

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.3 Dec.2006



目 次

計画研究の報告

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—2006—	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	5
海底広帯域地震観測でスタグナントスラブを診る	9
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	17
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 —これまでの成果と今後の展望—	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 —これまでの成果と今後の展望—	30
公募研究の紹介	35
研究集会報告	37
2005年計画研究クの報告（再掲）	38

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—2006—

笠原 稔 (北海道大学・地震火山観測センター)

[1] 2006年実施内容

図1に、本計画の観測点と周辺で稼働中の長周期地震観測点を示してある。2005年度には、1～5の観測点が設置され、順調に稼働している。2006年には、観測点番号6～10の観測点の設置を計画した。しかし、12月現在稼働しているのは、6、7の2観測点である。観測点の位置及び観測開始日時を表1に示してある。今年度末、2007年3月に、観測点8の設置を予定している。9、10観測点は、地震計設置点の断熱構造等の構築に手間取り、来年度の設置を予定している。

当初予定を変更したカムチャッカ観測点の設置許可は、2006年10月初めに得ることができた。この中で、既存のロシア側の長周期観測点のデータ提供も入っており、図

1のカムチャッカの点のデータも利用可能になった。また、マガダン管轄のデータに関しても了解を得ているので、2005年以降、必要なデータのリストができれば、データ提供を申し入れることが可能である。

今年度は、計画の中間点であり、当初計画の8割方は進んでいる。この計画に関連する、千島・カムチャッカ・アリューシャン海溝での沈み込みに伴う諸問題を議論するJKASP-5の国際シンポジウムを2006年7月上旬に、スタグナントスラブA01班の共催で、札幌で開催し、この計画の進行状況と初歩的な結果について報告し、関連するいくつかの発表もあった。

Far- Eastern Russia- Japan Seismic Network

- Seismic station
operating
-  IRIS Broad band
 -  Operating station
 -  Planning station
 -  Sapporo Center

V3,0 2006.12.20



図1. 極東ロシアでの広帯域地震観測点分布。(赤色：2005年の設置観測点、1-5、2006年の設置観測点、6-7、水色：本研究で今年度・来年度設置予定の観測点、8-10、緑色：北海道大学観測センター、橙色：IRIS等の既設観測点)。観測点番号は表1を参照。

表1. 2005年度・2006年度設置観測点リスト、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

表2 2006年度2007年度設置予定点、番号は、図1に対応する。

8	Palana	PAL
9	Zoboreva	ZOB
10	Okhotsk	OKH

[2] データの日本国内への持ち込み方法

2003年以降、ロシア国内法の変更により、外国との共同研究、それに伴うデータの国外への持ち出しに関して、国家保安局（FSB、いわゆる旧KGBの復活）および国防省の許可が必要となっている。本格的な設置許可が遅れた理由もその手続きに、半年から1年近くかかることによる。今回許可は、地震データの国外への持ち出しを「地震」に限るという条件で進めている。全データの持ち出しにすれば、もっと時間がかかるという判断からである。2006年夏に、すべての許可に関してはオーソライズされた。そのために、必要なデータ切り出しのためのイベントリストの提出、これは後日、ロシア側の研究者から関係部局に報告されないといけない、ということになっている。少々不便はあるが、このリストは必要不可欠なのが、現状である。データアーカイブ班により、利用者の声を反映したイベントリストを適宜（monthly程度が良い）作成し、次に述べるサハリンサブセンターへ連絡しなくてはならない。

一方、2005年・2006年に設置した7観測点の安定したデータ収録を維持するため、観測点の保守体制を確立する必要がある。また、ロシアから日本への波形データの安定した定期的供給を確保する必要がある。そのために、ロシア側のサブセンターとして、ユジノサハリンスクへのデータの集約おこなっている。この作業のためには、個々の観測点での保守に関する謝礼が必要であり、計画書にも記載してあるが、日本側の事務的な解釈との折り合いがうまくいかずに苦労しているところである。

今後、データのリアルタイム伝送に関して、ロシア側との協議を進める予定である。今回の計画に関連するすべての観測点、ロシア地球物理測量局（Geophysical

Survey, Russian Academy of Science) の管轄である。学問的な意味での地震観測は、ここが管轄している。それで、設置後の運用を円滑にする上で、2007年1月末から2月初めにかけて、局長とサハリン、カムチャッカ、マガダンのこの局の支部長を招聘して、2007・2008年などの運用と、その後の可能な協力プロジェクトの相談を、札幌で行う予定である。

次に、ロシアでの地震観測点の設置の実態を見ていただくために、今年の夏に実施されたシベリア大陸の観測点の設置状況の具体的な報告を載せる。

2006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⁾・前田宜浩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

2006年夏期に、極東ロシアの内陸域の町ゼーヤとウラジオストック近郊のウスリースクの2カ所に広帯域地震計をロシア人研究者と共同で設置した（前の報告の図1参照、観測点番号6と7）。以下に各観測点の設置状況等を報告する。

[1] ゼーヤ観測点；観測点番号6

日本側3名（一柳、前田、宮町）は、観測機材の運搬の都合上、7月23日、新千歳空港からプロペラ機に乗り、サハリンのユジノサハリンスクに到着、翌24日、サハリン地震観測所において機材の最終確認を行った。7月25日、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）とともに総勢5名は、全観測機材を手持ちで飛行機の貨物室に運び込み、ハバロフスクに移動した。ハバロフスクのテクトニクス地球物理研究所のボルモトフ部長らの迎えを受け、研究所にて休息した。夕刻、昨年設置したハバロフスク市内の広帯域地震観測

点を点検し、その後、ハバロフスク駅から現地時間20時26分発の寝台列車（機材はコンパートメント内に収納。乗った車両の冷房が壊れていたため、コンパートメント内は灼熱）に乗りゼーヤを目指した。翌26日14時30分にテグダ駅に到着し下車。そこからは、事前にチャーターしていた大型タクシー（公共の交通手段が無い）に機材を搬入し、約1時間半（距離で100km）のドライブの後、ゼーヤ地震観測所に夕刻の16時過ぎに到着した。日本を出てから4日目ようやく目的地に到着したことになる。宿泊は観測所から歩いて10分程の場所にあるホテル（サナトリウム）に宿泊した。

ゼーヤ地震観測所（写真1）はゼーヤの町の郊外にあるアパート群のそばにあり、建物の周囲はこの付近の主要道路に隣接しているため交通量が多く、地震観測点としての環境は良い方ではない。これまで設置してきた他の観測所と同様に、ゼーヤ観測所には住み込みの職員（男性1名）と女性2名がいて、簡単な観測機材の保守と観測データの初期処理（データのコピーと発送）などを代行してもらう。7月27日8時半に観測所に行き、荷物の梱包を解き、地震計、データ処理系の設置作業を開始した。観測所の地下室にある地震計室内の地震計台にG.STRECKEISEN AG社製広帯域地震計STS2、マーク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2）。

ただし、この地震計室は、降雨時には床下から雨が逆流し、床一面が水没する（水はポンプで汲み出されるが、地震計台は高さ50cmくらいあるので、地震計台が水没することはない）。実際、設置時にも、床面から5～10cmの高さまで水没していた。データ処理系は、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。設置作業は20時過ぎに終わった。7月28日は、地震計の微調整を行うとともに、データ処理系の操作などを現地の職員に説明し（写真3）、取り扱いに慣れる練習をおこない、夕刻にはホテルに戻った。

7月29日は、サハリン地震観測所の衛星点であるキロススキー観測所（住宅兼用の観測点で、職員は中年女性2名）の見学に行った（写真4）。ゼーヤから車で片道約3時間ほどである途中、川の流れを上手に利用した人力の渡し船で川を渡る。観測点には電気はあるものの、水



写真1. ゼーヤ観測点、庁舎

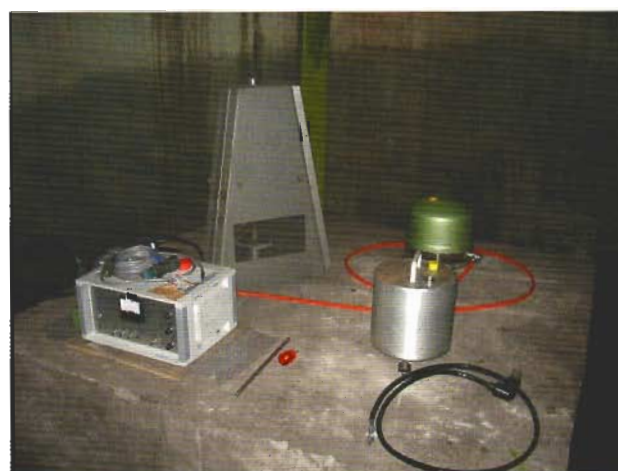


写真2. ゼーヤ観測点の地震計室内に設置した本計画の地震計。なお、地震計は運用時には保温箱で覆われている。



写真3. ゼーヤ地震観測点の職員（中央の女性2人と男性）、左端は、説明する一柳さん、右端は、サハリンのセン部長

道、電話もなく、暖房は薪ストーブという非常に過酷な地域であったが、地震観測には適していると感じた。夕



写真4. ゼーヤ観測点の衛星観測点5点のうちの1つ、キロスキー観測所全景

刻、ホテルに戻った。

7月30日の昼、帰路についた。チャーターしたタクシーでゼーヤ観測点を出発し、テイグダ駅に向い、16時56分発の寝台列車「アムール号」に乗り、一路、ハバロフスクを目指した。この寝台列車は、始発がモスクワであり、食事と洗面道具付きの豪華な列車であった。翌31日10時にハバロフスクに到着し、ホテルに宿泊。8月1日、ハバロフスク空港から飛行機に乗り、新潟空港に到着した。わずか一カ所の地震観測点を設置するのに、出国から帰国まで11日間の時間を要したが、ゼーヤ観測点は、今回の極東ロシアの広帯域地震観測網の構築において、最も西側に位置する観測点であり、今後のスタグナント・スラブの解析において重要であると考えている。表1に観測点の座標を示す。

[2] ウスリースク観測点

8月20日、前回と同様に、日本側3名（一柳，平野，宮町）は、新千歳空港からサハリンのユジノサハリンスクに向かった。到着後、サハリン地震観測所で機材の確認を行った。翌21日、サハリン地震観測所の2名（セン部長，ミハイロフ技術責任者）が加わり総勢5名でユジノサハリンスクからウラジオストックに移動した。ウラジオストックでは、応用数学研究所のゲラシメンコ教授，ニコライ助手と合流した。宿泊地はウラジオストック市内のホテルである。8月22日、ウラジオストック市内から車で2時間程の距離にあるグルノタユージネ地区に向かった。地震計の設置場所は、小高い丘の上にあるロシア科学アカデミー極東支部のウスリースク天文台の建物



写真5. 地震計を設置したウスリースク天文台内の建物

群の一棟（写真5）の地下室である。荷物の梱包を解き、地震計（STS2とL-4C-3D）および処理系の設置（ゼーヤ観測点と同一のシステム）をおこなった。

地震計は、以前に臨時地震観測を行った際のコンクリート製の地震計台（地下室）を利用した。翌23日、天文学者のロシア人に処理系の操作の説明をおこなった。8月24日、ウラジオストック市内の地震観測点を見学に行ったが、結局、その所在地が分からず、見学できなかった。8月25日、ウラジオストック空港から飛行機に乗り、富山空港に無事に到着し帰国した。表1に、この観測点の座標を示す。

[3] おわりに

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カ所の広帯域地震観測点を設置してきた。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。ロシアでの設置作業で一番苦勞するのは、ロシア人のペースで作業を行うことである。設置後の保守・点検を考慮し、できるだけロシア人に作業の多くを任せたい。ただし、せっかちな我々には考えられないくらいの作業スピードであるのも事実である。ひたすら、忍耐である。しかしながら、不思議なこと限定された期日内に必ず作業が終わり、さらに、その作業結果は確実に、信頼できるものであることを実感することが常であった。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的に観測をできるかが問題であり、各観測点の保守手順を十分に考える必要がある。

表1. 観測点の座標（座標値はWGS84系）

観測点名	観測点コード	緯度 (°N)	経度 (°E)	標高 (m)	稼働開始日
ゼーヤ	ZEY	53.7571	127.2861	280	2006/07/28~
ウスリースク	USL	43.7011	132.1629	263	2006/08/23~

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に先立ち、既存のデータを用いて主に次の5つの研究を進めた。

- (1) P波走時トモグラフィー、波形解析：より詳細なスラブイメージを求めて
- (2) S波波形トモグラフィー：スラブやプルームのS波速度イメージ
- (3) 沈み込み帯異方性構造の推定：沈み込み帯の流れ場・ストレス場解明に向けて
- (4) 沈み込み帯下部マントル反射面の検出：スラブ物質の行方を求めて
- (5) スタグナントスラブ・データセンターの構築

(1) P波解析

(a) P波走時トモグラフィー (大林, 深尾)

滞留スラブの細かな形状を明らかにするために、OHP, JISNET, SPANET, SKIPPY, IRISデータからのP波読み取り値やIRISデータによるPP-P走時差データをISCデータに加えてP波走時トモグラフィーを行った。その結果、沈み込み帯によってさまざまに異なる深さでスラブが滞留している様子が得られた(北千島, マリアナ, ジャワでは660km不連続面の下で滞留, 南千島, 中国, フィリピン海では遷移層の中で滞留)。いずれの場合も遷移層付近で高速度異常の水平的拡がり最も顕著なのは660km不連続面ではなく、スラブが660km不連続面直上に横たわっている様子は見られない(図1)。中国やフィリピン海では、傾き下がるスラブが660km不連続面に当たる場所で660km不連続面が30-40km深くなり、そこから離れると深さがグローバル平均値に近づく(Tono et al., 2005; Niu et al., 2005)。P波トモグラフィーの結果は、660km不連続面の凹凸と調和的である。

(b) P波波形解析 (田島)

これまでの解析で、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)あるいは、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)、およびそれらを多少変化させた構造で説明できることが分かっている(図2左上)。千島の沈み込み帯、および日本列島付近の東北部と南西部に認識できる構造境界でのサンプリングを増やし、構造遷移の詳細を調べたところ、構造遷移はかなり急激に起こっていることがわかった。また、M3.11やM2.0で代表される構造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る(図2右)。これらの異常はごく狭いゾーンで起こっており、震源近傍でSV-P変換が起こった可能性を示唆している。

(2) S波波形トモグラフィー (竹内)

昨年度までに開発した波形トモグラフィー法に改良を加え、Degree-18の全マントルS波速度構造を推定した。昨年度までに、解像度を全領域で均一化するようなトモグラフィー手法(データの重み付け手法)を開発した(Takeuchi & Kobayashi 2004, GJI)。この手法では、従来のトモグラフィー手法で使われていた光学波線近似に起因する解像度の劣化を避けるため、水平方向不均質構造の影響を厳密に計算する。要する計算時間は膨大になるが、筆者らが開発した効率的な理論波形計算手法(Direct Solution Method; Takeuchi et al. 2000, PEPIなど)及び地球シミュレーターを活用することにより計算

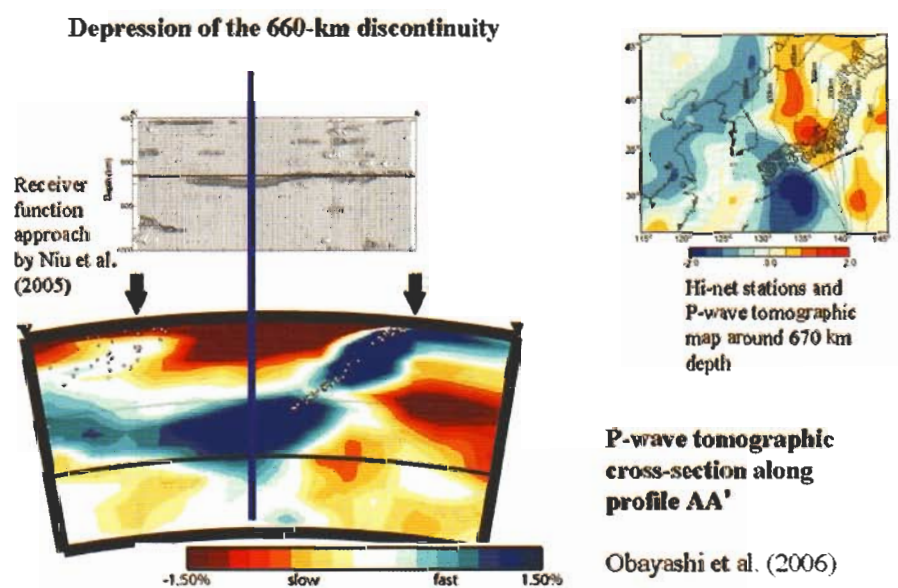


図1 伊豆-小笠原弧から沈み込み、滞留するスラブのP波トモグラフィー像とレーザー関数法によって推定された660km不連続面の凹凸(Niu et al., 2005)の比較。

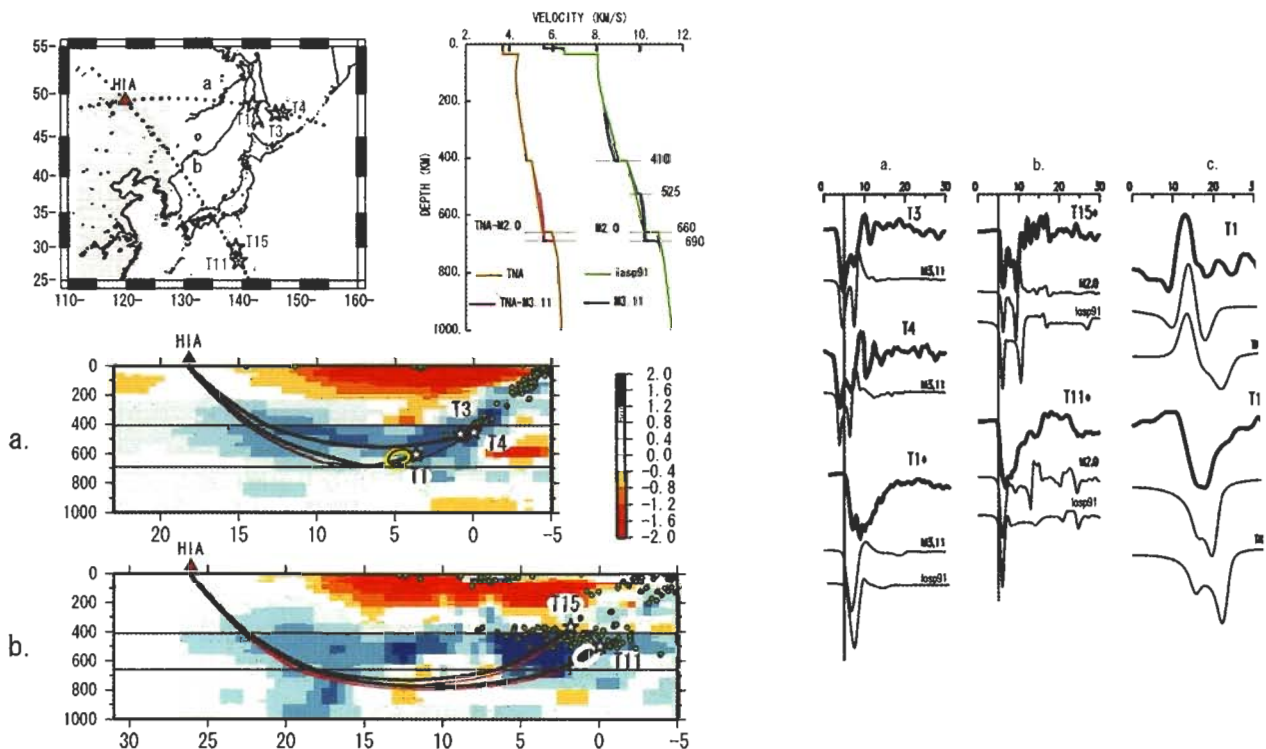


図2 P波波形解析から明らかになった千島と伊豆-小笠原の滞留スラブ付近の1次元速度構造(左上)。用いたP波線経路(左下)と波形(右)も示す。観測波形には、1次元構造による理論波形では説明できないbroadenを示すものがあり、滞留スラブ内部の微細構造によると考えられる。

可能になった。

今年度はこの波形トモグラフィー手法にさらに改善を加え、全地球SH速度構造モデルを推定した。メモリ使用の最適化により深さ方向の解像度(モデルパラメータ数)を4割改善するとともに、震源パラメータの誤差に内部構造モデルが乱されることを避けるようなweighting手法を新たに導入した。これにより上昇流域の深さ解像度・下降流域のモデル推定精度が特に改善され、2大上昇流域における速度構造の相違(図3左)及びスタ

グナントスラブの構造(図3右)の検出に成功した。

(3) 沈み込み帯異方性構造の推定(東野, 深尾)

本研究では、防災科研が運用しているHi-net傾斜計によって観測された核表面反射波とその多重反射波(SsScS, ScS2, sScS2)のスプリッティングを解析し、本列島下の異方性構造を推定した。Hi-net高感度地震観測網には、短周期地震計と同時に傾斜計が設置されており、Hori(2001)は、設置されている傾斜計記録を長

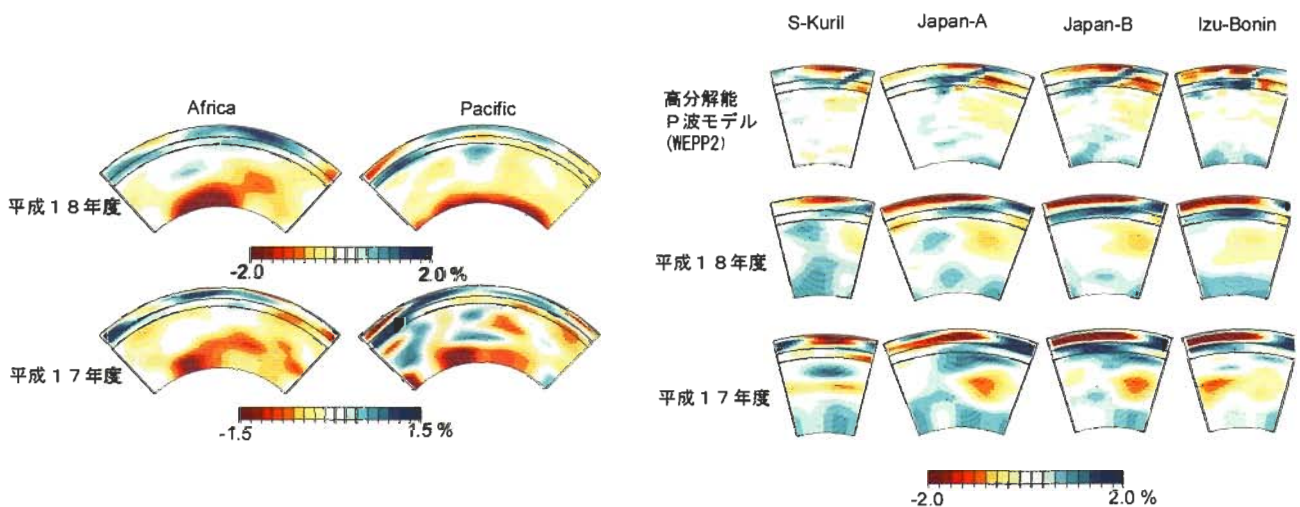


図3 S波波形トモグラフィー法により明らかになったアフリカ・南太平洋上昇流(左)と西太平洋沈み込み帯スラブのイメージ(右)。平成18年度に行った手法改良によって、上昇流やスラブのS波トモグラフィー像が明瞭になった。比較のため、高分解能P波トモグラフィー像(WEPP2)を示す。

期地震計記録として応用できることを示した。高密度地震観測網による高い分解能が得られるため、Hi-netに設置されている傾斜計を長周期地震計として応用することは、地球内部構造を探る新しい窓になると期待される。用いたイベントはVladivostok, Kuril, Sakhalinの3つの大深発地震でHi-net傾斜計ではScS, sScS, ScS2, sScS2波が明瞭に観測された。本研究では、Hi-net傾斜計によって観測された核上面反射波(ScS)とその多重反射波を用いて記録に含まれる震源、マントル、観測点直下の異方性を分離することを試みた。異なる震源メカニズムを持った複数の深発地震を稠密なHi-net傾斜計によって観測したことにより、異方性の地域性推定が可能になった。得られた異方性は、以下の通りである(図4)。

- (1) 震源直上の上部マントルでは、スラブ沈み込み方向で速度が速い(図4左)。
- (2) 観測点直上のマントルウェッジでは、火山フロントより海溝側では、スラブ沈み込みに直交方向で速度が速く、火山フロントより背弧側ではスラブ沈み込み方向で速い(図4左)。
- (3) 震源-観測点間のマントル、特に沈み込んだスラブでは、過去(43Ma以前)のプレート拡大方向で速度が速い(図4右)。

この結果は、スラブ沈み込みに伴う流れパターンや変形メカニズムを推定する上で重要である。

(4) 下部マントル反射面の検出(末次, 大林)

スラブは遷移層との相互作用により強く変形していると思われるが、変形様式は明らかでない。その実態解明に

はスラブ内外の詳細な構造推定が鍵を握る。2002年マリアナ深発地震(500km)のHi-net観測網記録のP波部分に明瞭な後続波が見つかった(図5左)。後続波は4つあり、それぞれP波から10-15秒(X1), 28-32秒(X2), 40-45秒(X3), 85-95秒(X4)に存在する。X1-X3は西日本における記録に良く現れ、X4は東日本により多く現れる。Niu et al. (2003)はX4を深さ1115kmにおけるSP反射変換波と同定した。X1-X3が最も明瞭に観測される方位325-330度のデータを用いてアレイ解析を行った。その結果、は以下の通り。(1) いずれの後続波もP波と同じ方位から到来している。(2) スローネスは、X1, X2, X3の順に小さくなる(入射角が小さくなる)。X1と直達P波のスローネスはほぼ同じ。(3) いずれの後続波も観測点においてはP波的振動方向を持つ。以上から、後続波が震源直下下部マントルにおける複数の反射面からのSP変換波であると考え、水平反射面を仮定して走時解析を行った。その結果、X1-X3は各々、深さ720kmにおける透過SP変換波、860kmにおける反射SP変換波、940kmにおける反射SP変換波であるとする走時とスローネスを最も良く説明することが分かった(図5右)。今後は、反射面の傾きや空間分布を推定するとともに、反射面の性質(速度増加か減少か、低速度層か否かなど)を波形解析から推定し、その実体を同定する。

(5) データセンターの構築(坪井)

データセンターは9月中旬に仮運用を開始した(図6)。現在取得できるデータはロシア広帯域地震観測網のうち、

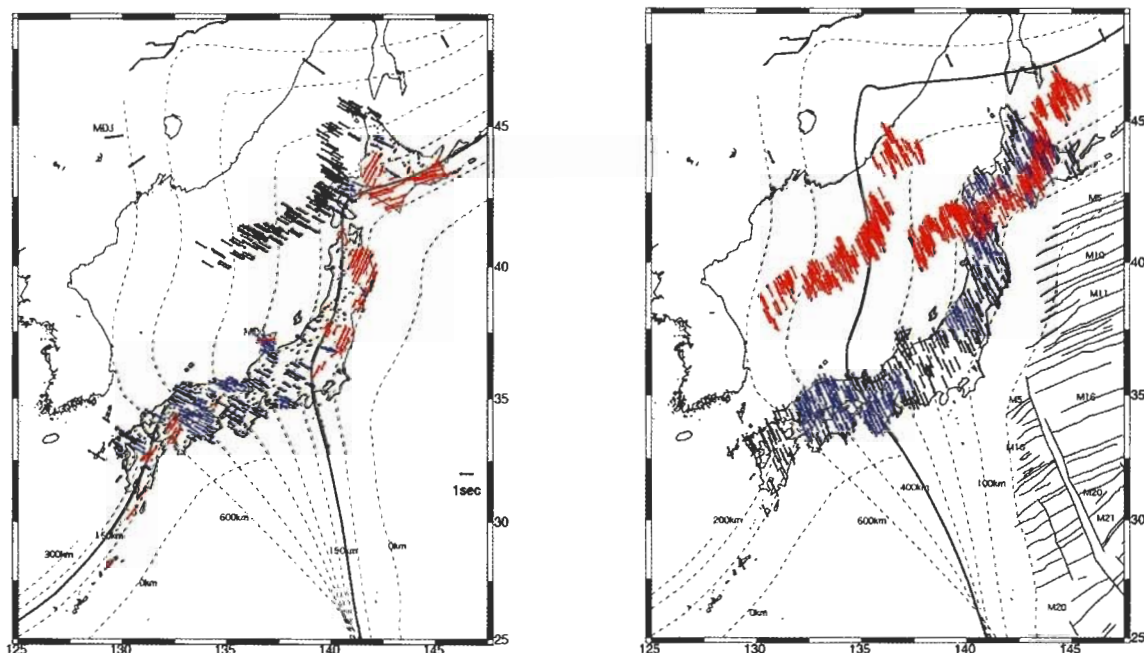


図4 多重ScS反射波のスプリティングから明らかになった日本列島周辺のマントル異方性の地域性。左は、震源直上及び観測点直下のマントルウェッジにおける異方性による高速度方向、右は沈み込むスラブ中の異方性による高速度方向を示す。

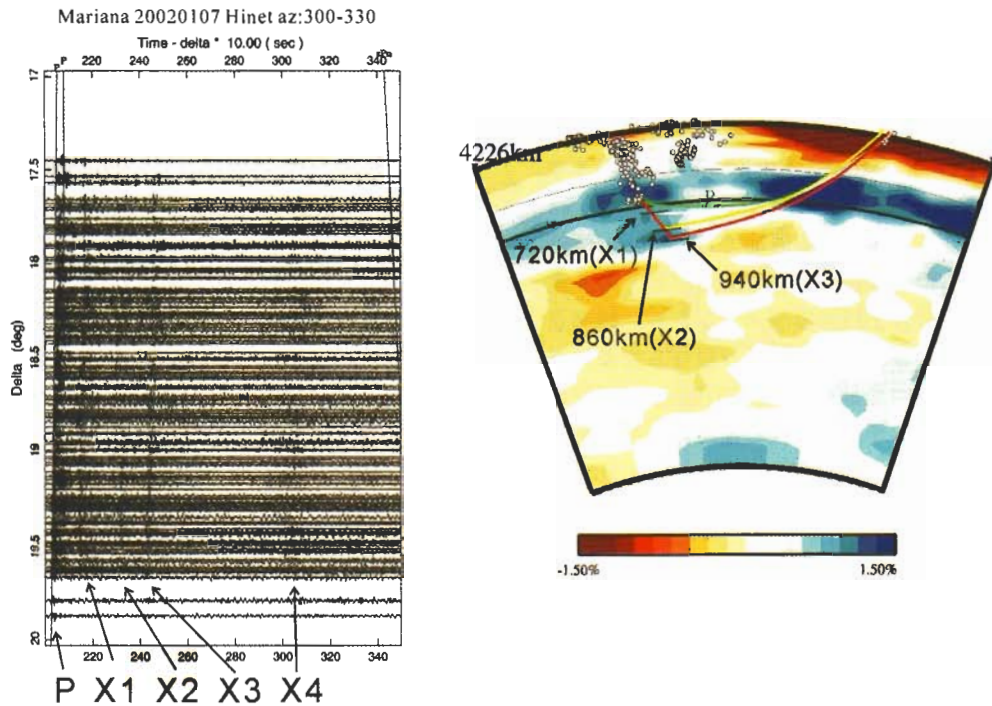


図5 2002年マリアナ深発地震の西日本でのHi-net上下動記録（左）。X1-X4の後続波が生記録でも確認できる。X1-X3波を下部マントルの水平不連続面のSP変換波として解釈した場合の変換面の位置（右）。P波トモグラフィ像の上にプロット。

今年度に設置したTymosk, Okha, Khabarovsk, Gorney, Terneyの5点の観測点で記録されたSTS-2広帯域地震計の連続記録である。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、2006年度に回収された海底地震計データや地球電磁気データなどもデータベース化されて取得できるようにする予定である。データセンターのページには特定科研費の研究分担者のみに知らせたユーザIDによりアクセスできるようにする。ユーザIDなどについては用意ができ次第、特定領域参加者にお知らせする。

(6) 今後の方向性

今後は、既存データを用いた上記の研究を進めるとともに、今年度回収された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トル不連続面凹凸、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、高圧鉍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。

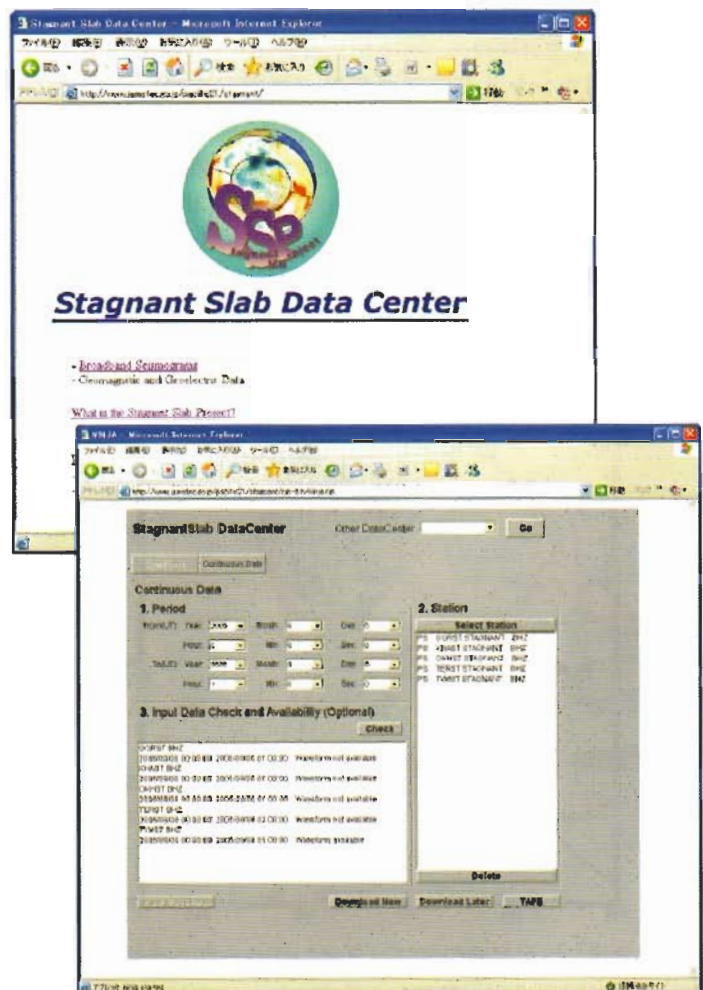


図6 データセンターのデータ取得ページ。

海底広帯域地震観測でスタグナントスラブを診る

金 沢 敏 彦 (東京大学地震研究所)

本研究班では海底電磁気機動観測を実施するエ班と共同で、本特定領域研究での一つの鍵となる観測研究として、2005年10月から2008年までの3年間、フィリピン海と北西太平洋の領域での長期繰り返しの海底広帯域地震観測を計画している。本年度は、昨年度に開始した最初の観測データを回収し長期観測を継続するために、海洋研究開発機構の深海調査研究課題公募で採択された、研究船「かいれい」のKR06-14航海(10月29日～11月20日)を実施した。本航海では昨年度に設置した18観測点(図1)で広帯域海底地震計(BBOBS)12台および海底電磁力計(OBEM)11台を回収しつつ、新たに各12台を図2に示す19観測点に設置し、加えて来年度の航海でOBEMを設置予定の2地点(T16, T20)での精密地形調査を行った。今回の第2期観測では、伊豆小笠原弧のT15観測点以西の12観測点にBBOBSを設置し、約1年間の観測を実施している。

回収したBBOBSでは、7台は予定通りの長期観測データを得たが、残り5台については機器内部のトラブルにより十分な記録が得られなかった。今回設置した機器では問題解決している可能性が高いが、今後原因究明と対策を行い、来年度の最終観測に備える予定である。なお、4台に搭載した精密差圧センサーによる記録はほぼ全期間にわたり得られている。BBOBSの回収から間もないので、データ解析はこれからであるが、T06観測点で得られているM6.5以上の地震記録とノイズモデルを図3に示す。地震記録の質はほぼ予想通りであるが、平均的ノイズレベルを示すノイズモデルは以前に同海域で得られたものに比べて高いことが分かり、現在その理由を検討している。

その他、来年度の観測航海に向けての広帯域海底地震計の調達を行っている。

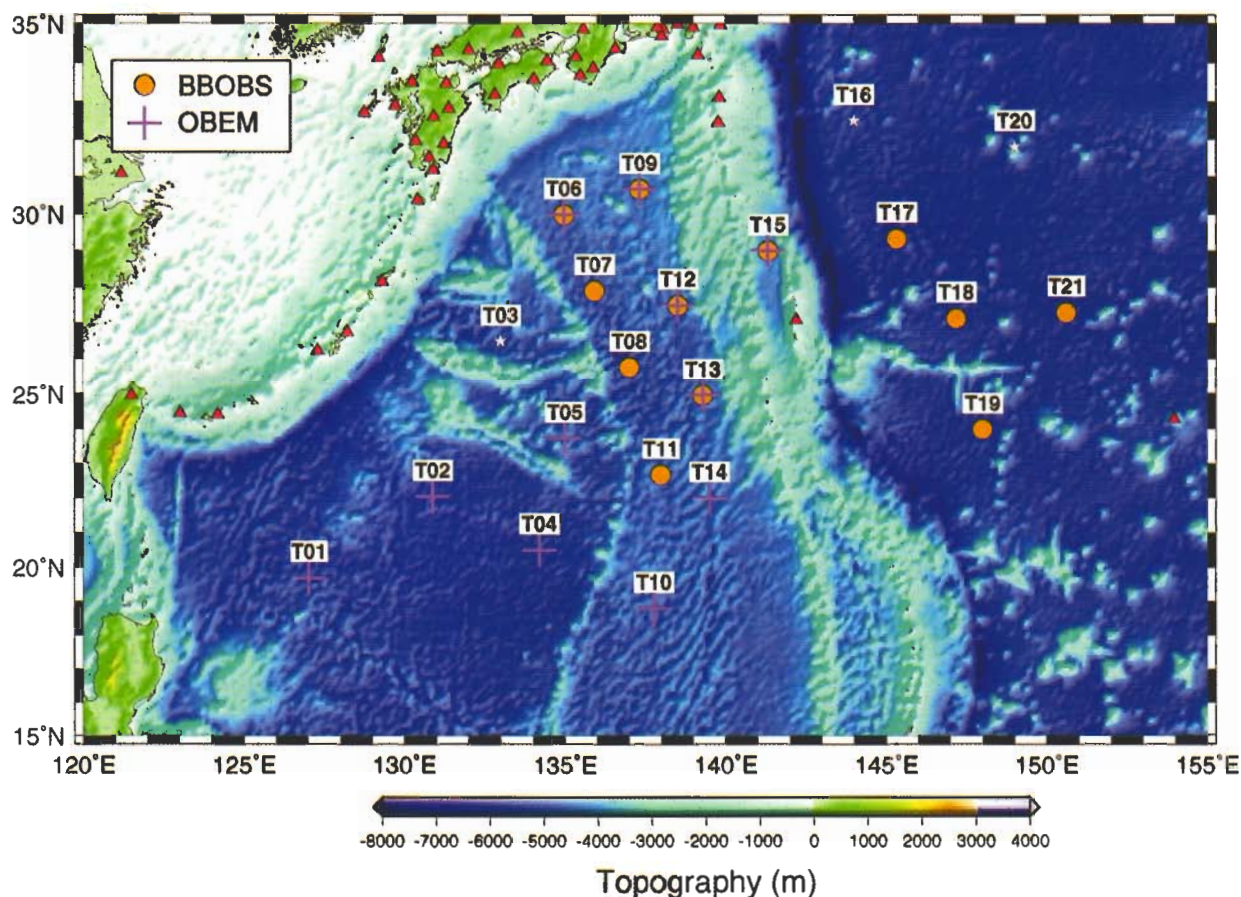


図1 今年度回収した海底地震・電磁気観測点の配置図 (●:地震, +:電磁気, ☆:2006年以降の観測点, ▲:陸上地震観測点)。

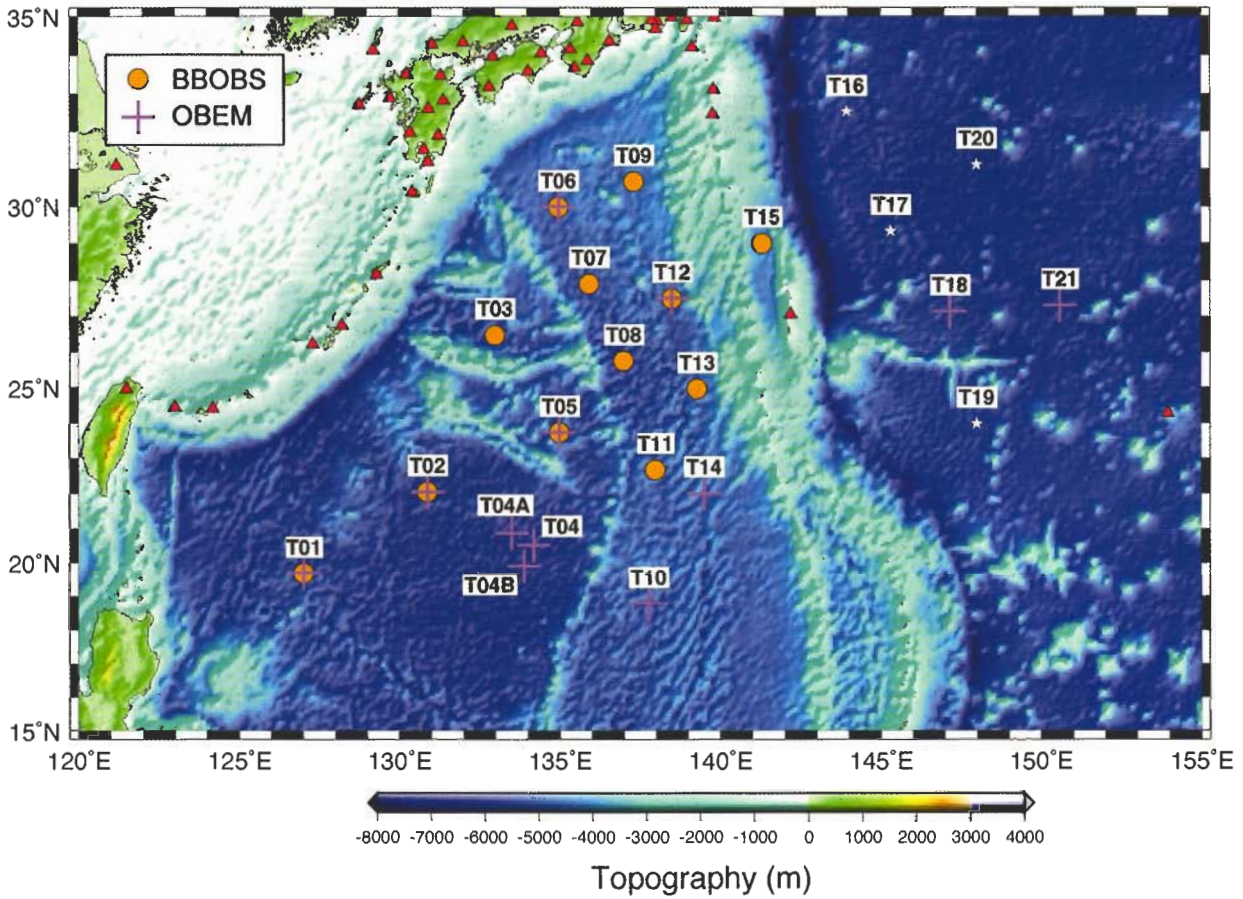


図2 今年度設置した海底地震・電磁気観測点の配置図 (●:地震, +:電磁気, ☆:2007年設置の観測点, ▲:陸上地震観測点)。

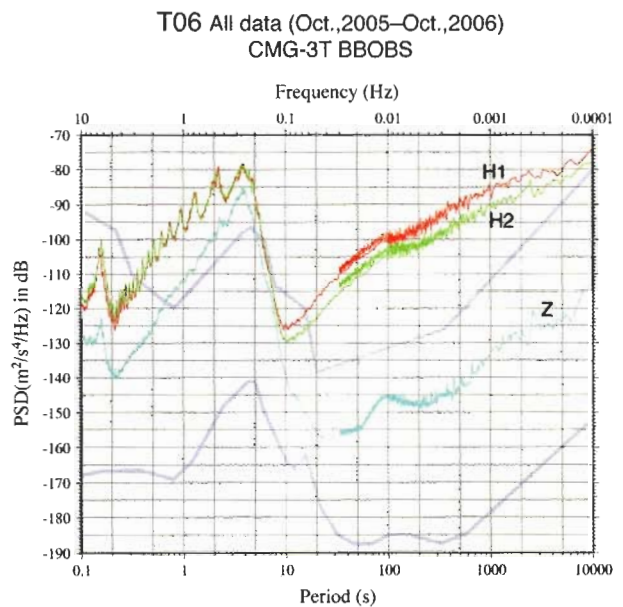
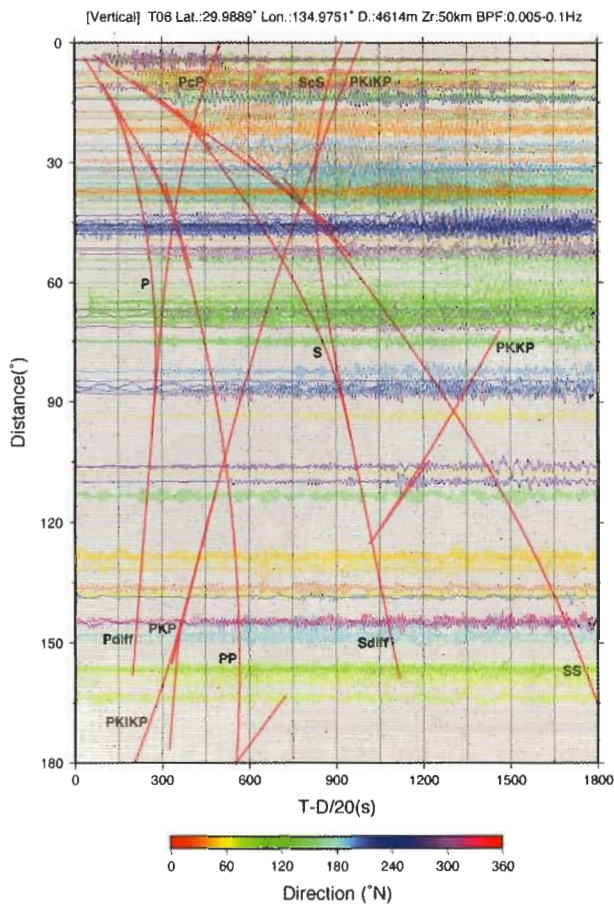


図3 T06観測点のデータによるレコードセクション(左)とノイズモデル(右)。前者には10~200秒のバンドパスフィルターをかけ、震源深さを50kmに補正、IASP91モデルによる理論的走時曲線を重ねてある。後者の背景には、統計的に得られた陸上観測点でのノイズの上下限を示してある。

また、海底地震観測データが得られるまでの解析準備段階として既存のネットワークデータを使用し、以下に挙げる主要な成果を得た。

(a) 日本弧下マントル不連続面のマッピング：

反射法地震学的手法を用い地震波速度変化の大きい場所（マントル不連続面）を特定した（図4）。スタグナントスラブが西南日本の660km不連続面に沈み込むに伴い、660km不連続面が40~50kmほど大きく下に変形していることが見て取れる。マントル橄欖岩のペロフスカイト構造への相分解が、冷たいスラブの影響でより深部で起こるとされる考えと調和的である。しかしながら変形の幅（約500km）はスラブの単純な沈み込み（penetration）でも、単純な横たわり（stagnation）でも説明つけにくく、ウ班研究で得られるトモグラフィー、ク班研究で得られる温度構造、オ・カ班研究で得られる物性情報とあわせることにより、スタグナントスラブとマントル遷移層のダイナミクスの実体を紐解く取っかかりになると期待される。

(b) 日本弧下の温度・物質（水）トモグラフィー：

P波・S波・減衰率（ Q_p ）のトモグラフィーと実験／

理論から推定される温度・物質不均質依存性を取り込み、温度・含水量・物性（Mg/Fe比）トモグラフィーを開発した。手法が適用可能な西南日本下の結果からは、スラブからの脱水と見られる含水量の多い場所が400km不連続面の直上に観測された（図5中下の赤い部分）。今後海底観測データを取り込み、北部フィリピン海全体にわたってより広範囲で詳細な温度・物質分布の推定が期待出来る。また海底電磁気観測（エ班）から得られる電気伝導度トモグラフィー・カ班による物性情報などを取り込むことで、redundantな情報をもとに、スタグナントスラブからの脱水過程、上部マントルでの物質循環に関して画期的な知見が得られることが期待される。

(c) 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波トモグラフィーが示す沈み込んだスラブがマントル遷移層で横たわっている描像に対し、実体波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（図6）。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対し、定常観測点として日本列島および中国に展開されている広帯域地震観測網データを解析したところ、ス

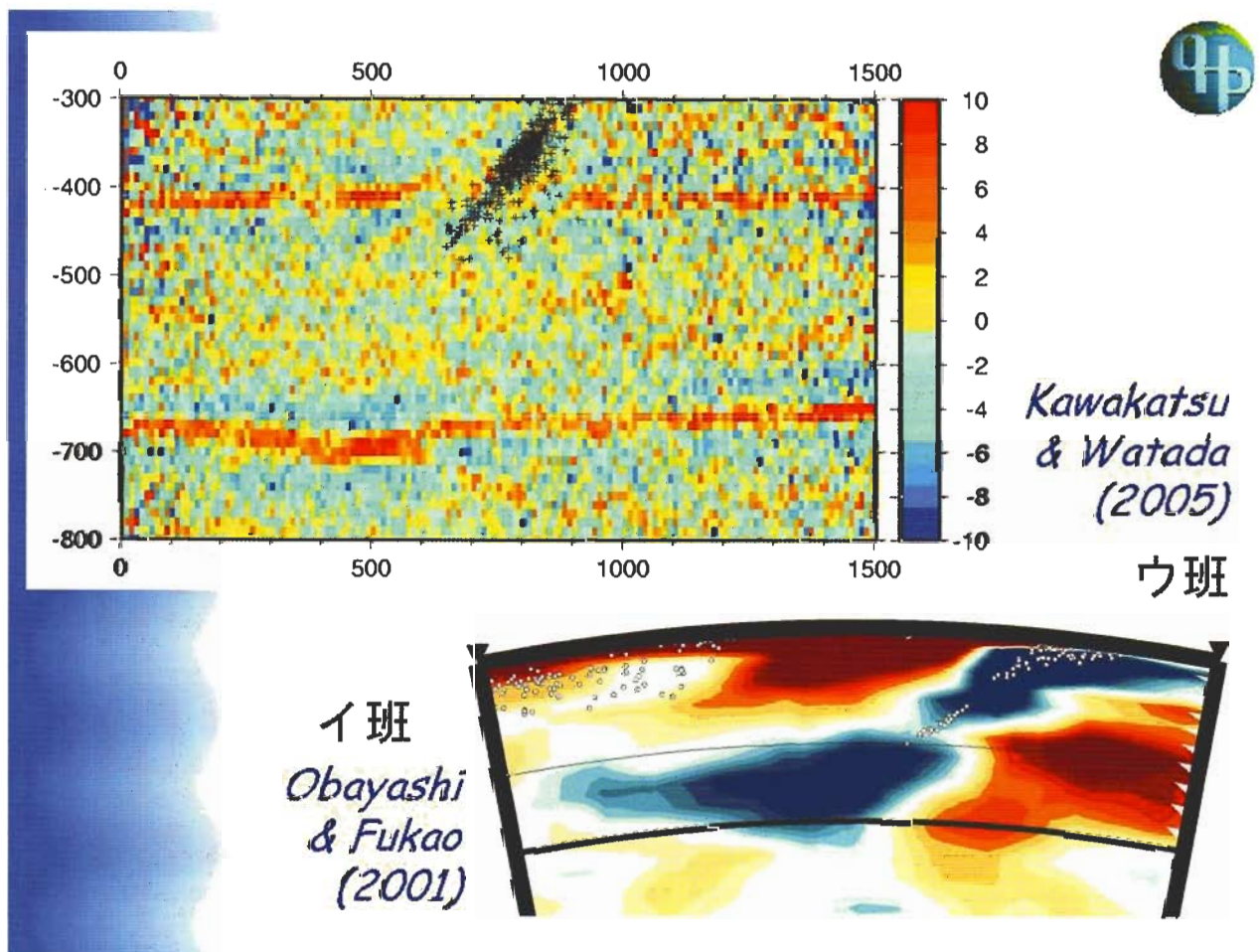


図4 西南日本下の地震波変換率断面（上）とトモグラフィー（下）の比較。地震波変換率断面：地震波速度が急激に増える場所（410km、660km不連続面）が明るい色で示されている。

日本弧下マントルの 含水量トモグラフィ

Shito et al (2006)

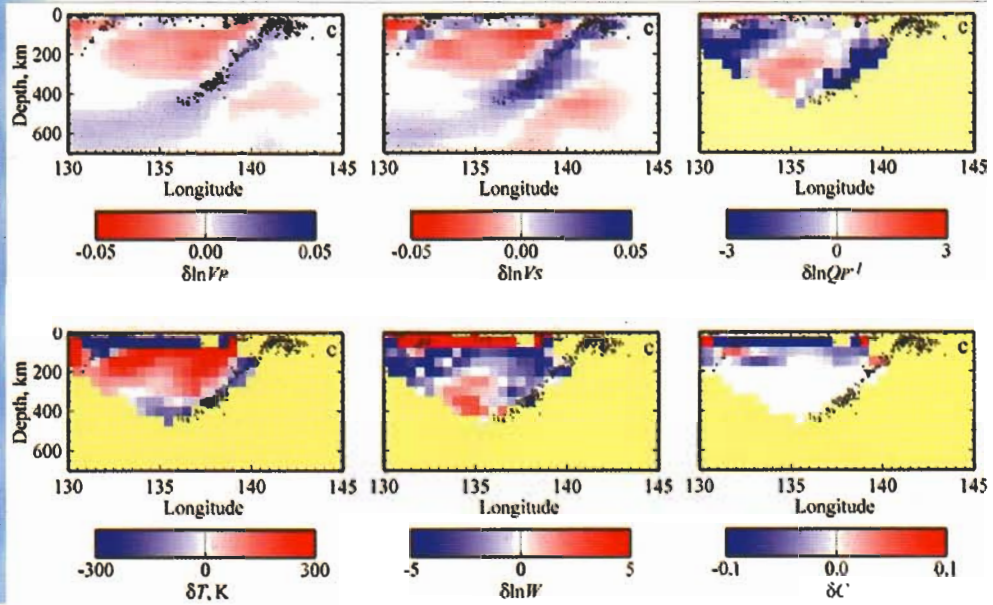
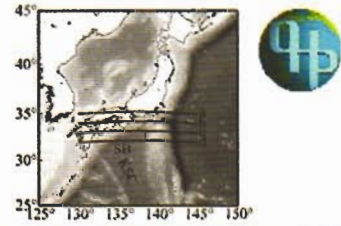


図5 上段：左からP波、S波、P波減衰率のトモグラフィ。下段：左から、上段の地震波トモグラフィより推定される温度、含水量、物性の分布。

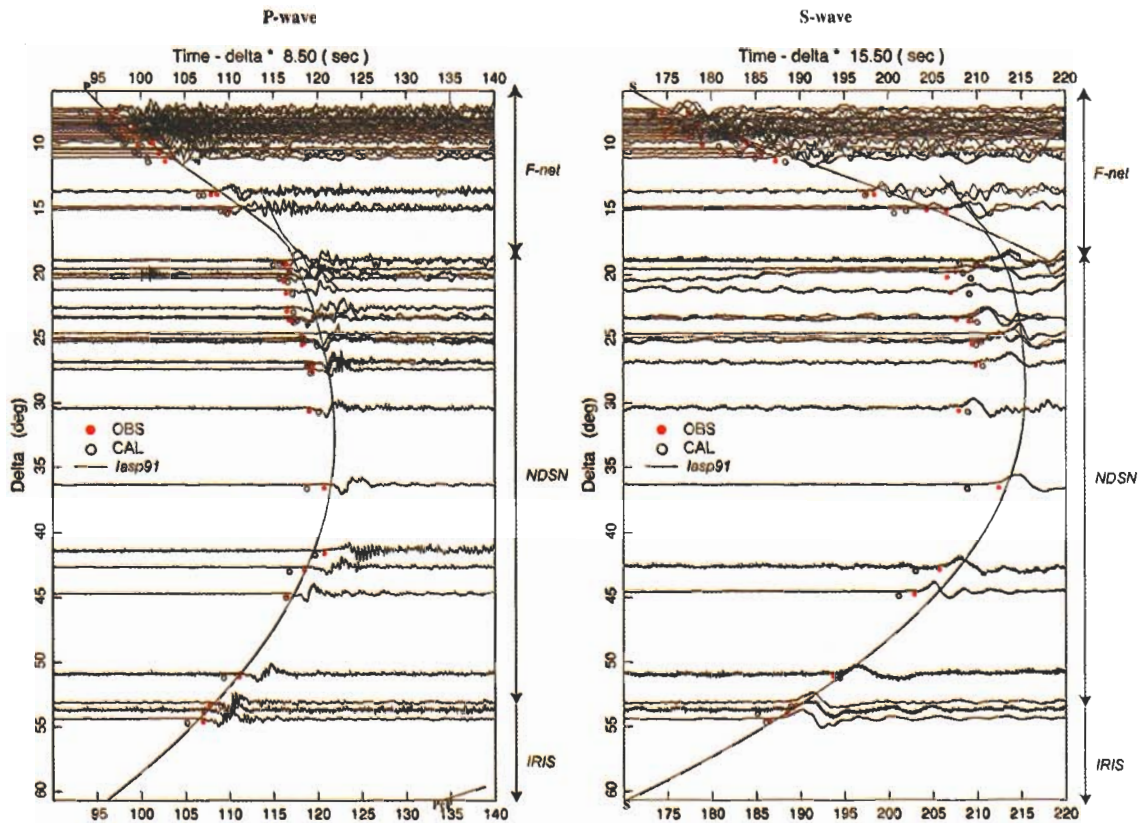


図6 広帯域地震観測網 (F-net, IRIS, NDSN) に記録された観測波形に読み取った初動 (赤丸) 3次元モデルを考慮した理論走時 (黒丸) を重ねた図。実線はIASP91理論走時曲線。P波 (左) とS波 (右) のいずれにおいてもスタグナントスラブに関連した走時異常が顕著に現れている。その残差はP波で4秒、S波で6秒にも及ぶ。

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。この観測事実、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、Widiyantoro et al., 1999）。3次元P波速度構造（Obayashi et al., 2006）を考慮した理論走時は、検出した観測走時異常をよく説明した。また、 V_p と V_s の変分比（ R ）を一定であると仮定し、P波速度構造から推定したS波速度構造に対する理論走時と観測走時の残差も小さいものであった。このとき R は1.7であり、この領域における速度異常の原因として温度依存性が重要であることを示唆している。今後は、海底広帯域地震観測網データを組み入れ、広範囲における3次元的な R の値を推定する。

に十分な解像度のある速度構造モデルを求めることが困難であった。しかし広帯域海底地震計による地震観測が実用化され、従来より高い空間解像度（約300~400km）をえることができた。基本モード及び高次モードの表面波の位相速度をデータとして用い、有限波長効果、波線追跡を考慮する最新の解析手法を用いることでより現実を反映した3次元S波速度構造モデルを構築した（図7）。得られた結果は、深さ約120kmまでは海洋底年代と調和的であり（年代が古いほど速度が速い）、160km以深では沈み込む太平洋プレートが高速度異常として明瞭に見られ、また大東海嶺の南とフィリピン海最南端に低速度異常が見られた。本特定領域研究では海底地震観測網が面的に展開されており、本研究結果よりさらに詳細な速度構造が得られることが期待される。

(d) フィリピン海域の3次元S波速度構造：

フィリピン海域では地震と観測点の地理的制約のため

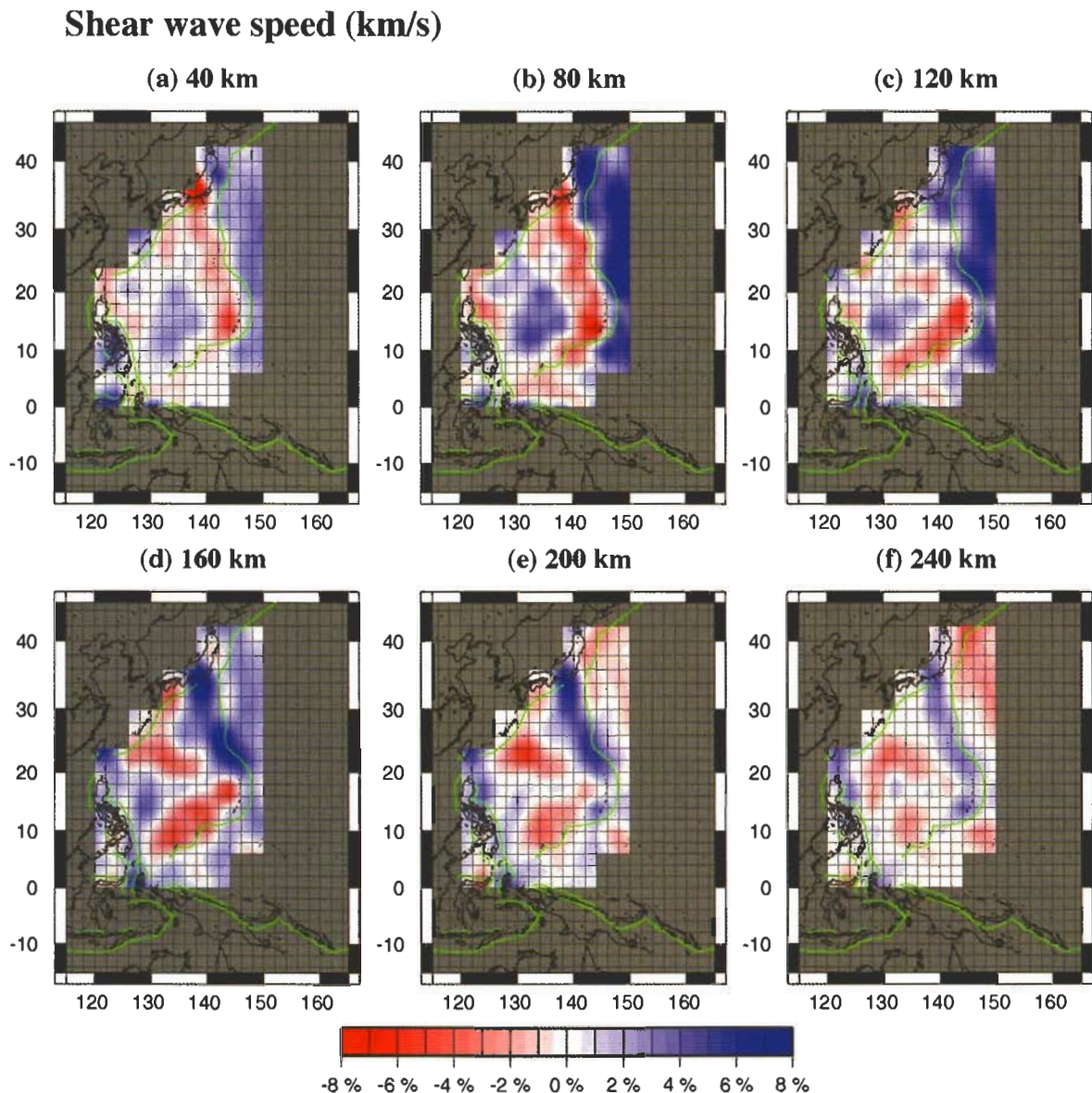


図7 既存海底地震データを組み込んだ、表面波トモグラフィーによる深さ毎のS波速度構造。

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。これまでに得られた結果は、未だ解像度や信頼性に問題が残る部分があるものの、ハワイの下に高温領域を示唆する高電気伝導度異常領域の存在や、フィリピン海下の遷移層下部に低温領域を示唆する低電気伝導度異常の存在などが示唆され、定性的にはP波トモグラフィーともよい一致を示した。しかし、フィリピン海下の低伝導度異常領域のすぐ上には（およそ400kmくらいの深さ）、顕著な高電気伝導度異常が見出されたが、トモグラフィーでは特段の異常はみられず、これらの異常の原因が単純に温度異常のみでは説明できないことが示唆された (Fukao et al., 2004)。中国東北部の上部マントル最下部でも、同様の高伝導度異常が見出された (Ichiki et al., 2005)。これらの高伝導度異常はスタグナントスラブの直上にあると推定されることから、スラブから水が供給された結果であるとの解釈することが可能である (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 (図1) 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。

本年度も昨年度に引き続き海洋研究開発機構の研究船「かいらい」による機動観測航海を実施した。10月29日 (横須賀発) から11月20日 (横須賀着) まで、およそ3週間の航海で、昨年設置した全11台のOBEMを回収するとともに新たに12台を設置した。図2 a および 2 b に、T04観測点における回収の状況を示す (11月4日)。回

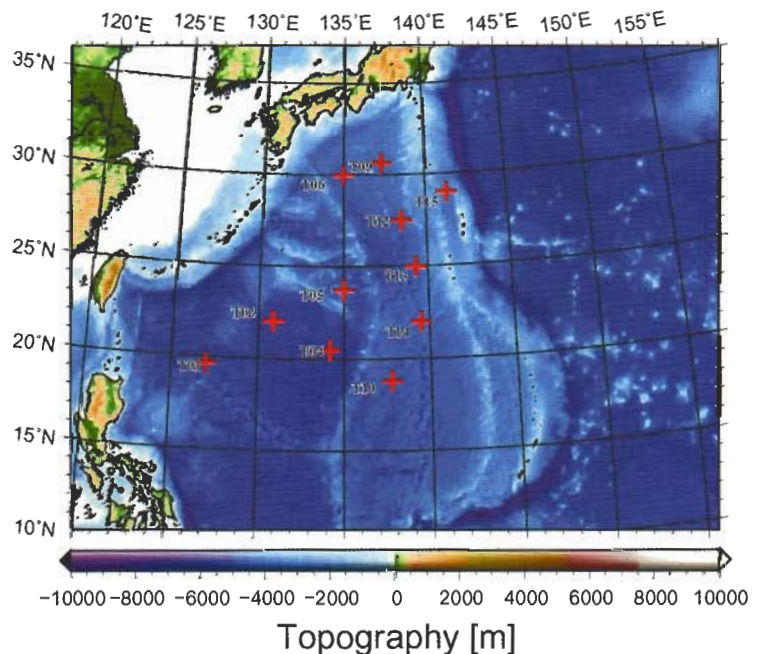


図1 2005年10月～2006年11月の約1年間設置して観測した海底電磁気観測点分布。

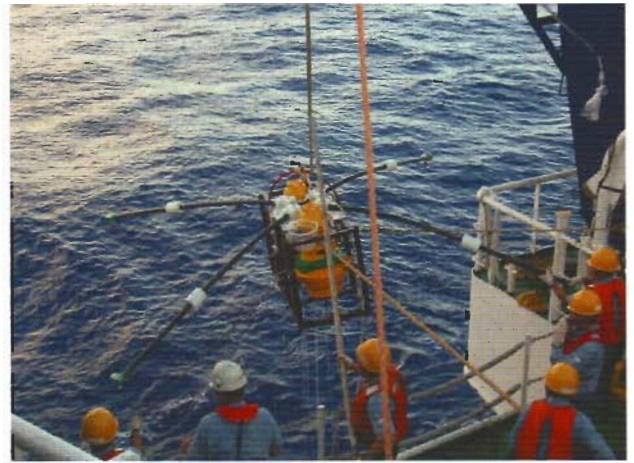
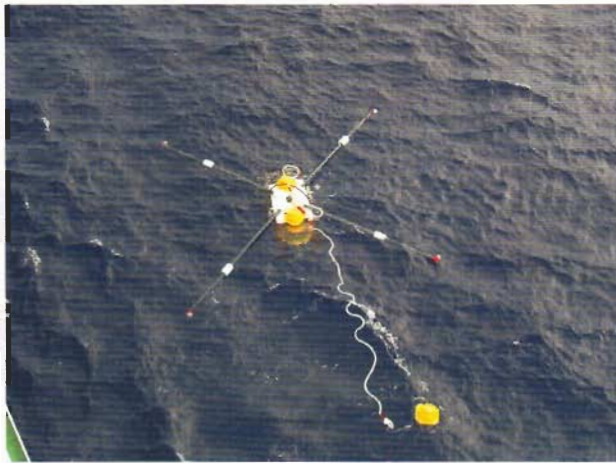


図2 左：2006年11月4日、観測点T04で浮上したOBEM。
右：Aフレームによってつり上げ、回収されたOBEM（いずれも馬場聖至撮影）。

収した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）ともにほぼ全観測期間の毎分値データが記録されていた。

図3は、2006年4月に発生した磁気嵐前後の10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）およびモンテルパ（MUT）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、数時間程度から10日程度の長い時間スケールまでの応答関数を求めることができるものと期待される。

図4は、図3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。一番上に観測点T02の全磁力を参照のためにプロットしてある。電場データも同様に概して良好であるが、T01の電場の1成分（最下段のプロット）は短周期のノイズが大きく、T09では2成分ともに数日程度の時間スケールの変動が目立つ。この2観測点では、MT応答関数の高精度の決定は難しいであろう。また、特にT12で顕著に見られるように、周期約1日の変動が多く観測点で見られる。正確には高分解能の時系列解析を行なって判断すべきであるが、これらは潮流の影響である可能性が高い。本領域の研究テーマとは直接関係はないが、興味深い現象である。

さらにこの磁気嵐の主相にあたる4月14日の24時間について、同様に電場変動のプロットをしたのが図5である。数時間程度の短周期変動は全ての観測点・成分で高い相関があることが伺える。これらの変動には、上部マントル深部（深さ数百キロメートル）の情報が含まれている。

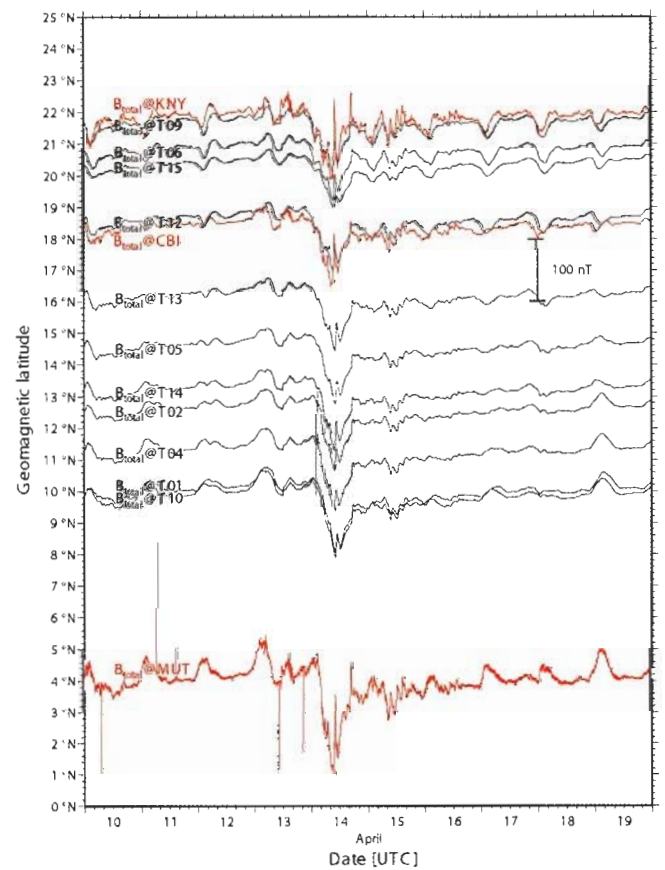


図3 2006年4月10日～4月19日における、陸上観測点（赤線）と海底機動観測点（黒線）で得られた全磁力の変動。縦軸は地磁気緯度で並べてある。

2. 2. 既存データの解析

昨年度のニュースレターに述べたように、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、地震波トモグラフィー（計画研究イの成果）と室内実験（計画研究カの成果）を用いることによって、水の分布を求めることを試みた。ここで用いた電気伝導度構

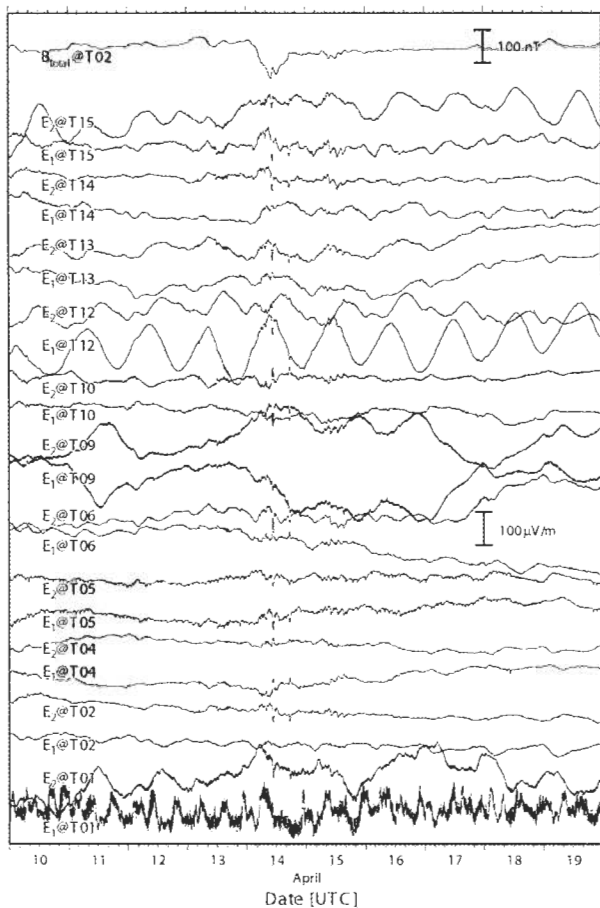


図4 図3と同じ期間における各海底観測点の電場2成分の変動の様子。縦軸は観測点番号の順に並べてあり、成分1と成分2は観測装置に固定した座標系の水平成分である。

造は、2001年にもとめたものであり、当然その時点以前に得られた陸上地磁気観測点における磁場データおよび海底ケーブルによる電場データがインバージョンでは用いられた。中には、1～2年のデータ長で応答関数を求めた観測点もある。そのような観測点では、それ以降の5年間にデータが蓄積されたため、当時よりもはるかに精度のよい応答関数が推定できる可能性がある。また、2001年には公開されていなかったなどの理由で用いなかったが、今では解析に用いることのできる観測点も見出された。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、電磁気応答関数の再解析を進めている。

3. 今後の展望

平成19年の航海では、フィリピン海においてももう一度OBEMの回収と再設置が行なわれ、海底電磁気観測データの長期化をはかる。また、今年度の航海では、公募研究からの提案を受けて西フィリピン海盆のT04点の周辺に十字形のアレイを設定した。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

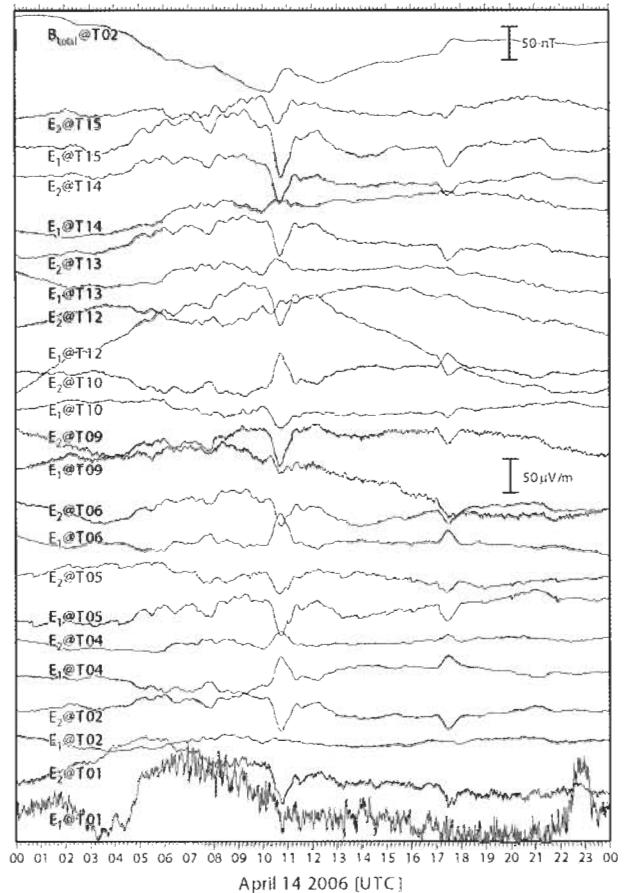


図5 磁気嵐の主相を含む24時間（2006年4月14日）の各海底観測点における電場変動。

の異方性があるのかを明らかにすることを目的として行う。

我々が北西太平洋の電磁気トモグラフィーによる電気伝導度分布モデルを得てから5年あまりになる。本計画研究班では、2. 2. で述べたような新たな陸上およびケーブルデータのコンパイルと解析を進め、海底機動観測データを含めたインバージョンにより、従来の電気伝導度構造モデルを更新し、他の計画研究（地震解析や高温高压実験）との共同研究を通じてさらに進んだ結果の解釈を行いたい。

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て、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いくつかの重要な研究成果があがりつつある。

計画班は愛媛大学GRC、岡山大学ISEI、広島大学、SPring-8の西日本の研究機関を中心とした研究者からなるが、この間1) インターネットを利用した日常的なメールやデータのやりとり、2) 神戸の国際鉱物学会(IMA)開催中に班員全員の集まりを開催し意見交換をおこなうとともに、3) SPring-8やGRCにおける共同実験、等により緊密に連絡をとりつつ研究をすすめている。

この結果として各個人やグループはもとより、本研究計画班内の異なる研究機関の間、あるいは他の研究計画班との間でいくつかの研究成果が論文として発表されている。

本年度予算でSPring-8のBL04B1において、X線イメージングの解像度の向上などを目指して、単色化装置を購入予定であり、2月頃の導入を目指して現在その発注をおこなっている(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、本年度予算で弾性波測定に必要なデジタルオシロスコープ等をSPring-8にも設置し、近い将来愛媛大GRC以外のグループでも測定が可能なシステムを構築する予定である。

一方、昨年度予算で愛媛大GRCにおいて昨年度後方散乱X線解析装置(EBSD)を導入したが、本年度はこの解析ソフトウェアを広島大学に本特定領域予算で導入するとともに、岡山大学ISEIでも同様のソフトウェアを導入した。このことにより、GRCにおいて得られた

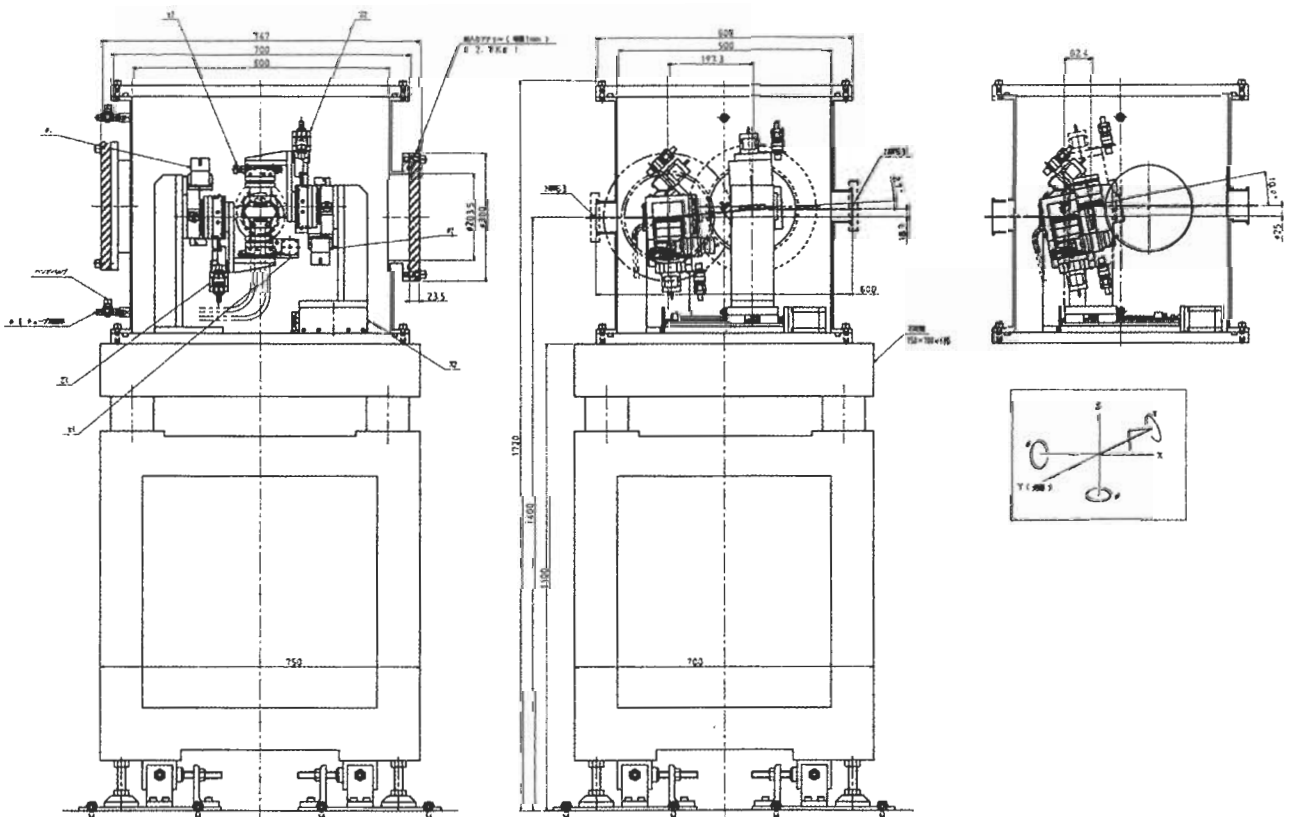


図1 平成18年度にSPring-8に導入予定の単色化装置の概要

EBSD測定データを、各グループにおいて解析することが可能になり、EBSD利用およびの解析時間の効率化が大幅にすすみ、高压合成試料や変形試料の微細組織や選択配向の観察に多大な成果があがっている。

2. 研究成果

本特定領域研究が開始されてから様々な研究成果がありつつあるが、ここではそのうちすでに論文として印刷・投稿中のトピックス的成果を2, 3紹介する。

1) 含水かんらん石の電気伝導度測定

近年の観測によると、海洋底アセノスフェア最上部の電気伝導度は、無水かんらん石では説明できないほど高く、また異方性が大きいことが報告されており、これは、かんらん石の含水化によって説明されている。この仮説を検証する為、含水かんらん石の電気伝導度測定を行った(図2)。測定試料はカンラン石単結晶で、100-200ppmの水をドープしたものとドープしていないものを用意した。測定は、脱水が起きない1000K以下の温度で行った。この温度領域では、含水かんらん石の伝導度は無水かんらん石より二桁以上高く、また一桁以上の異方性を持っている。しかし、活性化エネルギーが小さい為、アセノスフェア最上部の温度に外挿すると、含水かんらん石の伝導度は無水かんらん石とほぼ同じである。また、異方性も小さい。従って、上記の観測結果は含水かんらん石では説明できない。本研究は岡山大学ISEIのグループを中心におこなわれ、Nature誌に発表されて大きな話題を呼んでいる。

2) リングウッドイトとメージャライトの弾性波速度精密測定

放射光X線その場観察と超音波実験技術を組み合わせ、世界で初めてマントル遷移層領域に達する18GPa, 1700Kという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。昨年度のリングウッドイトに続いて、今年度は特にマントル遷移層のもう一つの重要な

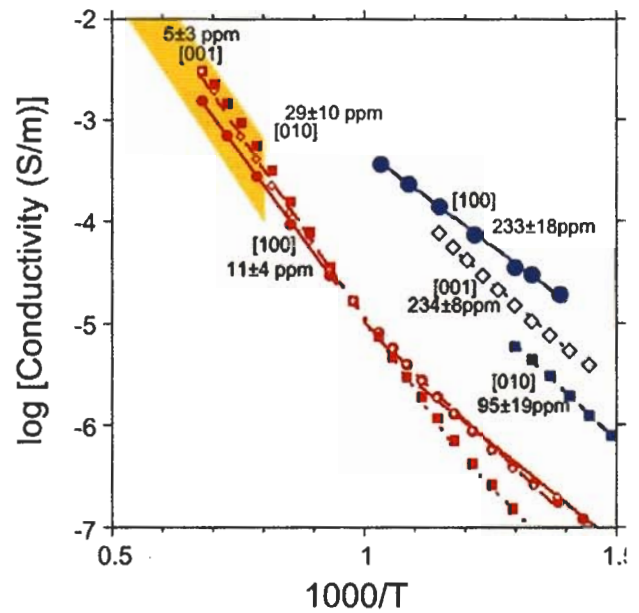


図2 含水かんらん石の電気伝導度の温度依存性

構成高压相であるメージャライトに対して、同様な温度压力条件下での測定をおこなった(図3)。この結果、パイロライト的な物質はマントル遷移層中部(~500km付近)において、PREMやAk135などの地震学的モデルと矛盾しない弾性波速度を与えることが明らかになった。また、リングウッドイトに対して弾性波速度に対するFeの効果を明らかにする新たなデータを得るとともに、玄武岩的物質の高压相に対する弾性波速度精密測定も開始しつつある。これらの成果は愛媛大学GRCのグループが主にSPring-8においておこない、Phys. Earth Planet. Inter.誌等に発表および投稿中である。

3) ポストペロプスカイトアナログ物質の変形実験

地球深部のD''層では様々な地震学的異常が観測されているが、そのひとつとして地震波速度の異方性がある。この異方性は、「結晶格子の選択配向」あるいは、「流体物などの形状定向配列」のどちらかによりもたらされる

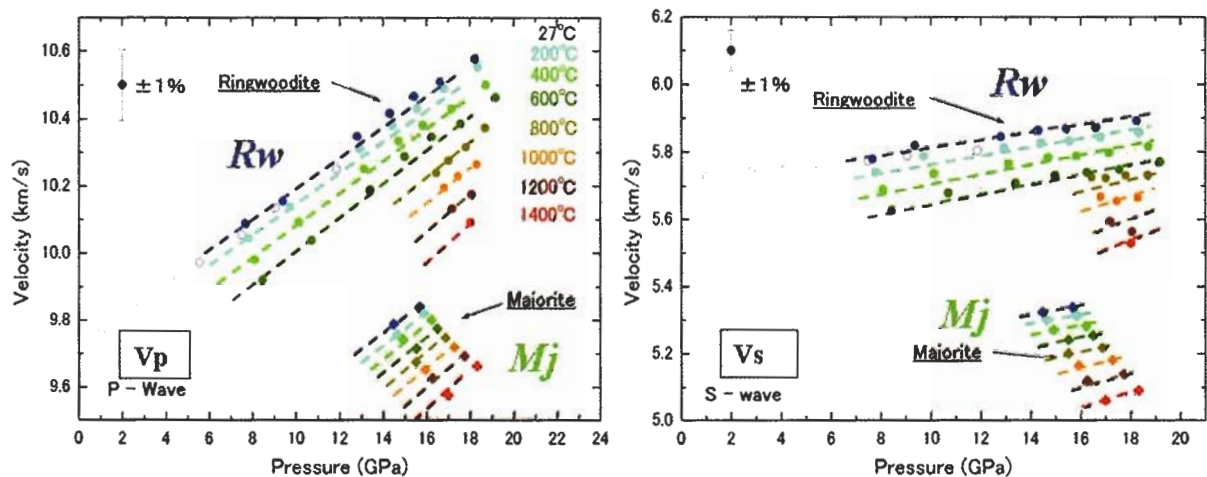


図3 高温高压下でのパイロライト中リングウッドイトおよびメージャライトの弾性波速度変化

と考えられている。一方、最近の実験的な発見により、D^{II}層はMgSiO₃ポストペロブスカイトと2次相のフェロペリクレスを主構成物としていと考えられてきている。そこで、D^{II}層の観測される異方性を理解するために、MgSiO₃のアナログ物質としてCaIrO₃ポストペロブスカイトに関する変形実験を行い、選択配向などの微細構造組織観察を行った。

実験は岡山大学ISEIのグループが中心となり合成実験をおこない、広島大学の装置を用いた変形実験、および愛媛大学GRCのEBSDを用いた選択配向の分析をおこなった(図4)。のその結果、専断を加えたCaIrO₃ポストペロブスカイト多結晶において、[100] (010)を滑り系とする選択配向が形成された。これらの選択配向のデータに基づいて、フェロペリクレスの影響を考慮して地震波速度の計算を行ったところ、剪断面を水平面とすると、V_{SH}がV_{SV}より1-4%程度早いことが分かった。このsplittingの程度は環太平洋下で観測されている値と一致を示す。つまり、観測される地震波速度の異方性は、構成物質の選択配向で説明可能である。さらに、必要十分条件であるかを示すためには、azimuthal異方性との比較がキーポイントである。この結果は研究領域内の岡山大学ISEI、広島大学、愛媛大学GRCの共同研究の成果としてEarth Planet. Sci. Lett.誌に掲載された。

3. 今後の展開

平成18年度中にSPring-8に導入予定の単色化装置の立ち上げ、また弾性波測定関連装置の設置、愛媛大GRCを中心とした分析装置の高度化などにより、研究計画班内外での共同研究のための環境を整備する。また、すで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も本格的に開始する予定である。次年度以降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

下部マントル領域に達する25 GPa, 1900K程度の温度圧力下での実験技術の開発をおこなう。また、これと平行させて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ーデータとの直接対比をおこなう。一方で大型単結晶合成技術と共振法を組み合わせ、高压相単結晶の弾性定数およびその温度変化の精密測定を試みる予定である。

2) 相転移、P-V-T関係および電気伝導度測定

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ペロブスカイトの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、高压相間の元素分配、密度変化を明らかにする。さらにパイロライト組成を持つメジャライトなどの高压相の電気伝導度を、マントル遷移層に対応する高温高压下で決定する。

3) レオロジーと脱水反応カインेटクス

マントル遷移層~下部マントルでのスラブ構成物質、すなわちメジャライトや珪酸塩ペロブ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。これによりスラブ滞留のメカニズムに関し、重要な知見が得られると考えられる。また、含水鉱物の脱水分解反応カインेटクスについても、放射光X線その場観察などの手法により検討し、その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。

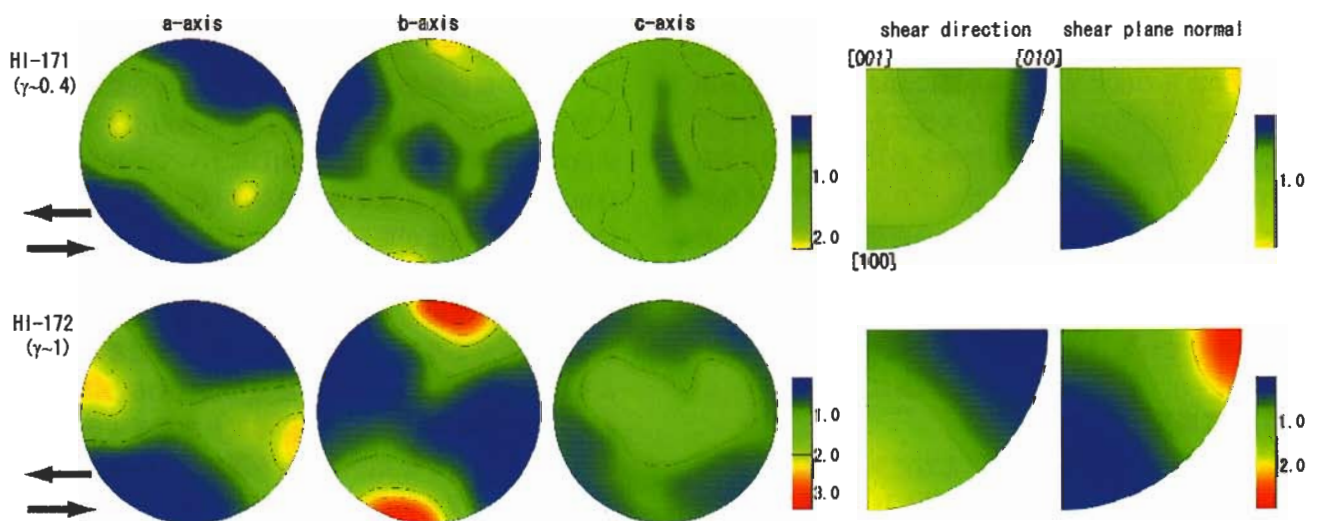


図4 愛媛大GRCに導入したEBSD装置による、ポストペロブスカイト相のアナログ物質の選択配向

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説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、化学的な相互作用を解明し、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イクスを解明し、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压装置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。高温高压X線その場観察実験によって、現在までにオリビン・ウオズレイト転移境界、ウオズレイト・リングウッドイト転移境界、リングウッドイトの分解境界及びGarnetのperovskiteへの相転移境界(post-garnet転移境界)に対する水の影響が明らかになった。無水のpost-spinel相境界は約-0.5MPa/Kと小さな勾配をもち、この結果は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、2wt.%の水を含む系の相境界は、無水に比べて大きく約-2MPa/K程度となる。また、水の存在によって、Ringwooditeの安定領域は低温ではより広がる。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、含水量に依存する可能性がある。

(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wadsleyiteおよびringwoodite中の水素の拡散係数を測定した。Wadsleyite中の水素の拡散係数は $D_H = 1.0 \times 10^5 \exp[-128 \text{ (kJ mol}^{-1})/RT]$ で表される。この値はおおよそオリビン中の平均的な水素の拡散係数に等しい。ringwoodite中の水素の拡散係数も、これらの値と同様の値を持つことが分かった。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。1200°Cにおいて、10億年に約1km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。

水素の拡散係数と電気伝導度の間の関係式によると、マントル遷移層は、地域によって含水量が異なり、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濃集してい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から容易に予想できる。

図1に660kmの地震波不連続面の近傍における脱水と水の濃集メカニズムを模式的に示す。これまでの研究によると下部マントルを構成するマグネシオブスタイトやMgペロブスカイトは、100ppm以下の微量の水を含むに過ぎない（例えばLitasov et al., 2006）。一方マントル遷移層の深さにおいては、低温の含水のスラブ内部には、含水リングウッダイト相やスーパーハイドラスB相などのように水を大量に含む相が存在し、マントル遷移層の下部における沈み込む低温のスラブの水の貯蔵量は1%程度にも及ぶ。沈み込んだスラブは、遷移層下部や下部マントル最上部に滞留し、温度の上昇とともに含水鉱物が分解し脱水する。また、下部マントルに沈みこむ際の固相反応にともなって、鉱物間の含水量の大きな違いによっても脱水反応が生じる。

含水量が0.01~0.1wt.%のスラブが約10cm/年でプレートが下部マントルの沈み込む場合、660km地震波不連続面においてはスラブの含水量の90-99%が脱水する。脱水した水は、上部のリングウッダイト中に吸収される。これは、冷たいスラブにおいては、マントル遷移層の下部においてリングウッダイトは約1wt.%までの水を固溶し得るからである。吸収された水は、拡散によっては均質化されることはない。これは、リングウッダイト中の水素の拡散が大変遅く、 10^8 年で約0.5km程度しか移動しないからである。流体の浸透は、リングウッダイト中の水の溶解度を超えた場合にすなわち含水量が1.0wt.%を超えた場合にのみ有効に働く。したがって、もしスラブが継続的に沈み込み660kmの不連続面で脱水すると、マントル遷移層の下部には含水量が0.5wt.%程度（含水量1wt.%のリングウッダイトを約50%含む）の領域が発達することになる。沈み込むスラブが0.01-0.1wt.%の水を含み、10cm/年のスピードで下部マントルに沈み込む場合には、マントル遷移層下部のスラブには0.5wt.%程度の水を含む領域が10-100km程度の厚さで形成される。このような局所的な水の濃集は最近の地球物理学的な観測結果と調和する（Koyama et al., 2006）。

(3) 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AlOOH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SiO₂スチ

Mechanism of water concentration in TZ

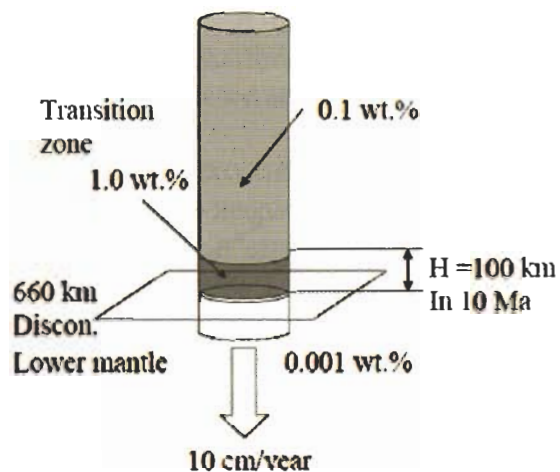


図1 マントル遷移層における水の濃集メカニズム。水素の拡散係数と660kmでの脱水反応を考慮すると、マントル遷移層の一部に水が局在する可能性がある。

ショバイトとd-AlOOH phaseに分解する。本研究においては、分解生成物であるd-AlOOH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2にd-AlOOH相の安定領域を示す。図から明らかのように、d-AlOOHは約19GPa以上約120 GP, 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、d-AlOOH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

Water can be transported to the base of the mantle

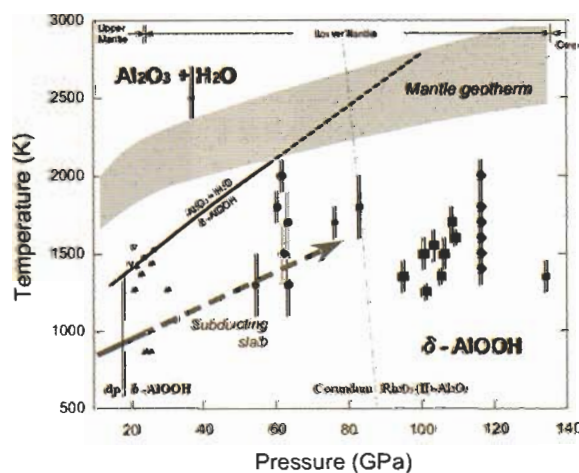


図2 含水高圧鉱物δ AlOOH相の安定領域。この相は、マントル最下部でも安定である。

ができる重要な含水鉱物となる。d-AlOOHの水素位置に関しては、氷X相と同様に高压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とするためである可能性もある。

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、d-AlOOH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。

(4) 核・マントル境界におけるケイ酸塩と金属鉄の相互作用

前年度に引き続いて、レーザー加熱用ダイヤモンドアンビルセル (LH-DAC) を用いて、核・マントル境界の条件である139GPa, 3000Kの条件を実現し、金属鉄とpost-perovskite相の間の反応を明らかにした。相の同定は、温度クエンチした資料を高压のもとでPFの放射光を用いて行い、post-perovskiteであることを確認した。また、回収した試料を分析電子顕微鏡で分析した。分析の結果、金属鉄には18.3atm% (6.3wt.%) のO, 6.6atm% (4.0wt.%) のSiが溶け込んでいることが明らかになった。この量のO, Siの鉄ニッケル合金への溶解は鉄ニッケル合金に比べて小さい外核の密度を説明することができる。さらに、この条件でのポストペロブスカイト相と金属鉄間の濡れの測定を行った。回収試料のTEM写真を図3に示す。濡れ角は67度であり、下部マントル最下部では、金属鉄の分離は生じやすいが完全には分離せず、約2%の金属鉄がケイ酸塩中の取り残されることが明らかになった (図3)。

下部マントル起源のブルームにおいては、オスミウ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。今回の二面角測定によるとポストペロブスカイト領域では、67度という大きな二面角をもち、ペロブスカイト領域の51度 (Takafuji, 2004) よりも

大きな値を持っている。二面角が60度以下のペロブスカイト領域では、溶融金属鉄は効果的に分離し、1~2%がマントルに残留しにくい。他方、ポストペロブスカイト領域では、溶融鉄の分離が不十分で少量の金属鉄が容易に混入し残留しやすい。オスミウム同位体異常を示すブルームは、CMBのポストペロブスカイト領域に起源を持つ可能性もある。

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) ポストペロブスカイト相転移の化学組成依存性、特にポストペロブスカイト中の3価の鉄の存在度

マントル最下部は、玄武岩質地殻の集積、部分融解、コアとの化学反応などによって比較的大きな化学組成の変化が期待される。D"不連続の深さには200km以上の変化があり、本研究グループの研究により、D"層はペロブスカイト相のポストペロブスカイト相への転移によるものであり、深さの変化は大局的には一般にはポストペロブスカイト相転移の大きな温度依存性に由来するものと考えられる。一方D"層の深さは、場所ごとにD"不連続の深さが100km以上異なっている例もあり、化学組成の効果は現在盛んに議論されている。

我々は相転移圧力に関する化学組成の効果を探る目的で、 $MgSiO_3$ 端成分に加えて、 $(Mg_{0.9}Fe_{0.1})_2SiO_4$, $(Mg_{0.5}Fe_{0.5})SiO_3$, $Mg_3Al_2Si_3O_{12}$, パイロライト的マントル組成 (KLB-1カンラン岩), およびMORB組成についてポストペロブスカイト転移境界を決定する実験を行った。その結果を見ると、ポストペロブスカイト大きな化学組成依存性はないことがわかった。過去にたとえば

Dihedral angle between molten iron and post-perovskite

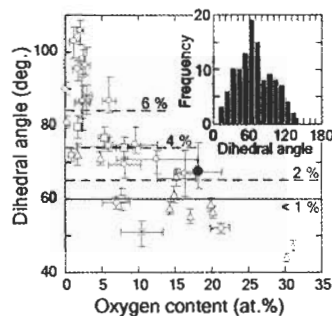
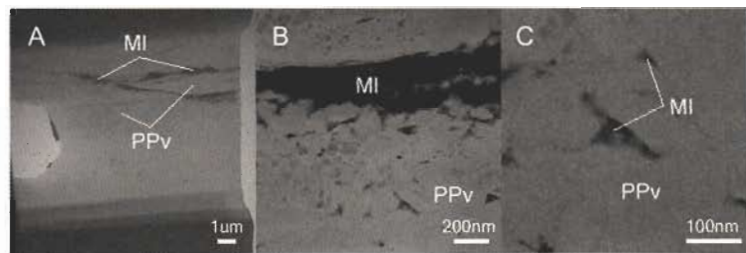


図3 CMBにおける金属鉄とポストペロブスカイト相の濡れ。二面角は67度でありペロブスカイトと鉄 (51度, Takafuji, 2004) の二面角よりも大きい。

鉄は大きく相転移圧を下げるという主張がなされたが、圧力マーカーを統一した結果、効果はきわめて小さいように見える。また天然の化学組成であるパイロライトやMORBに関する結果も、 $MgSiO_3$ 端成分において決定された境界と整合的であり、やはり化学組成依存性は大きくないことがわかった。また、ポストペロプスカイト中に含まれる3価の鉄の量についても回収したアモルファス試料のEELSスペクトルを取ることによって、多量の3価の鉄がポストペロプスカイトに存在し得ることを示唆する結果を得た。この結果は、ペロプスカイト相と同様、アルミナを含有するポストペロプスカイト相も構造中に3価の鉄を大量に保持し得ることを明らかにした。

以上の解析および、高温高压X線その場観察にもとづいて、MORB物質のマントルにおける密度を決定した。その結果を図4に示す。この結果から、MORBは、下部マントルの全ての領域において、周囲のマントルよりも重く下部マントルに沈みこんだスラブは、下部マントル最下部まで沈降し、CMBに堆積することが明らかになった。

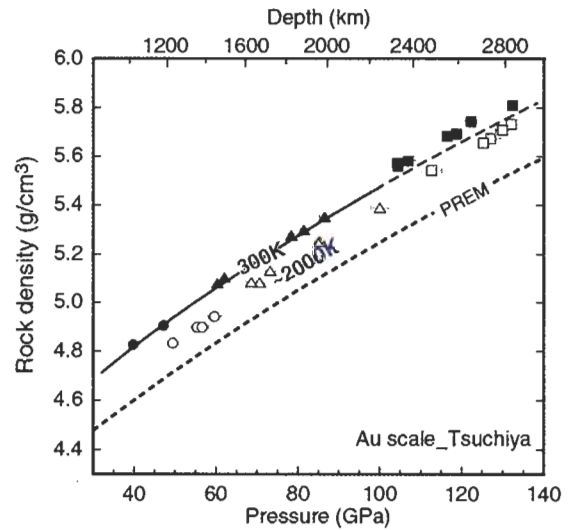
(2) 超高压高温の発生に関する技術開発と鉄の高温高压安定相の探索

内核境界に相当する320GPaで2000Kの条件を達成し、ここでの金属鉄および鉄ニッケル合金がhcp構造を持つことを示した。引き続き、金属鉄合金の高温高压安定相を探索する予定である。

(3) ブルリアン散乱測定によるマントル鉱物の弾性波速度の決定

本特定領域研究においてブルリアン散乱測定によるマントル鉱物の弾性波（地震波）速度の決定を計画の大きな柱としている。今年度は岡山大の村上がイリノイ大学との共同研究によって $MgSiO_3$ ペロプスカイトおよびポストペロプスカイトの横波速度をマントル最下部までの圧力下で決定した。この結果は、下部マントルの化学組成の決定に大きな制約となるものである。今後、高温高压での測定を試みる計画である。またスプリングエイトにビームラインBL10XUにブルリアン散乱測定システムを設置し、高压下でのX線その場観察とブルリアン散乱測定に着手した。ブルリア

Density of MORB crust



No density cross-over in the deep mantle!

図4 下部マントルにおけるMORBの密度。MORBは下部マントル全域において周りのマントルよりも重い。

ン散乱装置を図5に示す。高温を発生するためにCO₂レーザーによる加熱とともに外熱法による加熱も試みている。

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。1) 2006AGU Fall

Spring-8にて測定を開始した。

-Brillouin scattering measurements for Vs and Vp at high P-T

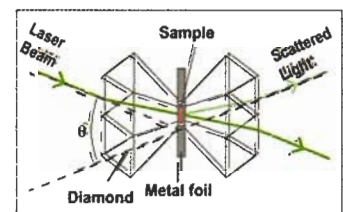


図5 東工大IFREEグループがSP8に設置したブルリアン散乱測定装置。

meetingにおいて、Co-conenorとしてユニオンセッションNew Views of the Core-Mantle Boundary Regionを組織した。2) Co-editorとしてポストペロプスカイトに関するAGUモノグラフを企画し、現在印刷準備中である。大谷は、以下の活動を行った。1) 2006 AGU Fall meetingにおいてMR (鉱物・岩石物理) セッションComposition and Dynamics of Earth's Mantle: Current Frontiers and Grand Challenges in Elasticity, Phase Transitions, and Rheology StudiesをCo-conenorとして組織した。また、このセッションにProceedingsを計画中である。2) 2006年8月のMelbourneのGoldschmidt conferenceにおいてポストペロプスカイトのセッションのコンピーナーを務めた。3) GSA monograph 421: Advance in High Pressure Mineralogyを編集し、このモノグラフは現在印刷中である。

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日の日程で開催予定である。この特定領域の複数の班から多くの発表が行われる予定である。

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

これまで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) や高エネルギー研究機構 (PF) 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。

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

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、相転移カインेटイクス、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。さらに、スラブ内部での相転移速度の測定をさらに押し進め、核マントル境界までの条件での準安定相等も考慮したスラブの構成物質を解明する。

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に着手する。

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

— これまでの成果と今後の展望 —

浜野洋三 (東大大学院理学系研究科)

小河正基 (東大大学院総合文化研究科)

柳澤孝寿 (海洋研究開発機構地球内部変動研究センター)

本多 了 (東大地震研究所)

岩森 光 (東大大学院理学系研究科)

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モデリングによって、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、プレート沈み込み帯で特に重要と考える水の循環に注目し、プレート沈み込みに伴う地球深部への水輸送のモデリングと、地球深部での水の存在に伴って引き起こされる広義の島弧活動のモデリングを行なっている。(2)については、マントル遷移層、マントル最下部近傍の相転移、大陸地殻、プレート運動等とマントル対流との相互作用を明らかにするためのシミュレーション研究を行なっている。

(1) プレート沈み込みに伴う水輸送と島弧活動の研究

(A) 地球内部での水循環を議論する上で基礎データとなる鉱物・岩石中の最大含水量について最新の高圧実験結果を含めてレビューを行った。その結果、マントルは、現実的な地温勾配を仮定した場合にも、現在の海水量の4.6から12.5倍の量の水を含みうる事が明らかとなった。これまでの高圧実験・試料分析では、マントルを構成する各鉱物の最大含水量が圧力・温度の関数として十分な精度で求まってはならず、上記の大きな見積もり幅をもたらす。しかし、見積もり幅を考慮しても、マントルが地球規模の水循環に果たす役割は大きく、特にnominally anhydrous minerals中の水が重要であることがわかってきた。これらの知見に基づき、沈み込み帯、特に日本列島での火成作用・変成作用と水循環の過程が見直された。その結果、(1) これらの火成-変成作用をもたらすスラブからの脱水反応は、主に200km以浅で起こるが、沈み込むスラブおよび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(図1)、(2) その量は、海嶺やホットスポット火成活動での脱ガス量に匹敵するあるいは上回るこ

と、(3) 持ち込まれる水の量は、ポテンシャル温度が高かった過去においては抑制され (hot-dry regime)、ポテンシャル温度が低い未来の地球においては促進される傾向があり (cold-wet regime)、マントル対流を安定化し長期間維持しうること、(4) 現在は、中部日本など、地下深部に対して水漏れを起している場所が存在することを考慮すると、hot-dry regimeからcold-wet regimeへの転換期にあると考えられることなどが分かった (Iwamori, 2006)。いずれの場合にも、マントルウエッジ底部および沈み込むスラブ内での上部マントルのNAMsに含まれる水の量が、地球規模の水循環に大きな影響を与えることになり、正確な議論を行うために、これらの基礎データをさらに充実させる必要がある。また、これらの水が具体的にどのように地球内部を循環するのかを調べるため、計画研究(ク)に属する広島大学

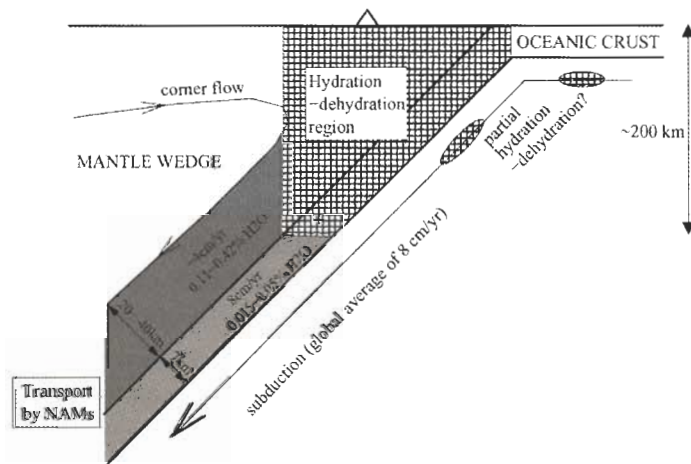


図1 水輸送の様式が大きく異なる2つの領域を示す模式図 (Iwamori, 2006) : およそ200kmよりも浅い場所では、マントルウエッジは、主要含水鉱物の分解に伴う沈み込むスラブからの水の供給をうけ、火成活動-変成作用が引き起こされる。より深い場所では、沈み込む海洋地殻およびマントルウエッジ底部におけるNAMsが相当量の水を地下深部に持ち込む(灰色で示され、'Transport by NAMs' とラベルされている領域)。NAMsによって遷移層に持ち込まれる水の量が示されている。

グループ（中久喜氏・多川氏）と協力して沈み込むスラブのダイナミックモデルに水輸送を組み込む試みを開始した。今後、水循環の様子を、それが沈み込みのダイナミクスに与える影響とともに調べる予定である。（岩森）

水輸送の様式が大きく異なる2つの領域を示す模式図（Iwamori, 2006）：およそ200kmよりも浅い場所では、マントルウエッジは、主要含水鉱物の分解に伴う沈み込むスラブからの水の供給をうけ、火成活動-変成作用が引き起こされる。より深い場所では、沈み込む海洋地殻およびマントルウエッジ底部におけるNAMsが相当量の水を地下深部に持ち込む（灰色で示され、`Transport by NAMs' とラベルされている領域）。NAMsによって遷移層に持ち込まれる水の量が示されている。

(B) 遷移層中に存在する水と火成活動の関連を考察するためにスラブの非定常的な運動が遷移層に与える影響についての簡単な数値シミュレーションを行った。

南米ソムンクラ台地の火成活動は火山フロントから数百キロメートル程度離れた場所で起こっている。折橋ら（2005）は、その原因として以下のように考えた。スラブがソムンクラ火成活動と同時期になっている、プレート運動の急激な変化による変形のために上昇し、その上にある水に富む遷移層が持ち上げられ、その結果として脱水に伴う溶融がソムンクラ台地を形成した。

折橋ら（2005：月刊 地球, 27, 438-447）の考えの力学的側面をチェックするために、図2のような簡単なモデルを考えた。このモデルはコーナーフローのモデルの変形版であり、粘性が一定の流体の中に図2のようなくさび型の領域を考える。上側は、大陸リソスフェアの底面と一致し（ $D=100\text{km}$ とした）、斜めになっている部分は、沈み込みながら回転する。このモデルを使って、遷移層の時間的移動を計算したものが、図3に示されている。遷移層は回転開始時には水平成層していたと仮定し、遷移層が410kmの深さを超えた時、その部分が溶融し、火成活動を引き起こすとして、ソムンクラ台地の火成活動との比較を行った。その主な制限は、火成活動は（1）8Myr程度続いた（2）島弧側から背弧側に向かって移動したように思われるというものである。比較の結果、沈み込む速度が遅い場合（ $\sim 2\text{cm/yr}$ 以下）あるいは回転角が大きい（ ~ 50 度）時に、条件が満たされる解がある事がわかった（図3の赤い楕円で囲んだ部分）。（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

(A) 本年度は、これまで行なってきたマントル対流・火成活動結合系モデルに組成的にマントルより非常に軽い大陸地殻を付け加えて、プレート運動により、どれだけ大陸地殻がマントルにリサイクリングするかを調べるための予備的数値シミュレーションを実行した。図4に数値モデルの一例を示す。大陸地殻は、マントル物

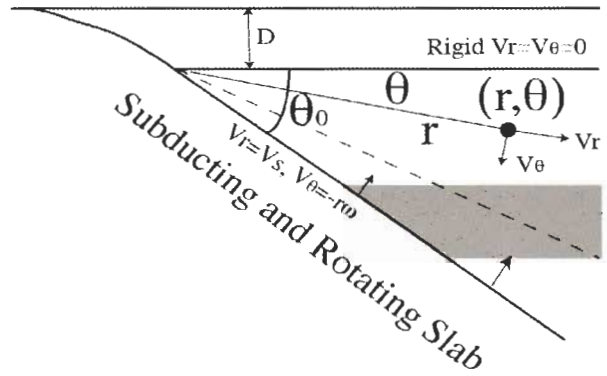


図2 モデルの概略図。モデルはコーナーフローの変形版である。上側の面は大陸リソスフェアの下面とみなす（ $D=100\text{km}$ ）。下側の面はスラブとみなし、一定速度で沈み込みながら、一定角速度で回転する。影をつけた部分は遷移層である。

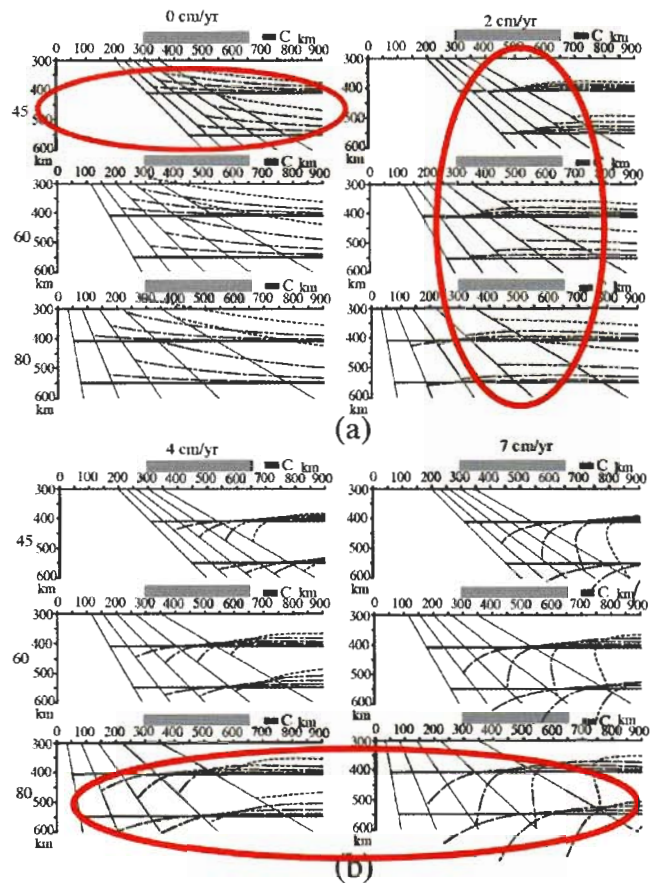


図3 計算結果。左の数字はスラブの初期角度、上の数字は沈み込む速度である。影をつけた部分はソムンクラ台地の大体の位置である。黒い長方形と“C”は大陸縁の大体の位置を示す。図中の細い実線は、スラブの位置を示す。太い実線、長い破線、一点鎖線、二点鎖線、短い破線は、それぞれスラブの回転が始まって0、2、4、6、8Myrにおける遷移層の上下面の位置を示す。赤い楕円で囲った結果が観測と整合的であるとみなしている。

質より0.6g/cc低密度であるとしている。大陸地殻の厚さを様々に変えて、大陸地殻の体積が、プレートの沈み込みに伴うリサイクリングの結果時間とともにどのように変化するかを調べたところ以下の図5に示すような結果を得た。図から大陸がリサイクリングにより消滅してしまうまでの典型的な時間を見積もると、大陸地殻の厚さが30km程度より薄くなると10億年以下となることが読み取れる。この30kmという具体的な数字が現実の地球に応用できるかどうかという問題はともかくとして、図5の結果は、大陸のサイズ（厚さや大きさ）にある閾値があり、この閾値を下回ると、大陸はプレートの沈み込みによりマントルに簡単にリサイクルされることを示唆している。この閾値の存在は、現存する大陸のうち30億年以上昔にできた大陸は、ほんの僅かしかないという事実を理解する上で重要な意味を持つと思われる。太古代には、大陸地殻は現在のように大きく成長することはなく、すべて断片的な小さなものであったことが知られている。上に述べた数値シミュレーションの結果は、この小さなサイズのため、太古代に形成された地殻は、ほとんどがマントルにリサイクルされてしまったことを示唆している。（小河）

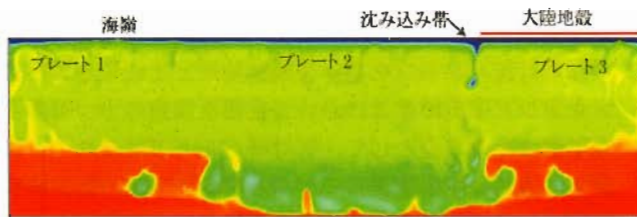


図4 大陸地殻を持つ2次元マントル対流・火成活動結合系モデル：計算結果の一例

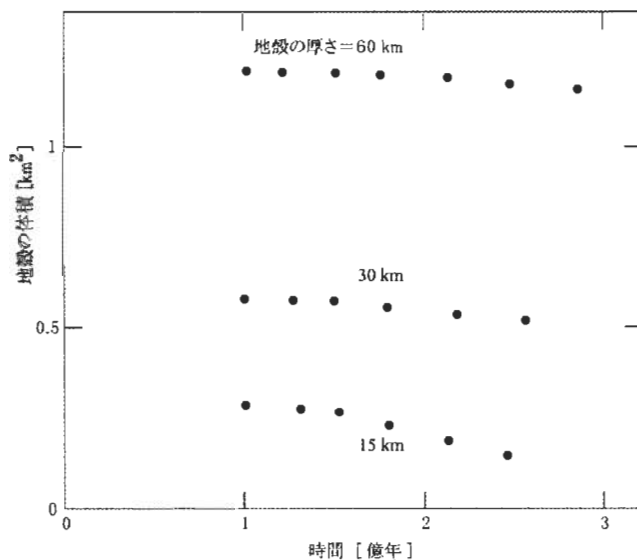


図5 計算結果：マントル対流リサイクルによる大陸地殻の体積の年代変化。地殻の厚さが15km、30km、60kmの場合の結果を示す。

(B) 3次元球殻対流：マントル中の相転移の役割、特にポストペロプスカイト転移

最近の高温高圧実験などから、マントル最下層に相転移が存在するとされている。このようなペロプスカイトの相転移（ポストペロプスカイト：PPV）がマントルの大規模な流れにどのような影響を与え得るかという研究を行った。PPV相転移に関しては依然として不確定性が大きいので、相境界の位置とクラペイロン勾配をパラメータとして対流パターンへの影響を系統的に調査した。マントル物質の圧縮性と潜熱の効果を考慮した三次元球殻内の対流の数値シミュレーションにおいて、地表から深さ410kmと660kmに相転移を設定し、さらにマントル最下層にポストペロプスカイトに相当する転移を組み込んだ。この相転移の影響はマントル対流の熱境界層との位置関係で大きく異なると考えられる。そこでマントル下部の熱境界層内である深さ2750kmに位置する場合と、熱境界層より上である2540kmの場合とを比較した。マントルの上下温度は固定し、内部発熱を考慮してある。紹介する計算では粘性は一様としている。

主要な結果は以下の通りである。660kmの負のクラペイロン勾配をもつ相転移により、スタグナントスラブ的な構造が見られるとともに、対流セルは横長になっている（図6）。PPVのクラペイロン勾配を正から負まで変化させると、平均温度構造がどの程度変化するか、ということを図7に示す。これは熱境界層内で相転移が起こる場合である。クラペイロン勾配が正の値では流れを促進し、熱境界層を実質的に薄くする効果を持つ。負の値では熱境界層が厚くなるのが見てとれる。一方、熱境界層の外側に相転移が位置する場合には極端に小さなクラペイロン勾配を設定しない限り平均温度構造の変形は見られなかった。図8はPPV相転移のクラペイロン勾配をパラメータとして、表面及びコアからの熱流量がどの程度変化するかということを示したものである。PPV相転移が存在しないケース（0MPa/K）に対しての比率で表している。平均温度構造の変化と対応して、熱境界層内にPPV相転移が存在する場合はクラペイロン勾配の大きさとともに熱流量は大きくなり、その効果はコアからの熱流量に大きく現れる。熱境界層の外側に相転移が位置する場合はほとんど違いが見られない。

さらに各深さにおける対流パターンの特徴的なスケールについても球面調和関数展開を用いて解析した。クラペイロン勾配が正である限りは大局的なパターンにはほとんど差がなく、660kmの相転移で強く規定された比較的長波長の構造を持つ。負の勾配であると、熱境界層を実質的に厚くすることに対応してマントル最下部でさらなる長波長化が見られる。現実には予想されているPPVのクラペイロン勾配は+8MPa/Kというような正の大きな値である。この場合はコアからの熱流量を若干引き上げる効果を持つが、マントルの大局構造には影響を与えないと考えられる。これは球殻の内側近くに位置する相境界であるので、大きな体積を占めないためと言うことも

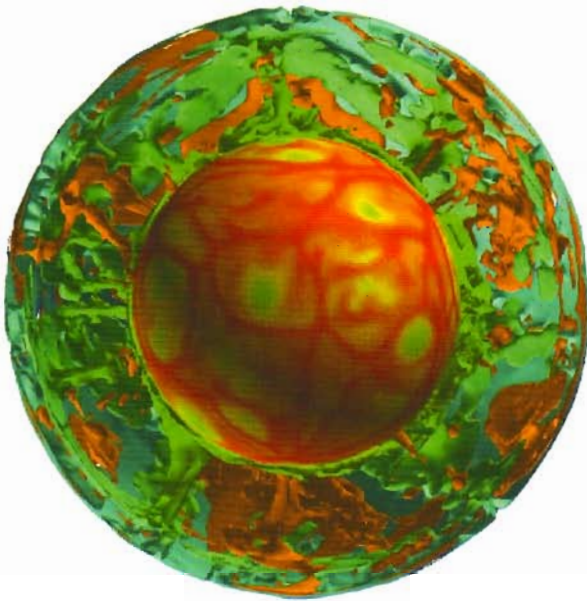


図6 410km, 660km, および2750kmの深さに相転移のある球殻でのマンテル対流。流れ場に大きな影響を与えるのは660kmの負のクラペイロン勾配を持つ相転移である。

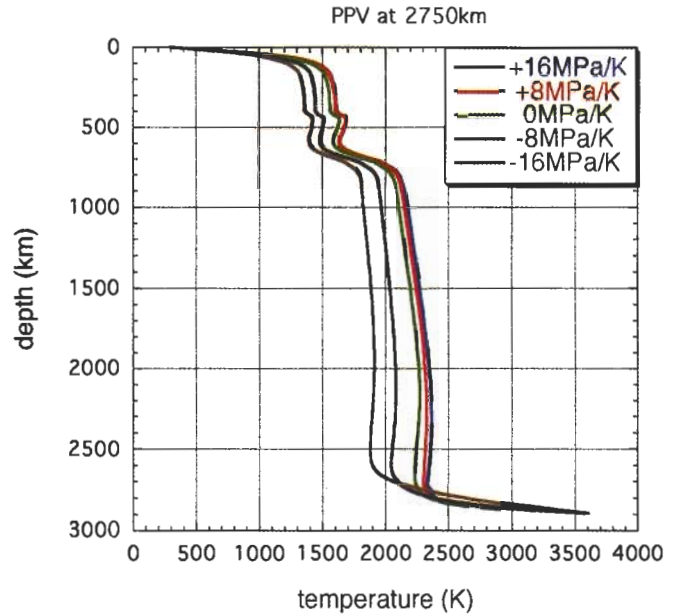


図7 水平平均した温度構造。410km, 660km, および2750kmの深さに相転移が存在。クラペイロン勾配の値を小さくしていくと下部の熱境界層が厚くなり、マンテルの平均温度は低下する。

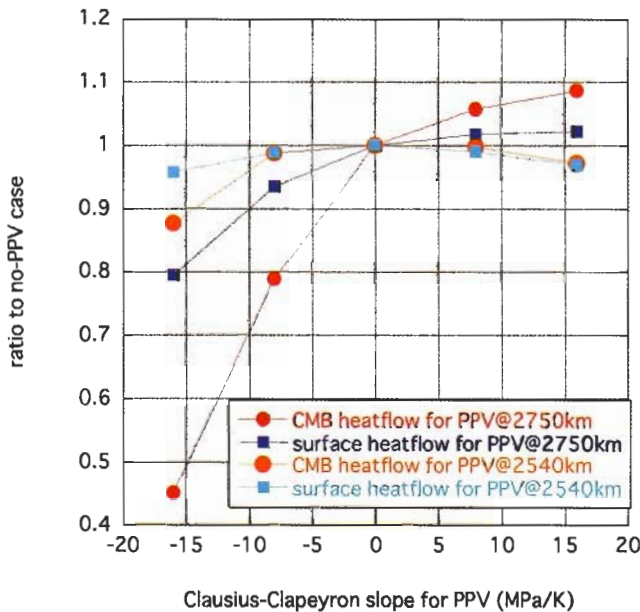


図8 PPV相転移なし(0MPa/K)のケースとの比で見たマンテル下端及び上端での熱流量。クラペイロン勾配を小さくしていくと熱流量は小さくなるが、特にコアからの熱流量に顕著に現れる。相境界が熱境界層の外側に位置する場合には大きな差は見られない。

できる。ただし相転移に伴いマンテル最下層の粘性率や熱伝導率が大きく変化する可能性があり、今後はこれらの効果を合わせて検討する必要がある。(柳澤)

(C) 地震学的・物性的研究成果を組み込んだマンテル対流モデルの構築

地震学的研究や物性的研究から得られた結果をマンテル対流モデルに組み込んでマンテル対流計算を行い、得られた対流パターンを様々な観測結果と比較することはマンテルダイナミクスにおいて重要な課題の一つである。今年度はその準備として、グローバルトモグラフィーモデルに基づいた密度異常モデルとプレート沈み込みモデルを組み合わせることにより、過去の研究に用いたモデル(Yoshida et al., 2001; Yoshida, 2004)と比較してより現実に即したマンテル内部の三次元密度異常モデルを構築し、三次元球殻内でのマンテル内部の定常速度場(「瞬間」速度場)を求めるテスト計算を行った。

三次元球殻内のマンテル対流計算は有限体積法とスタッガード格子を用いたプログラムで行った。マンテル対流はブジネスク近似の粘性流体と仮定した。重力加速度は深さ方向に変化する。今回のテスト計算では、グローバルトモグラフィーモデルはBecker and Boschi (2002)の高解像度S波速度異常モデル(次数は31次まで)を用いた。速度異常は最近の鉱物物理学(Karato and Karki, 2002)で示唆されている変換値を用いて密度異常に変換した。上部マンテルでのプレート沈み込みモデルは地震の震源分布に基づいた密度異常モデルを用いた(図9)。粘性率の深さ方向の変化は5層モデル(リソスフェア・アセノスフェア・上部マンテル・相転移層・下部マンテル)を用いた。リソスフェア内部の粘性率は簡単のため一様とした。上部マンテルでは、簡単のため沈み込みスラブのみの粘性率を考慮し、その粘性率はリソスフェアと同じとした。下部マンテル内部の水平粘性率変化(LVV)は速度異常から温度異常を見積もり、粘性率の温度依存性の関係を用いることにより決定した。

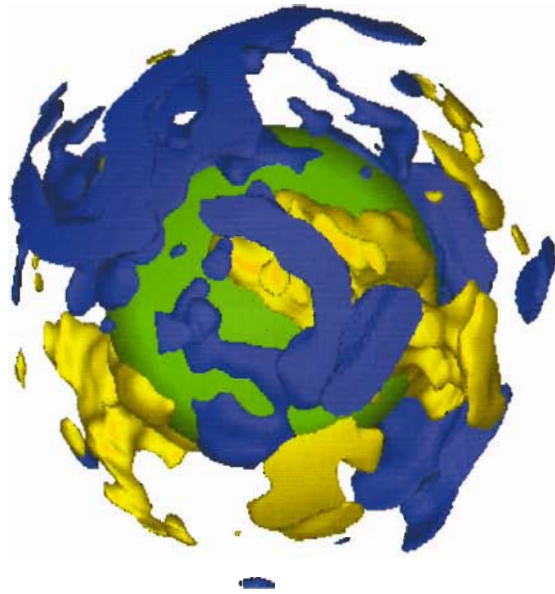


図9 計算に用いたマンテル対流内の三次元密度異常モデル。青色は $+10\text{kg/m}^3$ 、黄色は -10kg/m^3 。中心の緑の球はコアの表面を表す。

図10は、計算された定常速度場から見積もられたCMB上での水平速度場とトポグラフィーである。このモデルではリソスフェアと沈み込みスラブの粘性率は 3.2×10^{25} [Pa s] (Gordon, 2000), 上部マンテルの粘性率は 10^{21} [Pa s], 下部マンテルの基準粘性率(温度異常がゼロで定義された粘性率)は 10^{23} [Pa s]とした。CMBを挟んだマンテルとコアの密度差は 4337kg/m^3 とした。下部マンテル中に落下した沈み込みスラブに起因

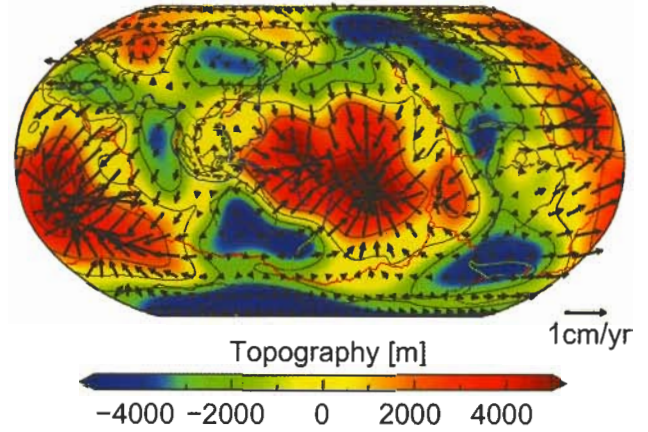


図10 CMB上のトポグラフィーと水平速度場。負の値は地球の中心に向かって凹む向き。コンター間隔は2km。

すると思われる高粘性率領域周辺でトポグラフィーが広範囲に最大4km程度凹んでいることが分かる。一方、南太平洋下及び大西洋中央海嶺から南アフリカ下での低粘性率領域ではリッジ状に流れが収束していることが分かる。

今後は、沈み込みスラブの粘性率と下部マンテルの粘性率比を系統的に変化させたモデルを用いて地表面でのジオイド異常とトポグラフィーへの影響を調べることを目標としている。またYoshida et al. (2001)で行われたようにリソスフェアのLVV(高粘性率のプレート内部領域と低粘性率で定義されるプレート境界領域)を組み込んだ計算を行い、これらが地表面観測に及ぼす影響についても調べる予定である。(吉田)

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 — これまでの成果と今後の展望 —

吉岡 祥一・中久喜 伴益・鈴木 厚・亀山 真典・田端 正久・中川 貴司

本計画研究では、数値シミュレーションにより、主として深さ660km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の解明を目指した研究を行ってきた。具体的には、熱流体力学的手法に基づいて、粘性率の強い温度・深さ依存性、粘性構造、相転移、スラブの斜め沈み込み、相転移に伴うスラブ内鉱物の細粒化などを考慮した、2次元及び3次元モデルを構築し、コード開発や数値シミュレーションを行ってきた。

本計画研究では、これまで「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、マントル対流の計算精度向上に向けたコード開発が進められてきており、今後の3次元スラブ沈み込みモデル構築への準備が着々と進められつつある。2次元モデルの数値シミュレーション結果からは、スラブ滞留の物理メカニズムの描像が定量的に描ける段階に達しつつある。以下、各研究グループのこれまでの成果と今後の展望について具体的に述べる。

部分3次元対流基礎プログラムの開発（箱型モデル）

本研究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、我々「部分3次元対流基礎プログラムの開発（箱型）」グループは個々のツールの独自開発からスタートした。本稿では我々のツールの開発状況とそれによる成果、及び今後の研究の展望についてまとめる。

我々が開発してきたツール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になってしまう。そこで、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。前年度にはアルゴリズム上の改良（クリロフ部分空間法との併用）を加えることで、

粘性率の空間変化に対する頑健さをある程度向上できることを示した。またこの手法は、モデルの形状によらず適用可能であることから、箱型モデルに限らず、マントル対流シミュレーション全般に通ずる基本ツールにまで進化させていくことを望んでいる。

これと同時に、マントル物質の相転移の効果をとり入れたシミュレーションを実施するためのプログラムの改造を前年度までに行ってきた。ここで開発したプログラムを用いて実施した計算結果の一例を図1に示す。このシミュレーションでは、上面からおよそ0.2の深さ（上部マントルと下部マントルの境界に相当）のポストスピネル相転移に加え、下部マントル最深部で期待されるポストペロプスカイト相転移の効果も取り入れている。図の赤い面は、ポストペロプスカイト（PPv）相（高压相）とペロプスカイト（Pv）相（低压相）が同じ割合で存在する温度・圧力条件を示しており、この面より高压側あるいは低温側でPPv相が卓越する。この相転移の持つ急な正のクラベイロン勾配（モデルでは約13MPa/K）により、PPv相転移の起こる圧力は温度によって大きく変化し、温度が高いほどより高い圧力（あるいは深い位置）で起こるようになる。また図1より、底面の温度 T_{CMB} とそこでのPPv相転移温度 T_{PPv} の大小関係によってPPv相の出現の様子が大きく異なることがわかる。 T_{CMB} が T_{PPv} よりも低い場合（図1a）ではPPv相はマントル最下部に一面に出現しているが、 $T_{CMB} > T_{PPv}$ の場合（図1b）ではPPv相はマントル下降流周辺の低温領域にパッチ状に出現するのみとなっている。

さらに、物質の移流を扱うことができるようにするための改良も実施した。この改良の目的は、物質（鉱物種・沈み込む「海洋」プレートと沈み込まない「大陸」プレートなど）の違いをモデルに取り込み、かつこれらの分布が流れの時間発展に伴って時間変化する様子を追跡することができるようにすることである。ここでは、CIP(0)法に基づいた3次元高精度移流方程式ソルバを設計した。この方法は本グループの2次元モデル研究でも用いられているものであり、数値拡散の悪影響が少ないことで定評があるものである。我々は2次元問題用のCIP(0)法ソルバを3次元問題用に改良し、並列化を施した上で、箱型マントル対流シミュレーションプログラムに導入した。計算の一例を図2に示す。この計算は、自発的な3次元プレート沈み込みを狙ったテスト計算の1つで、計算領域上面の左半分に沈み込み可能な

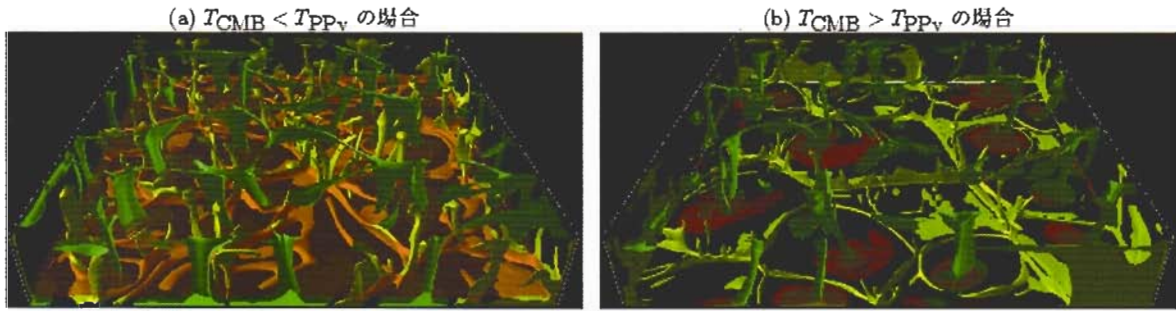


図1 ポストスピネル相転移とポストペロブスカイト相転移の効果を取り入れた3次元箱型マントル対流シミュレーションの例。モデル領域は高さ3000km、幅18000kmの3次元直方体で、上面から深さ約660kmの位置にポストスピネル相転移、下面付近にポストペロブスカイト相転移を導入している。図には温度の水平平均からのずれの等値面とポストペロブスカイト相転移のphase function Γ の等値面を示しており、黄色は水平平均より75K高いところ（上昇流に相当）、緑は水平平均より125K低いところ（下降流に相当）、赤は Γ が0.5のところ（ポストペロブスカイト相がとペロブスカイト相が平衡にある条件）を示す。（a）左は底面の温度 T_{CMB} がそこでのポストペロブスカイト相転移温度 T_{PPv} よりも低い場合、（b）は $T_{CMB} > T_{PPv}$ の場合の計算結果を示す。

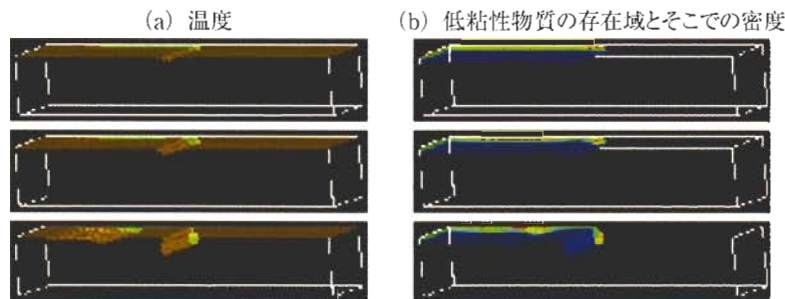


図2 CIP (0) 法による物質の移流とマントル対流を結合させたシミュレーションの一例。モデル領域は高さ2900km、幅17400kmの3次元直方体で、上面付近左半分に沈み込み可能な物質、右半分に沈み込み不可能な物質を導入し、かつ上面から深さ660kmの位置にポストスピネル相転移を導入している。左図は温度分布、右図は計算開始時に沈み込む「海洋プレート」上面に配置した低粘性物質の存在域とそこでの密度分布の時間発展を示す。

「海洋」プレート、右半分に沈み込まない「大陸」プレートを模した条件を設定し、流れの時間発展を追跡したものである。ただし「海洋」プレートの表面部分にのみ、プレート境界断層を模した低粘性領域を導入している。図より、低温の「海洋」プレートの自重で沈み込みが開始し、その流れに沿って低粘性領域が移動していく様子が追跡できていることがわかる。

以上の通り我々は、まずマントル対流の基本的な特徴（例えば、粘性率の空間変化・相転移など）を取り込み、それと同時に大規模で高分解能な3次元計算が可能なシミュレーションプログラムの構築を進めてきた。その際、マントル遷移層での下降流の振る舞いを規定する要因として、遷移層下面を規定する深さ約660kmでのポストスピネル相転移による浮力の効果に特に注目してきた。しかし残念ながら、そのようなモデルでは遷移層付近で滞留するスラブの再現には至らなかった。言い換えれば、マントル下降流の動きを相転移の浮力だけで「せき止める」ためには、ポストスピネル相転移と比べて著しく急な負のクラベイロン勾配を仮定せねばならない。実際、図1に示したシミュレーションでも、660km相転移（モ

デルでは約 -4.3MPa/K のクラベイロン勾配を仮定)は低温下降流の動きを妨げはするものの、その効果は滞留スラブを生ぜしめるほど強いものではなかった。では、滞留スラブを再現するためには今後何が必要なのだろうか？ その1つのカギはマントル物質の物性モデルの向上、具体的にはマントル物質の圧縮性を取り入れることにあると我々は考えている。地球のマントル内に存在する静水圧の大きさを考えれば、流体力学で広く用いられているブシネスク近似（浮力項以外の密度変化はないと仮定する）の妥当性は大きく限定される。また熱力学的考察によれば、圧力の増加に伴って密度の増加だけでなく熱膨張率の減少も導かれる。マントル遷移層付近での熱膨張率が小さくなることにより、マントル物質の相転移による密度変化の効果がより強く現れることになると期待される。実際、圧縮性を考慮した非弾性流体近似のもとでのシミュレーション結果（図3）では、緩やかな負のクラベイロン勾配でも流れを「せき止める」効果が十分大きく現れることが示されている。非弾性流体近似に基づき、同時にマントル物質の圧縮性を熱力学的に正しく考慮したモデルを開発することにより、滞留スラブ

の再現だけでなく、沈み込んだスラブの挙動の全貌を解明する道を開いていきたい。

部分 3次元対流基礎プログラムの開発 (球殻モデル)

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。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による計算コードの開発を行ってきたが、大きく2つの困難がある。1つ目は数値解法全般に亘る困難であるが、 10^7 程度の高レイリー数を取り扱うことであり、流体の粘性効果よりも移流効果が大きい現象の問題を解くことにある。これは昨年度、エネルギー方程式の物質微分項を特性曲線を用いて近似する手法の導入により解決することができた。2つ目の問題点はプラントル数を無限大と近似するため、対流現象の各時間ステップで定常の非圧縮流れを表すストークス方程式を解く必要があることである。この方程式は流速のx, y, z方向成分と圧力の合計4成分からなり、流速の非圧縮性の条件を含むため、弾性体問題よりも難しく高度な解法が必要である。並列計算が必須であるが、現在、領域分割法アルゴリズムの中でも最も計算効率の高い部分構造反復法の計算コードの拡張を行っている。この手法は弾性体問題に対して開発され(Mandel, 1993)、計算量が問題サイズにほぼ線形に依存する特徴をもつ優れたアルゴリズムである。近年、ストークス問題に拡張されている(Pavarino and Widlund, 2002)が、3次元の流れ問題での適用は本研究が初めてである。

開発を行っているコードの使用目的は660km付近での相転移の効果のモデル化で重要なクラペイロン勾配の値が対流パターンに与える影響を3次元の球殻領域で調べることであり、2次元の有限要素法コードにより予備的なシミュレーションを行った。図4は $Ra=5 \times 10^6$ 、相浮力パラメータ $P=-0.2$ での矩形領域と円環領域での無

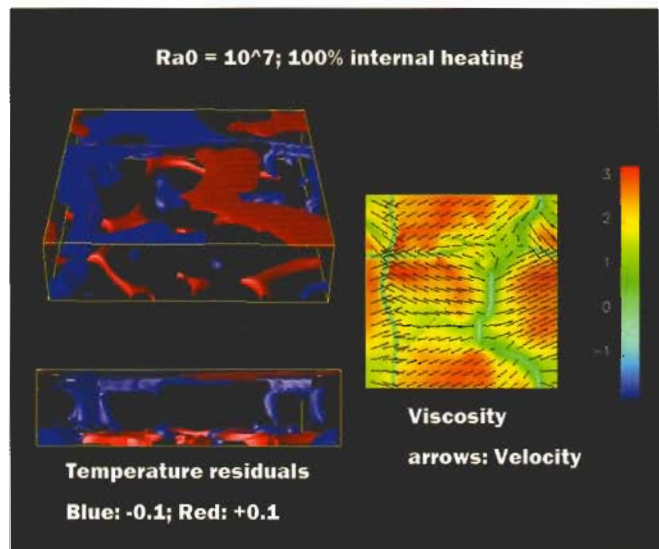


図3 プレート運動を引き起こすレオロジーを含んだ圧縮性マントル対流の数値シミュレーション結果の一例。左図は温度異常（水平平均からのずれ）の3次元分布で、青は水平平均より250K低い領域、赤は250K高い領域を示す。右図は上面境界での粘性率（色）及び速度場（矢印）の2次元分布を示す。

次元化した温度分布である。対流無しで成層した温度分布を初期条件として同一の時間が経過している。円環領域の方が相転移面を通過して下降流が生じやすいことがわかる。この数値シミュレーションを3次元で実行しマントルが占めている領域形状が流れに及ぼす影響を理解することが次の目的である。

2次元高度スラブ沈み込みモデルの構築

2次元高度スラブ沈み込みモデルは2つの研究グループに分かれて研究を行ってきた。

グループ1では、2次元の自発的沈み込みモデルを開発し(Tagawa et al. 2006a)、これを用いてスタグナン

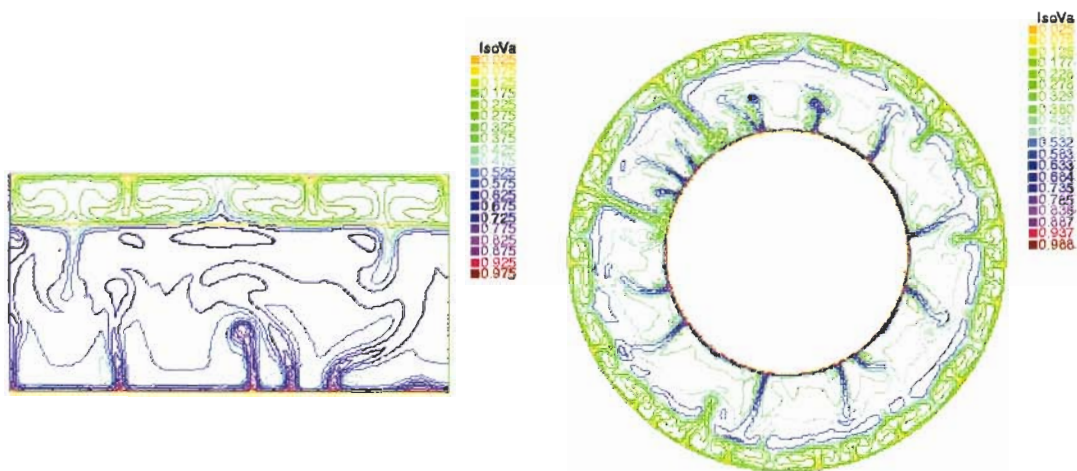


図4 矩形領域（左）と円環領域（右）で流速と圧力を未知データとして求める同一の有限要素法コードにより得られた温度分布（値は無次元化している）。 $Ra=5 \times 10^6$ 、相浮力パラメータ $P=-0.2$ に設定。対流無しの成層した温度分布を初期条件として同一の時間が経過している。

トスラブを再現しようと試みてきた。これまで計算したモデルでは、スラブは660km相境界面上に留まるか、660km境界を突き抜けるかのどちらかであった。本年度は上盤プレートが自由に移動するモデルを利用して、熱膨張率の温度依存性、660km境界における粘性率ジャンプの影響について調べた。これらモデルにおいてパラメターの値によっては、660km相境界面付近に滞留した後、下部マントルに貫入していくケースが見られた。これまでに調べた代表的な計算結果が図5である。スラブのマントル遷移層での振る舞いは下記のようにまとめられる。

- (1) 海溝の自由移動はスタグナントスラブの形成に大きな影響を与え、両者には正のフィードバック効果が存在する (Tagawa et al. 2006b)。
- (2) 粘性率のジャンプは下部マントルへ崩落するスラブの速度を大きく低下させ、緩いクラペイロンスロープの場合にもスラブを一時的に660km付近(必ずしも境界の上ではない)に滞留させる。2次元モデルでは、スラブ全体の強度が低下しないとプレート運動の速度が小さくなる。
- (3) 結晶細粒化が起きる場合にはスラブ強度の低下によりスラブがより屈曲しやすくなり、滞留が起こりやすくなる。このとき、スラブの屈曲によりスラブの先端が上昇する現象が見られる。
- (4) 熱膨張率の温度・圧力依存性を考慮した場合にはスラブの負の浮力が低下するため、緩いクラペイロンスロープでもスラブが一時的に660km境界付近に滞留しているように見える構造を作る。このスラブは後に下部マントルに沈み込む。

マントル対流シミュレーションにおいて、2次元計算

は、直接法を用いて粘性項を完全に陰的に扱えるため安定させやすく、計算量の少なから分解能も上げることができる。しかし、これまでの研究から2次元モデルの限界も目に付くようになってきた。例えば、粘性ジャンプがあると急に沈み込み速度が低下してしまうが、3次元モデルで様々な長さのスラブに引っ張られるプレートを考えるとこのようなことは起きないかもしれない。また、スラブ全体が圧縮応力場となるようなスラブも再現できていない。応力場の再現には3次元モデル、あるいは2次元モデルではプレート速度を強制的に与えたモデルが必要であると考えられる。

今後は3次元モデルを用いたシミュレーション、強制的にプレート運動を与える2次元モデルを用いて研究をしていきたいと考えている。2次元計算では、プレートの年代や沈み込み始めてからの時間などのテクトニックな性質を考慮する。また、ここでは述べなかったが、上記の研究の他、計画研究(キ)の岩森氏と共同でスタグナントスラブおよびマントル深部への水輸送のモデリングを行っている。こちらも進めて行く予定である。

グループ2では、スタグナントスラブが生成する物理的条件を定量的に明らかにする目的で、クラペイロン勾配、上部下部マントルの粘性コントラスト、海溝後退速度、海洋プレートの沈み込み角を現実的な範囲で系統的に変えた数値実験を行った。与えたパラメターの範囲は、クラペイロン勾配が、0~-2.5MPa/K、上部下部マントルの粘性コントラストが0~30倍、海溝後退速度が0~3cm/yr、海洋プレートの沈み込み角が30°~60°である。その結果、スラブが横たわる領域と横たわらない領域をグラフ上に定量的に示すことに成功し、

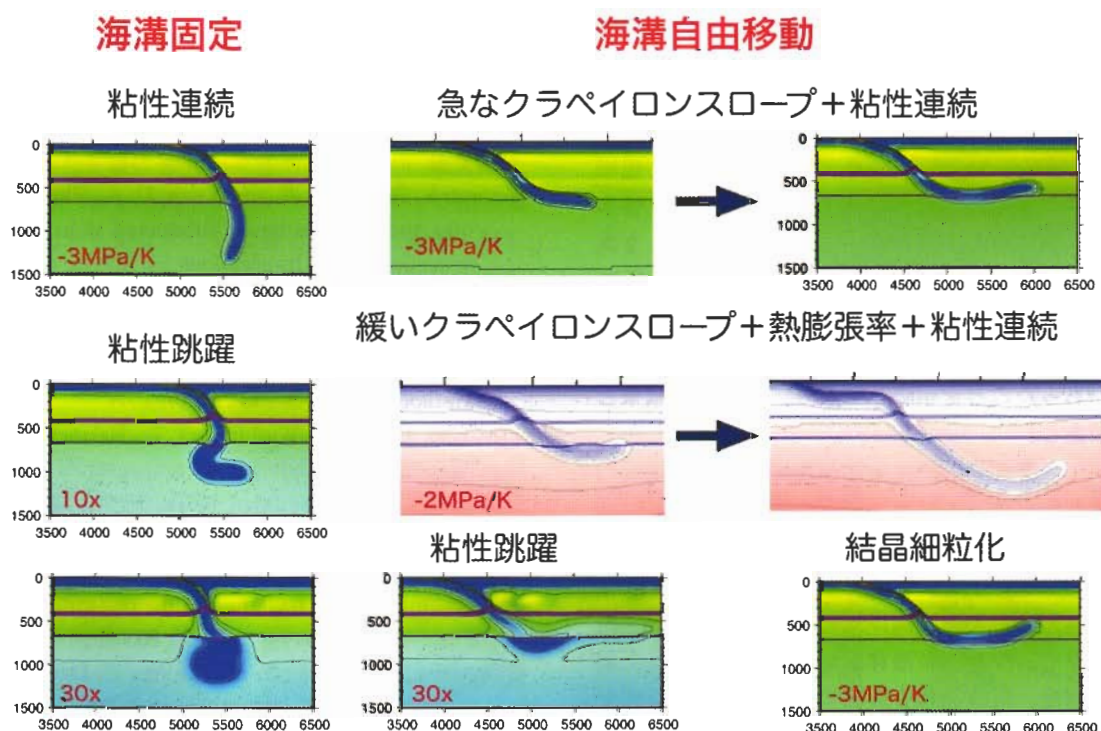


図5 2次元モデルによりシミュレートされたスタグナントスラブの様式。

- (1) 下部マントルが硬いほど、海溝の後退速度が速いほど、クラペイロン勾配の絶対値が大きいほどスラブは滞留しやすい。
- (2) 沈み込み角が緩やかなほど、浮力を受ける部分の体積が大きくなるので、スラブは横たわりやすい。
- (3) 海溝が後退している場合、下部マントルがある程度硬ければクラペイロン勾配が0MPa/Kでもスタグナントスラブを実現することは可能である。

と結論づけた(図6)。

これらに基づいて考察を行うと、1)クラペイロン勾配は660km以深の冷たいスラブに正の浮力を与え、2)下部マントルの大きな粘性率は下部マントルへのスラブの貫入速度を減速し、3)下部マントルの粘性率が大きいとき、海溝後退速度は660kmでスラブを曲げやすくする働きがあることがわかった。以上まとめると、以下のようになる。

- (1) 下部マントルの粘性が大きいとき、海溝の後退はスラブを660km直上で曲げる働きをしている。
- (2) 下部マントルの粘性と、海溝の後退の効果によりスラブの下部マントルへの貫入角度が緩められると、より緩やかなクラペイロン勾配でスラブは横たわることができる。
- (3) 660km直上でスラブが完全に水平方向に曲がりきった時、クラペイロン勾配の値にかかわらず、スラブは水平方向に滞留することが可能となる。

つまり、スラブが660km付近で横たわるには、一つには、下部マントルに差しかかる時のスラブの貫入角度が重要であり、それを左右しているのが海溝の後退と下部マントルの高粘性であると言える。また、図6の結果から、スラブを横たわらせるには、下部マントルの高粘性によってスラブを支えるモードと、クラペイロン勾配による正の浮力によってスラブを浮かせるモードの2つのモードが支配的であることも明らかにした。本研究で、現実的なパラメータの範囲でスラブを横たわらせることができたことから、Karato et al. (2001)によって提唱されているスラブ内の相転移に伴う細粒化による粘性率の低下はスラブ滞留の主要なメカニズムではなく、2次的な要因である可能性もある。現に、スタグナントスラブが多く見出されている北西太平洋地域では背弧側に背弧拡大を証拠づける縁海が見られ、このことはかつて海溝の後退があったことを示唆しており、本研究の結果とも調和的である。

今後は、1)地震学的に推定された660km不連続面の凹型の形状と地震波トモグラフィの結果を用いて、リングウッドイト→ペロブスカイト+マグネシウムスタイトの相転移のクラペイロン勾配の値を数値シミュレーションにより推定する、2)海洋地殻とスラブ本体の2層モデルを構築し、マントル遷移層~下部マントル最上部での両者の剥離・混合過程を解明する、といった研究を行う予定である。

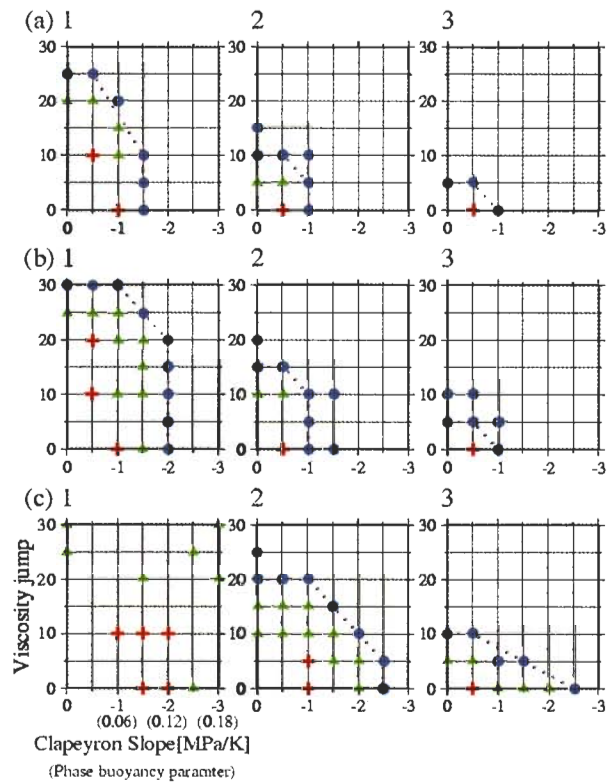


図6 スタグナントスラブのシミュレーション結果。横軸と縦軸は、それぞれクラペイロン勾配(カッコ内の数字は相転移浮力パラメータ)と上下マントルの粘性ジャンプ。○、十、△のシンボルは、それぞれ660km付近で横たわるスラブが形成された場合、スラブが下部マントルに貫入した場合、一時的にスラブが660km付近に滞留するか660kmより深いところで滞留した場合、である。ピンク色の破線はスラブが滞留する場合と滞留しない場合の境界線。各図の左上の数字は海溝の後退速度(単位cm/yr)を表す。(a)沈み込み角30°。(b)沈み込み角45°。(c)沈み込み角60°。図は鳥井翼氏の提供による。

参考文献

- Karato, S., Riedel, M. R. and Yuen, D. A., Rheological structure and deformation of subducted slabs in the mantle transition zone: Implications for mantle circulation and deep earthquakes. *Phys. Earth Planet. Inter.*, 127, 83-108, 2001.
- Mandel, J., Balancing domain decomposition. *Comm. Numer. Methods Engrg.*, 3, 233-241, 1993.
- Pavarino, L. F. and Widlund, O. B., Balancing Neumann-Neumann methods for incompressible Stokes equations. *Comm. Pure Appl. Math.*, 55, 302-335, 2002.
- Tagawa, M., Nakakuki, T., Kameyama, M. and Tajima F., The role of history-dependent rheology in plate boundary lubrication for generating one-sided subduction. *Pure Appl. Geophys.*, in press, 2006a.
- Tagawa, M., Nakakuki, T. and Tajima F., Dynamical modeling of the trench retreat driven by the slab interaction with mantle transition zone. *Earth Planets Space*, in press, 2006b.

一軸応力場における塑性変形によって生じたCaIrO₃の選択配向

八木 健彦 (東大物性研究所)

ポストペロフスカイト相の発見以来、マントル最下部のD''層に存在する弾性的異方性が、ポストペロフスカイトの結晶が強い選択配向を持って存在することにより説明可能なのではないかと、さまざまな研究や議論が展開されている。現在考えられているシナリオは、沈み込んだスラブが最終的にコア-マントル境界まで落下し、別の場所からまたプルームとして上昇するため、コア-マントル境界では水平方向の物質移動が存在し、それに伴って選択配向が形成されたのではないかとされている。しかしポストペロフスカイト構造を持った結晶がこのような「流れ」を起こした時、選択配向を起こすのか否か、またもし起こす場合にはどのような選択配向になるのかは、まだ未解決の問題である。

そこで本研究ではCaIrO₃をモデル物質として、一軸圧縮しながら塑性変形を起こさせた場合に、結晶の配向がどのように変化するかを、radial diffraction法と呼ばれる高圧下のX線回折実験により調べた。本来このような実験は、化学組成もより地球深部物質に近い物質で行う方が望ましいが、MgSiO₃のポストペロフスカイト相は生成する圧力が120GPa以上ときわめて高い上に、減圧するとアモルファス化してしまい、信頼できる塑性変形実験を行うことは技術的にきわめて難しい。そこで本研究では、CaIrO₃の結晶をモデル物質として用い、ペロフスカイト構造とポストペロフスカイト構造の相を出発物質として用い比較した。

実験は図1に示すように、側面が大きく開いたダイヤモンドアンビル装置を用い、X線を透過するボロンとカプトンで作ったX線に透明なガスケット(1)を用いて試料を圧縮し、つくばのフォトンファクトリーで加圧軸と垂直な方向から30マイクロンに絞った細いX線を入射し、得られた粉末X線回折(デバイリング)の強度変化から選択配向の様子を明らかにした(2)。図2に示したように、ポストペロフスカイト相を1気圧から6GPaまで

加圧していくと、当初ほぼ一様だったデバイリングが加圧と共に次第に強度が変化する様子が観察された。その変化の様子は、回折線の指数によって異なり、その解析から、変形に伴いポストペロフスカイト相のb軸が加圧軸と平行になるような選択配向が形成されることが明らかになった。一方ペロフスカイト相の場合には、このような強い選択配向は起こらない。これらの結果は、ポストペロフスカイト構造は層状構造を持っているため、層間が滑って結晶が回転し塑性変形を起こすとして理解することができ、同一構造を持つ結晶が存在すると考えられるD''層でも同様な選択配向が起きる可能性を強く示唆するものである。

しかし最近MgGeO₃をモデル物質とした同様の実験で、今回の結果とは全く異なりa軸が圧縮方向に並ぶという実験結果がMerkel等によって報告されており(3)、この違いが何に起因するかが問題となっている。我々は彼



図1. radial diffraction実験用に側面が大きく開いたダイヤモンドアンビル装置

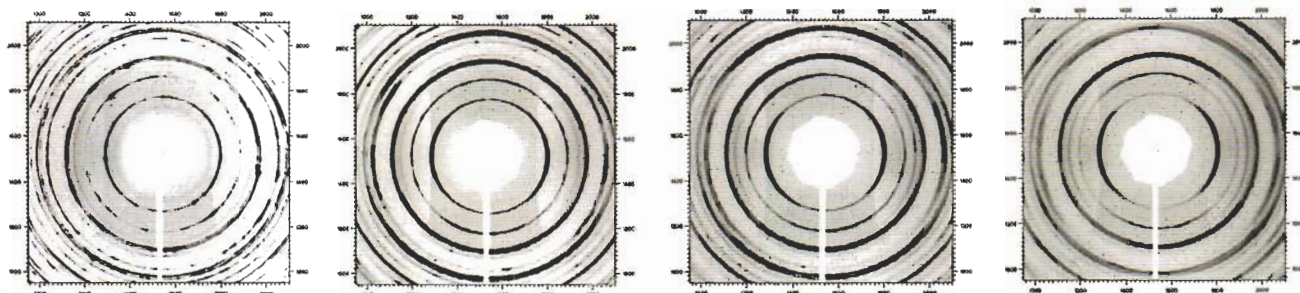


図2. ポストペロフスカイト構造のCaIrO₃に見られる選択配向。

らが、パイロキシン構造の出発物質を104GPaの高圧下でレーザー加熱によりポストペロフスカイト構造に転移させた当初から選択配向が存在し、その後圧力を130GPa付近まで上昇させても何ら変化が見られなかったと報告していることから、彼らが報告したものは塑性変形によって生じた選択配向ではないと考えて、それを明らかにする実験を計画中である。

Reference

- (1) Merkel and Yagi (2005) , Rev. Sci. Instrum., 76, 046109.
- (2) Niwa et al. (2006) , Phys. Chem. Minerals, submitted.
- (3) Merkel, et al. (2006) , Science, 311, 644-646.

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。また表にあるように数多くの国際ワークショップも主催・共催している。2006年は連合大会に於けるインターナショナル特別セッションを主催した。また2007年には、連合大会に於ける例年のセッションに加えて、イタリア（ペルージャ）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計画している。

連合大会インターナショナル特別セッション（2006年5月15-16日）

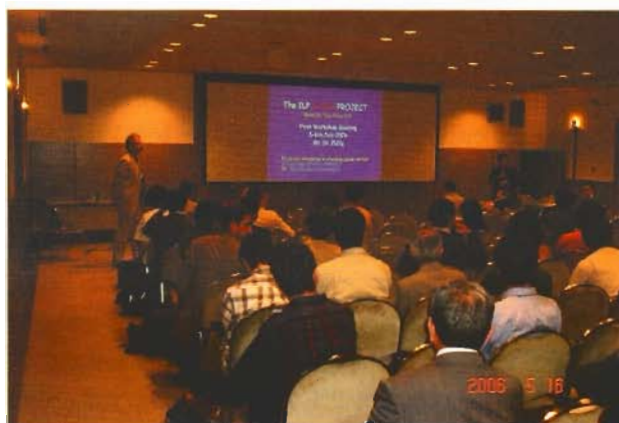
例年連合大会で主催している「深部スラブ」の特別セッションを、2006年はインターナショナルセッションとして開催した。9名の外国（米5、仏2、伊1、露1）からの招待講演を含む約60の講演を1日半の口頭発表セッション+ポスターセッションとして行った。南ヨーロッパ大陸下に存在するスタグナント・スラブと日本周辺のものとの比較研究など、今まであまり議論されてこな

かったテーマも発掘され、写真にあるように立ち見もでる、盛況な学術講演会であった。

IUGG (2007/7/2-13)

サッカーの中田が居たことで日本人にはなじみの深いペルージャ（イタリア）で開られる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）にBologna大学のトモグラファーA. Morelliを加えたコンビナーによる特別セッション“JSS012: Earth Structure and Geodynamics - Dynamics of Deep Mantle Slabs”が開催される。講演申し込み締め切りは、Postal submission: January 15, 2007; Electronic submission: January 31, 2007である。ナカタに負けないSSP旋風がペルージャの街に吹き荒れることを期待したい。詳しくは下記URLを参照されたい：

<http://www.iugg2007perugia.it/>



年度	集 会 名	日 時	開催場所 (担当)
16	Kick-offワークショップ	1月20-21日	地震研究所 (川勝)
17	合同大会特別セッション「地球深部スラブ」	5月22-26日	幕張 (川勝)
	国内研究シンポジウム “地球深部スラブ～研究の現状と今後の展望～”	11月10-11日	九州大学 (吉岡)
	国際ワークショップ “workshop on Earth's Mantle Composition, Structure, and Phase Transitions”	8月30日-9月3日	Saint Malo (共催/廣瀬)
18	連合大会国際特別セッション “Deep Mantle Slab”	5月15-16日	幕張 (川勝)
	国際ワークショップ “workshop on Subduction Processes emphasizing the Japan-Kuril-Kamchatka-Aleutian Arcs (JKASP-5)”	7月9-14日	札幌 (共催/笠原)
19	連合大会特別セッション「地球深部スラブ」	5月19-24日	幕張 (吉岡)
	国際ワークショップ “7th High Pressure Mineral Physics Seminar (HPMPS-7)”	5月8-12日	松島 (共催/大谷)
	IUGG (IASPEI sub-session “Dynamics of Deep Mantle Slabs”)	7月2-13日	Perugia (川勝)
	国内ワークショップ	秋	愛媛 (入船)
20	連合大会特別セッション「地球深部スラブ」	5月	幕張 (未定)
	国際シンポジウム	冬	未定 (川勝)

Newsletter第2号に掲載された計画研究クの報告に、編集上の大きな誤りがありました。本号に再掲させていただきます。

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

— 1年目の成果と今後の研究の準備状況 —

吉岡 祥一・田端 正久・中久喜 伴益・鈴木 厚・亀山 真典

本計画研究では、主として深さ660km相転移面でのスラブの挙動を数値シミュレーションによって明らかにすることが目的である。特に、地震学的イメージング班・海域観測によるイメージング班が観測対象としているカムチャッカ～マリアナの北西太平洋地域下におけるスタグナントスラブの形成・崩壊過程とそれに伴うスラブの変形・応力場、鉍物物性の空間分布を数値シミュレーションにより明らかにすることを目的としている。その目的を達成するため、熱流体力学的手法に基づいて、粘性率の強い温度・深さ依存性、粘性構造、相転移、スラブの斜め沈み込み、相転移に伴うスラブ内鉍物の細粒化などを考慮した、高分解能の「部分3次元高度スラブ沈み込みモデル」を構築し、地球シミュレータ上で、大規模計算を行う予定である。

当面は、本計画研究の構成メンバーを3つの研究グループに分け、「部分3次元対流基礎プログラムの開発(箱型モデル(亀山), 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)」の研究を推し進めている。将来はこれらの研究グループで開発されたプログラムを統合し、「部分3次元高度スラブ沈み込みモデル」を構築し、上記の目的を達成する予定である。以下、各研究グループの1年目の成果と今後の展望について具体的に述べる。

部分3次元対流基礎プログラムの開発(箱型)

本計画研究で行う予定のマントル対流シミュレーションは、1辺数千kmにも及ぶ3次元領域を数kmの空間分解能でカバーするものである。これを実現するには、総メッシュ数が10億(=10⁹)を上回る大規模なシミュレーションの実行に耐えるハードウェア及びソフトウェア環境を準備することが大前提である。このため、地球シミュレータ上で走らせることを想定した高分解能かつ高速なマントル対流シミュレーションの手法及びプログラムの開発を前年度までに行ってきた。マントル対流の数値シミュレーションでは、高粘性かつ非圧縮の流体の速度場を求める部分が計算時間の9割以上を占めており、この部分の高速化は大規模な3次元数値シミュレーションの実現においてとりわけ重要である。そこで、マント

ル対流の速度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開発することからスタートした。開発した手法と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ていくものである。この計算手法を用いて、有限体積法に基づく3次元箱型領域内でのマントル物質の純粋な熱対流をシミュレートするプログラムを構築した。さらにそれを地球シミュレータ上へ移植・最適化を施すことにより、この計算プログラムが良好なスケーラビリティを示すことを確認しただけでなく、総自由度が約13.4億(1024×1024×256メッシュ、速度3成分+圧力+温度の5変数)という世界で類を見ない高分解能シミュレーションへの道を拓くことが可能となった。

今年度は、より現実的な地球マントル対流シミュレーションを実現するため、プログラムに2つの改良を行なった。第1の改良点は、マントル物質の相転移の効果を取り入れることである。ここでは高压相(高密度)と低压相(低密度)の分率を意味する“phase function” Γ を導入することでモデル化した。このモデルでは、相転移は Γ の値が温度・深さ(圧力の代用)の関数として変化することによって表現される。また、相転移による密度変化を考慮するため、流体の密度を温度だけでなく Γ にも依存するものとした。さらに相転移の際の潜熱の出入りによる温度変化の影響を考慮することも可能である。図1に計算結果の一例を示す。このシミュレーションでは、上面からおよそ0.2の深さ(上部マントルと下部マントルの境界に相当)の位置に、ポストスピネル相転移を模した相転移を導入してある。図より、青で示された低温の流体が相転移面を越えて下降する際に、相転移による抵抗を受けていることが見てとれる。これは負のクラベイロン勾配(モデルでは約-4.3MPa/K)を持つ相転移が、これを横切る流れを妨害する効果を持つことによる。この手法は他の相転移(例えば下部マントル最深部で期待されるポストペロプスカイト相転移)の効果を取り入れる際にも全く同様に適用することが可能である。第2の改良点は、局所的な粘性変化に対する3次元プログラムの頑健さを向上させることである。これまでの

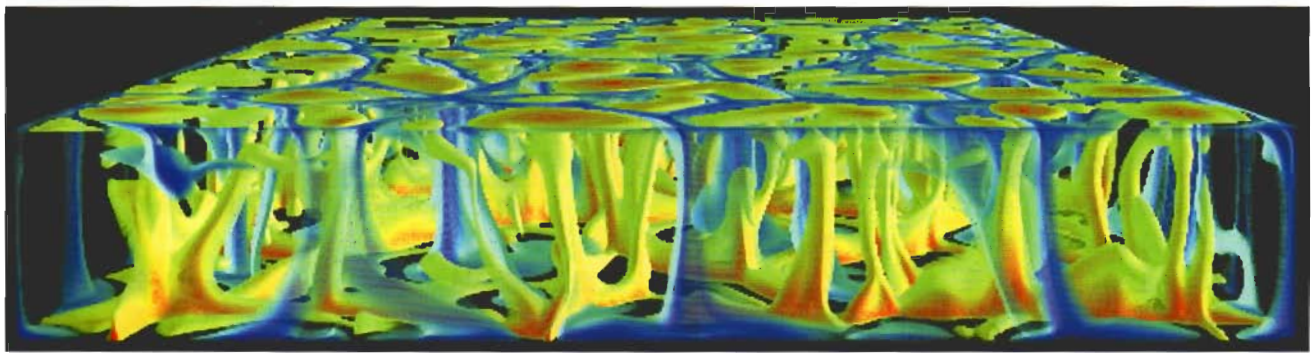


図1 660km相転移の効果をとり入れた3次元箱型マンテル対流シミュレーションの例。モデル領域は高さ3000km、幅18000kmの3次元直方体で、上面から深さ約660kmの位置に（対流を阻害する効果を持つ）相転移を導入している。青い領域は周囲よりも125K以上低温の下降域を、黄色～赤の領域は周囲よりも62.5K以上高温の上昇域を示す。

経験からいえば、多重格子法は3次元シミュレーションに代表される大規模な数値シミュレーションを実現するにあたって不可欠なツールであることは疑いない。その一方で、本計画研究で実施している「2次元高度スラブ沈み込みモデルの構築」の結果から、沈み込むスラブの挙動の再現には、局所的に粘性率を大きく低下させるメカニズム（例えばプレート境界での運動方向の食い違いを表現するための薄い低粘性領域の存在など）が重要な役割を果たしていることが示唆されている。しかし、このような微細な構造の存在は多重格子法とは本質的に相容れない。というのも、多重格子法では分解能の異なる計算格子での計算を巧妙に組み合わせることで計算の高速化を図っているのだが、粗い格子では「細かすぎて見えない」ような構造が含まれる場合にはこの原理が適用しえないからである。このため、従来の3次元シミュレーションプログラムを2次元シミュレーションと同じ条件で実行することが非常に困難であった。この問題を克服するため、計算アルゴリズムにいくつかの改良を加えた。そのうち現段階で最も効果的であったのは、一般化最小残差法（GMRES法）の考えを取り入れることであった。この考えの基本は、何らかの手段（例えば直近 m 回の多重格子法計算）により得られた近似解 $u^0 \sim u^{m-1}$ の線形結合により、新たな近似解 u_{acc} を作ることである。この際、 u_{acc} によって与えられる残差（の2乗ノルム）を極小化するという条件を課すことで、 $u^0 \sim u^{m-1}$ をどのような重みづけで足し合わせればよいかを決定することができる。なお、この方法はリスタートつきの一般化最小残差法（GMRES（ m ）法）の前処理に多重格子法を使ったことに相当する。しかしより厳密に言えば、GMRES法そのものではなく、どちらかと言えば残差切除法（Residual Cutting Method）に近い。また、上の議論から予想されるように、この手法では m の選び方が非常に大事である。 m が大きいとより多くのメモリを必要とする（過去 m 個の近似解と残差を保存するから）だけでなく、最小化問題を記述する係数行列の性質が m の増大とともに悪化する。かといって、 m があまりに小さ

いと、最適解を探索する線型空間の次元が小さい（探索範囲が狭い）ためにより u_{acc} が見つけれず、その結果収束しない可能性もある。しかし多重格子法と併用する場合には $m=5$ 程度で十分な収束性の改善が得られた。またこの手法を用いることにより、ある場合には従来のものと比べて10倍程度の計算時間の短縮が得られることを確認した。

上に述べたプログラムの改良に加え、今後によりモデルを現実に近いものにするための手法の改良を継続していくことが不可欠であると考えられる。特に、鉱物の相転移によるレオロジー変化の効果をとり入れることが極めて重要になるであろう。高温高压での鉱物実験の結果からは、鉱物の相転移に伴って生じる鉱物の細粒化が、スラブ物質の粘性率を大きく（ $10^4 \sim 10^6$ 程度）低下させる可能性が指摘されている。後述の「2次元高度スラブ沈み込みモデル」の結果でも、この効果を模したスラブ内の粘性率の激減がマンテル遷移層付近でのスラブの挙動に大きく影響することが示唆されている。しかし残念ながら、今年度実施した手法の改良では、このような急激な粘性率変化に耐えうるほどの頑健さを得ることはできなかった。今後のプログラム開発・改良にあたっては、ポストスピネル相転移以外の相転移の効果を導入することはもとより、計算手法の革新がますます重要になるであろう。その際、シミュレーションの実行速度を落とすことなく、粘性変化に対する頑健さを向上させる手法の確立が望まれる。新たなシミュレーション技術・手法を積極的に取り入れ、本計画研究の究極の目的の1つである「3次元高度スラブ沈み込みモデル」の開発につなげていきたい。

部分3次元対流基礎プログラムの開発（球殻モデル）

デカルト座標系を用いて球殻領域で支配方程式を記述し、流速、圧力、温度を原始変数とする有限要素計算コードを、地球内部の対流で想定される高レイリー数の現象をシミュレーションできるように改良した。従来は、熱の輸送を表す移流拡散方程式の離散化手法に安定化有

限要素法の一種であるSUPG法を用いていたが、現状の計算機資源では十分に細かい要素分割を実現することができず、数値的な不安定性を起こしてしまい 5×10^4 程度のレイリー数のシミュレーションが限界であった。これに対し本年度は物質微分項を特性曲線を用いて近似する特性有限要素法を導入し、そのアルゴリズム中の数値積分法を工夫することで、 10^8 のレイリー数でも安定に計算することが可能になった。

深さ660km付近での相転移の効果をChristensen and Yuen (1985) の手法に基づくモデルにより導入した。相転移層の内部とその周辺では浮力項が大きく変化することになるため、高い解像度が要求される。これには有限要素法の特徴であるメッシュ分割の自由度が大きいことを活用して相転移層付近にメッシュを集中させる非構造分割を採用し、解像度の向上をはかっている。またコア・マントル境界の熱境界層付近にもメッシュを集中させている。

図2にテスト計算経過を示す。 $Ra = 10^8$, 粘性比 $= 10^4$, 相転移層の厚さ $= 50$ kmである。初期条件を相転移層なしで得られたある一層対流に設定し、時間発展のある時刻での対流の状態を部分領域に切り出して示したものである。コア・マントル境界の熱境界層付近(赤色)と地表付近(青色)に配置した粒子の流れに沿って流した軌跡と、無次元温度0.8(橙色), 0.5(緑色)の等温度面を重ねて表示している。初期状態の対流の影響がまだ残っているが、0.8の温度等温面とコア・マントル境界の熱境界層付近からの流れは下部マントルにはほぼ留まっていることが観察できる。また上部マントルの一部に下降

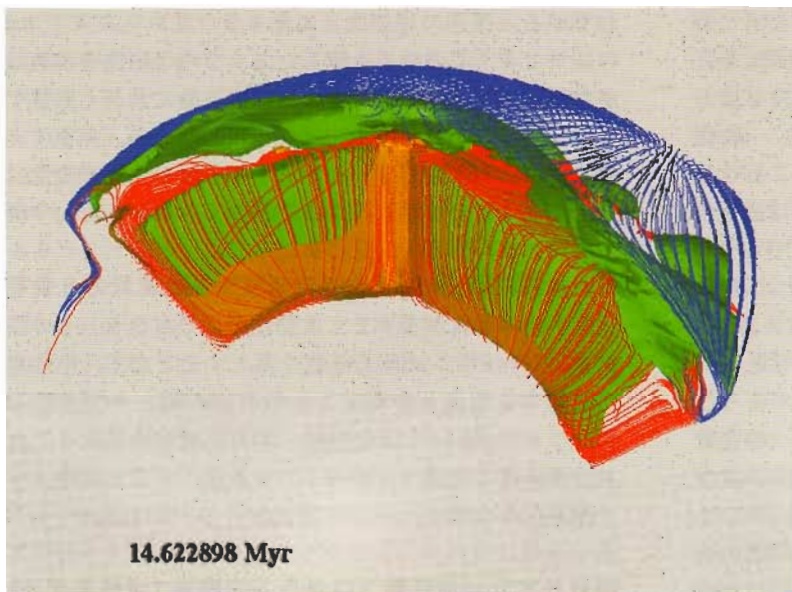


図2 660km相転移の効果を取り入れた3次元球殻マントル対流シミュレーションの例。 $Ra = 10^8$, 粘性比 $= 10^4$, 相転移層厚さ $= 50$ km。コア・マントル境界の熱境界層付近(赤色)と地表付近(青色)に配置した粒子の流れに沿って流した軌跡と無次元温度0.8(橙色), 0.5(緑色)の等温度面を重ねて示す。

流がみられ、対応する箇所の0.5の温度等温面は相転移層付近まで下がっている。

三次元球殻領域全体で相転移効果を取り入れたモデルをシミュレーションするコードの実装を完了した。次のステップとしてクラペイロン勾配の値による対流の変化を調べ、マントル下降流の滞留・崩落現象の確認を行う予定である。

部分球殻領域でスラブ沈み込みのモデルを構築するためには、2種の境界条件の設定が必要である。1つ目は沈み込みでの境界条件であり、海洋プレートの運動と矛盾を起こさないよう、スラブの運動の向きと速さを与える必要がある。マントル内部でこの運動を推定することは難しいため、スラブの沈み込む曲面での法線方向の運動を制約する滑り境界条件を与えることを検討している。3次元球殻領域のモデルではスラブ沈み込みは曲面状に分布することになるが、有限要素法の要素分割をこの曲面に沿って構成することで比較的容易に実現できる。2つ目は部分球殻領域に切り取った際に生まれる人工境界で流速、応力、温度をどのように決めるかである。マントル対流パターンを人工的に与えてしまうことのないよう、全球での粗いメッシュでの計算結果から補間して境界条件を推定する手法を検討中である。

2次元高度スラブ沈み込みモデルの構築

本研究は、3次元モデルよりも広いパラメータ空間において物性の影響を詳細に調べることを目的としている。これまで、プレートのレオロジーとして履歴に依存する破壊強度を考慮することによりプレート境界を作り出し、自由に運動できるプレートと非対称構造を持つ沈み込みのモデルを開発してきた。Christensen (1996) やCizkova et al. (2002) によると、スラブの海側への後退がスラブとマントル遷移層との相互作用に重大な影響を与えることが明らかになっている。昨年度の研究では、プレートの正断層型破壊と逆断層型破壊の強度(圧縮強度と引張り強度)の違いを考慮することにより、境界条件として与えることなく、沈み込むスラブの後退をある程度実現した。このモデルを用いてスラブとマントル遷移層との相互作用について研究を行った。しかし、このモデルでは海溝の移動量が小さく、遷移層においてスラブの強度を大幅に低下させないとスタグナントスラブを作り出すことはできなかった。

本年度は、上盤側プレートが自由に運動できるモデルを作成し、より自由にスラブが移動できるように改良した(図3)。このモデルでは上盤プレートが右側の境界と接している部分の粘性を下げるこ

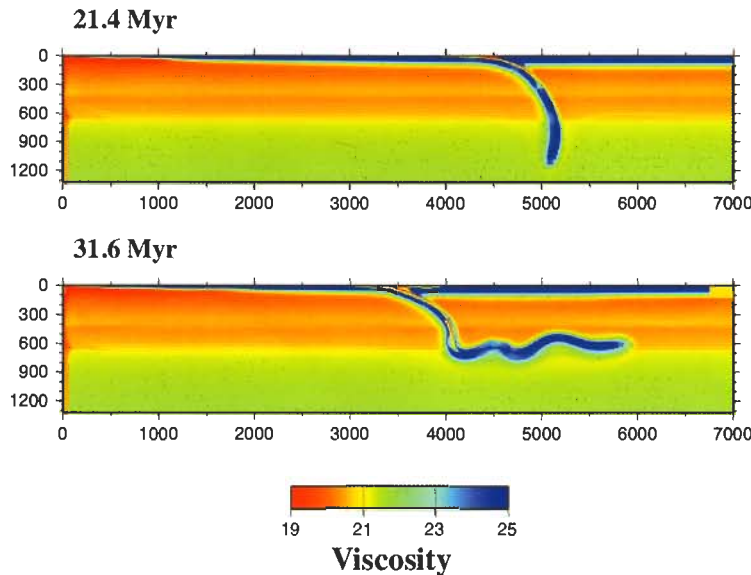


図3 スラブのスタグネーションと海溝後退の相互作用。上図は上盤プレートが固定されている場合、下図は自由に動くことができる場合。後者のモデルでは、上盤プレートの自由な運動と相転移に伴う細粒化の効果を考慮している。相境界のクラペイロンスロープは、410km境界が+3MPa/K、660km境界が-3MPa/Kであると仮定した。図は多川道雄氏の提供による。

により、上盤プレートの自由な動きを可能にしている。

上盤プレートが固定されている場合には、最初の沈み込み角が浅い場合でも沈み込み口付近での降伏により、スラブは下向きに沈み込む。上盤プレートが自由に動ける場合にはスラブの負の浮力により海溝の後退が起こり、スラブは斜めに沈み込んでゆく。スラブが斜めに沈み込んでいるときには下向きの速度成分が小さく、660km相境界の浮力が有効に働く。浮力を受けるとスラブはより不安定になり、海溝の後退が促進される。図は、細粒化の効果を入れたモデルを示しているが、細粒化がない場合でも海溝後退速度が速い場合にはスラブのスタグネーションが起きる。細粒化があるモデルでは最終的にスラブは、スラブが660km境界と最初に接しているあたりから下部マントルへ沈み込んだ。

さらに、660km相境界面での粘性ジャンプの影響についても調べ始めている。まだ、計算を行っている段階であるが、スラブが堅い場合にはスラブの沈み込むマントルの粘性により、沈み込み速度、すなわちプレートの速度は大きく変化する。スラブが下部マントルへ沈み込んだときに、下部マントルの粘性が高い場合にはプレート速度は大きく低下する。このことは、スラブの強度は遷移層で低下していることを示唆する。これは、プレートの駆動力の解析 (Yoshida et al., 2001) やジオイド (Moresi and Gurnis, 1996) と調和的である。

ここで紹介したモデルでは、メガリスを作るような様式のスタグネーションは起こらなかった。これはスラブが堅いためである。また、下部マントルに崩落しにくかったのは上盤プレートが筏のように自由に動けるので、海溝の速度がかなり速くなったためかもしれない。今後は、上盤プレートの運動のしやすさを調整可能なモデル

を開発する必要がある。更に、遷移層のスラブの強度の低下などのスラブのレオロジーモデルも再考する必要があると考えられる。その際、プレート運動の速度の比較や、モデルのスラブの壊れ方と深発地震分布との比較を行いながら研究を進める予定である。

参考文献

- Christensen, U. R., Yuen, D.A., 1985. Layered convection induced by phase transitions. *J. Geophys. Res.* 90. 10291-10300.
- Christensen, U. R., 1996. The influence of trench migration on slab penetration into the lower mantle. *Earth Planet. Sci. Lett.* 140, 27-39.
- Cizkova, H., van Hunen, J., van den Berg, A. P., Vlaar, N. J., 2002. The influence of rheological weakening and yield stress on the interaction of slab with the 670 km discontinuity. *Earth Planet. Sci. Lett.* 199, 447-457.
- Moresi, L., Gurnis, M., 1996. Constraints on the lateral strength of slabs from three-dimensional dynamic flow models. *Earth Planet. Sci. Lett.* 138, 15-28.
- Yoshida, M., Honda, S., Kido, M., Iwase, Y., 2001. Numerical simulation for the prediction of the plate motions: Effects of lateral viscosity variations in the lithosphere. *Earth Planets Space* 53, 709-721.

平成19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

