660km不連続面は40–50kmほど下側に凸になっている (Kawakatsu and Watada, 2005)。

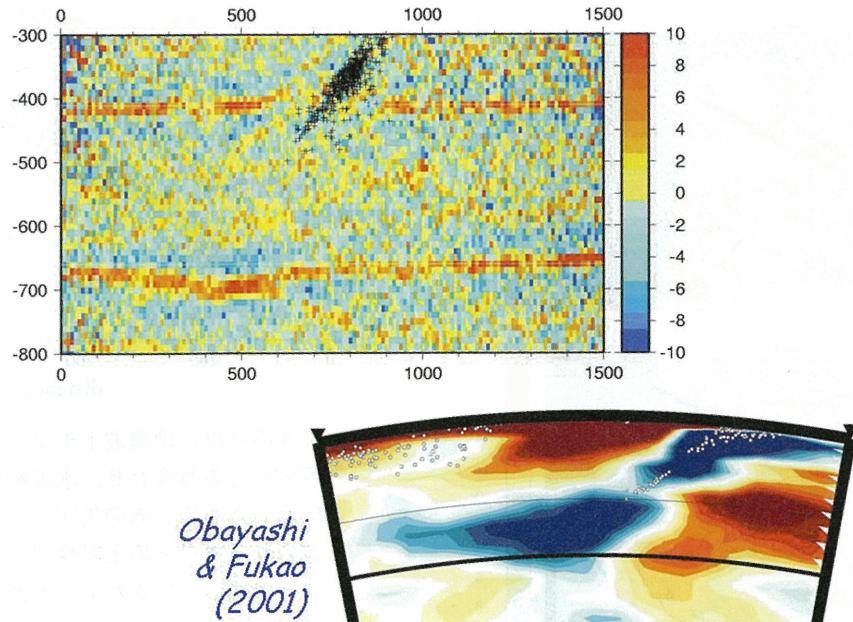


図7 図6をズームアップしたものと大林らのトモグラフィと同じ断面で比較したもの。

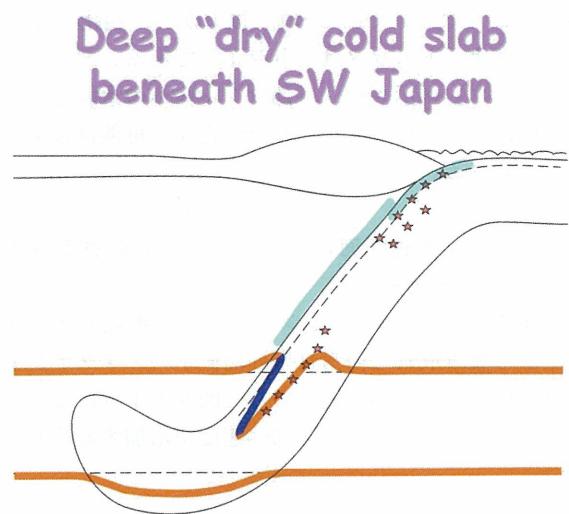


図8 イメージングの結果を模式的にまとめたもの。

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なったマント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( $-0.5\text{--}1.0 \text{ MPa/K}$ )のものでなく,  $-2.5 \text{ MPa/K}$ 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。

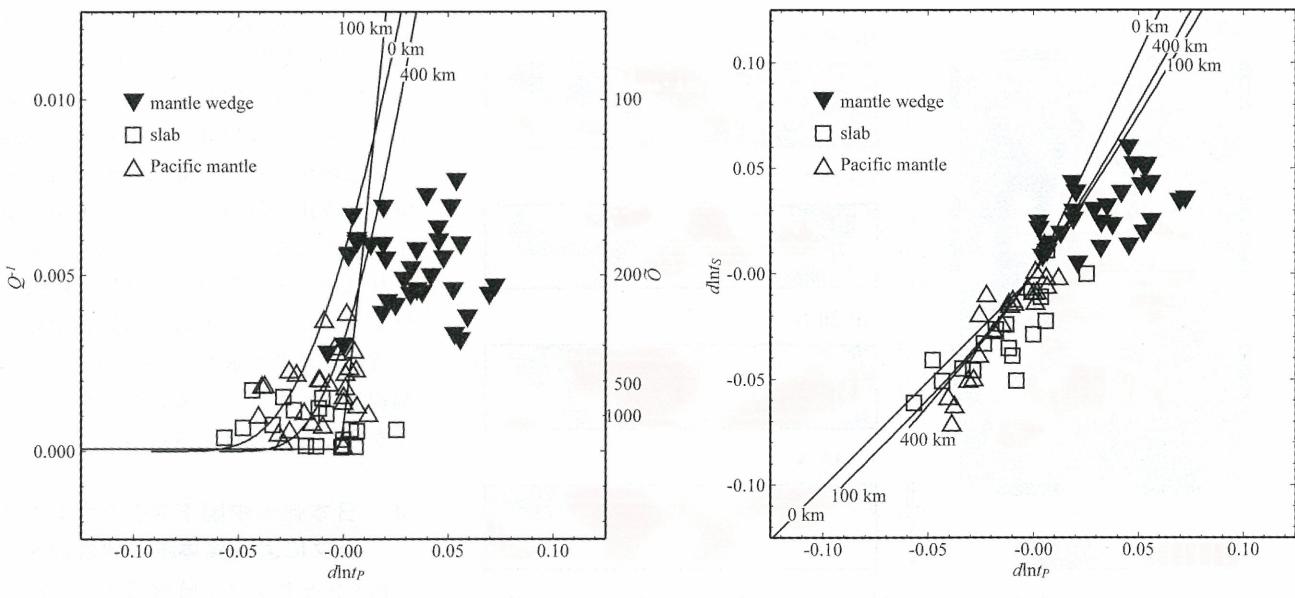
## 2. 広帯域海底地震計データから推定した伊豆-ボニン沈み込み帯の地震学的特性とその解釈

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, 國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ト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ト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。マント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えており, 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( $R=0.5\text{--}1.2$ )。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, 部分溶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トル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ため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



(A)

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」プロジェクトは從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。

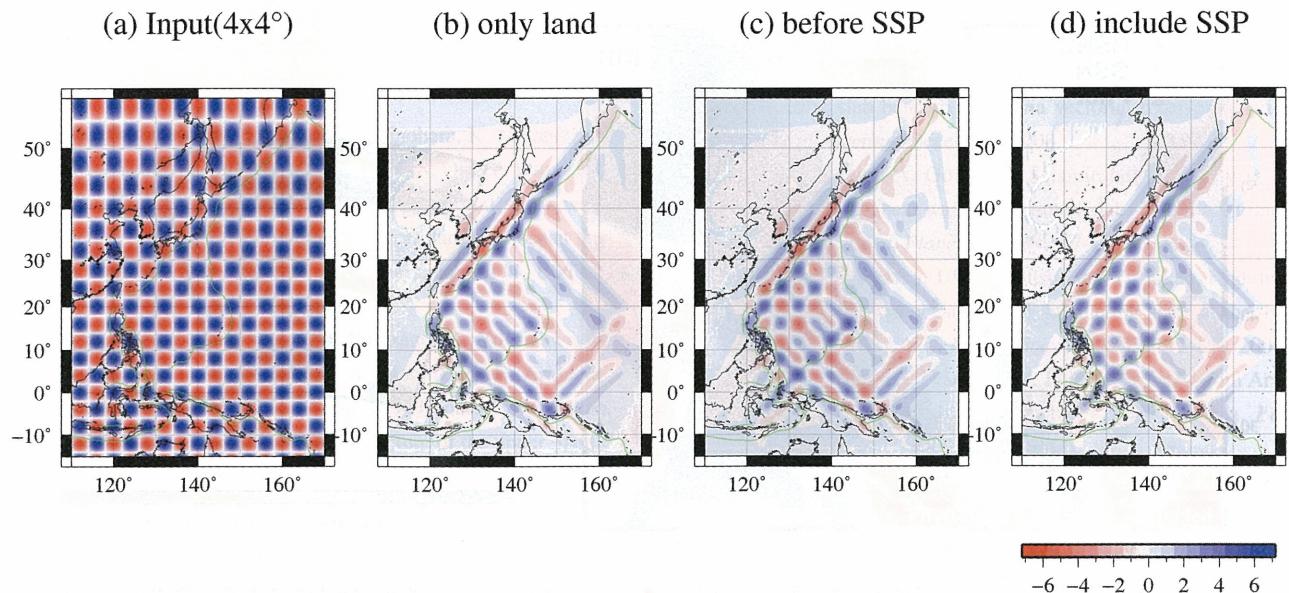


図10 周期42秒での解像度テスト。(a) 市松模様状の仮想速度異常パターン。(b) 既存の陸上観測点のみを用いた結果で、NW-SE方向へのしみ出しが顕著であり市松模様の再現性が悪い。(c) 本プロジェクト以前の海底地震観測のデータも加えた結果で、フィリピン海南部の解像度がまだ悪い。(d) 本プロジェクト最初の2年分のデータをさらに加えた結果、フィリピン海内側での市松模様の再現性が良くなっている事がわかる。

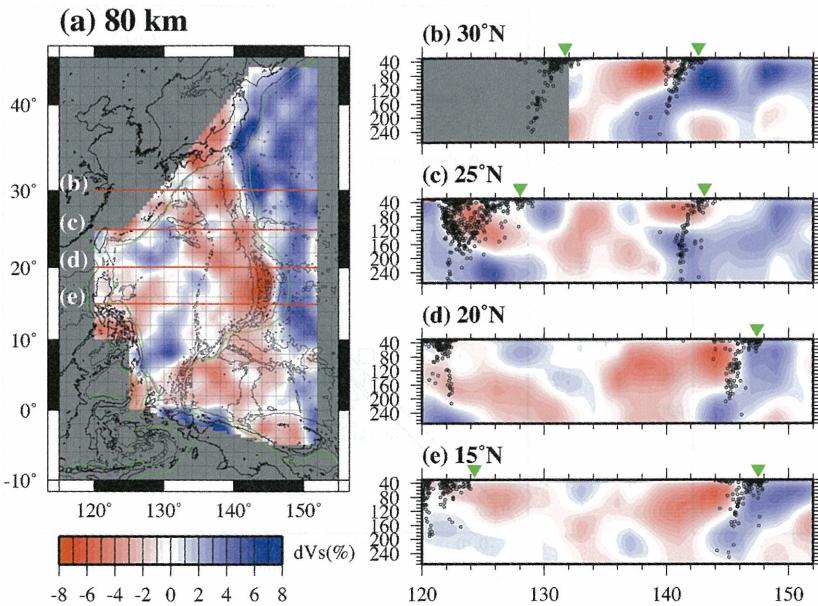


図11 得られた3次元S波速度構造。(a) 深さ80kmにおける速度構造、伊豆・小笠原・マリアナ島弧に沿って3つ低速異常の塊がみられる。北緯30度(b), 25度(c), 20度(d), 15度(e)での深さ断面。緑の逆三角は海溝の位置を示す。沈み込む太平洋スラブが明瞭に観察される。

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こと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つの独立した低速度異常域が存在し、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

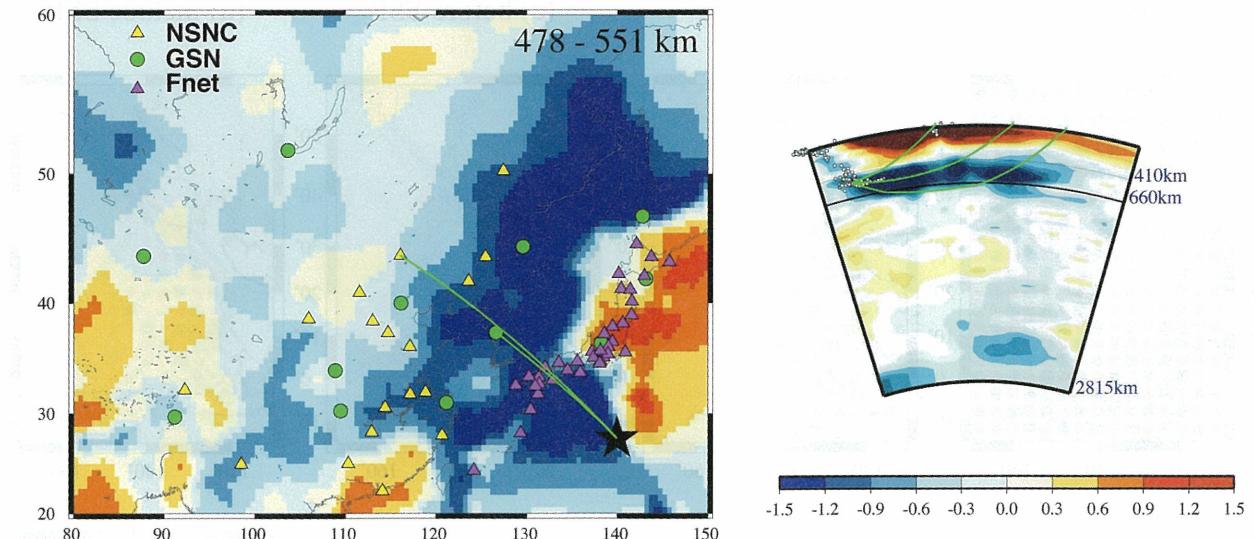


図12 (左) 本研究で使用した広帯域地震観測点の分布。 $\blacktriangle$ ,  $\bullet$ ,  $\blacktriangledown$ はFnet, GSN, NSNCである。P波トモグラフィのマントル遷移層部分を重ねて表示しており、 $\star$ は小笠原での深発地震(2002/6/3, 深さ494km), 緑色の曲線は震央から日本・韓国・中国の観測点への波線経路を示す。(右) その波線経路に沿った鉛直断面、左側が小笠原弧で小さな○は震源。下のカラースケールはP波slownessの偏差(%)で、深さ660km上面付近に高速度なスタグナントスラブがあり、先の3つ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

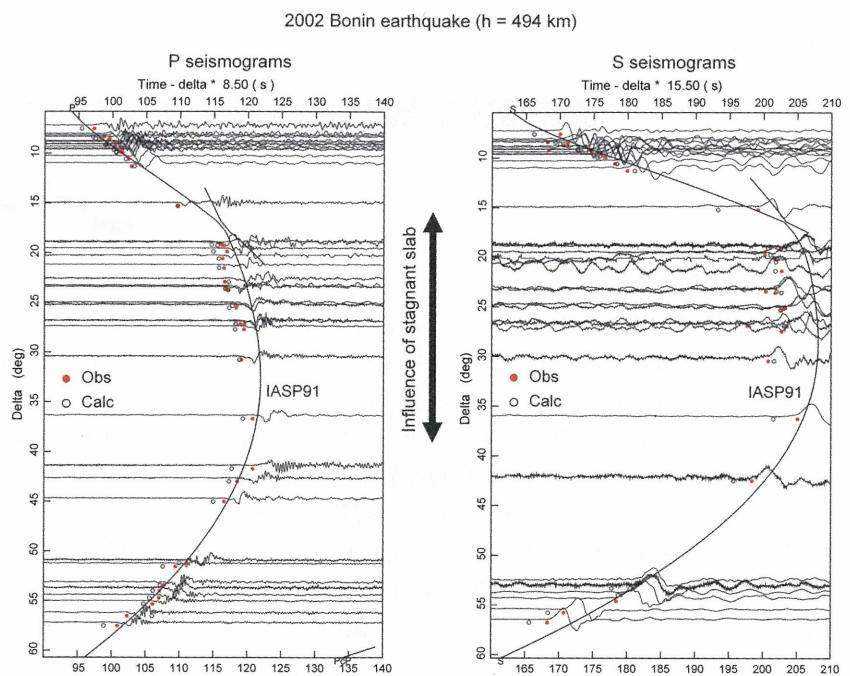


図13 図12で示した小笠原での深発地震のP波（左）及びS波（右）の記録。○と●は、3次元速度構造モデルによる理論走時と観測走時での到着時刻である。S波速度構造はRが一定と仮定してP波速度構造から推定した。曲線はIASP91速度構造モデルによる理論走時を示す。P・S波ともに、スタグナントスラブの影響を受けた走時異常が顕著であり、その残差はそれぞれ4・6秒に及ぶ。

- 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. Gorbatov, 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.

## 海底電磁気機動観測でスタグナントスラブを診る

歌 田 久 司 (東京大学地震研究所)

### 1. 研究班の目的

海半球計画で完成したグローバル電磁気観測網のデータ解析により、マントル遷移層までに達する3次元電気伝導度不均質構造の解明が試みられるようになった。その結果、西太平洋沈み込み帯のスタグナントスラブの直上に温度では説明できない高電気伝導度異常が発見され、スラブから水が供給された結果であるとの解釈の可能性が指摘された (Hae et al., 2006; Koyama et al., 2006)。その後、遷移層鉱物の電気伝導度に対する水の影響は、本領域の高圧グループによって詳しく調べられた (Yoshino et al., 2008)。沈み込むスラブによる水輸送の問題を詳しく検証するためには、電磁気トモグラフィーの解像度と信頼性の向上が不可欠である。

本計画研究は、海底電磁気機動観測によるデータと既存の海半球電磁気ネットワークによる観測データとを統合して電磁気トモグラフィー解析を行い、日本およびフィリピン海を含む西太平洋域の巨大なスタグナントスラブを電気伝導度によって高解像度で「診る」ことを目的として5年間で実施する。具体的には、以下の3項目の達成をめざす。

- (1) フィリピン海において、長期型海底電磁力計(OBEM)による1年間の観測を合計3回実施する。
- (2) 3回の機動観測によって得られる長期高密度観測データに既存のネットワークの長期観測データを加えて、マントル遷移層におけるスタグナントスラブに焦点をあてた電磁気トモグラフィー解析を行う。
- (3) 地震波トモグラフィー結果や高温高圧実験での物性測定結果との直接比較により、スタグナントスラブの形状変化とその原因(特に水の影響)を解明する。

### 2. これまでの経過と得られた成果

#### 2.1. 海域機動観測の完了

本研究計画では、西太平洋域に広がるスタグナントスラブとその周辺のマントルを電気伝導度によって実体視することを目指し、フィリピン海および太平洋において長期型海底電位磁力計(OBEM)を用いた海底電磁気観測を海底地震観測と合同で実施した。平成17年10月から開始した3度の観測で、東京大学地震研究所および海洋研究開発機構・地球内部変動研究センター(IFREE)が所有するOBEMのべ38台を出動させ、18観測点に展開した。図1に、各年度の観測点分布を示す。マントル

遷移層までの深さがターゲットとなるため長周期の電磁場変動を多くサンプルする必要がある。そこで、7観測点で1年間の観測を3回、5観測点で2回繰り返し、最長3年分の観測データを取得した。

OBEMの設置・回収は、海洋研究開発機構の研究船「かいれい」と民間の作業船(洞海マリンシステムズ「あせあん丸」)を傭船して実施した。第1次観測は、平成17年10月の「かいれい」KR05-14次航海で、11台のOBEMを設置し、平成18年11月の「かいれい」KR06-14次航海で回収した。このとき12台のOBEMを新たに設置し、平成19年11月に「あせあん丸」航海で回収するとともに(第2次観測)、更に14台のOBEMを設置した。第3次観測の回収は、「かいれい」によって行われ(平成20年11月、KR08-15次航海)、14台のOBEMを無事回収した。3回の観測で、OBEMの回収率100%を達成した。データの質も各点良好で、電磁気応答関数の推定に利用可能な区間は、磁場では全観測点で100%，電場については一部観測点でノイズに汚染されている区間があるが、質のよい区間を選んで解析することで、電磁気応答関数を推定することが可能である。

図2に、観測点T14のデータを解析して得られたGDS応答関数を示す。第1次観測で得られた1年分のデータを使って求めた応答関数(左)と3年分のデータを使って求めた応答関数を比較すると、データの蓄積によって応答関数の推定誤差が小さくなり、長い周期まで信頼性の高い推定ができることがわかる。

#### 2.2. フィリピン海上部マントルの標準1次元構造モデル

3次元電気伝導度構造を、インバージョンを用いて求

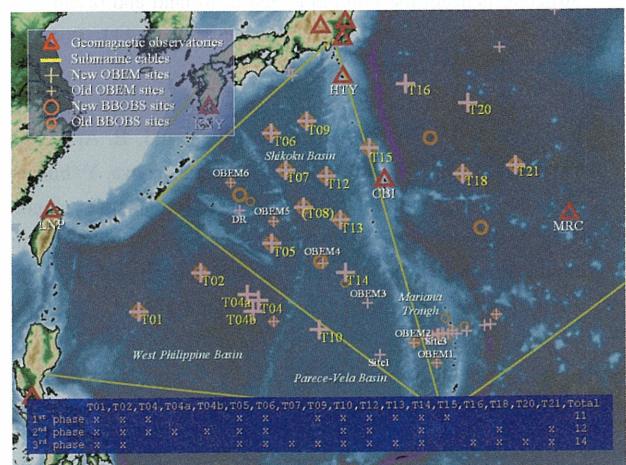


図1 海底電磁気観測点の分布。

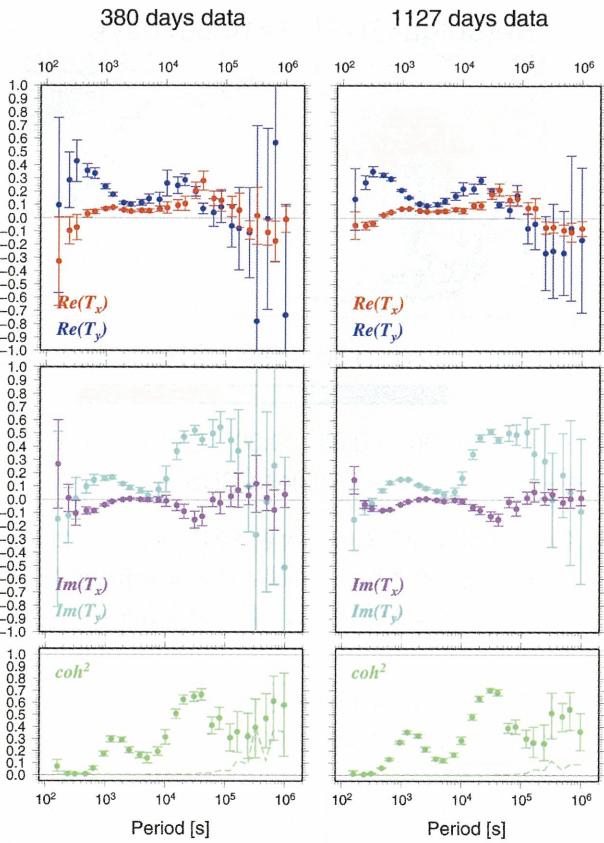


図2 観測点T14におけるGDS応答関数。左は、第1次観測で得られた380日間のデータを用いて解析記した結果。右は、第1次観測から第3次観測までのデータを統合し、全1137日間のデータを用いて解析した結果。

める際には、地震波トモグラフィーで行われているように、標準的な1次元構造モデルからスタートし、そこからの不均質として妥当な構造を探し出す手法が有効であると考えられる。そこで、本研究では3次元解析に先立ち、標準的1次元標準構造モデルの推定を試みている。まず、本計画の第1次観測で得られたデータと過去に行われた別の観測で得られたデータを再解析し、フィリピン海プレート上の14観測点について、MT応答関数を推定した。これら14観測点の応答関数の平均値を求め、その平均的応答関数に1次元構造インバージョンを適用した。

ところで海底のMT応答関数は、観測点周辺の海底地形の起伏や、海陸分布による電気伝導度不均質構造によって大きくゆがめられる。これは地殻・マントルを構成する岩石の電気伝導度にくらべて海水が非常に高電気伝導度で、海底および海陸境界が大きな電気伝導度コントラストをつくるからである。海底地形・海陸分布は既知情報があるので、電気伝導度構造としてモデルに組み込むことにより、電磁気応答関数への影響を見積もることが可能である。ただし

海底地形・海陸境界効果は、未知の海底下電気伝導度構造にも依存するので、先に求めた1次元構造モデルの上に海底地形・海陸分布による電気伝導度不均質がのった3次元構造モデルに対する電磁気応答関数のシミュレーション計算を行い、海底地形・海陸境界効果を見積もった。さらに観測から得られた応答関数から見積もった海底地形・海陸境界効果を除去して、再度1次元インバージョンを行って、海底下1次元構造モデルを推定しなおす。この過程を繰り返し、収束した結果得られたモデルを最終的な標準1次元構造とする。

図3に、得られた1次元構造モデルを示す。青色、灰色、オレンジ色のモデルは、それぞれインバージョンの際に与えた制約条件の違いを表す。共通しているのは、深さ約100kmから400kmまでの上部マントルは約0.03S/mでほぼ一様であること、それより深部では電気伝導度が高くなることである。いずれのモデルも14観測点の平均的MT応答関数（海底地形・海陸境界効果を除去してある）を同程度に説明する。またこのモデルをUtada et al. (2003), Kuvshinov et al. (2005) で得られた北太平洋の標準的1次元構造モデルとくらべると、フィリピン海の方が高電気伝導度である。本研究で得られたフィリピン海上部マントルの1次元電気伝導度構造モデルは、まだpreliminaryである。今後、第2次、第3次観測で得られたデータも解析して観測点数を増やすとともに、既存の観測点についてもMT応答関数の推定精度を向上させる。また海底地形効果についても、観測点近傍の詳細な地形まで考慮に入れた解析を行い、標準1次元構造モデルを改定し、3次元インバージョンにとりかかる予

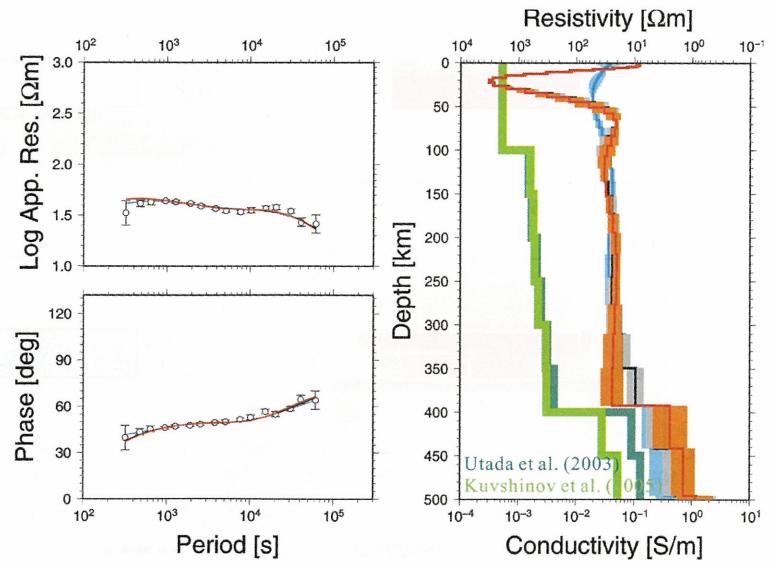


図3 海底地形・海陸境界効果を除去したあとの14観測点の平均的MT応答関数（左）とそのインバージョン解析で得られた1次元電気伝導度構造モデル。青、灰色、オレンジ色の線は、それぞれインバージョンの際に、モデルに制約条件を与えない場合、最上層と深さ約20kmの電気伝導度に制約（0.1S/m, 0.0032S/m）を与えた場合、更に深さ約400kmで不連続を許した場合に得られたモデル。

定である。

### 2.3. セミグローバル電磁気トモグラフィー

グローバルおよびセミグローバル電磁気トモグラフィーでは、1日以上の周期で期待される双極子型の外部磁場変動に起因する電磁誘導を扱い、GDS応答関数（周波数領域における磁場変動の南北成分と鉛直成分の比）、HTF応答関数（2観測点間の磁場水平成分の比）、MT応答関数（電位差変動と磁場変動の比）を用いて電気伝導度構造を求める。

GDS応答関数は、1観測点データから1次元構造解析を行うことが原理的には可能である。これまでに、このようにして求めた1次元構造を比較することにより、マントル電気伝導度構造の地域性が議論されることがあった。しかし、昨年度までに求めた、マントル遷移層に3次元電気伝導度異常体が存在する場合に期待される応答関数の分布によると、GDS応答関数の異常は、電気伝導度異常の南北境界付近で強く、また、南北の境界で逆センスとなる（図4）。従って、1点のGDS応答関数から求めた1次元構造からは、電気伝導度構造を正しく推定できない可能性がある。図4に示したGDS応答関数のうち、異常体上を通る測線N, C, S上の仮想的な観測点について、各点毎にGDS応答関数の1次元インバージョンを実行し、求められた1次元構造をまとめて擬似断面を作成した（図5）。特に観測線C, ST下の擬似断面は、与えた構造と明らかに異なることがわかる。これは、確か

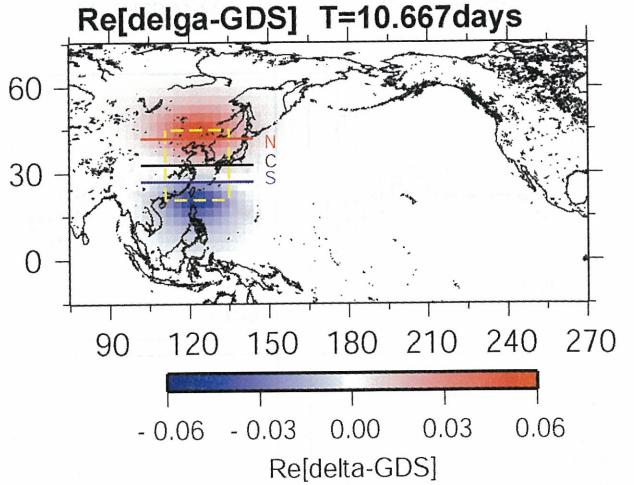


図4 地下400kmにある、大きさ $24^{\circ} \times 24^{\circ} \times 200\text{km}$ の電気伝導度異常（周囲よりも電気伝導度が5倍高い）によるGDS応答関数の異常分布。

な1次元電気伝導度構造を得るためにには、次元を問わず、多点のGDS応答関数を同時に解析に用いる必要があることを示している。

3次元構造推定を行うためには、求められた構造の信頼性とインバージョン計算の安定性の両面において、初期モデルとして用いることが可能な、信頼できる1次元標準モデルを求めておくことが不可欠である。再解析により求めた長周期（周期1日～100日）GDS応答関数（13点）とMT応答関数（8海底ケーブル）を用いて、Utada et al. (2003), Kuvshinov et al. (2005) で求められた北太平洋1次元標準構造を更新した。観測点分布を図6に、求められた標準構造の一例を図7に示す。海陸分布の影響の補正、補正済応答関数の平均による準1次元応答関数の決定、1次元インバージョンによる構造の決定、の3ステップを反復し、収束後に得られた構造を標準モデルとした。synthetic testにより、この方法を用いれば、マントルに電気伝導度異常が存在する場合でも、もっともらしい1次元構造が求められる、つまり、求められた構造は少なくとも遷移層については確かであることを確かめた。図7にはYoshino et al. (2008) による含水鉱物電気伝導度測定実験の結果もプロットしており、それらと遷移層内の標準構造を比較すると、遷移

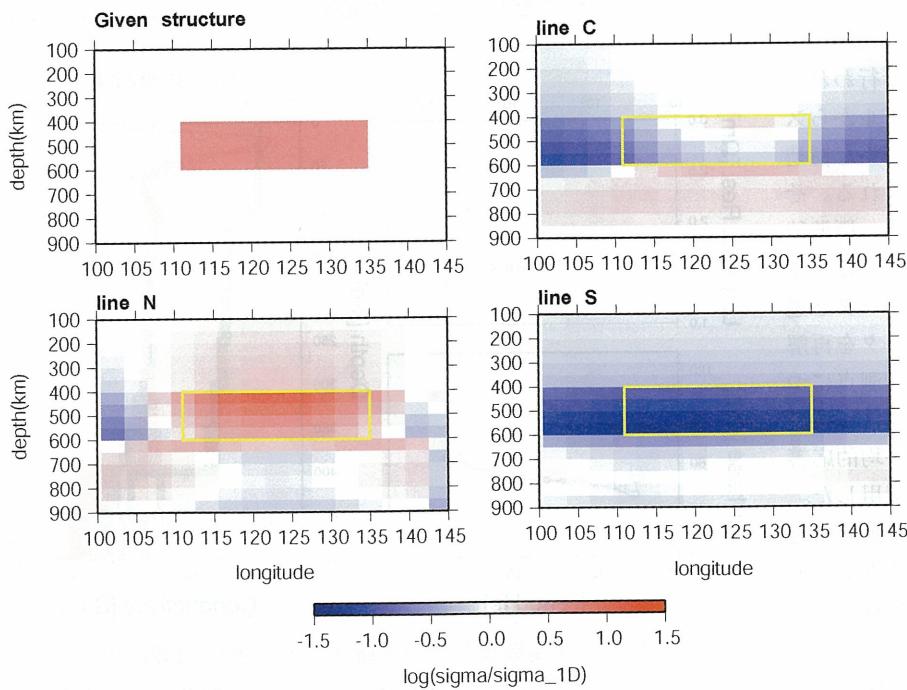


図5 図4の観測線N (42N), C (33N) およびS (27N) 上の仮想的な観測点におけるGDS応答関数からそれぞれの観測点での1次元構造を求め、それらをまとめて作成した電気伝導度擬似断面。GDS応答関数は、電気伝導度異常に対して図4に示すような分布をするため、この方法では正しく電気伝導度構造を求めることができない。

層には0.1–0.5wt%程度の水が存在することが示唆される。図8は観測された応答関数と1次元標準構造による応答関数間のミスフィットである。ミスフィットのばらつきは、観測誤差の影響に加えて、マントル内に1桁程

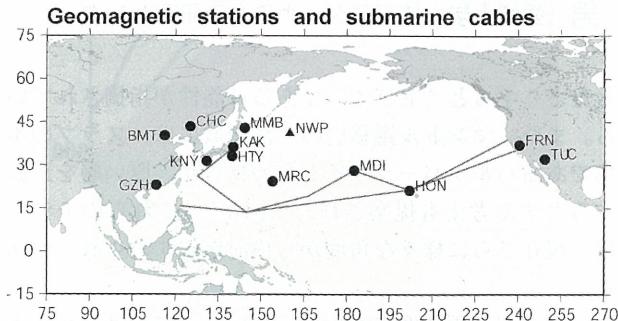


図6 1次元標準電気伝導度構造を求めるために用いた磁場観測点（●, ▲）と海底ケーブルの分布。▲は海底磁場観測点。

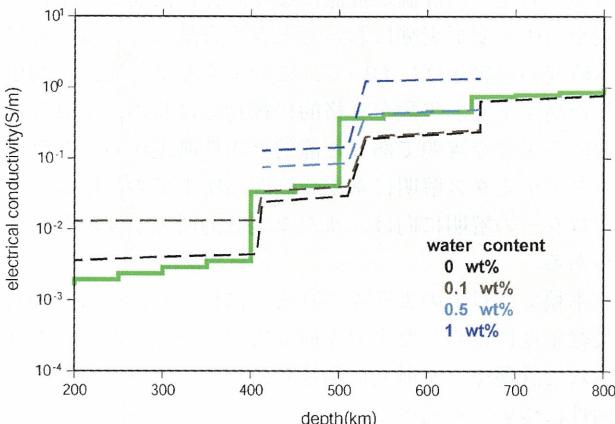


図7 今回更新された北太平洋域1次元標準電気伝導度構造（実線、緑）。深さ400, 500, 650kmにおいて、電気伝導度の不連続を許容したインバージョンにより求められたモデル。比較のため、Yoshino et al. (2008) の室内実験により測定された、含水鉱物の電気伝導度（破線、色は水の量による）もプロットしてある。

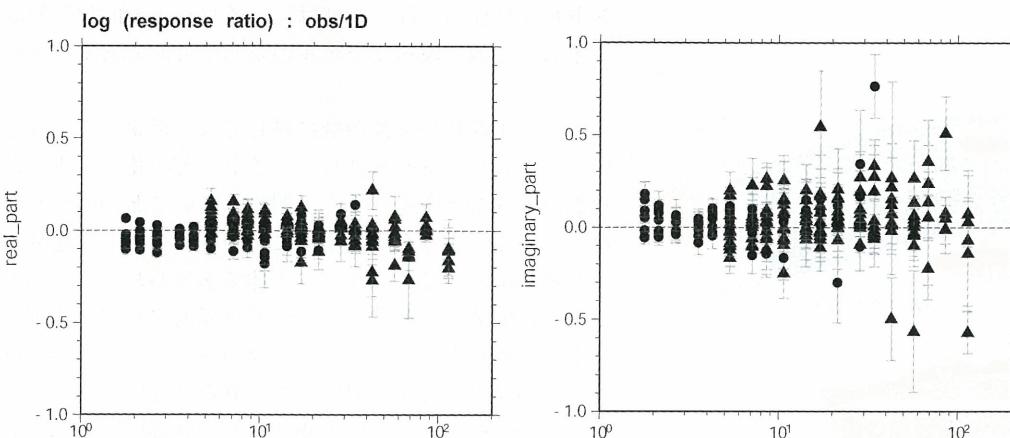


図8 観測された応答関数と1次元標準モデルによる応答関数の比の対数。0の周りのばらつきは、観測誤差のみではなく、マントルに3次元構造が存在することを示す。

度の電気伝導度コントラストが存在することを示唆している。

### 3.まとめ

本計画研究班ではフィリピン海における長期海底電磁気機動観測により、従来のグローバルスケールの解析から一桁解像度を向上させた遷移層のイメージを得るという目的に向けて、研究を進めて来た。本特定領域の最終年度である平成20年の航海により、フィリピン海において最後のOBEMの回収が行なわれ、海底電磁気観測データの取得が完了した。3年間にわたる海底観測の結果はほぼ100%の成功率であり、我々の観測の信頼性の高さを改めて示す事となった。すでに、データ解析を進めてフィリピン海下マントルの標準モデルが得られ、北太平洋の広域の平均値に比べ上部マントル全域でおよそ1桁程度高電気伝導度であることが示された。もしこの高電気伝導度を水（プロトン伝導）の効果のみで説明しようとすれば、いわゆるアセノスフェアの部分はほぼ水で飽和していることになる。部分溶融の影響等もあるものと考えられるので、地震学的情報との整合性をも考慮してモデルを構築する必要がある。一方、既存の観測網のデータ解析も進めて、北太平洋の遷移層までの広域標準モデルも更新する事ができた。結果は、最新の高圧実験を参照すると、遷移層に0.1–0.5wt%の水が存在する事を示した。これら標準モデルからのずれとして、3次元不均質構造を明らかにする事が本研究の目標であるが、データ解析に時間がかかったため、インバージョンを実施するまでには到らなかった。しかし、1次元モデルで予測される応答関数と観測データから得られた応答関数の間には有意な差があり、3次元不均質の存在を示唆している。今後、集中的に解析を行ない、当初の目的を達成したい。

## マントル遷移層とスタグナントスラブの物質科学的モデリング

入 船 徹 男 (愛媛大学地球深部ダイナミクス研究センター)

### 1. はじめに

「地球深部スラブ」において、我々の計画研究班ではマルチアンビル装置と放射光を主要な手段として用い、マントル遷移層領域におけるスラブおよび周囲のマントル物質の挙動を明らかにするための精密物性データを収集し、スラブの滞留過程の物質科学的モデリングを目指した。特にマントル遷移層対応する20万気圧領域において、弾性波速度および電気伝導度精密測定技術の開発をおこない、マントル遷移層の化学組成やスラブの挙動を制約した。本研究の終盤の2008年には、これらに関する2件のNature論文を初めとし、様々な重要な研究成果があがっている。

一方で十分信頼性の高い圧力スケールを開発することは、スラブの滞留過程に深く関連している660km不連続面の成因解明において、極めて重要であることが明らかになっている。我々の班では、これまでもしばしば圧力スケールとして利用されてきたMgOに的を絞り、マルチアンビル装置の特性を生かして、利用可能なすべての実験データを用いた新たな圧力スケールの決定版の開発もおこなった。この為に、弾性波速度精密測定技術に加え、焼結ダイヤモンドアンビルを用いた超高压発生技術の開発をおこなった。この結果得られた圧力スケールに関する成果は、J. Geophys. Res.において印刷中であり、今後最も信頼性の高いMgO圧力スケールとなることが予想される。

このような実験データを用いて、マントル遷移層の化学組成や水の存在度に対して新たな実験的制約が加えられるとともに、それに基づきマントル遷移層におけるスラブの存在様式に関する新たなモデルが提出された。これらの研究によると、マントル遷移層は従来考えられて

きたよりずっと“ドライ”である可能性が指摘されている。また、マントル遷移層の下部領域には、スラブの本体であるハルツバージャイト質の物質が、厚い層を形成するとする考えも提案された(図1)。これらのモデルは、現在さらに様々な角度から検討がすすめられつつある。

一方、本計画研究において、SPring-8における高圧地球科学関連ビームラインの高度化や装置の維持管理もおこなわれた。高分解能CCDカメラや単色化装置の導入により、試料部の高分解能イメージングや試料に加わる差応力の定量的評価が可能になり、弾性波速度の精密測定や高圧下変形実験において大きく貢献している。特に本研究の最終年度において、このような単色光源を利用した高圧下変形実験が本格的に稼動しはじめ、本研究における主要な課題であった静的な物性測定から、スラブのダイナミクス解明に重要な高温高圧下での高圧相のレオロジーの解明に向け、新たな実験的研究が開始されつつある。

本稿では以上のようなこれまでに得られた成果に加え、最終年度に得られた主要な研究成果を概観する。また残された課題や、本研究に関連した分野における今後の方針についても述べる。

### 2. 弾性波速度測定とスタグナントスラブ

高圧下弾性波速度測定に関しては、技術的にはほぼマントル遷移層全域をカバーする温度圧力下までの精密測定が可能になり、リングウッダイト、メジャライトなどの主要高圧相鉱物やMORBなどの多相系、また高温高圧下絶対圧力スケールの確立をめざしたMgOなどに對して、新たな実験データが提出された。この結果、マントル遷移層の上部～中部は、パイロライト的化学組成で矛盾なく地震波速度モデルの説明が可能であることが示された。

マントル遷移層下部領域に對しては、従来考えられていたパイロライトやピクロジャイトなどの化学組成では、地震波速度モデルをうまく説明できないことが明らかになつた。このような実験事実に基づき、マントル遷移層下部領域において、スラブの本体であるハルツバージャイトが、660km不連続面付近に汎世界的に存在する可能性が示唆された。これまでハルツバージャイトの高温高圧下での挙動に関する研究はあまりなされておらず、そのマントル遷移層領域での相変化や、弾性波速度の評価も開始されつつある。

一方、従来の超音波測定に基づく上部マントル～マン

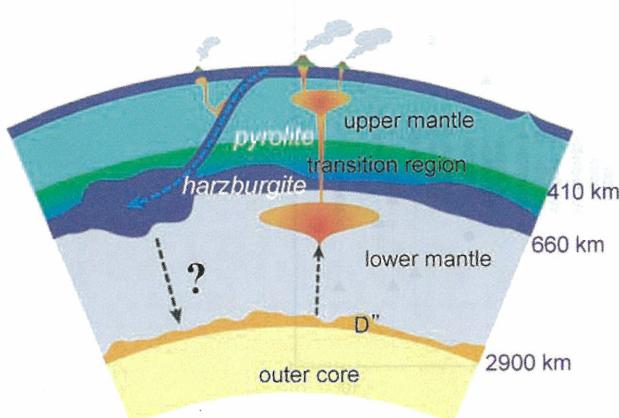


図1 マントル遷移層の化学組成モデル

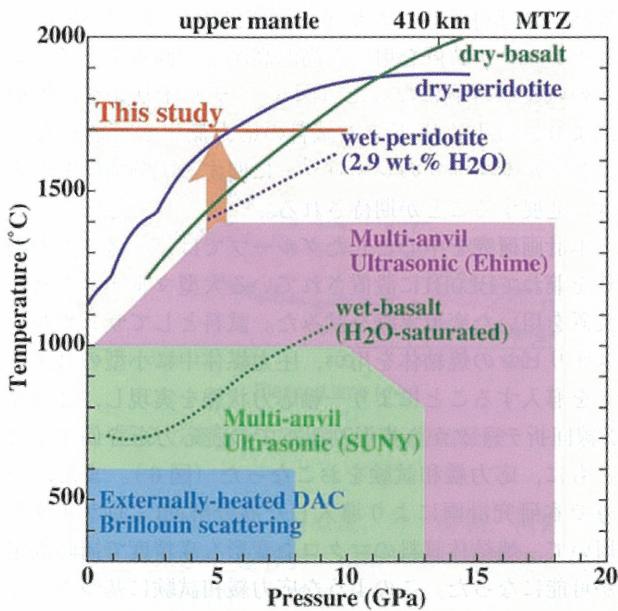


図2 部分熔融状態での弾性波速度測定を目指した高圧下超音波測定温度領域の拡大

トタル遷移層領域における弾性波速度の測定は、1500K程度までに限られていたが、部分熔融したスラブ内での弾性波速度測定を目指し、2000K領域での測定技術の開発がすすめられている（図2）。また、下部マントル領域に対応する25GPaを目指し、より高圧下での超音波測定技術の開発も平行してすすめられつつある。

### 3. 電気伝導度測定とマントル遷移層中の水

本計画研究班では、マントル遷移層の主要高圧相である、ウォズレイトやリングウッダイトに対して、高温高圧下での電気伝導度測定も系統的におこなわれた。特に従来“水”の貯蔵庫とみなされていたマントル遷移層領域において、どの程度の水が存在するのかを見積るために、含水条件下でのこのような測定が精密におこなわれ、観測に基づく電気伝導度モデルとの対比がなされた（図3）。

この結果は、マントル遷移層に多量の水が存在するとする従来の考えに否定的であったが、この結論は電気伝導度の観測精度に大きく依存する。この点に関しては、本研究領域における電気伝導度観測の計画研究との連携をおこないながら、更に決定的な結論を得ることを目指している。

一方で、新たな試みとしてスラブ中の電気伝導度の異方性を、スラブ直下の部分熔融したアセノスフィアの電気伝導度の異方性により説明しようとする試みが開始された。このために、高温高圧下での変形実験と電気伝導度測定を組み合わせ、歪み速度をコントロールした応力下での測定がおこなわれつつある。この結果、部分熔融したアセノスフィアの運動に伴う電気伝導度異方性が引き起こされ、これが観測されている電気伝導度の異方性をうまく説明可能であることが示された。従来このよう

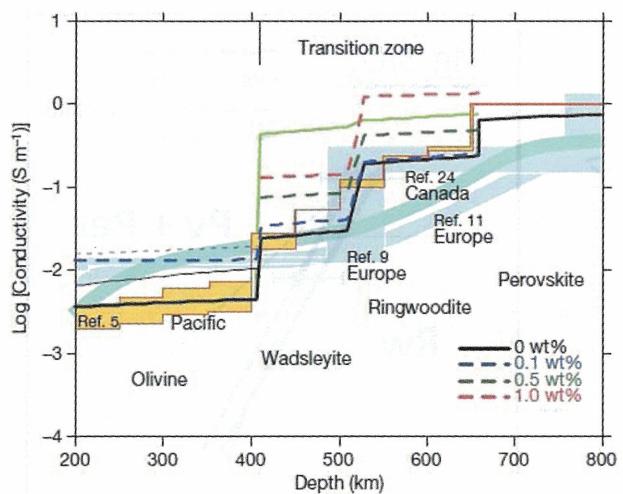


図3 高温高圧下での電気伝導度測定と観測プロファイルの比較によるマントル遷移層における含水量の推定

電気伝導度異方性は、含水かんらん石の異方性により説明されてきたが、この研究により部分熔融の重要性が指摘された。

### 4. 下部マントル領域でのP-V-Tデータ収集と状態方程式

焼結ダイヤモンドアンビルを用いた超高圧発生技術の開発に基づき、下部マントル中部にあたる80GPa領域の圧力発生を、マルチアンビル装置を用いて可能にした。このような技術に基づき得られたMgOのP-V-Tデータや、衝撃圧縮データを用いることによりself-consistentな新しい状態方程式の開発を行った。また、これとは独立に高温高圧下での弾性波速度測定に基づき、MgOの状態方程式の開発もすすめている。

これらの状態方程式に基づき、MgOを圧力スケールとして用いている過去のスピネル-ポストスピネル転移境界圧力の再評価をおこなった。この結果、いずれの圧力スケールも誤差の範囲で一致する結果を与え、660kmに対応する圧力より若干(0.5-1GPa)低い圧力でこの相転移が起こることが示された（図4）。このような新しい圧力スケールに基づき、この相転移のX線その場観察実験による再決定が望まれる。また、このような研究とは独立に、MgSiO<sub>3</sub>ペロブスカイト試料の大量合成により、より高精度な熱測定に基づくスピネル-ポストスピネル転移境界の再決定も試みられつつある。

焼結ダイヤモンドアンビルを用いた実験では、MgOと同様の手法によるAuの状態方程式の決定版を構築しつつあるとともに、下部マントルの主要高圧相であるMgSiO<sub>3</sub>ペロブスカイトの状態方程式の精密決定も平行しておこないつつある。これらの実験的研究に基づき、660km不連続面の成因解明とともに、下部マントル領域におけるスラブのダイナミクスにおいて重要な制約が与えられつつある。

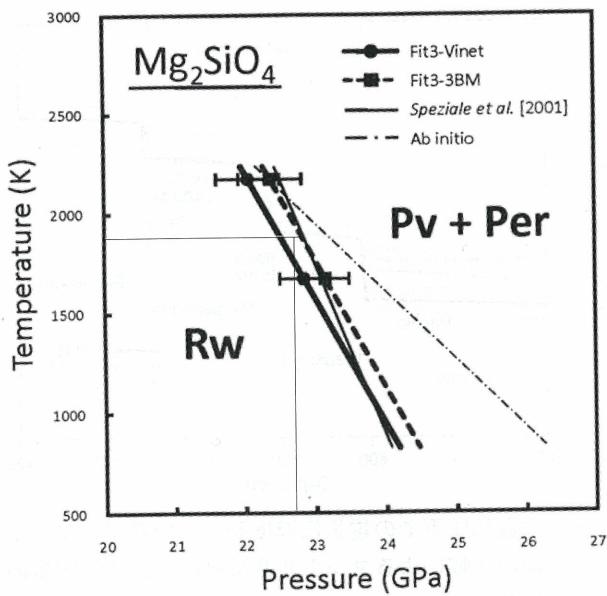


図4 新しいMgO圧力スケールによる、 $Mg_2SiO_4$ のスピネル→ポストスピネル相転移境界の再評価

## 5. 蛇紋石の脱水過程と変形挙動

蛇紋石は、スラブ最上部を構成する主要な含水鉱物であると考えられる。この鉱物は、沈み込むスラブによるマントル深部への水の供給において重要な役割を担っていると考えられ、その相変化や融解関係に関して多くの研究がおこなわれてきた。また、蛇紋石の高温高压下での脱水は、スラブ中に発生する深発地震の原因にも関連しているとする指摘もある。本計画研究では、特に蛇紋石およびこれを主体とした岩石である蛇紋岩の、高温高压下での動的挙動の解明をめざした実験的研究をおこなっている。

蛇紋石の存在が予想されるスラブ上部は、周囲のマントルに比べてかなり低温である。そこで蛇紋石の脱水反応のカイネティクスを、X線その場観察実験による時分割測定により明らかにした。この結果、この脱水反応がスラブ上面に想定される温度（~600–700度C）においても急激に進行することが明らかになるとともに、残留固相であるオリビンや輝石の粒成長に関して興味深い実験結果が得られつつある。

一方で、蛇紋石を主体とする蛇紋岩の変形挙動に関する実験的研究もすすめられた。この結果、蛇紋石の(001)面のすべりが、蛇紋岩の変形に主要な影響を与えることが明らかになった。このような弱い結合面のすべりに起因する変形は比較的低温下でも生じ、歪みの蓄積とその急激な開放が起こり、地震発生のメカニズムとして重要である可能性がある。

## 6. 単色光源を用いた応力測定とスラブのダイナミクス

本研究計画により導入したX線単色化装置と、2次元X線回折測定システムにより、SPring-8の白色

光高压地球科学ビームライン（BL04B1）において、マルチアンビル装置を用いた高温高压下で回折デバイリングの収集が可能になった（図5）。デバイリングの解析により、高温高压下での試料の応力測定が可能になり、マントルやスラブのレオロジーに関する実験的研究が大きく進展することが期待される。

本計画研究を中心としたグループでは、システムの調整を兼ねてBL04B1に設置されている大型マルチアンビル装置を用いた変形実験を試みた。試料としてサンカルロスオリビンの焼結体を用い、圧力媒体中に小型のピストンを導入することにより一軸応力状態を実現し、2次元X線回折データから高温高压下での差応力を評価とともに、応力緩和試験をおこなった（図6）。また、一方で本研究計画により導入した高分解能CCDカメラを用いて、焼結体試料のマクロな変形も高精度で同時測定が可能になった。このような応力緩和試験に基づき、今後スラブやマントル物質の粘性率に関する重要な実験データが得られると期待される。

本特定領域研究の期間において、大型マルチアンビル装置を用いた放射光実験と様々な物性測定技術を組み合わせることにより、スラブおよびマントル遷移層を中心とした周囲のマントル物質の物質科学は大きく進展した。しかしこれらの実験的研究は、主に高温高压下でのスラブやマントルのいわば「静的」な特性を明らかにすることに重点が置かれた。一方で、スラブ内部での破壊現象、即ち深発地震の発生メカニズムや、スラブとマントルのダイナミクスなど、「動的」な挙動の解明を目指した新しい研究の流れが生まれつつある。このようなスタグナントスラブ研究の新たな進展のためには、SPring-8など放射光実験施設におけるより高輝度の単色光源の利用や、本格的な高压変形実験装置の導入が望まれるところである。

本稿をまとめにあたり、本計画研究班のメンバーを含む以下の方々に資料を提供いただいた。記して感謝す

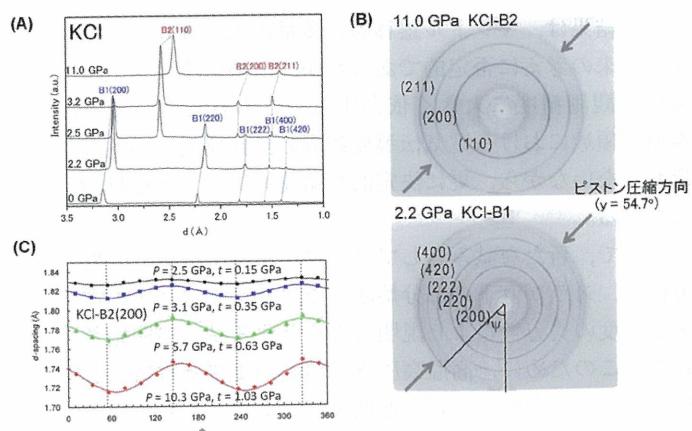


図5 SPring-8に導入された単色化装置と検出システムにより得られた（A）高压下での回折プロファイル、（B）回折デバイリング、（C）差応力解析

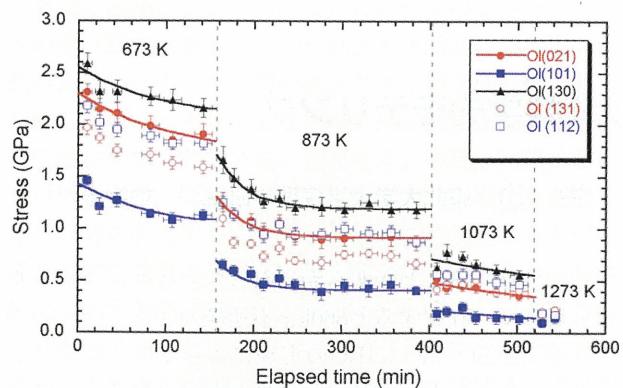


図6 高圧下における応力緩和試験

る。井上徹, 西山宣正, 西原遊, 丹下慶範, 河野義生(愛媛大学・GRC), 桂智男, 山崎大輔, 芳野極(岡山大学・ISEI), 舟越賢一, 肥後祐司(SPring-8・JASRI), 安東淳一(広島大・理)。

## スラブ滞留・崩落過程の物質科学的モデリング

大 谷 栄 治 (東北大学大学院理学研究科 地学専攻)

### 1. 研究の目的

この研究グループでは、スラブがマントル遷移層と下部マントル上部でなぜ滞留するのか、そして滞留したスラブが、その後どのように進化するのか、その後なぜ大規模な崩落を起こすのか、その原因はなにか、崩落にともなってスラブがどのように変化してゆくのか、そして本当にスラブが核とマントル境界部に堆積しているのかを、高圧高温実験にもとづいた物質科学的モデリングによって解明することを目指している。また、我々は数値モデリング班および地球物理的観測・解析班に対して、信頼できる物性値を提供し、これらの班のモデル化を支援し共同することも目指した。

### 2. 研究成果

本研究グループは主として東北大グループと東京工業大・IFREEグループからなる。九大および光科学研究中心のメンバーはそれぞれ前者と後者に属している。

I. 東北大グループの成果は以下にまとめられる。

#### 今年度の成果

##### (1) マントル遷移層における $Mg_2SiO_4$ のポストスピネル転移に対する水の影響

放射光施設SPring-8のBL04B1ビームラインに設置されているマルチアンビル高圧装置SPEED-1500及びSPEED-MkIIを用いてマントル遷移層に存在する一連の相転移境界に対する水の影響を、高温高压X線その場観察実験にもとづいて解明した。今年度は、高温高压X線その場観察実験によって、リングウッダイト  $Mg_2SiO_4$  の分解境界 (post-spinel転移境界) に対する水の影響が明を明らかにした。無水のpost-spinel相境界はKatsura et al. (2004), Fei et al. (2005) の  $Mg_2SiO_4$  のpost-spinel相境界の勾配と矛盾しないが、 $Mg_2SiO_4$ -2wt.%  $H_2O$ 系の相境界は、無水に比べて大きく約-2MPa/K程度となる。また、1000°Cにおいて、Ringwooditeが23.5GPaで安定であるなど低温では水の存在によって、Ringwooditeの安定領域が広がることが明らかになった。このことは、Ringwooditeの含水量に温度依存性があり、低温ほど含水量が大きくなり、高温になると少なくなることと調和的である。すなわち、Post-spinelの相境界の勾配は、含

水量に依存することが明らかになった。また、マントル遷移層に水が存在すると660km不連続面がより深くなることが  $Mg_2SiO_4$ -2wt%  $H_2O$  の実験によって明らかになった。単純な系において  $H_2O$  の効果が明らかになり、この結果を用いて任意の含水量の系において、相境界の移動の程度が熱力学的に推定することが可能である。

##### (2) マントル遷移層に沈み込んだスラブ中のアキモタイト ( $MgSiO_3$ ) の選択配向とスラブの地震波異方性

マントル遷移層に沈み込んだスラブにおいて、地震波速度の異方性が地震波の解析によって明らかになっている。Tonga subduction zone地下のマントル遷移層には、南北となる地震波速度の異方性が観測されているが (Vavryčuk, PEPI, 2006), それらの起源については、未解明のままであった。マントル遷移層内の鉱物の配列による地震波違法性を解明するために、マントル遷移層に存在する鉱物の中でもっとも弾性的異方性の大きいアキモタイトの応力下での選択配向性を明らかにする実験を行った。実験は、マルチアンビル高圧装置を用い、圧力媒体に埋め込まれたアルミニナピストンによる1軸圧縮実験およびずり変形実験を行った。実験は、アキモタイトの安定な20GPa程度の圧力および1000~1300°Cの温度領域において行った。

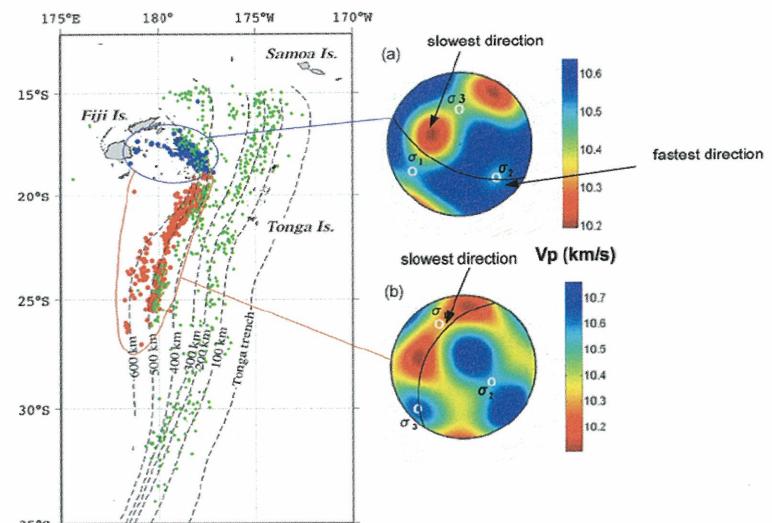


図1 トンガ海溝下のマントル遷移層の地震波異方性とアキモタイトの選択配向：(a) (b) の図は地震波の異方性、白丸は実験から予想される圧縮主応力軸 (Shiraishi, Ohtani, et al., Nature, 2008)

実験の結果、低温（1000°C）の条件でのアキモトイットの選択配向と高温（1100°C以上）の実験とは選択配向に違いがあり、すべり変形のメカニズムが変化したことを示唆している。温度によるすべり系の変化は、一般的に低圧鉱物で知られていることである。今回、高圧鉱物におけるすべり系の変化を世界で始めてみいだしたものである。得られたアキモトイットの選択配向性にもとづいて、地震波速度の異方性を見積もることができる。その結果、応力と地震波速度の異方性が、報告されているトンガ海溝下のマントル遷移層の南北となる地震波異方性が、温度による異なる結晶の選択配向性によって説明可能であることが明らかになった（Shiraishi, Ohtani, et al., Nature, 2008）。

### （3）スラブの沈み込みに伴う下部マントルへの水の移動と核との相互作用：下部マントルで安定な含水相と金属鉄の反応

マントルの条件で安定な含水鉱物としては、Wadsleyite, Ringwoodite, 含水D相MgSi(OH)<sub>3</sub>, 含水δ相AlOOHなどが知られており、後者の2種類は下部マントル深部まで安定である。D相は、橄欖岩組成のマントル中に存在しえる含水鉱物であり、Shieh et al. (1995) によって約45GPaで脱水分解することが示されている。他方、地殻物質中に含まれる含水のアルミニナ化合物Topas-OHは、含水phase Egg相となり、さらにマントル遷移層の深さでSiO<sub>2</sub>スチショバイトとδ-AlOOH phaseに分解する。本研究においては、分解生成物であるδ-AlOOHの安定領域を明らかにする実験を行った。また、含水相δ-AlOOHおよびRingwooditeと金属鉄の反応実験を行った。

#### 1) δ-AlOOH phaseの安定領域

出発物質は、diaspore AlOOHまたはgibbsite Al(OH)<sub>3</sub>を用い、レーザーの吸収剤としてIr粉末を混合した。実験はSPRING-8のBL10XUのビームラインにおいて、両面加熱のレーザー加熱ダイヤモンドアンビル高圧装置を用いた。図2にδ-AlOOH相の安定領域を示す。図から明らかなように、δ-AlOOHは約19GPa以上約120GP, 2000Kまで安定であり、沈み込むスラブ内において、下部マントル最下部まで、安定に存在することが明らかになった。この相は、通常の温度勾配のマントルにおいても安定に存在する可能性がある。以上のように、δ-AlOOH相は、これまえ見出されている含水鉱物のうち最も高圧まで安定なものであり、水をマントル最下部まで輸送することができる重要な含水鉱物となる。δ-AlOOHの水素位置に関しては、氷X相と同様に高圧で水素結合が対象化し、安定になる可能性が指摘されている（Tsuchiya et al., 2006）。今回得られた超高压高温での安定性は、この相における、水素と酸素の結合が対象かするためである可能性もある。

### 2) δ-AlOOH phaseと金属鉄の反応、含水Ringwooditeと金属鉄の反応

金属鉄と含水鉱物の反応様式を解明するために、含水Ringwooditeおよび含水δ-AlOOHと金属鉄との反応を高温高圧その場X線回折実験によって明らかにした。含水Ringwoodite中の水素は、鉄の存在下で鉄と合金を作りFeHを作り、Ringwooditeは無水になることが明らかになった。鉄とRingwooditeの間の水素の分配係数は約30程度になる。

含水δ-AlOOHとFeの反応についても、類似のFeH生成反応が確認された。すなわち、反応によって15GPa以上130GPaまでの広い圧力範囲において、約1300K以上でAl<sub>2</sub>O<sub>3</sub>の高圧多形とFeHが生成することが明らかになった。δ-AlOOHは核マントル境界に水素を運ぶ。したがって、今回明らかになった水素の挙動は、最下部マントルに運ばれた水素が核内部に運ばれることを示している。

### （4）核・マントル境界におけるマントル・核の相互作用とブルームのOs同位体異常

下部マントル起源のブルームにおいては、オスミオムの同位体の異常が見出されている。この異常は、核の物質が少量混入した最下部マントルの同位体異常を反映していると考えられている（例えばBrandon et al., 2004）。Brandon et al. (2004)によれば、核が結晶化する際に、液体の外核がオスミウム同位体異常をもち、これがCMBにおいて最下部マントルに混入することによって、最下部マントルがこのような同位体異常をもつこと解釈される。Osの同位体は、PtおよびReの同位体の崩壊によって生じる。したがって、Osの同位体異常の原因が、外核の金属鉄融体が最下部マントルを汚染し、ブルームがここから由来したものと解釈してきた。すなわち、ブルームのOs同位体異常は最下部マントルおよび外核のOs同位体異常を反映していると考えられてきた。外核のこのようなOs同位体異常は、核において内核の結晶化の際の、Os, Os, Reの元素分配挙動が原因であると間和えられてきた。これを内核分別作用と呼んでいる（Brandon et al., 2004）。このようなOs同位体異常をつくるOs, Pt, Reの分配挙動が金属鉄の固相と液相間の分配によって生じるか否かを解明するための実験を行った。

実験は、マルチアンビル高圧装置を用いて、圧力5GPaから20GPaまで、温度1470–1670°Cまでの条件でFe-Fes系においてOs, Re, Ptの金属鉄固体と金属鉄融体間の元素分配実験を行った。そしてこれらの元素の分配係数の圧力依存性、イオウ量の依存性を明らかにした。その結果、Os, Re, Ptの金属鉄の固液間の分配係数の圧力依存性および分配係数比(Dos/DRe, Dos/DPt)の圧力依存性は小さく、イオウ濃度依存性は非常に大きいことが明らかになった。図2に分配係数の組成依存性を示す。その結果、高温高圧条件において、外核に想定されるイオウ量では、ブルームに見られるOsの同位体異常を作り出すことができないことが明らかになった。

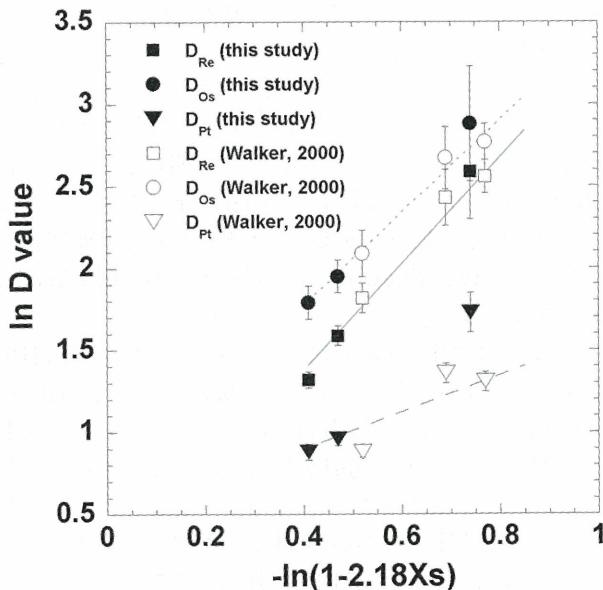


図2 金属鉄固相と液相間のPt, Re, Osの分配。イオウの効果は大きい。実験は20GPa, 1470–1670°Cで行っている。

すなわち、外核を作る金属鉄メルトの最下部マントルへの汚染の過程では、ブルーム起源のOs同位体異常を作ることはできないことが明らかになった。Os同位体の異常を説明するためには、内核分別作用では説明できず、これ以外の過程を考える必要があることが明らかになった。

## 5年間の成果

- マントル遷移層に滞留するスラブと関連する上部マントル、マントル遷移層、下部マントルの諸過程
- 相転移境界に対する水の影響の解明：マントル遷移層に存在するolivine-wadsleyite相転移境界とRingwooditeの分解反応境界をDryおよびWet条件で決定し、含水系では、Olivine-Wadsleyite境界低圧側にずれ、Ringwooditeの分解は高压側にずれることを明らかにした（図3）。
- マントル遷移層の主要鉱物Ringwoodite, Wadsleyite中の水素の拡散係数：
- WadsleyiteおよびMajoriteと流体との間の二面角の測定：流体はマントル遷移層で非常にぬれやすいことが明らかになった。
- WadsleyiteとRingwoodite中のSiとOの拡散係数の測定をし、マントル遷移層に沈み込んだスラブの流動特性を推定した。
- 含水マグマと含CO<sub>2</sub>マグマの密度をダイヤモンドの浮沈法およびX線吸収法によって測定し、これらのマグマが上部マントル最下部で安定に存在することを明らかにした。
- 1)～6)を総合して、滞留した深部スラブからの脱水と上部マントル再下部での部分溶融と重い含水マグマの生成、さらにプレート内部での火成作用と

の関連を示すモデルを提案した。すなわち、趙らのBMW (Big Mantle Wedge) modelの原因として、DD (Deep Dehydration) BMW modelを提案した (Ohtani and Zhao, 2009) (図4)。

## 2. 核マントル境界の過程の解明

- 核とマントル境界でのケイ酸塩post-perovskiteと金属鉄の反応を実験を行い、金属鉄メルトに酸素と珪素が溶け込むことを明らかにした (Sakai, Ohtani et al., 2006)。
- 金属鉄と水(氷)、含水酸化物との反応 ( $\delta$ -AlOOH)、含水ケイ酸塩(hydrous ringwoodite)の反応実験を行い、ケイ酸塩や酸化物中の水素は、金属鉄に溶け込み鉄水素化物を作ることが明らかになった。すなわち、核マントル境界では、スラブ中の水素は、核に吸収される可能性がある。

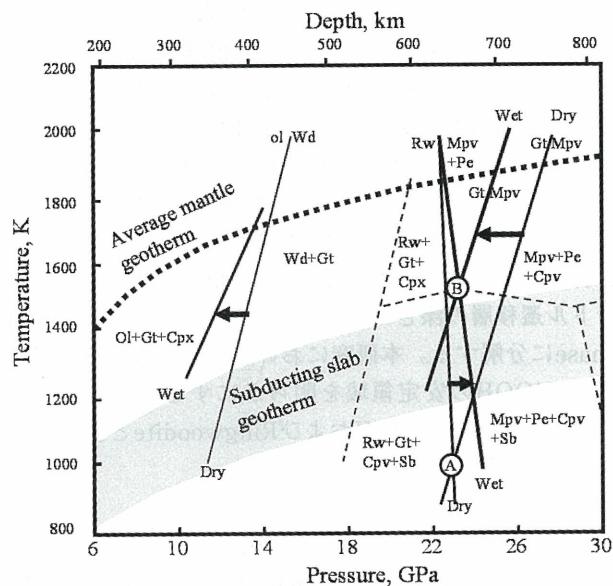


図3 相転移境界に与える水の影響。

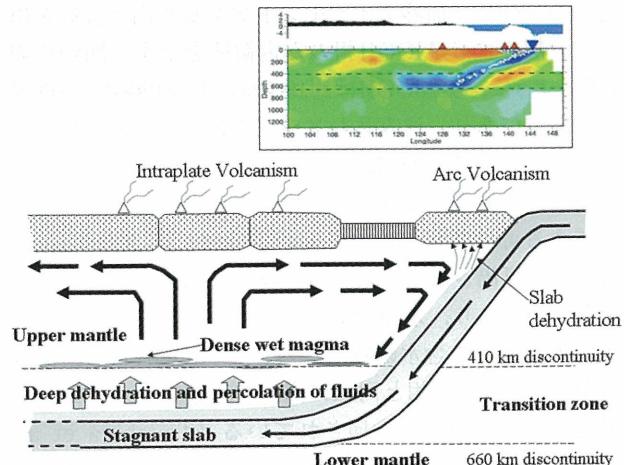


図4 マントル遷移層に滞留するスラブからの脱水による諸過程。DD-BMWモデル (Ohtani and Zhao, 2009)

3) 本年度の成果（4）で述べたように、内核分別作用によるブルームの起源物質のOs同位体異常は、内核分別作用が原因ではないことを明らかにした。

II. 東工大の広瀬敬教授らのグループは以下の成果は以下のようである。

## 今年度の成果

最下部マントルの主要鉱物と考えられるポストペロフスカイト相につき、以下の研究を行った。

### 1. ポストペロフスカイト相転移境界の精密決定と最下部マントルの熱流量の見積もり

レーザー加熱式ダイヤモンドセル実験では通常10%程度の大きな温度の誤差があるため、相転移境界を正確に決定することが困難である。しかし今回東工大的グループは、1330から4400Kまでのかなり広い温度範囲で実験を行うことにより、相転移境界を以前より精度よく決定することに成功した (Tateno et al., 2009 EPSL)。得られたMgSiO<sub>3</sub>の状態図を図5に示す。実験による相境界の決定には圧力マーカがいつも問題になる。今回はMgOをマーカに用いた。MgOの状態方程式は実験によるものと理論計算によるものが存在するが、両者はよい一致を示す。また、MgOマーカを用いた場合、ポストスピネル相転移とポストペロフスカイト相転移の圧力が、それぞれ深さ660kmと2600kmの地震波不連続面の圧力にほぼ等しい。これらのことからMgOの圧力マーカは現状ではもっとも信頼性が高いと考えられる。今回の実験で決定されたクラペイロン勾配は13.5MPa/Kであり、絶対値としては遷移層における相転移境界とくらべて少なくとも4倍大きい。それゆえ、密度変化は比較的小さいものの、マントルダイナミクスへの効果は遷移層のそれと同程度に大きいものと考えられる。

また、ポストペロフスカイト相転移境界は最下部マントルの温度構造を推定するのに重要である。最下部マントルで観測される対の地震波不連続面の深さ（比較的浅い場所に横波速度の正のジャンプ、より深いところに負のジャンプ）と相転移の圧力-温度境界を用いることにより、最下部マントルの異なる2つの深さの温度を直接決定することが可能である（図5）。さらに、コア・マントル境界の温度がグローバルに等しいということを考慮すると、コア・マントル境界の温度も精度よく推定できる（たとえばvan der Hilst et al., 2008 Science）。今回決定された相境界を用いると、図5に示すような温度構造が得られる。コア・マントル境界の温度は相転移温度より数百度高い約3800Kであると思われる。これは鉄や鉄化合物の融点から過去に見積もっていた温度に比べ、やや低い。さらに、マントル最下部の熱境界層中の温度勾配から、熱伝導率を適当に仮定すると、コアからマントルへの熱流量がおよそ7TWと推定された。今回決定された相境界の勾配が比較的大きいことにより、こ

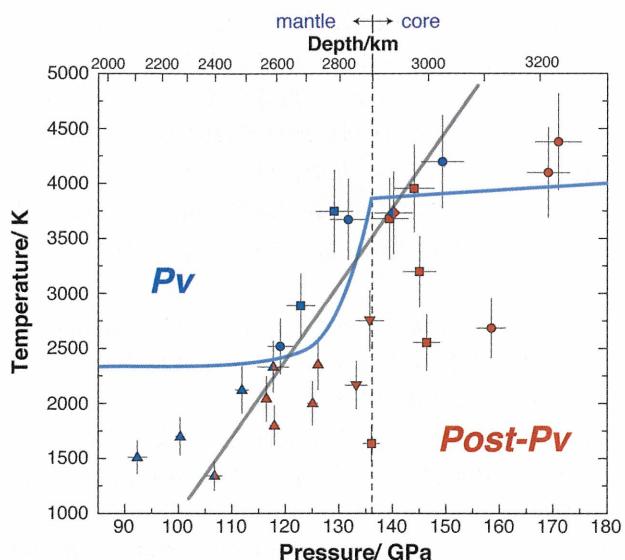


図5 MgSiO<sub>3</sub>の状態図。ペロフスカイト (Pv) 相とポストペロフスカイト (PPv) 相の境界を示す。青い線はマントル最下部で観測される対の地震波不連続面の深さと相境界をもとに推定した、コアマントル境界付近の温度構造。

れは従来の推定値より小さい値である。

### 2. ポストペロフスカイト相の電気伝導度測定

ペロフスカイト相からポストペロフスカイト相への相転移に伴い、マントル最下部のさまざまな物性は大きく変化している可能性がある。そこで今回東工大的グループは、大阪大学の清水克哉研究室との共同研究により、ポストペロフスカイト相の電気伝導度を測定することにはじめて成功した。実験はレーザー加熱式ダイヤモンドセルを用いて、143GPa・3000Kまでの超高压高温下で行われた (Ohta et al., 2008 Science)。その結果、(1) ペロフスカイト相に比べ、ポストペロフスカイト相の電気伝導度は1桁から3桁大きいこと、(2) ペロフスカイト相の伝導度は鉄のスピニ状態の変化により圧力によって大きく変化することが明らかになった。このことは、層状の構造をとるポストペロフスカイト相中で、鉄イオンが並ぶ面内の電気伝導度が高いことに起因していると考えられる。また、ポストペロフスカイト相を主要鉱物とするマントル最下部域が高い電気伝導度を持つことにより、液体の外核と固体のマントルの間に強い電磁気相互作用が起こり、その結果地球の自転速度の変化や自転軸の揺らぎに大きな影響を与えていていると考えられる。

## 5年間の成果

### (1) ポストペロフスカイト相

東工大のグループによる、下部マントルの主要鉱物ペロフスカイト相からポストペロフスカイト相への相転移の発見は、マントル最下部 (D"層) の研究のブレイクスルーとなり、発見以来世界中で関連する研究が活発に

行われている。その結果、長い間説明できなかったD"層内の地震学的異常もポストペロフスカイト相の存在によって説明可能になるなど、地球内部のもっとも謎めいた領域とされていたD"層の理解が飛躍的に進んだ。東工大のグループはこの5年間、以下に列挙するポストペロフスカイト相に関する実験的研究を精力的に行い、沈み込むスラブの行き着く先とされるD"層の理解に貢献した。

- (a)  $MgSiO_3$ 端成分、パイロライト組成、MORB組成中のポストペロフスカイト相転移境界を決定し、D"不連続面の成因をあきらかにした。
- (b) 相転移圧力に対する不純物成分（鉄とアルミニウム）の効果について検討し、D"不連続面の深さに関する化学組成の効果について議論した。
- (c) ポストペロフスカイト相のアナログ物質を複数見出し、その後のより低圧下におけるアナログ実験の展開につながった。
- (d) ペロフスカイト相とポストペロフスカイト相の熱膨張率を同時に測定し、最下部マントルから発生するブルームの浮力について論じた。
- (e) ペロフスカイト相とポストペロフスカイト相の弾性波速度を測定し、相転移に伴う速度コントラストを求めた。
- (f) ポストペロフスカイト相を含む下部マントル鉱物間の鉄の分配をあきらかにし、鉄は比較的フェロペリクレース相に濃集することをあきらかにした。
- (g) ポストペロフスカイト相の電気伝導度測定を行い、マントル最下部が高電気伝導層であることがわかった。
- (h) ポストペロフスカイト相中の鉄の2価/3価比の測定を行い、ペロフスカイト相同様にAl量に相関して3価鉄の量が増加することを見出した。

## (2) 沈み込んだMORB地殻

沈み込むスラブの上部を構成する、玄武岩質海洋地殻(MORB地殻)はマントル内部に大きな化学組成の不均質を生むため、その行方をあきらかにすることはマントル中の不均質構造を理解する上できわめて重要である。東工大のグループは、このMORB地殻の下部マントルにおけるふるまいを理解すべく、高圧下における密度測定と相転移の研究を行った。Hirose et al. (2005 EPSL)では、放射光施設スプリングエイトにおける体積測定と回収試料の化学組成分析から、MORB地殻の密度を下部マントル全域にわたってはじめて明らかにした。その結果、MORB地殻は660km不連続面付近を除き、全マントル領域にわたって周囲のマントルよりも高密度であることがわかった。特に、最下部マントルにおける密度コントラストは数%にも及ぶことから、下部マントルへ沈み込んだMORB地殻はマントルの底へ蓄積していく可能性が高いことがわかった。このことは、MORB地殻と周囲の密度コントラストを仮定して過去に行われたマントル対流のシミュレーション結果にも表れている。

しかし、MORB地殻がマントルの底へ蓄積している証拠はこれまで報告されたことがなかった。パイロライト的マントルとMORB地殻を伝播する地震波の速度の違いがよくわからないため、Ohta et al. (2008 EPSL)では相転移圧力の違いに着目し、マントルの底へ蓄積したMORBパイアルの検出を試みた。レーザー加熱式ダイヤモンドセルを用いた超高压実験により、最下部マントルにおけるパイロライト的マントルとMORBの状態図をできるだけ詳細に作成したところ、MORB中では約4GPa低圧でポストペロフスカイト転移が起こること、またMORB中では同じ圧力でシリカ相の相転移も起こることがあきらかになった。すでに行われていた理論計算によると、パイロライト的マントル中でのポストペロフスカイト転移は約1%の横波速度の増加を起こす。一方、MORB中のAlとFeに富むペロフスカイト相からポストペロフスカイト相への転移は横波速度の減少を起こす。また、同時に起こるシリカ相の相転移も横波速度を減少させる。すなわち、もし最下部マントルにMORBパイアルが存在した場合、比較的浅い位置に横波速度の減少を伴う不連続面が期待される。

最近のシミュレーション結果によれば、沈み込んだMORB地殻はブルーム発生域の下に溜まることが予想される。そこで、太平洋下の最下部マントルに観測されるLarge Low-Shear Velocity Province (LLSVP) の北縁をトンガの地震を使って精密に観測した。場所はLay et al. (2006 Science) で報告されたのと同じであるが、データ数ははるかに増えている。その結果、最下部マントルの比較的浅い場所に横波速度の負のジャンプが存在することがあきらかとなった。上で予想したことと合わせると、これはMORB中の相転移に対応すると考えられる。最下部マントルのMORBパイアルはより広範囲に存在すると考えられるため、今後特にアフリカの下などの解析が待たれる。

## (3) ブリルアン散乱法による弾性波速度の測定

マントル鉱物の地震波伝播速度を理解することは、観測結果の解釈にきわめて重要である。東北大の村上と東工大のグループは、ブリルアン散乱法を用いて、DAC中に封入され高圧高温下にある試料の弾性波速度の測定を行ってきた。下部マントルの代表的鉱物  $MgSiO_3$ ペロフスカイト、ポストペロフスカイト、 $MgO$ については、室温ながら100GPaを超す高圧までの測定に成功した。これらの結果を観測データと比較することにより、下部マントルは上部マントルに比べて $MgO$ 成分に乏しい ( $Mg/Si$ 比が1に近い) ことが示唆された(たとえばMurakami et al., 2009 EPSL)。さらに、下部マントルに相当する高圧高温下での測定にもはじめて成功した。現在までに60GPa・2750Kまでの測定を行った。これらの結果から、地震波速度の温度依存性を定量的にあきらかにしつつある。

## 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 ——これまでの成果のまとめ——

浜野洋三（海洋研究開発機構地球内部変動研究センター） 本多 了（東大地震研究所）

小河正基（東大大学院総合文化研究科） 岩森 光（東大大学院理学系研究科）

柳澤孝寿（海洋研究開発機構地球内部変動研究センター） 吉田晶樹（海洋研究開発機構地球内部変動研究センター）

我々のグループでは、マントル対流の数値シミュレーションを実施することによって、沈み込むスラブの挙動が、地球内部の熱・物質輸送と地球進化過程に与えてきた影響を解明することを目指している。数値モデリングの対象は、(1) プレート沈み込み帯に焦点を当てた領域モデル、(2) 2次元及び3次元のグローバル・マントル対流モデリング、の二つに分けられる。(1) では、昨年度から地球深部に沈み込んだ水およびそれに伴う元素の挙動を追うために、マントルに由来する玄武岩質マグマの同位体組成解析を進めている。また沈み込むスラブによって地球深部に沈み込んだ水によって引き起こされるマントルウエッジの活動について、数値モデリングに基づく考察を行っている。(2) の研究では、マントルの進化過程について、本年度は海洋地殻のリサイクリングとマントルの進化の関わりを調べている。3次元球殻マントル対流のシミュレーションでは、今年度は球殻マントルでの対流パターンとスタグナントスラブの形成条件についてのこれまでのシミュレーション結果のまとめを行った。また本研究プロジェクトで開発した新しい3次元マントル対流コードによるシミュレーションによって、粘性の温度変化がある範囲にある場合、最も超波長の次数1のマントル対流パターンが卓越するという結果が示された。

### (1) プレート沈み込みに伴う水輸送とそれにともなう元素の挙動の研究

#### (1-A) 深部に沈み込んだ水とそれに伴う元素の挙動

この研究課題では深部に沈み込んだ水およびそれに伴う元素の挙動を追うために、マントル物質およびマントルに由来する玄武岩質マグマに記録された物質科学的証拠からの地球規模物質循環について制約条件を得るための研究を行っている。本年度は、昨年度までの研究に引き続き、地球深部に沈み込んだ水およびそれに伴う元素の挙動を追うために、マントルに由来する玄武岩質マグマの同位体組成解析を進めた。物質循環の「出口」である海嶺の玄武岩や海洋島玄武岩に、「入り口」としての沈み込み帯からの水およびそれに伴う成分のインプットが現れていないかを調べるために、まず全地球規模の地球化学データベースの構築を進めた。海洋玄武岩につい

て、5つないしは6つの同位体比 ( $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ ,  $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ ,  $^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ ,  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ ,  $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$  [および $^{177}\text{Hf}/^{176}\text{Hf}$ ]) が同時に測定されているデータセットを、GEOROCデータベース (<http://georoc.mpcg-gwdg.mainz.de/georoc/>)、PetDBデータベース (<http://www.petdb.org>) および最近の文献に基づき収集・吟味した。これらのデータベースの中には、明らかなタイプミス、変質によると考えられる異常値、年代効果による radiogenic ingrowth、Nd同位体比を算出する際の基準値に依存する見かけのバリエーションを示すデータなどが含まれていることが分かった。これらのデータは、文献を参照しながらできる限り排除した。また、海洋島玄武岩については、 $\text{SiO}_2$ と相関を示すトレンド、おそらくは地殻でのAFCプロセス (assimilation-fractional crystallization processes) に対応すると考えられるトレンドを示すものがあるため、 $\text{SiO}_2$ を35から53重量%のものに限ってデータセットに取り入れた。その結果、現在までに、海嶺玄武岩について2794データセット、海洋島玄武岩について1520データセット（いずれも5同位体データセット）が得られた。このデータベースにより、大西洋、インド洋、太平洋の広範囲がカバーされる。対象を現在活動中の海嶺に限ると西太平洋にデータが殆どなかったため、フィリピン海プレート内の活動については、およそ20Ma程度までさかのほる過去のspreading ridgeからのデータも取り入れてある。また、最近発見されたチスピット (Hirano et al., 2006, Science; Machida et al., 2009 (in revision)) のデータも含まれている。図1にデータセットの分布を示す。

この全地球規模のデータセットを、近年、情報科学分野で発達しつつある「独立成分分析」の概念と手法を用いて解析した。大西洋およびインド洋に広がる海嶺玄武岩 (MORB) と海洋島玄武岩 (OIB) の同位体組成空間からは、昨年度報告を行ったとおり、従来の手法では見出せていない新たな構造と2つの独立成分 (IC1とIC2) が見い出された (Iwamori and Albarede, 2008, G-cubed)。今回の全地球規模のデータベースについても、同様の2つの独立成分が見出され、この2つの成分が張る空間は、母集団分散の90%以上をカバーする (図2, Iwamori et al., 準備中)。この独立成分空間においては、

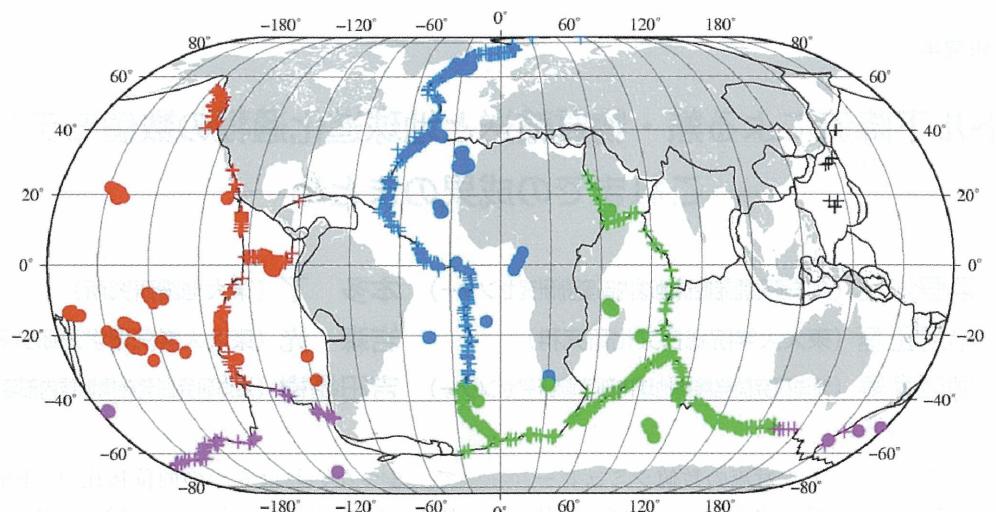


図1 海洋玄武岩（十印が海嶺玄武岩（及びその他）、●印が海洋島玄武岩）の同位体データの分布。地域ごとに色分けされている。

データ分布がhomogeneous joint distributionに近い構造をもち、マントルの同位体不均質が、数多くの「端成分」(DMM, EMI, EMII, FOZO, C, HIMUなど)の相互作用によって形成されているのではなく、2つの元素分別プロセスが相互にプロセッシングしあうことによって形成されていると解釈される。これらの2つのプロセスの実体は、独立成分の化学的性質を考慮した結果、溶融に伴う元素分別と、水溶液-岩石反応に伴う元素分別であることが推測される (Iwamori and Albarede, 2008)。前者はMORBとOIBを分ける主要な要素となっており、対流系の底部にメルトに富む成分が沈積し、しかし放射性元素に富むゆえに温度上昇し、プリュームとなって上昇、OIBをもたらすと解釈される。後者は、かつての沈み込みに伴う水溶液成分に汚染されたマントルに対応すると考えられ、地理的に大規模なドメインを形成すること、またコア-マントル境界付近あるいは下部マントルの地震波速度構造と対応関係があることがわかった。これらの解析結果に基づき、今後、マントルにおける物質循環様式の制約を試みる。「スタグナントスラブ」の5カ年間に、その原理から出発し、データベースの構築、解析へと進んだ本研究は、いわば「地球化学トモグラフィー」として新たな展開が期待される。(岩森)

#### (1-B) 沈みこむスラブから脱水された水の効果

トモグラフィーの結果は地球内部のダイナミクスについていろいろな推測や制限を与える。我々は、これまで東北日本の沈み込み帯のマントルウエッジで見られる低速度層のパターンを、沈み込むスラブから脱水された水によってマントルウエッジが低粘性となり、その結果生じた小規模対流を原因とすると言う仮説により検討してきた。

これまで行って来た沈み込み帯のモデルは、ほとんどがスラブをキネマティックに動かすというモデルであった。この点を改良すべく、本年度はスラブ上面および、プレ

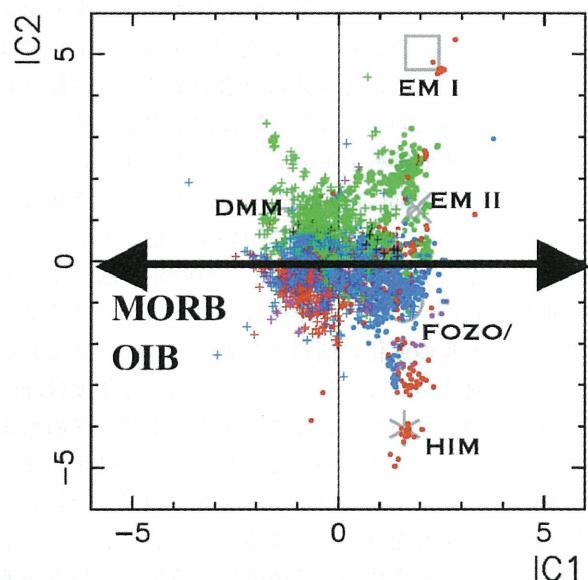


図2 地球規模の海洋玄武岩同位体データベースに見出された2つの独立成分 (IC1とIC2) 空間と、そこでのデータ分布図 (Iwamori et al., 準備中)。IC1は、OIBとMORBを明瞭に分け、IC2は地理的分布（色で区分：図1参照）を分ける。灰色な大きなシンボルはconventionalなマントル端成分を表す。

ート境界の近傍に速度を与え、その他の部分の流れはダイナミックに計算するというモデルを構築した（セミ・ダイナミックモデル）。このモデルでは観測からわかる、プレート速度（海溝の移動も含む）、および、スラブの大体の形状をモデルに組み込む事ができ、また、スラブのスタグナーションも再現できる。また、簡単な三次元モデルの計算も行え、スラブの周りの三次元流れ場の推定に使える。

上記のモデルを使い、これまで研究を行ってきた、マ

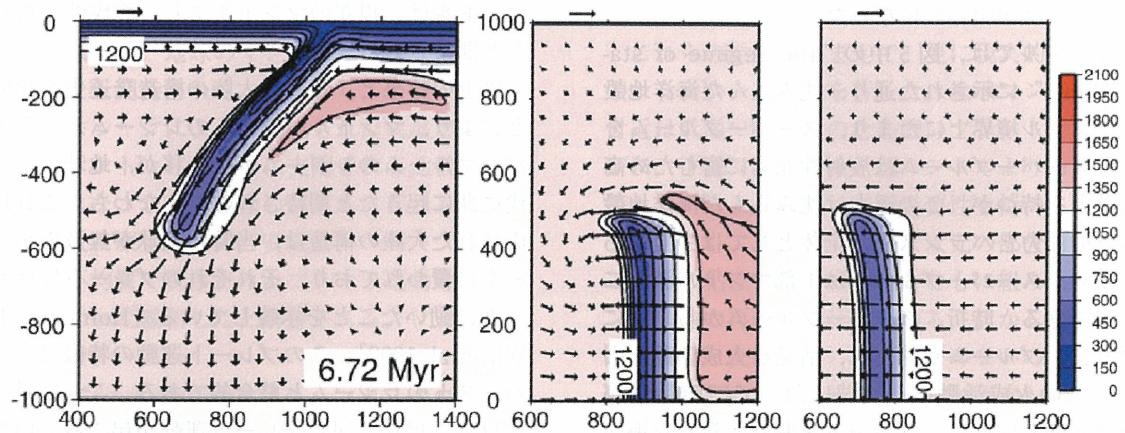


図3 上図は温度場と速度場を示す。スラブは領域の半分だけを占めている。左図は $y=250\text{km}$ の断面図を示しており、真ん中は $z=-200\text{km}$ （深さ $200\text{km}$ ）、右図は $z=-400\text{km}$ （深さ $400\text{km}$ ）の断面図を示している。

ントルウエッジ内に期待される小規模対流に海溝の移動が、どのような影響を与えるかを2次元モデルのシミュレーションで調べ、海溝の移動が、結果にほとんど影響を与えない事を明らかにした（Honda, 2008）。

一方、セミ・ダイナミックモデルを使用して、スラブエッジにおける流れ場を計算したところ、地震波異方性の研究から推定されている海溝に沿った流れは、海溝移動によって相対運動が、ほとんどまかわるような状態でないと実現されない事がわかった。また、海側のプレートの下に前年度考えたような熱い物（軽くて低粘性）がある場合は海溝に沿った流れが生じやすい事を示した（Honda, 2009：図3）。

二次元のセミ・ダイナミックなモデルを用いて、スラブのスタグネーションが、この高温異常に与える影響（高温異常が $410\text{km}$ 異常に停滞している時間）を調べたが、ほとんど影響はなさそうである事がわかった。これは、現象の時間スケールとスタグネーションしている時間との比によって決まっていると思われるが、トモグラフィーから推定されるスタグネーションの時間（～ $10\text{Myr}$ と推定）がスーパープルームが生じた時間（～ $100\text{Myr}$ ）に比較して小さいという考えに基づく。

上述の結果を含んで、図4に、本研究期間の5年間で得られた成果を簡単にまとめる。

基本的には日本周辺における沈み込み帯の様相を観測事実と照らし合わせながら一つのモデル（作業仮説）を築いた事であると考えている。本プロジェクトの前半においては、スラブが持ち込む水によってマントルウエッジの粘性が下がり、小規模対流が生じるというモデルを提案した。そのモデルによる温度異常と東北地方におけるトモグラフィーのパターンに類似関係がある事を示し、また、モデルの高温異常の時空間変化が東北地方に於ける火山分布のそれと似ている事も示した。つぎに斜め沈み込みをモデルに組み込む事により、伊豆－小笠原弧の雁行海山列の成因を議論し、それらが形成後の左横ずれ運動によって雁行配列になった事を示唆した。

プロジェクトの後半においては、沈み込みモデルの改

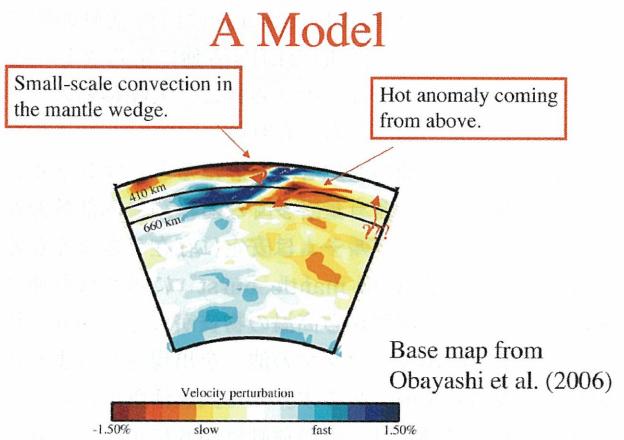


図4 本研究課題の成果に基づく日本周辺の沈み込み帯のモデル

良を行うとともに、海溝側プレートの下に見られる低速度層に着目した研究を行った。その結果、もし、低速度層の成因が温度によって支配されているとするなら、その高温異常は直接、下からきたのではなく水平方向から持ち込まれた高温異常が $410\text{km}$ の相変化面でトラップされているというモデルを提案した。その後、改良した沈み込み帯の三次元モデルを用いて、三次元的流れを推定し、海溝方向の地震波異方性と高温異常に何らかの関係がある可能性を示唆した。

このようなモデルを築く事により、将来の沈み込み帯の研究を発展させる上での一指針となる事が（本多）

## (2) グローバルマントル対流モデリングによる地 球大変動の起源の解明

### (2-A) 海洋地殻リサイクリングとマントルの進化

マントルの進化過程について、本年度は海洋地殻のリサイクリングとマントルの進化の関わりを調べている。プレート運動と火成活動を含むマントル対流の数値モデリングを行い、図5、6に示したように、マントルにリサイクルした海洋地殻が、マントルの内部構造のやその進化、プレートテクトニクスの進化に本質的に重要な役

割を果たしたことが明らかになった。

現在のマントルでは、図5中の“the regime of stable superplume”に示された通り、沈み込んだ海洋地殻はコア・マントル境界上にたまり、スーパープルームを形成する。スーパープルームは放射性元素に富むため高温で熱的浮力を持つが、この浮力は沈み込んだ海洋地殻の持つ組成的浮力をバランスし、全体としては中立である。このため、スーパープルームは下部マントル深部に安定に存在できる。時折、スーパープルームから、図に示したように、プルームが発生し、活発な火成活動を引き起こす。この火成活動は、地球においてLIPs活動が超大陸を割るのと同様に、プレートを割り、新たな海嶺を形成する。プレート運動は、図6に示したように、数十億年にわたって連続的に起こる。ただし、図5や図6(a)に示した間欠的な火成活動による海嶺形成のため、プレートのコンフィギュレーションはLIPs活動の際に大きく変わる。この間欠的なLIPs活動によるプレートのコンフィギュレーションの揺らぎは、大陸移動のウイルソンサイクルの起源と考えられる。

これに対し、地球の歴史をさかのぼると、マントルにおける放射性元素の含有量が多くなるため、内部熱源が強くなり、スーパープルームは安定に存在できなくなる。図5の“the regime of mantle burst”に示された通り、頻繁に、マントル深部から高温の物質がわき上がり（以下バーストと呼ぶ）、「マグマの池」を出現させるような激しい火成活動を引き起こす。この火成活動のため、プレートは頻繁に割られ、その運動は図6に示した通りカオティックになる。また、このカオティックなプレート運動とバーストによるマントルの攪拌と、スーパープルームそのものの不安定性のため、このレジームにおける

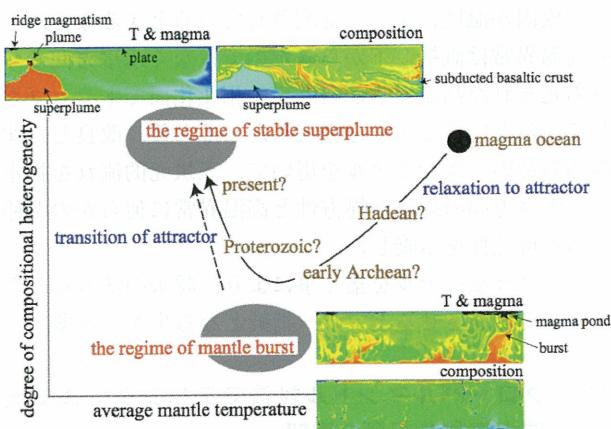


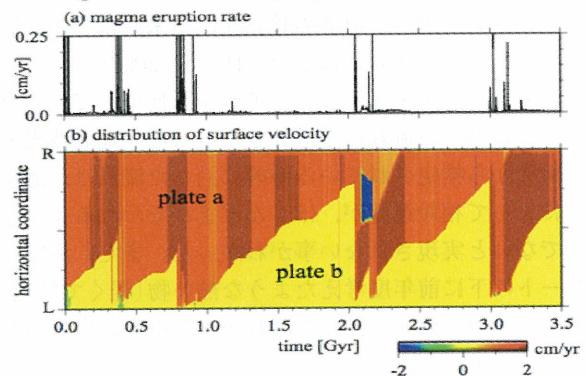
図5 地球のマントル進化の概念図。地球の熱化学的状態は、マントルバーストのレジームから安定なスーパープルームのレジームへのアトラクターの相転移と、マグマオーシャンによって形成される高温で化学分化した状態からのアトラクターへの緩和という二つのメカニズムによって起こったと考えられる。

マントルは、現在のマントルより、組成的に均質であったと期待される。

以上の結果と、地球の大陸の構造発達史を比較することにより、マントルバーストのレジームから安定なスーパープルームのレジームへの転移が、地球の中で、太古代後期に起きたと期待される。すなわち、これ以前に形成された大陸の構造は、当時の地球が無数の小さなプレートに覆われており、それぞれのプレート片はカオティックに動いたことを示唆している [Hofmann, 1989; de Wit et al, 1992]。このプレート運動の特徴は、マントルバーストのレジームと整合的である。これに対し、原生代以降、現在と同じプレート運動が起こっていたことが推測されており [Hofmann, 1988]、この時期、地球は

### Plate tectonics:

#### on the regime of stable superplume



#### on the regime of mantle burst

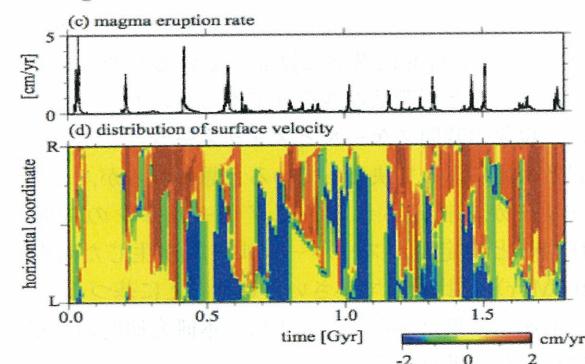


図6 図5に示したそれぞれのレジームにおけるプレートテクトニクスの特徴。色は、プレート速度を表す。図(b), (d)中、各時刻における垂直な線分は、図5のスナップショットに示した矩形領域の上辺に対応し、R, Lはそれぞれ、矩形領域の右上の角、左上の角に対応する。赤い領域では、プレートは角Rの方向に右向きに、青い領域では、プレートは角Lの方向に左向きに動いたことを意味する。(a), (b)で示したスーパープルームが安定なレジームではプレート運動は秩序だっているが、(c), (d)で示したように、マントルバーストが起きるとプレート運動はカオティックになることがわかる。

安定なスーパープルームのレジームに入ったと考えられる。以上の結果から、地球のマントルは、図5に示したように進化したと期待される。すなわち、まず、マントルはマグマオーシャンによって形成された高温で不均質な状態から、マントルバーストに支配される比較的均質でカオティックなプレート運動の起こるレジームに向かって緩和し、次に原生代以降、安定なスーパープルームに支配される不均質で秩序だったプレート運動の起こるレジームに向かって緩和したと期待される。(小河)

#### (2-B) 球殻マントルでの対流パターンとスタグナントスラブの形成

沈み込んだスラブが滞留するため重要な要因は、マントルの660kmの深さに相当するスピネルからペロブスカイトへの相転移であろうと考えられてきた。この相転移のクラウジウス・クラペイロン勾配は負であり、垂直方向の熱対流運動を妨げる働きを持つ。しかし、近年の高圧実験の結果から、この負の勾配は従来考えられていたほど急なものでないことが確立された。ドライな条件では $-0.5 \sim -2 \text{ MPa/K}$ 程度とされている。また、水を含んだ状態の実験では $-2 \text{ MPa/K}$ より急な勾配となる。一方、地震波の解析から $-2 \sim -3.5 \text{ MPa/K}$ という値が出されていて、これはマントル遷移層がある程度の水を含むことを示唆すると思われる。このようなクラペイロン勾配の値がマントルの全球的な流れにどのような影響を持つか、ということを我々は地球シミュレータの能力を活用して広いパラメータ範囲において系統的に調査した。従来の想定よりも緩い勾配がスタグナントスラブの形成に寄与するか、というのが着目点である。

シミュレーションの結果から、マントルの粘性を表すレイリー数を横軸に、クラペイロン勾配の値を縦軸にとって、実現されたパターンを3つに分類したプロットが図7である。ここに示した結果はいずれも、三次元球殻、内部加熱と下部加熱、マントルの粘性一様、660km以外の相転移なし、の場合である。ゼロに近い緩やかな勾配では、相転移は流れを妨げる効果を示さず全層の対流が実現するのに対して、急な勾配では上下マントルの物質交換が完全に妨げられて二層対流となる。この中間のIntermittentとした領域では中途半端に妨げの効果があり、下降流や上昇流が上下マントル境界で一時的に滞留するのが見られる。レイリー数が高い(つまり粘性が低い)ほど、この形態遷移が起こるクラペイロン勾配の値は緩やかとなる。図の縦軸には高圧実験および地震波解析から決められたクラペイロン勾配の範囲を、また、横軸にはマントルの粘性から想定される地球のレイリー数の範囲を示してある。これらの比較から、 $-0.5 \sim -1 \text{ MPa/K}$ 程度のクラペイロン勾配では滞留は起こせないが、 $-2 \sim -3 \text{ MPa/K}$ ではある程度の妨げ効果があることが分かる。ただし、この範囲でも全層対流の領域からそれほど離れていない、滞留は局所的であり実際のトモグラフィーで見られるような大規模なスタグナント

構造を形成するのは困難である。

これらの結果を踏まえて、更に現実的なマントル対流のシミュレーションを行った。地球マントルでは、表面付近は低温で高粘性のため固いプレートとなること、並びに、下部マントルは上部マントルよりも大きな粘性を持っていること、の二点が重要性を持つ。本プロジェクトの中でも二次元モデルや三次元の部分領域モデルでは、これらの粘性変化を相転移とともに組み込んでスタグナント構造の再現に成功している。しかし側面の境界条件が流れ場を支配している面が否めないので、側面のない球殻形状でのシミュレーションが望ましい。ここではグローバルな振る舞いに寄与の大きいと考えられる粘性の層構造を導入し、相転移との相乗効果について調べた。層構造として、リソスフェアに相当する表面の高粘性部分、低粘性の上部マントル、そして40倍大きな粘性を持つ下部マントル、を設定し、粘性の温度依存性も組み込む。さらに、降伏応力を設定して変形しやすい領域が自発的に生成されるようにした。これにより表面が複数の変形しにくい領域に分割され、その境界部分から沈み込むというプレート的な挙動が実現される。基本となる粘性層構造と降伏応力の値を同じにして、相転移の有無によりどのような違いが出るかを調べた。相転移ありの場合にはクラペイロン勾配として410kmに $+2.5 \text{ MPa/K}$ 、660kmに $-2.5 \text{ MPa/K}$ という地震波解析の結果と調和的な値を用いた。図8にその有無の比較を温度のパターンで示す。表面でのパターンの特徴的な大きさには差が見られないが、時間変化や垂直断面には顕著な違いが見られる。相転移なしの場合は、上下マントルは基本的に連結したパターンをとり、滞留はあまり見られない。全球的なパターンの時間変化は粘性が高くて流れの遅い下部

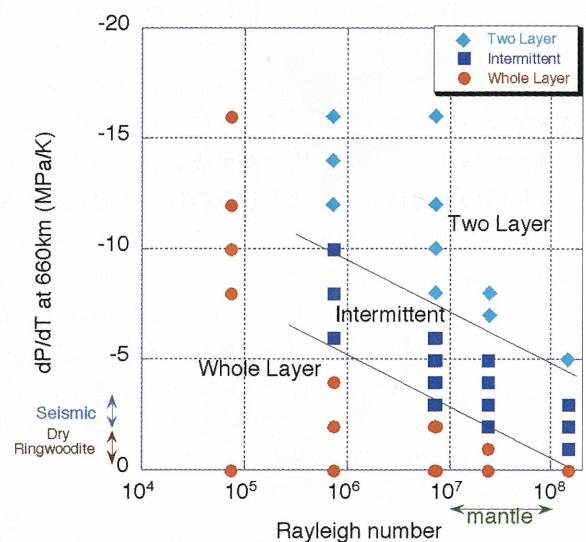


図7 一様な粘性を持つ球殻マントルでの、660km相転移のクラペイロン勾配と対流パターンとの関係。高圧実験あるいは地震波解析によるクラペイロン勾配の値は、現実のスタグナントスラブを相転移のみで説明するのは困難であることを示している。

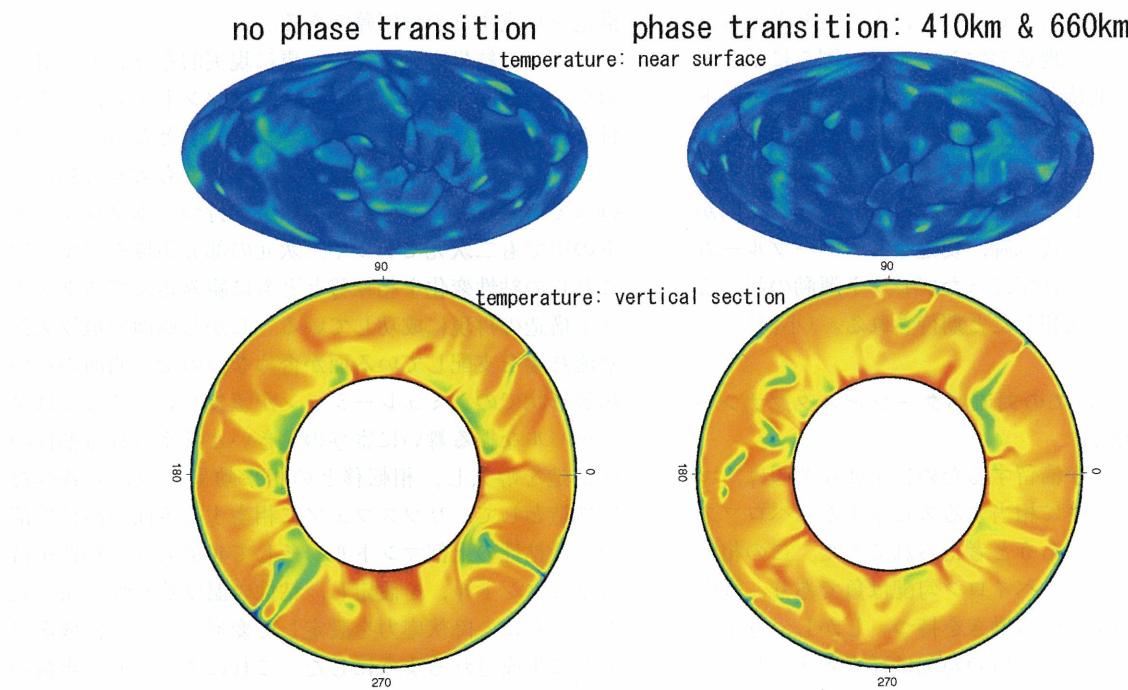


図8：表面でのプレート的な挙動と粘性の層構造を組み込んだマントルでの相転移の有無の比較。(左) 相転移なし。(右) 相転移あり：クラペイロン勾配が、410kmは+2.5MPa/K, 660kmは-2.5MPa/K。三次元球殻での計算の、(上) 表面付近、(下) 子午線断面、で温度場をカラースケールで表したもの。表面のパターンの特徴的な大きさにはあまり差がないが、子午線断面では大きな差が見られる。相転移なしの場合、上下マントルのパターンは連結性が強く、スタグナント構造はほとんど存在しない。相転移ありの場合、上下マントルの流れの連結性が弱く、海溝後退に伴って大規模なスタグナント構造が形成されている。

マントルの時間スケールに対応したものである。一方、相転移ありの場合は、上下マントルの境において大規模な滞留が見られ、上下のパターンの連結性は弱い。これは上下マントルがそれぞれの時間スケールで運動するためである。そして、660kmでの相転移の妨げ効果により滞ったスラブが下部マントルのゆっくりとした流れのため位置を変えないうちに、上部マントルのパターンが短い時間スケールで変化していくことにより、場所によっては横たわるスラブという構造が生成されている。このような場所の表面付近では沈み込みの位置の変化、つまり海溝後退に相当する現象が起こっている。図に見られるように、滞留した部分はその後下部マントルのゆっくりとした時間スケールで落下していく。実際の地球でもこのように、負のクラペイロン勾配による若干の妨げ効果と、下部マントルでの粘性増大の両者がうまく調和して、スタグナントスラブが出来ては崩落していく、と考えられる。(柳澤)

#### (2-C) 三次元球殻内マントル対流の次数1・次数2パターン

ほとんどのグローバルトモグラフィーモデルで示されているように、現在の地球のマントル対流は660km相転移面で流れが一時的に遮られているものの、その温度構造は南太平洋下とアフリカ下の大規模上昇流に特徴付け

られる次数2パターンが卓越している。しかしながら、過去に遡ったマントルにおいても次数2パターンが卓越していたかどうか、あるいはさらに長波長の次数1が卓越する対流パターンが存在していたかどうかは明らかになっていない。

これまでの三次元球殻モデルを用いたマントル対流シミュレーションから、現実のレイリー数 ( $O(10^6) \sim O(10^7)$ ) の条件下で一様粘性率を仮定した場合、現在のマントル対流パターンに近い次数2パターン（二つの円筒状の上昇流とそれらを囲むシート上の下降流）が発生しやすいことが知られているが、相転移や上部・下部マントルの粘性率比など複雑なマントルの物性を考慮しても、次数1が卓越する対流パターンが発生しないことも分かっている。しかし最近の研究で、ブジネスク近似の条件下で粘性率の温度依存性の程度がある範囲内では、マントルの内部熱源を考慮しない場合 (Yoshida and Kageyama, 2006, JGR), 考慮した場合 (例えば, McNamara and Zhong, 2005, GRL) に関わらず、次数1パターン（つまり、マントル対流が一つの円筒状の下降流に支配され、その対蹠点付近で上昇流が集中的に発達するパターン）が発生することが分かった。この次数1パターンは、ゆっくりとした動きの高粘性の下降流によって支配されるために時間的に非常に安定で、自発的に他のパターンに遷移することはない。つまり、次数1

パターンは三次元球殻内対流の基本構造の一つであると考えられる。

そこで本年度は、より詳細に三次元球殻内対流の基本構造を調べるために、レイリー数が $10^7$ の条件下で、より現実的なアレニウス型のレオロジーの式を用いて粘性率比を系統的に変化させた計算を行った。内部熱源は、下部加熱のみの場合と、下部加熱と内部熱源の両方を考慮した場合の計算を行った。エネルギー方程式には、粘性散逸と断熱圧縮による発熱を考慮した（いわゆる拡張ブジネスク近似）。いずれの計算も平均温度、熱流量、RMS速度が平衡になるまで計算した。計算には有限体積法に基づく三次元球殻内マントル対流数値計算コードConvGS (Yoshida, 2008, G-cubed) を用いた。

図9は、ブジネスク近似下での対流パターンの結果 (Yoshida, 2008, GRL) である。内部熱源の有無に関わらず共通して言えることは、(1) マントルの上面と下面の粘性率比が $10^3\sim10^4$ 程度のときに次数1パターンが発生する（図9a），(2) 一様粘性率パターンと次数1パターンの間の限られた粘性率比（内部熱源なしの場合、 $10^2$ 程度）において、“逆”次数2パターン（つまり、現在のマントルとは逆で二つの円筒状の高粘性下降流に支配されるパターン）が現れる（図1b）ことである。拡張ブジネスク近似下においては、粘性散逸による発熱が低温・高粘性の熱境界層の下部を不安定にさせるために対流パターンを短波長構造にさせるが、熱源が下部加熱のみ、あるいは下部加熱の程度が強い場合には、やはり次数1パターンと“逆”次数2パターンが発生するようである。

それでは、現在の次数2のマントル対流パターンを再現させる要因は何か？Zhong et al. (2007, PEPI) は、内部加熱を考慮した次数1パターンモデルで、円筒状の下降流の真上に円形の「超大陸」（高粘性のリッド）を置いた場合に、超大陸縁辺に設定した低粘性帯から沈み込みが発生し、マントル対流が次数2パターンに変化すると主張した。過去の研究 (Yoshida et al., 1999, GRL; Phillips and Bunge, 2005, EPSL) で行われた低粘性帯を持たない超大陸モデルの計算と比較すると、超大陸縁辺の低粘性帯は新しい沈み込み帯の発生とそれに伴うマントル対流パターンの変化に重要ならしい。

一方、本研究 (Yoshida, 2008, GRL) では、次数1パターンモデルに「降伏応力」を模したレオロジーを考慮した計算を行った。こ

こでは内部熱源は考慮していない。降伏応力が比較的高い100MPaと設定した場合では、上昇・下降流の直上付近でのリソスフェアの破壊に止まって、マントル対流は次数1パターンが維持される。しかし降伏応力を50MPaとした場合ではリソスフェアの破壊が進行し、実際の環太平洋のような地球を横断する「沈み込み帯」とそれに伴うシート状の下降流が発生することが分かった（図9c, d）。この「環太平洋型沈み込み帯」の位置は地質学的時間スケールにわたって非常に安定で、同様の対流パターンは内部熱源や410km・660km相転移を考慮したモデルでも発生する。

これらの数値計算結果から、現在の次数2のマントル対流パターンはマントル対流が持つ本来の基本構造ではなく、マントル表面を長期間漂う超大陸の存在によるものか、もしくは、継続的なプレートの運動・沈み込みによって生成されていると推定できる。本研究で得られた「環太平洋型沈み込み帯」の時間的安定性は、少なくとも過去4億年間で環太平洋の沈み込み帯の位置がほとんど変化していないという地質学的結果（例えば、Collins, 2003, EPSL）と調和的である。大陸やプレート運動がない場合の三次元球殻内対流の基本構造と推定される次数1パターンと“逆”次数2パターンが、大陸が最も離散した時代でのマントル対流パターンであるかどうかを解明するためには、今後さらなる詳細なパラメータ・スタディと併せて、大陸の離合集散を考慮したモデル計算を実行する必要がある。（吉田）

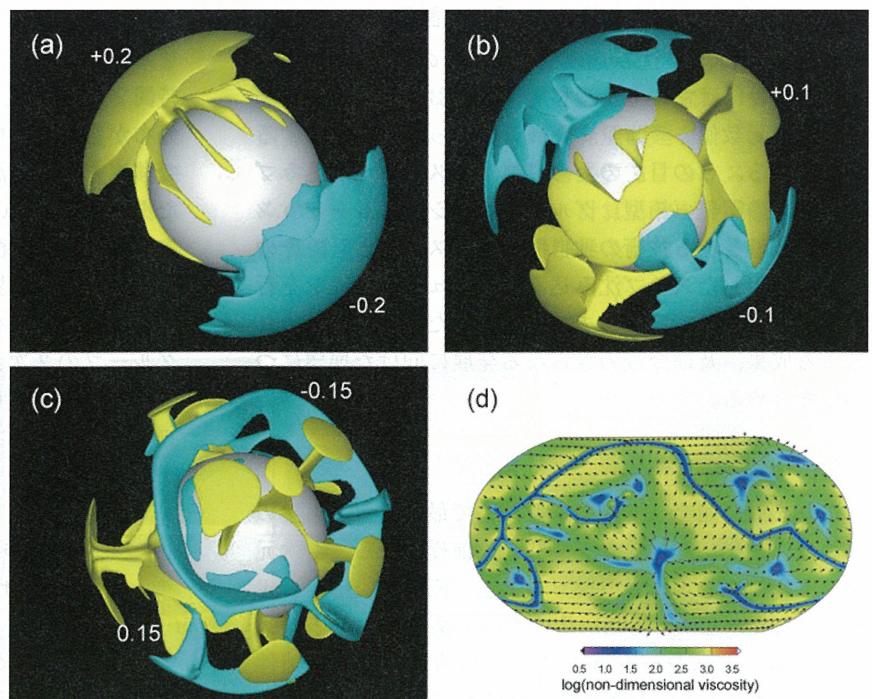


図9 (a) 次数1パターンと (b) “逆”次数2パターンの温度場。(c, d) マントルの上面に降伏応力を考慮した場合（温度依存性による粘性率比は $10^3$ ）の温度場と地表面の粘性率分布。温度場の黄色の等値面は周囲のマントルより高温の領域、青色の等値面は低温の領域を表す。

## 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 — 今年度の成果とこれまで5年間の成果 —

吉岡 祥一（九州大学大学院理学研究院）  
鈴木 厚（九州大学大学院数理学研究院）

中久喜伴益（広島大学大学院理学研究科）  
亀山 真典（愛媛大学地球深部ダイナミクス研究センター）

本計画研究では、深さ660kmの相転移境界付近でのスラブの形成・崩壊過程の物理メカニズムを数値シミュレーションによって解明することを目指した研究を行ってきた。3次元モデルでは、3次元スラブ沈み込みモデルの開発グループにより、マントル遷移層付近におけるスラブの振る舞いを支配する普遍的な要因を3次元数値シミュレーションによって明らかにすることを目的とし、沈み込んだスラブの挙動や滞留スラブの3次元的な特徴を理解し、再現することを第一の研究目標に設定して研究を進めてきた。一方、2次元モデルの数値シミュレーションでは、スラブ滞留の物理メカニズムの描像が定量的に描けるようになり、崩落過程の物理メカニズムの解明やレオロジーを反映したより現実的なモデルの構築を行える段階に達しつつある。以下、各研究グループの今年度の成果とこれまで5年間の成果について具体的に述べる。

### 1. 3次元スラブ沈み込みモデルの開発

#### 1-1. 3次元スラブ沈み込みプログラムの開発（箱型）

我々の目的はマントル遷移層付近における下降流の挙動を3次元数値シミュレーションによって明らかにすることである。この目的のために3次元スラブ沈み込みプログラムの開発（箱型）グループは、シミュレーション研究の基盤となる技術の独自開発からスタートし、その成果を活用したスラブ沈み込みのシミュレーションを行ってきた。本稿ではこれまでに開発した基盤技術とそれによる成果、及び今後のさらなる発展に向けた展望についてまとめる。

##### 1-1-1. 基盤技術開発

これまでに開発してきた基盤技術で最も重要なものの1つは、シミュレーション研究の大前提となる、3次元マントル対流シミュレーション手法（Kameyama et al., 2005; Kameyama, 2005）そのものである。マントル対流の数値シミュレーションでは、高粘性かつ非圧縮性（あるいは非弾性）の流体の定常流れ場を各時間ステップで求める部分が計算時間の9割以上を占めている。加えて、マントル物質の粘性率は温度・圧力・鉱物の結晶粒径などによって空間的に大きく変化することから、その定常流れ場を解くための方程式は大変性質の悪いもの

となってしまう。そこで我々は、マントル対流の流れ場を高速かつ精度よく計算する頑健な数値解法を新しく考案することでこの問題を克服した。新しい数値解法は、多重格子法に擬似圧縮性法と局所時間刻み法を組み合わせた反復解法であり、運動量と質量の保存則を同時に満たす速度場と圧力場を逐次的に求めしていく。さらにこの方法をクリロフ部分空間法と併用することにより、粘性率の空間変化がある場合の反復計算の頑健さや収束速度をある程度向上できることも示した。なおこの手法は本研究のモデルの他に、ポストペロブスカイト相転移を考慮した大規模3次元箱型マントル対流シミュレーション（Kameyama and Yuen, 2006）や3次元球殻内対流モデル（Kameyama et al., 2008）にも既に適用されている。

我々の開発したもう1つの重要な基盤技術は、物質の移流を高精度に追跡する数値解法（Furuichi et al., 2008）である。スラブの沈み込み現象をモデル化するにあたり、物質の違いによる性質の違い（例えば鉱物種・降伏する「海洋地殻」と降伏しない「海洋プレート内部」など）を考慮することは極めて重要である。加えて沈み込みの時間発展を扱う上では、流れの時間発展に伴って物質の分布が変化する様子を正確に追跡する必要がある。そこで移流方程式の高精度な数値解法を設計・構築した。新たな方法はCIP-CSLR法（Nakamura et al., 2001）を基本とし、その特徴の1つである完全な保存性に加え、シャープな物質界面の形状もより正確に移流できるように改良を加えたものである。この優れた特徴により、本グループの2次元モデル研究で用いられているCIP(0)法と比べて、より粗い空間解像度でも十分な精度での物質輸送が可能であることが確認できた（Furuichi et al., 2009）。

##### 1-1-2. 滞留スラブを再現する3次元数値シミュレーションに向けて

3次元数値シミュレーションの基盤技術の熟成を受けて、滞留スラブの再現に有効と期待される様々なメカニズムを取り込んだ3次元数値シミュレーションの構築を進めてきた。以下では特に今年度実施したシミュレーション研究の成果についてまとめる。

ここで考える数値モデルの特徴は、プレートの沈み込みと海溝後退を計算領域の境界に沿って強制的に与えて

いることである。多重格子法を用いる都合上、計算領域内部に特異な構造（例えば2次元沈み込みモデルで用いられてきた、スラブをマントル遷移層まで誘導する「流路」など）を人為的に導入することが困難であるが、その反面、3次元計算が高速に実施できるという利点を最大限活かすことができる。数値シミュレーションモデルとして、深さ1320km、縦横比6:1の矩形領域をとり、ブシネスク近似のもとでの熱対流を考える。マントル遷移層を特徴づける2つの相転移として、上面境界から深さ410km及び660kmの位置にそれぞれオリビンスピネル及びポストスピネル相転移を模した相転移を導入する。ただし相転移に伴う潜熱の出入りの効果は無視している。マントル物質の粘性は温度と深さに依存するものとし、加えて深さ660km境界における粘性率ジャンプも考慮している。計算領域のほぼ左半分を海側、残りを陸側とし、この両者の上面境界に異なった速度を与えることでプレートの沈み込みを駆動する。海側での温度の初期条件は、右方向に一定速度で動く半無限体の冷却モデルにより与える。また海洋プレートの上面には降伏可能な「潤滑剤」の薄い層を設け、プレート境界でのすべりの食い違いがスムーズに起こるようにしてある。この物質は海洋性地殻を模したもので、海洋プレートの沈み込みに伴って移流するものとした。海溝後退の効果は、van Hunen et al. (2000) の手法を3次元に拡張することによりモデル化した。この方法の要点は、静止しているマントル深部（下面境界）に対して大陸プレートが海溝後退に対応する速度で左側（海向き）に動いていると考えることにある。これに伴って大陸下の右側壁上に非零な水平方向速度が発生するが、その分布は十分発達した1次元チャネル流の仮定により求めることが可能である。これにより求まった右側壁での水平方向速度分布は、領域全体の流れ場を解く際の速度境界条件の役割も果たす。

ここでは海洋プレートの沈み込み速度に加え、(a) 海溝後退速度、及び660km不連続面での上部マントルと下部マントルとの間の (b) 粘性ジャンプと (c) 相転移

による密度ジャンプ量、の値を変化させて計算を行った。計算結果を図1に示す。(a)～(c)の効果はいずれもスラブをマントル遷移層に滞留させる傾向を持つものの、その中でも(a)の効果がとりわけ大きいことがわかった。具体的には、海溝後退速度が十分大きい場合には、660km不連続面での粘性ジャンプ・密度ジャンプの値に関わらず滞留スラブが形成される。また海溝後退の効果が小さい場合には、(c)相転移による浮力の効果が660km付近で横たわるスラブの形成に重要であることもわかった。これらの結果は本グループの2次元モデル研究で得られた結果と概ね調和的である。

ここで示した研究は、3次元シミュレーションプログラムを2次元モデルに縮小して行ったものであるが、過去に行われた2次元モデルによる研究の単なる焼き直しではないことを最後に強調しておきたい。その理由は、同様の2次元モデルと比べて、3次元モデルへの拡張が可能な数値手法を使っているという決定的な違いがあるからである。本研究で2次元モデルによる成果と調和的な結果が得られたということは、3次元モデルがスラブ沈み込みに関する重要なメカニズムを十分取り入れることができた証であろう。それゆえこの成果を、スラブダイナミクスの高度3次元数値シミュレーションに向けての重要な足掛かりとなるものと考える。

## 1-2. 3次元問題へ拡張可能な2次元スラブ沈み込みモデルの構築

マントル対流は球殻領域の中で起きているものであり、数値シミュレーションモデルも球殻形状を扱えるものであることが望ましい。これまで、デカルト座標系で3次元の任意の形状の領域を取り扱うことのできる有限要素法計算コードの開発を行ってきた。3次元計算は膨大な演算を必要とするため、時間発展問題をシミュレーションするためには相当の時間を必要とする。スラブ沈み込みのシミュレーションでは、計算モデルの構築のために、計算領域を制限するための境界条件や沈み込みの境界条件

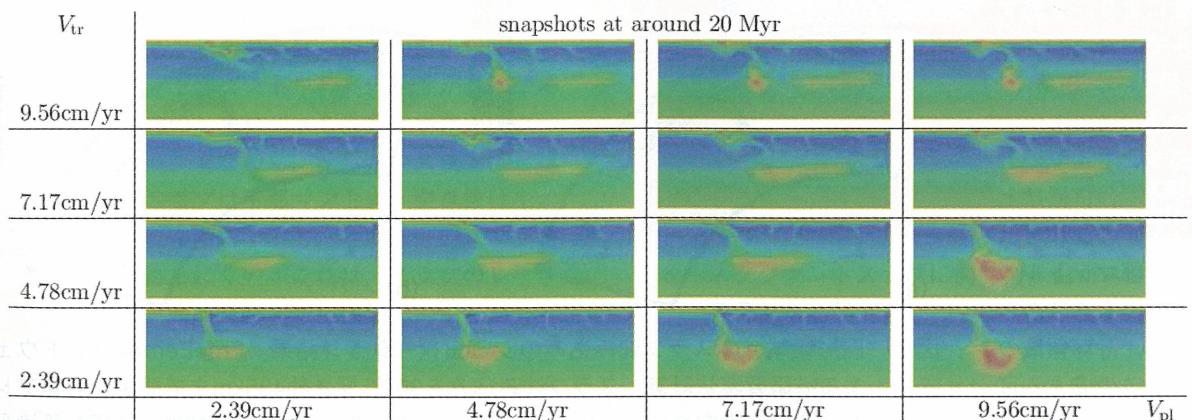


図1 海溝後退の効果を取り入れたシミュレーションの結果の一例。沈み込みプレートの速度 $V_{pl}$ と海溝後退の速度 $V_{tr}$ を変えた計算で得られた、沈み込み開始から約2千万年後の流れ場のスナップショット。図は粘性率の分布を示し、赤に近いほど粘性が高く、青に近いほど粘性が低いことを表す。図は加藤悠祐氏による。

件の設定など検討すべき項目が多い。そのため、まず2次元モデルにおいて計算モデルを構築することを目的とした。2次元での計算においても流体の非圧縮性は流速と圧力の未知変数を直接取り扱う混合法による計算手法を採用した。

スラブの沈み込みを人為的に与えるモデルを採用し、スラブ先端の660km相転移相境界付近での運動をシミュレーションした。3次元モデルへの拡張のしやすさを考慮して、スラブの沈み込みの形状のみを人工的に設定するモデルを構築した。スラブ上面での速度は海洋プレートの動きに整合し、大陸側のプレートは移動しないと仮定するため、海溝付近で特異性が生じてしまう。このため、海溝付近である深さまでスラブ部分と大陸部分の間にスリットを入れ、粘性流体を分離することで、特異性を回避することにした。スリットの終端からスラブ先端にかけては、流体がスラブに沿ってのみ移動するという滑り境界条件を与えており（図2）。スラブのスリット部分では、その上部と下部は二重に未知変数を保持しており、それぞれの流れがスリットをまたがないように滑り境界条件を与えている。また熱輸送に関しては断熱境界条件を設定している。スリットは滑り境界条件の取り扱いを簡単にするため直線的な形状を採用したが、曲線形状に拡張することもできる。計算領域を設定するための左右の壁面の境界条件は流速に関しては応力フリー、温度に関しては断熱条件を設定した。スリットは沈み込み角30°とし、深さ660kmに相転移境界を設定している。

扇型の領域でのテスト計算をおこなった。スラブの滞留とその後の崩落での温度分布を図3に示す。海洋プレートの人工的な沈み込みによりスラブはスリットに沿って流れ、相転移面の上下での粘性ジャンプとクラペイロン勾配の効果により滞留する。この際下部マントル部分ではスラブ直下からのブルームが相転移面の下部で左右に分かれる対流が観察される。上部マントルでのスラブはこの対流との力学的結合の効果も加わって滞留しているとみられる。時間が進むと相転移面での不安定性により、下部マントルでの対流パターンに沿って崩落しCMBへ落下していく。

下部マントルでの上昇ブルームの位置は上部マントルの流れとは独立に下部マントルの対流セルの大きさから決定され、計算領域のほぼ中央に生成する可能性がある。計算領域での海洋プレートと大陸プレートの構成比を変更し、スラブ沈み込

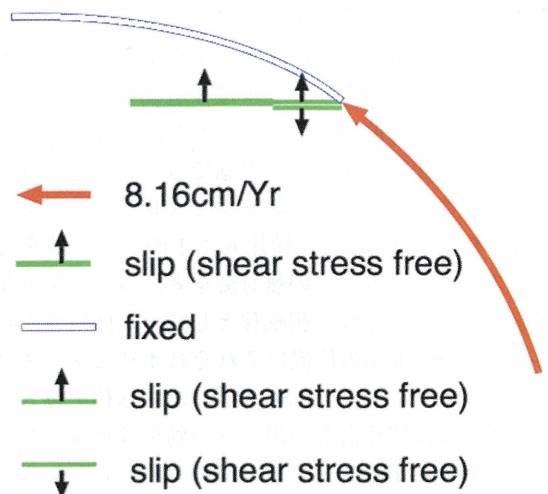


図2 扇形領域でのスラブ沈み込みのシミュレーションのための、スラブ付近の境界条件の設定。

みの位置を計算領域の中心からずらしたモデルで同様の計算を行った（図4, 5）。いずれの場合も上昇ブルームはスラブ沈み込みの直下に現れている。スラブの滞留と崩落過程にはクラペイロン勾配と粘性ジャンプに加えて上部と下部マントルの対流の相互作用が影響を与えているように考えられる。

海溝の後退も滞留を引き起こす要因と考えられる。後退する海溝に沿った座標系から見ることによるシミュレーションを実施しているが、流れ成分から座標変換に伴う剛体運動成分を調整するのみでは、人工的に設定したスリットに生じる応力を解消することができない。座標系を固定して、海溝の後退を実現するためには、海溝後退に伴うスリットの移動を追いかけるためにメッシュを再構成する必要があるが、現実的ではない。移動するスリット部分での流れ場を表現する境界条件を正確に設定する必要がある。

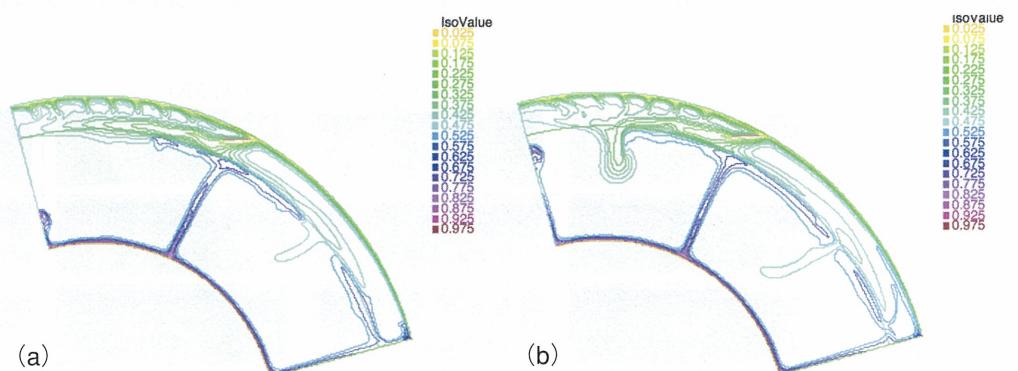


図3 扇形領域でのスラブ沈み込みのシミュレーション結果。FreeFem++ソフトウェアによる有限要素法計算。スラブ沈み込みを30°、深さ約435kmまで設定。海洋プレートとスラブは左向きに8.16cm/yrの速度を設定。 $Ra=5\times 10^6$ 、660kmに相転移境界を設定。相転移境界の厚さを29kmとし、上部マントルと下部マントルに20倍の粘性ジャンプを導入。クラペイロン勾配は-2.0395MPa/Kに設定。初期温度は無次元温度で地表面を0にCMBを1に、その他の領域を0.5と与えた。

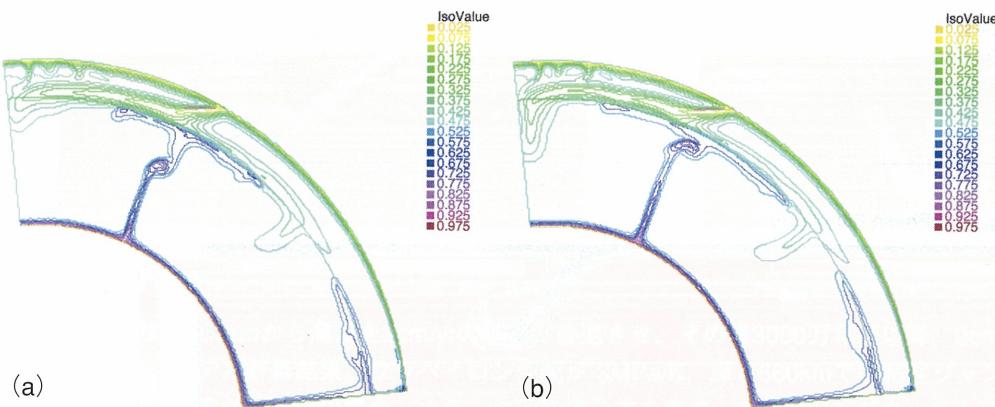


図4 スリットの設定位置の下部マントル対流に与える影響を確認するために、海洋プレートと大陸プレートの構成比を変更し、スラブ沈み込み位置を計算領域の左寄りに設定した数値計算。沈み込み位置以外の計算パラメターは図3, 5と共に。

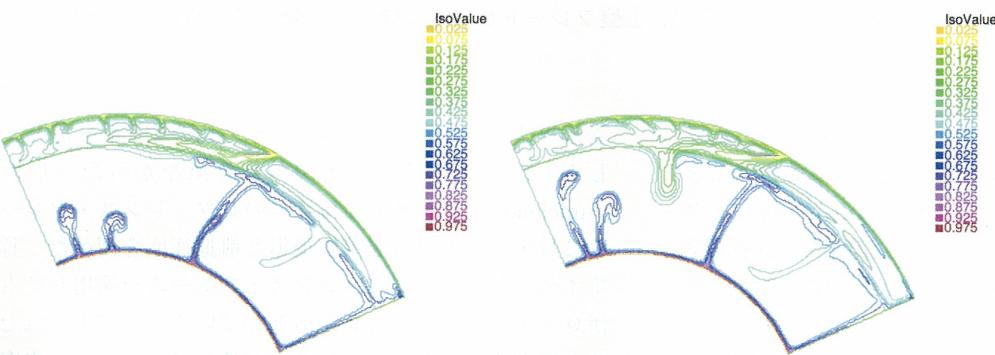


図5 スラブ沈み込み位置を計算領域の右寄りに設定した数値計算。沈み込み位置以外の計算パラメターは図3, 4と共に。

## 2. 2次元高度スラブ沈み込みモデルの構築

### 2-1. スタグナントスラブ形成と崩落のメカニズム

自発的沈み込みモデル (Nakakuki et al., 2008) を用いてスラブの滞留と崩落のメカニズムを明らかにすることを目標に研究を行ってきた。昨年まで広いパラメーター空間で行ったシミュレーションから、様々な構造を持つスラブが形成される可能性を示した。これらは、図6のような力がスラブに働いているとすると説明可能である。まず、高い粘性を持つスラブの滞留には、スラブの負の浮力を打ち消す効果が重要であり、海溝が自由に移動できること、または、下部マントルの高い粘性が必要である。同時に、スラブのレオロジーも滞留と崩落を制御していると考えられる。すなわち、軟らかいスラブほど滞留しやすく、硬いスラブは下部マントルへ突き抜けやすい。反対に、いったん滞留すると、今度は硬いスラブほど下部マントルへ崩落しにくい。これは、スラブのレイリー・ティラー不安定の成長時間が粘性に比例するためである。スラブが硬いにもかかわらず下部マントルへ崩落するのはクラペイロンスロープが0に近く、スラブが水平になり、その硬さのために変形できず、ゆっくり落下する場合である。

スタグナントスラブが形成され、崩落するメカニズムを明らかにすることが出来たが、これまで使用してきた

モデルには次のような欠点があった。それは、海溝の移動速度が速すぎること、下部マントルにスラブが突入すると沈み込むプレートの運動速度が遅くなりすぎること、プレート境界の形状が硬いリソスフェアに固定されてプレートが自由に沈み込み角を変えられないこと、の3点である。本年度は、より定量的な理解を目指して、これらの点についてモデルの改良を行った。主な改良点は、プレート境界の扱いの改良、プレート下にアセノスフェアの導入、沈み込み帯に低粘性ウェッジおよび低強度リソスフェアの導入、物質の組成を100%オリビンから60%オリビンとした点、である。このようなモデルを用いて、スラブ

の粘性率がスタグナントスラブの様式やプレート運動速度に与える影響を定量的に調べた。計算例を図7に示す。

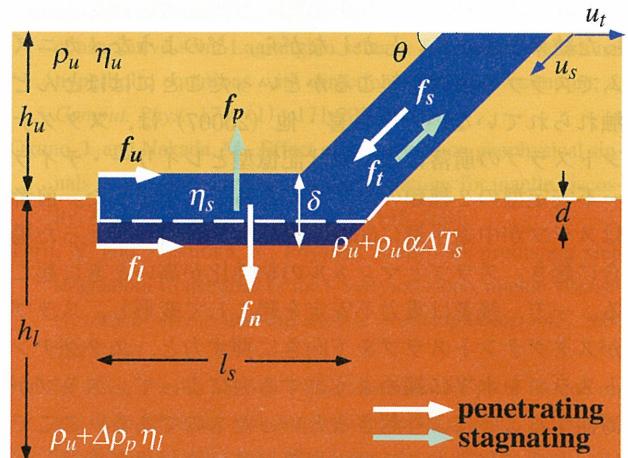


図6 スタグナントスラブに働く力。白がスタグナントスラブを崩落させようとする力 ( $f_s$ : 沈み込むスラブが下向きに押す力,  $f_n$ : スタグナントスラブの負の浮力,  $f_u$ : 上部マントルの粘性抵抗,  $f_l$ : 下部マントルの粘性抵抗) で、薄緑が滞留させようとする力 ( $f_t$ : 海溝の後退によりスラブが伸びようとするので沈み込むスラブが引き上げられる力,  $f_p$ : 相境界による正の浮力) である。

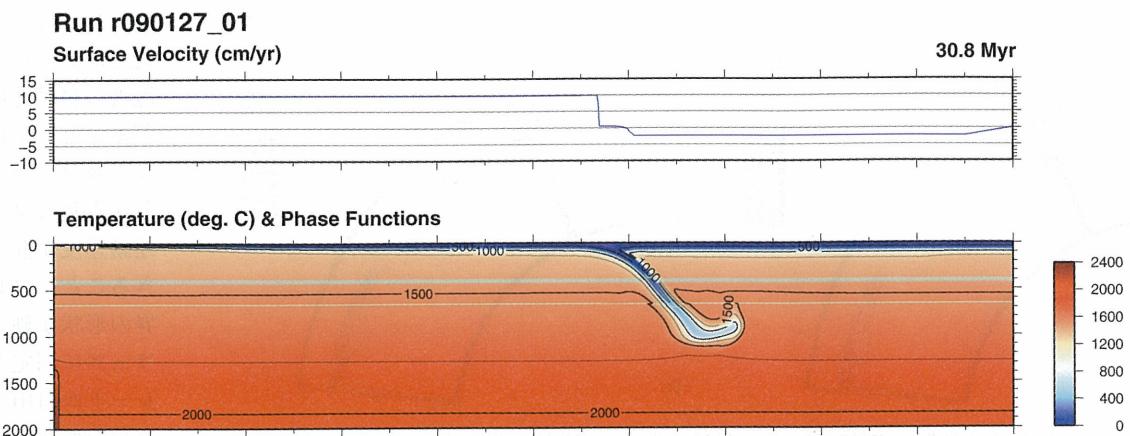


図7 新しく作成したスタグナントスラブのモデル。このモデルの粘性率は、深さ平均をとると後氷期変動から得られたマントルの粘性率（Okuno and Nakada, 2001）と大体一致するよう設定されている。また、下部マントルへ落下したスラブは強度を失い、その粘性率は周囲のマントルとほぼ等しいと仮定している。スラブは形状記憶型の滞留をした後、下部マントルに崩落する。この時、上盤プレートが海側に向かって動いているにもかかわらず、海溝は後退から前進に転ずる。

このモデルでは、これまでのモデルでは定量的に再現できていなかった沈み込むプレートの運動や海溝の移動を観測と合うような速度で起こるようになった。現在このモデルを用いて、スタグナントスラブの粘性率が下部マントルへの崩落に与える影響について調べている。

## 2-2. 海溝の移動がスラブの滞留・崩落に及ぼす効果

スタグナントスラブがなぜ深さ660km直上に滞留し、その後、どのように振る舞うのかを明らかにすることは本プロジェクトの最重要課題である。これまでの研究を振り返ってみると、Christensen (1996) が2次元箱型の熱対流モデルを用いて、スラブが660km相転移面直上に一旦横たわり、その後下部マントルへと崩落するといった結果を示した。しかしながら、どのようなメカニズムでスラブの崩落が起こるかといったことにはほとんど触れられていない。中久喜・他 (2007) は、スタグナントスラブの崩落には、形状記憶型とレイリー・ティラー不安定型の2種類のタイプがあることを示した。前者はスラブが中途半端に660km相転移面に引っ掛けた場合に起き、スラブとマントルの粘性比が高いときに起こる。一方、後者は重力不安定を起こして変形し、スラブがスタグナントスラブを下向きに押す力と、スタグナントスラブを水平に縮めようとする力によって、スラブが湾曲することにより起きるといったものである。ここでは、海溝の移動がスラブの崩落に及ぼす効果を検討してみた。

van der Hilst and Seno (1993) は、隣接している伊豆-小笠原スラブとマリアナスラブで、前者のスラブが深さ660kmで横たわっているのに対し、後者のスラブは下部マントルへ直接貫入している理由として、スタグナントスラブの進化過程を考え、両地域での過去の海溝後退速度の違いに着目し、海溝が前進することで、将来、伊豆-小笠原スラブが下部マントルへと崩落し、現在の

マリアナスラブのようになるといったモデルを示した。しかし、このモデルは想像の域を出なかった。最近、Funiciello et al. (2008) は4つのレファレンス・フレームに対する全世界の海溝の後退と前進速度を調べた。特筆すべきは、どのレファレンス・フレームを採用しても、伊豆-小笠原では、海溝が前進していることが示されたことである。すなわち、海溝が前進しているという事実が確認され、このことがスラブ崩落に関連している可能性が出てきたということになる。

本研究の計算には、Yoshioka and Sanshakokoro (2002) による2次元箱型の熱対流モデルを用いた。深さ400kmまで海洋プレートに相当するガイドを導入し、スラブの斜め沈み込みを与え、ガイドに沿ってスラブは沈み込んでいくものとした。ガイド内では流れの速度を一定とし、深さ400kmを超えるとスラブは自由に振る舞うように設定した。Torii and Yoshioka (2007) はこのモデルに断熱圧縮、粘性散逸の効果を取り入れ、リングウッドライトからペロブスカイト+マグネショウスタイトへの相転移に伴うクラペイロン勾配、660kmでの粘性ジャンプ量、プレートの沈み込み角、海溝の後退速度に対してパラメーター・サーチを行い、スタグナントスラブの形成に及ぼす影響を調査した。その結果、負のクラペイロン勾配に伴う浮力によってスラブが滞留する場合と、下部マントルの高粘性によってスラブが支えられる場合の両極のモードによってスタグナントスラブが生成されるることを示した。

上記のような先行研究を踏まえ、今年度は、Torii and Yoshioka (2007) のモデルに改良を加え、スラブの前進が扱えるようにした。図8は、クラペイロン勾配が-3MPa/K、深さ660kmでの粘性ジャンプがなく、海洋プレートの沈み込み速度が8cm/yrの場合の数値シミュレーションの結果を粘性率で示したものである。まず、水平距離3000kmのところから海溝を3cm/yrの速度で後

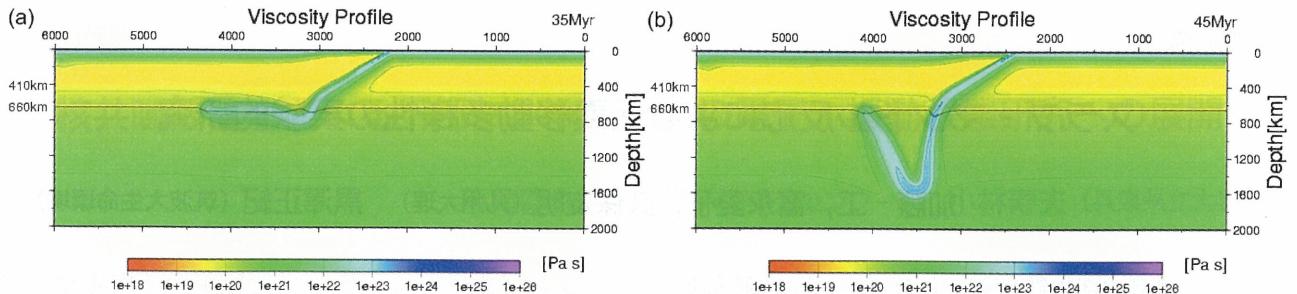


図8 水平距離3000kmから海溝を3cm/yrの速度で後退させ、その後3000万年後以降、2cm/yrの速度で海溝を前進させた場合のモデル計算結果。クラペイロン勾配が-3MPa/K、深さ660kmでの粘性ジャンプがなく、海洋プレートの沈み込み速度が8cm/yrの場合。カラーは粘性率分布を表す。赤線はリングウッタイトからペロブスカイト＋マグネショウスタイトへの相転移境界面の深さを表す。(a) 3500万年後。(b) 4500万年後。図は永野田彩氏による。

退させ、スタグナントスラブを形成させた(図8(a))。海溝後退の開始後、3000万年で海溝後退をストップさせ、その後ただちに2cm/yrの速度で海溝を前進させたところ、スラブが下部マントルへと崩落した(図8(b))。これは、海溝が前進することにより、海洋プレートが滞留したスラブを下へ押し込む力が効率よく増大するためと考えられる。これは中久喜・他(2007)によるレイリー・ティラー不安定型のタイプに近いモデルかもしれないが、その一因として海溝の前進が挙げられることを示したことになる。このモデルはTorii and Yoshioka(2007)の負のクラペイロン勾配によってスラブを滞留させる場合に対して計算されたものであるが、対局の下部マントルの高粘性によってスラブが支えられることによって生じるスタグナントスラブに対しても、崩落速度の違いがあるものの、同様な結果が得られた。さらに詳細なパラメーター・サーチが必要であるが、このように海溝の後退と前進が、それぞれ、スラブの滞留と崩落に密接に関係していることが明らかになった。

#### 参考文献

- Christensen, U.R., The influence of trench migration on slab penetration into the lower mantle, *Earth Planet. Sci. Lett.*, 140, 27-39, 1996.
- Funiciello, F., Faccenna, C., Heuret, A., Lallemand, S., Giuseppe, E. Di, Becker, T.W., Trench migration, net rotation and slab-mantle coupling, *Earth Planet. Sci. Lett.*, 271, 233-240, 2008.
- Furuichi, M., Kameyama, M. and Kageyama, A., Three-Dimensional Eulerian method for large deformation of viscoelastic fluid: Toward plate-mantle simulation, *J. Comput. Phys.*, 227 (10), 4977-4997, 2008.
- Furuichi, M., Kameyama, M. and A. Kageyama, Validity test of a Stokes flow solver by fluid rope coiling: toward plate-mantle simulation, *Phys. Earth Planet. Inter.*, in revision, 2009.
- Kameyama, M., ACuTEMan: A multigrid-based mantle convection simulation code and its optimization to the Earth Simulator, *J. Earth Simulator*, 4, 2-10, 2005.
- Kameyama, M., Kageyama, A. and Sato, T., Multigrid iterative algorithm using pseudo-compressibility for three-dimensional mantle convection with strongly variable viscosity, *J. Comput. Phys.*, 206 (1), 162-181, 2005.
- Kameyama, M., Kageyama, A. and Sato, T., Multigrid-based simulation code for mantle convection in spherical shell using Yin-Yang Grid, *Phys. Earth Planet. Inter.*, 171 (1-4), 19-32, 2008.
- Kameyama, M. and Yuen, D.A., 3-D convection studies on the thermal state in the lower mantle with post-perovskite phase transition, *Geophys. Res. Lett.*, 33, L12S10, doi: 10.1029/2006GL025744, 2006.
- Nakakuki, T., Hamada, C. and Tagawa, M., Generation and driving forces of plate-like motion and asymmetric subduction in dynamical models of an integrated mantle-lithosphere system, *Phys. Earth Planet. Inter.*, 166, 128-146, doi: 10.1016/j.pepi.2007.12.004, 2008.
- 中久喜伴益・多川道雄・岩瀬康行, スタグナントスラブの形成と崩落に対するレオロジーの役割, 地球惑星科学2007年連合大会, I214-004, 2007.
- Nakamura, T., Tanaka, R., Yabe, T. and Takizawa, K., Exactly conservative semi-Lagrangian scheme for multi-dimensional hyperbolic equations with directional splitting technique, *J. Comput. Phys.*, 174 (1) :171-207, 2001.
- Okuno, J. and Nakada, M., Effect of water load on geophysical signals due to glacial rebound and implications for mantle viscosity, *Earth Planet Space*, 53, 1121-1135, 2001.
- Torii, Y. and Yoshioka, S., Physical conditions producing slab stagnation: Constraints of the Clapeyron slope, mantle viscosity, trench retreat, and dip angles, *Tectonophysics*, 445, 200-209, 2007.
- van der Hilst, R. and Seno, T., Effects of relative plate motion on the deep structure and penetration depth of slabs below the Izu-Bonin and Mariana island arcs, *Earth Planet. Sci. Lett.*, 120, 395-407, 1993.
- van Hunen, J., van den Berg, A. and Vlaar, N.J., A thermo-mechanical model of horizontal subduction below an overriding plate, *Earth Planet. Sci. Lett.*, 182 (2), 157-169, 2000.
- Yoshioka, S. and Sanshadokoro, H., Numerical simulations of deformation and dynamics of horizontally lying slabs, *Geophys. J. Int.*, 151, 69-82, 2002.

# スラブ・マントル反応による元素移動多様性の実験的研究

加藤 工, 富永愛子, 久保友明 (九州大理) 黒澤正紀 (筑波大生命環境)

我々は、地球内部物質の輸送過程解明の実験的研究を大局的課題としている。地球化学的に不均一な海洋プレートは、沈み込みによってマントル遷移層に到達し、周囲のマントルとの混合が進行する。しかし、スラブサイズの完全な均一化は困難であり、元素種と鉱物特性に支配される特徴的な不均一性が必然的に生ずる。本研究では、スラブ停留条件のマントル遷移層から最上部マントル条件で、不均一性の端成分である玄武岩物質とマントル・ペリドタイトの一連の反応実験を行った。高精度微量元素分析により、元素移動度の多様性を明らかにし、これまで考慮されていなかった遷移層、最上部下部マントルのスタグナント・スラブに起源を持つ地球化学的起源領域の特性を解明することが目的である (News Letter 4, p65)。

必要な実験条件と分析試料合成を実現するため、マルチアンビル型高圧装置とLA-ICPMS装置の組み合わせを採用し、多元素の拡散同時測定が可能なDepth-Profile法を検討確立した。マントル最上部条件でのペリドタイト中の元素拡散について、得られた拡散分布パターンは、単純な玄武岩メルトの付加あるいは玄武岩由来の水流体の付加では説明が困難であり、オリビンの粒界拡散メカニズムが移動性を支配していると結論した (Preliminary analysis on the mobility of trace incompatible elements during the basalt and peridotite reaction under uppermost mantle conditions, Tominaga et al., Phys. Earth Planet. Inter., in press, online available)。

スラブ停留環境の低温で進行する準安定相転移 (olivine-wadsleyite-ringwoodite), 細粒化を伴う転移 (ポストスピネル) は、超細粒条件の粒界拡散支配によって、元素移動特性で特徴付けられる大きな元素分別を広範な領域で生み出す可能性がある。引き続いて、マントル遷移層を構成する高圧相鉱物の多結晶中の拡散を求めるための実験手順の確立を検討した。高圧鉱物-メルトの元素分配、鉱物内の元素拡散に関する研究は、これまでにも蓄積されつつあるが、混合途中過程での移動性の差異による分化の可能性に焦点を当てた研究は前例がない。

高圧実験には、愛媛大学から移設された500ton二段式装置 (EUDES→QDES) を使用した (<http://mineral2.geo.kyushu-u.ac.jp/NEW%20MIN%20HP/index2.html>)。高圧相転移に伴う細粒化により粒界拡散の役割が顕著になることが予測されるため、細粒の高圧相多結晶体が発物質として必要である。これらはOlivine単結晶 (San Carlos産) から比較的高温での相転移により得られることがわかった。拡散実験は合成時より低温で行い、保持中の粒成長効果を抑制した。図1は、実験セルの断面模式図と回収試料断面である。図2は、拡散媒体であるwadsleyite多結晶側からのlaser ablation pitを示す。連続元素濃度測定からpit底はbasalt拡散ソースまで達していることが確認された。現在、Depth-Profile法によって得られた拡散データの解析を行っている。

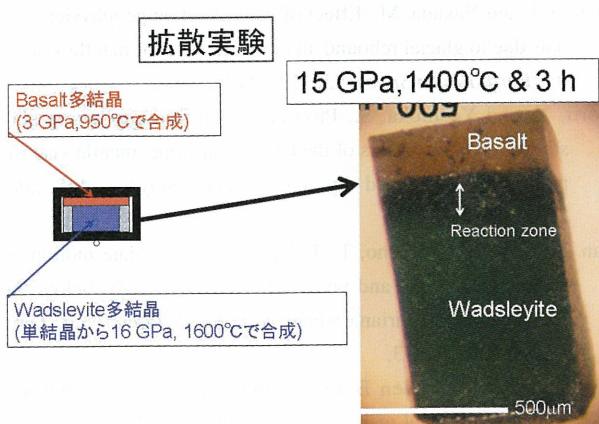


図1 高圧相多結晶体中での拡散実験の実験手順、試料セルデザインと生成物の顕微鏡写真

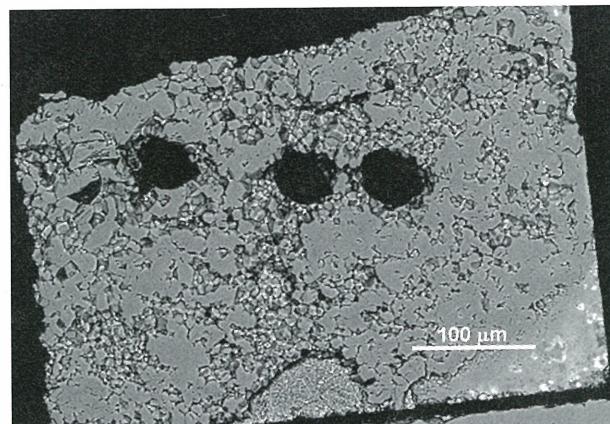


図2. Laser ablation pits on wadsleyite polycrystal

# 核共鳴散乱法による下部マントル物質の電子・振動状態研究への展開

平尾直久（高輝度光科学研究センター） 小林寿夫（兵庫県立大学）

## 1. はじめに

地球の全体積の半分以上を占めている下部マントルは、主に鉄を含む珪酸塩ペロブスカイト（～75%）とマグネシオウスタイト（～20%）から構成されている。最下部マントルの数百kmの領域では、ペロブスカイト構造はより高密度であるポストペロブスカイト構造へと相転移する。下部マントルの地震波トモグラフィの結果を物質科学的に理解するためには、下部マントル物質の弾性波速度を測定することが重要である。我々は、高温・高圧力下での核共鳴非弾性散乱測定法を確立し、下部マントル物質中の鉄原子の振動状態から下部マントル物質の弾性波速度を導きだすことを最終目的としている。そのため、核共鳴非弾性散乱測定用大開口型ダイヤモンド・アンビル・セルの開発などの研究を実施してきた（図1）。

一方、最近の研究から、下部マントル物質中に含まれる鉄原子の電子状態が、全マントルの構造やダイナミクスに大きな影響を及ぼし、深部地球を考える上で非常に重要なことが分かってきた。その理由は、鉄の価数やスピニ状態が下部マントル物質の弾性・輸送特性、元素分配など鉱物の物理化学的特性に重大な変化をもたらすためである〔1〕。核共鳴非弾性散乱法では、測定試料中に含まれる全ての鉄原子の振動状態を測定する。すなわち、複雑な下部マントル物質では、様々な価数・スピニ状態にある鉄原子の振動状態が畳み込まれた情報となる。下部マントル物質の弾性波速度を物質科学的に理解するためには、鉄原子の電子状態と振動状態との関係を理解することは不可欠である。そこで、まず初めに、我々は研究対象鉱物中の鉄原子がどのような電子状態で存在するのかをメスバウアーフ分光法を利用して調べた。

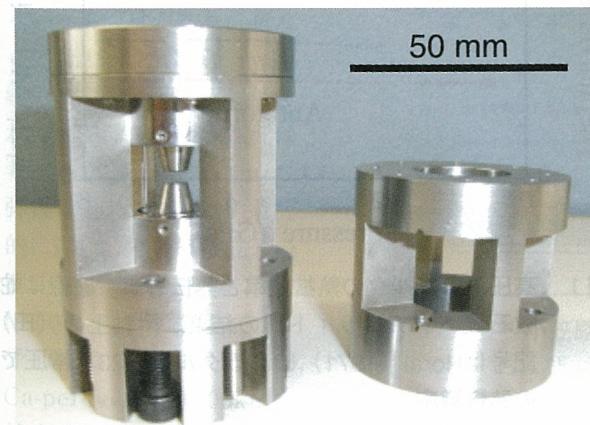


図1 核共鳴非弾性散乱測定用大開口型ダイヤモンド・アンビル・セル

## 2. 高圧力下珪酸塩ペロブスカイトおよびポストペロブスカイトのメスバウアーフ分光測定

最近放射光を利用した分光測定により、二価の鉄を含む珪酸塩ペロブスカイトの高圧力下での鉄原子のスピニ状態の研究が盛んに行われてきている。その結果、下部マントル条件では、二価の鉄原子は高スピニと低スピニの中間状態である、という提案が受け入れられ始めている〔2, 3〕。しかしながら、下部マントル条件下での珪酸塩ペロブスカイト中の鉄原子は、およそ50%が三価の状態で存在していると考えられている。すなわち、三価の鉄原子の鉱物物性への影響を無視することはできない。我々は、核共鳴プラグ散乱を利用した超単色X線を入射光に用いた、エネルギー・ドメイン放射光メスバウアーフ吸収分光法により、ペリドタイト組成の珪酸塩ペロブスカイトおよびポストペロブスカイト中の鉄原子の電子状態の理解に焦点を当て超高压下実験を実施した。高温高圧力（144GPa, 2000K）下で合成したポストペロブスカイトに関して、予備的な解析ではあるが約50%の三価の鉄が存在し、高スピニ状態にあることを示唆する結果がその場観察により初めて得られた（図2）。本研究で明らかとなった下部マントル条件下でのペリドタイト組成の珪酸塩中の鉄原子の電子状態に関する新しい情報は、マントルダイナミクスのモデル形成に重要な知見をもたらすことが期待される。

### 参考文献

- [1] McCammon, J. Min. Petro. Sci. 101, 130 (2006).
- [2] McCammon et al. Nature Geosci. 1, 684 (2008).
- [3] Lin et al. Nature Geosci. 1, 688 (2008).

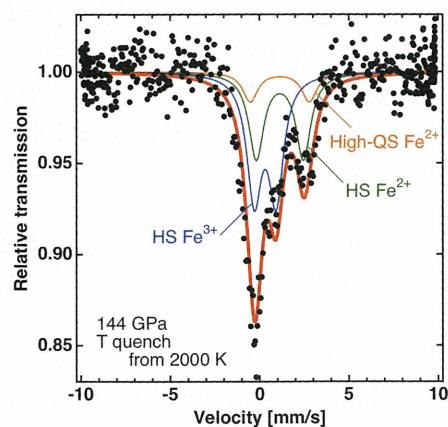


図2 144GPaにおけるペリドタイト組成の珪酸塩ポストペロブスカイト相の $^{57}\text{Fe}$ メスバウアーフスペクトル

## 高温高圧下におけるスラブ構成物質の熱物性測定

代表：大迫正弘（国立科学博物館理工学研究部）

分担：米田明・伊藤英司（岡山大学地球物質科学研究センター）

本研究では、地球深部を構成する物質の熱定数（熱拡散率、熱伝導率、および比熱）を高圧高温のもとで決定することを目的にした。測定方法には円盤形状の試料を用いる一次元のパルス加熱法を採用し、加圧には岡山大学地球物質科学研究センターの川井型装置を用いた（本ニュースレターNo.2）。なお実験には表記の3名に加えて岡山大学地球物質科学研究センターの米原光秀が後に加わった。

スラブを特徴づける含水物質の一つ蛇紋石について測定し、蛇紋石の熱伝拡散率と熱伝導率はカンラン石やザクロ石のおよそ半分であること、圧力による増加が小さいことを見いだした。後者の結果はやや予想外であった。熱伝拡散率と熱伝導率の温度効果はカンラン石と同様で、温度の上昇とともに速やかに（ほぼ絶対温度に逆比例して）減少する。圧力5GPaにおいて蛇紋石は800Kあたりで分解したとみられる。これ以上の温度では測定用のセルまたはヒーターなどに障害が出たらしく、データの追跡はできなかった。ついでタルクの測定を行った。同じくMgの含水珪酸塩鉱物であるが、タルクの熱伝導率と熱拡散率は蛇紋石よりかなり大きい。また、圧力効果は蛇紋石と同じく小さいことがわかった（図1）。タルクでも温度の上昇とともに熱拡散率・熱伝導率とも速やかに減少するという一応の結果を得ているが、確定すべく測定を進めている。また、天然のタルクは結晶粒の配向が強いので、それによる熱伝導の異方性も方向を変えて測り調べる必要がある。蛇紋石・タルクでの測定結果からしてみると、含水マントル相の熱物性に関しては未知のところが多いと思われる。他の主要な含水相（角閃石、phase-Dなど）でさらに予測しえないような結果がもたらされるかもしれない。実測することが重要である。同時に主要マントル物質の熱物性についてもデータを補完することが必要である。これにより、スラブやマントルウェッジの熱伝導率/熱拡散率の値の分布を求め、そこで詳細な温度構造の議論やスラブのダイナミクスについての基礎を提供することができるであろう。

カンラン石とザクロ石の熱伝導率・熱拡散率については圧力8GPa、温度1100Kまでの結果を得ているが、これに相当するような輝石のデータがない。そこで、ヒサイの集合体を輝石のアナログ物質として測定した。輝石の熱伝導率・熱拡散率の高圧下のふるまいはカンラン石

と同様であることがわかった。しかしながら試行ごとのデータのばらつきが大きく、落ち着いた結果が得られなかつた。粗粒の集合体であることが原因と考えられる。ガンカ輝石の単結晶が入手できたので、それを使って測定を行うことにしている。温度・圧力効果に加えて輝石の熱伝導の異方性も見ることができる。カンラン石やザクロ石にくらべ試料が小さいので、測定用セルも小さくしなければならず、実験は難しくなる。しかしセルを小さくすれば測定圧力の上限が上部マントルの底（15GPa）を超えることが期待できる。輝石の測定に加えて、カンラン石・ザクロ石の圧力範囲を伸ばしての再測定も予定している。

なお、本実験の方法では熱伝導率と熱拡散率を同時測定しているので、そこから比熱の値を求めることができる。比熱の圧力効果は小さいので、有意な結果を得るためにには測定精度を今より格段に上げる必要がある。それには測定条件の有限要素法解析による評価が有効であり、これを援用して測定の改良を進めるこも目標のひとつにしている。

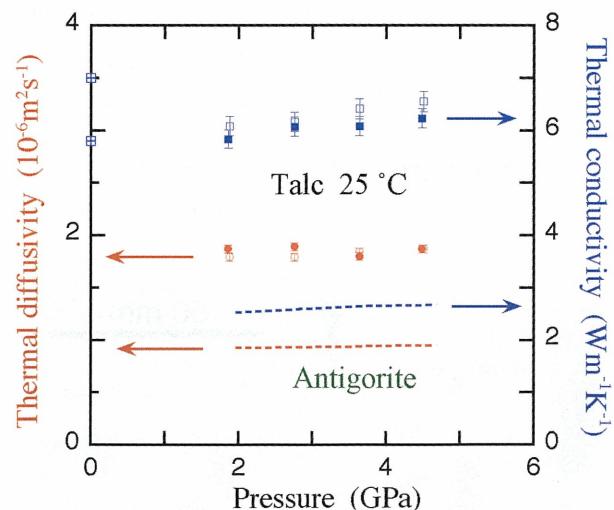


図1 高圧下のタルクの熱拡散率と熱伝導率。破線は蛇紋石（アンチゴライト）の結果。縦軸上の（田）記号はHorai (1971) によるタルクの23°C常圧での熱伝導率。

# スタグナントスラブ複雑系の地震学的解析による微細構造の研究

田島文子（広島大学）

当公募研究グループでは、トモグラフィーで捉えられた高速度異常域（スタグナントスラブ）を強くサンプルした広帯域実体波形（1Hz）を解析し、スラブを含むマントル遷移層および660km不連続面付近の構造の不均質性を詳細に調べてきた。結果として、かなりの部分がモデルM3.11（遷移層下部に高速度異常があり、不連続面が下降している）ないしモデルM2.0（遷移層下部に高速度異常があるが、不連続面は下降していない）などの層構造モデルで説明がつくことが確認できた一方、トモグラフィーでは捉えられていない短波長の（あるいは局所的な）不均質性も検知することができた。

具体的には、M2.0構造がM3.11構造に隣り合って分布していることを示し、スタグナントスラブを含む遷移層最下部にはringwoodite（rw）で代表される領域に接してmajorite（mj）に富んだ含水鉱物が溜まっているという仮説をたてた（Tajima et al., 2008）。相転移面が下降していないことは、含水のmjのClapeyron slopeは660km付近で正で、低温異常のあるスラブの相転移面は下降しないという実験結果（Sano et al., 2006）に裏付けられるが、それではなぜそのような組成を持つ物質がrw組成に対応する速度構造を持った領域に隣り合って存在するかという疑問が出てくる。この疑問に対しては、遷移層では、含水のgarnetはolivineよりも流れやすく（Katayama and Karato, 2008）密度が高いという裏づけがあり、重たくて流れ易ければ、rw組成の両側にmjに富んだ含水鉱物が溜るという状況は考えられる。一方、mjの弾性波速度はrwより系統的に遅い、という端成分の測定に基づく実験結果は

M2.0モデルの説明として矛盾するように思えるが、Ca-perovskiteは600kmを越える深さからでき始め（Irfune and Ringwood, 1987），高速度を示す

stishoviteの混在（10%程度）なども考慮すると、M2.0は含水mjを主成分とする物質が遷移層下部に溜った構造を表すという仮説は可能と思われる。

M3.11とM2.0の境界付近を強くサンプルした広帯域P波形では、まれに顕著なbroadeningを起こしていることはすでに報告しているが、これらの波形は、伝播経路の局所的な低速度域でSV→P変換を起こしたものと推測し、波形モデリングでその可能性を裏付けた（Nakagawa and Tajima, 2008）。スラブ内では、低温異常のみならず“水あるいは含水鉱物”的影響で、マントル組成鉱物の相転移が多様であり、広帯域実体波形解析では、これらの多様性の結果創りだされたと思われる局所的な低速度異常を含む構造の変化を鮮明に捉える解像力があることを実証した。このような微細構造の研究は、ミクロな物理過程（鉱物物性）に支配されているマクロの物理（スラブダイナミクス）を理解するヒントを探ることに繋がると思う。

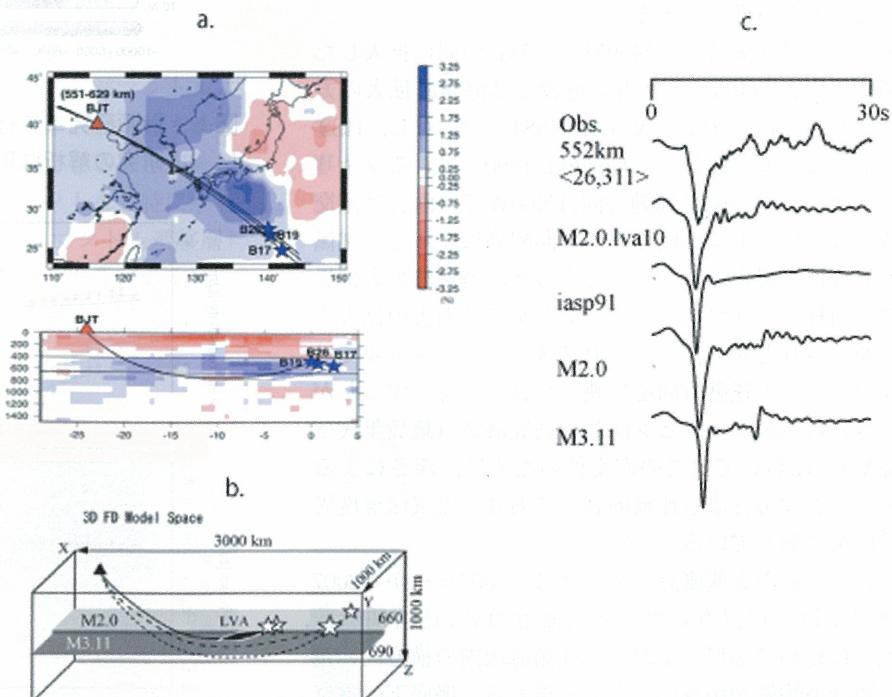


図1 a. 伊豆・小笠原付近のトモグラフィーイメージ（Fukao et al. (2001) モデルによる）および、P波形に異常を示す深発地震源と観測点を結ぶ波線。波線が最深点に達する付近で、高速度異常域の下に低速度異常のイメージが薄い層で捉えられている。b. 3D 差分法計算でのモデルスペースのイメージ。c. 異常を示す観測P波形（トップ；a. で示された震源B17の波形）と理論波形。M2.0.lvaは、M2.0モデルの660km不連続面の下に低速度異常を入れて計算した波形。

## 電気伝導度異方性で見るフィリピン海上部マントルダイナミクス 2

馬場聖至（東京大学地震研究所）

本研究は、計画研究工で行われる海底電磁気機動観測において、西フィリピン海盆北部に展開された3観測点（図1）のデータを解析し、この海域下の電気伝導度を異方性の有無・方向・強度を含めて明らかにしようとするものである。

東太平洋海嶺における海底マグネットテルリック（MT）観測データの逆解析から、上部マントルの電気伝導度異方性が客観的に求められた（Evans et al., 2005; Baba et al., 2006）ことを契機とし、含水オリビンの電気伝導度測定実験（Yoshino et al., 2006; Wang et al., 2006）が行われるなど、電気伝導度を通じて海洋リソスフェア・アセノスフェアの理解を深めようとする気運が高まっている。電気伝導度異方性はオリビン中の水素イオンの拡散率の異方性と結晶の定向配列を反映しているという解釈や、部分溶融帯がチューブ状に連結しているとする解釈が可能である。アセノスフェアの高電気伝導度・異方性の原因を結論する上で、観測的アプローチからは、地殻年代やテクトニックセッティングの異なる様々な海域でデータを取得し、高電気伝導度・異方性の分布を明らかにすることが不可欠である。

西フィリピン海盆は、約60Ma～35Maの間に拡大した背弧海盆で、約45Maより古い地殻では海洋底拡大の方向はN30Eである（Hilde & Lee, 1984）のに対し、HS2-NUVEL1モデル（Gripp & Gordon, 1990）によるフィリピン海プレートの絶対運動方向はN60Wで、両者は直交する。仮にマントル構成鉱物の定向配列によって電気伝導度異方性が規定されているとすると、地震波の方位異方性と同様に、リソスフェアマントルでは過去の拡大方向に凍結された異方性を、アセノスフェアマントルでは現在のプレート運動方向を反映した異方性を示すことが期待される。西フィリピン海盆の調査海域（地殻年代は約52Ma）においてはこの直交性のために、深さによる異方性の方向の分離も比較的容易であり、電気伝導度異方性解析に適している。

解析に用いた3観測点のデータは、2006年秋から2007年秋にかけて取得された。各観測点のMT応答関数は、お互いに極めて類似しており、観測海域内の横方向の電気伝導度不均質が小さいことを示唆する。海底下の電気伝導度構造を求めるに当たり、観測点周辺の海底地形および海陸分布がMT応答関数に及ぼす影響を除去するために、Baba and Chave (2005) の反復的補正法を適用した。海陸境界・海底地形効果を補正したMT応答関数から電気伝導度構造の主軸方

向を求めるに、最短周期（240秒）ではほぼN30Eであるが、長周期になるにしたがいN70E程度まで変化する。試行錯誤的フォワードモデリングによって、標準的1次元等方モデルに対し、深さ約30～45kmに東西方向の電気伝導度が南北方向の電気伝導度に対して1.5桁大きい異方性を持たせた場合に、観測されたMT応答関数を比較的よく再現する（図2）。しかしながら両者のフィットは必ずしも十分でなく、最終的な結論を得るには更に詳細な解析が必要である。

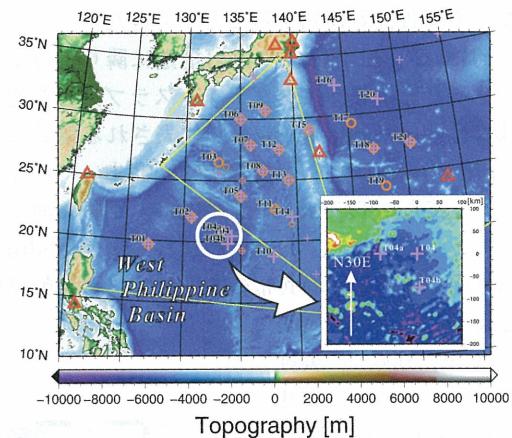


図1 計画研究工で行われた海底電磁気起動観測点と本研究の解析に用いた観測点（+）。

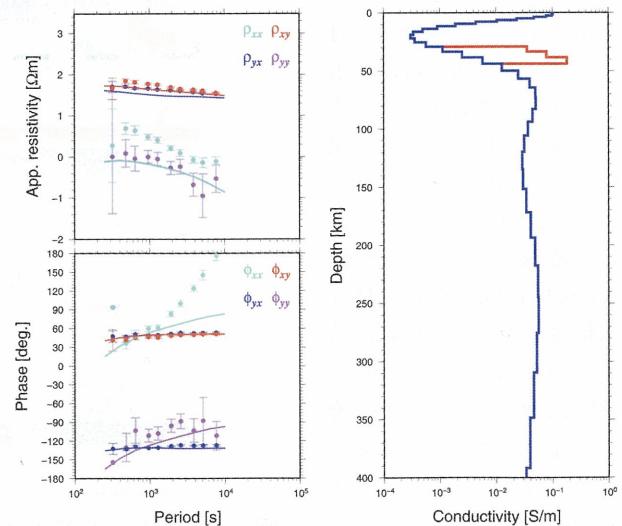


図2 左：T04点における表層不均質効果を取り除いた後のMT応答関数。  
x, yはそれぞれ、N30E, N60W方向。実線は右に示した電気伝導度構造モデルから計算されるMT応答関数。右：暫定的な1次元電気伝導度異方性構造モデル。深さ約30km～45kmでは、東西方向の電気伝導度（赤）が南北方向（青）の電気伝導度よりも1.5桁高い。

# 最終国際シンポジウム報告

鶴大 大平

川勝 均

2009年2月25日～27日に京都御所蛤御門前「京都ガーデンパレスホテル」に於いて“Stagnant Slab Project: Final International Symposium: Deep Slab and Mantle Dynamics”と題して特定領域研究の最終国際シンポジウムが開催され、外国からの参加者13名（うち招待11名）を含む計約70名の参加者によって地球深部スラブのダイナミクスに関して活発な議論がなされた（口頭発表25件、ポスター発表37件）。主催者側の代表としてまず特定領域研究代表の深尾良夫氏による基調講演“Integration of efforts in different disciplines towards the goal of the stagnant slab project”がなされ、「スタグナントスラブ」をキーワードとした地球物理観測、高圧実験、計算機シミュレーションの統合を目指す研究領域の説明がなされた。続く初日と2日目前半は今回のシンポジウムの中心トピックのひとつであるマントル深部での“水”的役割に関する発表が続いた。日本研究者の地震・電磁気観測によるマントル深部での水の挙動に関する最新の成果報告がなされ、高圧実験結果・計算機シミュレーション結果とあわせた議論は、国内外の参加者から一部驚きを持って受け入れられ、この分野における本特定領域研究の先導性が確認された。海洋地殻に蓄えられた水が脱水しスラブ沈み込みとともにマントルウェッジ内でスラブ上面に沿って取り込まれ、さらにフィリピン海下の上部マントル、マントル遷移層上部に蓄えられていることが明らかとなり、今後は遷移層深部、下部マントルにどのように水が取り込まれていくのかが（取り込まれないという可能性も含めて）重要な課題となることが確認された。また沈み込み帯以外の上部マントル（特に水を多く取り込む可能性が示唆されているマントル遷移層）にどれだけの水があるか定量化することも今後の重要な課題となるであろう。



写真1 質疑応答風景。

続いて、スラブがマントル遷移層下部に滞留する原因に關係して、特定領域開始時のkick-off集会以来問題となっているRingwoodite→Perovskite相転移のClapeyron勾配について、地震学的観測と高圧実験成果の不整合が議論され、相転移の反応速度を取り入れることにより問題が解決される可能性があることが実験的・数値的に明らかなことになった。高圧実験においては、圧力スケールの不確実性が解決されて信頼性の高い勾配値が得られた一方、シミュレーションでは系統的な探索によって「地球的なマントル対流」を実現するための条件の絞り込みが行なわれたことが、本特定領域の大きな成果としてあげられる。グローバルシミュレーションによっても、スタグナントスラブを再現することが可能になり、滞留のメカニズムをほぼ解き明かす事ができた。

シンポジウムの後半では、スタグナントスラブの最終的な行き先と考えられるマントルの底CMBの研究発表がなされた。このセッションでは、実験研究における本領域研究グループの先導性、それに基づく深部スラブとD"構造の関係を示す新たな考え方の提示がなされ、今後も研究対象として我が国研究者の優位性が強く發揮されるであろうことを伺わせた。

今回のシンポジウムでは、日本側（特定領域側）は若手・中堅の研究者の台頭を反映し、半分以上の口頭発表が若手・中堅の研究者によって行われた。これらの人材は、特定領域研究「スタグナントスラブ」の成果を継承する今後のプロジェクトにおいて、中心的役割を果たす事が期待される。シンポジウムは全体的にfriendlyな雰囲気で進行し、多くの前向きな議論が海外および国内の参加者との間でなされたことは会議を成功に導いた大きな要因と考えられる。



写真2 ポスターセッション。

## PEPI特集号“Deep slab and mantle dynamics”的お知らせ

末次 大輔

2009年2月の国際シンポジウム“Deep Slab and mantle dynamics”での発表論文を中心とした論文集をPhysics of Earth and Planetary Interior (PEPI, Elsevier社) 特別号として発行することになりました。スラブの沈み込みやそれに伴う水の輸送、スラブ滞留と崩落やそれに関係するマントルダイナミクスについての論文を、地球物理学・鉱物物理学・対流シミュレーション

等の広い分野から募集します。この特集号のためのゲストエディターは、Craig Bina, Douglas Wiens, 井上徹, 末次 大輔です。投稿締め切りは7月末予定, 発行は2010年春を予定しております。投稿論文は編集者による検討の後に査読作業に付されます。皆様の積極的な論文投稿をお願いします。

---

平成21年3月発行

発 行：特定領域研究「スタグナントスラブ：マントルダイナミクスの  
新展開」総括班

編 集：塩原 肇・清水久芳・横山景一

東京大学地震研究所 海半球観測研究センター  
〒113-0032 東京都文京区弥生 1-1-1  
Phone: 03-5841-5701  
Fax: 03-3812-9417

---