

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.2 Dec.2005



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	6
海底広帯域地震観測でスタグナントスラブを診る	14
海底電磁気機動観測でスタグナントスラブを診る	16
スラブ滞留・沈降過程の物質科学的モデリング	20
スラブ滞留・崩落過程の物質科学的モデリング	26
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	38
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	48
公募研究の紹介	53
研究集会報告	62
研究集会のお知らせ	66
お詫び（正誤表）	73

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-2005-

笠原 稔 (北海道大学・地震火山観測センター)

[1] 2005 年実施内容

図 1 に、本計画の観測点と数編で稼働中の長周期地震観測点を示してある。2005 年には、観測点番号 1~5 の観測点を設置し、稼働を始めた。観測点の位置及び観測開始日時を表 1 に示してある。これらは、当初計画どおりの地点に設置された。本年度は、観測点番号 6, 7, 8, 10 の 4 点の下見を行い、来年度の設置準備を行った。カムチャッカ半島では、当初予定点での長周期地震観測がロシア側で進められており、今回の目的に会うように、オホーツク海に面したカムチャッカ半島の西海岸を選定した。来年度の設置予定点の観測点名を表 2 に示してある。これらは、2006 年度の早い時期に設置を進められるよう手続きは進んでいる。

Far- Eastern Russia- Japan Seismic Network

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

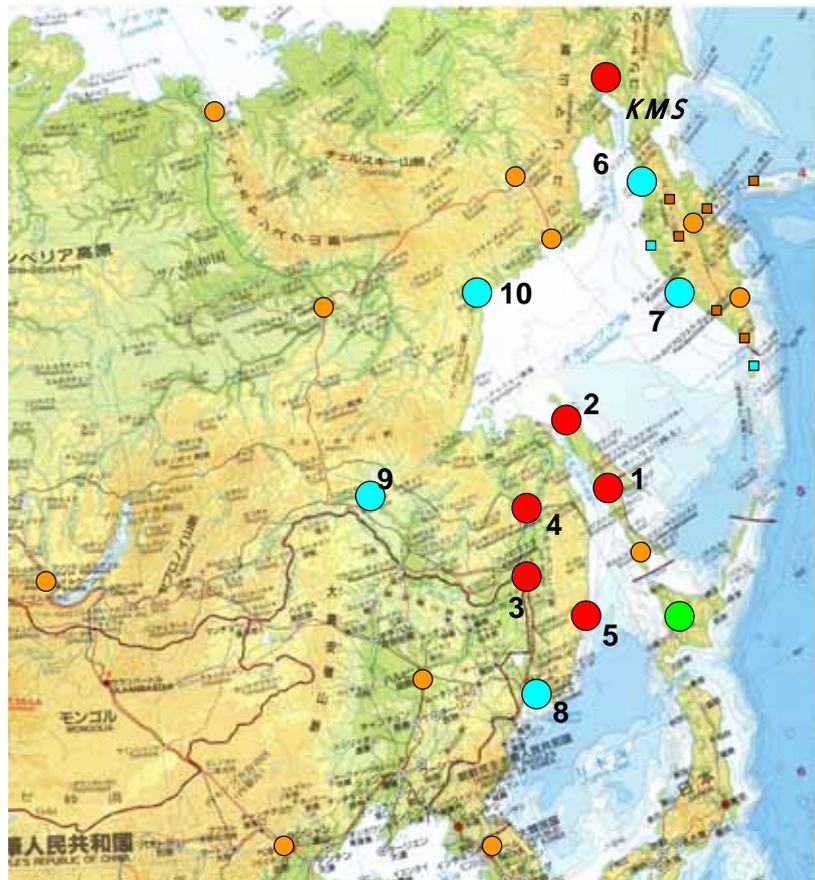


図 1 .極東ロシアでの広帯域地震観測点分布 (赤色 : 2005 年の設置観測点 ,1-5、
水色 : 本研究で来年度設置予定の観測点 , 6-10、緑色 : 北海道大学観測センタ
ー , 橙色 : IRIS 等の既設観測点) . 観測点番号は表 1 を参照 .

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	Est. 2005
1	Tymosk	TYM	50-51-53.9	142-40-33.1	161	Jun.25
2	Okha	OHA	53-36-06.5	142-56-44.4	26	Jun.27
3	Khabarovsk	KHA	48-28-23.8	135-03-05.2	111	Aug.10
4	Gorney	GOR	50-45-47.4	136-26-57.9	528	Aug.23
5	Terney	TER	45-03-43.2	136-36-02.3	30	Sep.30

表 2 2006 年度設置予定点、番号は、図 1 に対応する

6	Palana	PAL
7	Zoboreva	ZOB
8	Uslisk	USL
9	Zeya	ZEY
10	Okhotsk	OKH

[2] 広帯域地震観測システム

本計画研究の観測点の観測システムを図 2 に示す . 地震計には , G. STRECKEISEN AG 社製 STS 2 型広帯域地震計とマークプロダクツ社製短周期地震計 L-4C-3D(固有周期 1Hz) を採用した . 観測波形の収録には白山工業社製 LS-7000XT を用い , 広帯域地震計および短周期地震計とも , サンプルング周波数 100Hz 24 ビット A/D でデジタル化され , LS7000XT 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 ・ 7 9 EP ・ 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 .

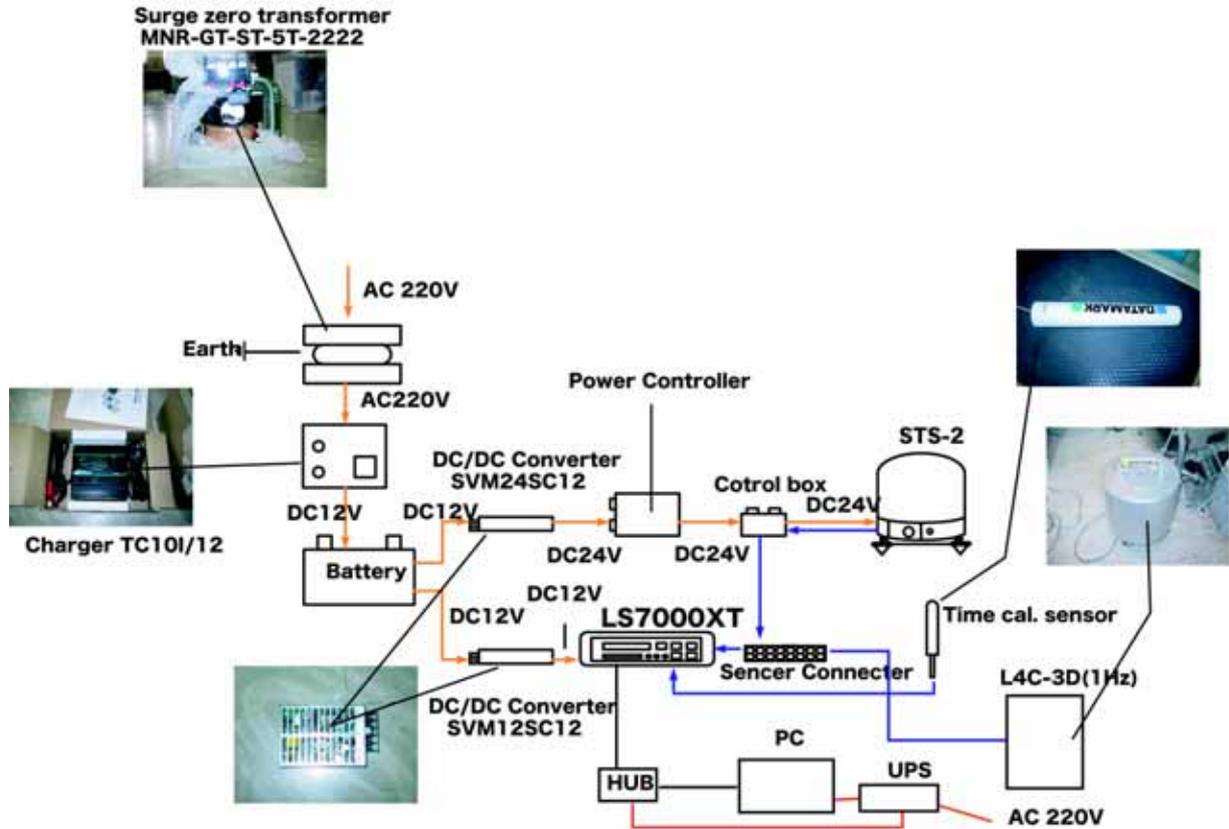


図 2 . 観測システムのブロック図 (本文参照)

実際の観測機器の設置は、2005年6月に観測点(1)OKHと(2)TYM、8月に(3)KHAと(4)GOR、9月に(5)TERの合計5ヶ所の設置を行った(図1参照)。各観測点の座標と観測開始時を表1に示した。KHA観測点以外は、サハリン地震観測所の地震観測網を構成している地震観測点の地震計室に本観測システムを設置した。また、各観測所の職員により、本観測システムは保守されている。

各観測点でCFカードに収録された連続波形データは、オリジナル観測波形保存のため、一時保存用ハードディスクにコピーされる。一方、波形収録されたCFカード(あるいは、それらをコピーしたデータ輸送用ハードディスク)は郵送(不定期)等により、ユジノサハリンスクのサハリン地震観測所に集約される。サハリン地震観測所では、全波形データをチェックし、観測システムの動作状態を確認する。最終的には、集約された全波形データは北海道大学観測センターに送られる。しかし、現時点では観測データのロシア国外への持ち出しの許可を申請中(2006年2月に許可予定)のため、一部の試用データのみが北海道大学観測センターに集められている。図3に、極東ロシア地域のIRIS観測網の観測点(MDJ, YSS)の波形と大陸の観測点、GORとTERの観測波形例を示す。図4には、ハバロフスク市内に設置されたKHA観測点でのパキスタン地震の記録例を示してある。

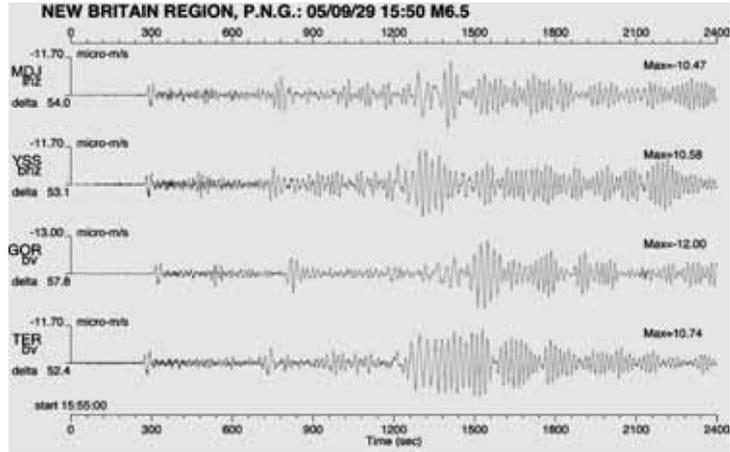


図3. 広帯域地震計観測波形例1 (上下成分). 観測点 GOR, TER と IRIS 観測網 (MDJ と YSS) の波形例.

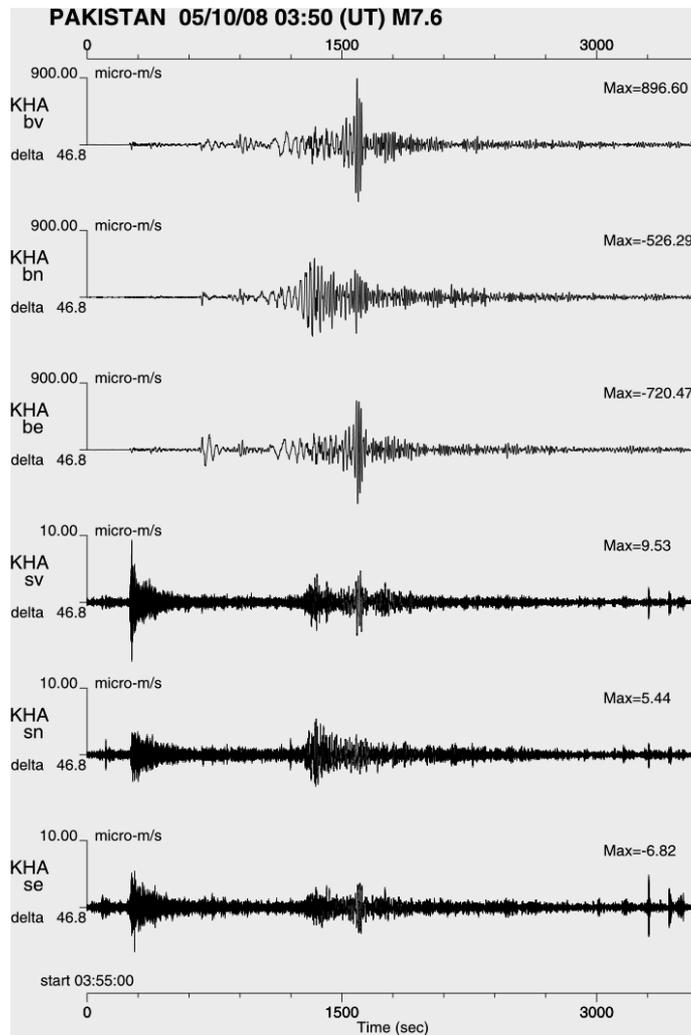


図4. 観測点 KHA で観測されたパキスタン地震 (2005年10月8日 UT) の広帯域地震計波形 (上から上下成分, 南北成分, 東西成分) と短周期地震計波形 (上下成分, 南北成分, 東西成分).

[3] 今後の予定

図 1 に示されているように、2006 年夏までに観測点（図 1 中の水色丸；表 2 参照）を新設する予定である。そのため、これらの地点の下見を 2005 年秋におこなった。2005 年の観測点設置作業は、日本人 3 名と現地ロシア側研究者から成る設置担当班 1 班によって行われたが、2006 年は広範囲に渡る観測点展開となるため、2 班から成る設置担当班を編成する予定である。一方、2005 年に設置した 5 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も検討中である。

また、当初計画の観測網がほぼ完成するのに合わせて、2006 年 7 月上旬に、札幌でこの計画の進行状況と初歩的な結果についての国際シンポジウムを予定している。

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 (IFREE, 海洋研究開発機構)

研究計画イでは次の5つの研究を進めた。

- (1) P波走時トモグラフィー - : より詳細なスラブイメージを求めて
- (2) S-P走時トモグラフィー - : スラブの地震波高速異常の原因解明に向けて
- (3) S波波形トモグラフィー - : 地震波速度異常のスケール解析
- (4) 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
- (5) スタグナントスラブ・データセンターの構築

(1) P波走時トモグラフィー (大林、深尾)

P波トモグラフィーにおいてより詳細な高速スラブのイメージを得るために独自に測定した初動の走時データとPP-P走時差データを従来のISCの初動走時データに加えてトモグラフィーを行った。初動は西太平洋を中心とした太平洋域の広帯域地震計ネットワーク(OHP, JISNET, SPANET, SKIPPY, LDG, フレンチポリネシア広帯域海底地震計)波形データを使用し読み取った。得られたデータはおよそ26,500パスである。PP-P走時差は観測されたP波の波形からPP波形を合成し観測PP波形と相関をとることで測定している。IRISのグローバルにある広帯域波形データかを使い測定した結果約15,000のPP-P走時差データを得た。図1は本研究で追加したP波、PP-Pの波線の通過する密度を表したものである。トモグラフィーイメージの改善が見られる地域のおおよその指標となる。西太平洋全域にわたり解像度改善が期待されるが、PP-Pデータを組

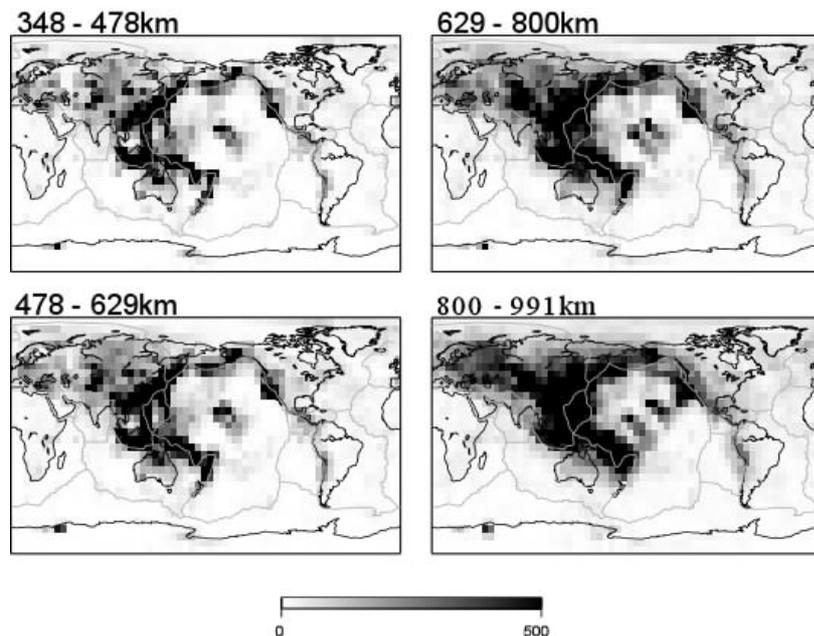


図1 64(緯度方向)×32(経度方向)に分割したブロック内を通過する波線の数。新たに追加した初動走時データ及びPP-P走時差データのみ対象としている。

み込むことによって上部マントルにおいてもユーラシア大陸（横たわるスラブの先端部）での解像度改善が期待されることは注目すべき点である．

図 2 は得られた結果を WEPP2 (Fukao et al., 2001) と比較してプロットしたものである．本研究では ISC の走時データを約 700 万パス使用している．独自のデータは ISC のデータの 2 倍の重みをつけてある．

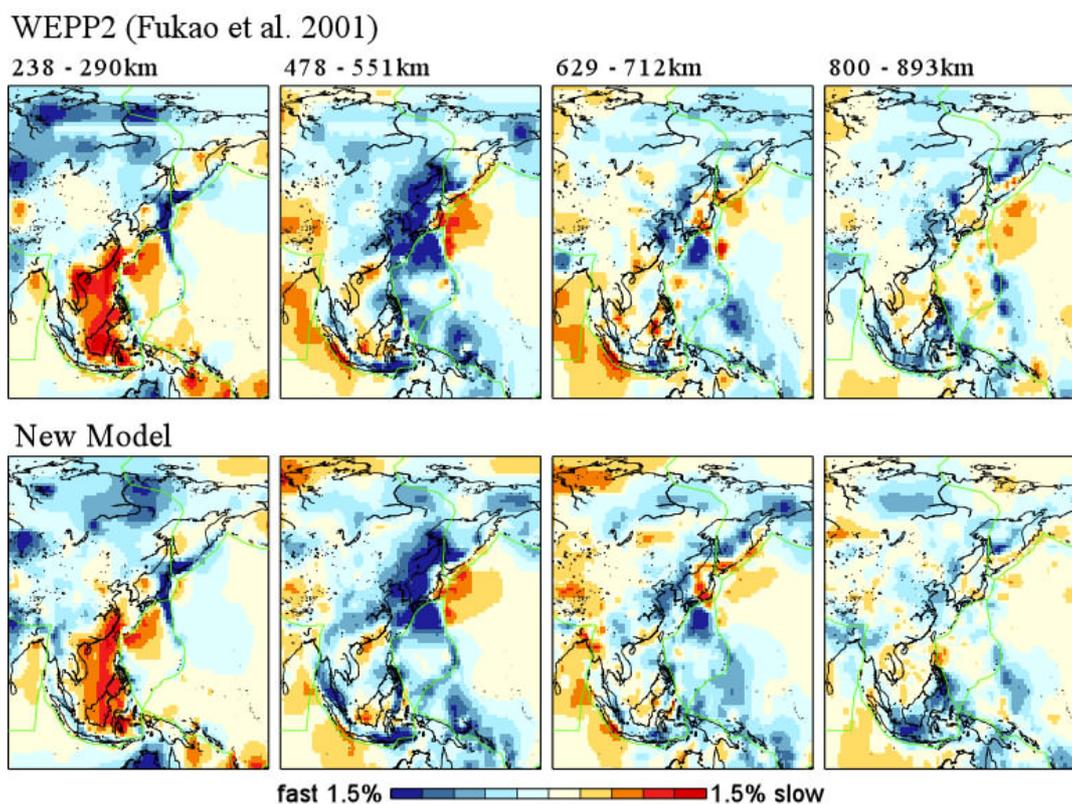


図 2 異なる深さにおける西太平洋域での P 波トモグラフィーの結果．青，赤はそれぞれ高速，低速異常を表す．上図は WEPP2 (Fukao et al., 2001) 下図は本研究で得られた結果である．

全体的にシャープなイメージが得られていることが分かる．日本海溝から沈み込んだスラブが横たわる深さ 500km 付近では横たわるスラブのイメージが周りににじむことなく強い振幅で得られている．また同じ深さでフィリピン海プレートを囲んで線状の高速度異常がクリアに見られる．図 3 はジャワ，フィリピンから沈み込むスラブの様子を描いた断面図である．660km 不連続面を突き抜けたスラブが下部マントルでたまっている地域である．WEPP2 では沈み込むスラブが断続的であったのに比べ本研究では連続的になっており，たまっている部分と地表から沈み込む部分がつながっていることが確認できる．北千島、マリアナなど他に 660km 不連続面を突き抜けるスラブは同様に像の改善が見られ連続的に下部マントルまで突き抜ける様子が観測されている．

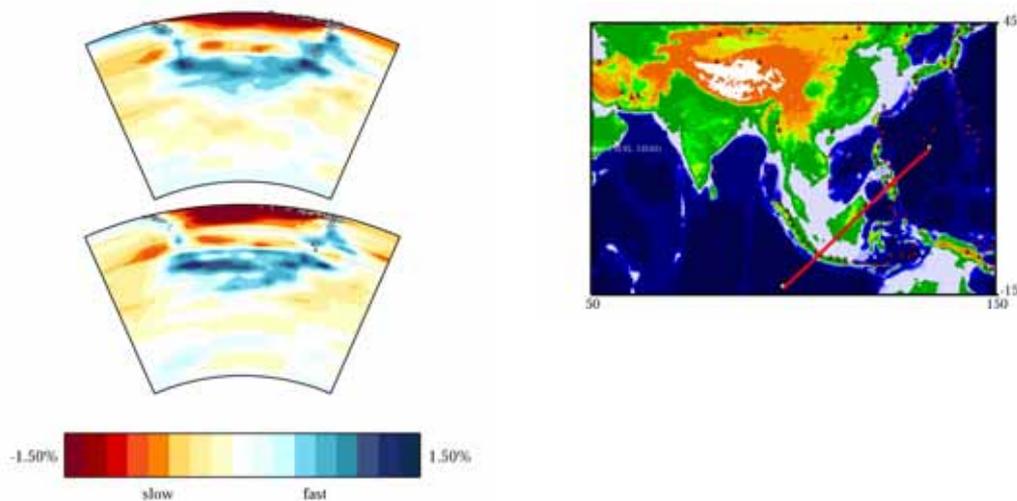


図 3 下図赤線で示すモホ面から核マントル境界までの断面図．断面図の上は本研究の結果，下は WEPP2 ．

(2) S-P 走時トモグラフィー（沖、深尾、大林）

V_p/V_s 比は鉱物物理分野によって速度異常の成因により異なる値をとることが知られており，速度異常の成因を議論するのに有効なパラメータである．しかし地震波トモグラフィーによって得られるのは V_p , V_s それぞれ独立なモデルであり，両者の比をモデルパラメータとした 3 次元グローバルモデルは未だ得られていない．

本研究では V_p/V_s 比トモグラフィーモデルの構築に必要な短周期 S-P 走時差測定手法の開発，および， V_p/V_s 比を直接のモデルパラメータとしたトモグラフィーの開発を行った．本発表では，得られた preliminary V_p/V_s 比 3 次元モデルとその解釈について報告する．

S-P 走時差測定手法の開発

V_p/V_s 比トモグラフィーモデル構築のデータとして 経路に沿った平均的な V_p/V_s 比を直接的に反映した物理量である S-P 走時差に着目した．この走時差を，P 波から S 波を合成して観測 S 波との相互相関を取る，波形相関法によって測定した．合成波を生成する際，実体波立ち上がりの周波数を規定する物理分散のリファレンス周波数に，慣習的に用いられている 1Hz ではなく 2Hz を採用すべきであることを定量的に示した．これにより目視による P 波読み取り走時と整合的な S 波の走時が効率的に得られるようになった．

V_p/V_s 比トモグラフィーの開発

得られた S-P 観測走時 $T_s - T_p$ および基準とする S-P 走時差 $(T_s - T_p)_0$ は V_p/V_s 比を用いて，式のように書ける．ここで既知パラメータは P, S 波のブロック内波線長さ d_{lp} , d_{ls} , 基準 P/S 速度比 $(V_p/V_s)_0$ とする．

$$\text{観測走時} : T_s - T_p = \int_S (V_p/V_s)(d_{ls}/V_p) - \int_P d_{lp}/V_p \quad \dots$$

$$\text{基準走時} : (T_s - T_p)_o = \int_S (V_p/V_s)_o (dls/V_p^o) - \int_P dlp/V_p^o \quad \dots$$

得られた 13,500 個の S-P 走時差のうち、明瞭な立ち上がりの P 波走時 13,000 個を目視により読み取った。この走時は、高精度で求められている既存の P 波トモグラフィーモデル [Fukao et. al., 2001] による予測走時と極めて調和的であることが分かった。この整合性は、式において $V_p=V_p^o$ が成り立つことを意味する。2 式の差を取った式は $V_p/V_s - (V_p/V_s)_o$ を未知パラメータとした、線形なインバージョンとして解くことができる。

$$(T_s - T_p) - (T_s - T_p)_o = \int_S [V_p/V_s - (V_p/V_s)_o] (dls/V_p^o) \quad \dots$$

得られた V_p/V_s 比モデルと依拠した P 波モデルとにより、 $V_s=V_p/(V_p/V_s)$ として S 波のトモグラフィーモデルが得られる。例として深さ 1,100 - 1,200km の V_p , V_s , V_p/V_s モデルを図 4 に示す。

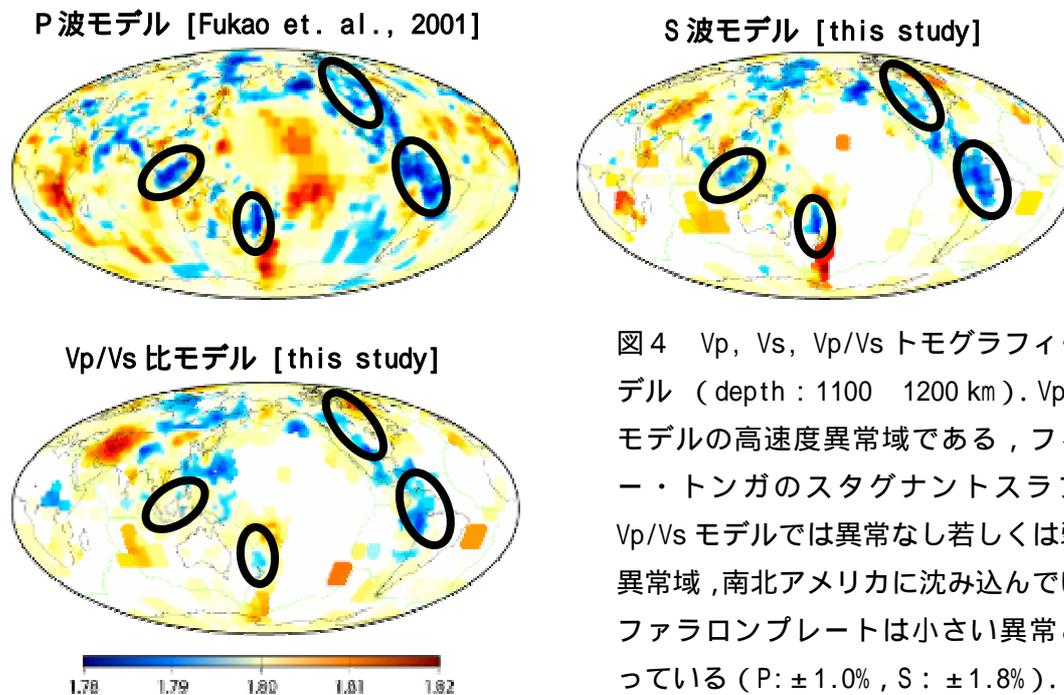


図 4 V_p , V_s , V_p/V_s トモグラフィーモデル (depth : 1100 - 1200 km). V_p , V_s モデルの高速度異常域である、フィジー・トンガのスタグナントスラブは V_p/V_s モデルでは異常なし若しくは弱い異常域、南北アメリカに沈み込んでいるファラロンプレートは小さい異常となっている (P: $\pm 1.0\%$, S: $\pm 1.8\%$).

Preliminary V_p/V_s 比モデルの解釈 - 温度異常に起因する速度異常の空間分布 -

本研究の V_p/V_s 比モデルの応用例として、温度異常に起因する S 波速度異常の空間分布を定量的に評価した。P 波と S 波の速度異常の成因が温度異常によるときの両者の比 $R=d\ln V_s/d\ln V_p$ は、鉱物物理分野より、下部マントルにおける値として 1.5 ~ 2.5 (深くなるほど大きくなる) で与えられている。P 波速度異常が温度異常によるとした場合、これと R との積は、温度異常による S 波速度異常の理論値となる。本研究の V_s モデルは、 V_p モデルに依拠することで求められた V_p/V_s 比を介して推定されているため、上記理論 S 波速度異常と定量的に比較することができ、その残差はすなわち温度異常以外に起因する速度異

常分をあらわす。

この空間分布を評価したところ、スラブ高速異常を含む下部マントルのほとんどは温度異常に起因していることが分かった。一方で、ソロモン諸島下 2100km 以深に見られる S 波低速度異常域や下部マントル最上部のスラブ周辺域の速度異常は温度異常だけでは説明できないことが分かった (図 5)。

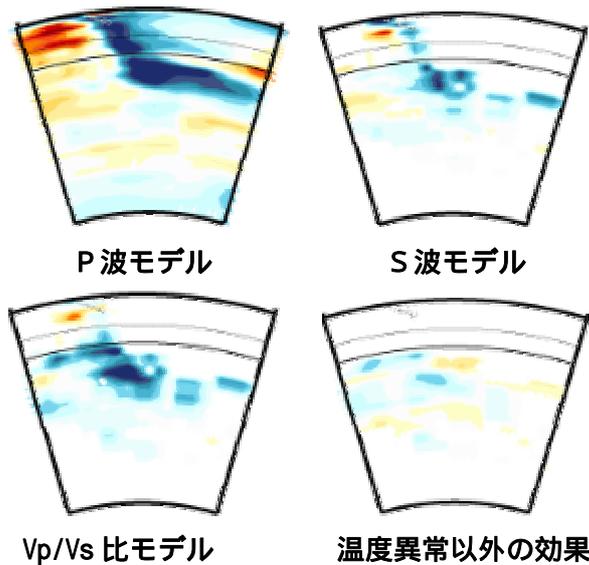


図 5 南米スラブの断面図

P, S 波モデルで高速度異常を示す領域は V_p/V_s 比では平均より小さい値を示す青色になっている。P 波の速度異常が温度異常によるとしたとき、物性から与えられる R を用いて、S 波の温度異常による速度異常理論値が得られる。本研究の S 波異常と理論値との残差は、温度異常以外の成因による速度の異常値を表している。図より、スラブ高速度異常は温度異常で説明できることが分かる。

(3) S 波波形トモグラフィー (竹内)

詳細な走時トモグラフィー研究を通じ、スタグナントスラブは全世界で普遍的な特徴として示唆され (Fukao et al. 1992, JGR; Fukao et al. 2001, Rev. of Geophys.), マントルが基本的には二層対流系をなしていることの重要な証拠とされている。一方で、本当にマントルが二層対流系をなしていれば、670 km 不連続面近傍では全球的に境界層が発達していることが期待されるが、既存のトモグラフィーモデルではこの特徴は必ずしも自明でない。本研究では大局的な不均質構造を推定するのにふさわしい内部構造推定手法を開発した上で、670 km 不連続面近傍の境界層の検出を行った。

大局的なマントル対流のパターンを制約するには、地震波速度不均質構造のスケールレングス (特徴的な不均質の波長) の分布を制約することが有効であると考えられる。しかし既存のトモグラフィー手法では、解像度が地域ごとに大きく異なるため、地球内部のさまざまな領域におけるスケールレングスを直接比較することができなかった。この問題を解決するため、筆者らは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)。

本研究ではこの手法を応用し、全マントルの S 波速度構造を推定した。既存のトモグラフィーモデルで解像度の悪かった地域 (海洋域など) の解像度を改善するため、波形インバージョンを実施し、波形に含まれる全情報を活用した。(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した。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可能になった。

約 200 イベントのデータを用い、Degree-18 の全マントル S 波速度構造を推定した。予備的な結果を図 6 に示す。上部マントル・下部マントルの双方で、最上層と最下層では比較的長波長不均質構造 (degree-2 など) が卓越する赤いスペクトルの不均質構造を示すのに対し、真ん中の層では白いスペクトルの不均質構造を示す。この結果は上部マントル・下部マントルの 2 つの対流セルが存在し、それぞれの最上層と最下層が(水平方向の流れが卓越する)境界層となっていることを示唆する。この結果はスタグナントスラブの存在と並び、マントルの二層対流説を裏付ける重要な証拠となりうる。

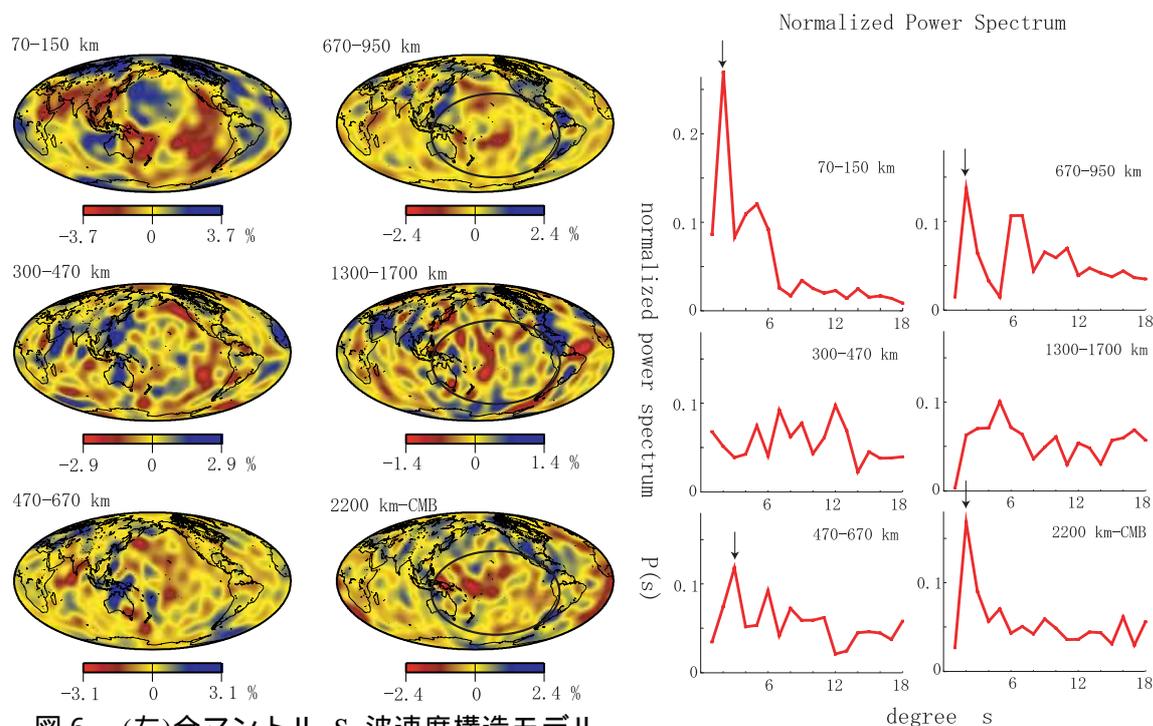


図 6 (左)全マントル S 波速度構造モデル。(右)各層における水平方向不均質の正規化パワースペクトル。

(4)沈み込み帯異方性構造の推定(東野、深尾)

防災科研の運用している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がを長周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。

本研究では、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(ScS, sScS, ScS2, sScS2) を用いて日本列島下の異方性の解析を行う。ScS波を用いた日本列島下の異方性過去の研究には、Ando(1984), Fukao(1984)などがあり、どちらもScS波を短周期記録で解析し、異方性がNNW-SSE方向であると示している。しかし、異方性の存在場所については、震源、マントル、観測点のそれぞれの位置に異方性が存在する可能性が高く、従来の研究では、テクトニクスとの相関などから異方性の存在箇所を推定している。そこで、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。

用いたイベントはVladivostock(02/06/28, Mb6.7, 566km), Kuril (02/11/17, Ms7.3, 459km), Sakhalin(03/07/27, Mb6.7, 481km)の3つの巨大深発地震でHi-net傾斜計ではScS, sScS, ScS2, sScS2波が明瞭に観測された。KurilとVladivostockの地震によって観測されたScS2波を用いて、マントル全体の異方性を推定するとNNW-SSE方向に1往復で0.75秒の差を生じさせることがわかった。さらに、ScSとsScSの経路の違いを考慮しScSの解析で得られた異方性を用いてsScSを補正し震源付近の異方性を求めた。その結果、VladivostockはNEN方向に1.0秒、KurilはNNE方向に1.0秒、SakhalinはNNWに1.8秒の異方性の早い軸を持つという結果になった(図7左)。S波のradiation patternには水平2成分のうち1成分、波の振幅がほとんど生じない方向がある。Sakhalin地震はマントル異方性の軸方向がS波の振幅が弱い方向になっていた。従って、ScSはマントル異方性の影響を受けていても、振幅の大きい1成分のみの走時が早まっているだけであり、スプリッティングには寄与していない。つまり、本研究で用いているcorrelation法では検知した異方性は、観測点直下の異方性を現していると考えられる。この記録を用いて、西南日本ではNNW方向、東北日本では、NNE方向に異方性の早い軸が存在するという結果を得た(図7右)。

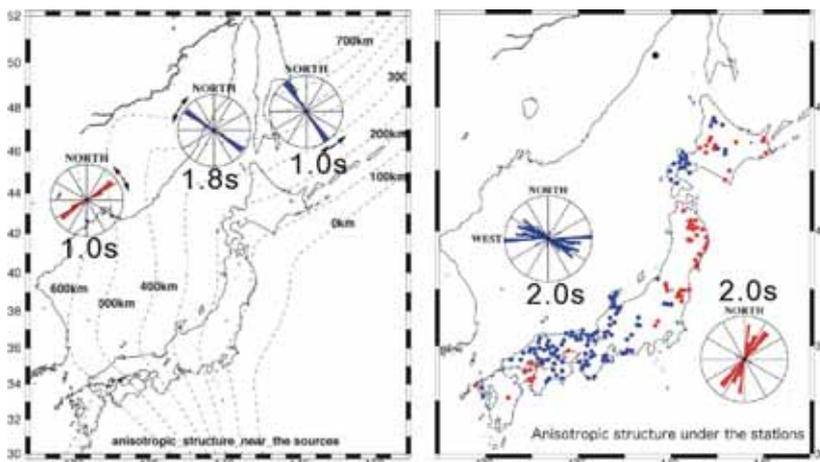


図7 震源近傍上部マントルの異方性(左)と観測点直下異方性(右)。最大速度方向と異方性による走時差をローズダイアグラムで示す。

(5)データセンターの構築(坪井)

データセンターは12月中に図8に示したページが立ち上がる予定である。今年度取得できる予定のデータはロシア広帯域地震観測網のうち、今年度に設置したTyosk、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となる。データセンターには、今後実施される予定の海底観測で得られる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つもりであり、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。

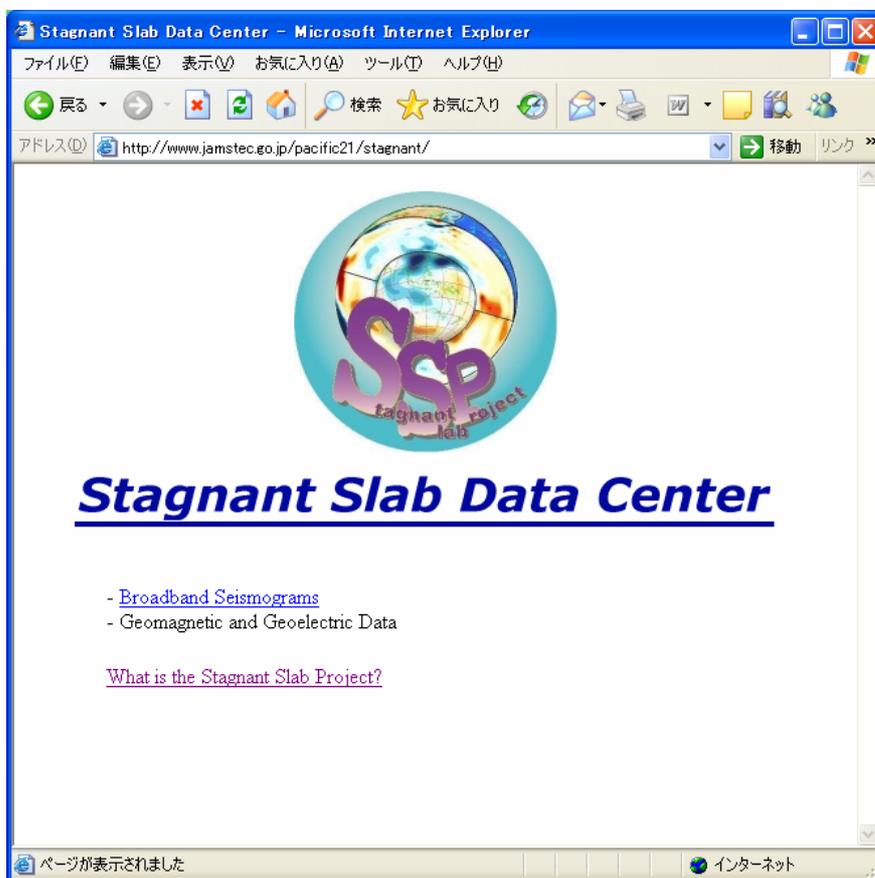


図8 データセンターのトップページ

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)

本研究グループでは海底電磁気機動観測と共同で、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海底観測を計画している。本年度はその最初の観測を開始するために、昨年度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KR05-14航海(10月5~26日、和歌山~グアム)を実施した。本航海では図1に示す18観測点において、広帯域海底地震計12台および海底電位磁力計11台を、異常に停滞し続けた台風で翻弄されつつも無事に設置完了することができた。しかし、来年度以降に機器を設置する3観測点での精密地形調査は航海時間がなくなり断念することとなった。

本観測で使用する広帯域海底地震計(図2)は、広帯域センサー(Guralp社製CMG-3T,360s-50Hz)を搭載し1年間連続の高精度の記録を取得可能である。1999年以降、日本周辺・仏領ポリネシア海域での多くの観測実績もあり、十分な信頼性をもっている。加えて今回は、観測領域中央部の4点(T07,T08,T12,T15)では差圧センサー(海洋研究開発機構の地球内部変動研究センターで開発・製造)の記録も試験的に取得することにした(図3)。圧力変

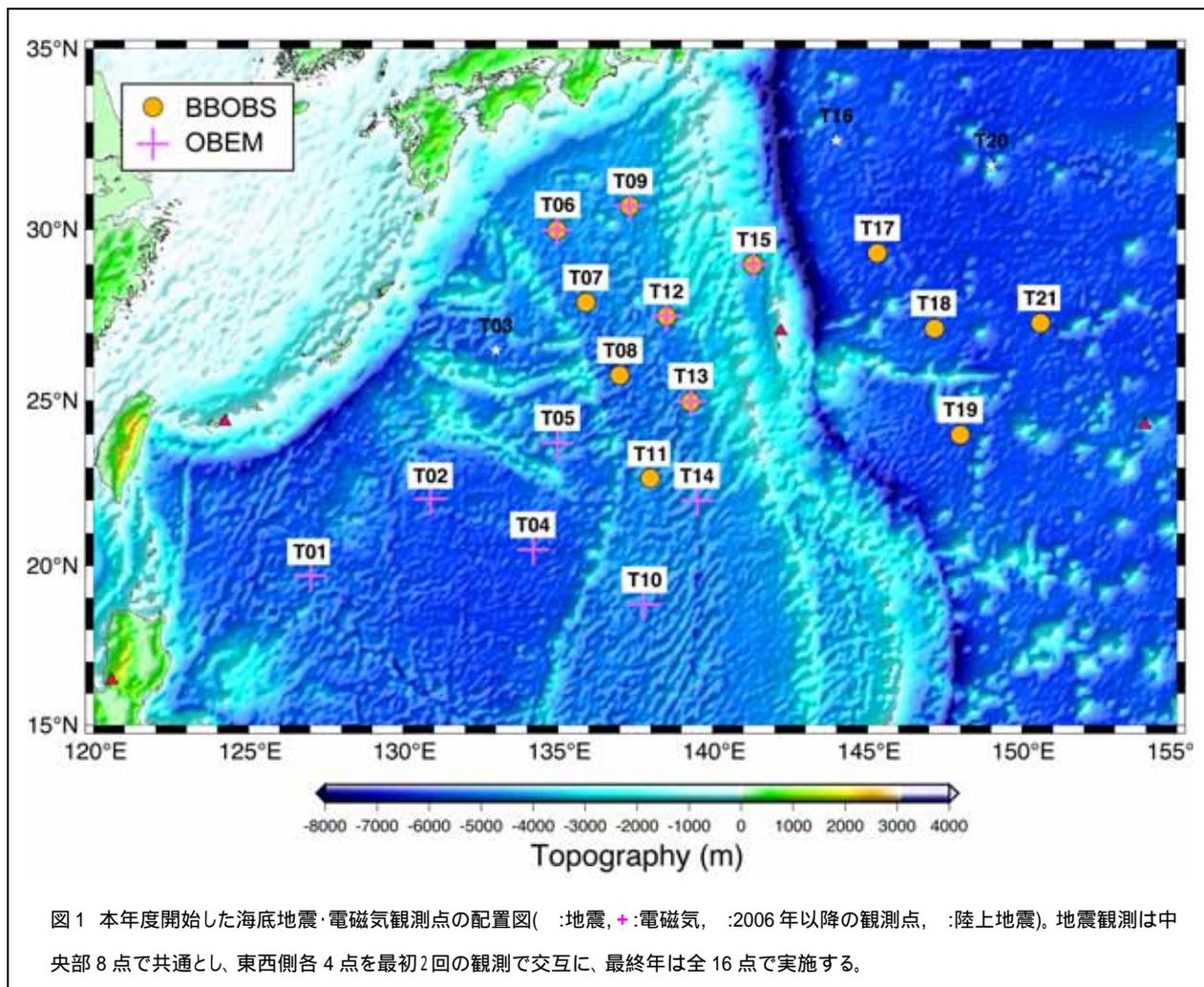




図2 広帯域海底地震計の外観、T09 に設置したもの。

動データを用いることで、地震計の上下動記録の改質・地殻構造情報の取得などが可能となり、より詳細なスタグナントスラブの実態把握へ近づくことが期待される。

その他、本年度は来年度の観測航海に向けての広帯域海底地震計の調達・深海調査研究課題の公募による研究船利用の確保などを行った。後者については既に採択内定を受け、2006年11月に研究船「かいらい」での航海を行えることとなっている。その際には各地震観測点でエアガン探査を機器回収前に行い、地殻浅部の速度構造を把握する予定である。これにより、深部構造を求める際の適切な走

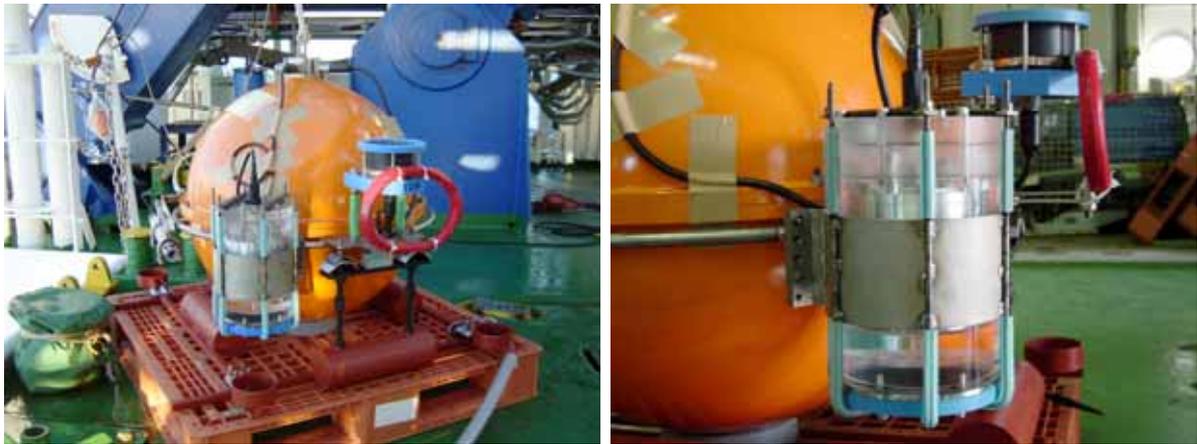


図3 差圧センサーを追加装備した広帯域海底地震計。左：全体像、右：差圧センサー部。

時補正が可能となる。

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

我々は、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を明らかにした。その結果は、観測点によっては観測期間が十分長くない場合があるなど、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、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、顕著な低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を示唆した(Fukao et al., 2004)。同様の高伝導度異常は、中国東北部の上部マントル最下部でも見出されている(Ichiki et al., 2005)。いずれの地域においても、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が一つの可能性として成り立つ。この点をさらに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(LOBEM)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を解明する。

2. これまでの経過と成果

2.1. 既存データの解析

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た。電気伝導度から水の含有量を一意的に決定することはもちろんできない。ここでは、地震波トモグラフィー(計画研究イの成果)と室内実験(計画研究力の成果)を用いることによって、水の分布を求めてみた。

Karato (1993) によれば、マントル鉱物中に水が存在する場合の電気伝導は水素原子の拡散によるものが主となり、電気伝導度は

$$\sigma = \frac{cD\rho^2}{kT} \quad (1)$$

で与えられる (D は結晶中の水素原子の拡散係数、 r は電荷、 k はブルツマン定数、 c は水素含有率である)。 (1) 式から、温度と拡散係数が与えられれば、電気伝導度異常を水素 (あるいは水) 存在量に変換することができる。結晶中の水の存在は P 波速度には影響が小さいことから、 P 波の異常は第一近似として温度異常によると仮定する。これにより得られる温度構造と、室内実験による拡散係数 D の測定値 (ここでは、Hae et al., 2005 による) を用いて求めたフィリピン海下の遷移層の水の分布を図1に示す。スタグナントスラブ直上の高伝導度異常は、およそ 0.3 wt% の水が存在することで説明できることがわかった (Koyama et al., 2005)。

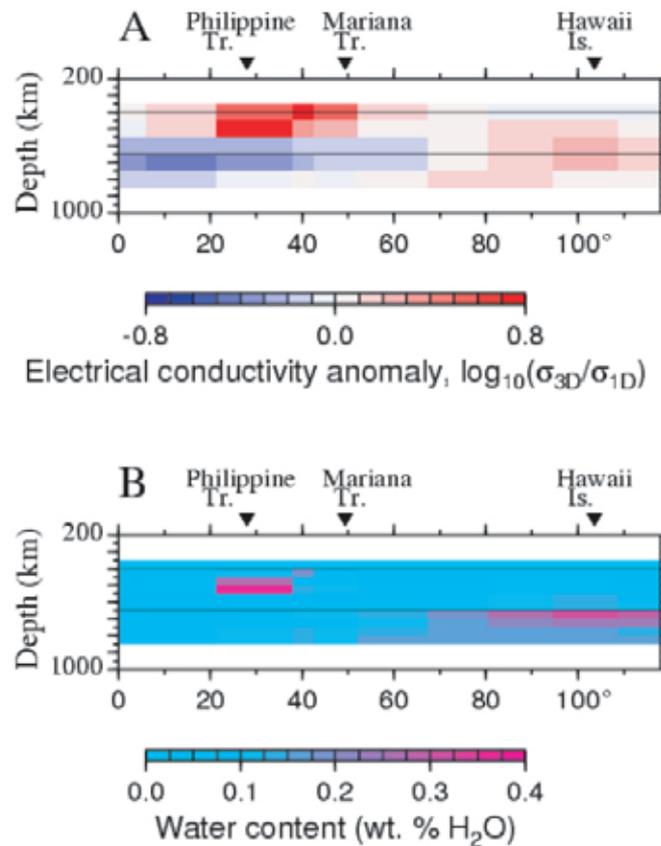


図1 ハワイーマリアナーフィリピンを通る測線で見ると電気伝導度異常の分布 (上) と、そこから求められた含水量 (鉱物中に含まれる水の重量% で表す) 分布 (下)。

同様の解析をヨーロッパにおいても行った。ヨーロッパの地磁気観測所のデータを用いて、遷移層の電気伝導度分布を求め、 P 波トモグラフィーと比較したところ、図2に示すように、スタグナントスラブの高

速度異常と低伝導度異常の間に(分解能の違いを除けば)よい対応が見られた。このことは、ヨーロッパの場合に沈み込むプレートが西太平洋に比べて若く、従って高温なため、スラブが遷移層まで水を運ぶことができないことを示しているのではないかと考えられる。

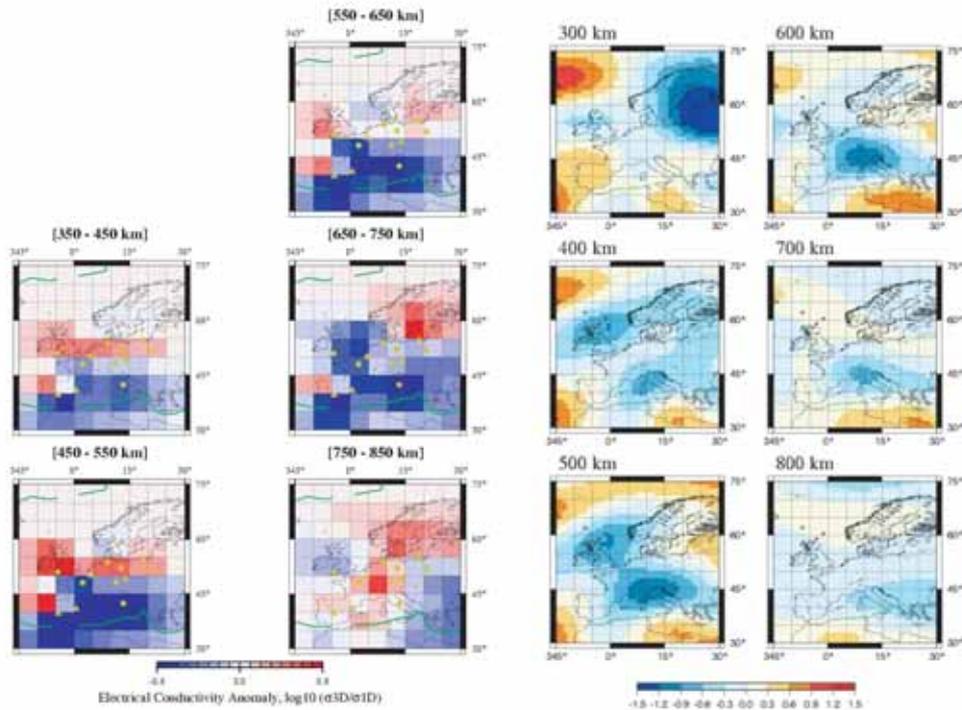


図2 ヨーロッパ下のマントルにおける電気伝導度異常(左)とP波速度異常の比較。

2.2. 海域機動観測の開始

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。平成17年10月には計画研究ウと共同で、海域機動観測の設置航海を実施した。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目指す。

10月5日(和歌山発)から10月26日(グアム着)まで、およそ3週間の航海で、11台のOBEMをフィリピン海に設置(図3)した。観測点の分布図は計画研究ウの報告を参照されたい。



図3 海洋研究開発機構の研究船「かいいい」の後部甲板における、フィリピン海の測点 T05 への海底電磁力計(OBEM)の設置作業の様子(馬場聖至撮影)。

3. 今後の展望

次年度の航海は平成18年11月に予定されている。この航海では、今年度設置した装置の回収と同様の装置の設置により長期観測を継続するだけでなく、公募研究からの提案を受けて西フィリピン海盆に十字形のアレイ観測を実施する予定である。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4年あまりになる。この間、この地域(海域)では新たな長期観測が数多く実施され、また既存の各観測点ではデータの蓄積がなされてきた。本計画研究班では、これらのデータのコンパイルを進め、次年度中に電磁気トモグラフィーを更新し、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. はじめに

本研究計画班では、SPring-8の大型高圧装置 SPEED-1500, SPEED-MkIIの主要ユーザーである、愛媛大学地球深部研(GRC)と岡山大学地球物質研(ISEI)を中心に研究者を組織している。本研究では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変化や物性精密測定をおこなう。またスラブが沈み込む場であるマントルの物質構成の詳細を明らかにするとともに、スラブの挙動を支配する密度変化やレオロジーの研究にも焦点をあて、スラブ滞留および沈降過程を物質科学的に検討することを目的としている。

本特定研究が開始されて1年あまりになるが、この期間は研究に必要なハードおよび研究支援体制を含むソフト面の整備をおこなうとともに、新しい実験技術の開発やその高度化を重要な課題とした。特に本研究において重要なツールである、SPring-8の高圧装置の高度化や維持管理体制の確立をおこない、研究の本格的遂行にむけての整備をおこなった。

このような研究環境と体制の整備と平行して研究班および個人での研究を遂行した。また、SPring-8においてGRCとISEIのメンバーによる共同実験をおこない、GRCの設備を用いた共同実験や分析をおこなうなど、班内の異なる研究機関の研究者の交流を積極的にすすめた。この結果、研究開始から比較的短期間にかかわらず、後に示すような様々な成果があがりはじめている。

2. 研究環境の整備

SPring-8の高圧地球科学ビームラインの高度化と維持管理に関して、高分解能 CCD カメラの導入をおこなった。導入されたカメラの分解能(2 ミクロン/ピクセル)は、現在高圧下で得られる世界最高解像度であり、これを用いた X 線透過像の解析により、試料変位長の計測を高精度でおこなえるようになった(図1)。これにより高圧相の弾性波速度測定や変形特性の解析において、従来より格段に精度の高い実験が可能になっている。

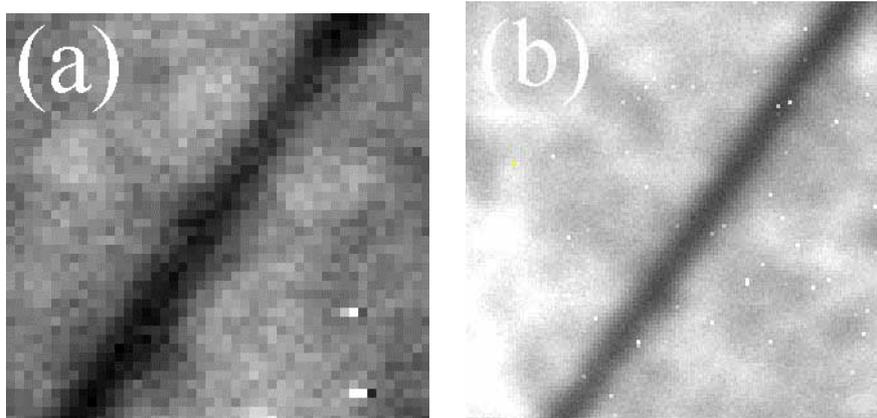


図1 従来のカメラを用いた高圧下試料部の CCD 画像 (図1(a))と、新規導入した超高解像度画像 (図1(b))の比較

SPring-8 の2台の大型マルチアンビル装置、特に SPEED-MkII の維持管理を本計画研究代表者が責任を持っておこなうことになり、第一段アンビル等の消耗品の供給や装置の維持・管理、また周辺測定装置の充実等をおこなっている。関連して博士研究員レベルの研究支援員を1名採用し、SPring-8 に常駐することによりこれらの業務を速やかにおこなえる体制を整えた。

一方、本計画研究の中心である愛媛大 GRC において、既存の FE-SEM に対して微小鉱物選択配向観察用の後方散乱 X 線解析装置 (EBSD) を導入し、高圧合成試料や変形試料の微細組織や選択配向の観察に使用している。この装置は国内外でも導入例は極めて少なく、広島大や岡山大の共同研究者が GRC を訪れて共同実験をおこなうなど、班内の異なる研究機関の研究者間の共同研究や研究交流にも重要な役割を果たしている。

3. 研究成果

1) 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 という高温高圧条件下での高圧相の弾性波速度精密測定をおこなった。特にマントル遷移層で最重要であるリングウツダイトに対して、良質焼結試料の合成をおこない、これらの弾性波速度を上記条件までの広い温度圧力条件までの測定に成功した (図2)。また、多成分系のメージャライト試料に対しても同様の実験をおこない、精度の高いデータを得ている。現在データの詳細を解析中であるが、この結果によりマントル遷移層の化学組成を制約する重要な成果が得られると期待される。

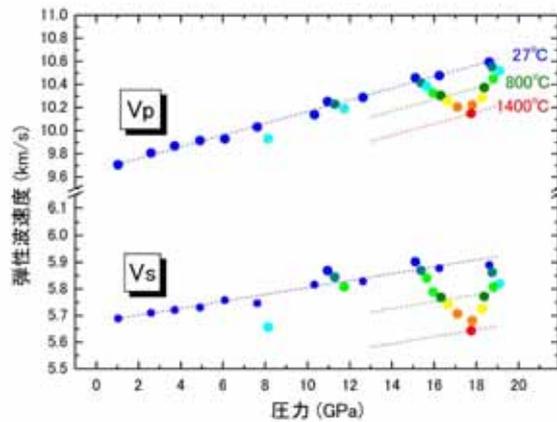


図2 高温高圧下での $(\text{Mg}_{0.9}\text{Fe}_{0.1})_2\text{SiO}_4$ リングウッドイトの弾性波速度変化

2) 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、マントル遷移層～下部マントル関連高圧相の相転移実験や P-V-T 関係、電気伝導度等の精密測定をおこなった。特に下部マントルでも最重要である MgSiO_3 ペロフスカイトの、高圧下での熱膨張率の精密決定を広範な温度圧力条件下でおこない、その圧力依存性が従来の結果に比べて2倍程度大きいことが明らかになった(図3)。また、沈み込むスラブ関連物質の相転移実験と P-V-T 測定実験をおこない、マントル遷移層で重要であると考えられる superhydrous phase B の圧縮率や、下部マントル上部条件下でのアルミナス相(カルシウムフェライト関連相)の安定性と圧縮率などを明らかにした。

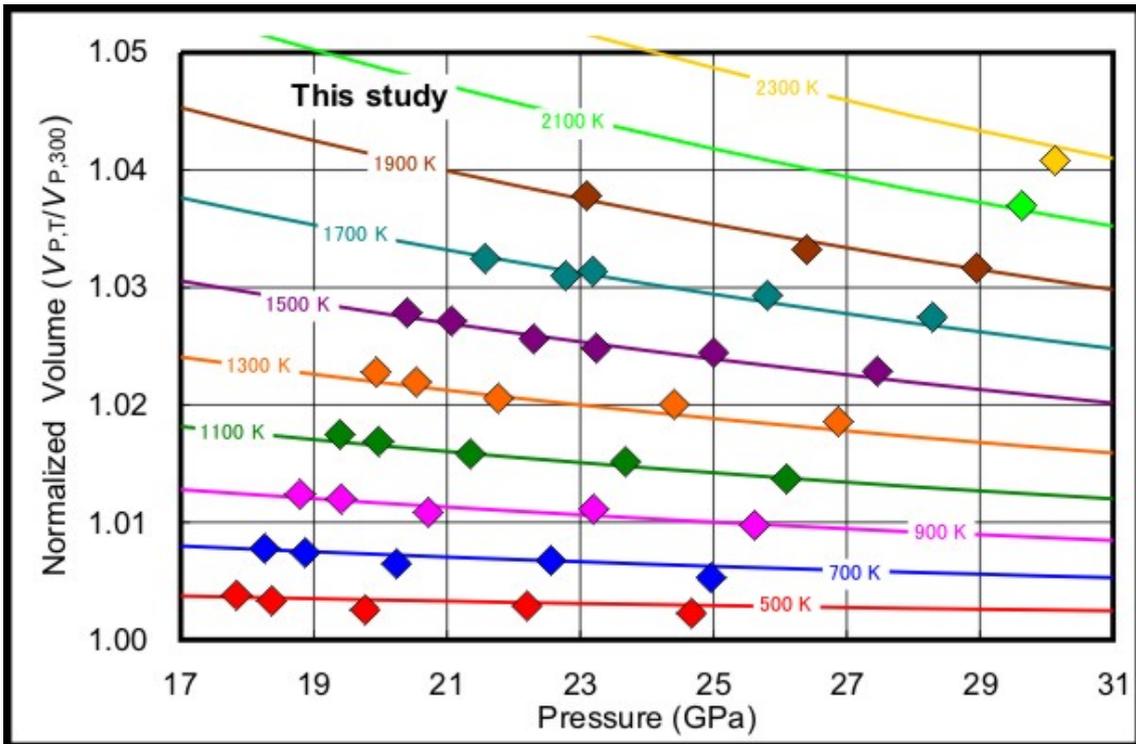


図3 MgSiO₃ペロフスカイトの格子体積の温度圧力依存性

一方で含水かんらん石の電気伝導度を、3GPa, 600-1000K の条件下で測定した。この条件では、含水かんらん石の電気伝導度は、無水かんらん石より有意に高いことが明らかになった。しかし、海洋底アセノスフェアの異方性の大きな高電気伝導度を説明するほどには高伝導度ではなく、また異方性も小さいことがわかった。

3) レオロジー

マントル遷移層でのスラブのレオロジーに制約を与えるために、高温高圧下でのリングウッダイトの結晶粒成長実験を行った(図4)。この結果、無水条件下ではリングウッダイトの粒成長が、かんらん石やウオズレアイトに比べて非常に遅いことが明らかになった。この結果、低温のスラブのほうが高温のスラブや周囲のマントル物質に比べて粘性がより低くなる可能性があり、スラブの滞留過程において重要であることがわかった。

また、相転移時におけるスラブの力学強度の変化とその支配メカニズムを解明する為に、改良 Griggs 型変形実験装置を用いた Ge かんらん石の変形実験を開始した。本年度は変形実験装置の基本性能の評価と使用する試料セルの開発を行ったが、この過程で稍深発地震の発生メカニズムに関する新しい知見が得られつつある。

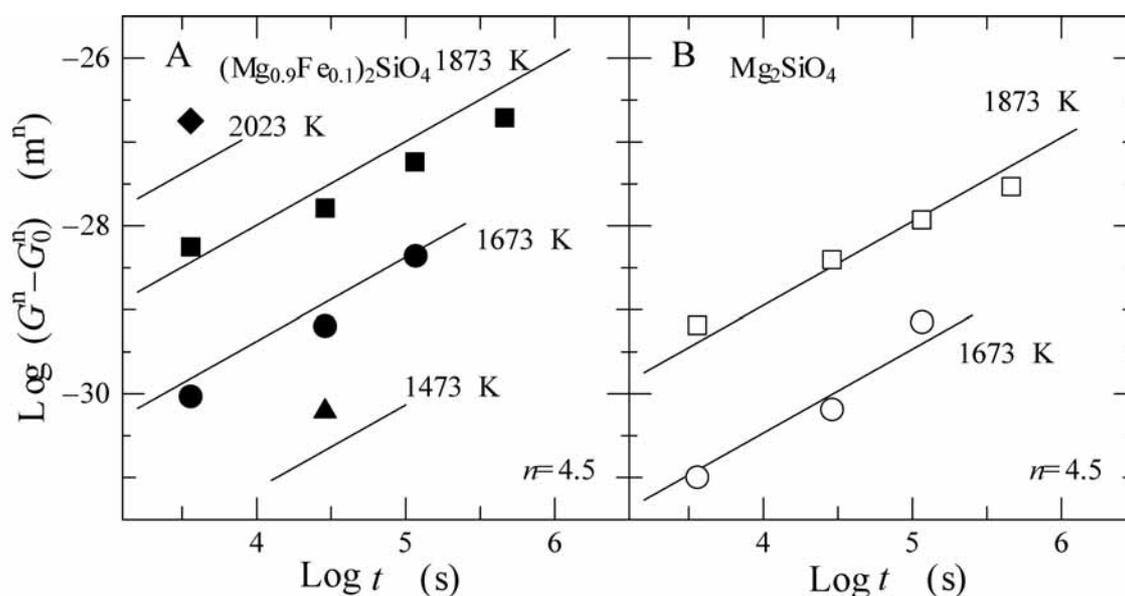


図4 リングウッドタイトの粒径の温度圧力依存性

4. 今後の計画

本計画研究の重要なツールである SPring-8 のマルチアンビルおよび関連装置の、ハードおよびソフト面の高度化を更にすすめる。特に、現在の白色X線の単色化に関して検討をすすめるとともに、X線回折測定の実験時間の大幅な短縮化と高効率化を目指す予定である。主要な研究の柱としては、以下のようにスラブおよびマントル関連鉱物の1)弾性波速度精密測定、2)相転移および密度・電気伝導度等精密、3)レオロジーに関する研究をすすめることには変わらない。

1) 弾性波速度精密測定

スラブやマントルの各構成鉱物に加えて、パイロライトや MORB 等の多成分系の焼結体に対するマントル遷移層条件下での弾性波速度精密測定をおこなうとともに、更に下部マントル領域に対応する温度圧力条件下での測定技術の開発をおこなう。また、大型高圧相単結晶合成技術の開発をおこない、弾性波速度測定を試みる。

2) 相転移および密度・電気伝導度等精密

X線その場観察や熱測定などに基づく、ポストスピネル転移のクラベイロン勾配の再検討をおこなう。また、含水鉱物の脱水分解反応カインティクスについても、放射光X線その場観察により検討し、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。また、引き続き含水鉱物の高温高圧下での電気伝導度等精密決定をおこなう。

3) レオロジー

Ge かんらん石の良質焼結体の合成をおこない、その変形実験をおこなう。また下部マントルでのスラブ構成物質、すなわち珪酸塩ペロプスカイトとフェロペリクレースの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。

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）

研究の目的

我々の研究グループは、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、これらの疑問を解決することを目的としている。この研究グループでは、このような問題を高圧高温実験にもとづいた物質科学的モデリングによって解明することを目指している。また、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を目指している。

具体的には、(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すること、また、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する。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研究目的としている。そこには準安定な鉱物が存在するのか否か、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。

本研究グループの1年目の成果

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。1年目の成

果は以下のようなものである。

1、東北大などの成果

今年度は、東北大を中心とするグループでは、揮発性元素、特に水の振る舞いに焦点をあてて、マントル遷移層と核マントル境界における物性の解明を中心課題として研究を行った。具体的には(1)マントル遷移層におけるポストスピネル転移、ポストガーネット転移に対する水の影響の解明、(2)マントル遷移層鉱物中の水素拡散の解明、(3)含水マグマの密度とマントル内部での重力的安定性の研究、(4)核マントル境界におけるポストペロブスカイト相と金属鉄の相互作用の解明を行った。

(1) マントル遷移層における相転移に対する水の影響

放射光施設 SPring-8 の BL04B1 ビームラインに設置されているマルチアンビル高圧装置 SPEED-1500 及び SPEED-MkII を用いてマントル遷移層に存在する一連の相転移境界に対する水の影響を、高温高圧 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、現在までに水の影響が明らかになったのは Ringwoodite の分解境界 (post-spinel 転移境界) 及び Garnet の perovskite への相転移境界 (post-garnet 転移境界) である。図 1 に Pyrolite 組成についての無水と含水 (2 wt.%) の post-spinel 相転移境界の測定結果を示す。この図から明らかのように、無水の相境界は約 0.5 MPa/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。また、2 wt.% の水を含む系の相境界は、無水に比べて大きく約 2 MPa/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り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、含水量に依存する可能性がある。

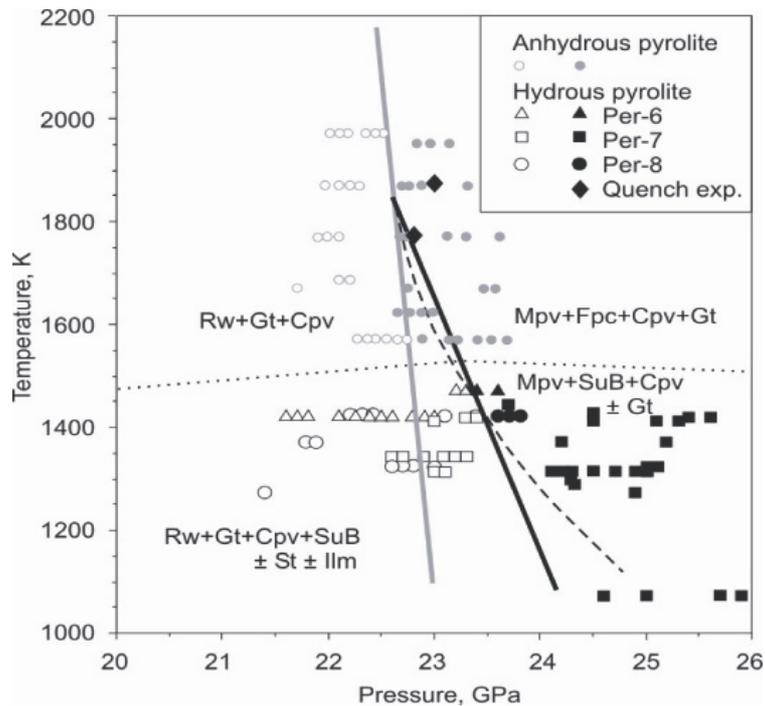


図1、高温高压 X 線その場観察実験による無水および含水（2wt.% H₂O）条件での post-spinel 転移境界の測定結果。

図2には、マントル遷移層と下部マントルに存在する相転移境界への水（2wt.%H₂O）の影響をまとめたものである。Olivine-wadsleyite, wadsleyite-ringwoodite 転移境界の移動に関しては、未だ予備的実験結果であるが、この図にまとめて示してある。図から明らかのように、海洋底玄武岩（MORB）組成において、最も重要な相転移は post-garnet 転移である post-garnet 転移は正の勾配をもつことが知られている。このため、無水条件でも 24GPa, 1000 K の条件で post-spinel 転移境界と post-garnet 転移境界が交差し、1000K よりも高温では玄武岩層と橄欖岩層に密度逆転が存在する（図2の A）。一方含水（2wt.% H₂O）では、post-garnet 転移の圧力は約 1.5~2GPa 低圧に移動し、相境界の交差はさらに高温になり、23 GPa, 1400K（図2の B）程度となる。図2の A 及び B 点よりも低温の条件では、密度逆転が存在しない。すなわち、低温のスラブ内部では密度逆転が存在しない可能性がある。図3は、通常の沈み込みの温度条件で MORB 層と橄欖岩層の密度逆転は無水条件では存在するのに対して、2wt.%の水を含む系では post-garnet 転移が低圧側に移動するために、沈み込むスラブ内部では密度逆転が起りにくいことを示している。このように、水の存在は、プレートの沈み込みにともなう海洋地殻と橄欖岩のスラブ本体のダイナミクスに大きい影響を与えることが明らかになった。上記の研究成果に関連する発表論文を以下にまとめる。

1. Litasov, K., and Ohtani, E., Stability of hydrous phases in CMAS-pyrolite-H₂O system up to 25 GPa. *Phys. Chem. Mineral.*, 30: 147-156, 2003.
2. Litasov, K. and Ohtani, E., Hydrous lower mantle: The water source for wet plumes, 8th International Kimberlite Conference long abstract, 2004.
3. Litasov, K.D., Ohtani, E., Suzuki, A., Kawazoe, T., Funakoshi, K., Absence of density crossover between basalt and peridotite in the cold slabs passing through 660 km discontinuity, *Geophys. Res. Lett.*, 31, L24607, doi:10.1029/2004GL21306, 2004.
4. Litasov, K.D. and Ohtani, E., Phase relation in hydrous MORB at 18-28 GPa: Implications for heterogeneity of the lower mantle. *Phys. Earth Planet. Inter.*, 150, 239-263, 2005.
5. Litasov, K.D., Ohtani, E., Suzuki, A., Kawazoe, T., Funakoshi, K., Absence of density crossover between basalt and peridotite in the cold slabs passing through 660 km discontinuity, *Geophysical Research Letters*, 2004GL021306R in press, 2005.
6. Litasov, K.D., E. Ohtani, A. Sano, A. Suzuki, and K. Funakoshi (2005a) *In situ* X-ray diffraction study of post-spinel transformation in a peridotite mantle: Implication to the 660-km discontinuity, *Earth Planet. Sci. Lett.* (in press).
7. Litasov, K.D. E. Ohtani, A. Sano, A. Suzuki, and K. Funakoshi (2005b) Wet subduction versus cold subduction, *Geophys. Res. Lett.*, 32, L13312, doi:10.1029/2005GL022921.

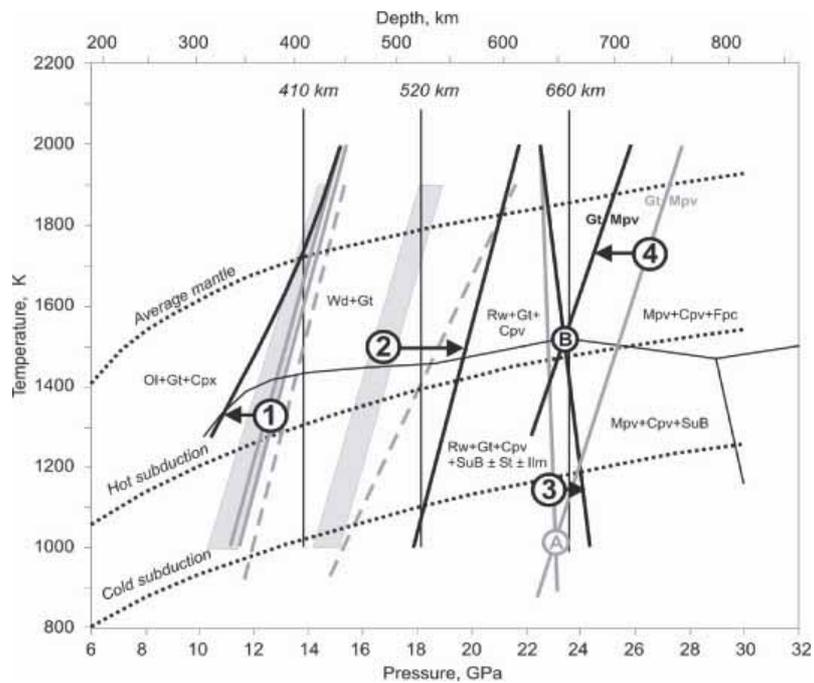


図2、マントル遷移層の様々な相転移境界に対する水の影響(2wt.% H₂O)。

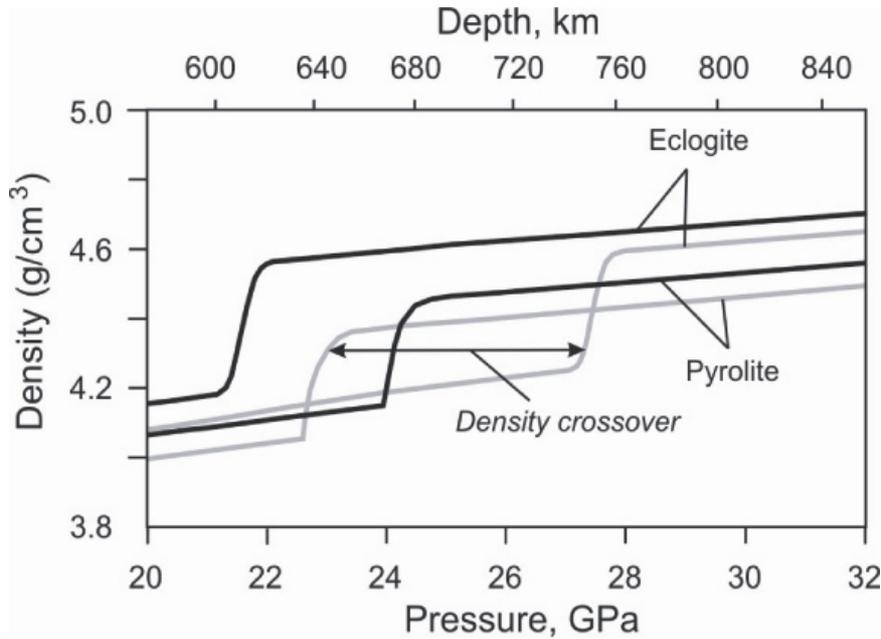


図 3、含水及び無水条件における玄武岩地殻と橄欖岩層の密度関係。黒い実線は含水（2 wt.%H₂O）、灰色の実線は無水条件の密度変化。含水条件では密度逆転が存在しない。

（ 2 ） マントル遷移層の鉱物中の水素拡散

マントル遷移層を構成する多結晶体の wadsleyite 中の水素の拡散係数を測定した。測定には顕微 FTIR 分光装置を用いて行った。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。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 において、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。

水素の拡散係数と電気伝導度は Nernst-Einstein の関係式 ($\sigma = Dc q^2 / kT$) で表される。この関係を適用すると、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 0.3-0.5 wt.% の含水量の場所も存在することが明らかになっている。

（ 3 ） 含水マグマの密度とマントル内部での重力的安定性

無水条件の玄武岩マグマの密度は、ダイヤモンド結晶の浮沈法を用いて決定されている (Ohtani and Maeda, 2001)。これによると上部マントル最下部において周りのマグマとの間で密度の逆転が存在し、マグマが滞留する可能性がある。マントルを上昇するホットブルームは不均質であり、沈み込んだ海洋地殻を代表する玄武岩成分を含んでいる可能性がある (Takahashi et al., 1998)。しかしながら、無水の玄武岩の融点は上部マントル最下

部では 2000 以上の高温であり、現在のマンツルの深部を上昇するホットブルームにおいて無水の玄武岩成分が融解する可能性は低い。一方、水は融点を低下させ、マンツル内部を上昇するブルーム内部の温度においても、マグマを生じさせることができる。含水のブルーム内部で生じたマグマの重力的安定性を議論するためには、含水マグマの密度を見積もることが重要である。

高圧におけるマグマの密度測定については、東北大学で開発されたダイヤモンド浮沈法が確立している。上部マンツルにおける無水の玄武岩マグマの密度は、この方法を用いて、Ohtani and Maeda (2001) によって決定されている。本研究では、含水マグマの密度測定を、ダイヤモンド浮沈法を用いて、含水量 2wt% 及び 8wt% の玄武岩マグマについて試み、高温高圧下でのマグマ中の水の部分モル体積を推定した。今回の密度測定実験に用いた出発物質は MORB (海洋底玄武岩) 組成に 8 wt.% 水を加えた組成である。MORB の組成は無水の玄武岩マグマの密度測定に用いたものと同様のもの (Ohtani and Maeda, 2001) 、その組成は SiO_2 47.66wt.%, Al_2O_3 14.67, FeO 9.17, MgO 7.23, CaO 10.75, Na_2O 2.50, H_2O 8.0 である。

今回の実験 (Sakamaki et al., Nature 2005) によると、8 wt% 水を含む玄武岩マグマは約 20GPa、2200 でダイヤモンドの密度と等しくなる。低圧では、ダイヤモンドはメルト中を沈降する。このことから、この含水メルトの密度は $3.59\text{g}/\text{cm}^3$ と推定することができる。この値から、この温度圧力のもとでの水の部分モル体積をもとめると、 $7.82\text{cm}^3/\text{mol}$ となる。この水の部分モル体積を用いて、高温高圧における、含水メルトの密度を推定することが可能になる。

8wt% 程度水が溶け込むとマグマが軽くなり、上部マンツル下部では密度の逆転が消滅する。すなわち、水が 8wt% を含む玄武岩マグマは上部マンツル最下部では重力的に不安定である。得られたマグマ中の水の部分モル体積を用いて 1650 における 8%、4%、0% の含水量の玄武岩マグマの密度を図 4 に示した。比較のためにマンツルの平均的な地震波モデルである PREM (Dziewonski and Anderson, 1981) も示した。この図から明らかのように、無水のマグマについては上部マンツル最下部に密度逆転が存在し、5.3wt% までの水が存在するマグマは重力的に安定である。以上から上部マンツル最下部においては、含水マグマは重力的に安定となること。上部マンツル最下部における含水マグマの存在を模式的に図 5 に示す。

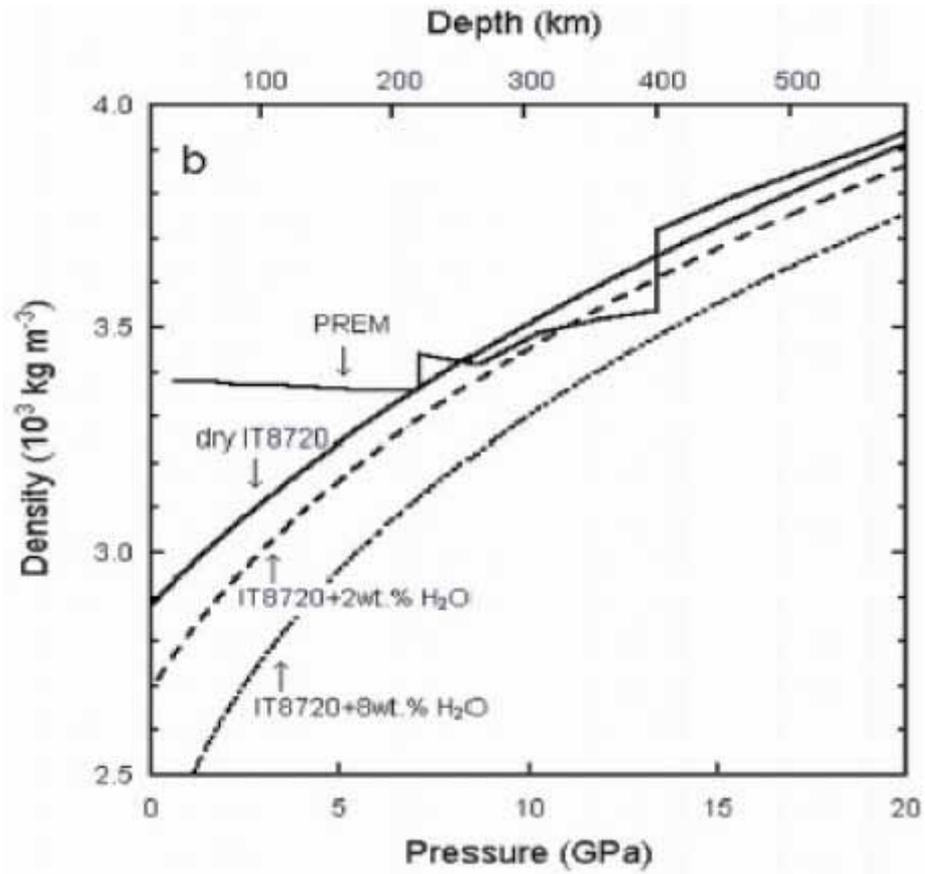


図4、含水量2%、8%のマグマの密度。マントルに密度 (PREM) も図示した。

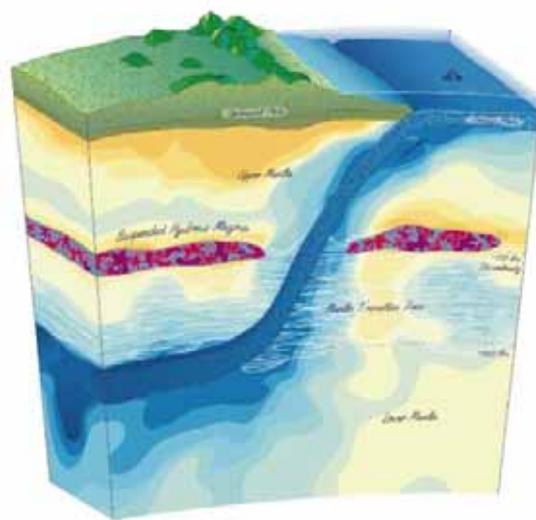


図5、上部マントル最下部の含水マグマの集積モデル。

(4) 核・マントル境界におけるポストペロブスカイトと金属鉄の相互作用の解明

我々は下部マントルを構成する最も重要な鉱物であるペロブスカイト相と核マントル境界に存在が予想されているポストペロブスカイト相と金属鉄との反応様式を解明するための実験を行った。実験は2種の方法を用いた。第一はマルチアンビルを用いる方法である。この方法では、27GPaで様々な温度と酸素分圧の条件で、金属鉄とペロブスカイト相の反応様式、すなわち金属鉄中へのSi, Oの溶解度を明らかにした。両方の元素の溶解度は、温度の上昇とともに急激に増加する。一方、酸素分圧の増加とともに、Siの金属鉄への溶解度は減少し、Oの溶解量は増加することが明らかになった。

第二の方法は、レーザー加熱用ダイヤモンドアンビルセル(LH-DAC)を用いるものである。実験は核・マントル境界の条件である139GPa, 3000Kの条件を実現し金属鉄 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圧のもとでPFの放射光を用いて行い、post-perovskiteであることを確認した。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18.3 atm% (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。濡れ角は67度であり、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。これは、D''層における不均質性の原因の一つになっているかもしれない。

2、東京工業大学など(廣瀬 敬グループ)の成果

今年度東工大のグループを中心に、(1)ポストペロブスカイト相転移の化学組成依存性、(2)ABO₃組成のポストペロブスカイト相、(3)超高压高温の発生に関する技術開発とシリカの立方晶相の合成、(4)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、などを行った。

(1) ポストペロブスカイト相転移の化学組成依存性

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、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が、化学組成の効果も考慮に入れる必要がある。50km以下のスケールで場所ごとに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調べる目的で、MgSiO₃ 端成分に加えて、(Mg_{0.9}Fe_{0.1})₂SiO₄、(Mg_{0.5}Fe_{0.5})SiO₃、Mg₃Al₂Si₃O₁₂、パイロライト的マントル組成(KLB-1カンラン岩)およびMORB組成について実験を行った。このうち実験圧力を見

積もるための圧力マーカーを金に統一して行った実験につき、結果を図6に示す。

結果を見ると、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、MgSiO₃ 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。ここに示した相転移の圧力の絶対値は、D"不連続の深さに比べてかなり小さい。これは金スケールの問題と考えられる。実際金と同時に測定したMgOからは、相転移圧が119GPa@2500Kと、D"不連続の深さに一致した結果が得られた。

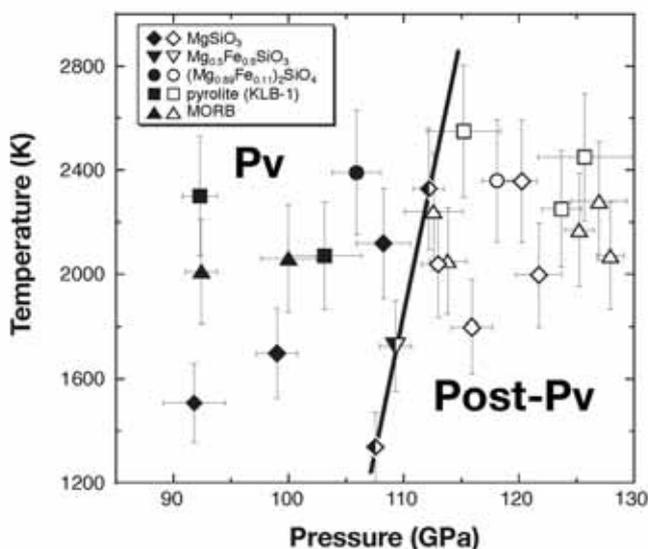


図6、ポストペロブスカイト転移境界の温度圧力依存性。

(2) ABO₃ 組成のポストペロブスカイト相

ABO₃ 組成をもつきわめて数多くの物質がペロブスカイト構造をとることがよく知られている。ポストペロブスカイトの場合はどうだろうか？我々のグループでは、titanate と germanate を中心にペロブスカイトの高圧下における構造変化とポストペロブスカイト相転移について調べた。

その結果、MgSiO₃ の他、MgGeO₃、MnGeO₃、CaIrO₃ において、ペロブスカイト構造からポストペロブスカイトへの転移が観察された。これらポストペロブスカイト転移が認められた化学組成のペロブスカイトは、どれも圧力によって構造の歪みが大きく増加して

いくことがわかった。逆に CdGeO₃ ペロブスカイトは圧力とともに対称性が上がっていく。このようなペロブスカイトはポストペロブスカイトへの転移を起こさなかった。

(3) 超高压高温の発生に関する技術開発とシリカの立方晶相の合成

地球深部に相当する超高压と高温の発生はその実験的に研究に不可欠な技術である。我々は地球中心に相当する超高压と高温の発生を目指した技術開発を進めている。現在までのところ、320GPa・2000K 以上の発生とその場 X 線観察に成功している。また高压発生技術の進歩に合わせて、SiO₂ (シリカ) 相の相転移の実験を行ってきた。その様子を図 7 に示す。

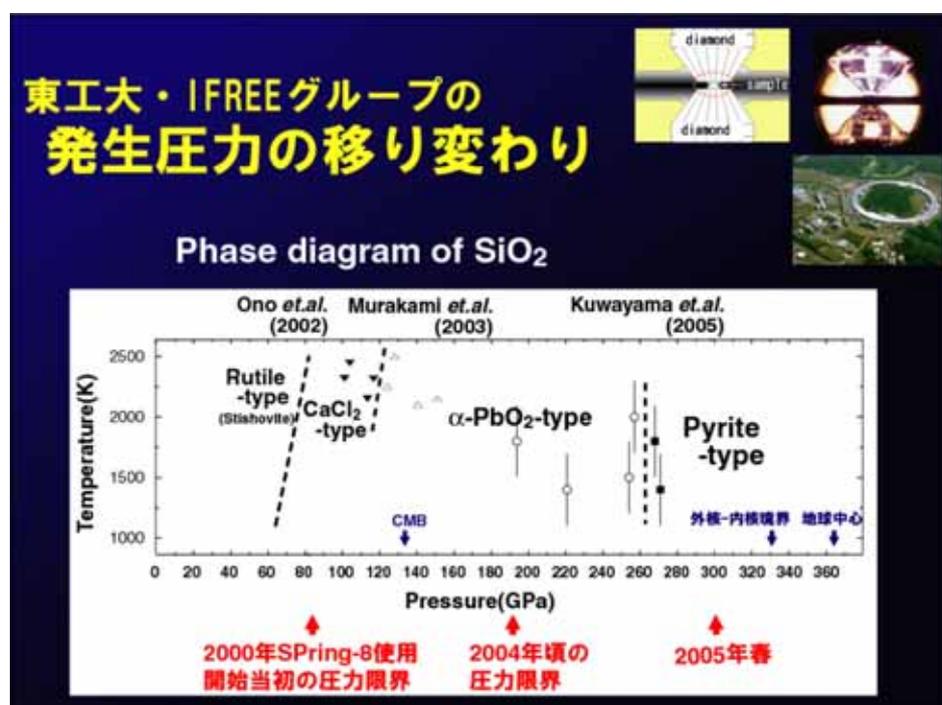


図 7、東工大 IFREE グループの発生圧力の移り変わり。

今年度は 270GPa・2000K 以上において、パイライト（黄鉄鉱）型と呼ばれるシリカの立方晶を世界ではじめて合成に成功した。パイライト型のシリカは、1988 年にすでに理論的に予測されていた。最近の理論計算の結果では相転移圧が 200GPa とされていた。200GPa を大きく超える超高压下でのレーザー加熱実験はこの研究がはじめてである。このような超高压下における高温実験は過去に抵抗加熱式による鉄の実験が一例あるのみであった。本実験では、パイライト型への相転移に伴い、Si の配位数が 6 から 6+2 へ増加することによって、密度が約 5 % も増加することがわかった。

パイライト型のシリカの安定な圧力は地球のマントルのそれをはるかに超えており、地

球内部にはこの新鉱物は存在し得ない。しかしシリカは太陽系全体の主要組成であり、天王星や海王星といった地球より大きな惑星の岩石コア中に含まれている可能性がある。

(4) 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

我々のグループは、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。今年度は東工大の村上がイリノイ大学との共同研究によって MgSiO₃ ペロブスカイトおよびポストペロブ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することに成功した。

また東工大にもブルリアン散乱測定システムを今年度設置した。今年度は室温高压の測定を行う予定である。また来年度前半にスプリングエイトにビームライン BL10XU へ移設し、後半から高压高温下の X 線回折とブルリアン散乱の同時測定を開始する予定である。

今後の研究・実験の準備状況

本研究課題の遂行には下部マントル全域にわたる圧力・温度を制御よく発生することが必須である。さらにスラブの密度を決定するには、高压高温下その場における X 線回折データと、回収した実験合成物の微量領域分析によって化学組成を明らかにする必要がある。本研究班では、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、すでにコアの圧力・温度に相当する室温で 300GPa 以上、140GPa・3000 K における X 線回折データの取得に成功し、出現する高压相の結晶構造を特定している。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にも実績がある。また高压高温下におけるブリュアン散乱測定にも、これまで培ってきた高压高温発生技術を有効に活かすことができる。この場合、レーザー加熱法のみならず、抵抗加熱法も極めて有用であり、抵抗加熱法の技術開発を進めている。

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、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の高压相転移反応速度とそれへの水の影響、元素の拡散過程を解明し、含水マグマの密度と粘性などの諸物性を明らかにする。核マントル境界にいたる広い圧力領域において、高温高压 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、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、ペロブスカイト相など下部マントル高压鉱物の弾性定数の測定を行う。

現在、高圧鉱物中の水素の拡散速度を明らかにし、これらの鉱物中の電気伝導度に対する水素（水）の影響を解明する。また、スラブで生じる様々な低温準安定相を明らかにし、それらの相転移速度を決定する。スプリングエイトにおいて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。スラブ物質の密度決定や、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。また、水を含むマグマの密度、粘性などの物性を下部マントルの条件で明らかにする。また、ブリュアン散乱法を用いた弾性定数の測定を検討する。これまで培ってきた超高压発生の技術を活かし、下部マントル条件での弾性定数の直接測定を目指す。

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

初年度の成果と今後の展望

浜野洋三（東大大学院理学系研究科）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シミュレータセンター）

我々のグループでは、地球内部の熱・物質輸送と地球進化過程を解明すべく現在の地球の状態を重視した（１）プレート沈み込みに伴う水輸送と島弧活動の研究と、過去に起こった様々な地質現象を重視した（２）地球変動にみられる長周期変動の起源の研究を行っている。それぞれの課題について初年度の成果と今後の展望について報告する。

（１）プレート沈み込みに伴う水輸送と島弧活動の研究

地球表層付近の水は、プレートの沈み込みに伴って地球内部に持ち込まれ、地球内部の物性やダイナミクスに大きな影響を及ぼすと考えられるが、その詳細は不明である。本研究では、地球内部での水輸送のモデリングの基礎となる水和したマントル岩石の相平衡および最大含水量のモデル化・パラメータ化を行った。最大含水量（飽和量）は、沈み込むプレートが、その温度・圧力・化学組成条件で水溶液を脱水・遊離するかどうか、またその周囲のマントルが吐き出されてきた水溶液をどの程度の量吸収するのかを評価する基準となる。また、地球内部の水の潜在的蓄水量を評価する上でも基礎となる。高圧実験結果、熱力学的解析およびマスバランスを用いて求めた各圧力・温度（約 30GPa, 摂氏 2500 度まで）のメルトを含む相平衡関係と最大含水量を図 1 に示す。主要な含水鉱物は、約 6GPa までは摂氏 600 度以下、約 10GPa 以上では摂氏 1200 度以下で安定である。後者では、15 重量%を超える最大含水量となり、1200 度以上でも数%の水を含みうる。

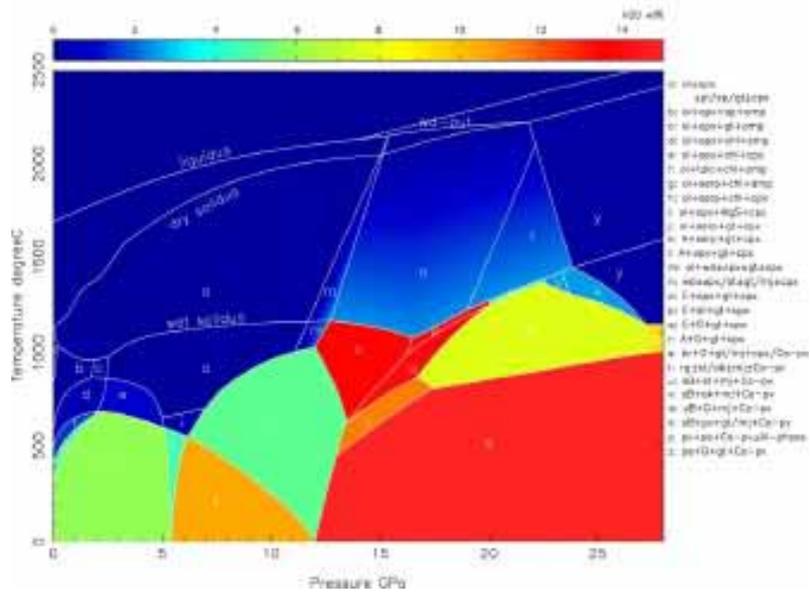


図1 H₂O に飽和したカンラン岩の相平衡図と最大含水量。右端は、各温度・圧力領域の主要な相組み合わせを示す。

この相平衡図を用いて、沈み込むプレートの温度構造・速度がその運びうる最大 H₂O 量に与える影響を評価した。図2は、沈み込み帯の温度構造を、沈み込むプレートの年齢と速度の関数として計算し、図1で得られた最大含水量に基づいて、沈み込み帯の温度・圧力分布に対応した潜在的蓄水量の分布を示したものである。

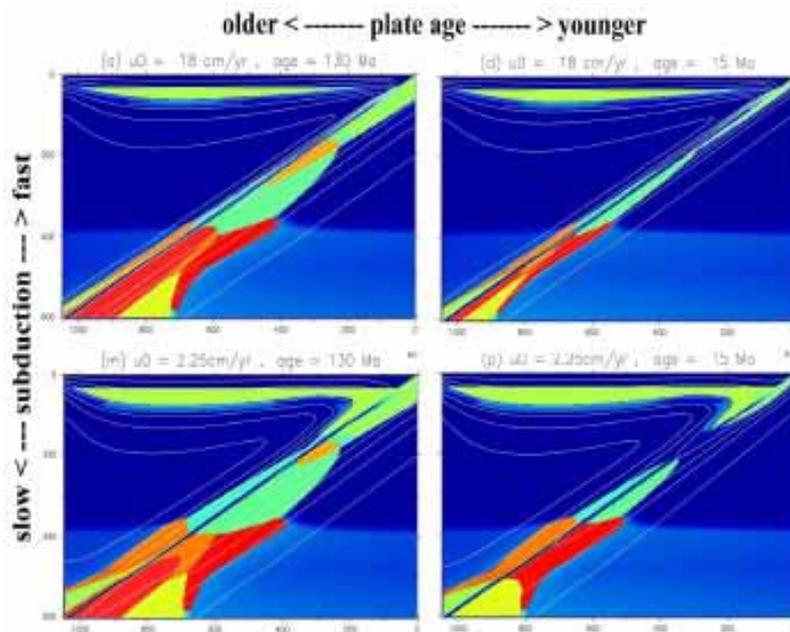


図2 沈み込み帯(深さ600kmまで)の温度構造と対応する最大含水量。沈み込むプレートの年齢と速度の関数として示されている。

この計算には、沈み込む過程の脱水反応や脱水後の水溶液の移動と化学反応はまったく入っていないが、プレートの年齢が若い場合には、沈み込みの過程で主要な含水鉱物の安定領域が途切れることが分かる。これは、図1中の約6GPaにおける主要含水鉱物の安定上限温度が最小となる点（`choke point [Kawamoto et al., 1996]として知られる）に対応する。この沈み込みに伴うフィルタリングによって、マントル遷移層以深に持ち込み得る水の量が制限されることが予想される。今後、脱水反応と水の移動を考慮した場合、水の輸送量が沈み込みの条件によりどのように変化するかを調べる必要がある。

沈み込みスラブからマントルウエッジに水が供給された場合、マントルウエッジの粘性が局所的に減少する可能性がある（図3）。その結果、どのような地学現象が期待出来るかを調べ、沈み込み帯近傍における水の分布を間接的に推定している。前年度はこの考えをもとにして、数値モデルを作成し、そのモデルを東北日本にあてはめ、その地域のトモグラフィーの特徴と火山活動の時空間分布を少なくとも定性的に説明する事に成功した[Honda and Yoshida, 2005]。今年度は、このモデルを用いて伊豆 ボニン弧の北側に存在する雁行上の海山列（図4）の特徴を説明する試みを行った。海山列の特徴は（1）沈み込み帯の走向に対して雁行している（2）現在は、海山列での活動はない（3）全体としての火成活動は背弧側から島弧に向かって進行しているなどである。（1）の沈み込みの走向に対して雁行になっている事を説明するために、スラブが斜めに沈み込んでいる場合の小規模対流の特徴を調べた。その結果、ロール（小規模対流）の軸は沈み込み帯の走向に対し、垂直になる事がわかった（図5A）。つまり、海山列の起源が東北のホットフィンガーと同じくロール状の対流であるとするると雁行状の海山列は単純には説明できない事になる。もし、これをロール状の対流起源で説明しようとするると（1）昔の沈み込み帯の走向は現在のそれと違っていた（2）雁行は、海山列が出来たのちの変形によって生じた、のいずれかであろう。我々は、この2つの可能性のうち2番目の可能性が高いと考える。この海山列形成後の雁行形成という考えは青池 [2003] によっても指摘されている。

現在、海山列で火山活動がない事を説明するためにスラブの角度を変えて小規模対流が起こった場合、どのようなパターンになるかを調べた（図5B）。その結果、スラブの角度を変化させると、ロールは消滅する事が分かった。従って、伊豆 ボニンの北部では、過去には沈み込み角度が低角であったものが、高角になったとすれば海山列の火成活動が説明できる。この考えは van der Hilst and Seno [2003] が伊豆とマリアナの沈み込み角度の違いを660kmの相変化とスラブの相互作用で説明したシナリオと整合的である。

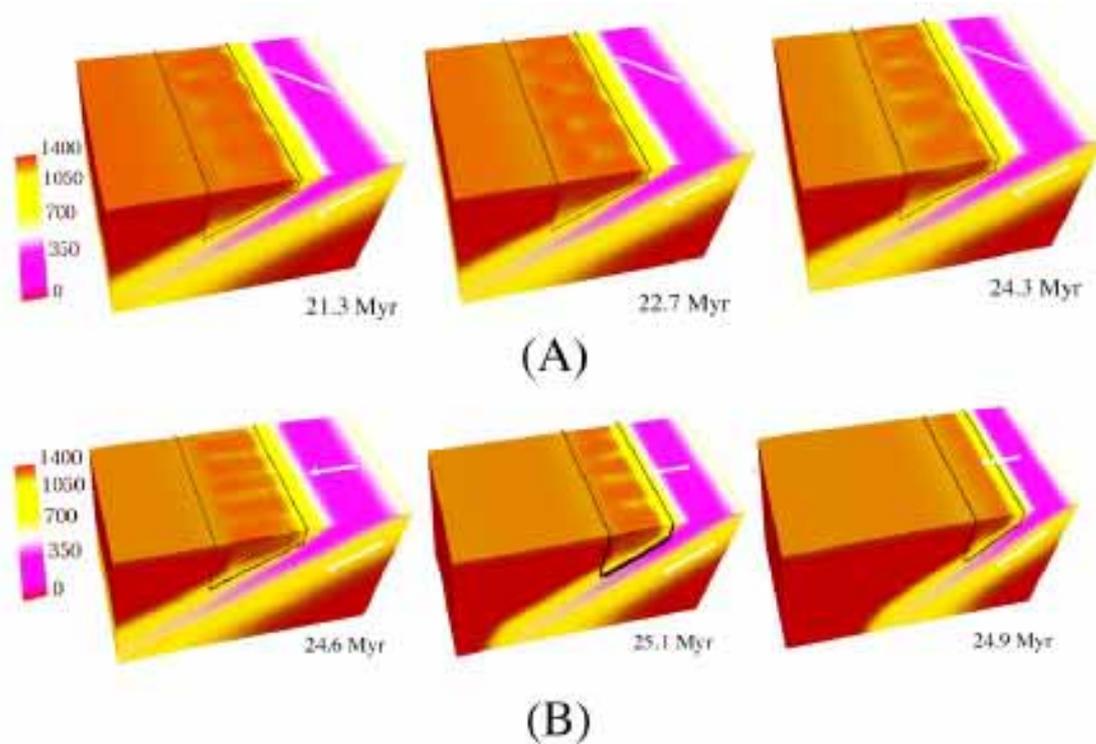


図5 沈み込み帯の温度構造。上面は深さ60 kmにおける温度を示す。矢印はプレート速度の水平面と垂直面への投影を示す。図中の黒い線は、低粘性の部分を表す。(A)はスラブが斜めに沈み込む場合を表している。年代は計算を始めてからの時間を示している。(B)はスラブの沈み込み角度を変えた場合を示す(左から30度、37.5度、45度の結果である)。

(2) 地球変動にみられる長周期変動の起源の研究

長周期の変動として、火成活動や海洋プレートの拡大が活発だった白亜紀中期を中心とする過去2億年の変動に注目し、対流運動に自発的に起こる自励振動(リズム)として、1)火成活動を伴うマンテル対流の2次元数値シミュレーションによる地球進化モデル、2)3次元地球殻マンテル対流の数値シミュレーション、の2つのアプローチによって、このような変動のリズムを生じるパラメータ領域を調べた。

1) 火成活動を伴う地球進化モデルのリズム

様々なマンテル内部熱源の強さのもとで、プレート運動を含むマンテル対流と火成活動結合系の数値シミュレーションを系統的に行うことにより、図6で火成対流相と示した条件のもとでマンテルは化学的に成層し、特に図7に示したようなスーパーブルームが下部マンテル深部に発達することを確かめた。このスーパーブルームは、海嶺火山により形成

された海洋地殻が、沈み込みの後プレートから分離し、コア・マントル境界上に蓄積したことにより生まれたもので、その強い内部加熱のため周りのマントルより 500~1000 度ほど高温となる。スーパーブルームからは、ときおり図 7 に示したようにブルームが上昇し、ホットスポット火山活動を引き起こす。さらに、このブルームは、十分高温のときには図 2 の 6.18~6.23Gyr のスナップショットに見られるようにプレートを割り、新たなプレート境界を生成する。

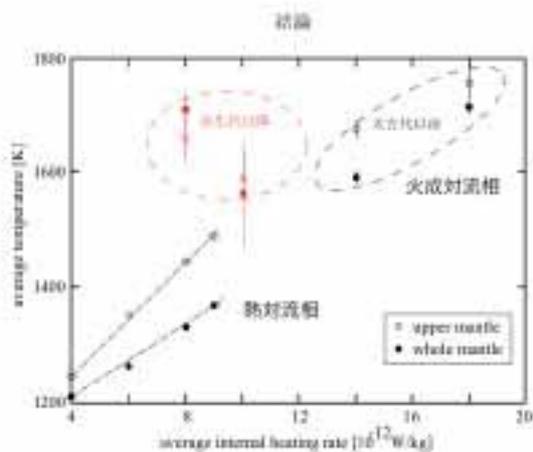


図 6 内部熱源量による対流モードの変化を、マントル全体及び上部マントルの平均温度で示す。赤で示す部分でスーパーブルームやプレート活動度が大きな時間的揺らぎを示す。

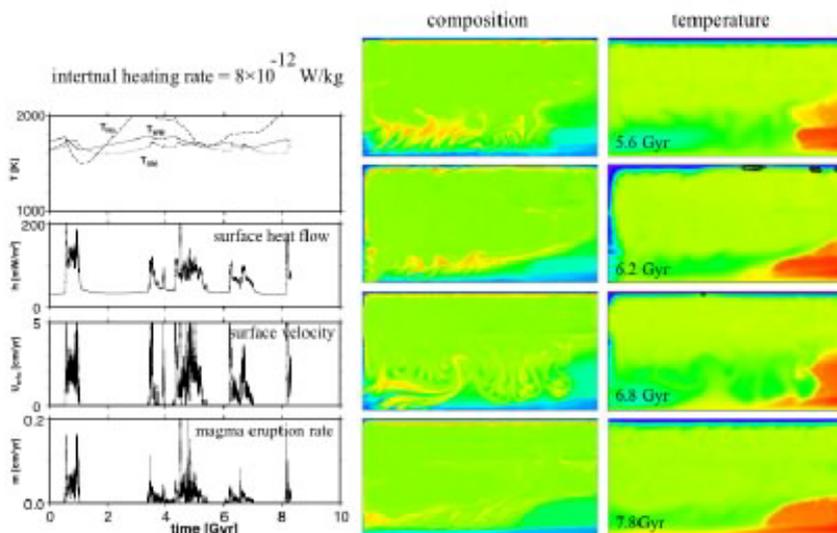


図 7 内部熱源が 8×10^{-12} W/kg の場合の、温度、表面熱流量、表面速度、マグマ噴出率の時間変化（左）とスナップショット（右）。

このスーパーブルームから立ち上るブルームの発生頻度は、内部熱源が強ければ強いほど高く、特に、 12pW/kg (原生代初期の地球のマントルに相当) より強いときには、立ち上る時間間隔はプレート運動の時間スケールより短くなり、新たなプレート境界もこの短い時間スケールで頻繁に生成された。このため、プレートはほぼ定常的に運動し続けた。さらにこの条件下では、ブルームは、スーパーブルームの一部が熱的浮力によりちぎれて浮上するという形で生成された。しかし、内部熱源の強さが 12pW/kg より弱いときは (図 6 の陰をつけた部分)、ブルームの生成はより間欠的になり、その時間間隔はプレート運動の時間スケールと同程度、あるいはより長くなった。このため、図 7 の $6.79 \sim 7.83\text{Gyr}$ のスナップショットに見られるように、新たな海嶺が生成されるより前に、既存の海嶺が沈み込み帯まで移動し消滅し、プレート運動が止まってしまうということがしばしば起こった。すなわち、この条件下では、プレート運動も、ホットスポットの活動度も顕著な時間的揺らぎを示した。さらに、この条件下でのブルームは、スーパーブルームの一部がちぎれて浮上するというよりは、スーパーブルームの上のマントルがスーパーブルームにより暖められ、ブルームとなって浮上するという形で生成した。(図 7 参照)

プレート運動やホットスポットの活動度が大きな時間的揺らぎを示す内部熱源の強さ (図 6 の陰の部分参照) の範囲は、原生代初期から現在の地球のマントルに相当するものであり、上に述べた結果は、この時期の地球のテクトニックな活動や火山活動は、それ以前の太古代のものより大きな時間的揺らぎを示したことを示唆している。この、時間的揺らぎの程度の変化が、太古代・原生代境界における地球のテクトニクスの変化の一つの原因となった可能性がある。

さらに、以上の結果は、プレートの堅さや 660km 相境界のマントル対流に対するバリアー効果の強さにどう依存するかも系統的に調べ、スーパーブルームはプレートが剛体の板の様に振る舞うときにのみ発達すること、 660km 相転移は、現実の地球で期待される程度のバリアー効果の強さでは、影響を与えないことを確かめた。今後は、以上のモデルに、十分な組成的浮力を持ち、決して沈み込むことのない大陸地殻を加えたとき、どのような効果が生じるかを調べる予定である。

2) 3 次元球殻対流運動で生じるリズム 相転移と粘性の層構造の効果

対流の振る舞いは系の幾何学形状に依存する。マントル対流の数値シミュレーションにおいても、現れるパターンや時間的変動の特徴を地震波トモグラフィーの結果やプレート運動の復元と定量的に比較するためには、3 次元球殻という形状での対流の理解が重要である。 660km の深さでは相転移圧力の温度係数 (クラウジウス・クラペイロン勾配) が負であり、このことは相境界を越えての対流運動を妨げる方向に働く。その値の大きさによって、対流パターンは全層的から完全二層まで変化することが知られているが、従来の結果は箱形の形状によるものや、比較的低いレイリー数に相当するものであった。我々は解像度を上げて高いレイリー数まで計算可能にした球殻コードに内部発熱と相転移の効果を

導入し、球殻の形状かつ地球に想定されるレイリー数を完全にカバーする領域で、クラペイロン勾配と対流パターンの相関を完成させた（図8）。全層対流と二層対流の間の *intermittent* とした領域では上部マントルの下降流が滞留し、時間が進むとそれが下部マントルへの間欠的な崩落を引き起こす。このような挙動を示す領域はレイリー数が大きいほど、絶対値の小さなクラペイロン勾配に対して実現される。地球に近い条件では、遷移層での崩落に伴う少数の巨大な下降流が数億年という周期で発生するのが見られる。これに伴い対流運動は非常に活発化し、地表とコア境界での熱流量はほぼ同期して急増する。遷移層によるこのような間欠性が、様々な地表および内部での活動のリズムを作り出すと考えることができる。

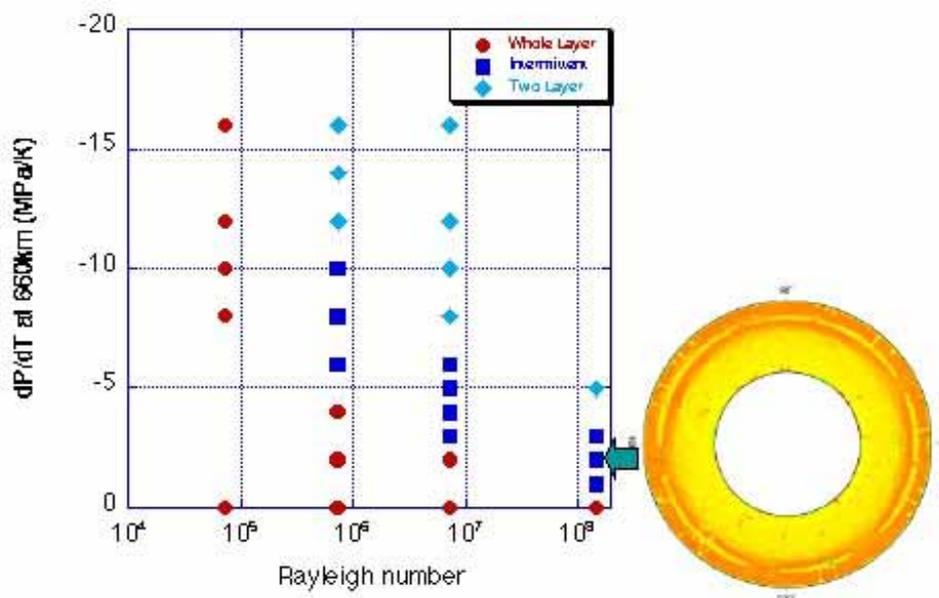


図8 レイリー数、660kmでの負のクラペイロン勾配の大きさ、を与えた際の対流パターンの相関。これはすべて一様粘性の結果である。あるレイリー数について、クラペイロン勾配の絶対値を大きくしていくと対流パターンは全層から間欠的、そして完全二層へと変化する。その遷移の勾配値はレイリー数が高いほど小さい。同心円の図は矢印の設定で実現された温度場の子午線断面の例。上下流が妨げられて滞留している場所と突き抜けている場所とが同時に存在している。

現実の地球マントルでは、粘性率が温度に依存して変化し低温では高粘性になること、並びに、平均的に見て下部マントルは上部マントルよりも数十倍大きな粘性率を持っていること、の二点が重要性を持つ。ここではグローバルな振る舞いを規定するには寄与の

大きいと考えられる粘性の層構造を導入し、上述の相転移との相乗効果について調べた。600kmの深さまでの粘性率を一定として、そこから750kmの深さまで滑らかに増加させ、さらに下部は40倍大きな一定の粘性率を持つ構造を与えた。まず相転移のない場合は、粘性率の差に対応して、上部マントルでは細くて速い上下流、下部マントルでは太くてゆっくりした上下流となり、上下流同士は同じ位置で連続するという構造を持つ。これは全層対流である。負のクラペイロン勾配をもつ相転移を導入すると、間欠性を持った挙動を示すようになり滞留する部分が見られる。一様粘性の場合のintermittent領域と同様な振る舞いである。粘性の層構造をもつ系ではレイリー数の意味合いが異なるので、全球で平均した粘性が一様粘性のものと同程度の場合同士を比較した。すると、下部マントルが高粘性という構造を持つもののほうが、クラペイロン勾配の小さい値に対しても流れの滞留やパターンの長波長化を生じやすいということが分かった。今後はさらに、粘性の温度依存性と降伏応力の効果を組み込むことでプレート的な挙動をする部分が自然に再現されるようなシミュレーションを行う。

3) 3次元高精度マントル対流数値計算プログラムの開発

マントル下降流の滞留と崩落の過程におけるマントル深部からの上昇流による熱輸送量の推移を数値計算モデルで正確に見積もるために3次元カーテシアン高精度マントル対流数値計算プログラムの開発を行っている。マントル対流を支配する運動方程式と連続の式はカップルさせて速度場と圧力場を同時に求める。このとき、マントル物質の粘性率の温度依存性によるマントル対流層の上面と下面の粘性率比が4~5桁以上変化しても数値安定性を維持させることで、地球のリソスフェアに相当する低温・高粘性リッド(スタグナントリッド)の形成を再現することが可能となった。熱輸送方程式の移流項には空間に3次精度の風上差分(4次中心差分に4階微分の数値拡散を加えたものに相当)を採用し、時間差分には2次精度のクランク・ニコルソン法またはアダムス・バッシュフォース法を採用した。開発したプログラムの妥当性を調べるためにマントル対流計算プログラムのベンチマーク論文の結果(Busse et al., 1993)と比較し、粘性率が空間的に一様、または温度に依存する場合において正確な結果が得られることを確認した(図9)。このプログラムは、マントル上昇流の熱輸送量の推移を見積もる目的の他に、リージョナルな領域におけるマントルダイナミクスの問題、例えば、沈み込みスラブとマントル上昇流との熱的・物質的相互作用の解明にも役立つ予定である。

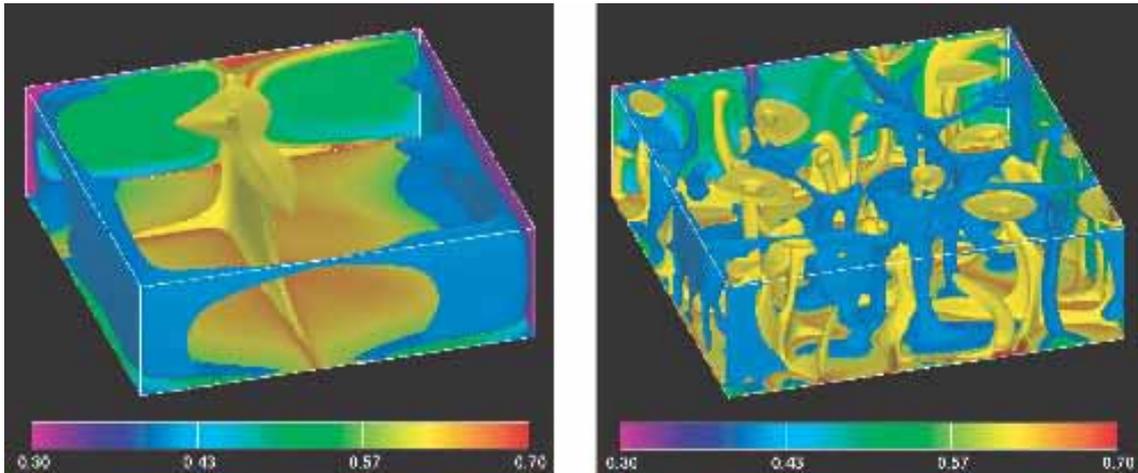


図9 アスペクト比3の箱形内でのマントル対流の温度場。レイリー数は(左)10*6、(右)10*7。青色と黄色の等値面はそれぞれマントル下降流と上昇流を表し、温度異常(各深さにおける温度の水平平均からのずれ)は、(左) - 250Kと+ 500K、(右) - 188Kと+ 188K。箱の側面のカラーコンターは温度を表す(カラーバーを参考)。

4) 今後の計画

マントル活動によって生じるリズムの原因については、火成活動、プレートの挙動を考慮した2次元マントルシミュレーションの結果は、マントル下部境界のホットプルームの間欠的な成長と上昇が原因となっている。一方、3次元球殻マントル対流シミュレーションにおいては、下降流の660km不連続面での滞留と崩落が変動のリズムを生じさせている。どちらが実際の地球で起こっているかを明らかにすることが、当面の課題である。2次元シミュレーションについては、本ニュースレターの吉岡グループの報告に示されているように、プレート沈み込みが起こる場所を固定した場合にはスラブの滞留は起こらないが、この沈み込み上盤側のプレートを固定せずに移動できるようにすると、スラブの滞留と沈み込み場所の後退が同時に起こることが示されている。本稿で示した2次元モデルの場合は、沈み込み場所が左端に固定されておりスラブが滞留する自由度がないことが、スラブの滞留が起こらない原因とも考えられる。また、この2次元モデルで得られた変動では表層のプレート運動の停止した状態とホットプルームによるプレートの破壊とプレート運動の開始という大規模な変動がおこっており、過去2億年で観測されているマントル活動の変動振幅に比べて、より大きな変動が起こっている。一方、3次元モデルに関しては、変動の大きさ、周期等は実際の地球に近いものの、プレート生成に必要な、粘性の温度依存性が取り入れられていないという問題点がある。今後の研究方針としては、2次元、3次元マントル対流シミュレーションのそれぞれの利点を活かして、その難点を補うようなシミュレーションを行うことが必要と考えている。

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 660 km 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、鉱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鉱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。ここでは高圧相（高密度）と低圧相（低密度）の分率を意味する "phase

function" 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 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 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。これは負のクラペイロン勾配(モデルでは約 -4.3 MPa/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ブスカイト相転移)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。

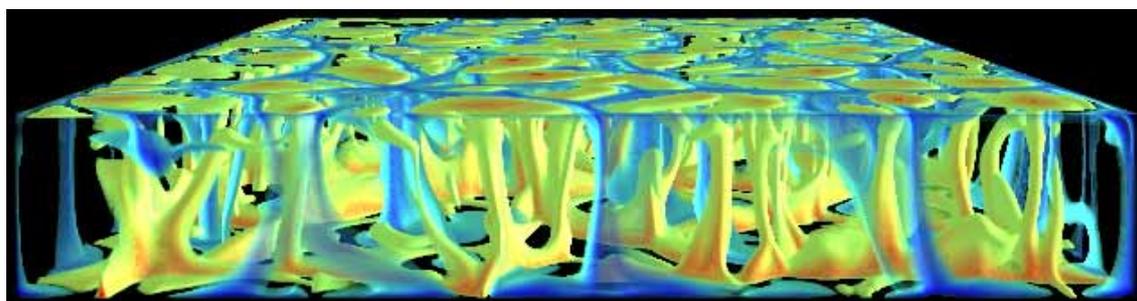


図1 660 km相転移の効果を取り入れた3次元箱型マントル対流シミュレーションの例。モデル領域は高さ3000 km、幅18000 kmの3次元直方体で、上面から深さ約660 kmの位置に(対流を阻害する効果を持つ)相転移を導入している。青い領域は周囲よりも125 K以上低温の下降域を、黄色∼赤の領域は周囲よりも62.5 K以上高温の上昇域を示す。

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付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} が見つけられず、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、今後もよりモデルを現実近づけること、及びそのシミュレーションを可能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取り入れることが極めて重要になるであろう。高温高圧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ト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）

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2)。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とにより、上盤プレートの自由な動きを可能にしている。

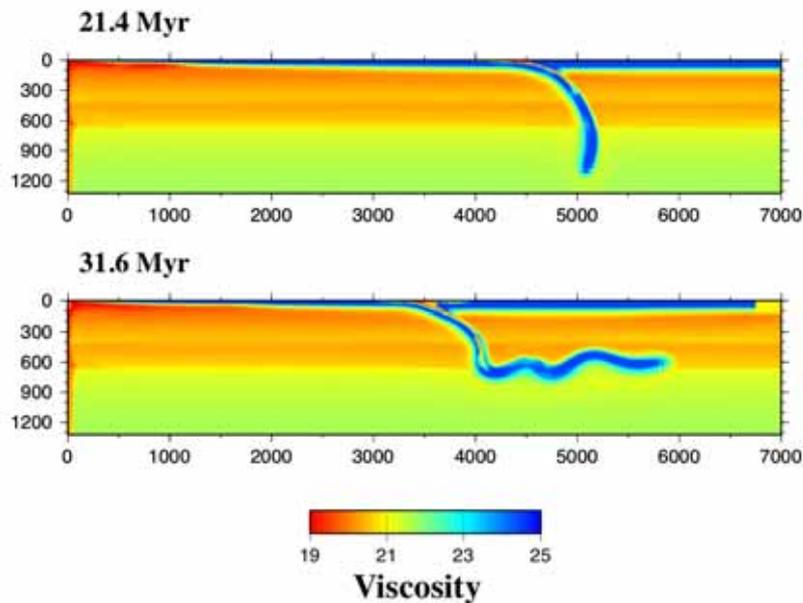


図2 スラブのスタグネーションと海溝後退の相互作用。上図は上盤プレートが固定されている場合、下図は自由に動くことができる場合。後者のモデルでは、上盤プレートの自由な運動と相転移に伴う細粒化の効果を考慮している。相境界のクラペイロンスロープは、410 km境界が+3 MPa/K、660 km境界が-3 MPa/Kであると仮定した。図は多川道雄氏の提供による。

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、660 km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660 km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、660 km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。

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., 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.

公募研究

地球深部スラブ近傍のマルチスケール電位差データ解析

市来 雅啓（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）

これまでの電気伝導度構造の研究では、対象とするスケールに合わせて2点間の電位差測定を行い、その2点間の間隔程度を分解能にしたモノスケールでの解析を行うことが主流であった。具体的には、100 kmまでの深さの構造を1 km程度の分解能で見たもの、或いは1000 kmまでの構造を10 km程度の分解能で見たモノスケールの解析である。最近の電磁気観測の拡大で、様々なスケールの電位差データが東アジア地域で蓄積された。即ち、極東ユーラシア大陸および日本海海底ケーブルでの電話線を用いた長基線（10km以上）の電位差データ、機動観測MT法データ（100m）、海域での海底電位磁力計の機動観測によるデータ（5m）である。

本研究の目的は、これらのマルチスケールで測定された既存の電位差データをコンパイルし、マルチスケールで測定された電位差データを解析して電気伝導度構造を求めるインバージョン手法を開発し、浅部の詳細構造と深部の大規模構造を、空間に応じた適切な分解能を持つような電気伝導度モデルを深部スラブの存在する東アジア地域で求めるということが目的である。従来の研究イメージと本研究での実現を目指す研究イメージを図1に示す。

分解能が明らかな上で電気伝導度構造を求められれば、水素溶解度が定量的に求められ、粘性率構造の推定に役立てることができる。粘性率構造は深部スラブ周辺の現在・過去・未来の姿を推定するマントル対流計算において基礎的なデータになりうる。このように電気伝導度とマントル対流計算とが有機的に結びついた新たな研究の発展が期待できる。

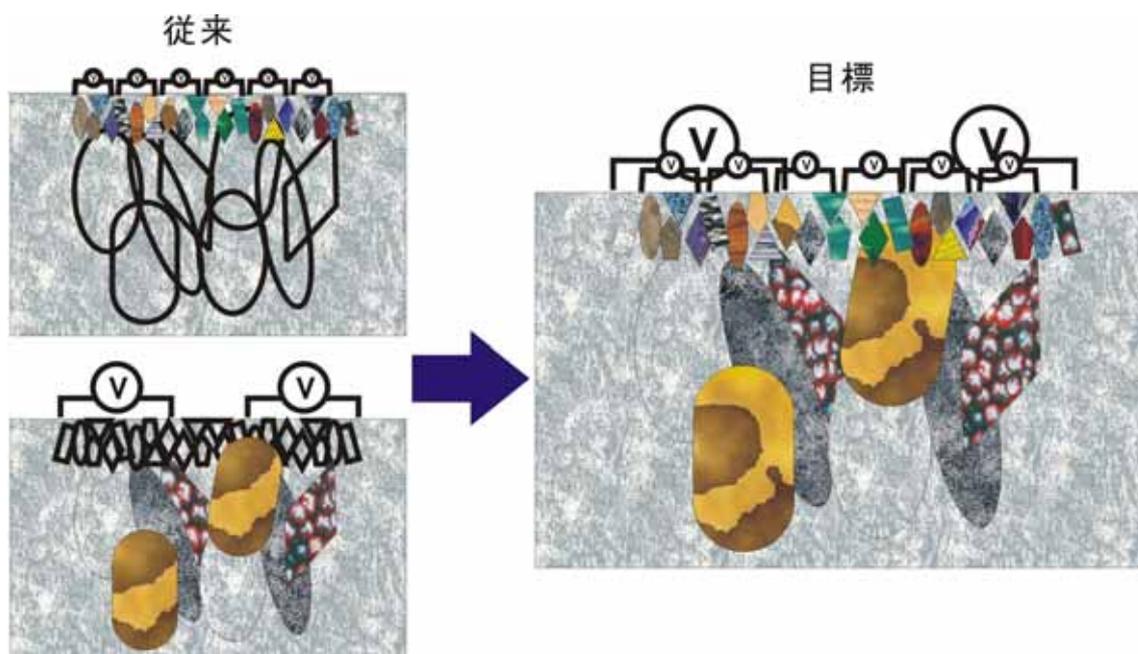


図1．本公募研究目的のイメージ．

高温高圧下におけるスラブ構成物質の熱物性測定

代表: 大迫正弘 (国立科学博物館理工学研究部)

分担: 米田明・伊藤英司 (岡山大学地球物質科学研究センター)

本研究の目的は地球深部を構成する物質の熱定数(熱拡散率・熱伝導率 および比熱)を高圧高温のもとで決定することにある。熱拡散率は温度伝導率ともいい、熱伝導率と $\kappa = \lambda / C$ の関係にある(C は比熱、 ρ は密度)。いうまでもなく沈み込むスラブの熱的状态は、マントル対流やプレート運動などのダイナミクスを大きく左右している。660km不連続面付近で滞留したスラブが間歇的に地球中心核-マントル境界に沈降していくようなふるまいは温度で支配されていると考えられる。したがって、スラブおよびその周囲の物質の熱物性(熱伝導率・熱拡散率・比熱)データはスラブの沈み込み様式を議論するための基礎となる。対流の計算などにおいては、地球のマントル内の値として熱伝導率を $\lambda = 4 \text{ W m}^{-1}\text{K}^{-1}$ ($\sim 1 \text{ cal m}^{-1}\text{K}^{-1}$)、熱拡散率を $\kappa = 10^{-6} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$ (SIで 10^{-6})にすることも多い。しかし λ と κ は物質(組成と結晶構造)の違いはもとより温度圧力によって大幅に変化するものであり、その値は弾性などほかの物性量から誘導することも難しい。とくに、含水マントル物質についての熱物性は未知なところが多い。それゆえ、熱拡散率と熱伝導率を地球深部の温度・圧力のもとで測定し、その値を押さえていくのは重要なことである。

図1に川井式装置(岡大地球物質科学研)で用いる熱伝導測定用の試料セルアセンブリーを示す。この大きさのセルでもって 10 GPa までの測定ができる。同じ厚さの薄い円盤を3枚重ね、合わせ面の一つにヒーターを置いてパルス加熱し、もう一つの合わせ面の温度変化を熱電対でとらえる。この測定法のよいところは熱拡散率と熱伝導率が同時に求まりしたがって比熱もだせること、熱伝導の異方性もはかれることである。本研究では実験の圧力と温度の上限を現在の装置の能力と測定可能な試料の大きさとを考えて、20 GPa(深さ 600 km の圧力に相当)・1500 K(深さ 400-600 km 付近の推定温度)までとする。圧力の上限を伸ばすためには、セルのサイズを小さくするか、アンビルを大きくして加重を増やすかの二つの方法がある。当研究で見込まれる温度と圧力の範囲は上部マントルから遷移層中間に相当するものであるが、精度の高い実験によって、スラブの滞留する“660 km”不連続面付近とさらにはその下部に相当する圧力への外挿に耐えうるデータの取得を目指す。研究の対象となる物質は通常の無水マントル鉱物のほか、とくにスラブ内で重要となる含水鉱物(角閃石、雲母、ローソン石など)である。

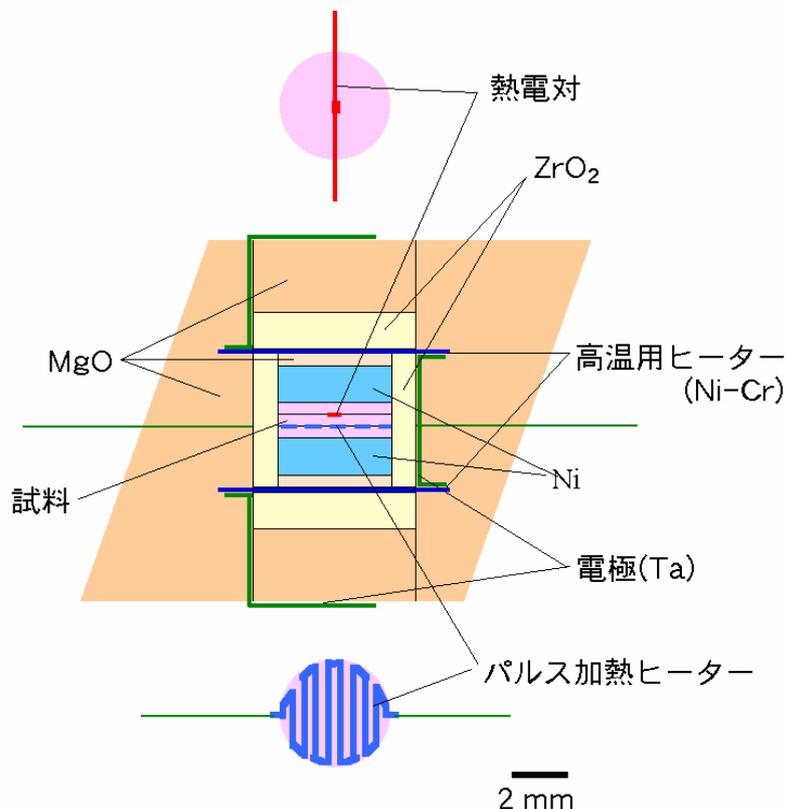


図1 川井形装置による熱伝導測定用セル

本研究にはいる前であるが、上部マントルを構成するカンラン石とザクロ石の熱伝導率・熱拡散率を圧力 8 GPa、温度 1100 K までの範囲で測定した。熱伝導率および熱拡散率の圧力による増加は 1 GPa につき 3 % ~ 4 % の範囲にある。また、ヒスイの集合体を輝石のアナログ物質として測定をして、熱伝導率・熱拡散率の高圧下のふるまいがカンラン石に似ていることがわかった。このようにして、無水の主要マントル物質については上部マントルの圧力条件での熱伝導率・熱拡散率について輻射伝導を別にすればおおよその結論を得たものと思われる。

スラブを特徴づける物質の一つとして低圧で安定な蛇紋石について測定した。蛇紋石の熱伝導の値はカンラン石やザクロ石のおよそ半分であること、圧力による増加が小さいことを見いだした。後者は予想外であったが、これについては加圧によるアモルファス化などによるものではないかという指摘がある。このように含水マントル相の熱物性測定からは予期しないような結果がでてくる可能性がある。蛇紋石を加圧したのち温度を上げると、安定領域を超えてとてすぐに脱水反応がはじまったと思われ、試料アセンブリーがダメージを受けたようで、測定ができなくなった。この測定上の困難を克服し、沈みこみの温度圧力条件を追跡するようにして測定できればまた面白いであろう。

海洋プレートの密度の高温高圧その場測定

小野重明（海洋研究開発機構・地球内部変動研究センター）

沈み込むスラブのダイナミクスを解明するために、現実のマントル物質の物性を明らかにすることは不可欠である。特に密度と粘性という二つの物性はマントルの対流を支配する重要なパラメータである。そこで本研究では、密度に注目して、沈み込む海洋プレートとそれを取り囲むマントル物質の密度差を精密に測定することを目標とする。これまで、上部マントル及び遷移層においては、マルチアンビル型高圧発生装置を用いた研究によって、かなり信頼しうるデータが報告されているので、本研究では、下部マントル中でのスラブの振る舞いを明らかにするため、実験装置としてダイヤモンドアンビルセル高圧発生装置を用いる。また、放射光を用いたX線その場観察の手法を組み合わせることにより、今までにない非常に信頼性の高いデータを得ることを目標とする。

本年度中に得られた研究結果をまとめると、図のようになる。まず、KLB-1 ペリドタイト（パイロライト）の密度を測定したところ、下部マントル中では実験の誤差内で PREM 密度と良い一致を示した。このことは、下部マントル全体の化学組成は、ほぼペリドタイト（パイロライト）と考えて差し支えないことを示している。つまり、下部マントル中では、深さ方向の大きな化学組成の変化は存在しないことを意味している。また、深さ約 2700km でカルシウムイリジウム相（ポストペロフスカイト相）への相転移が観測された。この相転移は純粋な $MgSiO_3$ 組成では、もっと深い所で起こり、D” 層の成因をうまく説明することができなかったが、天然の岩石組成（ペリドタイト）では、この相転移によって D” 層の成因をうまく説明することができる。つぎに、沈み込むスラブを構成している海洋プレート（玄武岩）の密度を測定した所、PREM 密度およびモデルマントル物質（KLB-1 ペリドタイト）の密度より大きいことが明らかになった。密度差はおおよそ 1% である。また、海洋プレート（玄武岩）には、下部マントル深部で三つの相転移が起こる。1つは深さ約 2200km で起こるシリカ相の相転移である。2つ目は深さ約 2500km で起こるカルシウムイリジウム相（ポストペロフスカイト）の相転移である。3つ目は深さ約 2800km で起こるアルミ相の相転移である。相転移が起こることにより、密度が徐々に大きくなる。周囲を取り巻くモデルマントル物質との密度差は常に約 1% 程度存在するが、深さ約 2500km 付近で密度差が大きくなる。これは、岩石の化学組成の違いにより、カルシウムイリジウム相（ポストペロフスカイト）の相転移圧力が変わるためである。さらに、深さ 2700-2800km では、逆に密度差が 1% 以下になる。このように、下部マントル最下部では、沈み込むスラブと周囲のマントルとの間の密度差は複雑に変化することが明らかになった。今後、対流モデリングの研究においては、本研究で得られた基礎データを組み込むことにより、より現実的な計算を行うことができるようになった。

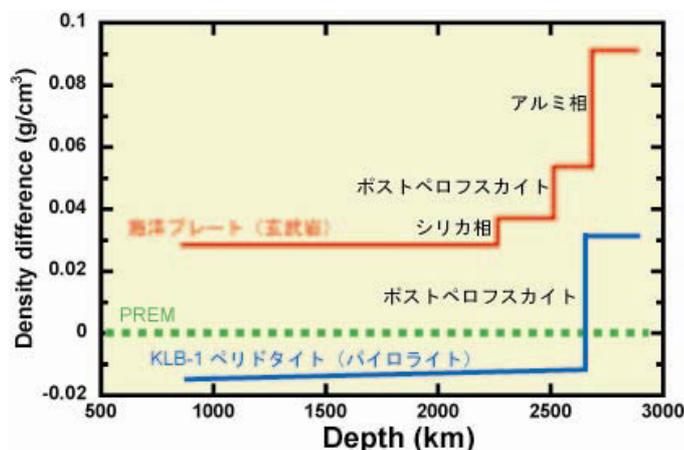


図1 沈み込む海洋プレートとマントル物質の密度の関係
PREM 密度を基準にした。密度不連続は、それぞれの岩石に含まれる鉱物の相転移によって起こる。
赤線：海洋プレートの密度。青線：モデルマントル物質の密度。

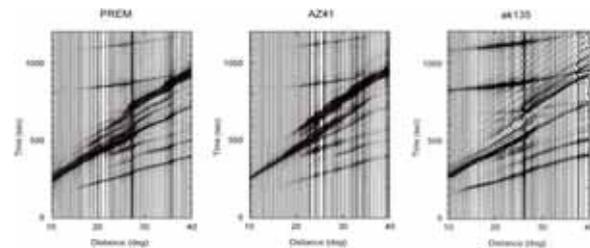
波形インバージョンを用いた局所的内部構造推定への試み

ゲラーロバート・富士延章・河合研志（東大・理）

実体波の読み取られた到達時刻をデータとして用いる走時トモグラフィの出発点は、70年代の後半に発表された一連の画期的な論文 (Sengupta & Toksoz, GRL, 2 84-86, 1976; Aki et al. JGR, 82 277-296, 1977) だったと言える。当時のモデルの解像度は荒いものであったが、それ以来全世界の研究者の努力の積み重ねによって解像度は向上され、走時トモグラフィは地球内部の構造およびダイナミクスの解明に大きく貢献してきた。一方で、走時だけをデータとすることでの限界も指摘されつつあり、波形そのものをデータとした内部構造推定、すなわち波形インバージョンによって、より詳細かつ正確な内部構造推定が可能となる公算が大きいであろう。しかしながら、波形インバージョンの実用化のためには幾つかの技術的な課題も残っており、我々はその解決に取り組んでいる。ここでは、その研究を要約する。

本研究は今年度から特定領域研究として採択されたもので、当座の目的は波形インバージョンによる西太平洋下の上部マントルおよび遷移層の微細構造推定である。すでに広帯域波形データを用いた局所的な波形インバージョンは、中南米下の D''層の S 波速度構造推定(Kawai et al., AGU, 2003)で先がけて行われており、本研究はその拡張である。

現在、局所的な 1 次元モデルに対してフォワードモデリングを行い、波形データセットを集めている。これらはインバージョン実行のための下準備となる。まず、西太平洋下をサンプルする $M_w \geq 6.0$ かつ震源の深さ 400km 以上の 1995 年から 2005 年までのイベントのレコードを F-net, IRIS, OHP 等から取得し、SN 比がよい



(図) 3つの遷移層モデル(anisotropic PREM, AZ41, ak135)の深さ 600km の震源に対する速度波形プロフィール(震央距離 $10^\circ \sim 40^\circ$) 10s まで計算した。不連続面の深さや数の違いを反映している。

波形をデータセットとして選別した。震源関数の影響 (Half duration が大きくなりすぎる) を考察し、 $M_w \leq 6.5$ のデータを使った方が良いと判断した。次に、Kawai et al. (2006, GJI, in press) の波形計算ソフト (ソフトは以下のサイトで公開中 : <http://www-solid.eps.s.u-tokyo.ac.jp/~dsm/>) を用いて局所的な遷移層の3つのモデルに対してフォワードモデリングを行った。anisotropic PREM, AZ41, ak135 の深さ 600km の震源に対するプロフィールを掲載している (図)。不連続面の数などの影響から、三重合が見られる場合と見られない場合がある。西太平洋の局所的 1 次元モデルの研究は、現在に至るまで数多く発表されており、微細構造の推定手段の一つとして現在においても有効であると考えられる。ところが、それらは主に実体波を用いたフォワードモデリングによって行われており、定量的かつ客観的な見積もりが困難であった。そこで、本研究は波形インバージョンにより遷移層の微細構造を局所的に推定してゆくことで、遷移層のイメージを具体化することを目指している。波形インバージョンには、効率よくモデルパラメータに対する偏微分係数を計算するスキーム (Geller & Hara, GJI 1993) を用いる予定である。また、将来的に 3 次元で解くためのアプローチとしての最適化演算子を用いた差分法のコードの開発も進めている (Hirabayashi et al., GJI, submitted)。

局所的な波形インバージョンは今始まったばかりであり、それが 30 年前の走時トモグラフィのように急成長することを期待したい。

電気伝導度と地震波速度による沈み込み帯の構造に関する研究

島 伸和（神戸大学内海域環境教育研究センター）

海底における電磁気観測データから得られる電気伝導度構造と地震観測データの解析から得られる地震波速度構造には、温度、メルト含有量、割れ目の幾何学、水の含有量の情報が含まれており、これらの情報を引き出すことは、上部マントルの物性やダイナミクスに関する理解を深めるためには重要である。本研究では、沈み込み帯の上部マントルでの条件に限定し、電気伝導度・地震波速度の2つの違った構造から、温度、メルト含有量、割れ目の幾何学、水の含有量をどの程度拘束できるかを明らかにする。この結果を、マリアナ海域での観測データに適用し、その妥当性を検討する。さらに、温度、メルト含有量、割れ目の幾何学、水の含有量の視点から、電磁気観測データと地震観測データに条件をつけて、より高分解能で構造を推定する解析手法の開発を目指す。

マリアナ海域は、米国 MARGINS プログラムのサブテーマである Subduction Factory のターゲットサイトになっており、マリアナ海域の地震学的観測、電磁気学的観測のアメリカ側の予算が MARGINS 関連予算として採択されているほど、この海域の注目度は高い。また、InterRidge（国際中央海嶺共同研究機構）においても、背弧海盆拡大系は大きなテーマの1つとなっており、現在アクティブであるマリアナトラフ拡大系は重要なターゲットだと考えている。さらに、InterRidge 関連の複数のワークショップでは、今後の方向性として、地震学と電磁気学の両方の手法による探査・観測を同じ海域で実施することが、地球物理学的な拘束条件を得るために重要であると指摘している。マリアナ海域では、両方の手法による観測がすでに実施されており、さらに平成17年度～18年度にかけて、高密度な海底電磁気観測が実施される。本研究は、両方の手法によりデータが得られた後を想定した研究であり、今後の展開の上でも重要である。

本研究の一環として、研究協力者の Douglas A. Wiens 教授（ワシントン大学）らと共同で、背弧海盆の上部マントルを対象にした地震学的手法（Wiens 担当）、電磁気学的手法（島担当）、数値シミュレーション手法（Conder 担当）に関する研究のレビューを進めてきた。この結果を次の論文にまとめて発表している。

Douglas A. Wiens, Nobukazu Seama, and James Conder, Mantle Structure and Flow Patterns Beneath Active Back-Arc Basins Inferred from Passive Seismic and Electromagnetic Methods, Ridge 2000 - InterRidge AGU Monograph, Interactions among Physical, Chemical, Biological, and Geological Processes in Back-arc Spreading Systems, accepted.

「広帯域地震実体波形解析：スタグナントスラブに伴うマントル微細構造の研究」

広島大学 田島文字

地震波トモグラフィーモデルにより、地球内部構造の3次元的なイメージが鮮明になり、マントル遷移層および深部に沈み込むスラブの挙動の多様性が明らかになってきた。当公募研究では、この挙動の違い、つまりスラブが遷移層で滞留したり下部マントルに突き抜けてから滞留したりする多様性を、スタグナントスラブ付近を強くサンプルした広帯域波形を解析することにより詳細に調べる。

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690 km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[Tajima and Grand, 1995, 1998]。又、千島から日本の沈み込み帯では、低温スラブに伴った高速度異常の分布は、トモグラフィーイメージによるものよりはずっとコンパクトなもので、不均質性の波長も短いことが分かっている。しかしながら、日本列島付近の東北部と南西部に認識できる構造的な境界、あるいはM3.11からM2.0などへの構造遷移の詳細は分かっていない。一方で、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。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。H₂Oを含んだスラブの温度異常勾配が、深さ方向のみならず水平方向にも存在すると、相転移に伴った不均質性の局在が考えられ、このような構造の複雑さとして現れるものと思われる。

特定領域で設置される観測点(A:ロシア極東部広帯域地震観測網;ウ:海底広帯域観測網)からの広帯域波形データは、既存の観測点から得られるデータベースを補い空間的な解像度を改善し、波形解析を発展させるものと信ずる。新しい観測点からのデータを使うと、既存の観測点のデータからは解像度のなかった構造的な推移が明らかになっていくことと思う。ことに、カムチャッカから千島付近、およびフィリピン海プレート下のスタグナントスラブに関する構造遷移の微細構造を決められることは、非常にスリリングである。解析はreflectivityによるものと有限差分法を使う2次元・3次元モデリングも含む。層構造モデル(M3.11, M2.0など)では、スタグナントスラブに伴った高速度異常の振幅は高々3%未満であるが、3次元的な構造では速度異常の振幅はもっと大きいと推察される。

高温・高圧下でマントル鉱物の物理パラメータを測定する実験技術も革命的に進歩してきたが、長波長のトモグラフィーモデルと、鉱物物理的な研究とのギャップは大きい。広帯域波形解析により構築されたモデル(M3.11, M2.0)は、高温・高圧実験に基づき導かれた速度構造モデル[Li et al., 1998]と同程度の精度があり、長波長のトモグラフィーモデリングに対し相補的な貢献を提供できる。遷移層付近のスラブの挙動の違いが、どのような物理的条件の違いにより生じるのかを念頭に、高温・高圧物性で測定された物理パラメータに基づいて構築された速度モデルおよび数値シミュレーションの結果とも比較検討する。マントルの組成と推定される物質の物理パラメータから構築した速度構造モデルを、地震学的に導かれたモデルと比較する研究はまだあまり発表されていないので、新しい発展の可能性を持つ。かくして当広帯域波形解析は、特定領域の個々のグループの研究を有機的に関連させ、総合的なモデリングをする上で、独自の有用な役割を持つ。

電気伝導度異方性で見るフィリピン海上部マントルダイナミクス

馬場聖至(東京大学地震研究所)

本研究では、計画研究で行われる海底電磁気機動観測で得られたデータを解析し、フィリピン海上部マントルの電気伝導度構造を異方性の有無・方向・強度を含めて明らかにする。

本研究の特徴は電気伝導度の異方性を明らかにすることにある。電気伝導度異方性はマントル中の含水量と鉱物結晶の選択定向配列に依存すると考えられ、異方性の方向と強度から、マントル中の含水量と応力方向およびそれらの空間変化を推定することができる。また水の分布はマントルの粘性にも深く関与するので、海洋リソスフェア・アセノスフェア境界について、電磁気観測に基づきつつも本来の力学的定義に立ち返った議論が可能になる。これらは全く新しい試みであり、本研究の最も独創的な点である。マントル中の電気伝導度が異方性をもつ可能性は近年になって世界各地で報告されているが、海洋上部マントルの電気伝導度異方性を観測データから具体的にイメージしたのは、筆者とその共同研究者のグループによる東太平洋海膨における研究が初めてかつ唯一のものである(Baba et al., in press.; Evans et al., 2005)。西フィリピン海盆や四国海盆のようにすでに海洋底拡大を終了し、また過去の拡大方向と異なる方向に運動している場において電気伝導度異方性の有無・方向・強さを解明することは、海底電磁気研究をリードするだけでなく、マントルダイナミクス研究においても重要な一翼を担う。

図1に地殻年代に対する上部マントル電気伝導度パターンの見積もりを示す。中央海嶺における部分溶融が引き起こす水の再分配説(Hirth & Kohlstedt, 1996)、プレート冷却モデルから予測される地殻年代による温度分布とマントル構成鉱物(パイロライト組成を仮定)に対する電気伝導度・水素イオン拡散の室内実験データ(Kohlstedt & Mackwell, 1998; Wang et al., 1996; Woods & Mackwell, 1998; Woods et al., 2000)、およびオフィオライトで観察された各鉱物の定向配列パターン(Mainprice et al., 2000)に基づき、Ichiki et al, in press.の方法を用いてbulkの電気伝導度を計算した(a: 異方性の高伝導度軸方向、b: 低伝導度軸方向)。その結果は四国海盆や西フィリピン海盆(15~60 Ma)で電気伝導度異方性が存在し得ることを示している。

本研究は、計画研究の推進に対しても重要な貢献を果たす。研究計画「海底電磁気機動観測でスタグナントスラブを診る」が目指すのは、マントル遷移層にあるスタグナントスラブを電磁気学的手法でイメージングすることであるが、そのような深部の電気伝導度の推定精度は、上部マントルの電気伝導度に強く依存する。例えば上部マントルがより高伝導度の場合、電磁波の減衰もより大きいために遷移層の深さの電気伝導度に対する感度が落ちる。計画研究においては1年間の観測を3度行う計画であるが、上部マントルのイメージングには1年間の観測で十分であり、第1次観測で上部マントルの電気伝導度を明らかにし遷移層に対するデータの感度を調べることで、続く観測においてスタグナントスラブをより正確にイメージするために必要な観測点分布や観測期間を設定できる。

スラブのイメージングは低温物質の下降流というマントルダイナミクスのごく一部を描像するに過ぎない。その周辺でのマントルの状態や運動パターンをも共に解明することではじめて真のマントルダイナミクスの理解が進む。背弧側上部マントルのダイナミクスが沈み込むスラブと密接に関連していることは疑いなく、本研究を通じて、より直接的にはスラブからの水の供給プロセス、

発展的にはスラブのスタグナント・崩落プロセスと周期的背弧拡大プロセスとの関係など、現在の固体地球科学における第一級の問題にもアプローチできると考えている。

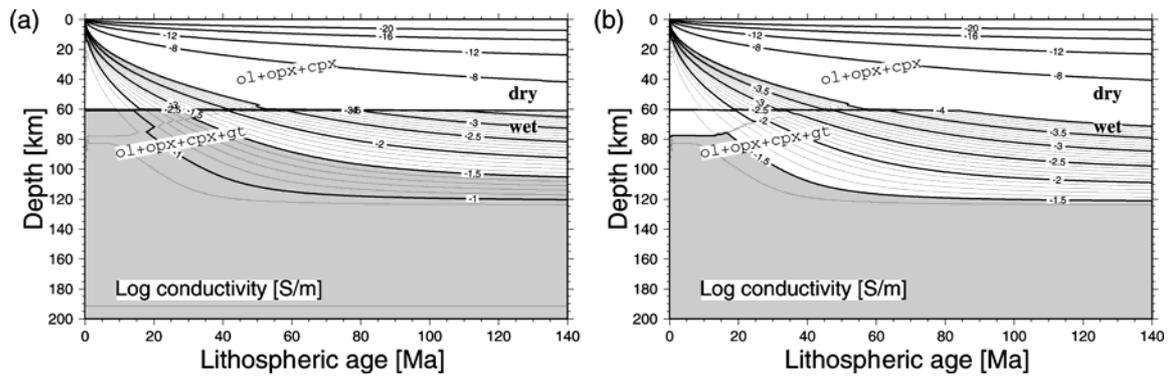


図1 地殻年代に対する上部マントル電気伝導度パターンの見積もり

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。2004 年は Kickoff ワークショップ、合同大会に於ける「地球深部スラブ」特別セッション、九州大学におけるシンポジウムを開催した。

第 1 回研究シンポジウム報告 (Kickoff ワークショップ)

特定領域研究として最初の全体集会ということで、2004 年 1 月 20-21 日の二日間、「地球深部スラブとマントルダイナミクス」と題してスタグナントスラブをキーワードとして共通問題認識を持つべく開催した。「現在の到達点と問題点」セッションでは、特定領域研究の 4 つの分野での現状を共有すべく、計算機科学 (本多了)、高圧実験科学 (廣瀬敬)、内部構造科学 (原辰彦)、海底観測科学 (塩原肇) の分野での本格的なレビュー講演を行った (括弧内は講演者、敬称略)。またそれぞれの分野において、計画研究がどのように計画されているか、各班の班長から紹介された。続く「特定領域に期待すること」セッションでは、特定領域に参加していない国内外の研究者；巽好幸 (IFREE)、高橋栄一 (東工大)、BINA Craig (ノースウェスタン大)、趙大鵬 (愛媛大)、丸山茂徳 (東工大) の諸氏から特定領域研究周辺の状況、領域への期待、または叱咤激励 (?) などの話題提供をいただいた。「深部スラブ / 遷移層のダイナミクス」セッションでは、若手の研究者中心に講演会を行った。地球深部の水に関する講演が多いことが、その問題の重要性を際ださせた。最後に「総合討論：今後の研究の進め方、相互の乗り入れのメカニズム」で、今後の領域研究の進め方について議論した。地球深部の温度・圧力と相転移の関係の研究をさらに進めるべきであるなど、今後に向けていくつかの具体的な研究共通テーマを設定していくことの重要性が確認された。(東大地震研・川勝均)

第 2 回研究シンポジウム報告

2005 年 11 月 10 日 (木)、11 日 (金) の 2 日間、スタグナントスラブ第 2 回研究シンポジウムが九州大学 (箱崎キャンパス内) で開催された。口頭発表は国際ホールで、ポスター発表は理学部大会議室で行われ、10 日は 89 名、11 日は 94 名の参加者があり、活発な議論が行われた。

今回の研究シンポジウムでは、1) なぜスラブは滞留するか？ 2) なぜスラブは崩落するか？ 3) スラブが崩落すると何がどうなるか？ の本特定領域研究の 3 つの主要な研究テーマに焦点をあてたプログラム構成で研究シンポジウムが行われた。

初日は、領域代表の深尾氏による挨拶に引き続き、「セッション 1：なぜスラ

ブは滞留・崩落するか? ~その1~」のセッションが開催された。滞留あるいは崩落するスラブがどう見えているか、あるいはスラブの周囲のマントル遷移層がどう見えているか、に関連して、計画研究ア、ウ、イ、エ、クの報告、公募研究1件の研究発表がなされた。このセッションでは、地震学を専門とする研究者の発表が多かったが、川勝氏(計画研究ウ)から、レシーバー関数を用いた解析により、太平洋スラブの沈み込みに関連した660 km不連続面が最大15 km、水平距離500 kmにわたって下降しているとの報告があった。田島氏(公募研究)は、波形解析の結果に基づき、スタグナントスラブが存在している領域でも660 km不連続面の下降が見られない地域が存在していることを報告し、大谷氏からは最近の高温高压実験によるクラペイロン勾配が $-0.5\text{MPa/K} \pm 0.3$ 程度とかなり絶対値が小さいといったコメントもあった。これらに関連して、660 km付近での温度、含水量など今後解決していかなければならない重要な問題も提起された。



その後、ポスター発表者によるポスター発表紹介(概略紹介)が口頭で行われた。1講演1分という短い発表時間ではあったが、どの発表も要領よく発表内容がまとめられていた。

休憩を挟んで、「特別セッション：数値シミュレーションと地球科学」では、地球科学における数値シミュレーション分野で活躍されている土屋氏、阪口氏、Ismail-Zadeh氏による講演があり、異なる分野のシミュレーション研究に触れ、数値シミュレーション全般のもつ可能性、及びその限界についての理解を深めることができた。土屋氏からは第一原理に基づく数値シミュレーションを用いた高温高压での物性値の決定法と実験結果との比較の講演があり、地球内部物性への新たなアプローチとして数値シミュレーションの有効性が示された。阪口氏はDEM(個別要素法)の発展の歴史と、せん断を受けるガウジ層内におけ

るアスペリティの形成とスティック・スリップ現象への DEM の適用例を示し、また、DEM を地球内部の熱・物質移動へ適用する新たな試みについても紹介した。Ismail-Zadeh 氏はマントル対流における時間逆行問題について講演し、彼の手法の有効性を示した。

2 日目午前は、「セッション 2：なぜスラブは滞留・崩落するか？ ~その2~」のセッションが行われた。このセッションでは、滞留あるいは崩落するスラブ、及びその周囲のマントル遷移層がどのような性質を持つか、またそれらがスラブの挙動にどう影響しているかに関連して、計画研究オ、カ、キ(その1)の報告がなされた。高温高圧実験の分野の発表が多かったが、桂氏(計画研究オ)の高温高圧下での電気伝導度測定、近藤氏(計画研究カ)の Fe のスピン転移など、著者にとっては目新しいトピックの発表もあった。鳥海氏のスラブ内の相転移に伴うレオロジーに関する講演、奥野氏のマントル粘性構造の講演内容も、数値シミュレーショングループにとって示唆に富む、有益な講演であった。

その後のポスターセッションでは、28 件の発表が行われ、活発な質疑応答が行われた。地震波を用いた地球内部構造、高温高圧実験による水の振る舞い・変形・相転移・弾性波速度・熱伝導度・密度、電気伝導度構造、スラブ・マントル対流の数値シミュレーションなど多種多様な発表があった。これだけ異なる分野の研究内容が1つのポスター会場で発表されることも珍しく、スタグナントスラブの研究にいかに関心を異にする研究者が集結しているかを実感させられた。



午後のセッション「セッション 3：スラブが崩落すると何がどうなるか？」では、スラブが崩落する先の下部マントルがどうなっているか、あるいはスラブの崩落が引き起こす現象について議論した。このセッションでは、計画研究キ

(その2)の報告に加え、地震学的手法によって見出された下部マントルの散乱体(金嶋氏)、数値シミュレーションによる下部マントル・CMBでの熱・物質輸送(中川氏)、ブルームに含まれるリサイクル物質に着目したホットスポットマグマからの制約(小木曾氏)の研究発表が行われた。また、浜野氏(計画研究キ)により、3次元球殻対流モデルで、レイリー数 10^8 のとき、 -1.0MPa/K でも2層対流となることが示されたが、これまでの研究結果と異なっており、興味深い。

総合討論では、計画研究クによる数値シミュレーションモデルでスラブが下部マントルへ崩落しないことについての議論や、クラペイロン勾配の値や粘性構造についての議論が行われた。前回のKick-offワークショップでもそうであったが、何が確固たる観測事実で、実験事実であるのか、またそれらがどの程度の精度で決定されているのか、のコンセンサスを早期に得ることが重要であると再認識した。



今回の研究シンポジウムのプログラム作成にあたっては、前述の3つのテーマに沿った形で進めることに加えて、なるべく前回のKick-offワークショップで発表していない方に各計画研究の報告をして頂くことや、ポスター発表を導入することで、より多くの研究者に発表して頂くことに留意した。それによって、本特定領域研究に携わる多くの研究者の顔ぶれ・研究内容を把握することができた。個人的には、本研究シンポジウムは大変有意義で、大成功であった、と感じている。これもひとえに、今春より長きに亘って研究シンポジウムの準備に携わって下さった方々の惜しみない協力のおかげであり、この場をお借りして関係者の皆様に厚くお礼申し上げたい。

(九大地球惑星・吉岡祥一)

研究集会のお知らせ

2006 年度は合同大会で国際特別セッションを開催します。10 名程度の海外招待講演者
予定しています。7 月には北大で計画研究アに関連した国際ワークショップが開催され
ます。詳細は 1st サーキュラーをご覧ください。また 2007 年の IUGG での特別セッシ
ョンも提案中です。

年度	集会名	日時	開催場所
18	合同国際大会特別セッション 「Deep Mantle Slab」	5月 14-18 日	幕張メッセ
	国際ワークショップ(計画研究ア)	7月 9-14 日	北海道大学
19	国内ワークショップ	秋	仙台 / 愛媛 (未定)
20	国際シンポジウム	冬	未定

5th Biennial Workshop on Subduction Processes emphasizing the
Japan-Kurile-Kamchatka-Aleutian Arcs (JKASP-5)
and
International Volcanological Field School for Graduate Students
--Linkages among tectonics, magma genesis, and eruption in the northern Pacific arc--

@ Hokkaido University International Congress Hall, Sapporo, Hokkaido, Japan

July 9-14, 2006

[July 9-19 for the International Volcanological Field School]

FIRST CIRCULAR
CALL FOR PARTICIPANTS and ABSTRACTS

Graduate School of Science, Hokkaido University

Geological Survey of Hokkaido

REGISTRATION DEADLINE: 31 MARCH 2006

EXPECTED ABSTRACT DEADLINE: 30 APRIL 2006

Updating info: <http://tomura.eos.hokudai.ac.jp/jkasp2006/>

Objective

This continuous and mature workshop has been widely covering subduction processes emphasizing the active Japan-Kurile-Kamchatka-Aleutian volcanic arcs, containing regional and local tectonics, seismic activity, deep and shallow subsurface structure, magma genesis, magma evolution, eruption mechanisms, volcano seismology, geochemistry, geodynamics and volcano and earthquake hazard mitigation. These segmentalized scientific objectives have automatically desired organic linkage with each other to understand the nature of geodynamic system. International geoscience community in the North Pacific has taken a step to overcome the obstacles which had disturbed scientific work in this region. This fact implies 5th meeting will be able to build vital and fruitful relationship not only for scientific output but also meaningful future collaboration between neighbor residents. One of the special emphases of the forthcoming meeting will be to report progress on imaging the stagnant slab beneath northern Pacific region and its linkage to the volcanic phenomena, deep-to-shallow focus earthquakes and plate dynamics. This understanding will allow the fundamental

further development of models for whole subduction zone processes. Another highlight of this workshop is the International Volcanological Field School for Graduate Students, which has been fully funded by Initiative for Attractive Education Program of Hokkaido University. This school will offer the opportunities to make productive international relationship between graduate students. Field excursion to the volcano Tokachi will be held after the scientific sessions, which will provide a clue to understand the pre- and post- caldera process of island arc volcano.

International Volcanological Field School

(Sunday, July 15 - Saturday, July 21)

Volcanological Field School for students from Japan and other countries will be held after the workshop. This is one of the geological studies field course for graduate students of Hokkaido University. International students are welcome to join the course. In this course students will learn about a wide variety of volcanoes and eruptive products in Hokkaido Island, where is a junction of two arcs, Northeast Japan and Kuril Arcs. We will expect less than 20 students. All costs during Hokkaido staying will be supported by Hokkaido University and LOC.

Steering Committee:

Minoru Kasahara and Mitsuhiro Nakagawa, Sapporo, Japan

Evgenii Gordeev and Victor Chebrov, Petropavlovsk-Kamchatsky, Russia

John Eichelberger and Jon Dehn, Fairbanks, AK, USA

Local Organizing Committee:

Hokkaido University: Minoru Kasahara (chairman), Mitsuhiro Nakagawa

(vice-chairman),

Hiroaki Takahashi, Mitsuhiro Yoshimoto, Takahiro Maeda

Geological Survey of Hokkaido: Noritoshi Okazaki

Form of Workshop:

Speakers who hope oral presentation are asked to talk for 15 minutes including discussions, and are able to use a fixed windows PC with digital projector but no overhead projector (OHP). Poster presentations are also welcome, and will be available throughout the dates of workshop. Presenters are not able to submit more than two presentations as first author.

Meeting Venue

Scientific sessions will be held at International Congress Hall of Hokkaido University, locating near Hotels, Sapporo station, and central Sapporo city.

Language of the meeting

The official language of the workshop is English.

Travel and Accommodation

Travel arrangements up to New-Chitose/Sapporo airport should be made individually. But there are little direct flights from abroad to New-Chitose. LOC recommend US and EU participants will come to Sapporo via Osaka/Kansai or Nagoya/Chubu airport where have many direct flights from/to US and EU, and easy to transfer to the Sapporo/Chitose flights. Tokyo/Narita airport requests 2-3 hours moving to the Tokyo/Haneda domestic airport by bus and/or JR line. For Russian participants, Niigata airport is one of potential transfer route to Sapporo. For Sakhalin participants, Sapporo/Chitose and Hakodate airports have direct flight in Monday, Wednesday and Friday. After arriving at New-Chitose airport, get on JR-line for Sapporo JR Station.

During Sapporo staying, “Sapporo Aspen Hotel” and “Sapporo Mets Hotel” are potentially preserved. Both are within an easy walking distance to the meeting place and Sapporo station. Fundamentally, hotel reservation will be handled by LOC but individual accommodation bookings in Sapporo via internet are approval. We anticipate that costs for food and lodging will average about \$150/day in Sapporo. Accommodations during excursion will be lumped by LOC.

Weather

Beginning of July in Sapporo is generally sunny and daytime temperatures averaging +20°C. However, there is always a possibility of rain and cold air, especially in field trip.

Pre-Registration and Abstract Submissions

Participants wishing to make oral/poster presentations are requested to fill registration form with tentative titles and submit it until **March 31, 2006**. People who want to attend this workshop but non-presentation also need to make registration. Students who hope to join the International Volcanological School are also requested to submit a registration form until above deadline. Expected deadline of abstracts is **April 30, 2006**. LOC will inform concrete deadline and formatting in 2nd circular which will be issued

immediately. Please check updating info at <http://tomura.eos.hokudai.ac.jp/jkasp2006/>.

Expected Registration Fee and Field Trip Costs

There will also be a registration fee of approximately \$250 to cover group events. Field trips are expected to cost about \$400 each including accommodations and meals. Costs for students who will join the International Volcanological Field School will be fully supported except for trip fee from your country to Sapporo. Please fill out the attached registration form with expected title of your presentation and return it to the Hiroaki Takahashi (hiroaki@eos.hokudai.ac.jp) until the **deadline, 31 March 2006**. All conference attendees are requested to pay in cash by US dollars or Japanese Yen at the registration desk.

Contact

If you are interested in receiving subsequent circulars regarding this meeting, please contact the following members,

- Sapporo LOC member: Minoru Kasahara (mkasa@eos.hokudai.ac.jp), Mitsuhiro Nakagawa (nakagawa@ep.sci.hokudai.ac.jp), Hiroaki Takahashi (hiroaki@eos.hokudai.ac.jp).
- US participation will be coordinated by UAF/GI through Jon Dehn (jdehn@gi.alaska.edu) and Pavel Izbekov (pavel@gi.alaska.edu)
- Russian participation will be coordinated through IVS by Evgenii Gordeev (gordeev@kcs.iks.ru)

Sponsorship:

This meeting will be sponsored by the Institute of Seismology and Volcanology, and Division of Natural History of Hokkaido University, Stagnant Slab Projected of Grand-in-Aid for Scientific Research of MEXT of Japanese Government, Initiatives for Attractive Education of Graduate Schools at Hokkaido University funded by MEXT of Japanese Government, and Geological Survey of Hokkaido.

Tentative Schedule (Subject to Revision)

Sunday, July 9

15:00 - 18:00 Registration and Check-in

18:00 - 20:00 Icebreaking reception

@Scientific Sessions

Monday, July 10

- Introduction and welcome
- Imaging stagnant slab and upper mantle structure beneath north-western Pacific region.
- Seismological and geological tectonics, geodynamics, subduction-related seismology.

Tuesday, July 11

- Magma genesis, geochemistry, volcanic eruptions, and monitoring.
- Volcano and earthquake hazard mitigation
- Discussion on international collaboration for research and education.
- Evening discussion at Sapporo Beer Garden with ram B.B.Q.

@Field excursions at Central Volcanic Zone of Hokkaido Island

Wednesday, July 12

- Moving from Sapporo to the base of the Tokachi volcano by chartered bus. Geological short reconnaissance of Tokachi volcanic group. Open discussions at open-air hot spring bath in hotel.

Thursday, July 13

- Climbing up to the active craters of Tokachi volcano (2041m) by walk about 6-7 hours for round trip. Geological and petrological discussions will be made during the way. Athletic shoes or light climbing boots are recommended. Participants who will not able to climb up can visit volcano monitoring stations, volcano hazard mitigation facilities, and taking hot spring bathes.
- Open discussion: Summary of meeting, future collaborations, and time and place of next workshop.

Friday, July 14

- Back to Sapporo by chartered bus until evening. Participants should be taking accommodation at Sapporo because of lack of night flight.

@International Volcanological Field School

Sunday, July 15-Thursday, 19

- Geological field trip will be held after above field excursion. Costs of this course will be fully funded by Initiatives for Attractive Education Program of Hokkaido University.

お詫び

ニュースレター第1号(Dec. 2004)に編集時に混入した誤りがありました。以下の正誤表のように訂正させていただきます。関係の皆様にお詫び申し上げます。

正誤表

P.22

左のコラム 下から14行目

(誤) (数千 km) 3

(正) (数千 km)³

右のコラム 下から13行目

(誤) 1010

(正) 10¹⁰

P.23

図1の説明文

(誤) 1 0 5 倍

(正) 1 0⁵ 倍

図2の説明文

(誤) Ra= 1 0 4

(正) Ra= 1 0⁴

(誤) 粘性比= 1 0 4

(正) 粘性比 = 1 0⁴

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