

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.4 Dec.2007



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	4
海底広帯域地震観測でスタグナントスラブを診る	8
海底電磁気機動観測でスタグナントスラブを診る	12
スラブ滞留・沈降過程の物質科学的モデリング	16
スラブ滞留・崩落過程の物質科学的モデリング	20
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	25
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	33
公募研究の紹介	40
中間評価報告	42
研究集会報告	43
研究集会のお知らせ	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—2007—

笠原 稔 (北海道大学・地震火山研究観測センター)

[1] 2007年実施内容

2007年設置予定の観測点の内、オホーツク観測点は、新たな地震計設置のための観測小屋の建設をロシア側に6月に実施してもらい、8月に地震計の設置を行った。その詳細は、次節に述べる。カムチャッカの予定点に関しては、パラナ観測点の設置の準備を進めたが、12月現在、稼動には至っていない。これは、パラナ観測点の維持のための要員の確保の問題があったことと、カムチャッカの国際空港の税関倉庫の工事のために、国外からの輸入業務を2008年春まで行わないという事情による。これは、2007年正月に通告された。現在、日本カムチャッカ間の船便も無く、最終的には、持ち込み荷物として、ハバロフスクで通関して、9月に搬送できた。その後の事情もあって、現時点では、ベトロパブロフスクで試験運用している段階である。

安定した運用を考えるために、1観測点分の機材を保持することとして、カムチャッカの観測点は、パラナ1点のみにすることに変更した。2006年中、テルネイ観測点がデータロガーの不都合で2ヶ月ほど欠測になったが、予備のロガーをロシア国内での輸送により交換し、復帰できた。地震波形データは、日口間の取り決めに従い、イベント切り出し方式であるが、ユジノサハリンスクに郵送で集まったデータをイベントリストに従って収録され、ハードディスクとDVDにより日本に持ち込まれている。

今後の展望としては、早い時期に、カムチャッカ・パラナ観測点の観測を開始すると共に、運用されている8観測点のデータをできるだけ早く、定期的にデータセンターに提供できるように進めて行きたい。

2007年極東ロシアにおける広帯域地震観測点の設置報告

宮町宏樹¹⁾、一柳昌義²⁾、平野舟一郎³⁾
セン・ラク・ス⁴⁾、ミハイロフ・ワレンチン⁴⁾

- 1) 鹿児島大学理学部地球環境科学
- 2) 北海道大学大学院理学研究院附属地震火山研究観測センター
- 3) 鹿児島大学理学部附属南西島弧地震火山観測所

4) ロシア科学アカデミー極東支部サハリン地震観測所

2007年夏期に、極東ロシアのオホーツクに広帯域地震計をロシア人研究者と共同で設置した(図1参照)。以下に各観測点の設置状況等を報告する。

(1) 設置メンバー

日本側3名(一柳, 平野, 宮町)とサハリン地震観測所の職員2名(セン部長, ミハイロフ技術責任者)の総勢5名

(2) 日程

8月12日: 日本側3名は新千歳空港からサハリンのユジノサハリンスクに移動, ロシア研究者2名と合流し, その日の夕刻の便でハバロフスクに



- STS2 stations (this study in 2004-2006)
- Sapporo Center
- New STS2 Station (this study in 2007)
- IRIS stations

図1 極東ロシアにおける広帯域地震観測網



写真1 オホーツク高層気象観測測候所

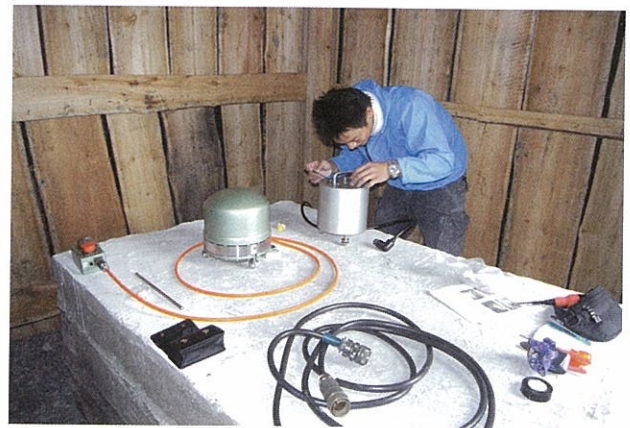


写真2 地震計小屋内の地震計台

移動 (ハバロフスク泊)

- 8月13日：ハバロフスクからプロペラ機でオホーツクへ移動 (オホーツク泊)
- 8月14日：広帯域地震計・短周期地震計および収録装置の設置 (オホーツク泊)
- 8月15日：現地スタッフへの収録装置等の説明と機器の最終チェック (オホーツク泊)
- 8月16日：オホーツクからハバロフスクへ移動 (ハバロフスク泊)
- 8月17日：日本人1名 (宮町) はハバロフスクから新潟空港に帰国。他の4名は夕刻の便でハバロフスクからユジノサハリンスクへ移動 (ユジノサハリンスク泊)
- 8月18日：今後の保守の打ち合わせ等の検討 (ユジノサハリンスク泊)
- 8月19日：日本人2名 (一柳と平野) はユジノサハリンスクから飛行機で新千歳空港に帰国。

(3) 設置場所

オホーツクはマガダン管区のため、事前に、地球物理局マガダン支部・Larisa Gunbina 支部長と相談し、設置場所の検討を行った。その結果、高層気象観測を実施しているオホーツク高層気象観測所 (写真1) に地震計を

設置することになった。ただし、オホーツクの町自体が海岸線に沿った町であり、流砂のような地形であるため、地震計の設置には不向きな地盤であると推測される。また、気象観測専用の測候所であるため、地震計台などの設備は無い。そこで、事前に、ミハイロフ・ワレンチン氏が現地へ行き、地元業者を雇い、測候所に隣接した木造の簡易地震計小屋を建て、その中にコンクリート製地震計台を新設した (写真2)。

(4) 設置機材

これまで設置してきた機材と同様に、G.STRECKEISEN AG社製広帯域地震計STS2、マークプロダクツ社製短周期地震計L-4C-3D (固有周期1秒) を設置した (写真3)。冬期間、簡易地震計小屋内はかなりの低温が予想されるため、広帯域地震計と制御装置は、温度計ロガーとともに、発泡スチロール製の保温箱に入れた (写真4)。地震計出力は、測候所建物内の部屋にケーブルで取り込まれ、データ収録系に接続されている。地震計の設置座標 (WGS84系) は、eTrexで測定し、北緯59°21'38.0"、東経143°14'05.6"、標高8メートルを得た。

データ収録系は、白山工業製のLS-7000XTとノートパソコンで構成されている。観測波形は、広帯域地震計および短周期地震計とも、サンプリング周波数100Hz、24

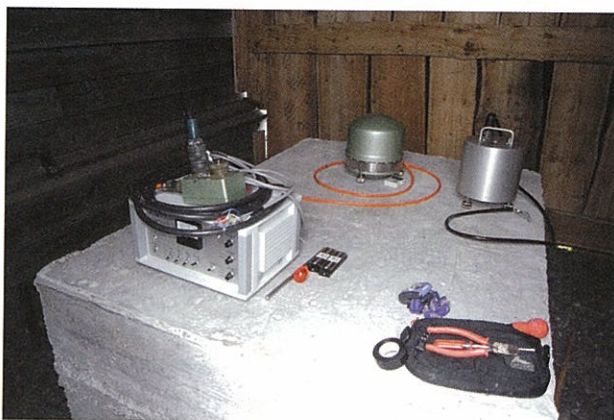


写真3 設置した地震計と制御装置



写真4 最終的な設置状況

ビットA/Dでデジタル化され、LS-7000XT内蔵のコンパクトフラッシュ（CF）カード（容量2GB：約90日間の連続波形データが収録可能）に連続記録される。LS-7000XTの刻時は1時間毎にGPSにより自動校正される。停電対策として、商用AC電源により常時充電されているバッテリー（12V80Ah）から、これらの観測機器すべてに電源が供給されている。また、LS-7000XTは内蔵のLANポートを経由して、パソコン（SONY社製VAIO・PCG-79EP・ロシア語版WindowsXP）に接続され、パソコン上で観測記録のモニターを可能にしている。

（5）おわりに

これまでに、我々はロシア極東域のサハリンおよび大陸側において、2005年までに5カ所、2006年に2カ所、2007年に1カ所の合計8カ所に広帯域地震観測点を設置してきた（図1参照）。ロシア側研究者および各観測所の職員など現地のロシア人の絶大なる協力があり、無事に観測点の設置をおこなうことができた。ロシア側の周到な準備と対応に心から感謝する。

今後は、これまでに設置した観測点において、トラブル無くどれだけ連続観測をできるかが課題であり、各観測点の保守体制を十分に検討する必要がある。

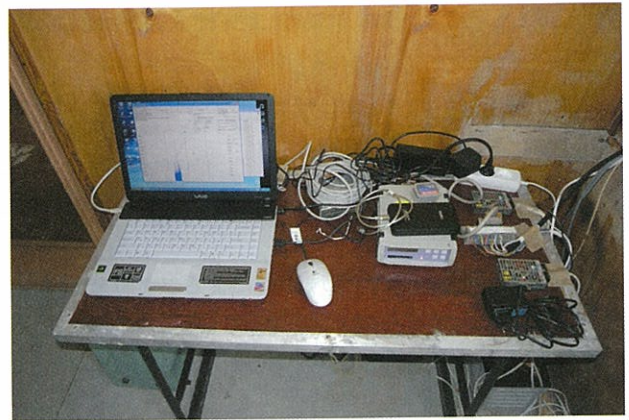


写真5 データ収録系

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) フィリピン海のマンテル遷移層 (レシーバー関数, 波形解析)
- (2) 沈み込み帯下部マンテル反射面の検出
- (3) 太平洋最下部マンテルの低速度層
- (4) スタグナントスラブ・データセンターの運用開始

(1) フィリピン海マンテル遷移層

(a) レシーバー関数 (末次, 他)

フィリピン海北部と西太平洋に展開されている広帯域海底地震計 (BBOBS) データを用いて、フィリピン海マンテル遷移層に滞留している太平洋スラブ周辺の410-km, 660-km不連続面の深さを推定した。この観測は2005年から3年間の予定で実施されており、最初の設置は2005年10月 (JAMSTEC深海調査研究 KR05-14) に実施され、すでに最初の1年のデータが回収されている (JAMSTEC深海調査研究 KR06-14)。本研究ではこの1年間のデータを用いてレシーバー関数解析をおこない、Velocity Spectrum Stacking法 (Gurrola et al., 1994) によってフィリピン海の滞留スラブ周辺のマンテル不連続面深度を推定した。滞留スラブを通るPs変換波から計算したレシーバー関数をスタッキングして求められた410-km, 660-km不連続面の深さと遷移層の厚さは、各々380km \pm 9, 691 \pm 5km, 312 \pm 10kmである。一方、滞留スラブから南方へはずれたPs変換波からは、416km \pm 3, 673 \pm 15km, 258 \pm 16kmという値が求まった。また、西太平洋に設置された3観測点のデータから古い太平洋の410-km, 660-km不連続面深度と遷移層厚さを推定したところ、397 \pm 10km, 662 \pm 8km, 266 \pm 11kmに求められた (図1)。速度補正にはRitsema and Heijst (2000) のS波モデルを用いた。まだ初年度のデータのためデータ数は少ないが、滞留スラブ内外の30kmに及ぶ660-km不連続面深度の差と遷移層厚さの違い (50km) は有意であると考えられる。速度補正の影響が少ないマンテル遷移層の厚さの違いを温度の差に換算すると、滞留スラブにおけるマンテル遷移層の平均温度は、太平洋の同じ深さと比較して約300K低温であると推定される。

(b) P波波形・走時解析 (坪井, 他)

フィリピン海における滞留スラブについてこれまでに求められたP波走時トモグラフィーモデルの妥当性を検討するために、日本・中国を含む東アジアの広帯域観測波形データと3次元P波速度モデルから計算される理論波形の比較を行った。P波モデルとしては大林他によるGAP-P1モデルを用い、理論波形計算にはスペクトル要素法を、計算資源としては地球シミュレータ (512ノード) を用いて、周期2秒までの理論波形を求めた。対象とした地震は、2002年6月3日の伊豆・小笠原弧深発地震 (北緯27.57度, 東経139.82度, 深さ488km) であり、観測波形はF-net, IRISの観測点の記録である。観測波形では、震央距離20度から35度で高速度の滞留スラブによるP波の負の走時異常が見られるが、理論波形でも同

P660s conversion points and depths of '410' and '660'

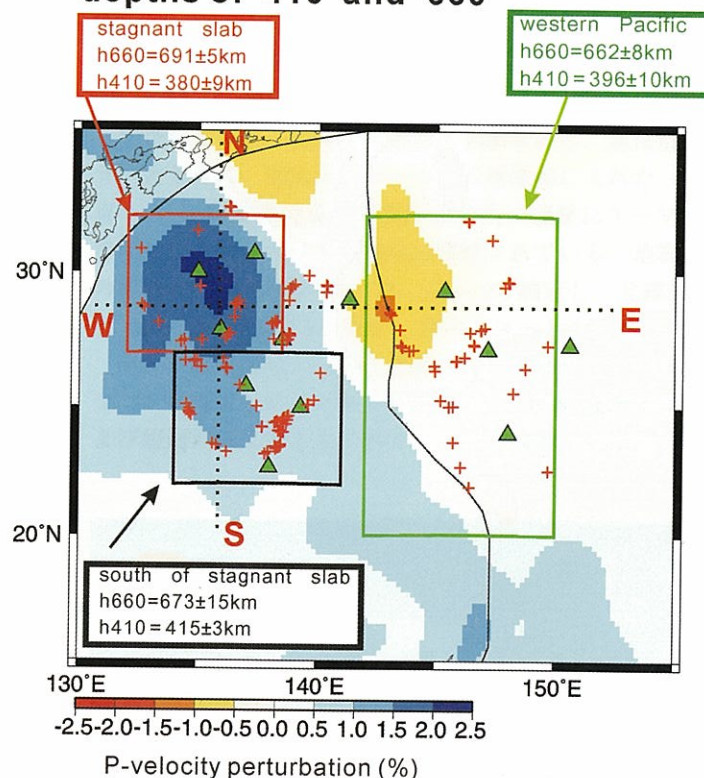


図1 レシーバー関数法による410km不連続面, 660km不連続面, 遷移層の厚さ。滞留スラブ, 滞留スラブ南方, 太平洋の三つの領域での平均値。△はBBOBS観測点, +はPs変換波の660kmでの変換点。背景のカラー図は、大林のトモグラフィーによるマンテル遷移層でのP波速度異常。

様の異常を再現できた (図2)。また、理論波形自体も観測波形に良く似ており、GAP-P1モデルは滞留スラブの実態を良く表していると考えられる。

(c) P波・S波の波形解析 (田島—公募研究)

本研究では、スタグナントスラブ付近を強くサンプルした広帯域実体波形 (P & S) を解析することにより、トモグラフィーイメージより波長の短い不均質構造を詳細に調べている。ニュースレターNo.3 (Dec. 2006) で報告したように、スタグナントスラブに関する速度構造は、モデルM3.11 (遷移層下部に高速度異常があり不連続面は690kmくらいまで下降している)、およびモデルM2.0 (遷移層下部に高速度異常はあるが広範囲にわたる不連続面の下降は伴わない) あるいはそれらを多少変化させた層構造で多くは説明できるが、そのごく近傍をサンプルしたP波で、たまにコーダ状にbroadeningを起こしている波形が見つかることがあり、上記のモデルでは説明がつかない。又、M3.11の構造からM2.0への変化も温度異常だけで説明するには勾配が急激過ぎ、遷移層最下部における鉱物組成分布の違いを検討している (Tajima et al., 2007)。図3 (左) では、千島の沈み込み帯で決められているトモグラフィーイメージとM3.11およびM2.0の層構造モデルで代表される観測波形が伝播した波線 (震源A5, A6とHIAを結ぶ) とを比較し、異常な拡がりのある観測波形 (A2のHIAにおける) も構造的にはごく近傍を伝播したことを示している。図3 (右) では、それぞれの観測波形と異なったモデルを用いて有限差分法により計算した波形を比較している。ここでTomoは、トモグラフィーモデル (Fukao et al., 2001) から速度構造を構築し、左

2002/06/03 09:15:00.0, 27.570, 139.820, 488.0, , MW, 5.1 disp

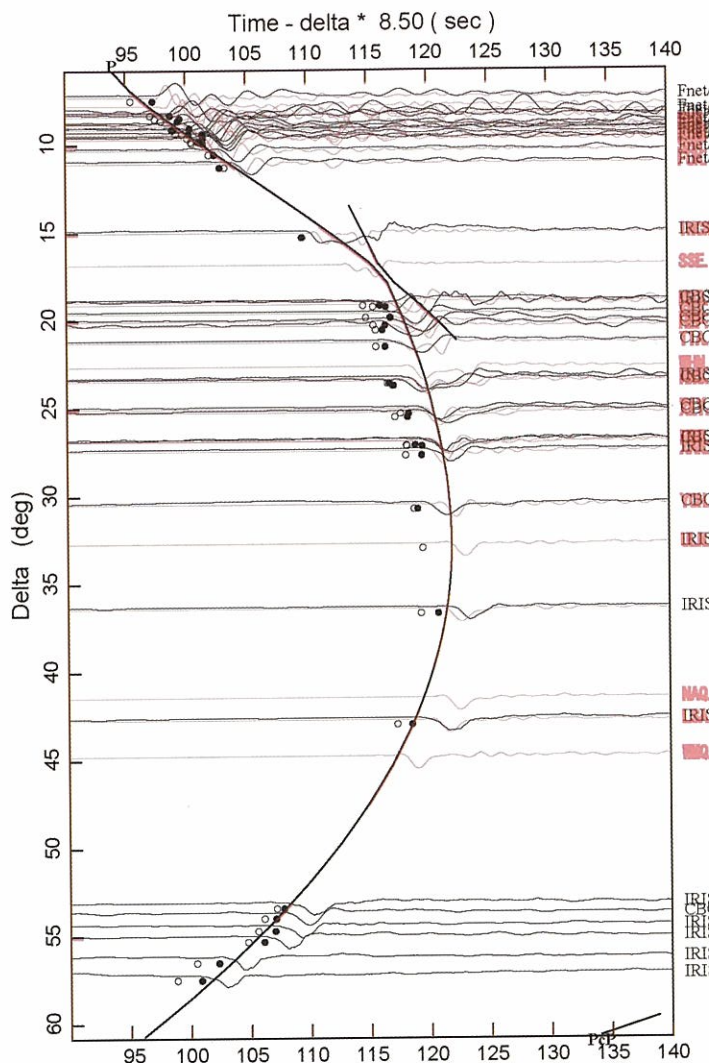


図2 伊豆・小笠原深発地震の観測P波波形 (黒線) と理論波形 (赤線) の比較。震央距離25-40度に達するP波は滞留スラブの中を長く伝播している。黒点、白点はそれぞれ観測P波、理論P波の初動読み取り時刻。

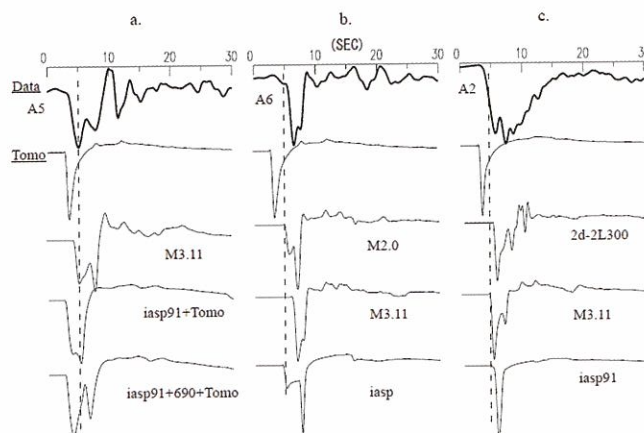
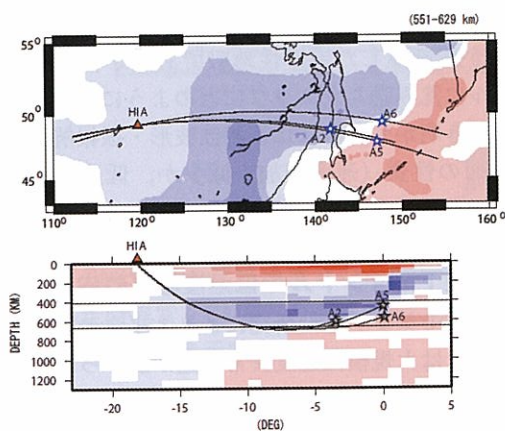


図3 (左) トモグラフィーイメージと地震波線: (上) 地図上での震源 (A2, A5, A6) と観測点HIAの位置および (下) クロスセクション。ここでトモグラフィーモデルはFukao et al. (2001) により、平面図上でのイメージは、551-629kmの深さに対応。(右) 観測波形 (トップ太線) 及び差分法で計算した理論波形。

側の下図で示されているクロスセクションに対応した2次元構造で計算したもので、660kmの不連続面が考慮されていないため波形は単純であり、3つの震源に関しHIAでの理論波形は殆ど区別がない。又、初動の到達する時間は観測データより若干早く計算されている。その下には、観測波形を良く説明するモデルで計算した波形を示す。a.の一番下に示されている波形は、iasp91のモデルにトモグラフィーのパーターベーションを加え660km不連続面を下降させたモデルで計算したもので、三重合波形をよく再現しており、トモグラフィーは高速度異常のイメージを良く捉えていることが分かる。しかしながら、初動の走時はデータやM3.11で計算したものに比べ速い。c.の観測波形データの再現は、2次元モデル計算ではまだ充分ではないが、震源(606km)から波線に沿って傾いた低速度層(P波S波ともに-10%)を入れたモデル(2d-2L300)が、後続波を多少作り出している。P波がコーダ状のbroadeningを起こす現象は、深発地震源近くのごく狭いゾーンで起こっており、スタグナントスラブに伴った局所的なメルトの存在を示唆しているように思われる。

(2) 下部マントル反射面の検出 (末次, 他)

2002年1月7日に発生したマリアナ深発地震(19.02N, 145.05E, h619km, Mw5.9)の際に、日本列島での波形データ(防災科研のHinet)に非常に顕著な複数のP波後続波があらわれた。P波初動から12秒(X1), 30秒(X2), 42秒(X3)付近に顕著なパルス状の後続相が存在する。東日本の観測波形では、X1, X2は弱いながらも観測されるが、X3は観測されない。西日本の記録を震源からの方位によってグループ分けしたうえで各グループについてアレイ解析を行い、後続波の到来方位、スローネス(入射角に相当)と走時を測定した。スローネスはP波, X1, X2, X3相の順(到着時刻順)に小さくなり(直達P波より入射角度が立っている), X3では0.8s/degreeほどスローネスが小さいことがわかった。到来方向は、一部のグループを除いて直達P波の到来方向から2度の範囲内におさまる。また、3成分波形を用いて後続波のパーティクルモーションを描いたところ、すべてP波的な振動方向を示した。後続波の振幅が大きいことを考え合わせると、震源付近の不連続面でのSp変換波である可能性がある。得られたスローネス、到来方向、到着時刻を説明するSp変換面の場所と形状(傾斜角と傾斜方向)をTakenaka(2000)の方法によって推定し、地震波トモグラフィー(Obayashi et al., 2006)のイメージと比較した(図4)。反射面はマリアナ深発地震直下の深さ690km付近(X1), 震央から北西方向400-600kmの深さ800, 850km(X2, X3の一部), そして震央から北西方向100-400kmの深さ940km(X3の一部)に求まった。690km反射面はマリアナスラブ内部でのポストスピネル相転移面と考えられ、また940km反射面は下部マントルに沈み込んだマリアナスラブ内部の不

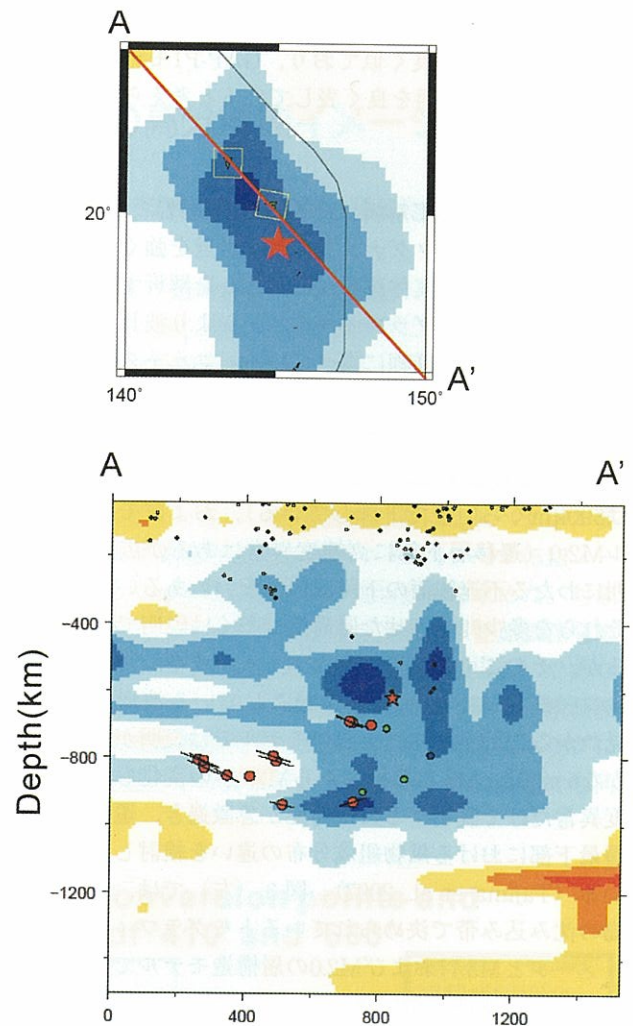


図4 マリアナ沈み込み帯下部マントルにおけるSp変換面(黒線)と変換点(赤点)。緑点、青点はそれぞれKaneshima(2003)とKruger et al.(2001)で求められた変換点。小さい点は地震分布。背景のカラー図は大林のトモグラフィーによるP波速度異常。

均質によると考えられる。一方、800km, 850km反射面は下部マントルのマリアナスラブの外に位置する。これらがスラブから剥離した海洋性地殻であるか否かなど、下部マントルに沈み込んだスラブにどのように関係しているのかを解き明かすためには後続波波形・振幅解析によって反射面の性質(速度増加か減少か、低速度層か、など)を調べる必要があり、今後検討を進めていく。

(3) 太平洋最下部マントルの低速度層(竹内)

グローバルトモグラフィー研究により太平洋の下の最下部マントルには大規模低速度異常構造が広がっていることが知られている。しかし解像度が乏しく、その微細構造や成因については良くわかっていなかった。我々は海半球計画を通じてベトナムに広帯域地震計アレイを展開し、太平洋の低速度異常域を直接サンプルする貴重なデータを取得した。このデータを解析した結果、東経

140度の東西でCMBから反射する地震波の走時異常の大きさが急激に変化していること(図5),及びCMBから400km以内の領域を通過する直達波走時が遅いことが検出された。これは太平洋下の低速度異常構造が化学的不均質により生じていること,化学的不均質がCMBから400km程度の範囲に局在化していることを示唆している。

(4) データセンターの運用(坪井)

極東ロシア広帯域地震観測網のイベント波形データと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ユーザIDによりアクセスできる。

(5) 今後の方向性

今後は蓄積されていくフィリピン海広帯域海底地震波形データや極東ロシア広帯域地震波形データを解析し,スタグナントスラブの実像に迫る。両観測網から,スタグナントスラブの影響を強く受けたデータが得られることが期待できる。これらのデータを用いてレシーバー関数解析や異方性解析,P波波形・走時解析をおこなう。スタグナントスラブ周辺のマンテル不連続面凹凸,詳細な速度構造や形状,異方性を推定し,スラブ滞留・崩落の実態とそのメカニズムについて推定するとともに,高圧鉱物実験データやモデリング研究のための基礎データを提供する。

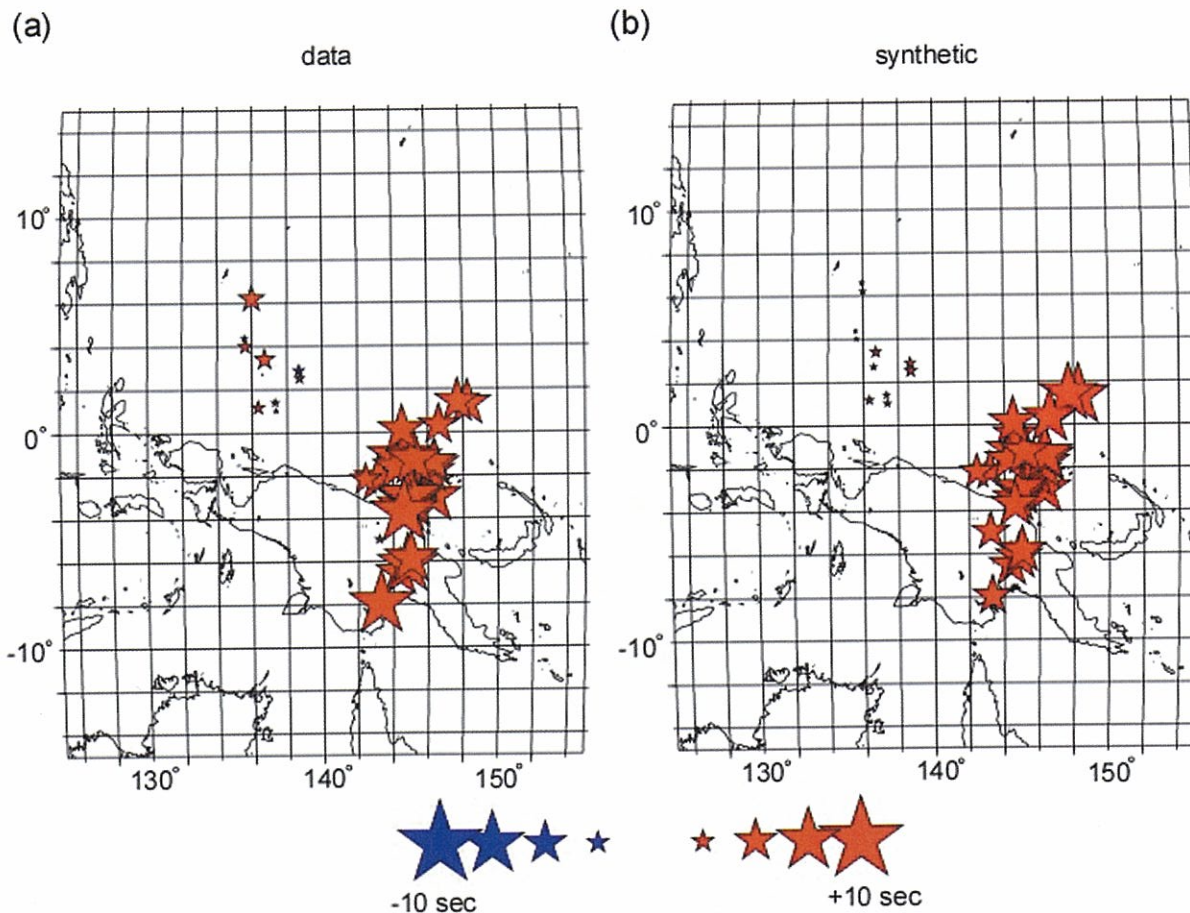


図5 CMBで反射する地震波の走時異常分布(左:観測値,右:本研究で推定された速度構造モデルによる理論値)。走時異常をCMBでの反射地点にプロットしており,正の値が観測されればその地点のCMB近傍に低速度異常があることを示唆する。

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)

昨年度に引き続き、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た。本年度も、昨年度より継続した観測データを回収し最終期の長期観測を続けるために、民間の作業船を傭船し観測航海を実施した(10月31日~11月24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)各12台を回収しつつ、新たにBBOBS・OBEMそれぞれ15・14台を19観測点に設置した(図2)。昨年度の回収と同様に、全数の長期海底観測機器を無事に回収している。

回収したBBOBSにおいては、12台中で1台が機器内部のトラブルで記録が得られなかった(T15)が、BBOBS全体でのデータ回収率は90%となっている。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。傾向としては、昨年度にデータを得ていなかった観測点、特にT05・T13が低雑音レベルであった。図3に、この2観測点のノイズモデルを示す。うちT13観測点では、BBOBSの海底での底層流に起因すると思われる小さな揺れを規制する構造を付加する試みを行っている。そのため、ノイズモデルの長周期側で水平動2成分(H1, H2)の雑音レベルが低い方(H2)でほぼ揃った。その結果、上下動(Z)の雑音レベルがより低くなっているようである。来年度の最終的な回収航海は、海洋研究開発機構の深海調査研究での研究船「かいらい」を11月に利用する予定が得られており、これをもって本研究での長期海底観測を完了することになる。

また、昨年取得した海底地震観測データの第一期回収

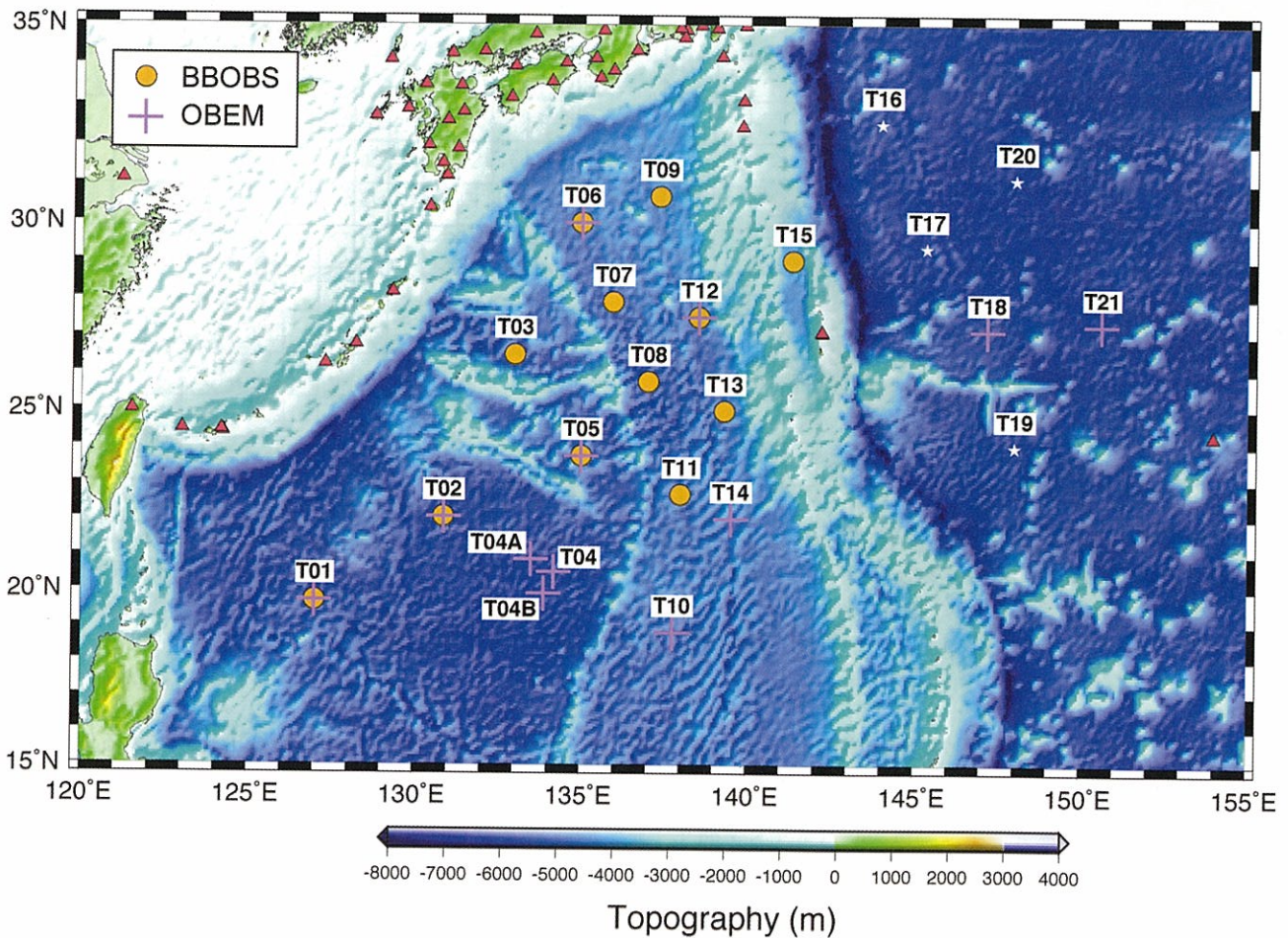


図1 今年度回収した海底地震・電磁気観測点の配置図 (●:地震, +:電磁気, ☆:2006年以降の観測点, ▲:陸上地震観測点)。

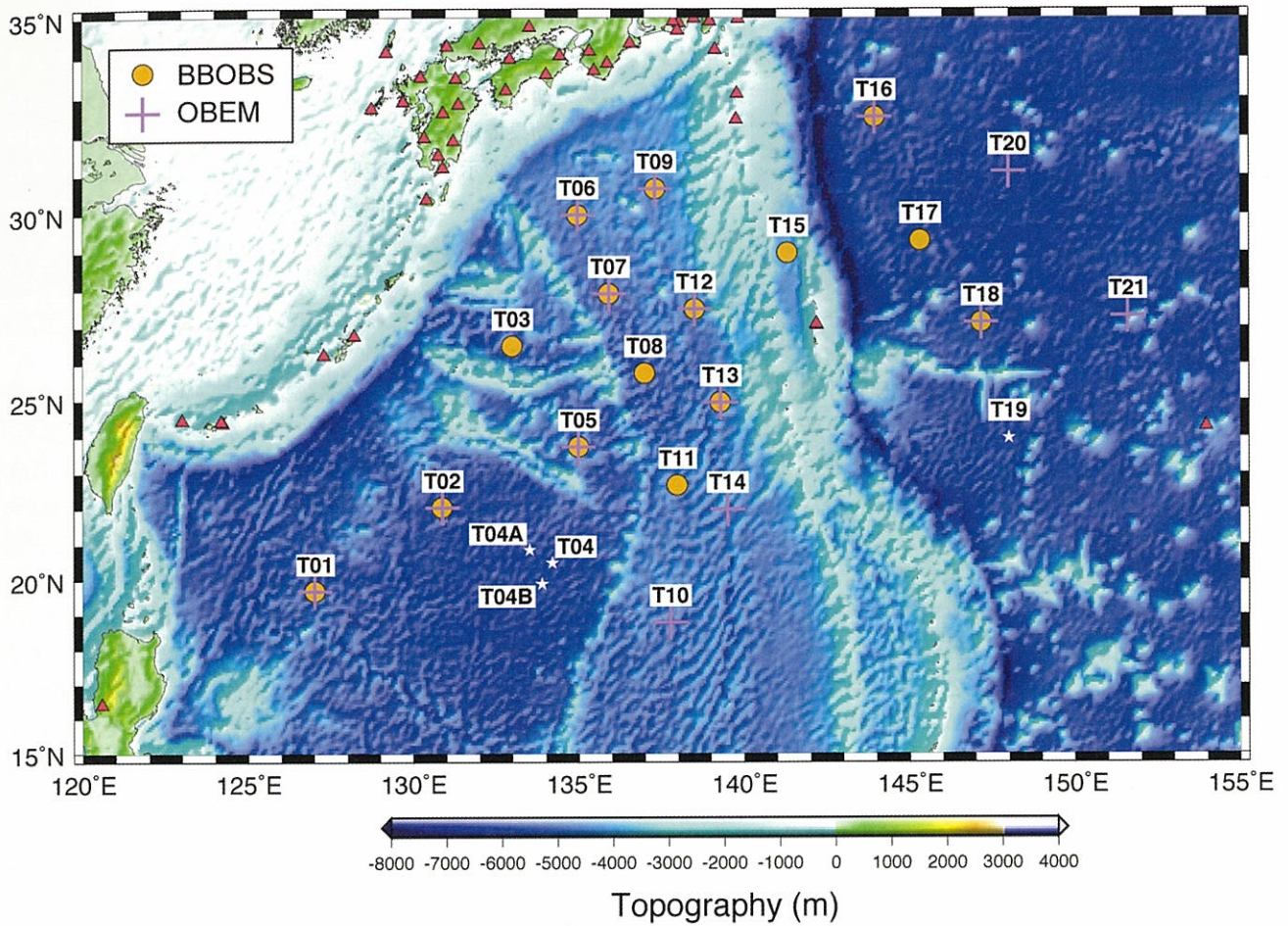


図2 今年度設置した海底地震・電磁気観測点の配置図 (●:地震, +:電磁気, ☆:2007年以前に設置の観測点, ▲:陸上地震観測点)。

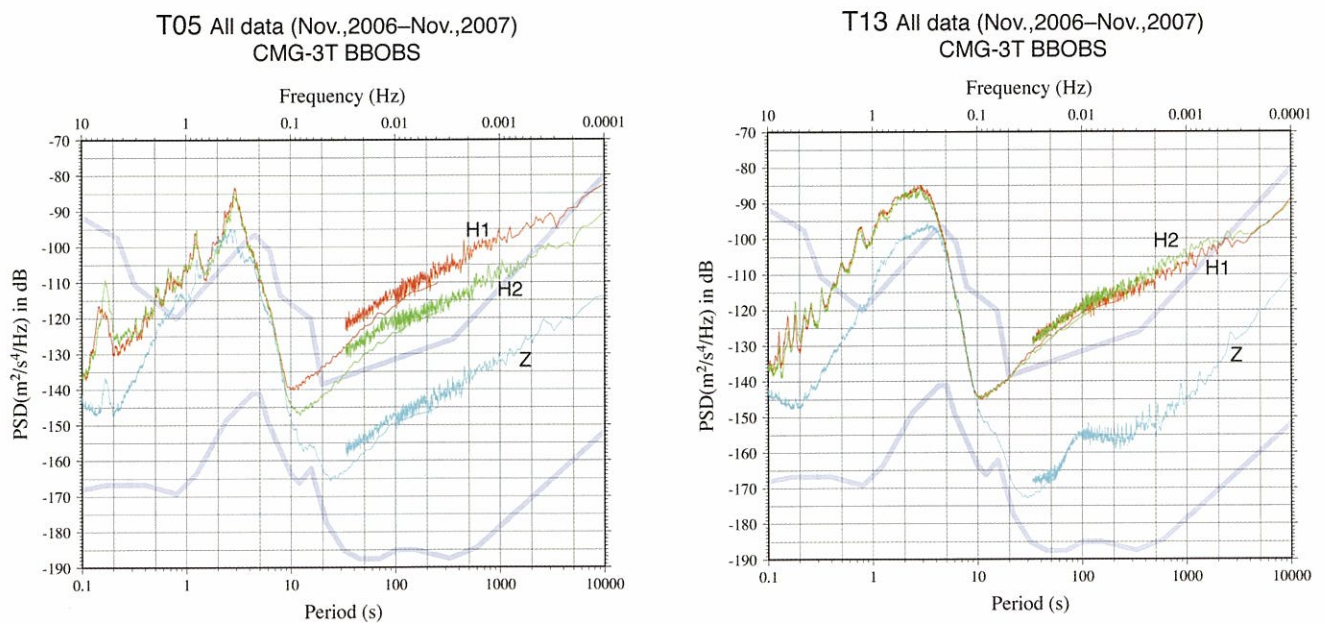


図3 T05 (左)・T13 (右) 観測点のデータによるノイズモデル。背景の2曲線は、統計的に得られた陸上観測点でのノイズの上下限を示してある。T13ではH1方向の揺れを規制する試みを施し、その実効が確認された。

分（全体の1/3にあたる）の解析からフィリピン海東縁の沈み込みに関する新たな知見が明らかになると共に、既存のネットワークデータの解析から画期的な成果を得た。

(a) フィリピン海域の3次元S波速度構造：

既存の陸上及び海底地震観測のデータに2006年11月に回収された広帯域海底地震計12台の観測データを加え、北西太平洋地域においてIsse et al. (2006) を上回る解像度の良い3次元上部マントルS波速度構造モデルを得た。このモデルにより、新たに北部伊豆小笠原、南部伊豆小笠原（硫黄島）、北部マリアナの3カ所にピークを持つ低速度異常がマントルウェッジ内に存在することが明らかになった（図4 a, b）。これらの異常の波長は約500kmと分解能を十分超えている。この低速度異常のピークの位置と伊豆小笠原マリアナ弧の火山フロントで得られた火山岩の同位体比のパターンの特徴を比べたところ非常に良い相関が見られた（図4 b, c）。同位体比のパターンの違いは火山岩の元となるマントルの違いを示している事から、マントルウェッジの異なる異常源が地表にまで影響を及ぼしている事が初めて示された。

(b) 伊豆ボニン・マントルウェッジにおけるメルトの観測：

第一期観測期間内に伊豆ボニンスラブ内で起こった10イベント（ $4.7 < M < 5.9$ ）のBBOBS波形記録とF-net観

測点（OSW）の波形記録からP波減衰とP波走時異常を求めた。P波の減衰と走時異常の関係から、太平洋スラブを通る波線やその下のマントルを通る波線のデータは温度効果で説明できるが、マントルウェッジを通る波線のデータの示す正の走時異常は、温度効果で説明できないほど大きいことが明らかとなり、メルトの存在を示唆していると考えられる。

(c) 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地震学的に明らかにした。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（Kawakatsu and Watada, Science, 2007）。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。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。今後観測網の拡充（海域を含む）をはかり、150km以深の深部への水輸送過程を明らかにしていきたい。

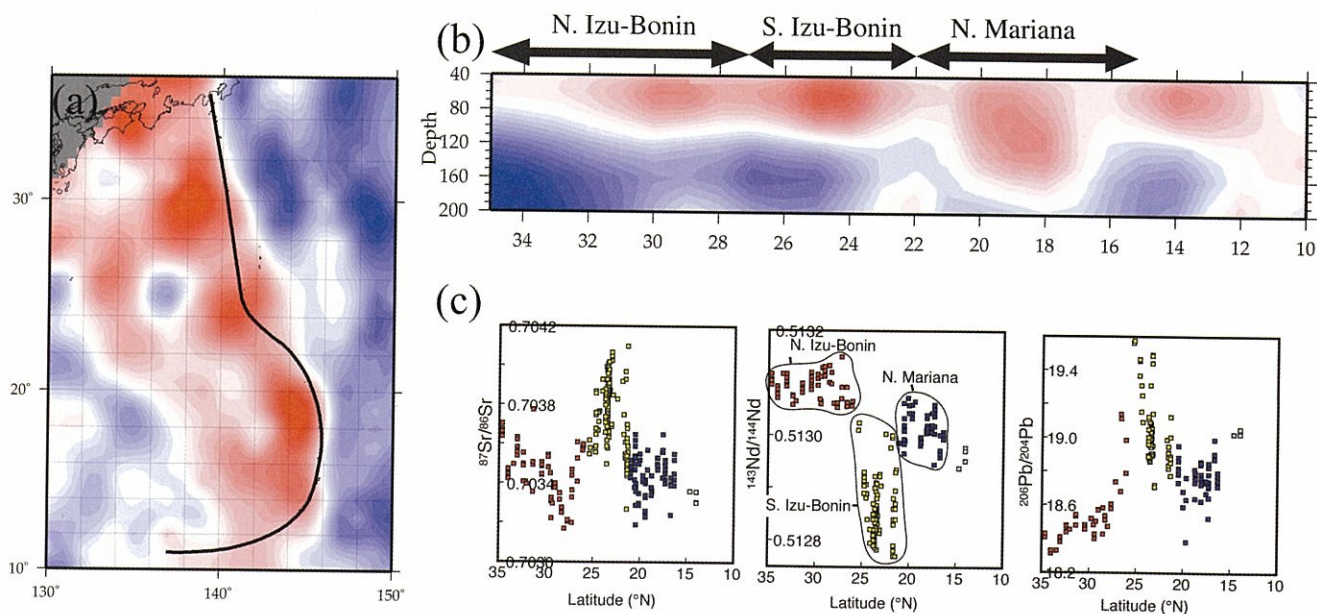


図4 (a) 深さ60kmにおけるS波速度異常構造。(b) 伊豆小笠原マリアナ弧の火山フロントに沿った断面。(c) 同弧の火山フロントで得られた火山岩の同位体比で、左からSr, Nd, Pbの同位体比。

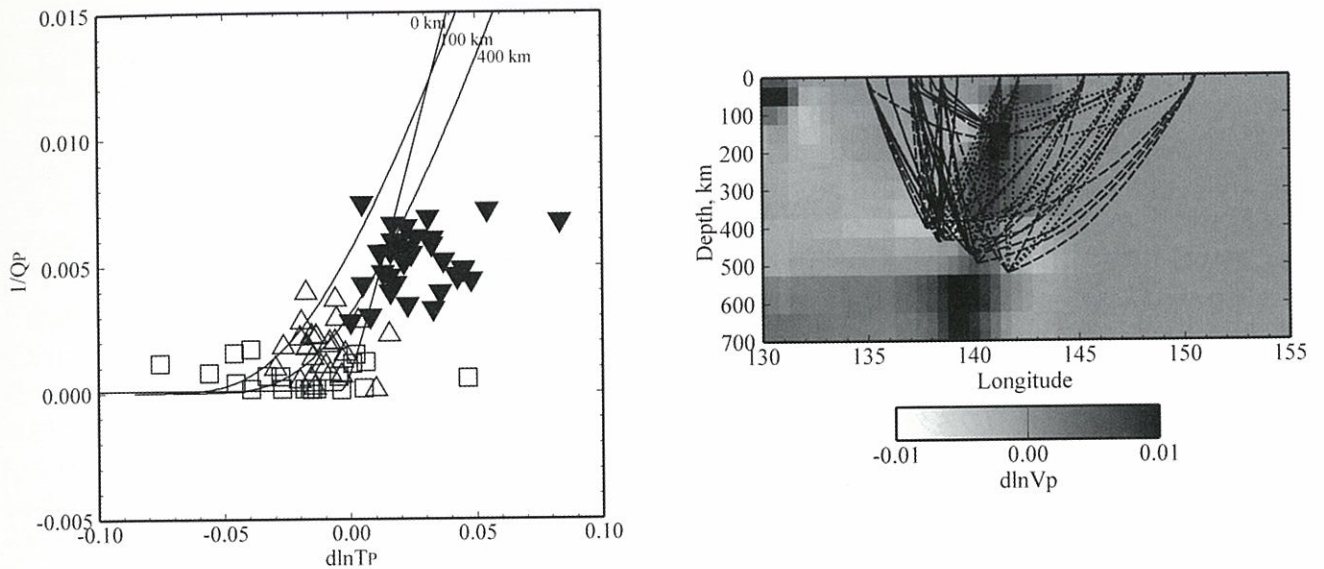


図5 (左) シンボルは観測データ、線は温度効果から予測される理論値を示している。太平洋スラブを通る波線(□: T15, OSW) やその下のマントルを通る波線(△: T17, T18, T19, T21) のデータは温度効果で説明できるが、マントルウェッジを通る波線(▼: T06, T08, T09, T12) のデータの示す正の走時異常は、温度効果で説明できないほど大きく、メルトの存在を示唆している。(右) 東西に切った断面。中央の速度の速い部分がスラブに対応している。左方向に向かう波線がウェッジを通る波線に対応。

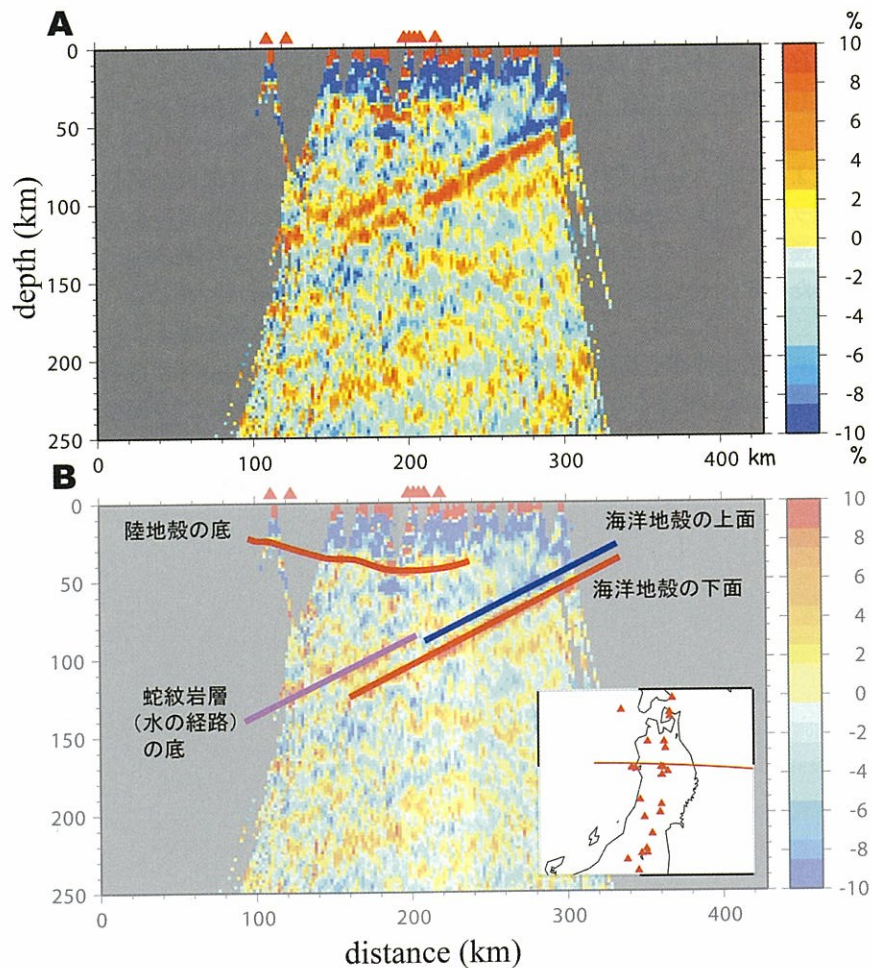


図6 (A) 東北日本下の地震波速度変化率プロファイル。(B) 解釈図で、赤色は上から下に速度が急に増えることに対応 (青はその逆)。

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)。この点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压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. これまでの経過と今年度の成果

2.1. 海域機動観測の開始

本計画研究では、平成16年度と17年度の2か年で合計10台の海底電磁力計 (OBEM) を整備した。これにより、現有品と合わせて22台のOBEMを本領域の機動観測に使用できることとなった。平成17年10月に計画研究ウと共同で実施した設置航海によって11台のOBEMをフィリピン海に設置して長期機動観測を開始した。この機動観測は、既存の観測点 (陸上の地磁気観測所および海底ケーブルによる電位差測定、その特徴的な間隔は数千キロメートル) の間を補間し、空間分解能の飛躍的な向上を目指すものである。上部マントル構造の研究を目的とする場合は、数カ月の観測期間で十分な精度の電磁気応答関数を推定することができるが、本研究では対象がマントル遷移層にあるため、必要に応じて同じ場所に繰り返し装置を設置して最長3年の連続観測データの取得を予定している。

昨年度の海洋研究開発機構の研究船「かいらい」による設置・回収航海に引き続き、今年度は洞海マリンシステムズ (株) の「あせあん丸」による航海を実施した (計画研究ウの報告参照)。10月29日 (久里浜発) から11月24日 (久里浜着) までのおよそ4週間の航海で、昨年設置した全12台 (図1a) のOBEMを回収するとともに新たに14台 (図1b) を設置した。今回も回収した

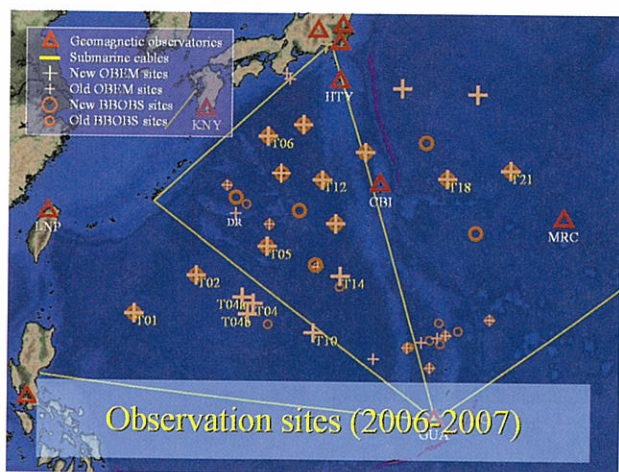


図1a 2回目の長期観測 (2006年11月設置～2007年11月回収) における海底電磁気観測点分布。

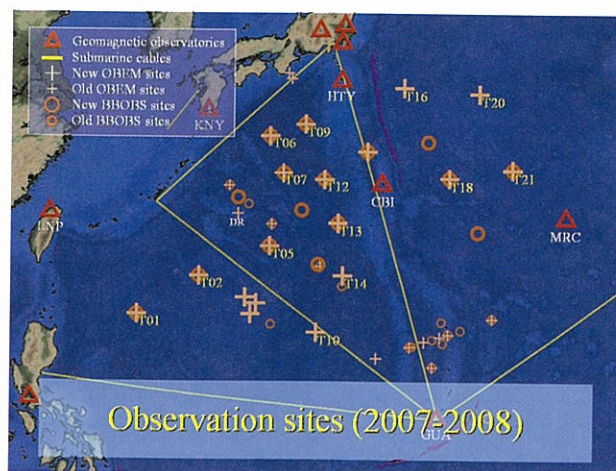


図1b 3回目の長期観測 (2007年11月設置～2008年11月回収予定) における海底電磁気観測点分布。

OBEMの記録状況は極めて良好で、主観測量（磁場3成分と電場2成分）および補助観測量（傾斜と温度）ともにほぼ全観測点で全観測期間の毎分値データが記録されていた。また、2回目の観測では、公募研究からの提案を受けて西フィリピン海盆のT04点の周辺に高密度アレイを設定した（図1a）。このアレイ観測は、スタグナントスラブの上の上部マントルに電気伝導度異方性があるかどうか、あるとすればどの方向にどのくらいの異方性があるのかを明らかにすることを目的としている。

図2は、2006年12月に発生した磁気嵐前後の2日間を選び、各観測点で得られた磁場3成分からベクトル絶対値の計算（ $\sqrt{H_x^2 + H_y^2 + H_z^2}$ ）で求めた全磁力の変動の様子を、地磁気緯度（地球磁場双極子で定義される緯度）に対してプロットしたものである。また、参考のため陸上の観測点である気象庁の鹿屋（KNY）と父島（CBI）および南鳥島（MRC）のデータを赤で示した。このように磁場データは全ての点で良好で、異常なドリフトやスパイク状ノイズなどはほとんど見られず、本研究に必要な帯域の応答関数を高精度に求めることができるものと期待される。

図3は、図2と同じ期間における各観測点の電場の変動の様子を見たものである。電場データも同様に概して良好であるが、T02の電場の1成分（最下段から4つめのプロット）は短周期のノイズが混入している。これら2成分は、記録されたデータをそのままプロットしたものである。OBEMの場合には、磁場のデータによって自由落下した装置が着底した時の方位を知ることができるので、最終的にはgeomagnetic northをx座標とする座標系に回転する。図4aとbにはそれぞれ、T14観測点において1回目（2005年秋～2006年秋）に得られたデータから求めたMT応答関数と1回目と2回目（2006年秋～2007年秋）のデータを結合して求めたMT応答関数を比較した。2年分のデータの蓄積によって、明らかに応答関数推定のエラーバーが小さくなり、長い周期まで信頼性の高い推定ができていることがわかる。

2.2. 3次元球座標系による電磁誘導モデリング

上に述べたように、既存データの解析からフィリピン海下のスタグナントスラブの直上には水の存在が原因と考えられる高伝導度異常が見出され、そこから水の分布を求めることを試みた。この電気伝導度構造を求める解析以降5年間にデータが蓄積されたため、当時よりもはる

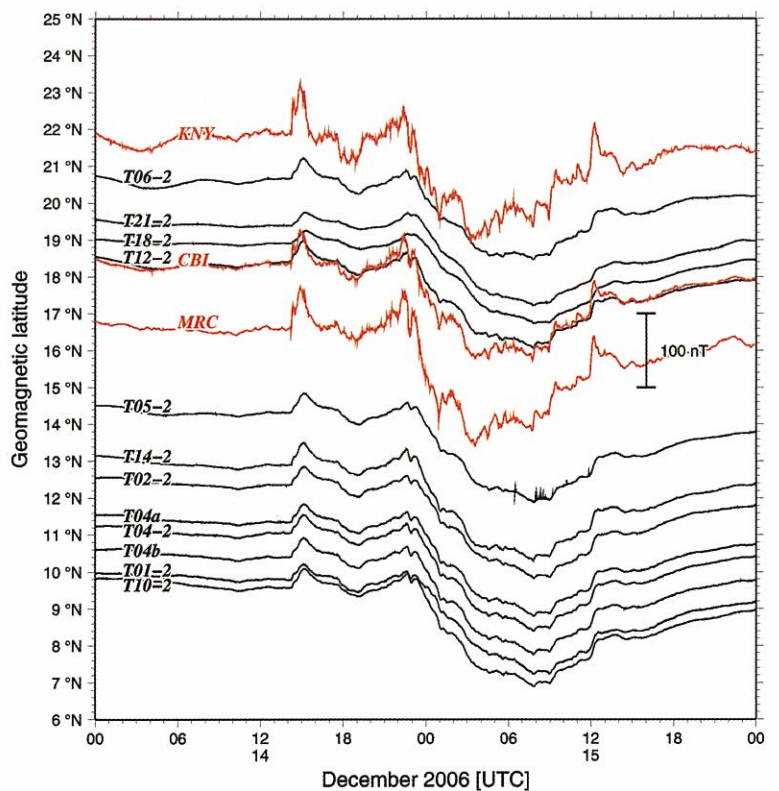


図2 2006年12月14日～12月15日の2日間の、陸上観測点（赤線）と海底機動観測点（黒線）で得られた全磁力の変動。縦軸は地磁気緯度で並べてある。

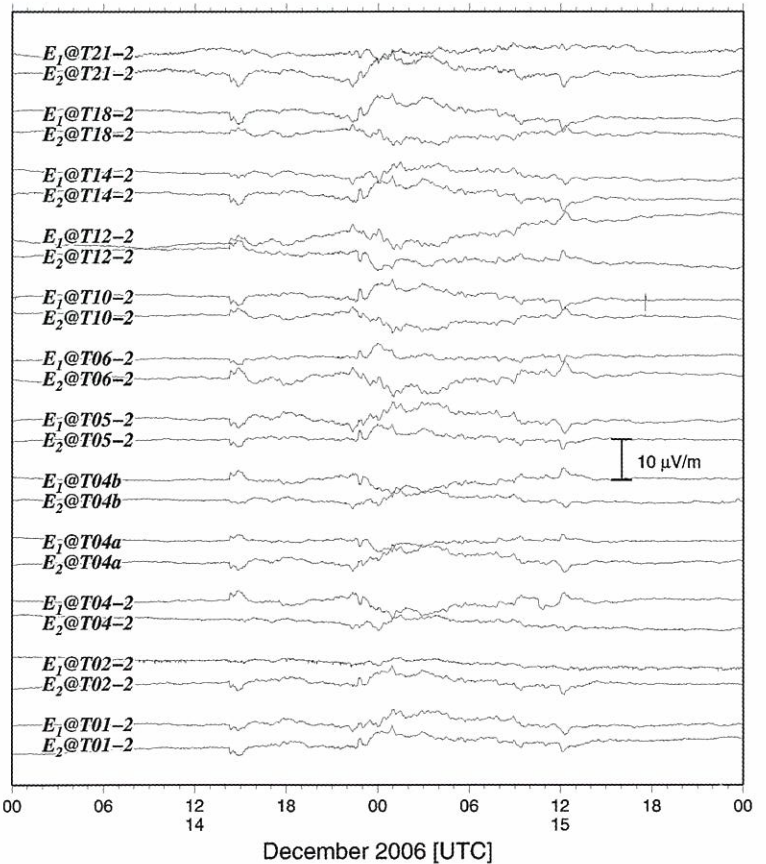


図3 図2と同じ2日間の、12カ所の海底機動観測点で得られた電場2成分の変動。

かに精度のよい応答関数が推定できる可能性がある。そこで、本計画研究では、これらの新しいデータセットを含めた、長周期（周期1日～数十日）電磁気応答関数の再解析を進めてきた。

これらの応答関数を用いることにより、Utada et al. (2003) や Kuvshinov et al. (2006) で求めた北太平洋の1次元標準モデルおよび3次元電磁気トモグラフィ (Fukao et al., 2004; Koyama et al., 2006) の更新を行い、北太平洋下のマントル遷移層の電気伝導度分布を新たに求めることができる。フィリピン海には多くの観測点においてOBEMの長期データが得られるので、1000kmよりも高い解像度でイメージングを行うことが期待される。

従来、グローバルあるいはセミグローバルな電磁気トモグラフィでは、リングカレントと呼ばれる双極子型の外部磁場変動に対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)と、MT応答関数 (OBEMや海底ケーブルによって測定される電位差変動と磁場変動の比) によって電気伝導度構造を求める。インバージョンの精度は観測から得られる情報量に依存するため、本研究ではHTF応答関数 (磁場の水平成分の振幅比) を加えることによって独立な情報が増えるかどうかを検討した。リングカレントによる電磁誘導を考えると、HTF応答関数は電気伝導度が半径方向のみに変化する場合には、電気伝導度に依存しないことが予測される。逆にいえば、HTF応答関数は構造の水平方向の不均質のみに感度があり、GDSやMT応答関数とは独立な情報を与えることがフォワード計算によってわかった (図4 a, 4 b)。また、想定される不均質により十分検出可能な振幅のHTF応答関数が観測されることも確かめられた。

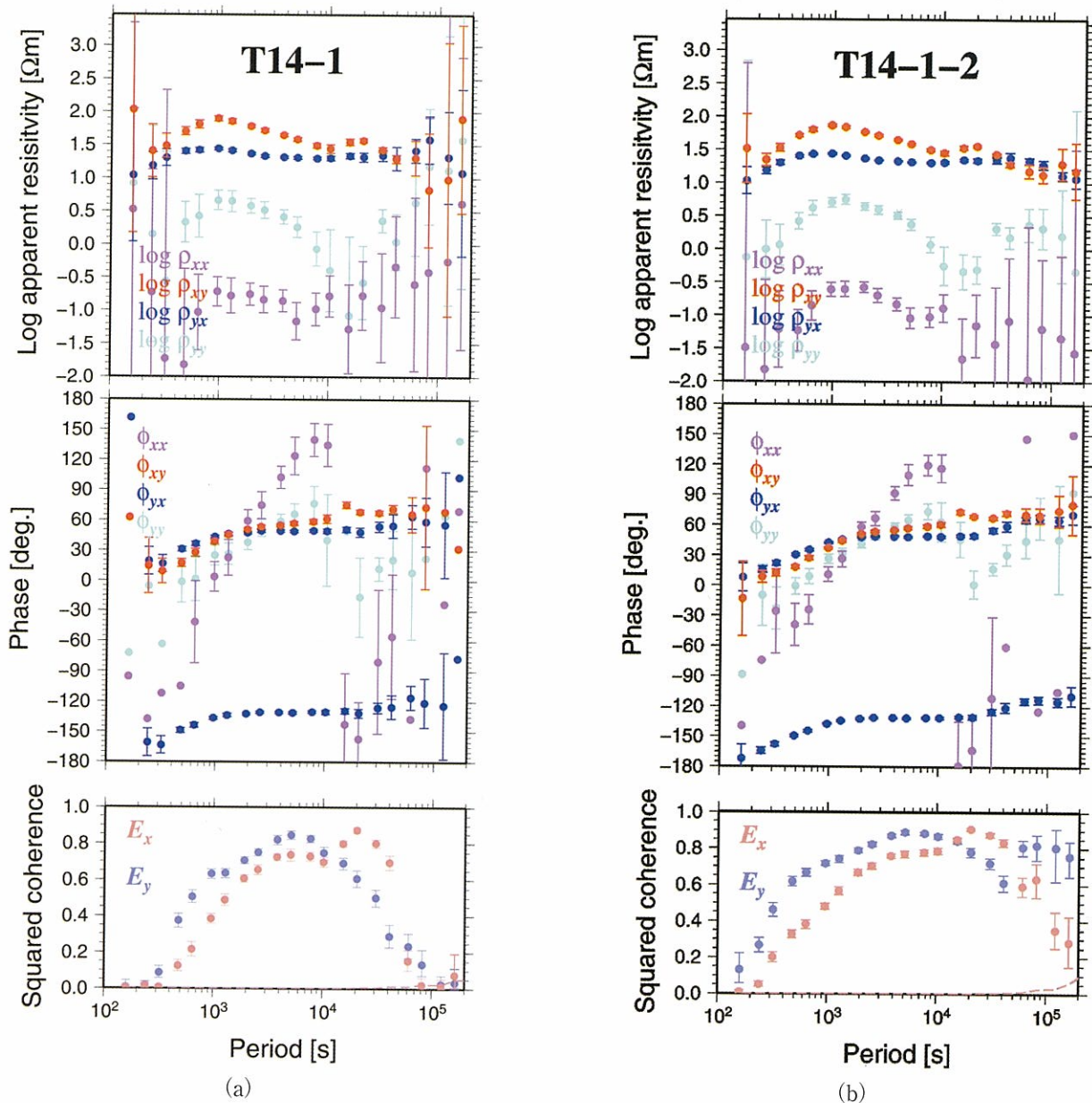


図4 (a) 1回目 (2005年秋～2006年秋) に得られたデータから求めたT14におけるMT応答関数, (b) 1回目と2回目 (2006年秋～2007年秋) のデータを結合して求めたT14におけるMT応答関数

2.2. 3次元直交座標系によるインバージョンコードの海底観測データへの適用

球座標系にせよ直交座標系にせよ、電磁気分野では実用的な3次元インバージョンは未だ開発途上である。本研究では、遷移層の電気伝導度構造の解明を主たる目的にしているが、観測データには1日程度よりも短周期の現象も記録されているので、上部マントルの電気伝導度のインバージョンも可能である。

上部マントルの解析のために使用する周期帯では、外部磁場変動は電磁誘導でほぼ打ち消されるので、平面波近似が可能になり、直交座標系で電磁誘導問題を扱うことができる。Siripunvaraporn et al. (2006) が開発したインバージョンは、唯一実用的な3次元コードであるが、海底観測には対応していない。そこで、現実的な地形の海底における多点観測で得られた応答関数からインバージョンでマントル電気伝導度を求めることができるように改良することにした。また、インバージョンにおいて観測点周辺の細かな海底地形までモデルに組み込むこと

は計算時間やメモリーの点で現実的ではない。この問題を回避するために、海底観測点周辺の細かな地形の効果を各観測点固有の補正項として表現する方法が従来から採られている。本研究では、地形補正の方法についても新しく従来よりもさらに厳密な方法を考案し、インバージョンに組み込もうとしている。現在までにフォワード計算の部分のコードの修正が終わったので、次年度には海底観測で得られた応答関数から地下構造解析が行える段階に達した。

3. 今後の展望

本特定領域の最終年度である平成20年の航海では、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する。以上のように、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、準備が整いつつある。

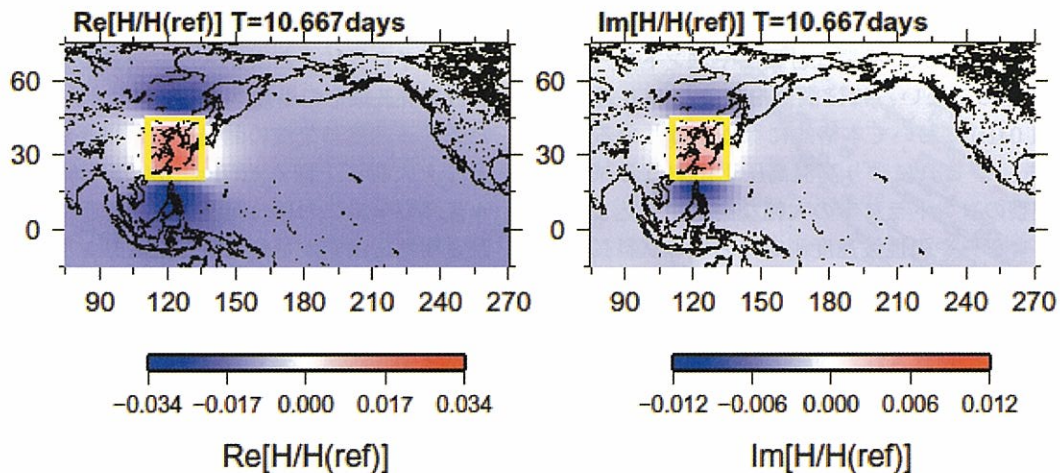


図5 a 地下400kmにある、大きさ $24^{\circ} \times 24^{\circ} \times 200\text{km}$ のブロック状の電気伝導度異常（周囲よりも電気伝導度が5倍高い）によるHTF応答関数の実数部分（左）と虚数部分（右）。基準は柿岡とした。この場合、異常体の上にHTF応答関数の大きな値が分布し、その南北にほぼ対象に小さな値が分布する。

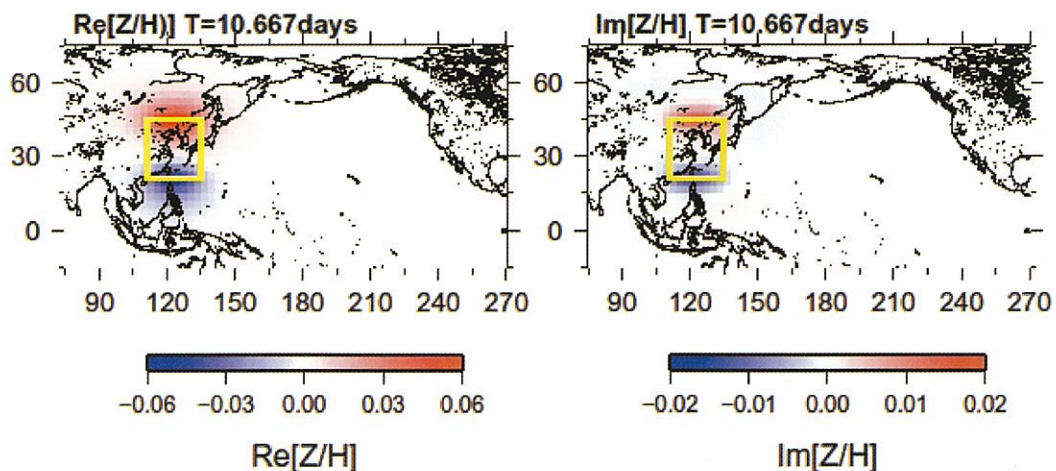


図5 b 図5 aと同じ異常体によるGDS応答関数の分布。GDS応答関数の値は、異常体の中心部の直上ではほぼゼロになり、異常体の南北縁の付近で大きな値（南北に正負の値が反対称になる）が分布する。

スラブ滞留・沈降過程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. 本計画研究班活動の概要

本研究計画班ではSPring-8の大容量マルチアンビル装置の特性を生かし、マントル遷移層および下部マントル上部領域におけるスラブおよびマントル関連物質の相転移、弾性波速度、密度、電気伝導度、変形挙動などの実験的研究に取り組んでいる。本特定領域研究が開始されて2年あまりになるが、この間研究の重要な手段であるSPring-8の大型マルチアンビル装置関連ビームライン(BL04B1)の高度化をおこなうとともに、研究に必要な技術開発をすすめ、これらマントル深部物質の高温高压挙動の解明において多くの非常にインパクトの高い研究成果があげりつつある。

昨年度末に本予算により購入した放射光白色X線の単色化装置は、今年度に入り必要な付属品やコントローラーなどの開発をおこない、ほぼ調整を終えており近くSPring-8のBL04B1において本格的に稼働をはじめの予定である(図1)。これにより高温高压下における試料の変形等の観察のコントラストの大幅な向上が見込まれ、高压相のレオロジーや弾性波速度測定における試料長の精密測定等において重要な改善がなされるものと期待される。また、弾性波測定に必要なデジタルオシロスコープ一式もSPring-8に設置され、愛媛大GRCおよび関連グループによる高温高压下超音波測定がルーチン的におこなわれている。

一方、GRC、岡山大ISEI、広島大などでそれぞれ独自の超高压変形装置を立ち上げ、マントル物質のレオロジーに関連する物性測定のための技術開発がすすめられつつある。これらの装置と技術を用いて、今後マントル



図1 SPring-8に導入し、調整をすすめつつある放射光X線単色化装置

遷移層領域での高压相の変形挙動を明らかにする研究の新たな進展が期待される。

2. 研究成果

上部マントル~マントル遷移層におけるスラブの挙動に関連し、世界をリードするいくつかの研究成果が論文として公表されるとともに、Nature誌などに新たな成果がとりまとめられつつある。特にメージャライトやリングウツダイトなどのマントル遷移層中における主要高压相に関して、弾性波速度・電気伝導度・粘性に関する実験的研究が集中的におこなわれた。ここではそのうち特に重要な成果について報告する。

1) パイロライトおよびスラブ物質の弾性波速度

放射光X線その場観察と超音波実験技術を組み合わせた弾性波速度測定法の開発を引き続きおこない、昨年度までを大幅に上回る22GPa, 1800Kという、ほぼマントル遷移層全域における高温高压条件下での高压相の弾性波速度精密測定が可能になった。リングウツダイトとメージャライトの測定結果に基づき、弾性パラメーターを決定するとともにマントル遷移層のパイロライトやピクロジャイトの弾性波速度を見積もった(図2)。この結果(1)メージャライトは高温で V_s の低下が著しい、(2)パイロライトのほうがピクロジャイトよりマントル遷移層の地震波速度変化をよく説明する、(3)いずれもマントル遷移層下部の V_s の観測値に適合しない、(4)この領域にハルツバージャイトの物質からなるスラブ物質がかなり存在する可能性がある(図3)、などの点が明らかになった(Nature誌印刷中、PEPI誌投稿中)。また、玄武岩の物質(MORB)の高压相に対する弾性波速度測定もおこない、これが従来の見積もりよりかなり低い地震波速度をもたらすことが明らかにされた。これらの研究は主にGRCおよびSPring-8でおこなわれている。

2) 含水かんらん石高压相の電気伝導度

カンラン石の高压相であるワズレアイトとリングウツダイトの電気伝導度を、これらの鉱物の安定領域下で、含水量・温度の関数としてマルチアンビル装置を用いて精密に決定した(図4)。この結果、(1)無水のワズレアイト・リングウツダイトの伝導度はこれまで考えられていたより0.5~1桁以上低い、(2)無水の場合、カンラン石-ワズレアイト-リングウツダイト-ポストスピネル転移により、各々0.5~0.8桁増加し、今まで考えら

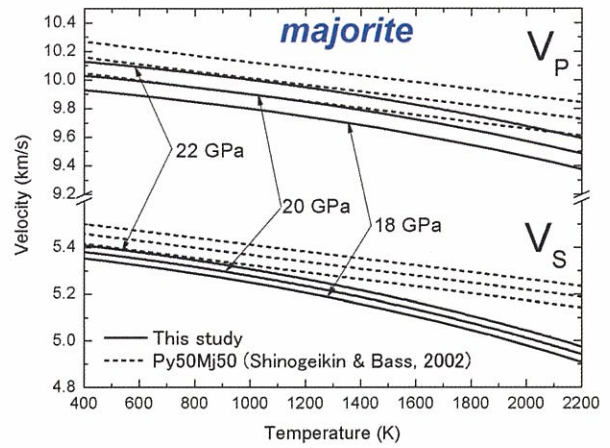
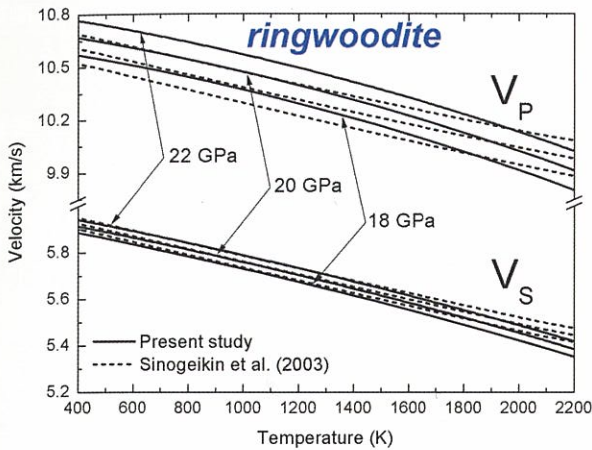


図2 マントル遷移層条件下でのパイロライト中リングウッドイトおよびメージャライトの弾性波速度変化の温度・圧力依存性

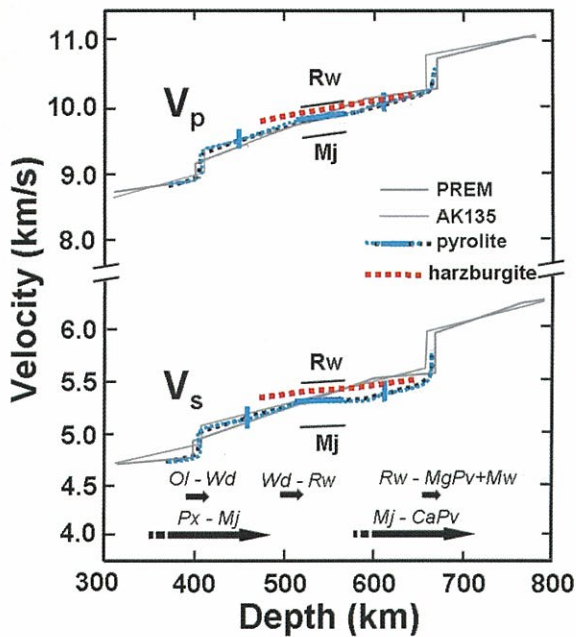


図3 パイロライトおよびハルツバージャイトの弾性波速度変化と地震学的モデルとの対比

れていたような、410kmでの二桁の伝導度増加は存在しない、(3) 海洋下のマントルの電気伝導度分布は、この領域が本質的に無水であることを示している、(4) ウェッジマントルの高電気伝導度をカンラン石とその高压相の含水化で説明することは、高地震波速度と両立しない、ということが明らかになった (図5: Nature誌印刷中, PEPI誌投稿中)。その他、リングウッドイトの電気伝導度をFe/(Mg+Fe)比の関数として測定し、また、メージャライトに対しても測定を行った (いずれもPEPI誌投稿中)。これらの研究はISEIで行われている。

3) 沈み込むスラブ中の粒径変化と粘性

スラブ物質中の相転移に伴う高压相の粒径変化は、スラブの粘性に対して重要な実験的制約を与える。ISEI・

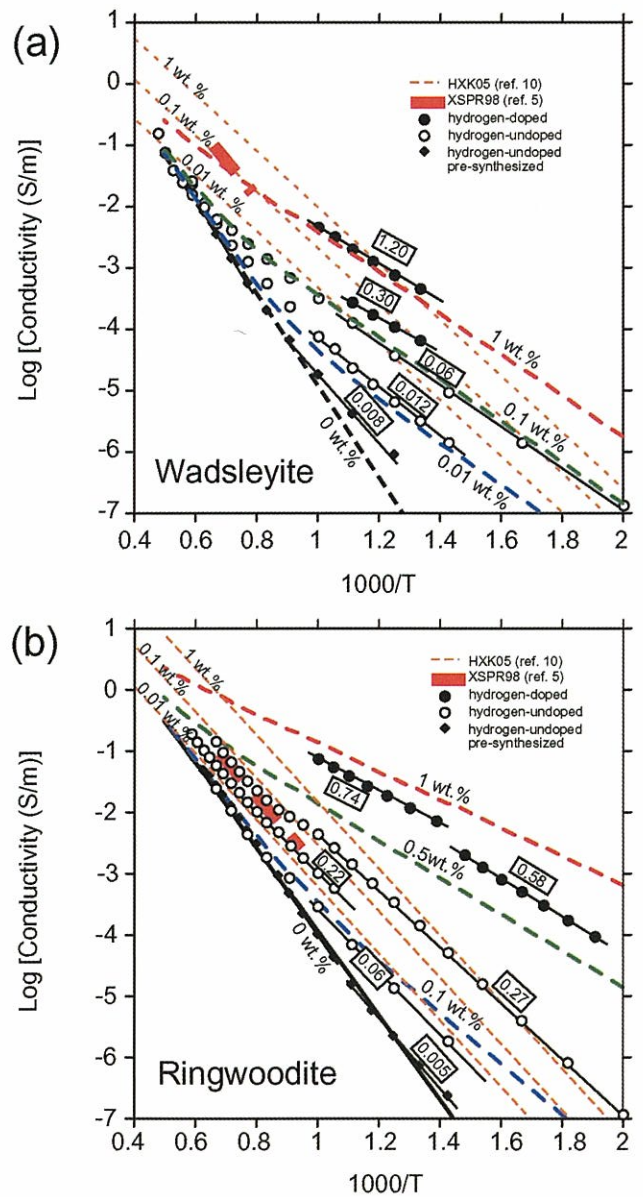


図4 サンカルロスオリビンを出発物質としたワズレアイト (a) とリングウッドイト (b) の電気伝導度の温度依存性と含水量の影響

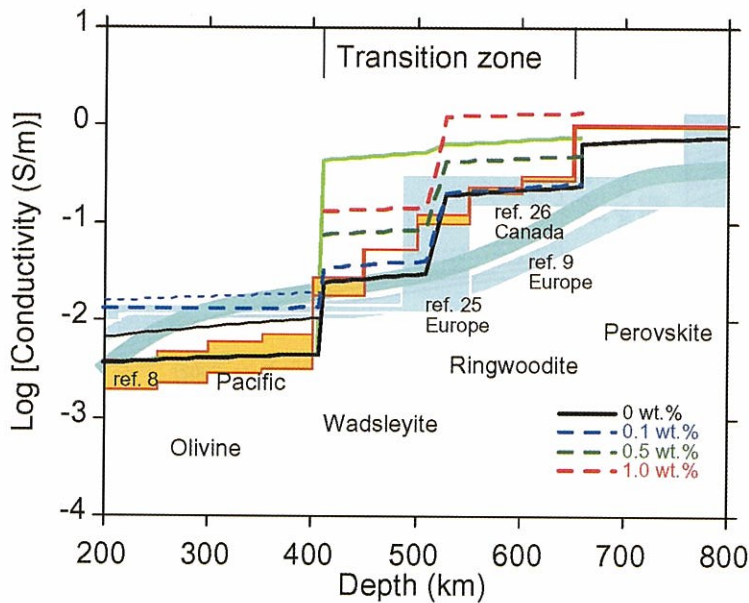


図5 上部マントル～マントル遷移層における電気伝導度の観測によるモデルと、実験結果との比較

GRCのグループではかんらん石の相転移に伴うリングウッドタイトの粒成長が極めて遅いことを明らかにし、低温のスラブの粘性が低い可能性を示したが、マントル遷移層におけるスラブのもう一つの重要な高压相であるメジャライトに対しても、実験的研究に基づきその粒径変化とそれに伴う粘性変化に関して検討した。

図6に比較的高温のスラブ(a)と低温のスラブ(b)におけるメジャライトとリングウッドタイトの粒径を、実験結果に基づいて示す。リングウッドタイトスラブ中で相転移に伴い大きく粒径が低下し、その後スラブの沈み込みの時間スケールであまり大きく成長しないのに対し、nucleation growthによる相転移とは異なる輝石のメジャライト転移では粒径変化はほとんどみられないと予想される。これらの結果はメジャライトが主体の海洋

地殻部分とその下のハルツバージャイト的なスラブ物質より高粘性の可能性を示唆する。

4) 下部マントル領域での相転移境界・密度変化

GRCおよびISEIのグループでは、マルチアンビル装置に焼結ダイヤモンドアンビルを用いた圧力発生領域の拡大をおこなってきたが、この技術開発により60-70GPa領域に至る圧力発生が可能になっている。本研究ではこの技術を用いて下部マントル深部におけるスラブおよびマントル関連物質の相転移境界や状態方程式の精密決定をおこない、滞留したスラブの下部マントル中での挙動についても実験的制約を与えることを目指している。

本年度はスラブおよびマントル中において最も重要である $MgSiO_3$ ペロフスカイトの、60GPa程度の圧力までのP-F-T精密決定をおこなった(図7)。この結果 $MgSiO_3$ ペロフスカイトの高温高压下での格子体積(密度)変化を、

広範な温度圧力条件下で精密に制約することができた。また、 $MgSiO_3$ ペロフスカイト-ポストペロフスカイト転移のアナログとして、 $MnGeO_3$ の同相転移の精密決定に関しても重要な成果があがりつつある。

3. 今後の展開

SPring-8に導入・調整しつつある単色化装置の本格的利用により、試料長の精密測定による弾性波速度測定や変形実験などのより高压下での精密実験を可能にする。また、引き続きマントル遷移層条件下での弾性波速度、電気伝導度、密度、レオロジーに関する精密測定をおこなうとともに、下部マントル領域までこのような実験を拡張する。さらに得られた様々な物性データを用い、観測およびモデリング班との共同研究により、スラブの沈

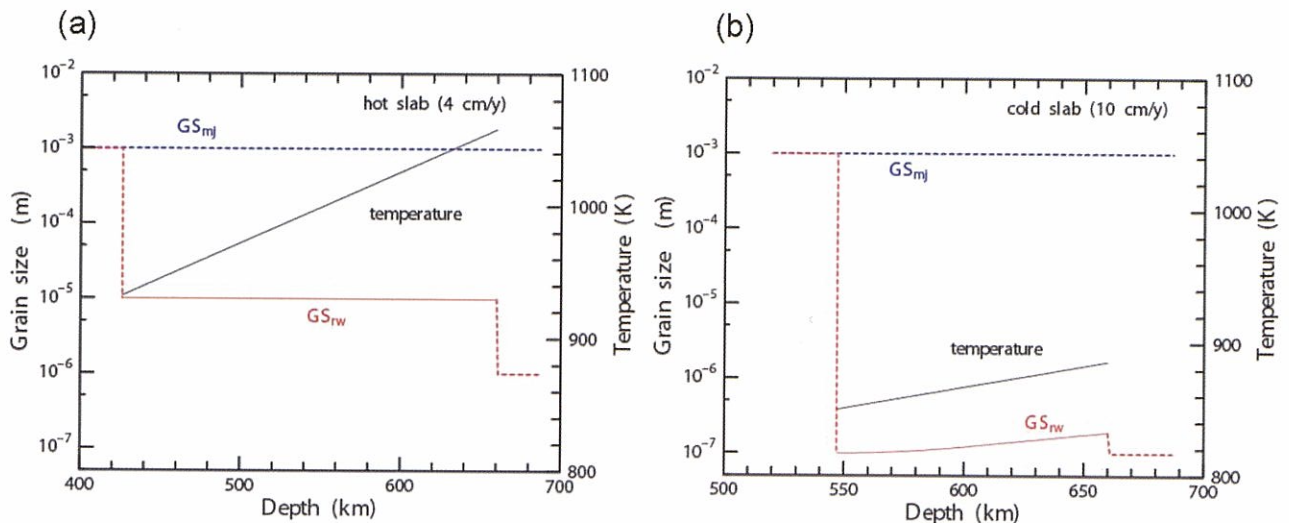


図6 比較的高温(a)と低温(b)のスラブ中における、リングウッドタイトおよびメジャライトの粒径変化

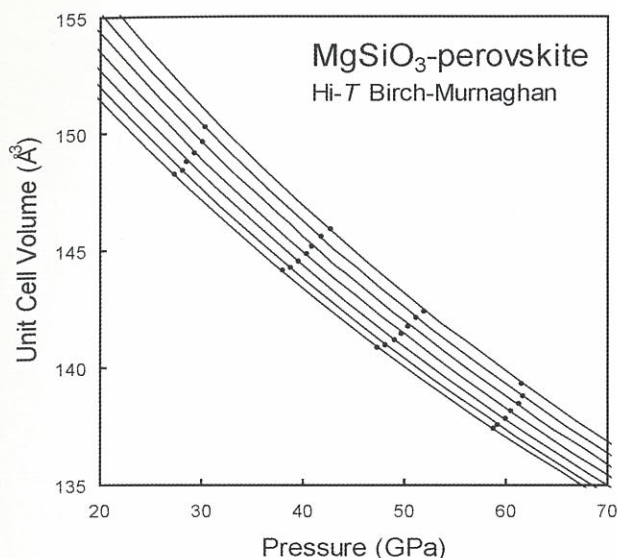


図7 X線その場観察実験によるMgSiO₃ペロフスカイトの下部マントル領域におけるP-V-T変化

降・滞留過程のモデリングを推進する。今後の本計画研究班の中心的研究課題は以下のとおりである。

1) 弾性波速度精密測定

パイロライトおよびMORBの弾性波速度をマントル遷移層全域において決定する。これらのデータを用いて、マントル遷移層全域の化学組成を制約するとともに、沈み込むスラブの弾性波速度およびその温度依存性を明らかにし、地震波トモグラフィデータとの直接対比をおこなう。一方でMgOの高温高圧下での弾性波速度精密測定をおこない、絶対圧力スケールの決定を試みる。この結果に基づき従来の状態方程式を見直し、特にスピネル-ポストスピネル相転移境界の圧力および温度依存性を再検討する。

2) 電気伝導度測定

流体水が共存する高圧相の電気伝導度を温度圧力の関数として精密決定し、水の影響を定量的に評価するための実験データの収集をおこなう。この結果と観測データの対比に基づき上部マントル～マントル遷移層領域における流体水の存在可能性を検討する。一方で、焼結ダイヤモンドを用いた圧力発生技術を利用し、下部マントル領域における高圧相の電気伝導度測定も試みる予定である。

3) 相転移、状態方程式の精密決定

引き続き放射光X線その場観察実験により、50–70GPaの下部マントル深部条件に至るMgSiO₃ペロフスカイトのP-V-T関係を焼結ダイヤモンドアンビルを用いて高い精度で決定し、状態方程式を確立する。また同様の圧力条件まで、マントルの代表的化学組成であるパイロライトの相変化、高圧相間の元素分配、密度変化を明らかにする。更に、MgSiO₃ペロフスカイトの大量合成と熱測定に基づき、ポストスピネル転移境界の圧力および温度依存性の再検討をおこなう。

3) レオロジーと脱水反応カインेटイクス

マントル遷移層～下部マントルでのスラブ構成物質、すなわちメージャライトや珪酸塩ペロフスカイトとフェロペリクレスの2相系のレオロジーを明らかにし、上部マントル・マントル遷移層でのスラブとのレオロジー的相違を明らかにする。一方で、大型高圧変形装置を用いたマントル遷移層領域での変形実験のための技術開発もすすめる。また、含水鉱物の脱水分解反応カインेटイクスについて、放射光X線その場観察などの手法により検討し、スラブ沈み込みに伴う地震発生メカニズムとの関連を考察する。

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、高压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ている。

(1) スタグナントスラブとマントルの熱的、化学的相互作用を解明し、滞留するスラブからの脱水過程とそれによって生じる含水マグマの移動過程を解明するために、水(水素)の拡散係数、含水マグマの密度と粘性等を決定したい。さらに、スタグナントスラブ内での準安定相や相転移のカイネティクスを解明し、それに対する水の影響を明らかにしたい。また、(2) 下部マントルを崩落するスラブ内部の諸過程を解明することも重要な研究目的である。そこに準安定な鉱物が存在するの否か、相転移反応がどの程度進行するのか、脱水反応が生じるのかなど、スラブの崩落中に生じる動力学過程を解明したい。さらに、(3) 下部マントルにおけるスラブの浮力を明らかにしたいと考えている。このために、核マントル境界領域までの圧力・温度を発生可能なレーザー加熱式ダイヤモンドアンビルセルを用いて、下部マントル全域にわたってスラブ物質の相平衡、各構成鉱物の密度と化学組成を明らかにし、スラブの密度(浮力)を決定し、崩落したスラブの行方をモデル化し、沈降したスラブ物質の核マントル境界部における存在様式を明らかにする。さらに、沈み込むスラブを物質科学的性質にもとづいてモデル化し、観測量との対比を可能にするために、スラブ物質の弾性定数をブリュアン散乱法などによって測定し、観測される地震波速度と比較する。そして、上記の(1)~(3)を総合して、周囲のマントルとの相互作用を考慮したモデルの妥当性を検証することを目指している。

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センターのメンバーはそれぞれ前者と後者に属している。

東工大の広瀬らのグループは以下のような研究を行った。

(1) 最下部マントルにおける相転移とMORBパイルの地震学的検出

沈み込んだ玄武岩質海洋地殻(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。MORB地殻は660km不連続面付近を除くと周囲のマントルよりも高密度なため、時間とともにマントルの底へ蓄積していく可能性が以前から指摘されていた。しかしながら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がよくわからないこともあり、実際に証拠はこれまで報告されたことがない。本研究では、最下部マントルで起こると期待されるポストペロフスカイト転移の深さがパイロライト的マントルとMORB地殻で差があることを利用し、相転移に伴う不連続面の深さの違いから、このMORBパイルの検出を試みた。

まず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の状態図を作成した(図1, 2を参照)。その結果、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明らかになった。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

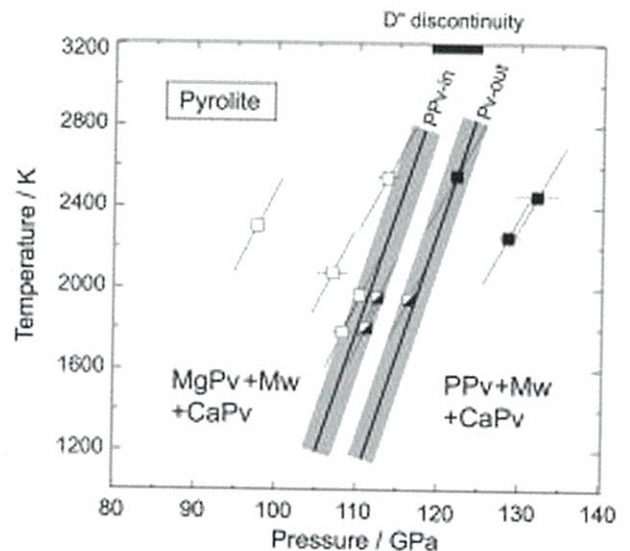


図1 最下部マントルにおけるパイロライト的マントルの状態図

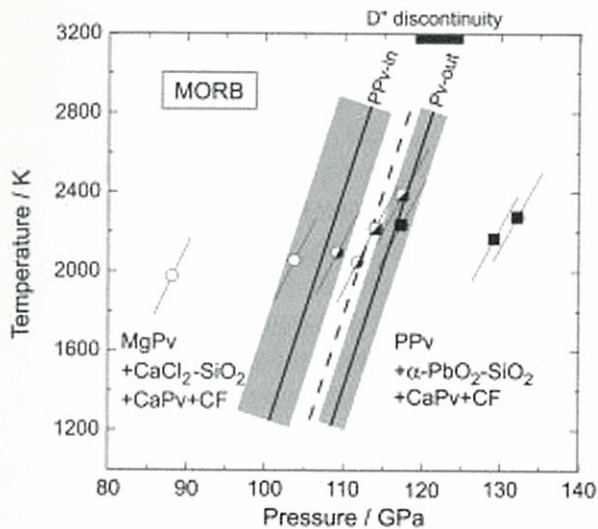


図2 最下部マントルにおけるMORBの状態図

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、図3に示すような横波の速度構造が得られた。上で予想したことと合わせると、不連続AはMORB中の相転移、不連続Bはパイロライトのマントル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。

(2) 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の同時測定

マントル最下部ではペロフスカイト相からポストペロフスカイト相の相転移、さらにその下位ではその逆反応が起こっていると考えられている。このような複雑な層構造がブルームの発生にどう関わっているかを明らかにするため、今回、両者の体積を高圧高温下で同時に測定し、熱膨張率を同時に決定した。

実験にはダイヤモンドアンビルセルを用いて、まずレーザーで加熱を行うことにより、MgSiO₃組成のペロフスカイト相を合成した。そののちさらに加圧し、再びレーザー加熱を行って、一部をポストペロフスカイト相へ転移させ、両者の共存状態を作った。そこからセルをヒーターの中に入れ、外熱式と呼ばれ

る抵抗加熱法により832Kまでの測定を行った。外熱式は温度がたかだか1000Kまでしか上がらないが、温度制御に優れた温度勾配はたかだか5 Kほどである。これは3000Kまで加熱可能だが、温度の誤差が約10%もあるレーザー加熱式と対照をなす。結果は図3に示す。

結果は、両者の体積を比べると、温度に関わらず1.5%ほどポストペロフスカイト相のそれが小さかった。またマントル最下部域の熱膨張はマントル最上部の3.6分の1に小さくなっている。すなわち、この1.5%という体積差は、温度に換算すると1300Kの差に相当する。これらのことはマントルの底付近でポストペロフスカイト相からペロフスカイト相への逆相転移が大きな浮力を生み、ブルームの発生に大きな役割を果たしていることを意味している。

東北大グループの成果は以下にまとめられる。

(1) マントル遷移層における相転移に対する水の影響

前年度に引き続いて、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、高温高圧X線その場観察実験にもとづいて解明した。高温高圧X線その場観察実験によって、リングウッドイトMg₂SiO₄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Mg₂SiO₄のpost-spinel相境界の勾配と矛盾しないが、Mg₂SiO₄-2wt.%H₂O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℃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、

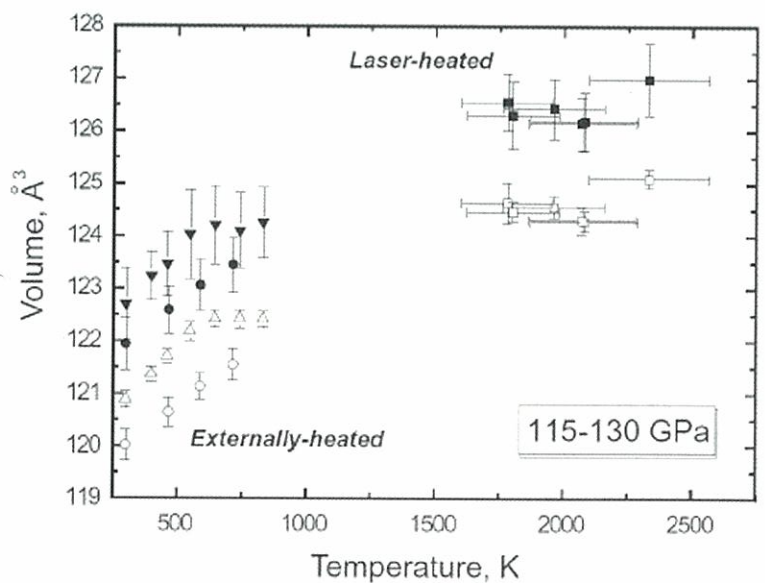


図3 ペロフスカイト相とポストペロフスカイト相の熱膨張率の同時測定：黒いシンボルはペロフスカイト相、白ぬきのシンボルはポストペロフスカイト相である。

明瞭に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。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Mg₂SiO₄-2wt%H₂Oの実験によって明らかになった。単純な系においてH₂O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になった。

(2) マントル遷移層の鉱物中の水素拡散とマントル遷移層への水の濃集機構

マントル遷移層を構成する多結晶体のringwoodite中の水素の拡散係数を測定した。Ringwoodite中の水素の拡散係数は $DH = 1.6 \times 10^{-4} \exp[-140 \text{ (kJ mol}^{-1}) / RT]$ で表される。この値はWadsleyiteおよびOlivine中の平均的な水素の拡散係数よりもやや大きい値を示している。水素の拡散係数はその他のイオンの拡散係数にくらべて大きいですが、1200℃においてさえ、10億年に約1 kmと非常に遅く、マントル遷移層が、水素の拡散過程によって水素濃度が均質になることはない。

水素の拡散係数とともに、WadsleyiteおよびRingwoodite中のSiとOの拡散係数とそれへの水の影響を明らかにした。実験は、水素と同様マルチアンビル高圧装置を用いて測定した。Mg₂SiO₄他結晶体に同位体の酸素、シリコンを蒸着し高温高圧下で処理し、拡散プロファイルを九州大学のSIMSを用いて測定した。それによると、シリコンの拡散係数が酸素に比べて有意に小さいという結果が得られた。また、水の存在によって拡散係数が増加する。マリアナ海溝やフィリピン海溝下部のマントル遷移層などのように0.3–0.5wt.%の含水量の場所も存在すると推定される。一方、唐戸らによる電気伝導度と水素イオンの拡散係数の関係を用いると、マントル遷移層での含水量はこの見積もりよりも大きくなる(Koyama et al., 2006)。最近の電気伝導度の観測値によると、水はマントル遷移層内でも不均質に分布し、海溝下のマントル遷移層に水が局在することを示唆している。このような水の濃度の不均質性は、水素の拡散係数の値とも矛盾しない。水は、酸素やシリコンの拡散係数を増加させることから、水が局在したマントル遷移層は、周囲

に比べて変形しやすいことを示唆している。

(3) マントル遷移層の地震波速度異方性

沈み込むプレートには、マントル遷移層では地震波異方性が非常に大きいアキモトアイトが存在する可能性が高い。アキモトアイトの変形による選択配向性を明らかにする変形実験を行った。アキモトアイト試料はMgSiO₃組成を持っている。図4に約20GPa程度の条件で行ったアキモトアイトの変形実験後の回収試料の選択配向をEBSDで測定したものを示す。測定は、千葉大学の金川久一先生の協力を得た。この結果から、選択配向の様式は温度依存性があり、高温と低温で選択配向の様

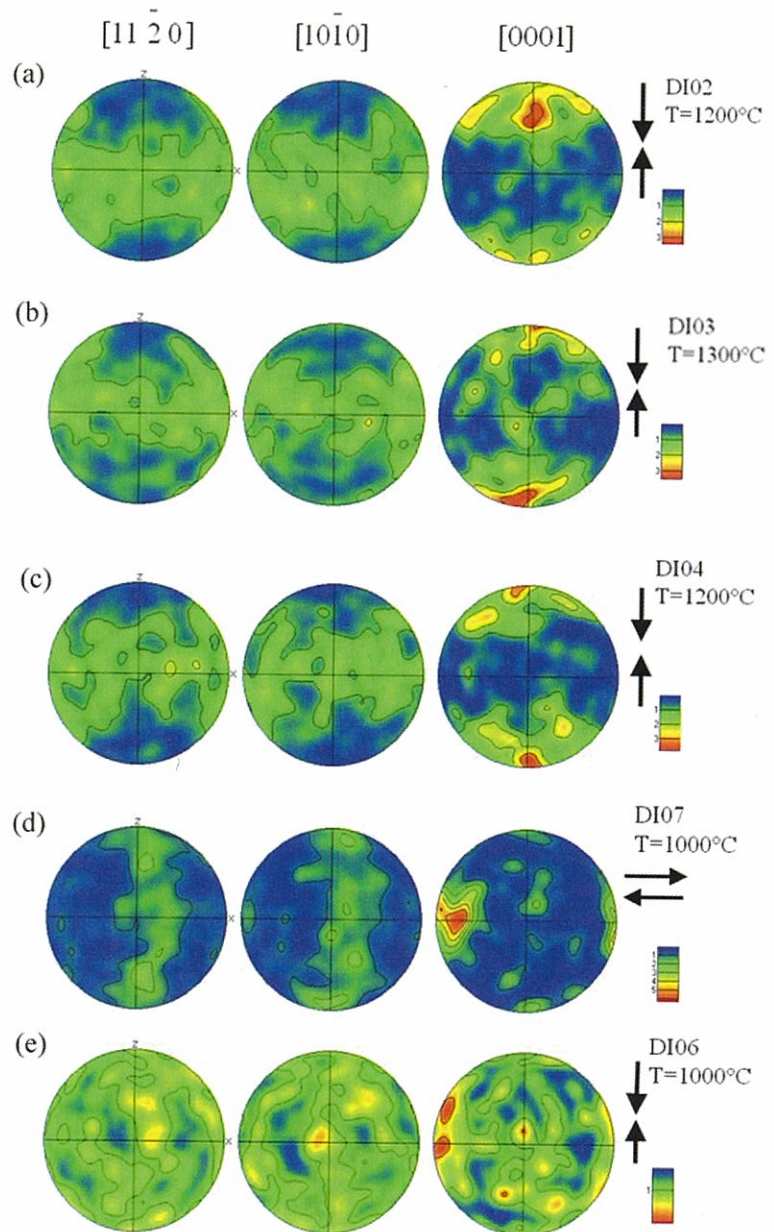


図4 アキモトアイトの応力場での選択配向。1000℃の低温と1200℃の高温条件では応力場での選択配向の様式がことなることを示している。これは、石英などに見られるように、アキモトアイトのスベリ系が温度によって変化するためと考えられる。

式がことなることが明らかになった。滞留スラブは、温度によって異なった選択配向を示し、異なる地震波異方性を示す可能性がある。今後さらに詳細に、実験を継続する予定である。

(4) スラブの沈み込みに伴う下部マントルへの水の移動：下部マントルで安定な含水相

下部マントルの条件で安定な含水鉱物として、これまでに含水D相 $MgSiO(OH)_3$ 、含水 δ 相 $\delta-AIOOH$ の2種類が知られている。D相は、橄欖岩組成のマントル中に存在する含水鉱物であり、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、地殻物質に含まれる含水のアルミナ化合物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_2 スチショバイトと $\delta-AIOOH$ phaseに分解する。本研究においては、分解生成物である $\delta-AIOOH$ の安定領域を明らかにする実験を行った。

出発物質は、diaspore $AlOOH$ またはgibbsite $Al(OH)_3$ を用い、レーザーの吸収剤として金属粉末を混合した。図5に $\delta-AIOOH$ 相の安定領域を示す。図から明らかなように、 $\delta-AIOOH$ は約19GPa以上約120GPa、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。これまでの実験では、少なくとも150GPa、2000K程度まで、この含水鉱物が安定であることが明らかになった。以上のように、 $\delta-AIOOH$ 相は、これまで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。 $\delta-AIOOH$ 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称化し、安定になる可能性が指摘されている (Tsuchiya et al., 2006)。今回 $\delta-AIOOH$ について、中性子回接実験を行い、圧力とともに対称化が進むことが明らかになった。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称化するためであると考えられる。

CMBは核内部からの熱流のために、大きな温度勾配をもち、CMBの温度は4000Kを超える可能性がある。このような高温においては、 $\delta-AIOOH$ 相が脱水分解する可能性がある。脱水によるCMBでの水の供給によって、この領域の融点が降下する可能性がある。地震学的に観測されているULVZは水の供給によって融点が低下することによって部分溶

融領域となっている可能性がある。

3. 研究成果の公表の活動

この班の代表者らは、国際会議や国際シンポジウム等を組織し、本特定の成果の公表を行った。

広瀬は以下の活動を行った。

公表活動

- (1) 2007年のAGU Fall Meetingにおいて、ユニオンセッションStructure and Processes in the Lower Mantle and at the Core-Mantle BoundaryのCo-convenor

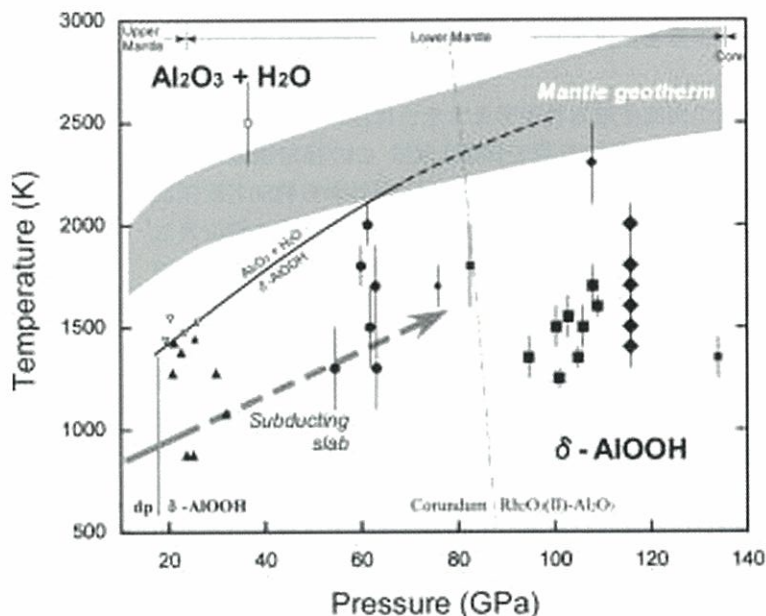


図5 含水高圧鉱物 $\delta-AIOOH$ 相の安定領域。この相は、マントル最下部でも安定である。

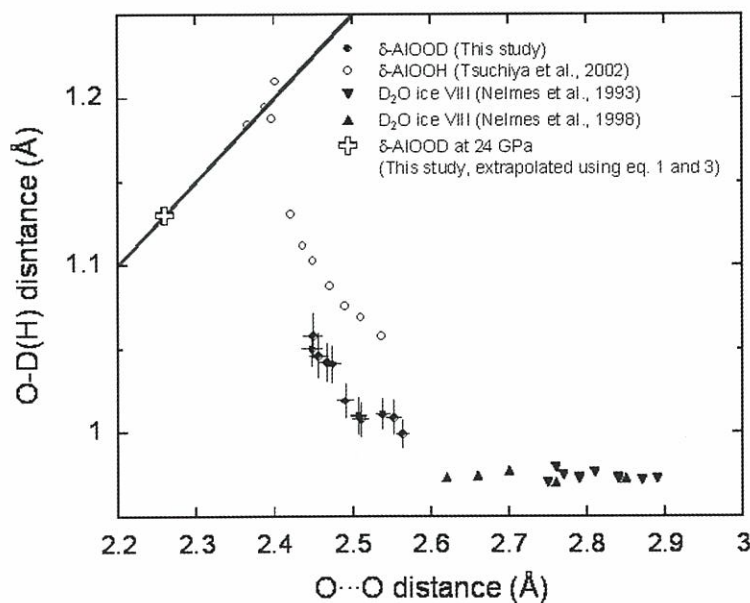


図6 $AIOOH$ の重水素は圧力の増加とともに対称化する。それによって、この相が超高压でも安定となる。

- (2) AGUモノグラフ, Post-perovskite: The Last Mantle Phase Transitionを12月に刊行予定。廣瀬はCo-editor。

大谷は、以下の活動を行った。

1) Composition and Dynamics of Earth's Mantle: Current Frontiers and Grand Challenges in Elasticity, Phase Transitions, and Rheology Studies (2006 AGU Fall meetingにおいてMR (鉱物・岩石物理) セッション) のSpecial issueを大谷をCo-editorとしてPEPIに企画している。約20編の論文が投稿されており、2008年春に出版の予定である。2) GSA monograph 421: Advance in High Pressure Mineralogyを編集し、このモノグラフはアメリカ地質学会から2007年9月に出版された。

第7回高圧鉱物物理学セミナーは、松島において2007年5月8-12日の日程で開催した。この特定領域の複数の班から多くの発表が行われた。海外から約50名、国内から約100名が参加した。現在、大谷をChief-editorとして、この会議のSpecial issueを企画している。約40編の論文が投稿されている。

4. 今後の研究計画

本研究では、滞留するスラブ内の諸過程とスラブと下部マントルとの化学的相互作用を解明することにより、スタグナントスラブの多様性、滞留したスラブのマントル深部への崩落の原因、そして崩落するスラブのダイナミクスを解明する。そのために、以下の研究を行う。

下部マントルの相転移と密度の解明

核マントル境界にいたる広い圧力領域において、高温高圧X線その場観察実験にもとづきスラブ物質の密度を決定し、崩落するスラブの浮力を明らかにする。さらに、スラブ物質の高圧高温下X線その場観察実験を精力的に行い、スラブ物質の鉱物組み合わせ、各鉱物の体積を下部マントル全域にわたって決定する。さらに合成された試料を回収し、分析透過電子顕微鏡により、各鉱物の化学組成を決定する。

CMBと核の解明

昨年度に引き続いてレーザー加熱式ダイヤモンドアンビルセルと高輝度光科学研究センター (SP8) の強力X線の組み合わせにより、コアの圧力・温度を目指して、より高精度のX線回折データを取得し、金属鉄軽元素系、金属鉄・ケイ酸塩反応を解明する。また分析透過型電子顕微鏡を用いた数十nmスケールの微小領域分析を行う。特に核マントルの境界領域に由来すると思われるOs同位体異常の起源を解明するためにPt, Os, Reの金属鉄とメルト間の分配を高温高圧条件で明らかにする。

高圧高温下における弾性波測定

地震学的情報と対比するために、ブリュアン散乱法を用いて、ペロプスカイト相など下部マントル高圧鉱物の弾性定数の測定を行う。これまで培ってきた高圧高温発生技術を有効に活かし、レーザー加熱法のみならず、抵抗加熱法の技術開発を進めて、高温高圧でその場X線観察を行いつつブリュアン散乱測定を行うという大きな技術的課題に挑戦する。

地球深部の融体

前年度に引き続いて上部マントル最下部に重い含水マグマが存在することを示した。この研究をさらに推し進め、さらに詳細なマグマの密度測定、粘性率の測定とこれらの性質への水およびCO₂の影響を解明する。同時に、核およびCMBに存在する金属鉄メルトの性質を解明するために、鉄、鉄系元素系のメルトの密度、粘性率、表面張力等の測定を行う。

元素の拡散、流動と応力場での選択配向

マントル遷移層から核マントル境界に至る条件のもとで元素の拡散過程とそれへの水の影響を解明する。

前年度に引き続き、無水および含水の条件で高圧鉱物中の水素、酸素、珪素などの拡散速度と測定し、これに対する水の影響を明らかにする。これらの結果を用いて、マントル遷移層や下部マントルの流動性や電気伝導特性を解明する。応力場でのマントル物質の選択配向およびこれに対する水の影響を明らかにする実験を継続する。

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

— 4年目の成果と今後の展望 —

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、これまでの研究でプレート沈み込みに伴って多量の水がマントルに沈み込むことが分かったことから、今年度は沈み込んだ水の深部での挙動を調べるための研究を開始した。また沈み込むスラブの海側のマントルの低速度域について、モデリングに基づいて考察を行った。(2)の研究では、地球進化モデルについて、地球史の各段階でのスーパープルームの挙動を系統的に調べるためのシミュレーションを行なった。3次元地球殻マントル対流のシミュレーションでは、今年度は地球初期に想定される高レーリー数までの広いレーリー数の範囲で、熱対流パターンの変化を系統的に調べた。また、現在の地球の深部の対流運動を再現するために、実際の地球に想定される大きな水平粘性率変化を扱えるシミュレーションコードを開発し、マントル定常場の計算に用いることによって、観測されるジオイド異常を説明出来るモデルを得ることが出来た。

(1) プレート沈み込みに伴う水輸送と島弧活動の研究

(1-A) これまでの数値モデルおよび岩石学的研究により、プレートの沈み込みに伴い、多量の水がマントルに沈み込みうるということが分かってきた(例えば、Iwamori, 2007)。沈み込みの際、水を含んだ海洋地殻は比較的浅所で脱水を蒙るが、その水がスラブ直上に含水層を形成し、より深部にまで持ち込まれる可能性が指摘された。スラブからの脱水反応は、主に200km以浅で起こり、沈み込み帯に火成-変成作用をもたらすが、スラブ直上のマントルウエッジ底部は、なお数百から数千ppmの水をNAMsに含んだまま沈み込み、遷移層にまで水を持ち込むことが予想されている。その水のフラックスは、海嶺やホットスポット火成活動での脱ガスフラックスに匹敵するあるいは上回る。スラブ直上の含水層の存在は、近

年の地震波解析からも支持されており(例えば、Kawakatsu and Watada, 2007)、地球規模水循環の入り口の様子が解明されつつある。

より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、(1) 対流数値モデルによるフォワードな予測、(2) 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のバックワードな制約の2面から研究を展開している。(1)については、広島大学の中久喜博士と共同研究を行い、リアリスティックな沈み込みプロセス・スラブによって、水がどのように地球内部に持ち込まれるかの数値モデルを作成中である。まだ、ダイナミクスにおよぼす水の影響(浮力、相境界、粘性等)が取り入れられておらず、また計算精度面での難点は残っているものの、近似的モデルは構築されつつある。今後、さらにモデル作成を進め、フォワードな予測を行いたい。

(2)については、物質循環の「出口」である海嶺の玄武岩や海洋島玄武岩に、これらの「入り口」としての沈み込み帯からの水および伴う成分のインプットが現れていないかを、玄武岩の同位体組成を用いて検証をすすめている。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、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)の同位体組成空間の解析を行った結果、新たな構造と2つの独立成分(IC1とIC2)が見い出された(図1: Iwamori and Albarede, 投稿中)。これらの玄武岩の3つ(または6つ)の同位体比(206Pb/204Pb, 207Pb/204Pb, 208Pb/204Pbおよびそれらに87Sr/86Sr, 143Nd/144Nd, 177Hf/176Hfを加えたデータ)からなる組成空間は、たかだか2つの独立成分(ベクトル)によって張られること、および独立成分空間においては、データ分布がhomogeneous joint distributionに近い構造をもつことなどが明らかとなった。この結果は、マントルの同位体不均質が、数多くの「端成分」(DMM [Depleted MORB Mantle], EMI [Enriched Mantle 1], EMII [Enriched Mantle 2], FOZO [Focal Zone], C [Common component], HIMU [High-U/Th (μ) mantle] 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ことを示している。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、熔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。2つの元素分別プロセスの相互プロセッシングは、海嶺で生み出されたMORB（メルト成分）や海洋リソスフェリックマントル（メルト成分に乏しいハルツバーガイト）が、沈み込む際に脱水し、その水はマントルウエッジ（ここにもリサイクルしたMORBやハルツバーガイトが存在する）に付加される。これらの過程で、さまざまな割合で脱水-加水をうけたメルト成分に富む部分と乏しい部分が生み出され、さらにこれらが海嶺で再熔融し、再度沈み込み帯で流体過程を蒙る、という相互プロセッシングが推測される。そうであるならば、マントルの物質的不均質全体が、たった2つの表層近傍プロセスによって生み出されているということになり、それ以外の分別プロセス（例えば、マントルとコアの反応）はマントル対流システム外にあると考えるのが合理的となる。今後、2つのプロセスの定量的検討、同定とともに、Re-Os系のようなマントルとコアの反応に敏感と考えられるパラメーターを含めた解析を進める予定である。（岩森）

(1-B) トモグラフィーの結果は地球内部のダイナミクスに関し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いう仮説により検討して来た（まとめ：Honda et al., Island Arc, 16, 214-223, 2007）。本年度は、マントルウエッジとちょうど反対側になる沈み込むスラブの海洋側のマントルに見られる低速度層の原因について考察を行った。

上記のような低速度層が現実にあるかどうか（つまり、トモグラフィーによって解像出来ているかどうか）、また、その原因は何であるか（つまり、温度か組成か、あるいは、両方か）、については、いろいろな考えや議論がある。しかし、最近、Obayashi et al. (2006) により、この低速度層が実際に存在する事および200度程度の高温異常である事が示された。また、この高温異常は410kmの速度不連続面と良い相関があるように見える。もし、高温異常であるとする、そのような高温異常が何故、このような場所に存在するかを説明する必要がある。

我々は、おそらく最も単純なモデルと考えられる、海側に生じた何らかの高温異常がプレートの運動と共に、海溝に到達し、沈み込んで行くというモデルを考えた。このようなモデルを考えると410kmの速度不連続面の原因と考えられているolivineからwadsleyiteへの相変化が高温部分に与える影響が重要になってくる。すなわち、この場合は、410kmの相変化は、高温部分の下降運動を遮る方向に働く。このような傾向は、前述の高温異常と410kmの相関を説明するのに都合がよい。

図2は数値シミュレーションの結果の一例を示す。モデルでは、プレートの運動をキネマティックに与え、温度異常は楕円状の高温異常を仮定した。図において、左は410kmの相変化を考慮しているが、右側では410kmの相変化を考慮している。

この結果から判明する事は相変化を考慮すると高温部が410km付近に存在する事と、相変化は高温部を“停滞”させる事である。いわば“スタグナント・プルーム”の状態になっている。

次の問題としては、この高温プルームの起源である。我々は、その起源として、1-2億年前に発生したと考えられているスーパー・プルームの可能性を検討した。その結果、空間的には直径3000km程度、温度異常としては300度程度のものであれば、スーパー・プルームの可能性がある事がわかった。

我々の結果は、海溝の海側に存在

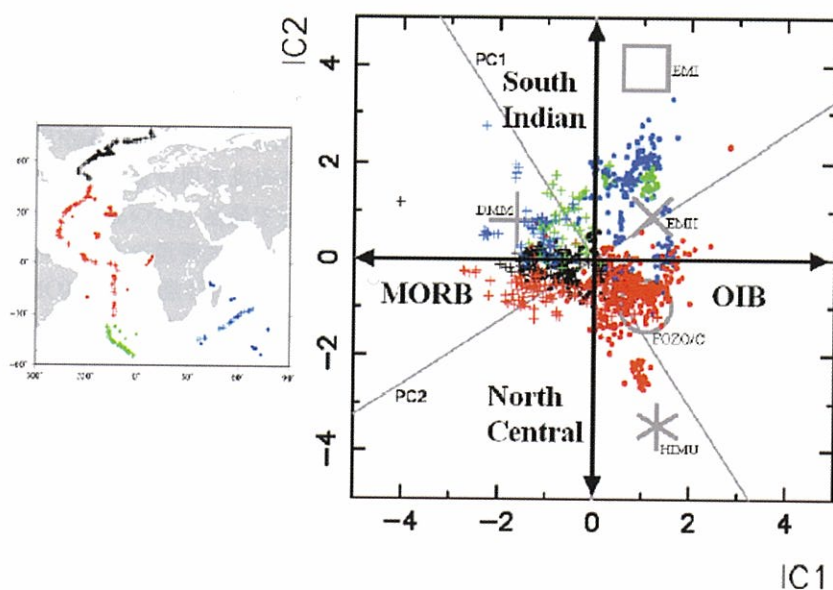


図1 大西洋およびインド洋のMORBとOIBの同位体組成空間を、検出された2つの独立成分（IC1とIC2）空間に変換投影した図（Iwamori and Albarede, 投稿中）。IC1は、OIB（丸印）とMORB（+印）を明瞭に分け、IC2は地理的分布（色で区別される：左図がインデックスマップ）を分けており、実際に2つの独立な情報に対応することが分かる。PC1とPC2は主成分（principal component）、灰色な大きなシンボルはconventionalなマントル端成分を表す。

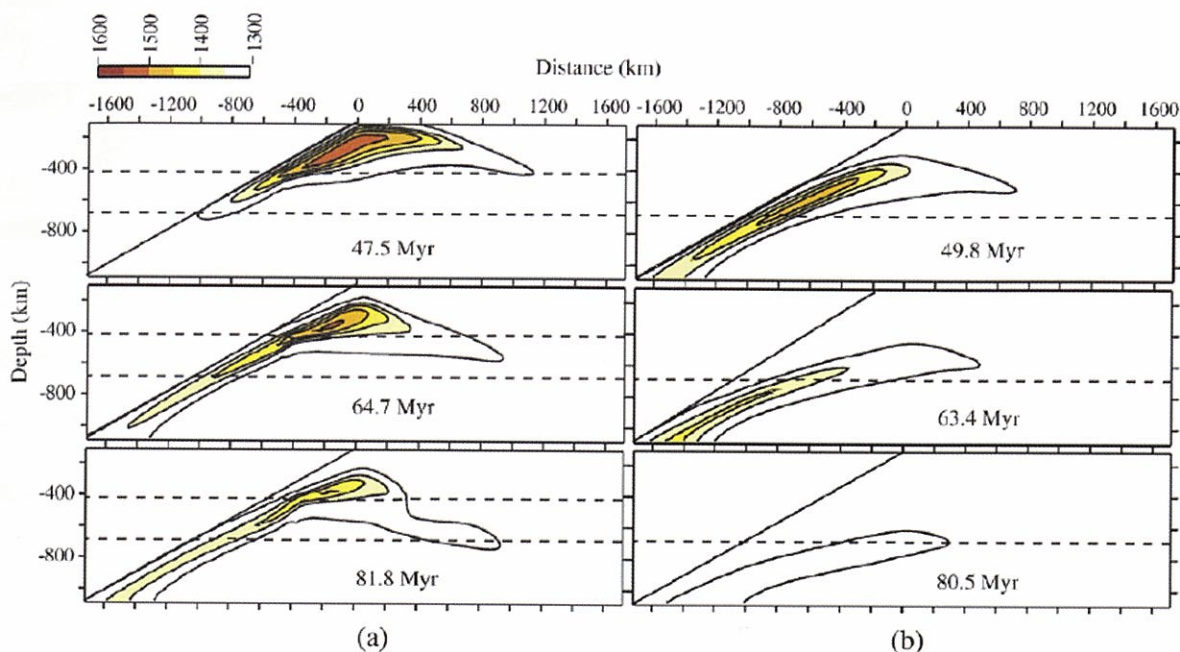


図2 温度分布図。数字は計算をスタートしてからの経過時間。(Honda et al., EPSL, 261, 565-577, 2007)。

する低速度層が様々な地球科学的的重要性を持っている可能性を示している。例えば、高温領域の形態は、相変化の性質によっても変化するので、相変化の性質をある程度、制約できるであろう。また、過去のブルームの痕跡であるとするならば、過去のブルームの影響が到達した場所等の制限を与えるであろう。さらに、高温域がスラブの沈み込み場所の近辺に留まっている事は、海溝付近の火成活動に何らかの影響を与える可能性があるかもしれない。

以上の成果を踏まえ次年度（最終年度）は、上記のモデルを改良し、これまでの結果と合わせて、トモグラフィ等の観測と数値シミュレーションに基づいた日本周辺の沈み込みのテクトニクスの作業仮説を提示したいと考える。モデルの改良については、前述の研究でスラブの動きを完全にキネマティックに与えた点と、スラブの温度を考慮しなかった点を改良する予定である。準備状況としては、スラブの沈み込み、特に深い部分について自由度をあげたモデルを、ほぼ完成しており、それを上の問題に適用しつつある段階である。スラブのスタグネーションも原理的には考慮可能であるので、それも考慮したモデルを作成したいと考えている。(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) 本年度も前年度に引き続いて、地球史の各時代に於けるスーパーブルームの挙動を系統的に調べた。具体的には、冥王代から太古代初期のマントルに期待されるマントル平均内部加熱率を仮定し、プレート運動を含むマントル対流・火成活動結合系の2次元モデルを動かす、統計的定常状態に於いて、沈み込んだ海洋地殻の溜まりとして下部マントル深部にスーパーブルームが発

達するか否か、発達するならどのような力学的挙動を示すかを調べた。

結果の一例を図3に示す。図中Hはマントルの平均内部加熱率をあらわす。また、地球史においてそれぞれ対応する年代を括弧内に示す。今年度は、 $H > 25 \text{ pW/kg}$ のケースを計算した。図から、太古代初期以前の、内部熱源が非常に強かった時代は、スーパーブルームが十分発達できず、マントルは、太古代中期以降と比べて化学的により均質であったことがわかる。これは、沈み込んだ海洋地殻は、周りのマントルより放射性元素が濃集しており強く加熱されるため、スーパーブルームを形成しても、短時間のうちに組成的な負の浮力に打ち勝つだけの熱的浮力を獲得し、対流不安定を起こして、火成活動を含む激しいブルーム活動を起こし、周りのマントルと攪拌・混合してしまうからである。この際生ずる火成活動では、時として深さ700km以上にまで広がる「マグマの池」とも言えるマグマ生成域が生成した。

さらに、このスーパーブルームの挙動の変化は、プレートテクトニクスの様式にも重大な影響を及ぼすことがわかった。太古代中期以降のケースでは、時折、安定に存在するスーパーブルームから上がってくるブルームのため新たな海嶺が形成される以外は、プレート運動は比較的定常的に起こっており、プレートサイズも図に示した箱の横幅のおよそ1/2または同程度で安定していた。しかし、太古代初期以前のケースでは、スーパーブルームが対流不安定を起こす際に、激しい火成活動と対流運動のため、プレートは小さな断片に分裂してしまい、もはや、現在の地球に見られるような剛体の板の整然とした運動ではなく、よりカオティックな運動をした。

以上の結果は、ネオジムの同位体比から推測されるマントルの化学進化や、大陸の成長曲線・構造進化から推

測される地球のテクトニックな進化と整合的である。ネオジムの同位体比からは、初期のマントルは化学的分化と攪拌・混合を繰り返し、結果として現在より均質であったことが示唆されている。また、大陸の成長曲線や構造進化からは、太古代初期の頃は、地球は無数の小さなプレートで覆われており、大陸地殻は形成されても激しいマントル対流によりすぐにマントルにリサイクルしてしまい、今日見られる大陸のように十分発達する間がなかったことが示唆されている。これらの特徴は、初期の地球に於けるスーパーブルームの対流不安定性によって理解されることが、今回のシミュレーション結果から示唆される。

これまでの冥王代から現在に至るまでの系統的なスーパーブルームとプレート・テクトニクスシミュレーションにより、太古代から現在に至る地球のテクトニックな進化とマントルの化学進化の大枠を理解するための基盤となるモデル構築のめどが立った。最終年度は、このモデルを完成させることを目指す。

これまでのシミュレーションの重要な結果は、時代をさかのぼるにつれて、初期の地球では、スーパーブルームはより活発かつ不安定に、プレート運動はよりカオティックに、マントルはより化学的に均質になるというものであった。しかし、一般に、プレート運動の特徴やマントルに於ける化学的不均質性の発達・対流による攪拌混合は、対流を起こしている「容器」のサイズや形状に依存することが知られている。もちろん、これまでのシミュレーションを3次元球殻としてのマントルで行うことが理想であるが、これは、現在の計算機の性能を考慮するとおよそ非現実的である。そこで、最終年度は、「容器」(=2次元の矩形領域)のアスペクト比をこれまでの2から4に増やし、計算結果が容器のサイズにどれほど依存するかを調べる。

現在、太古代中期に相当するマントル平均内部加熱率でそのような計算を行っているが、その途中経過を図4に示す。全体としては、対応する従来のシミュレーション結果と同様の結果を得ているが、容器の横幅が増えた分、マントル対流によるマントルの冷却効率が落ち、スーパーブルームの活動がより激しくなる傾向が見られる。今後、さらに平均内部加熱率が高いケースについて計算を実行し、「成果」の項で述べた結論、特に、太古代初期以前のプレート運動が、現在よりカオティックであったと言う結論の妥当性を検討する。

以上の研究により、地球形成期を除き、それ以降、マントルは化学的にどう進化し

たのか、その結果地球のテクトニックな活動は時代とともにどう変遷してきたのか、と言う問いに対する首尾一貫したモデルが完成すると期待される。さらに、この首尾一貫したモデルは、今後、マントルに於ける水・二酸化炭素など揮発性元素のサイクルを理解する上でも重要な基盤となると期待される。(小河)

(2-B) 球殻という形状で高粘性流体による熱対流がどのようなパターンをとり、どれだけの熱を輸送するか、という情報はマントルに見られる構造の空間スケールや地球の進化と寿命を議論する上で基本となるものである。ここでは地球のマントルに対応する半径比の球殻で、相対的な浮力の大きさであるレイリー数(Ra)について臨界値から6桁以上までを実現し、熱輸送量および典型的な空間スケールについての系統的な調査を行った。従来は臨界値から3桁程度までであった調査領域を、地球シミュレータを用いた高解像度計算により大幅に拡

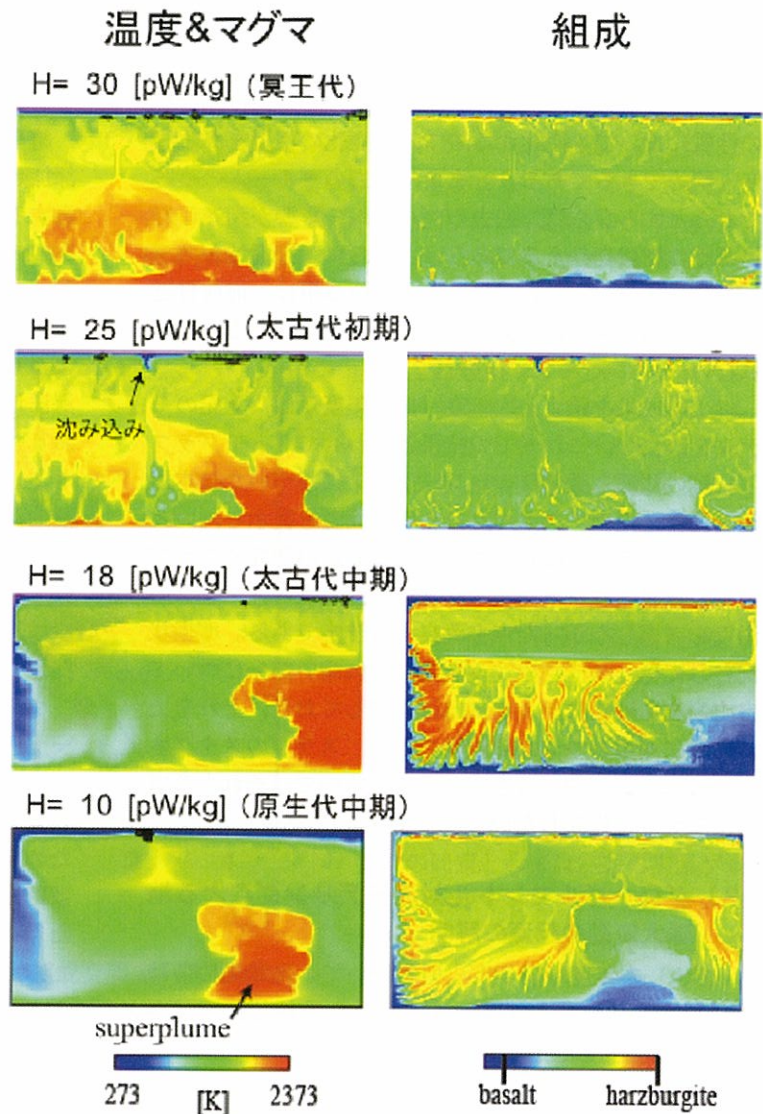


図3 プレート運動を含むマントル対流・火成活動結合系の2次元モデルの例。

温度・マグマ分布

組成分布

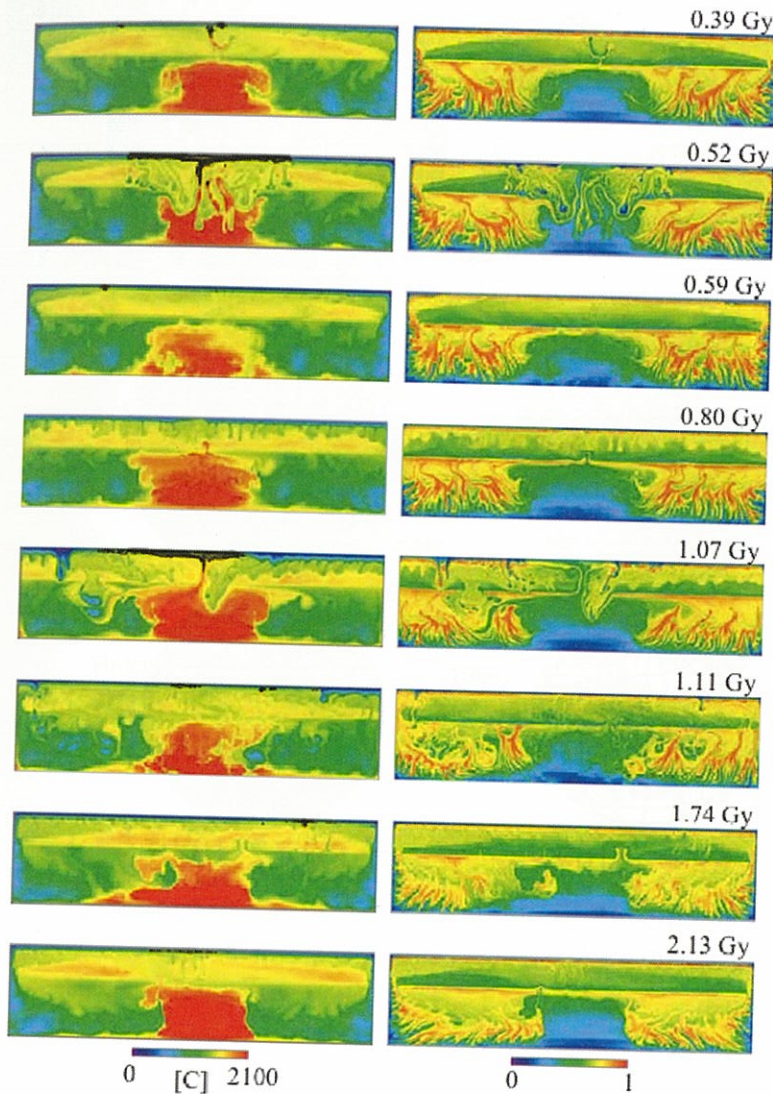


図4 モデル領域（2次元の矩形領域）のアスペクト比をこれまでの2から4に増やし、計算結果の領域依存性を調べた例。太古代中期に相当するマントル平均内部加熱率での途中経過を示す。

大することに成功した。過去のマントルではRa数は高かったと推測されるが、ここまでのRa数を実現すると地球史のほぼ大部分の時代についてのマントル対流を網羅することができる。

最も基本となる一様粘性、上部冷却・下部加熱、の場合について紹介する。対流が自発的に形成するパターンとはどのようなものであるかを見るため、比較的細かい初期擾乱から計算を開始し、擾乱の影響がなくなるまでの十分な時間が経過した後のパターンで比較した。低いRa数（ $\sim 10^4$ ）では初期パターンはお互いに調整しつつ合体していき、大きさの揃った長波長の対流セルになって定常流れに落ち着く。中程度のRa数（ $\sim 10^6$ ）では、球殻の厚み全体を通して対流セルという構造が存在するがそのパターンは時間的に変化する。更に高いRa数（ $\sim 10^9$ ）では、上下の境界層近傍にのみ対流セルといえるシート状の構造が存在し、その間の深さでは時間変動

の非常に大きいブルームの上下運動が卓越する。（図5）

各深さについて平均した温度は図6のようになる。球殻という形状での上下の面積比を反映して、中間深さでの平均温度は低温側にずれたものとなっている。Ra数の増加とともに熱境界層の厚さが薄くなっているのが見てとれる。図7は各深さでの温度の標準偏差を示したものである。上下端では温度を固定しているのでゼロであり、熱境界層で大きくなっている。中間深さではRa数とともに温度偏差（水平不均質性）の大きさは小さくなっていく。

流体運動のない伝導状態での熱輸送量に対する実際の対流状態での熱輸送量をヌッセルト数（Nu）という。これをRa数とともにプロットすると、 $Ra > 10^9$ まで $Nu \sim Ra^{0.3}$ という関係が成立することが確認できた。（図8）これは高温の物体が対流しつつ冷却する時間を見積もる上で重要な関係である。図では過去の研究結果もプロットしてあり、低いRa数ではよく一致している。しかし中程度のRa数では差が見られ、従来は $Nu \sim Ra^{0.25}$ という関係が示唆されていた。我々の長時間計算により、これは長波長のパターンが存在する場合に成立する関係であり、実際には中程度のRa数では短波長側で落ち着き、Nu数も若干増大することが確かめられた。過去の研究では、線形論から導かれる臨界値付近での比較的長波長のパターンを初期擾乱としていたため、臨界値から数桁上までのRa数の場合はそのパターンで固定化されてしまい、自然なパターンに抜け出すことができなかったと結論される。（柳澤）

(2-C) マントル対流モデルを用いてトポグラフィーやジオイド異常を求め、観測と比較することはマントル内部の粘性率構造への制約条件となる。観測されるジオイド異常は、2次と3次の波長を取り除くと環太平洋上の沈み込み帯付近で広範囲な正の異常を示す。マントル対流の数値計算の手法を用いることで、従来の応答関数を用いた半解析的手法（例えば、Hager, 1984）とは異なり、マントル内の粘性率の空間変化を扱うことが可能となる。これまで、我々の2次元マントル対流モデルを用いた研究では、マントル・リソスフェア内の水平粘性率変化（LVV）、特に、高粘性の沈み込みスラブと低粘性のプレート縁辺域の存在がジオイド異常のパターンに大きな影響を及ぼすことが分かった（Yoshida, 2004）。

本年度は、現実的な密度構造を仮定した三次元球殻モデルを用いてマントル内のLVVが長波長ジオイドに及

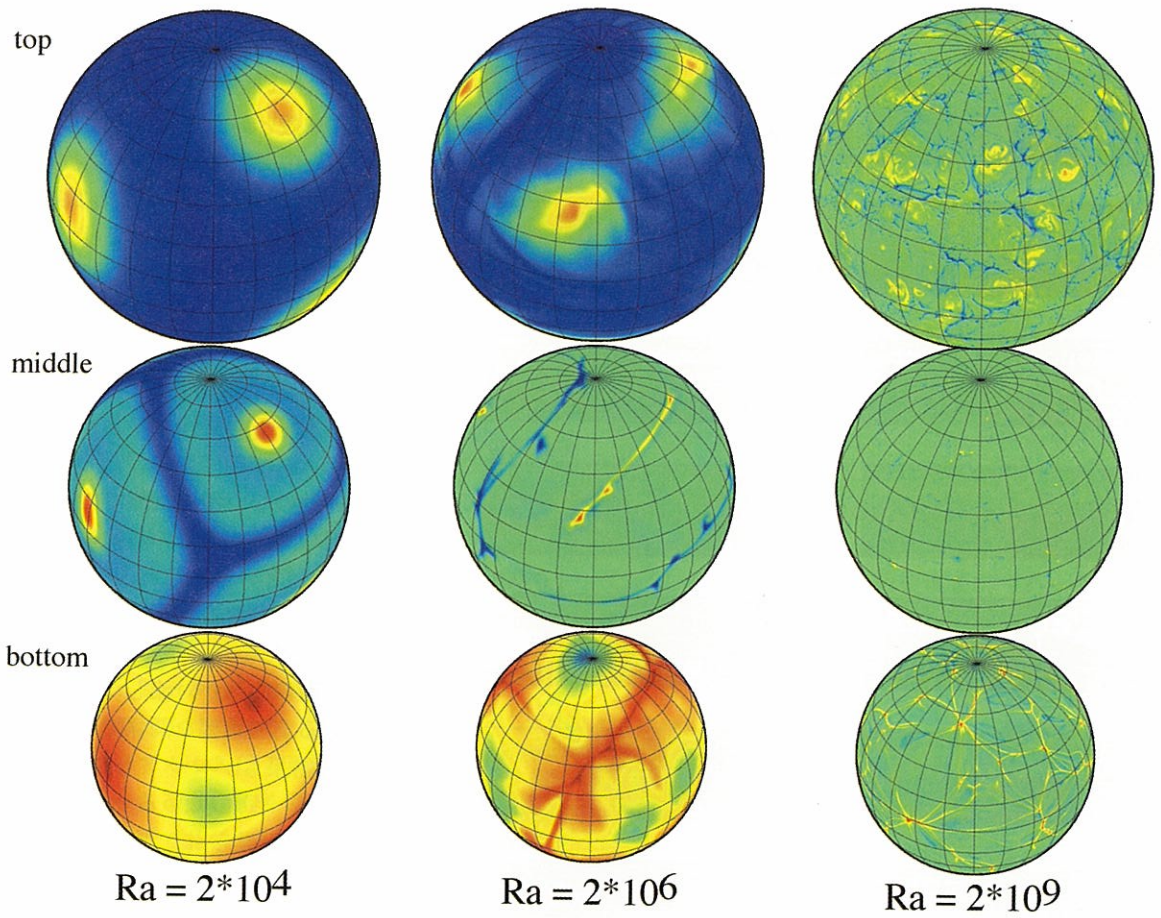


図5 球殻での熱対流の例。上下の熱境界層内と中央の深さでの温度場を表示している。Ra数の増加とともにパターンは細かくなり、中間の深さでの温度偏差は小さくなっていく。

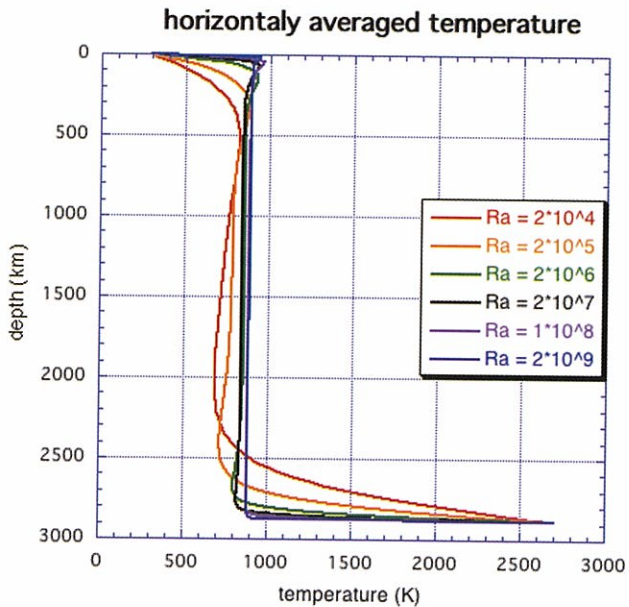


図6 水平平均した温度構造。温度勾配が大きい上下の熱境界層の部分と中央の対流コアの部分に分けられる。球殻であるため上下の非対称性が顕著である。Ra数を大きくしていくと熱境界層が薄くなり、熱流量は大きくなる。

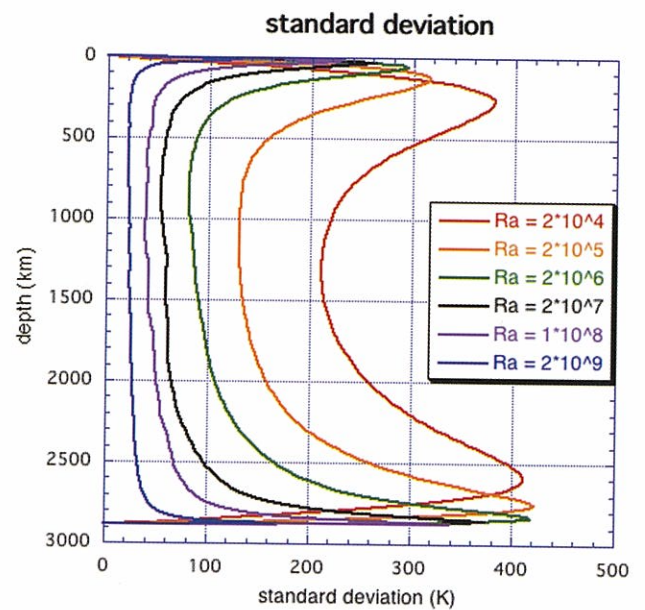


図7 各深さでの温度の標準偏差の大きさ。熱境界層の近傍で大きな不均質性を示す。対流コア領域についてはRa数とともに標準偏差は小さくなる。こちらにも球殻の効果による上下非対称性が見られる。

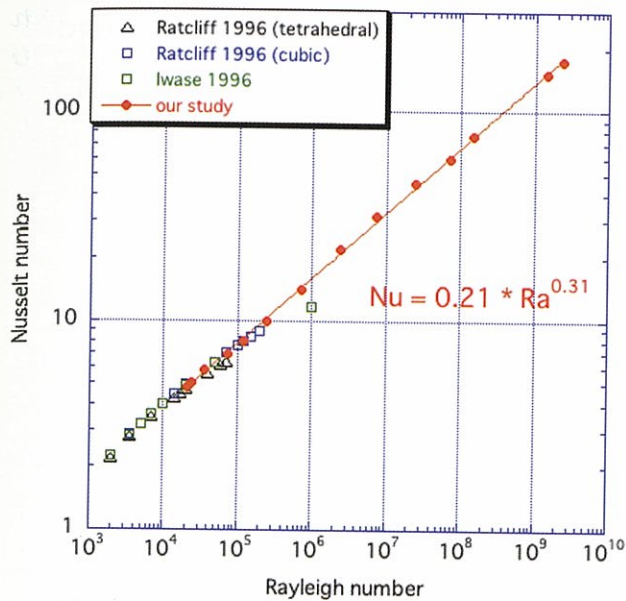


図8 Ra数とNu数との関係。丸印と直線は短波長の初期擾乱から出発した我々の結果によるもの。Ratcliff et al. (1996) と lwase (1996) は臨界Ra数付近で安定な長波長のパターンで計算したものである。

ほす影響を調べた。マンツルの定常速度場の計算には、前年度までにIFREEで独自に開発した三次元球殻マンツル対流コード (ConvGS) を用いた。このコードは、従来のインヤン格子を用いた有限差分法コード (Yoshida and Kageyama, 2004) とは異なり、基礎方程

式の離散化手法をスタッガード格子に基づく有限体積法に改良したものである。これによりマンツル物質の粘性率の空間変化をより効率的に解くことが可能になった。密度異常モデルに関しては、上部マンツルには地震活動に基づくサイスミックスラブモデル、下部マンツルにはS波トモグラフィーモデル (Becker and Boschi, 2002) を用いた (図9 (a))。粘性率の水平変化は、マンツル内には周囲のマンツルより高粘性の「沈み込みスラブ」、リソスフェア内にはグローバルな歪速度モデル (Kreemer et al., 2003) から求められた低粘性の「プレート縁辺域」を考慮した (図9 (b))。上部マンツルの粘性率を基準としたときの、下部マンツルの粘性率比をRLM、上部マンツル内の沈み込みスラブの粘性率比をRslabとし、これらの比を系統的に変化させてマンツル内の定常速度場を求め、ジオイド異常を計算した。上部マンツルに対するリソスフェアの粘性率比は 10^4 と固定した。

結果の一例として、まず、低粘性のプレート縁辺域を考慮しない場合の結果を示す。沈み込みスラブの粘性率比 (R_{slab}) を 10^4 、上部・下部マンツルの粘性率比 (R_{LM}) を 10^3 とした場合、ジャワと南米付近において局所的な負のジオイド異常が現れる (図10 (a))。これらの地域は、沈み込みスラブが下部マンツル最上部 (深さ $\sim 1200\text{km}$) まで達している地域である (Fukao et al., 2001)。このため、リソスフェアと沈み込みスラブの力学的強度が大きくなり、地表面の地形を大きく引き下げ、結果的にジオイドが負になる。次に、低粘性のプレート縁辺域を考慮した場合、これらの領域ではリソスフェア

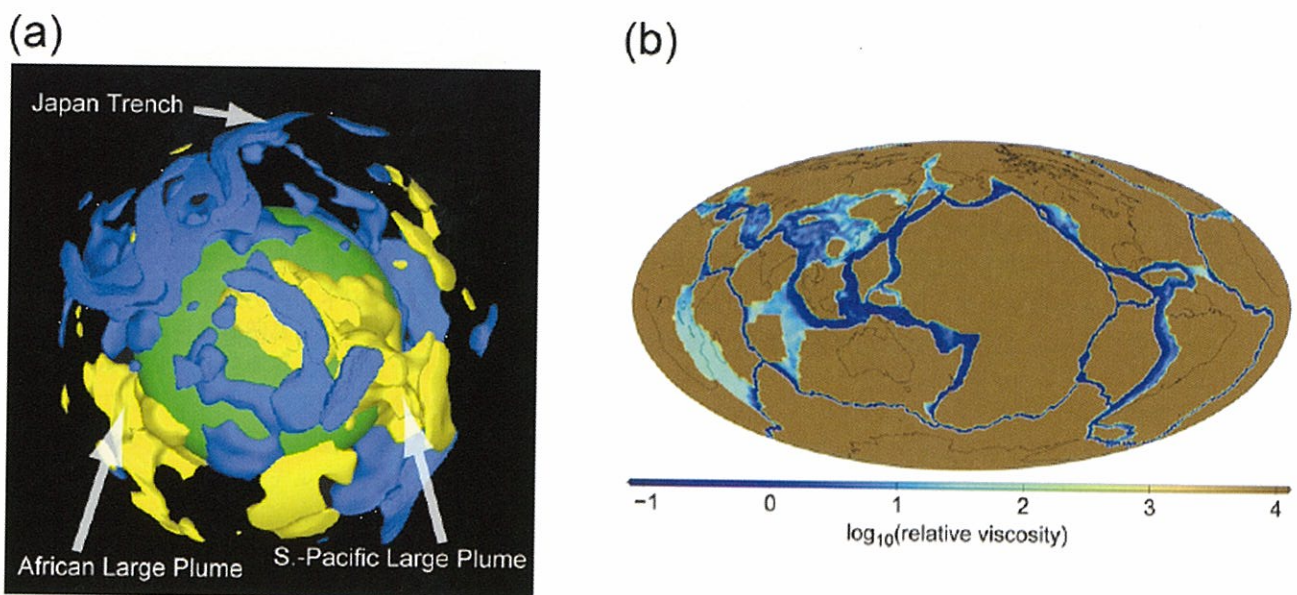


図9 (a) 計算に用いた密度異常分布のモデル。青色と黄色の等値面はそれぞれ $+10\text{kg/m}^3$ と -10kg/m^3 を表す。上部マンツルのスラブの密度異常は $+32\text{kg/m}^3$ 。(b) 計算に用いたリソスフェア内部の水平粘性率分布。高粘性率・低歪速度のプレート内部 (上部マンツルに対する相対粘性率が 10^4)、及び、低粘性率・高歪速度の「プレート縁辺域」の分布を示している。リソスフェアの厚さは 100km で、全ての深さで一様な水平粘性率分布を与えている。

と沈み込みスラブの力学的強度が小さくなるため、ジオイド異常は正のパターンに変わる (図10 (b))。結果として、 R_{LM} が 10^3 の場合では、環太平洋上の沈み込み帯全域で最大振幅が100m程度の広範囲な正の異常が再現される。この結果は沈み込みスラブの粘性率比 (R_{slab}) を小さくして、 10^2 とした場合でも変わらない (図10 (c))。以上のモデルでは、下部マントル内のLVVを無視したが、図2 (d) では、最近の物性研究で得られているペロプスカイトの活性化パラメータ (Yamasaki and Karato, 2001)、及び、地震波速度異常、温度、粘性率の簡単な変換式を用いて、下部マントル内のLVVを考慮した。この場合、沈み込み帯付近において、ジオイドの正のパターンは維持するものの、その最大振幅は

150m~250m以上となり、観測と合わない結果が得られた。これは、上部マントルから下部マントルへ沈み込むスラブが高粘性の深部スラブに支えられて、沈み込みスラブを引き込む力が減り、地表面の地形の振幅が小さくなるからである。

以上の結果から、高粘性の沈み込みスラブと低粘性率のプレート縁辺域に起因するLVVはジオイド異常のパターンに大きな影響を及ぼすことが分かった。本研究で用いたモデルでは、観測される沈み込み帯付近での広範囲な正のジオイド異常を再現するためには、両方のLVVを考慮する必要があることが分かった。また、下部マントル深部のスラブと上部マントルのスラブは力学的に強くカップルしていないことが示唆された。(吉田)

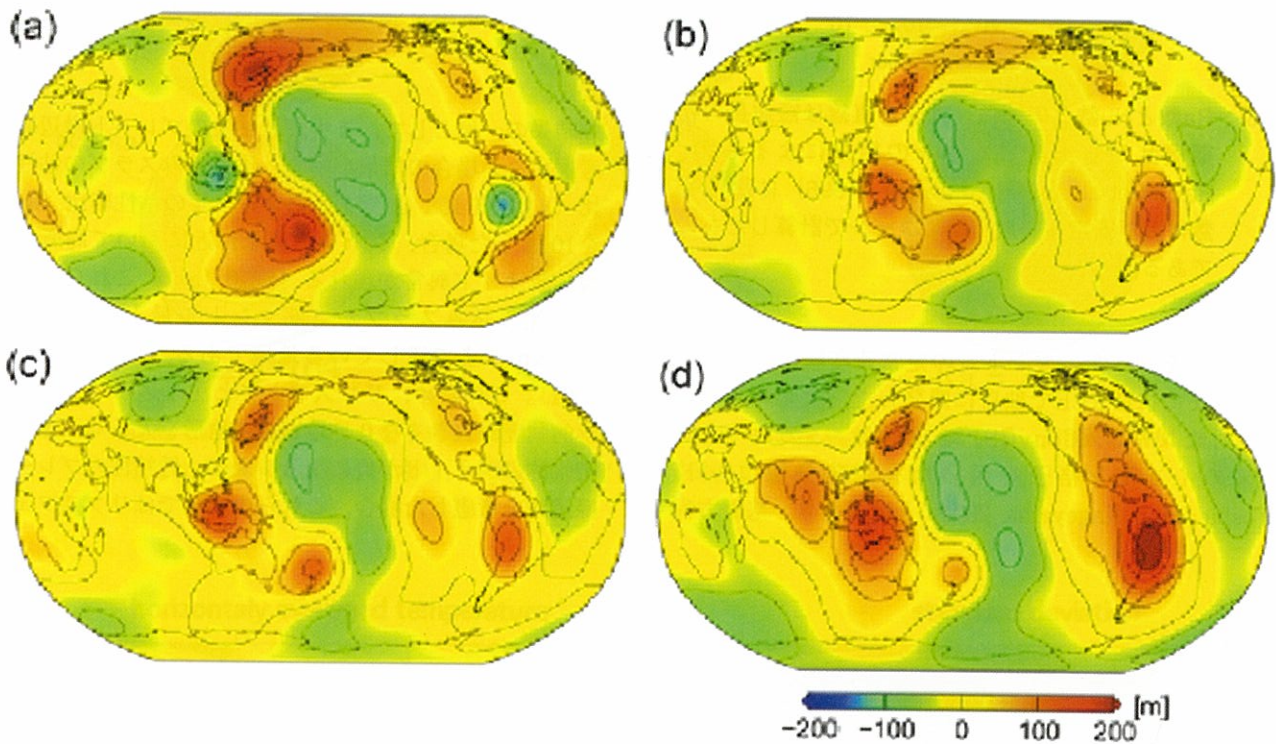


図10 計算されたジオイド異常のパターン。いずれも上部マントルと下部マントルの粘性率比 (R_{LM}) が 10^3 の場合の結果。(a) は低粘性のプレート縁辺域なし (リソスフェア内のLVVなし) で、上部マントルと沈み込みスラブの粘性率比 (R_{slab}) が 10^4 の場合、(b) は (a) のモデルに低粘性のプレート縁辺域を考慮した場合、(c) は低粘性のプレート縁辺域ありで、 R_{slab} が 10^2 の場合、(d) は (b) のモデルに、下部マントル内の水平粘性率変化を考慮した場合。カラーコンターは赤色が正の異常、青色が負の異常を示す。ラインコンターの間隔は50m。

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

— 今年度の成果と今後の展望 —

吉岡 祥一 (九州大学大学院理学研究院)

中久喜伴益 (広島大学大学院理学研究科)

鈴木 厚 (九州大学大学院数理学研究院)

亀山 真典 (愛媛大学地球深部ダイナミクス研究センター)

中川 貴司 (九州大学大学院理学研究院)

本計画研究では、深さ660kmの相転移境界付近でのスタグナントスラブの形成・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いる。昨年度までは、「部分3次元対流基礎プログラムの開発 (箱型モデル (亀山・中川), 球殻モデル (鈴木・田端))」, 「2次元高度スラブ沈み込みモデルの構築 (中久喜・吉岡)」の3つの研究グループに分かれて研究を推し進めてきた。3次元モデルでは、プログラムの根幹部分がほぼ完成したことを受け、今年度より「箱型モデル」と「球殻モデル」の研究グループを発展的に再編し、新たに「3次元スラブ沈み込みモデルの開発」グループとして統合し、新たな研究体制を整えた。本グループは、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いる。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今後の展望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次元球殻内における圧縮性マントル対流モデルによる自発的なプレート生成と660km相境界ならびに粘性境界との相互作用

本研究では、プレートの生成・運動が自発的に引き起こされるようなレオロジーを考慮した3次元球殻内における圧縮性マントル対流モデルシミュレーションを実施している。モデル流体の圧縮性と非弾性流体近似に加えて、熱力学的な物性変化を考慮することで流体モデルを高度化し、高圧下でのマントル物質の物性 (例えば、地表付近とマントル遷移層での熱膨張率の違い) をよりリアルに表現したモデルの構築を行っている。

この計算では、マントル物質はハルツバージャイト成分とMORB成分から構成される2成分多相系であり、その平均的な組成はパイロライト的であるとしている。

ハルツバージャイト成分は圧力増加につれてオリビン→スピネル→ペロプスカイト→ポストペロプスカイトへと相転移し、一方、MORB成分の相転移はパイロキシニ→ガーネット→ペロプスカイト→ポストペロプスカイトとする。マントル物質の粘性率は温度 (7桁), 深さ (4桁), 及び降伏応力に依存している。降伏応力については、“pseudo-plastic yielding” (塑性降伏: 降伏応力が単純に深さだけに依存) と “brittle-ductile yielding” (塑性-脆性降伏: 降伏応力がある深さまでは深さに依存するが、その深さより深い領域では一定値をとる) のいずれかでモデル化した。

準備的なシミュレーションの結果を図1に示す。図上段は “pseudo-plastic yielding” について、図下段は “brittle-plastic yielding” についての結果を示している。これらの結果からわかることは、(1) プレートが生成される発散境界は、トランスフォーム断層のような形状を示す場合と、プリュームのような円筒状の形を示す場合のいずれかで特徴づけられる、(2) プレートの沈み込み角がほぼ垂直であるため、660kmの相転移境界によって下降流がせき止められる効果はさほど顕著には現れない、(3) 粘性散逸や断熱圧縮の効果によって、沈み込むスラブは下部マントルに入ると熱的また粘性的に周囲のマントルと同化する傾向にある、(4) 低温の地表面での粘性率分布より、“pseudo-plastic yielding” の場合にはプレート内部とプレート境界での粘性率コントラストが約2桁以上の比較的高いプレートが生成されている。これに対し “brittle-ductile yielding” では粘性率コントラストが1桁から2桁程度と小さい。これは “brittle-ductile yielding” の場合には低温の浅部では塑性変形に比べて、脆性変形が卓越しているためと考えられる。これによって定式化上の降伏応力が変化し (Tackley, 2000), その結果、表面の粘性率が単純な塑性降伏の場合と比べて小さな値になっていると考えられる。

ただし、ここに示した図は計算初期の段階のものであるため、厳密な議論を行うにはより長時間にわたって計算を行う必要がある。これに加えて今後は、マントル全体の対流流速に対する地表面速度の比や、プレートの力学的な強さを示す “plateness” などの解析を通して、地表面の運動の特徴をより定量的に議論していきたい。

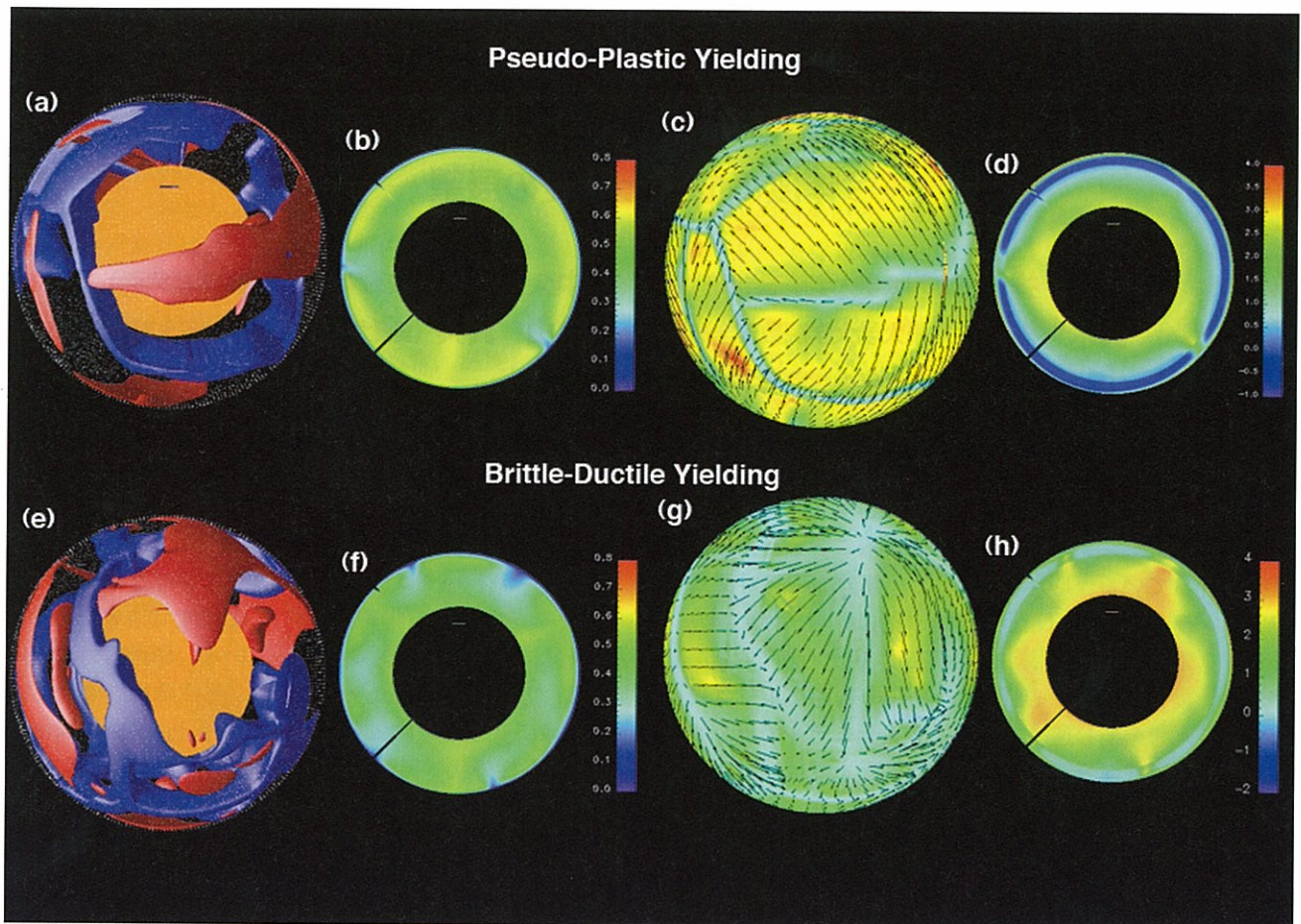


図1 降伏レオロジーの違いによる3次元球殻内におけるプレートの自発的生成シミュレーション結果。上段：“pseudo-plastic yielding”の場合。(a) 温度残差。赤は水平平均より250K高い，青は平均より250K低い。(b) 温度の赤道断面。カラーバーは無次元ポテンシャル温度である。(c) 表面における粘性（カラー），及び水平流速（矢印）。(d) 粘性構造の赤道断面。(c)と(d)のカラーバーは粘性の対数を示している。下段：“brittle-ductile yielding”の場合。(e) 温度残差。(f) 温度の赤道断面。(g) 表面における粘性（カラー），及び水平流速（矢印）。(h) 粘性構造の赤道断面。

これによって，観測されているプレート運動のような“プレート”の再現，及びその660km付近での相転移や粘性ジャンプとの相互作用について調べていく予定である。

1-2. プレート沈み込みの3次元性に関するシミュレーション

本研究では，沈み込んだスラブの3次元的な振る舞いに着目したシミュレーションを実施している。従来の2次元スラブ沈み込みシミュレーションでは，海溝軸に沿った方向には一様なモデルという仮定が暗に含まれていた。本研究では3次元モデルの特徴を活かし，海溝軸に沿った方向の非一様性がスラブの沈み込みに与える影響の検討を試みている。具体的には，海溝軸方向の不均質性（海溝軸の湾曲など）に代表されるモデルの3次元性が，沈み込んだスラブの振る舞いをどのように規定しているのかに焦点を当てている。さらに，斜めに沈み込んだスラブと660km相転移境界との相互作用が2次元的な

場合とどのように異なるのかを調べることを目指している。

数値シミュレーションモデルとして，深さ1320km，縦横比6：6：1の3次元矩形領域をとる。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に依存するものとし，低温の上面付近と高温の深部で 10^3 の粘性率コントラストを与えてある。温度の初期条件として，約4.7cm/yrで右方向に動く半無限体の冷却モデルで得られた温度分布を用いる。この温度分布に加え，時刻0で上面境界のほぼ中央部に海陸境界を模した「切れ目」を導入し，左半分の「海洋プレート」と右半分の「大陸プレート」に分割する（図2参照）。「大陸プレート」の速度は0で固定し，「海洋プレート」はその上面に右向き速度を与え続けるものとする。海陸境界でのプレートの収束速度は約4.7cm/yrで一定とし，沈み込む海洋プレートの年

代は平均で約8200万年となっている。計算領域を水平方向に 256×256 、鉛直方向に64の均質なメッシュに分割し、我々が開発した多重格子法ベースの3次元箱型対流プログラム (Kameyama et al., 2005; Kameyama, 2005) を用いてシミュレーションを行う。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、プレート境界断層に相当する薄い低粘性層や、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がある。

計算結果を図2に示す。海陸境界が沈み込み方向と直交している場合 (図2a) では、モデルの2次元的な設定の結果、紙面奥行き方向に一樣な沈み込みが起こっている。これに対し、海陸境界が湾曲している場合 (図2b) では、海溝軸の形状の変化を受けて、沈み込みの様相が奥行き方向に非一様になっている。例えば、低温塊の下降速度は紙面奥行き方向でわずかながら変化がみられ、奥側ほど下降速度が大きい。これは海溝軸の湾曲の結果、沈み込むプレートの年代が変化し、紙面奥側ほど

年代の古いプレートが沈み込むことが原因と考えられる。一方、マントル遷移層付近での低温塊の振る舞いに注目すると、いずれの場合も相転移の影響をほとんど受けず、660km境界を突き抜けて下降していく。この原因の1つとして、低温下降流が660km境界付近でほぼ垂直になっているために、相転移の影響を受けにくくなっていることが考えられる。

この結果を踏まえてモデルを向上させるため、現在は海溝後退の効果を取り入れるべくシミュレーションモデルの改良を実施している。ここでは海溝後退の効果は、計算領域全体が (海溝の後退速度に対応する) ある一定の速度で、静止したマントルの中を動いているとみなすことによりモデル化した。言い換えればこの方法では、基礎方程式を「海溝軸とともに並進運動している座標系からみた」ものとして取り扱っていることに相当する。結果の一例を図3に示す。この例では、約2.3cm/yrの速度で計算領域全体が並進運動していることになっている。図2と図3の比較から、海溝後退の効果を模したことで、時間の経過とともに低温塊の先端が陸側へ入り込み、かつ陸側に低角で傾斜した沈み込み形状を示すよう

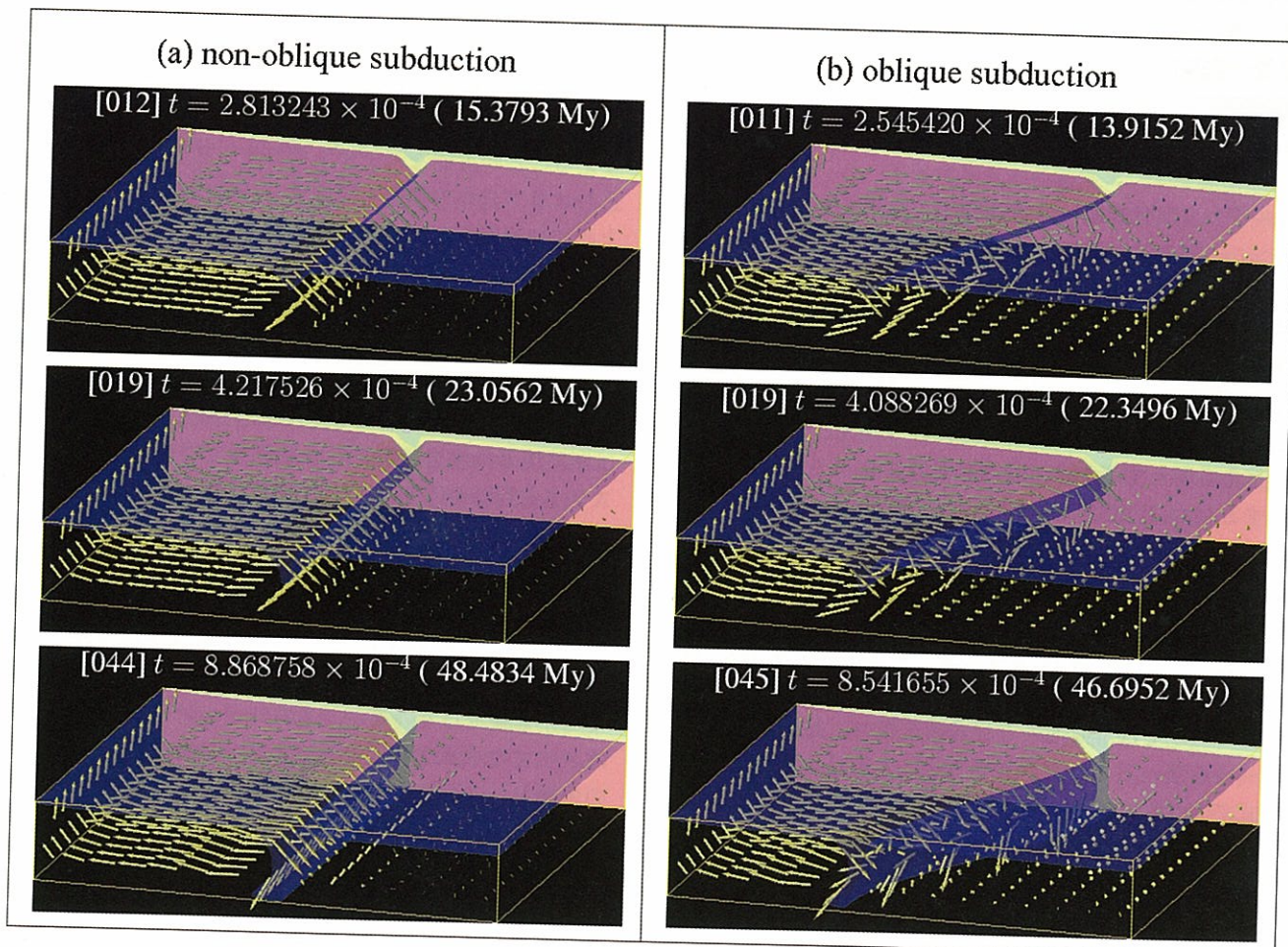


図2 プレート沈み込みの3次元性に注目したシミュレーションで得られた、各時刻での流れ場のスナップショット。矢印で流速を、青い半透明の面で無次元温度 $T=0.9$ の等値面 (海洋プレートの下面の代用) を示す。また、紙面奥側の側壁に沿った温度の2次元断面も色で示している。(a) は海陸境界と沈み込み方向が直交している場合、(b) は海陸境界が湾曲している場合の結果を示す。

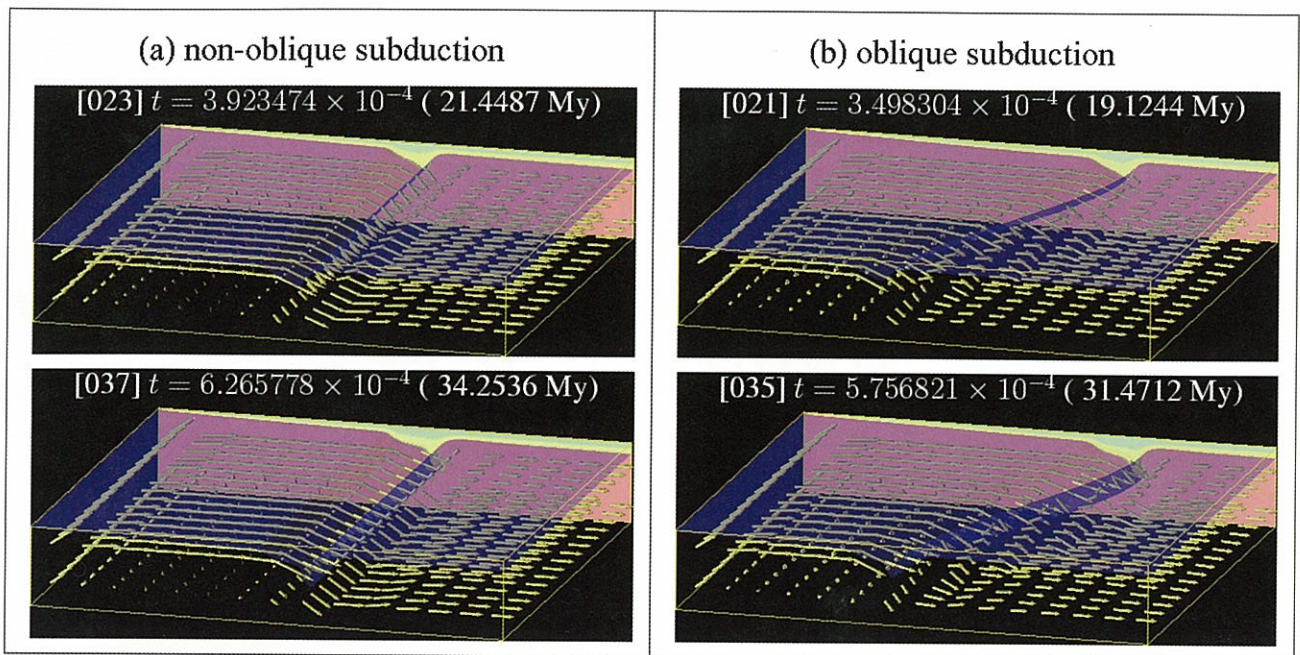


図3 海溝後退の効果を取り入れた3次元スラブ沈み込みシミュレーションの結果の一例。図の見方は図2と同じ。

になることがわかる。今後はこのモデルをさらに発展させ、660km相転移での浮力やそこでの粘性ジャンプ、海溝軸の後退速度、低温下降流のマンテル遷移層での3次元的な挙動・形態へ及ぼす影響に着目したシミュレーションを実施する予定である。

1-3. 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

マンテ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し、3次元に移行する方針をとることにした。ここで、2次元モデルと3次元モデルでは、共通の方程式系を扱い、共通の計算スキームを用いることが重要である。2次元計算では連続の式で表される流体の非圧縮性を満足するために流れ関数を用いる解法が主流であるが、3次元では、スカラー値の流れ関数は存在しないため、流速、圧力の自由度を直接扱う離散化手法を選ぶ必要がある。この計算手法は有限要素法の混合法により確立されているが、スラブの沈み込みを人為的に与えるモデルの構築では注意が必要となる。ある幅を持ったスラブを沈み込ませる場合、スラブ内部でも連続の式を満足するようにスラブの速度を決める必要がある。流れ関数を用いる2次元の場合は海

溝付近での折れ曲がりに関して注意を払う必要があるが、実現可能である。しかし、3次元の場合はスラブの形状の3次元的な構造を考える必要があり、連続の式を満足する速度場を設定することは非常に複雑になる。このため、3次元問題においても人為的にスラブの沈み込みを与えることが可能なモデルを構築する必要がある。沈み込むスラブ全体の速度を設定するのではなく、スラブの上面での速度を海洋プレートの動きと整合するように与えるモデルを構築した。大陸側のプレートは移動しないことを仮定するため、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。スラブのスリット部分では断熱境界条件を設定しているが、スリットの終端からスラブ先端にかけては流体に速度分布を設定するのみであり、温度場も連続しており、特異性はなく、スラブの沈み込みのシミュレーションに適したモデルである。

扇型の領域でのテスト計算結果を図4に示す。右の海洋プレートに設定した流れが斜め30°に設定したスラブに沿って沈み込んでいることがわかる。深さ660kmに相転移境界を設定しているが、このシミュレーション結果ではスラブの滞留は実現できていない。沈み込んだスラブの先端からの流れは上部と下部マンテル全体の対流の影響を受けるため、初期の温度分布の選択が重要である。また、スラブの沈み込み角と形状を検討する必要があるが、これらも容易に設定可能である。このスラブの沈み込みモデルの境界条件の設定は3次元においても容易に実現できる。対流を規定する温度の初期条件および、計算領域を切り出す際の境界条件の設定を2次元モデルで検討し、3次元計算に移行する予定である。

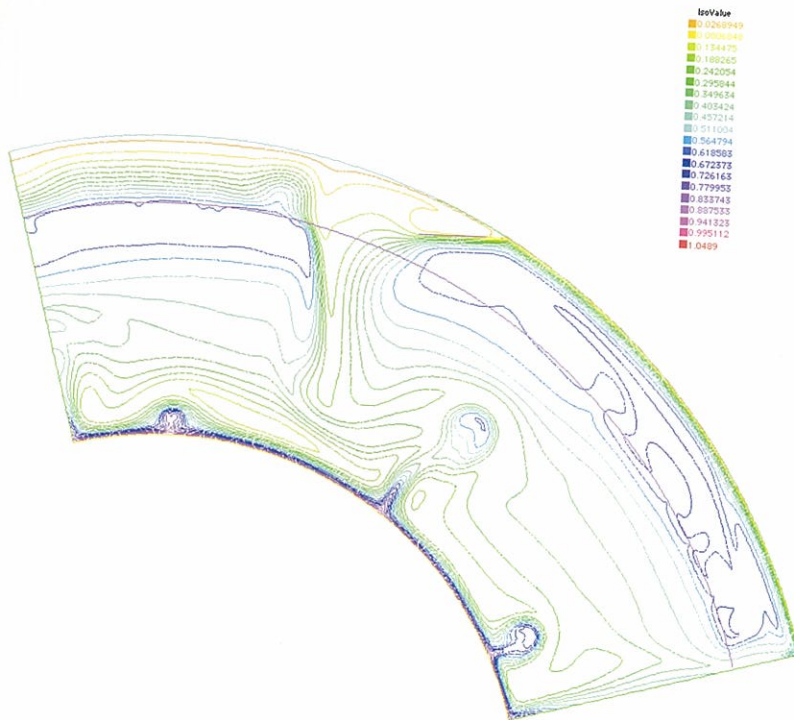


図4 扇形領域でのスラブの沈み込みのシミュレーション結果。FreeFem++ソフトウェアによる有限要素法計算。スラブの沈み込みを 30° 、深さ約435kmまで設定。海洋プレートとスラブは左向きに8.16cm/yrの速度を設定。 $Ra=5 \times 10^6$ 、660km相転移境界（紫線）を考慮して、クラペイロン勾配は -2.0395MPa/K に設定、相転移境界の厚さを29kmに設定。温度成層状態を初期値として、0.53Gyr経過したときの温度分布を表す。

2. 2次元高度スラブ沈み込みモデルの構築

2-1. 2次元自発的沈み込みモデルから見たスラブの滞留・崩落のメカニズム

本研究では、自発的沈み込みモデルを用いてスタグナントスラブの滞留と崩落について研究を進めてきた。これまでの計算と岩瀬と共同で行った理論的考察から、スタグナントスラブの形成に関して次のようなメカニズムが浮かび上がってきた。1つはChristensen (1996)で既に指摘されている海溝後退の重要性である。沈み込むスラブが硬い場合には、スラブ全体の荷重が660km境界を押すため、海溝が固定されていると660km境界を突き抜けてしまう。しかし、海溝が後退すると、海溝とスラブが660km境界に当たる点との間の距離が伸びなければならないので、下向きの力を打ち消す上向きの力が生じる。このため、細粒化によるスラブの粘性率の低下が起こらない場合でも、スタグナントスラブが形成される。細粒化がある場合にはスラブが曲がりやすいので、より0に近いクラペイロン・スロープの条件下でも滞留が起こる。また、660km境界に衝突したスラブは上向きに曲げられる。スラブは高い粘性率を持つため、いったん曲がるとスラブはその形状を保持したままとなる。スラブはその形状に沿って動こうとするので、660km境界から

浮いたり、逆に中途半端に引っ掛かって660km境界の下に水平なスラブを作ったりする。細粒化が起きる場合には、曲げ強度が低下するので、スラブはより小さな曲率半径で湾曲する。この構造は、トモグラフィから得られたイメージをよく説明する。660km境界で粘性率が不連続に増加する場合は、より0に近いクラペイロン・スロープでもスラブが滞留する。

一方、スラブが崩落するメカニズムも明らかになってきた。予想されるメカニズムの1つは海溝の後退が止まることであろう。海溝の後退を自発的に止めることは我々の数値モデルでは再現できていない。これまで再現できた崩落の様式は図5に示す様な2つのタイプである。図の(a)は、スラブが中途半端に引っ掛かった場合に起きる崩落である。下部マントルにはみ出した部分は、しばらくマントルの粘性に支えられているが、この部分が多くなると、その形を保ったまま下部マントルへ落下する。このため、形状記憶型崩落と呼ぶことにする。これは、スラブとマントルの粘性コントラストが高いときに起こる。もう1つはスラブがレイリー・テイラー型の重力不安定を

起こして変形しながら下部マントルへ落下する場合である。スラブが大きく変形するので、コールド・プルーム型崩落と呼んでもよいかもしれない。これは、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。スラブの湾曲はスラブの粘性が低い方がより速く成長する。また、下部マントルの粘性抵抗が大きいほど水平に縮めようとする力も大きくなるので、上下マントルの粘性コントラストが大きい時の方が崩落しやすくなる。つまり、このメカニズムではスラブが滞留しやすいレオロジーの条件の方が、スタグナントスラブは下部マントルへ崩落しやすいのである。逆に、硬いスラブは滞留してしまうと崩落が起こりにくい。このことは、フラッシング・イベント (Honda et al., 1993) が粘性率の温度依存性がない対流で観察されていたことも統一的に説明できる。

ジオイドの研究 (本誌 計画研究キの項を参照) から、下部マントルの粘性率は高いと推定されている。この場合には、マントル遷移層において上部マントル・スラブと下部マントル・スラブとの間の力学的結合が弱くなっていないと、10cm/yr程度のプレート運動速度を再現できない可能性が高い。プレート運動速度を拘束条件として、マントル遷移層におけるスラブの強度やレオロジー

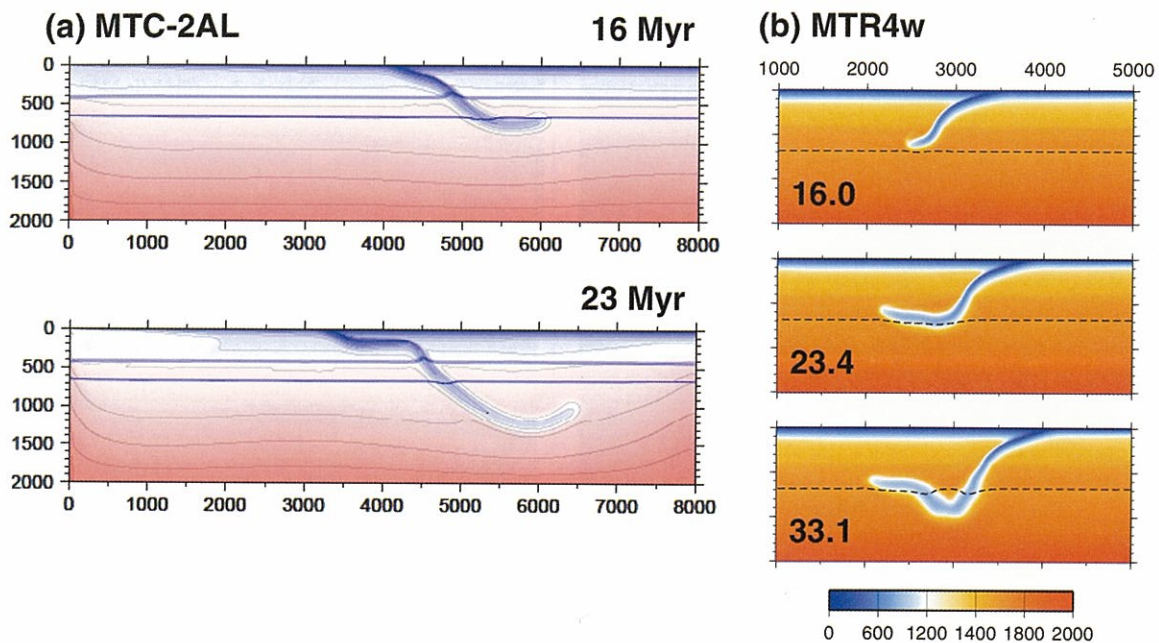


図5 スタグナントスラブ崩落の2つの様式。(a) 形状記憶型, (b) レイリー・テイラー不安定 (コールド・ブルーム) 型。(a) では, 熱膨張率の温度・圧力依存性を考慮し, クラペイロン・スロープは -2MPa/K である。(b) ではマントル遷移層のスラブの粘性率をスラブのほぼ全体にわたって低下させている。クラペイロン・スロープは -3MPa/K である。数字は時間を表し, 単位は100万年である。

をより定量的に検討することは今後の課題の1つである。

2-2. マントル遷移層に沈み込むスラブと海洋地殻の挙動の数値シミュレーション

Irifune and Ringwood (1993) や Hirose et al. (1999) の高温高圧実験により, 上部マントルでは海洋地殻の密度がスラブの密度より大きいものに対し, 下部マントル最上部 (深さ約 $660\text{km} \sim 720\text{km}$) では, 両者の密度逆転が起こることが示され, 海洋地殻がスラブから剥離する可能性が示唆されている。本研究では, マントル遷移層～下部マントル最上部におけるスラブと海洋地殻の振る舞い, 特に海洋地殻のスラブからの剥離の可能性を定量的に明らかにすることを目的としている。ここでは, 拡張ブジネス近似を用いた Tagawa et al. (2007) の2次元モデルをさらに発展させ, 自発的に沈み込む海洋地殻とスラブの層構造モデルを構築した。海洋地殻の標準の厚さは 6km とし, 海洋地殻が存在しうる領域 (水平距離 4000km , 深さ 1000km) では, 250m の高分解メッシュを設定した。スラブは海洋地殻直下の厚さ 34km のハルツバージャイト層とその下のスラブ本体から構成されるものとした。海洋地殻, ハルツバージャイト層, スラブ本体のそれぞれに対し, 異なる密度・粘性率の深さ分布や相転移に伴うクラペイロン勾配の値を与えられるようにした。ハルツバージャイト層とスラブ本体に対しては, 深さ 410km 付近, 660km 付近でのオリビンとその高圧相の相転移を取り入れ, 海洋地殻に対しては, 深さ 40km 付近, 400km 付近, 720km 付近でガーネットの相転移を取り入れた (図6 (a))。3つの層のダイナミッ

クな振る舞いは, 輸送方程式をCIP法 (Takewaki et al., 1985) を用いて解くことにより追跡できるようにした。モデル領域は水平距離 8000km , 深さ方向 2000km である。流れの境界条件は, モデル上面と下面で自由すべり, 左右の側面で反射とし, 温度の境界条件は, モデル上面で温度一定, 他の3つの境界面で断熱とした。初期条件は, 流れなしで, マントルの温度分布は水平成層構造とし, モデル最上部の左側にプレート冷却モデルから計算された海洋プレート, 右側に大陸プレートを配置し, 両者の境界面は降伏応力に達すると粘性率が低下し, 海洋プレートの沈み込みが自発的に起こるように設定した。

ここでは, 海溝の後退速度, 深さ 660km での粘性ジャンプ量, ハルツバージャイト層の粘性率, 海洋地殻の相転移に伴うクラペイロン勾配の値などのパラメータを変えた計算を行った。3層に対し, 現実的な密度の深さ分布を与え, 他のパラメータに変化を与えない場合, 密度差のみにより, 海洋地殻がスラブから剥がれる現象は起きなかった。この結果はこれまでの数値シミュレーションの結果と同様である (例えば, Gaherty and Hager, 1994)。さらに, ハルツバージャイト層の粘性率を一様に1～4桁落とした計算を行ってみた。1桁の場合, 海洋地殻の剥離は起こらず, 4桁の場合にはスラブの自発的沈み込み自体が起こらなかった (図6 (b))。このことはこれまでの数値シミュレーションや理論的考察における結果 (van Keken et al., 1996; Karato, 1997) とは異なる。両者の違いの原因は明らかではないが, 我々のモデルにおけるスラブの粘性率が彼らのモデルの粘性率よりも高い可能性があること, スラブの沈み込み速度が彼ら

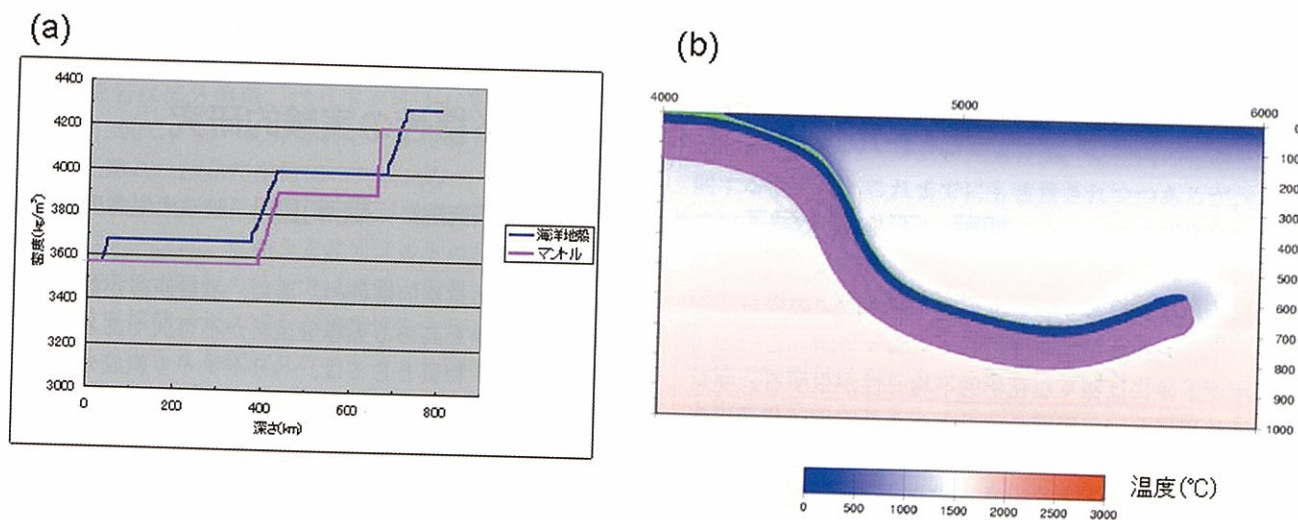


図6 (a) 計算に用いた海洋地殻 (青線) とスラブ (ピンク線) の密度の深さ分布。(b) (a) の密度の深さ分布を与え、海溝後退があり、ハルツバーチャイト層の粘性低下がスラブ粘性率の最大値に対して1桁 (10^{24} Pa sで固定)、660kmでの粘性ジャンプが10倍、660kmでのクラペイロン勾配が-2MPa/Kのときのシミュレーション結果。図はスラブの沈み込み開始から48Myr経過したときの結果。緑色、青色、ピンク色は、それぞれ、海洋地殻 (厚さ6 km)、ハルツバーチャイト層 (厚さ34km)、その下のスラブ本体 (厚さ約100km) の存在領域を示している。海洋プレート以外の領域のカラーは温度分布を表す。図は橋本達樹氏による。

のモデルより大きく、粘性応力により海洋地殻がスラブとともに深部に引きずり込まれている可能性があることなどの要因が考えられ、今後、両者の違いの原因の詳細を追及していくとともに、海洋地殻の剥離がどのような条件下で起こりうるのか、或いは、起こらないのかについて定量的に明らかにしていく予定である。

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.
- Gaherty, J. B. and Hager, B. H., 1994. Compositional vs. thermal buoyancy and the evolution of subducted lithosphere, *Geophys. Res. Lett.*, 21, 141-144.
- Hirose, K., Fei, Y., Ma, Y. and Mao, H. K., 1999. The fate of subducted basaltic crust in the Earth's lower mantle, *Nature*, 397, 53-56.
- Honda, S., Yuen, D. A., Balachandar, S. and Reuteler, D., Three-dimensional instabilities of mantle convection with multiple phase transitions, *Science*, 259, 1308-1311, 1993.
- Irifune, T. and Ringwood, A. E., Phase transformations in subducted oceanic crust and buoyancy relationships at depths of 600-800 km in the mantle, *Earth Planet. Sci. Lett.*, 117, 101-110, 1993.
- 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, 162-181, 2005.
- Kameyama, M., ACuTEMan: A multigrid-based mantle convection simulation code and its optimization to the Earth Simulator, *J. Earth Simulator*, 4, 2-10, 2005.

Karato, S.-i., On the separation of crustal component from subducted oceanic lithosphere near the 660km discontinuity, *Phys. Earth Planet. Inter.*, 99, 103-111.

Tackley, P. J., Self-consistent generation of tectonic plates in time-dependent, three-dimensional mantle convection simulations I. pseudoplastic yielding, *Geochem. Geophys. Geosyst.*, 1, doi:10.1029/2000GC000036, 2000.

Tagawa, M., Nakakuki, T. and Tajima, F., Dynamical modeling of trench retreat driven by the slab interaction with the mantle transition zone. *Earth Planets Space* 59, 65-74, 2007.

Takewaki, H., Nishiguchi, A. and Yabe, T., 1985. Cubic interpolated pseudo-particle method (CIP) for solving hyperbolic-type equations, *J. Comp. Phys.*, 61, 261-268.

van Keken, P. E., Karato, S. and Yuen, D. A., 1996. Rheological control of oceanic crust separation in the transition zone, *Geophys. Res. Lett.*, 23, 1821-1824.

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 (九州大学大学院理学研究院) 黒澤正紀 (筑波大生命環境)

中央海嶺におけるプレート生成, 海洋底での変質, 沈み込み帯での加熱脱水を経過して, スラブ内部とその周辺のマントルには様々な化学的不均一性が生ずる。マントル遷移層において周囲のマントルと熱平衡, 化学平衡に向かう条件でメルト (流体) 移動, 元素拡散, による混合が進行する。しかし, スラブサイズの完全な均一化は活発な対流運動渦の中でも困難であり, 元素と構成鉱物の特性によって混合途中段階で特徴的な不均一性を生ずることが考えられる (図1)。本研究の目的は, スラブ停留条件のマントル遷移層から最上部下部マントルで, 不均一性の端成分である玄武岩物質とマントル・ペリドタイトの反応実験を行う。マントル遷移層, 最上部下部マントル領域は, 一連の相転移反応が結晶細粒化, 再結晶, 脱水分解を引き起こし, 多結晶マントルの輸送物性の理解には, 物質移動の素過程を支配する鉱物物性の研究が必要である。高精度微量元素分析により, 相平衡関係, 元素分配関係だけでは理解できない元素移動の多様性とそのメカニズムを明らかにし, メガリス領域のスタグナント・スラブに起源を持つ地球化学的端成分の特性を検討する。

研究手法は, 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 (Laser Ablation) -ICPMS装置の組み合わせを採用する。微量

元素移動性の定量的解析のために, 拡散距離が確保でき微量検出効率を高める大容量試料が不可欠である。モデル・マントル物質としては, ペリドタイト組成の初期粒径と粒界条件を配慮した多結晶体を準備する。拡散源となる玄武岩物質は, 深部マントルに到達する過程での脱水, 部分熔融等の変成を考慮して組成を想定し, 反応実験に至る温度圧力条件を実現するためのガラス, 多結晶体を使用する。初期解析として, 走査型電子顕微鏡, X線回折, 赤外, ラマンなどの分光分析によって想定される鉱物組み合わせを確認し, LA-ICPMSによるDepth-Profiling法によって元素移動性の定量的なデータを得る。

(1) 玄武岩メルトからペリドタイト中への元素移動特性による化学分別 沈み込むスラブの中で最も特徴的な微量元素供給源は海洋プレート上面を構成する玄武岩である。沈み込み帯での火山フロントの存在, 鉛直方向の火山活動の多様性に関して, スラブとウエッジマントルの間の反応が関与していることは間違いない。この検証と素過程の解明のため, 数多くの高圧熔融実験が行われ, 流体成分の移動による付加, 熔融条件についての制約が得られている。我々は, 島弧マグマやOIBの起源領域が, 単純なマントル・ペリドタイトと玄武岩およびその由来成分の混合によって生成されるのではなく, 元素移動特性の理解が本質的に重要であると考え予備的な実

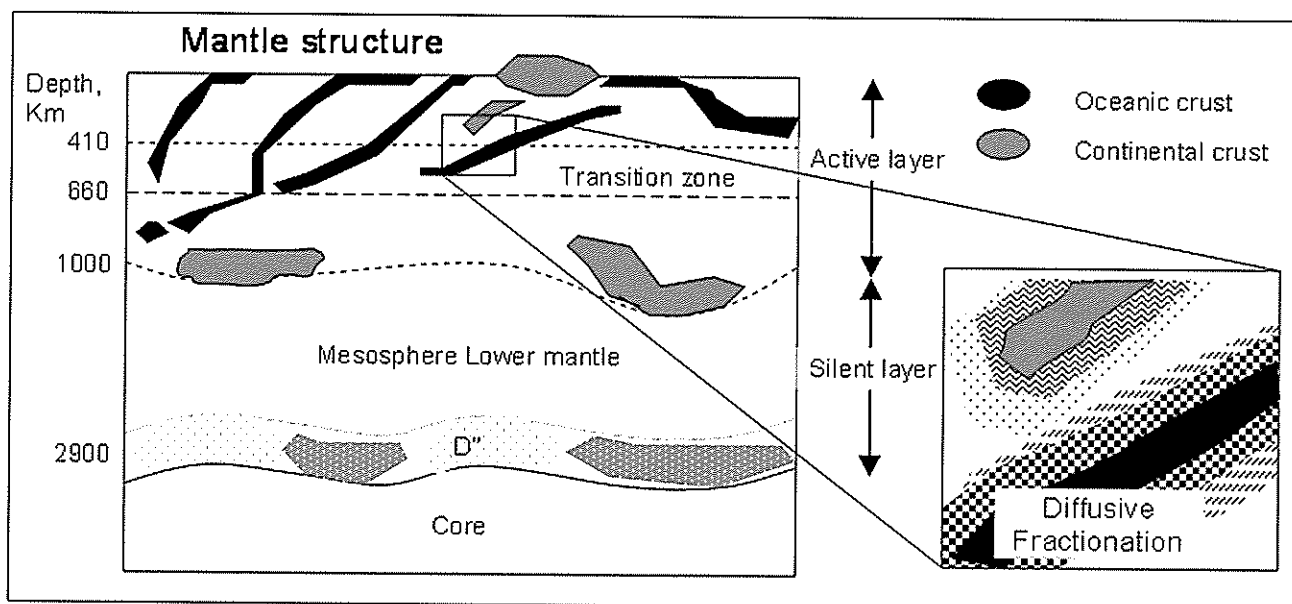


図1 海洋と大陸地殻の沈み込み (Subduction & Delamination) によるマントルの不均一構造の模式図。遷移層から最上部下部マントルは, 相転移による細粒化, 変形, 熱伝導によって, 元素拡散を素過程とする化学分別が進行する。

験解析を行っている。

実験は、玄武岩-ペリドタイトサンドイッチ試料に対し、玄武岩は部分溶融、ペリドタイトは固体の条件下 3GPa, 1300°C, 10~60分で行った。境界から数百ミクロン以上離れた結晶粒径約10ミクロンのペリドタイト中に、玄武岩起源の微量元素の増加が検出された。その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考えられる。得られた拡散プロファイル (図2) と粒界拡散係数 (図3) は、イオン半径、電荷との有意な相関を示している。

(2) メガリス領域での海洋プレートからマントル遷移層への元素移動特性による化学分別 海洋プレートは、沈み込み過程の熱交換、化学反応を経て、マントル遷移層に到達し、上下マントルもしくは物質物性境界面での抵抗によって大きな変形流動を受けてメガリスとして停

留する。プレートが熱平衡に到達する時間は非常に長く、このスタグナント・スラブ領域でも鉱物の準安定反応、部分溶融、脱水などに励起されて元素移動が進行し続ける。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。特に、スラブ環境の低温で進行する準安定相転移、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。

マントル内に導入された不均一性の拡散混合は、物質循環において必然的に生ずる化学進化過程である。地球深部条件でのスケリングと地質学的岩石化学的な検証によって、マントルダイナミクスに新展開をもたらすことが期待される。

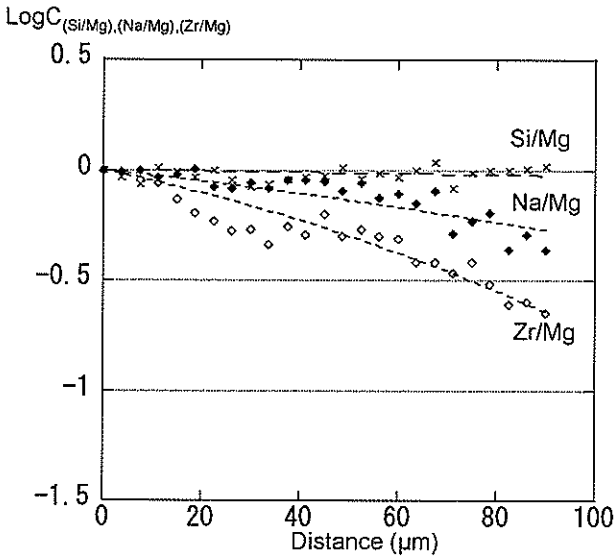


図2 Depth-Profiling法で検出されたペリドタイト中の元素濃度分布

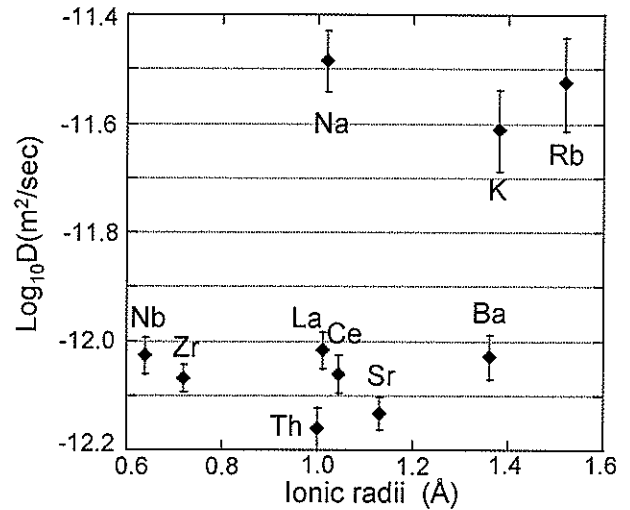


図3 トレーサー微量元素のオリビンの粒界拡散係数とイオン半径の関係。

中間評価の結果について

総括班事務局

平成18年度は、本特定領域「地球深部スラブ」5年計画の中間年にあたり、中間評価が実施されました。評価を受けるにあたって計画研究各班の協力を得て報告書を作成し、8月16日にこれを文部科学省に提出しました。以下に、報告の概要と審査部会における所見をそのまま掲載致します。幸いこれまでの成果に対して高い評価を得ることができました。これを励みに、終盤に向けてさらなる盛り上がりを期待します。

1. 報告の概要

(1) 研究領域の目的及び意義

本特定領域は、プレート沈み込みに関わる「スタグナントスラブ」の概念をキーワードに、地球物理観測、超高温地球科学、計算機科学の先端グループが結集し、5年間でマントルダイナミクス研究に新展開をもたらすことを目的に設定された。具体的には、(1) 極東ロシアとフィリピン海において地震・電磁気観測を実施して、カムチャッカからマリアナに至る沈み込み帯に沿ってスタグナントスラブの全貌を明らかにする。(2) スラブの滞留と崩落のメカニズムを高温高压実験により明らかにする。(3) 現実の地球に近いパラメータ空間・モデル空間で対流モデリングを行う。(1)～(3)を統合して、スタグナントスラブの滞留と崩落の物理を解明し、それがプレート運動史ひいては地球史に及ぼす影響を明らかにする。「スタグナントスラブ」は、その発見・一般的存在の検証・命名まで含め一貫して本領域参加者がリードしてきており、現在では、マントルダイナミクスにおけるその役割が注目されている。その理由は、単にそれがマントル遷移層において最も際立つ現象というだけでなく、マントル対流の非定常性と関わってプレート運動史を理解する一つの鍵と見られるからである。本領域は「スタグナントスラブ」の概念を独自の切り込み口とし、日本が世界に誇る観測・実験の研究手法と世界最速クラスの計算機を駆使して、マントル対流の全容に迫るものである。このアプローチは日本独自のものであり、一つの研究潮流にまで発展する可能性が高く、領域設定の意義は極めて大きい。

(2) 研究の進展状況及び成果の概要

本特定領域が設定されてから2年あまりを経過し、すでに計画研究からは、P波/S波速度比の直接インバージョンによるマントルのイメージング、マントル遷移層に対応する温度圧力下での弾性波速度測定、含水マントルの相境界への水の影響の解明、地球に想定される高レーリー数の領域でのクラペイロン勾配と対流パターンの相図の作成など、世界に先駆けた顕著な研究成果が得られている。また、地震及び電磁気観測と高温高压実験によ

る沈み込むスラブに伴う水の分布の推定や、高温高压実験による物性の拘束を入れた対流シミュレーションなど、領域を横断した連携による世界最先端の成果も得られつつある。平成17年11月には、世界に前例のない時空間規模の海底地震・電磁気観測がフィリピン海で開始された。さらに、8件の公募研究も順調に進展している。得られた成果は、欧文査読誌193篇、その他19篇の(印刷中含む)の論文として公表した。これまでに国内および国際研究集会を合計4回主催した他、2回の国際ワークショップを他のプログラムと共催し、研究成果を公表してきた。残る2年半あまりの研究期間には、極東ロシアにおける地震観測も軌道にのり、海底機動観測による地震および電磁気データが回収され、本格的な解析が開始される。今後も、総括班の主導のもとに研究項目の枠を越えた連携を強化して、目標に向かって研究の一層の展開を図りたい。

2. 審査部会における所見

A (現行のまま推進すればよい)

スタグナントスラブの滞留や崩落のメカニズムとそのマントルダイナミクスにおける役割の解明という明快な目標設定のもとに、高温高压実験、地球内部を調べる地震波・電磁気トモグラフィー、計算機シミュレーションなどの研究分野の世界最高レベルのグループが結集し、研究領域を横断する有機的な連携によって、スタグナントスラブの具体的なイメージの描像を始めとする世界的な研究成果が既に数多く得られていることは高く評価される。また、多くの学術論文が発表されているだけでなく、国内及び国際研究集会の開催、一般向け講演会の開催などの成果発表や情報発信も積極的に行われている。現状のまま推進すればよいと判断した。

研究集会報告

本特定領域では、観測／解析／実験／計算の異分野の研究交流を促進すべく、年に数回全体の研究集会を行っている。また数多くの国際ワークショップも主催・共催している。2007年は連合大会に於ける例年のセッションに加えて、イタリア（ペルージア）で開られるIUGGにおける特別セッションの開催、愛媛での国内集会を開催した。また、北海道大学との共催で、地震学夏の学校2007「地球深部研究の最前線」を開催した。

IUGG (2007/7/2-13)

ペルージア（イタリア）で開られたIUGG (International Union of Geodesy and Geophysics) XXIV General Assemblyにおいて、本特定領域メンバー（Kawakatsu, Irifune, Yoshioka）とBologna大学のトモグラファーA. Morelliを加えたコンビーナーによる特別セッション“JSS012: Earth Structure and Geodynamics - Dynamics of Deep Mantle Slabs”を開催した。講演数は29（口頭14，ポスター15）と盛況であった。（川勝均）

スタグナントスラブ第3回研究シンポジウム (2007/11/3-4)

スタグナントスラブ第3回研究シンポジウムが、2007年11月3日（土）・4日（日）の2日間にわたり、参加者約80名により愛媛大学理学部講義棟においておこなわれた。今回は高圧物性分野を中心に、観測・シミュレーション分野の発表者を交え、テーマごとにそれぞれの分野の視点からの研究発表をおこない、領域内の共同研究の一層の促進や現状理解、今後の課題について集中した議論がなされた。それぞれのセッションの概要は、以下のとおりである。

セッションI (上部マントル～マントル遷移層の物性)

高温高圧下での弾性波速度測定を進めている愛媛大



写真1 オーストラリア国立大学のIan Jackson博士による、マントル物質の水の取り込みに関する実験的研究についての講演

GRCの高圧グループが、スラブ沈降と滞留の場であるマントル遷移層や沈み込むスラブ物質の弾性波速度測定結果に基づき、遷移層下部が従来の化学組成モデルでは説明できないこと（入船）、絶対圧力スケールの確立にむけた取り組み（河野：招待）を紹介した。また、IFREEのグループによる地震波速度構造からみたスラブの特徴についての報告があり、水の弾性波速度に対する影響に関して議論された（末次）。一方で、岡山大ISEIのグループによる高圧下電気伝導度測定結果（桂）と、東大ERIのグループによる観測結果に基づくモデル（歌田）との比較検討がなされた。この結果、上部マントルやマントル遷移層における水の存在について否定的な見解が示され（芳野：招待）、測定や観測の信頼性や伝導メカニズムなどに関して活発な議論がなされた。

セッションII (スラブのレオロジーとダイナミクス)

ISEIのグループから、スラブのレオロジーを制約する粒成長・拡散に関する実験結果から、スラブの主要高圧相の粘性変化の見積もりがなされ、特にリングウツタイトの相転移に伴う細粒化の重要性が強調された（山崎）。また広島大理のグループは、変形実験に基づくスラブの強度を見積もる試みを紹介し、ガーネットの粘性が鉄の量によって大きく変わる可能性を指摘した（片山：招待）。一方で九大理の高圧グループからはスラブ中での非平衡相転移の重要性に関して、実験結果をもとに密度や粘性への影響が報告され（久保）、また同シミュレーショングループからは、このようなレオロジーも含めた物性パラメーターを取り入れた、より現実的なスラブの滞留条件と形状に関する研究成果が示され、遷移層下部におけるスラブの沈み込みの角度も滞留に重要であることなどが示された（吉岡）。

セッションIII (下部マントルの構造と相転移)

東工大理のグループにより、ダイヤモンドアンビル装



写真2 ペルージアの街中の由緒ある建物内でのポスターセッション

参加者には、地球深部研究を専門としない院生や若手研究者、これから進路を考えようとしている学部学生も多く参加していました。今回のような、若い学生や研究者を主な対象としたアウトリーチ型の研究集会を通じ、次世代を担う若手向けの啓蒙活動を行うことも、今後ますます重要さを増していくものと思われま

最後に、北海道での夏の学校を開催するにあたり、企画から運営までご支援いただいた北海道大学の学生・研

究員・教員の皆様に心より感謝申し上げます。なお、本夏の学校は、社団法人日本地震学会より「若手育成のための企画」として後援して頂きました。記して感謝申し上げます。

地震学夏の学校2007世話人：吉澤和範，青山 裕，高橋浩晃（北海道大学大学院理学研究院）

研究集会のお知らせ

最終国際シンポジウム（2009/2/25-27@京都）

特定領域最終年度にあたる2008年度は、2月25-27日に京都で国際集会を開催し、特定領域研究の成果を世界に発信する予定です。場所等の詳細は決定次第、特定領域メールリストでお知らせすると共に、ホームページ (<http://ohp-ju.eri.u-tokyo.ac.jp/tokutei/index.html>) に掲載致します。

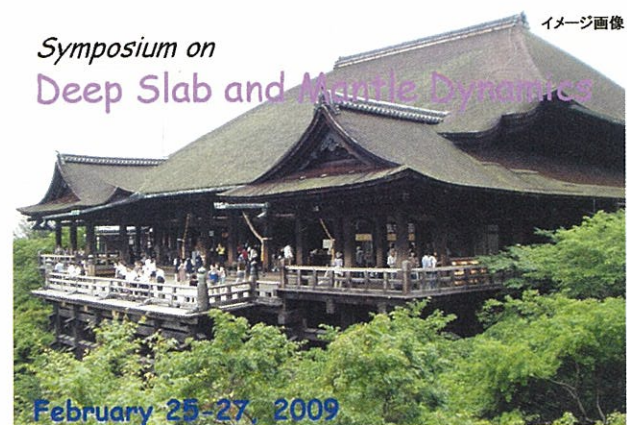


写真1

平成20年 2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
