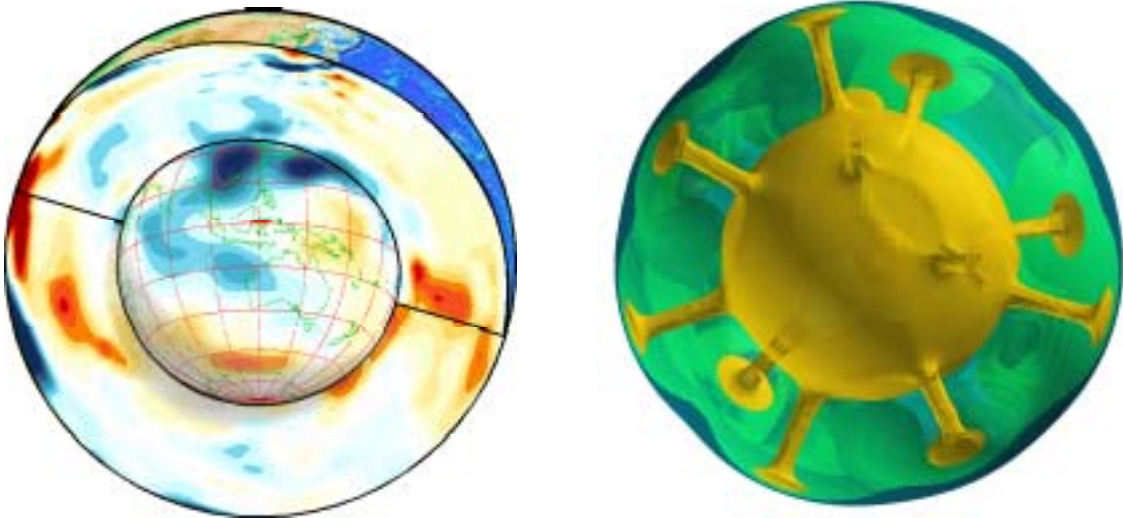


# スタグナントスラブ：マントルダイナミクスの新展開 ニュースレター

No.1 Dec.2004



地震波トモグラフィーによってイメージされたスタグナントスラブ（左、研究項目A01）と  
3次元マントル対流モデルによる対流パターン（右、研究項目A04）

# 目 次

スタグナントスラブ：マントルダイナミクスの新展開	.....
沈み込むスラブを追跡する！	
プロジェクトの概要	.....
研究計画	
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	.....
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	.....
海底広帯域地震観測でスタグナントスラブを診る	.....
海底電磁気機動観測でスタグナントスラブを診る	.....
スラブ滞留・沈降過程の物質科学的モデリング	.....
スラブ滞留・崩落過程の物質科学的モデリング	.....
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	.....
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	.....

## スタグナントスラブ：マントルダイナミクスの新展開 沈み込むスラブを追跡する！

深尾良夫（海洋研究開発機構）

地震・火山噴火などの自然現象は地球表面を覆う十数枚のプレートと呼ばれる岩板の運動の結果として説明されています。プレートは中央海嶺と呼ばれる海底大山脈で生まれ、太平洋を縁取る海溝から沈み込んで地表から消滅します。環太平洋は年老いたプレートの巨大な墓場なわけです。マントル（地球の外側半分を占める岩石の世界）に沈み込んだプレート部分は特に「スラブ」と呼ばれています。最近地震波を使って地球内部の写真を撮る技術が発達し、スラブの行方を追跡することができるようになりました。それによれば、沈み込んだスラブは、上部マントルと下部マントルの境目付近の遷移層内に一旦横たわろうとする著しい傾向があることがわかってきました。図を御覧ください。環太平洋に沿って沈み込んだスラブが地震波の伝播速度が速い場所として映し出されていますが、そのスラブが深さ 700km の ±300km 内で横に寝る傾向にあるのが見て取れます。こうした傾向にあるスラブは本特定領域の研究者によって「スタグナントスラブ」（＝滞留スラブ）と名付けられました。また日本や伊豆・小笠原の断面図を見ると、マントルの最下部にスラブの残骸と見られる異常が映っています。これは遷移層に滞留したスラブが溜まりすぎて重力的に不安定になり下部マントル深く落下したものと解釈されています。本領域研究の目的は、沈み込むスラブが何故遷移層に横たわろうとしその後どうして下部マントル深く落下するのか、またスラ

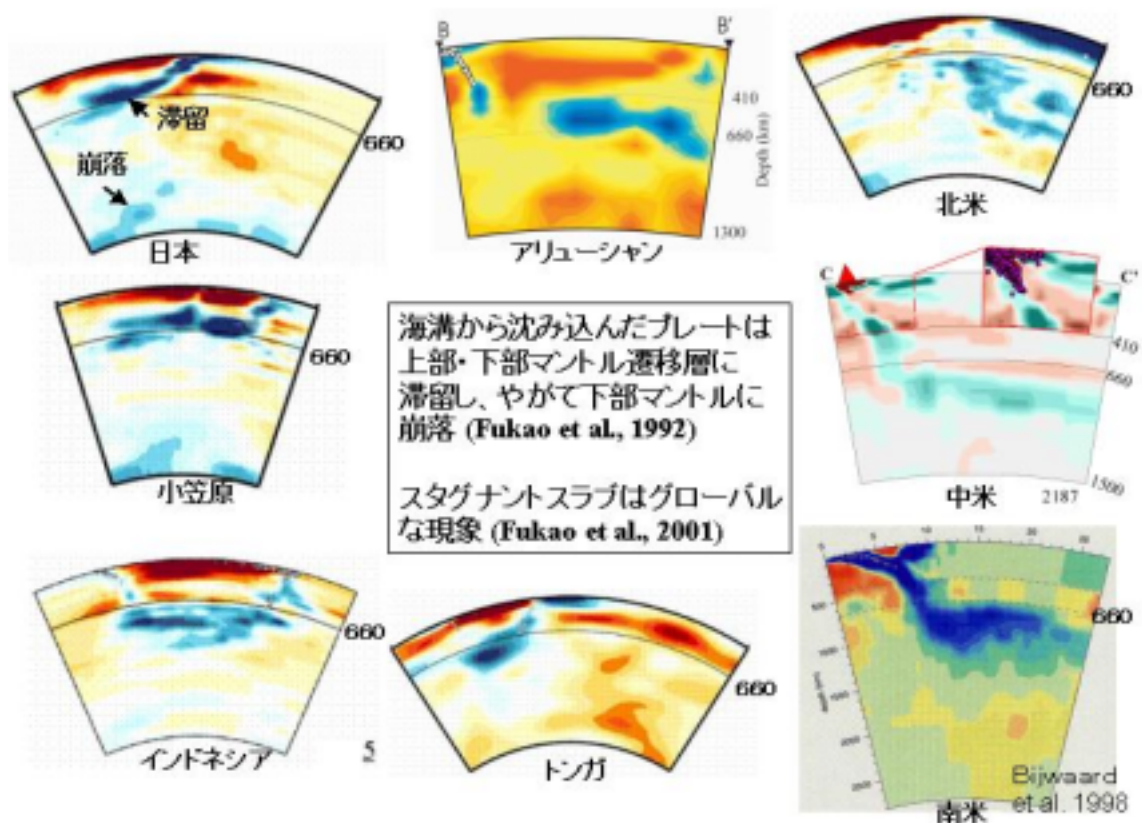
ブの滞留・落下に伴って何が起こり地球史にどのような影響を与えるかを明らかにすることにあります。

この目的を達成するために本領域では3つのアプローチを取ります。第1は海底における地震・電磁気観測とトモグラフィ解析とを組み合わせた観測アプローチです。世界トップクラスの海底観測技術を駆使してスタグナントスラブの実態と周囲のマントル環境を明らかにします。第2は最高輝度の放射光施設と高圧実験装置を組み合わせた実験アプローチです。世界をリードする実績を背景にスラブ滞留のメカニズムと落下の過程を物質科学の側面から明らかにします。第3は上記の研究成果を取り込んで世界最速コンピュータ（地球シミュレータ）を動かす計算アプローチです。数理学の研究者と共同でマントル対流の新しいシミュレーションコードを開発しスラブの滞留と落下の地球史的な意義を明らかにします。詳しくは、本ニュースレターを御覧ください。

皆さんは「マントル対流」という言葉を御存知でしょうか？マントルは火山地帯を除けば全て固体の岩石でできています。しかし固体といえども長い地質時間では対流を起こし深部の熱を地球外に放出しています。このゆっくりした対流が「マントル対流」です。プレート運動はマントル対流のごく表層の動きに他なりません。また地球史上には今の地球からは想像もできない激変の時代があったことが知られています。

手近な所では1億年前の「白亜紀超温暖期」のグローバル火山活動が有名ですが、こうしたグローバルイベントもマントル対流の存在を考えて初めて理解可能な現象です。沈み込むスラブの遷移層への滞留と下部マ

ントルへの落下はマントル対流の本質と考えられ、地球内部の運動と進化を理解する上で重要な現象です。この現象を解明することにより、マントルダイナミクスの新展開が期待されます。



## プロジェクトの概要

深尾良夫（海洋研究開発機構）

本領域は、プレート沈み込みに関わる「スタグナントスラブ」の概念をキーワードに、地球物理観測、超高压地球科学、計算機科学の先端グループが結集し、5年間でマントルダイナミクス研究に新展開をもたらすことを目的に設定される。具体的には(1)カムチャッカから日本を経てマリアナに至

る世界最大の沈み込み帯に沿ってスタグナントスラブの全貌を明らかにするため、特に分解能の低い極東ロシア域とフィリピン海域において長期アレー地震観測・電磁気観測を実施する。(2)沈み込むスラブが上部・下部マントル境界付近で滞留するメカニズムと滞留の後に崩落するメカニズムを

マントル物質に関する高温高圧実験により明らかにする。(3)現実の地球に近いパラメタ空間・モデル空間で世界最速コンピューター(地球シミュレータ)による対流モデリングを行い、その結果と観測・実験結果とを合わせて、スタグナントスラブの滞留と崩落のメカニズムを明らかにする。また滞留と崩落の過程がプレート運動史ひいては地球史に及ぼす影響を明らかにする。「スタグナントスラブ」現象は、その発見から一般的存在の検証までを(命名まで含めて)一貫して本領域参加者がリードしてきたもので、現在では、マントルダイナミクスにおけるその役割が世界的に注目され

ている。スタグナントスラブが注目されるのは、単にそれがマントル遷移層において最も際立つ現象というだけではなく、マントル対流の非定常性と関わってプレート運動史ひいては地球史を理解する1つの鍵と見られるからである。本計画はこの「スタグナントスラブ」の概念を独自の切り込み口とし、そこに日本が世界に誇る海底地球物理観測技術と高温高圧実験技術を特色ある研究手法として持ち込み、世界最速コンピュータを駆使して、下降流の側からマントル対流の全容に迫るアプローチを取ろうとするものである。

#### イメージング分野

##### A01: 地震学的イメージング

計画研究ア: ロシア極東部広帯域地震観測による滞留スラブのイメージング

計画研究イ: 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

##### A02: 海底観測によるイメージング

計画研究ウ: 海底広帯域地震観測でスタグナントスラブを診る

計画研究エ: 海底電磁気機動観測でスタグナントスラブを診る

#### モデリング分野

##### A03: 物質科学的モデリング

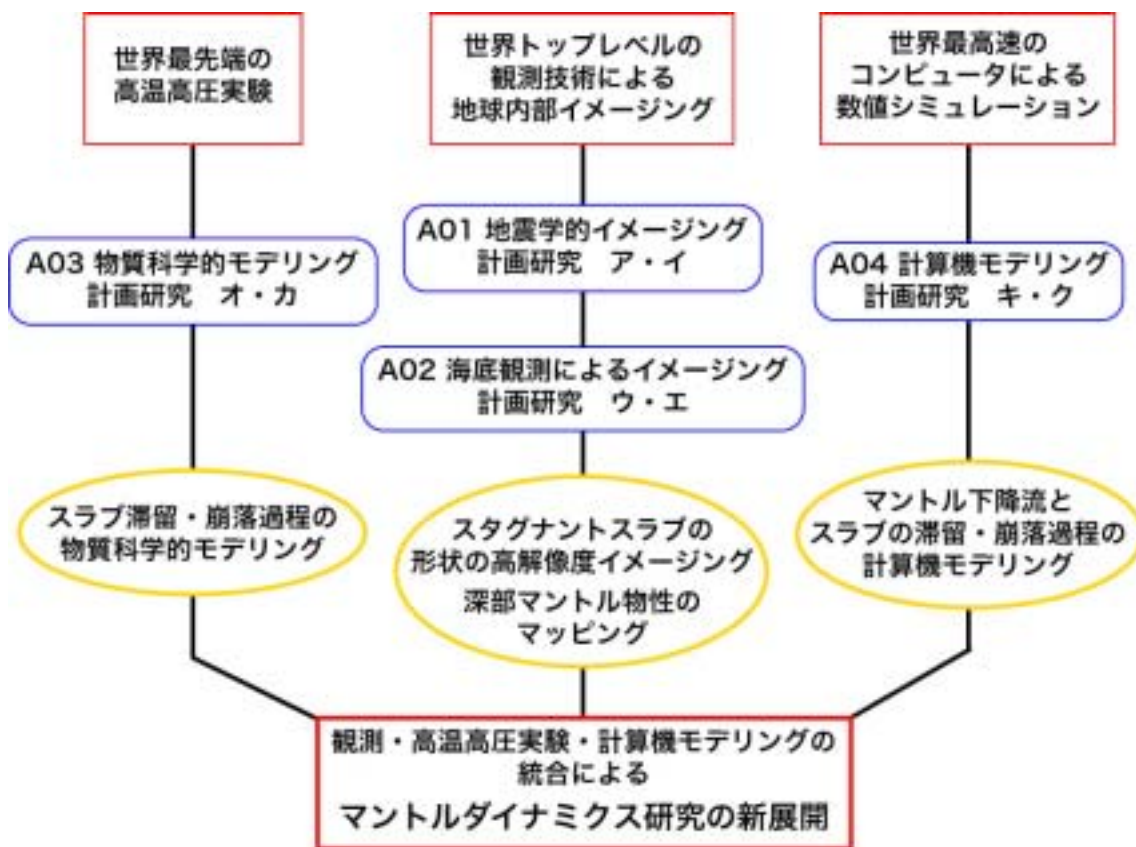
計画研究オ: スラブ沈降・滞留過程の物質科学的モデリング

計画研究カ: スラブ滞留・崩落過程の物質科学的モデリング

##### A04: 計算機モデリング

計画研究キ: 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

計画研究ク: 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



研究経費  
総額 1,635,407千円

平成16年夏

平成21年3月

総括班：観測分野とモデリング分野との連携のリード  
研究推進のための評価と連絡調整  
研究進展状況の報告・広報  
研究集会及び国際シンポジウムの開催

## 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

笠原稔（北海道大学・地震火山観測センター）

千島海溝・日本海溝から年間 8cm という世界でも有数の早い速度で沈み込みを続けている太平洋プレートは、活発な深発地震活動を深さ 660km 付近まで伴いながら、南側は 660km 層の上で、北側は 880km 層を突き抜けて深さ 900km 付近で滞留しているものと推定されている。この場所は、ロシア沿海州・サハリン・オホーツク海に当たる。しかしながら、この地域の地震観測網は空白状態にあり、この滞留スラブを直接通過した地震波線が得られていないために、地震波トモグラフィ - で得られた画像の分解能が著しく低いという事実がある。本研究では、滞留スラブが存在すると推定されている上記の地域において、広帯域地震計による臨時地震観測網を日露共同で展開し、滞留スラブを「直接」通り抜けてくる地震波形データを取得することにより、滞留スラブの南側から北側にかけての形態変化を鮮明に描写する。また、滞留スラブの周囲マントル（特に大陸上部マントル）の非均質構造を表面波解析により求めると共に、遷移層微細構造を変換波・反射波解析により求める。以上を統合して、滞留スラブの形態変化の要因を観測の側から明らかにする。

### 研究の進捗状況

図 1 が、今回の計画で設置を予定している観測点分布である。図からわかるように、全ての観測点はロシア連邦極東地域に分布する必要があり、ロシア連邦との 2 国間共

同研究という位置づけで進められなければならない。ロシアとの共同研究に関しては、1995 年北サハリン地震の際の共同観測に端を発して、日ロ科学技術協力委員会合意協力プロジェクトとして極東地域の研究所との間での共同観測・研究が、1995 年から続けている。その発展的プロジェクトとして今回の 5 カ年計画は位置づけられている。

表 1 に各観測点の位置と関連するロシア側の研究所を示してある。ロシアの地震観測は、基本的にはロシア科学アカデミー・地球物理観測機構 (Russian Academy of Science, Geophysical Service; RAS,GS) の下にある、各地域の地震観測所が受け持っている。各観測所は、例えば、カムチャツカの場合は、Kamchatkan Experimental Methodical Seismological Department (KEMSD) と呼ばれる。同様の組織が、サハリン州、マガダン州にもあり、表 1 に示した SEMSD, MEMSD がそれである。このほかに、沿海州にはこの組織がないので、応用数学研究所 (Institute of Applied Mathematics; IAM)・国立極東大学との連携の下に、ウスリースク近郊にある天文台の敷地に観測点を設置できるよう、了解を得ている。また、ハバロフスクでは、テクトニクス・地球物理学研究所 (Institute of Tectonics and Geophysics; ITG) との連携により、ハバロフスク観測点を計画している。サハリンにおいては、海洋地質学・地球物理学研究所 (Institute of Marine Geology and Geophysics; IMGG), カムチ

チャッカにおいては、火山地震研究所 ( Institute of Volcanology and Seismology; IVS ) との連携の下に進めている。

8月中旬、カムチャッカにおいて開催された、**The 4th Biennial Workshop on Subduction Process, along Japan-Kamchatka-Alaska arc** において、カムチャッカ・マガダン・サハリン・ハバロフスクからの各機関の代表との会談を行い、基本的な合意を得た。最も多くの観測点を管轄しているサハリンを12月上旬に訪問し細部の話し合いを進めた。先に述べたように、多数の研究所が関係していることから、包括的な合意をロシア科学アカデミーの大本との間で明確にしておく必要があることが指摘された。5年前に、基本的な合意書を交わしているため、来年1月には、その延長をモスクワで話し合うことにしている。

### 観測点現地調査

10月中旬に、来春設置予定点のうち、極東シベリアの4点の現地調査を行った。図1の観測点、1~4である。観測点4、Gornii は、サハリン地震観測所の管轄であり、ユジノサハリンスクから担当者に参加してもらえた。3階建てのアパートの1階角の部屋を観測室として使用して、その地下に地震計室が設置してあった。オペレーターは、60歳を越していると思われる女性2人である。訪問した10月20日、すでに積雪10cmの冬景色であった。観測点2、Terney も、サハリン地震観測所の管轄であり、ここは独立した地震観測所があり、50代前半の夫婦がオペレーターであり、メールもつながっており、良好な観測が期待できることが確認できた。ここまでは、ウラジオストッ

クから、750kmの距離であり、自動車で行くのであるが、2日がかかりになる。観測点1、は、ウスリースク近郊にある天文台である。ここのインターネット環境はかなりよく、できればここのデータは、ウラジオストックの極東大学まで転送することを検討している。できるだけ、観測データがロシアの若い研究者・学生の目に触れるようにすることも重要なことであると考えている。観測点3、は、ハバロフスク市内の地理学研究所の地下室を予定している。予定点のうち、観測点7、Oxa, と12、Kamenskoe においては、すでに、CMG および STS-1 による広帯域地震観測が日ロ協力研究として進められている。観測点8、Timosk, 11、Klyuchi、については、すでに現地調査済みであり、来年度の設置が予定されている。観測点、5、6、9、10 に関しては、来年度に現地調査を予定しており、2006年の早い時期には、全ての観測点を稼働させる予定でいる。

8月上旬、交付決定通知を受けて、観測システムの根幹を成す、STS-2型地震計の発注を行ったところ、納期6ヶ月とのことで、2005年1月末に観測機材は全て整うことになる。2月中旬に、サハリンからの共同研究者を札幌に招聘して、全機材の点検のために平行観測を行う予定である。

### 期待できる効果

図2に、現状のIRIS観測を10年間続けた場合と、今回の観測網が稼働して4年間で得られるデータによる、表面波トモグラフィ - の解像度の変化を示しておく。





図 1

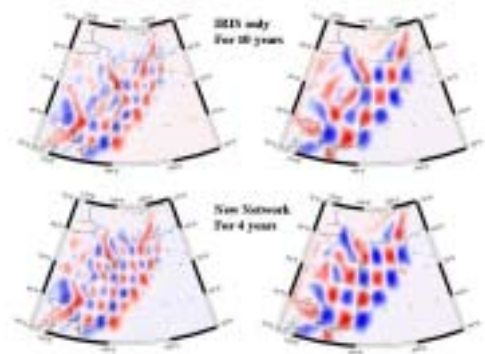


図 2

表 1

No.	Station Name	Lat	Lon	Height	Institution	Start
1	Vladivostok	43.52	132.07		IAM/AO	
2	Terney	45.05	136.62		SEMSD	
3	Khabarovsk	48.63	135.35		ITG	
4	Gornii	50.81	136.46		SEMSD	
5	Zehya	54.14	127.42		SEMSD	
6	Nikolaesk-na-Amur	53.23	140.70		SEMSD	
7	Oxa	<b>53.64</b>	<b>142.83</b>		<b>SEMSD</b>	<b>2001 ~</b>
8	Timosk	50.83	142.67		SEMSD	
9	Sevro-Krilyusk	50.71	154.40		SEMSD	
10	Oxotsk	59.45	143.00		MEMSD	
11	Klyuchi	56.14	161.29		KEMSD	
12	Kamenskoe	<b>62.54</b>	<b>165.11</b>		<b>ERI /KEMSD</b>	<b>1996 ~</b>

## 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（海洋研究開発機構）

### 研究計画

本研究（計画研究イ）では、フィリピン海・北西太平洋に設置される広帯域海底地震計（計画研究ウ）と極東ロシアに設置される広帯域地震計（計画研究ア）のデータを既存観測点のデータと併せて解析することによって以下の対象をこれまでにない高分解能で推定するとともに、計画研究ア、ウ、エで得られる地震観測データと電磁気データのためのデータセンターを立ち上げ、その運営を行う。

#### (a) 西太平洋沈み込み帯滞留スラブの構造・形状

新たに得られる地震データと従来のデータを用いた地震波トモグラフィーにより、カムチャツカ・千島から日本、伊豆・小笠原、マリアナにいたる西太平洋沈み込み帯全体にわたってスラブの滞留形状と深さや、準安定相・海洋性地殻の存在などを考慮した内部構造を連続的に空間分解能 100km でイメージングする。

#### (b) 西太平洋沈み込み帯におけるマントル不連続面凹凸

スラブ滞留にマントル不連続面がどのように寄与しているかを明らかにするために、マントル不連続面の凹凸を空間分解能 300km で詳細にマッピングするとともに、トモグラフィーの結果と併せて、滞留スラブ内外の温度異常・含水率を推定する。

#### (c) データセンターの立ち上げ・運営

特定領域研究「深部スラブ」で得られる地震波・電磁気的全データを管理し、当該領域に参加する研究者の解析に資するためのデータセンターの立ち上げ・運営をおこなう。

具体的な解析手法としては、(a)についてはP,S 波走時トモグラフィーと広帯域波形データの波形インバージョンによって西太平洋マントル構造を推定して滞留スラブを捉え、(b)についてはレシーバー関数法、ScS 反射法などによって滞留スラブ付近のマントル不連続面凹凸を求める。また深発地震のSP、PS 変換波解析などにより、海洋性地殻やスラブ内部準安定相などのスラブ内部微細構造の研究をおこなう。

### 研究の狙い

本研究の特色は、従来、海域であることやアクセス困難であるために観測が難しかった極東ロシアでの観測データと日本の高密度観測データを併合解析することによって、西太平洋沈み込み帯全域の太平洋スラブが上部マントルから下部マントルへどのような過程を経て沈み込んでいくのかを明らかにできることである。

これは、世界をリードする日本の広帯域海底地震観測と、ロシアとの共同研究の長い経験があって初めて可能になった。

スラブの遷移層周辺での滞留と崩落は、マントル対流の非連続性・間欠性を作り出す重要な過程である可能性が高いと考えら

れる。本研究で得られる滞留スラブのイメージは、電気伝導度から見た滞留スラブのイメージと併せて解釈し、さらに超高压・高温岩石学と結合させることによって温度や含水率など組成の推定に用いることができる。

さらにそれらがモデリングに利用されることによって、全マントル規模の対流・物質循環のモデル構築へと発展することが期待できる。

## 準備状況

### (a) 既存データの準備

全地震波読み取り計画によって、本研究に必要な各種実体波到着時刻データの整備を2年前から開始し、データベースが着実に整備されている。現在は7万の走時データが蓄積されており、他に比類のないデータベースとなっています。このデータに当該領域の新データを加えて本研究を実施する準備はすでにできている。

### (b) 解析手法、計算プログラム

本研究で行う予定の地震波走時トモグラフィや波形インバージョン、マントル不連続面凹凸推定などの地震波解析手法とその計算プログラムはすでに開発済みである。

#### ScS 反射法

日本列島に高密度に展開されている防災科研 Hinet 傾斜計で記録された sScS 波の後続波からマントル不連続面の凹凸を推定する手法を開発し、滞留スラブと関係すると見られる不連続面の凹凸を画期的な空間分解能で明らかにした(図1)。

このような研究は、IFREE が国内外の研究機関との共同研究によって西太平洋地域の地震データを蓄積・解析してきた積み重

ねによって可能となった。本研究では、構築されてきた高密度地震データベースに当該領域で得られる新データを加えて、この手法を発展・適用していく。

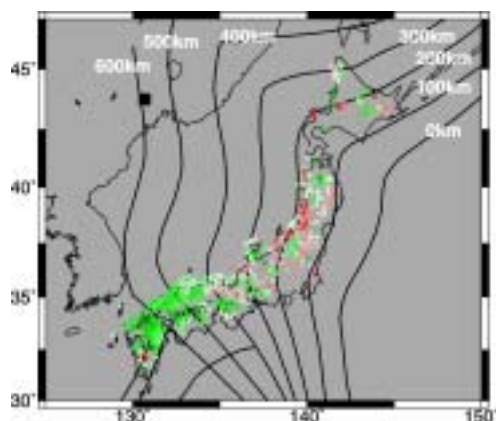


図1 防災科研 Hi-net 傾斜計データを用いて得られた 660km 不連続面の深さマップ。暖色系は標準より浅く、緑系は深い。西日本では 680-690km まで深くなっている(東野他 2003)。

広帯域 OBS データのレーシーバー関数解析によるフィリピン海マントル不連続面凹凸解析に用いたのは、OHP 計画によって実施されたフィリピン海横断海底広帯域アレーのデータである。まず観測点ごと、地震ごとに3成分波形データからレーシーバー関数を求め、これを近い観測点ごとに全ての地震について重合して S/N 比を向上させた。

フィリピン海内部での 410, 660km 不連続面深度の地域性の結果とその地理的位置を図2に示すと、特徴的なのは 660km 不連続面がこの測線上で 690-710km と非常に深いことである。本計画研究では、面的に配置された広帯域海底地震計のデータから、フ

フィリピン海のマンテル不連続面凹凸の面的分布が推定できると期待している。

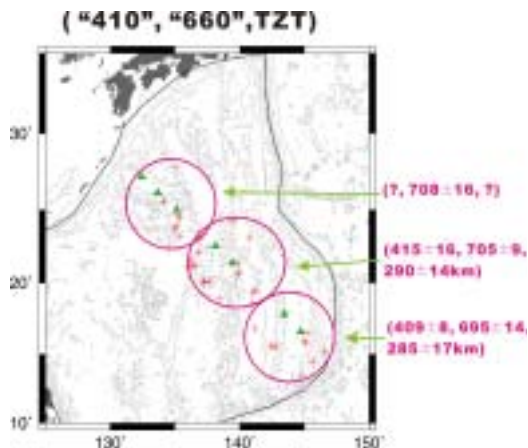


図2 フィリピン海の“410km”、“660km”不連続面の深さと遷移層の厚さ。三角は海底観測点、+はPs変換波が深さ660kmを横切る点。

### 新データを使った実体波走時トモグラフィーによる分解能テスト

西太平洋沈みこみ帯について、当該領域研究で取得されるロシア・フィリピン海の地震データによってマンテル遷移層付近の空間分解能がどのように改善されるかをテストした。カムチャツカ、千島、マリアナ弧で大幅な分解能の改善が期待されることがわかった(図3)。なお、この結果は当該領域のロシア・フィリピン海における地震観測点の位置決定の際に考慮されている。

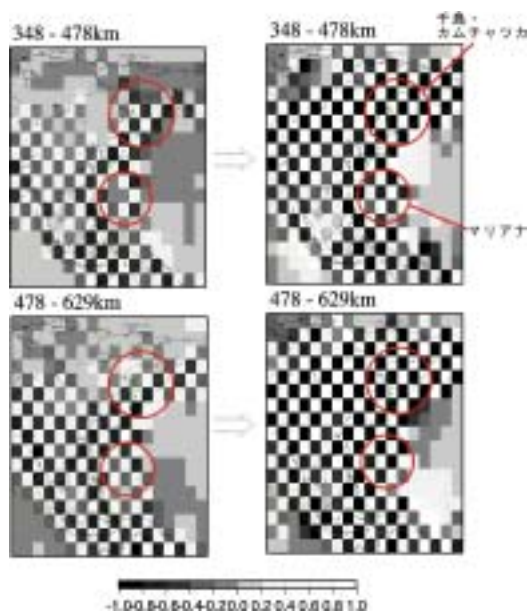


図3 西太平洋沈みこみ帯マンテル遷移層におけるP波トモグラフィーの分解能。左は既存のISCデータのみ用いた場合、右は当該領域で取得されるロシア・フィリピン海の地震データを加えた場合。

### 年次計画

#### 平成16年度

データセンターのための機材整備

既存データを用いた西太平洋マンテルトモグラフィー、マンテル不連続面凹凸の研究

#### 平成17年度

データセンター運用テストを経て、後半に運用開始

既存データを用いた西太平洋マンテルトモグラフィー、マンテル不連続面凹凸の研究

#### 平成18年度

フィリピン海海底地震観測データ、極東ロシア広帯域地震観測データの解析開始

## 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2005年10月から2008年までの3年間、図1に示す領域での長期繰り返し観測を計画している。伊豆小笠原海溝で沈み込む太平洋プレート(スラブ)は北緯25度より北ではスタグナントスラブは横たわって深さ660kmのマントル内不連続面付近に存在するのに対し、南に位置する北部マリアナ島弧付近で顕著なように南側では急な沈み込み角を持ち、その不連続面を突き抜けているようなイメージがグローバルトモグラフィーの結果から得られている(図2)。しかし横たわるスタグナントスラブの存在

する領域から南方への遷移の様子は、陸上の観測点密度が低いため解像度が低くその正確かつ詳細な様子を把握することは出来ていない。この課題を解決するのが本特定領域研究の一つの主要な目的であり、そのため横たわるスタグナントスラブが存在する四国海盆から存在しなくなる西フィリピン海盆・パレスベラ海盆での対象域直上、及びマリアナ島弧下を通過する地震波を捉える太平洋プレート上に観測点を配置し、高密度な良質の地震記録を取得することを狙っている。

図1 海底地震・電磁気観測点予定配置図(○:地震, +:電磁気, △:孔内地震, □:陸上地震, ◇:旧地震アレイ)。電磁気10点は全期間、地震は中央部8点は共通とし東西側各4点を最初2回の観測で交互に最終年は全16点で観測を実施する。

具体的な観測計画としては、地震観測は 3 回各 1 年間のうち当初 2 回は 12 点を(1 回目は九州パラオ海嶺より東側、2 回目は伊豆小笠原島弧より西側)、3 回目は全 16 点で観測を行う。これは各年に 1 航海を予定し、各観測点で地震計の入れ替えを行うために機材を各年度で 4 台ずつ調達して順次必要な数を揃えていくためである。この航海時には海底電磁気観測 10 点での設置・回収も同時に実施する。使用する広帯域海底地震計は「海半球ネットワーク計画」のなかで開発・実用化してきたもの(図 3)で、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。本観測領域内の T09 付近では 2002 年 10 月から 2003 年 5 月まで同形式の海底地震計により観測が行われており、その期間でのノイズモデル(図 4)とノイズスペクトルの重ね合わせ(図 5)を示す。底層流の変動による地震計の微少な傾

き変化と思われることにより水平動でのノイズレベルはいわゆるハイノイズモデル(HNM)より高いものへと押し上げられているが、上下動は大洋島観測点と同等のノイズレベルを、遠地地震での観測に適する 10 ~ 100 秒の帯域で得られている。また、微動帯の 5 秒より長周期側では HNM 以下のレベルであり、基本的にこの海域は地震観測に適していることが他の海域との比較から分かっている。また、この観測により期待される解像度向上の推定も行っている。図 6 は、過去の 3 年間分のデータから陸上観測と本海底観測でそれぞれマントル遷移層での波線が通過する数を 5 度メッシュの区画ごとに積算した値をグレースケールで示したものである。本観測領域であるフィリピン海内部では陸上観測で殆どカバーされていないのに対して、海底観測を行うことで補完され、解像度が大幅に向上することが期待される。

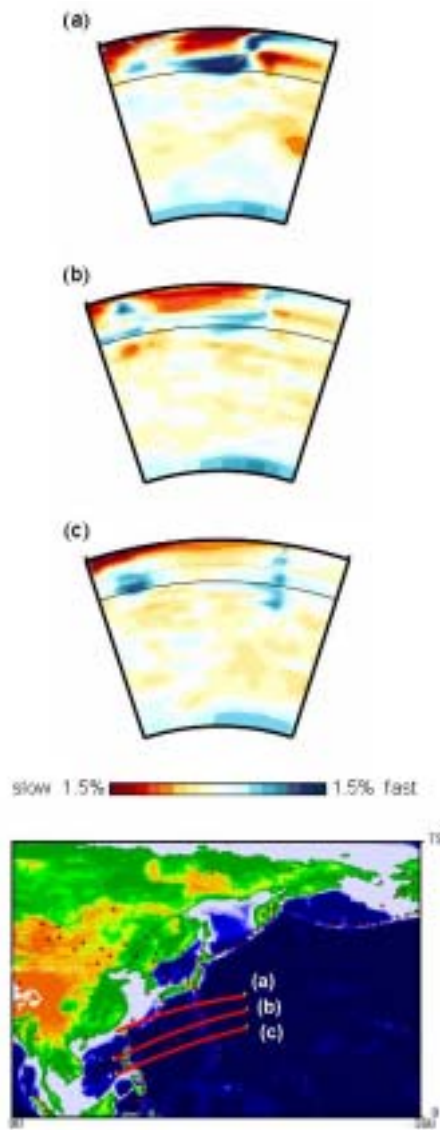


図2 グローバルトモグラフィーに見られるスタグナントスラブの伊豆-小笠原-マリアナ島弧に沿った変化。

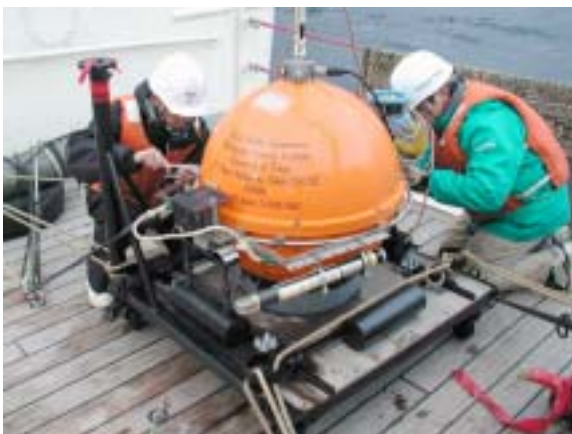


図3 広帯域海底地震計の外観。

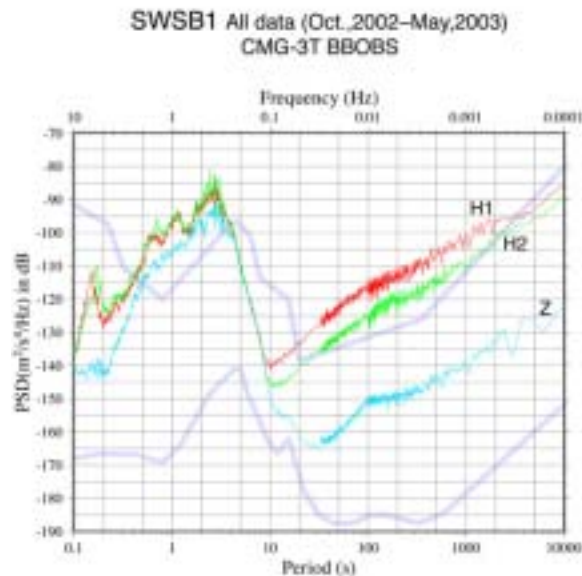


図4 四国海盆南西端での広帯域海底地震計による観測データから計算されたノイズモデル。Z: 上下動、H1&H2: 水平動。裏側の太い線は陸上観測点のデータによる統計的なノイズモデルの上下限。

本年度は来年から始まる観測に向けての広帯域海底地震計の調達・観測航海の公募による確保などを行った。この地震計は地震研究所にて開発しているため、部品単位で調達を行い実際の観測前に完成したものと組み立てられる。長期観測では電池の自然放電による容量低下も問題となるため、来年度の観測に必要な消耗品である電池などは来年の観測前に調達予定である。観測航海は海洋研究開発機構の深海調査研究課題公募に応募し、現在 2005 年 10 月 5~26

日(研究船「かいいい」、K05-15 航海, 和歌山~グアム)で採択内定を確保した。これは初年度の航海で全観測予定点での SeaBeam による精密な海底地形調査を完了させておくことにより 2 回目以降の観測航海での使用船舶の自由度を増やし、民間の作業船での設置・回収航海も可能にするためである。また、各観測点ではエアガン探査も行い、地殻浅部の速度構造を把握し、適切な走時補正が可能となるようにする予定である。



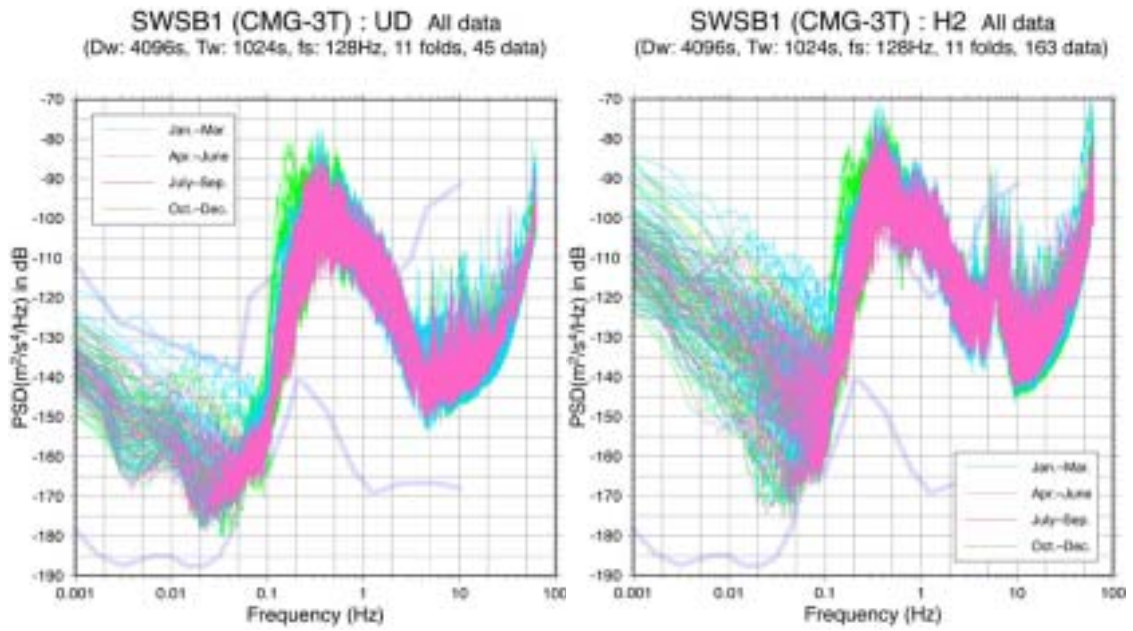


図 5 約半年の観測期間から無作為抽出した地震が起きていない時間帯のスペクトルの重ね合わせで季節毎に色を変えてある。左：上下動、右：水平動の1成分。

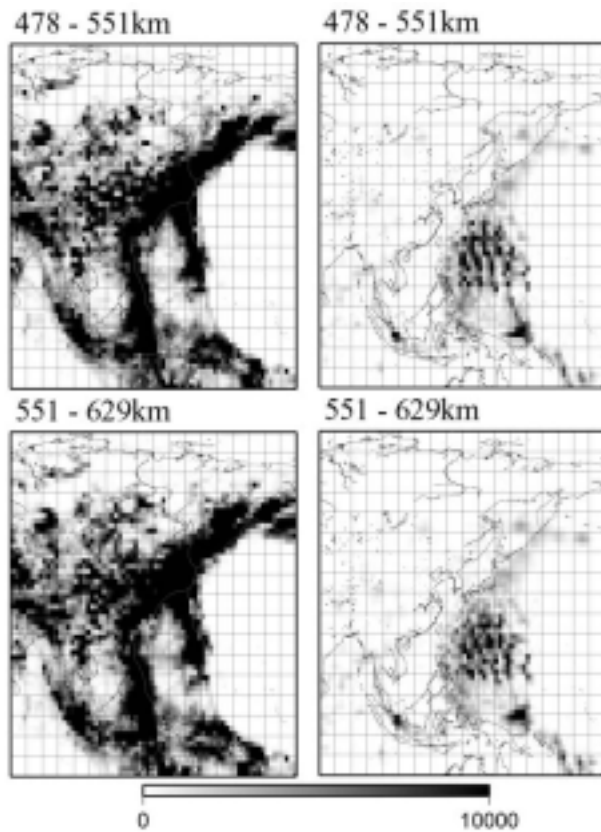


図 6 マントル遷移層を通る波線の合計長。左：既存データ、右：本観測によって期待されるもの。

## 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）

研究代表者 歌田久司（東大・地震研）  
研究分担者 上嶋 誠（ 同上 ）  
同 清水久芳（ 同上 ）  
同 後藤忠徳（海洋研究開発機構）  
同 小山崇夫（ 同上 ）

### 研究目的

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実体視す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。

近年の固体地球科学において、マントルダイナミクスに関する研究分野は目覚ましく発展しつつある。この発展の最も重要な推進力の一つになっているのが、地球内部構造の研究である。特に、「海半球ネットワーク」などの固定観測網を用いた地震波トモグラフィーによるスタグナントスラブの発

見とその一般化は、我々の観測研究グループが世界に先駆けて得た成果である。しかし、固定観測網によって得られる描像は、きわめておおまかなものでしかない。さらに、ダイナミクスの解明のためには、地震学で得られる情報のみでは限界がある。当該領域は、北西太平洋に存在するスタグナントスラブに焦点を絞って、(a)稠密な地震観測、電磁気観測を行って、(b)高分解能トモグラフィー解析を行った結果を用い、(c)高温高压実験および(d)対流の計算機モデリングによるマントル流のダイナミクスの総合的理解を目指して設定される。本計画研究は、このうち(a)と(b)について海底電磁気観測および海底電磁気トモグラフィー解析を実施し、領域全体の研究の推進に寄与する。また、研究の準備状況の項で示すように、機動観測により目標達成に十分な分解能が得られる見通しもついている。冷たいマントル下降流は周囲のマントルに温度擾乱をもたらす。地震波トモグラフィーでイメージされる、日本列島周辺の下降流とスタグナントスラブに対応する高速度異常領域の異常は、この温度場の擾乱によるものと考えられている。しかし、温度場の擾乱を他の効果（部分熔融や水の効果や鉍物化学組成など）から分離することは地震波トモグラフィーだけでは不可能である。ここに本計画研究で行う電磁気トモグラフィーの重要性がある。電気伝導度という地震波速度とは独立なパラメータと速度構造との直接比較さらには高温・高压実験によ

る物性測定を組み合わせた研究は未開拓の分野である。当該領域における研究により、スタグナントスラブだけでなく、深部マントルダイナミクスを解明するための新たな手法の確立に発展することが期待される。

### この研究課題の準備状況

研究計画の策定に先立って、最適な海底観測点の配置の検討を行った。また、既存の海底観測データのコヒーレンス解析により、遷移層の深さを十分な信頼度で探査するのに必要なデータ長は約 800 日であると見積った。さらに、深部マントルの構造に対する解像力が、既存のデータだけの場合に比べ海底機動観測によってどう改善されるかをテストした。テストは、Koyama et al.

(2004)の関係式を用いて P 波トモグラフィー (Fuako et al., 2001) のイメージを電気伝導度に変換したモデルによる理論値を用いて行った。その結果を付図に示す。図 (a) が与えた遷移層内深さ 500 ~ 600km の電気伝導度分布で、西日本からアジア大陸にかけてスタグナントスラブに対応する低電気伝導度領域が見られる。既存の陸上観測網のみによる解析結果 (b) やこれに海底ケーブルのデータを加えた結果 (c) では、この異常構造は不鮮明である。一方、フィリピン海にほぼ等間隔に配置した 10 点の海底機動観測データを加わえた解析結果 (d) では、この異常領域が明瞭にイメージされる。海底機動観測を計画通り実施した時の解像度の向上は目をみはらせるものがある。

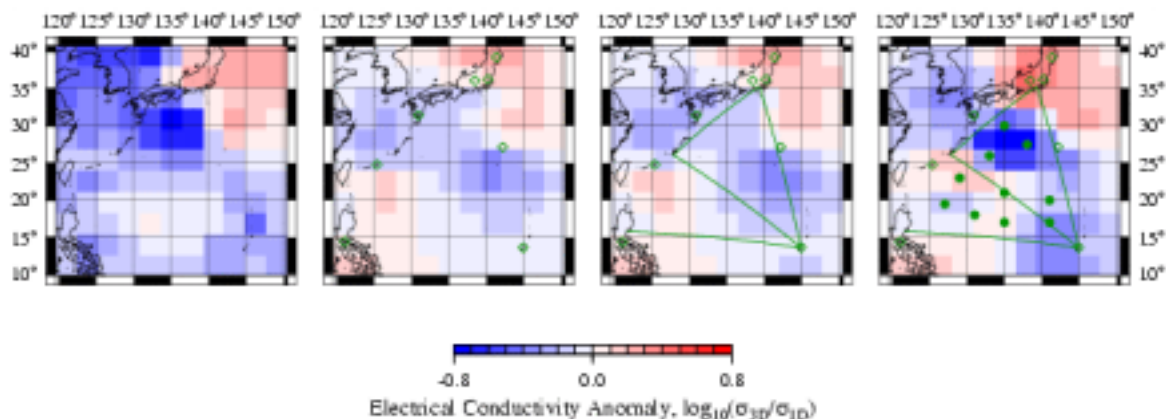


図1 海底機動観測による、マントル遷移層の 500 ~ 600km の深さの電気伝導度分布に対する分解能の改善をテストした結果。左から、(a) 地震波トモグラフィーを参照して作成した電気伝導度モデル、(b) 既存の地磁気観測網のみによるイメージ、(c) 陸上観測網に海底ケーブルデータを加えた場合、(d) 海底機動観測データを加えた時に得られるイメージ。

本研究は、機動観測を実施するフィリピン海周辺の西太平洋地域におけるグローバル観測網（海半球ネットワーク）の長期観測を背景に行うものである。すなわち、観測

網のデータと機動観測データの統合解析によってはじめて上記のような遷移層の電気伝導度不均質構造に対する分解能の飛躍的向上が期待できる。海底ケーブルおよび地

球磁場観測による海半球電磁気観測ネットワークは、平成 16 年度より海洋開発機構を主担当とするコンソーシアムによって運営される体制に移行した。本計画研究への参加者は、コンソーシアムの主要メンバーであり、観測データは本計画研究においてフルに活用することができる。

当該領域で行う研究は、地球電磁気分野にとって極めてチャレンジングである。対象とする地下構造は、従来のグローバルな研究からみればはるかに高分解能であるが、従来のリージョナルな研究よりはるかに大きくて深い。電磁気の探査深度は周波数に依存し、遷移層の深さをイメージングするためには、数日から 10 日という長い周期の電磁気応答関数を用いる必要がある。これまでに、日本周辺海域で 1 年間の長期観測を行った実績はあるが、1 年間のデータ長によって十分な信頼度で応答関数を決定

できるのは周期 5 日程度までであることが明らかになった。遷移層のイメージングを目標とする本研究では、長周期の応答関数推定の信頼度を上げ、使用できる帯域をできるだけ長周期側にのばす必要があり、そのためには、1 年間の機動観測を 3 年間繰り返して同一観測点での長期観測を実現することが不可欠と判断された。

機動観測には、海半球計画で実用化された 1 年間観測可能な機動観測用の海底電磁力計 (LOBEM、図 2 参照) を使用する。この現有品は、地震研究所と海洋科学技術センターとで合計 10 台保有している。本計画研究で新規に作成する 10 台を加える事により、本領域で必要とする分解能を達成するために必要な、10 観測点における 3 年にわたる長期観測データの取得が実現可能となる。

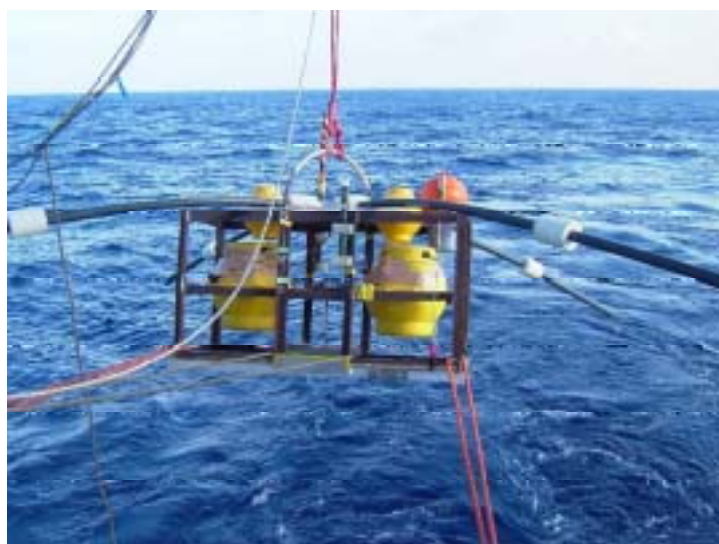


図 2 機動観測に使用する長期型海底電磁力計 (LOBEM)。

## 研究計画

本研究では研究目的を達成するために、海底電磁気機動観測、解析のための手法開発、既存データの収集、電気伝導度構造解析を実行する。研究代表者と研究分担者とが密接に連携して、計画全体の円滑な進行に努める。機動観測の実施計画については計画研究ウの海底地震観測グループと連携協力し、得られるイメージの直接比較を容易にするために、地震・電磁気機動観測の位置はできるだけ同一地点になるよう調整する。

平成16年度には、機動観測に用いる5台の長期型海底電磁力計を購入する。観測担当の分担者らは、次年度の観測実施に備えた感度検定およびランニングテストを、気象庁の地磁気観測所および八ヶ岳地磁気観測所（地震研究所）を利用して実施する。一方、解析担当の分担者らは、電磁気トモグラフィー解析手法の開発および改良をすすめ、過去の研究で開発した構造解析コードの高速化をはかるとともに、逆問題に組み込む際の計算を効率化する。また、国内外の既存の電磁気観測データを収集・コンパイルする。

平成17年度に5台のLOBEMを製作して、現有品とあわせて保有台数を20台とする。これらを用いて、平成17年度から20年度までの3年間、フィリピン海に配置した10ヶ所の観測点で長期海底電磁気機動観測を実施する。この機動観測のための設置回収航海は4回で、そのうち平成18年度と19

年度には一航海で設置と回収を行う。1回目の機動観測が終了し2回目の観測を開始した後、速やかにデータの処理およびインバージョン解析を行う。その結果得られるイメージをもとに、特に高い解像力が必要な地域を絞り込んで、3回目の観測点配置に修正を加える。

最初の設置航海は、海洋研究開発機構の研究船「かいれい」を使用して、平成17年10月に実施する予定である。17年度以降はデータ処理・解析要員として研究支援者を雇用する。観測で取得された時系列データおよび収集・コンパイルした既存の観測データに対して周波数解析を行って、電気伝導度に関する情報を持った電磁誘導応答関数を求める。これらの応答関数を用いて、開発・改良した電磁気トモグラフィー解析手法を駆使して、マントル深部の電気伝導度構造モデルを求める。他の計画研究の結果と比較検討し、総合的モデリングにつなげる。

計画研究で実施する観測データから3次元不均質電気伝導度分布のイメージングを行い、そこからマントル深部の温度構造や水の分布を推定したり、異方性等を考慮した構造解析を行う手法はまだまだ十分に確立していない未開拓の分野である。そこで本領域の目的達成のため、平成17年度と19年度の2回の公募研究を実施して、新たな解析手法の開発とそれら観測データへの適用をはかることにしている。斬新なアイデアをもった研究者の参加を期待する。

## スラブ滞留・沈降過程の物質科学的モデリング

入船徹男（愛媛大学地球深部ダイナミクス研究センター）

### 1. はじめに

日本のお家芸である、多アンビル高圧装置を用いた急冷回収実験に基づく実験により、下部マントル上部までの温度圧力条件下での地球深部構成物質の相関係の決定が可能になっている。このような手法を用いて、マントルの代表的化学組成であるパイロライトや、沈み込むスラブの主要構成物質である中央海嶺玄武岩などの相変化の詳細が1990年代までに明らかにされてきた。

一方放射光の強力X線の超高压実験の応用が1980年代に開始された。このような“X線その場観察実験”は、第3世代の放射光実験施設 SPring-8 の完成と、大型のマルチアンビル装置を備えた高圧地球科学ビームラインの建設により、とりわけ1990年代末から多くの重要な研究成果をもたらしつつある。SPring-8 においては、当初設置されたマルチアンビル装置 SPEED-1500 に加え、H.12-14 年度特定領域研究「超高压地球科学」(大谷栄治氏代表)により新たな改良型装置 SPEED-MkII が設置され、ハード面では諸外国の追随を許さぬ環境が整いつつある(図1)。

これまでのX線その場観察実験の大部分は、比較的単純な化学組成の鉱物相変化の観察、相転移境界の精密決定、高压相の状態方程式の決定など、X線回折実験を中心としたものであった。これらの研究により地球内部の地震学的不連続面の深さや、マントル物質の密度変化に対して重要な実験



図1

データが得られつつある。本研究ではこのような手法をより現実的なマントル物質やスラブ物質に対して適用し、それらの相変化や密度変化を精密に決定するとともに、X線回折その場観察に超音波測定、電気伝導測定、熱伝導測定などの物性測定技術を組み合わせることにより、これらの物質の様々な物性の精密決定をめざしている。また、スラブのレオロジカルな性質に関しても、高压実験を手段として用いた様々なアプローチによる物質科学的制約を試みる。

### 2. 重点的研究課題

マントルおよびスラブ構成物質に対し、超高压実験、放射光実験、物性測定、および透過・走査電子顕微鏡、赤外・ラマン分光、EBSD、SIMS 等様々な分析手段や実験方法を組み合わせ以下のような研究課題に重点的に取り組む。特にマントル遷移層領域を中心とした10-20GPa領域での実験を集中的におこない、この領域におけるマントルの化学組成の解明と、そこに沈み込む

スラブの沈降および滞留過程の実験的制約をおこなう。具体的な物質としてはマントル遷移層において特に重要である、メージャライトガーネットやリングウッドイトに焦点を当てた研究をおこなう予定である。

### スラブおよびマントル構成物質の相変化と密度変化

スラブと周囲の密度差は、スラブの挙動を規定する重要な要因である。放射光とマルチアンビル装置を組み合わせた X 線その場観察実験において、 $\text{SiO}_2$ ,  $\text{MgSiO}_3$ ,  $\text{Mg}_2\text{SiO}_4$  などの単純な化学組成を持つ物質の相転移境界や状態方程式 (P-V-T 関係) が高い精度で決定されている。

ここでは更に Fe, Ca, Al などの次に重要な化学成分の効果、また現実的な多成分系に対する実験をおこない、スラブ構成物質およびモデルマントル物質の密度変化を低温のスラブも想定した広範な温度条件下で直接決定する。また、マントルダイナミクスの数値計算に必要な非圧縮率や熱膨張率といったパラメーターやそれらの組成依存性のデータを提供することをめざす(図2)。

更に、 $\text{H}_2\text{O}$  や  $\text{CO}_2$  といった揮発性成分の影響や、微量元素も含む系の相平衡実験や元素分配実験、また融解実験もあわせておこない、

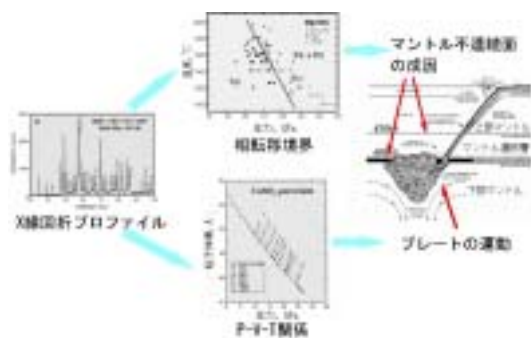


図2

地球化学的観点からのスラブの挙動に関しても実験的制約を与えることも併せておこなう予定である。

### 高圧相の弾性波速度精密測定

スラブの沈降・滞留過程を明らかにするためには、マントル遷移層の物質構成を明らかにする必要がある。この領域の主要構成鉱物、が(変型)スピネル型のリングウッドイト(あるいはウオズレイト)とメージャライトであることは一般に受け入れられているが、その割合に関しては前者が多いパイロライトと、後者を主成分とするピクログライトという2つのモデルが提唱されている(図3)。

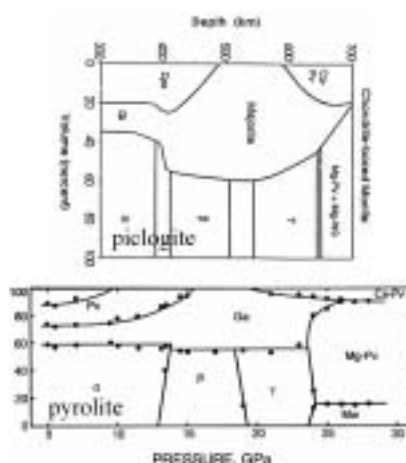


図3

本研究では超高压下での超音波測定と放射光 X 線を組み合わせることにより、特にリングウッドイトとメージャライトの高温高压下での弾性波速度精密測定をおこなう。実験条件は、20GPa、1800k という、従来達成されていない温度圧力条件のもと、X 線透過像を用いた試料長や X 線回折を用いた発生圧力のリアルタイムモニターをおこないつつ、超音波パルス法によりこれらの弾性波速度を 1% 程度以下の精度でおこな

う予定である。

本研究により上記の2つのモデルの妥当性に関する決定的なデータが得られるものと思われる。また、このような多結晶体を用いた測定とは独立に、高圧相の大型単結晶育成技術の開発をおこない、共振法あるいはギガヘルツ領域の超音波パルス法を用いた弾性定数の精密決定も平行して試みる予定である。

### スラブのレオロジー

スラブの動的な挙動の解明には、それを構成する高圧相の変形メカニズムを明らかにすることが重要である。本研究ではリングウッダイトやメジャライトの高圧下での強度や変形挙動に関する実験データを、放射光X線を用いた回折X線の強度プロファイルの解析から制約する。また、これらの高圧相の高温高圧下での粒成長など微細組織の解析に基づき、スラブやマン托ルの粘性変化や異方性を検討する。

実験の一部はAPSに導入された高圧変形装置(D-DIA)と放射光の組み合わせによりおこなうが、急冷回収実験試料のSEMやEBSDを用いた解析も併用する。また、近年鉍物のレオロジーに対するH<sub>2</sub>Oの影響の重要性が指摘されているが、可能な限りの無水条件下での高温高圧実験が可能な実験手法を開発し、粒径など微細組織の変化を含む水条件下の場合と比較検討する。

### その他の関連研究

放射光とマルチアンビル装置を用い、更にこれに多様な測定系を組み合わせることにより、マン托ル遷移層~下部マン托ル上部、また沈み込むスラブの構造や動的挙動

に関連する様々な実験的研究をおこなう。特に高分解能CCDカメラを組み合わせたメルトの粘性測定、メルトの構造解析、高圧相の電気伝導率や熱伝導率の測定など、新しい技術開発をおこないながらより多様な物性測定に基づくスラブの挙動解明をめざす。また、天然の含水岩石を用いた高圧実験などに基づき、現実的なスラブ中の相転移や変形挙動に対する水の役割を検討する。更に下部マン托ル上部領域に至ったスラブ物質の挙動を解明するために、焼結ダイヤモンドアンビルを用いた50GPa、2000K領域での相転移およびP-V-T実験もおこなう予定である。

## 3. 準備状況と研究計画

### 現在の準備状況

主要な研究手段である放射光とマルチアンビル装置を用いた実験は、主にSPring-8の高圧地球科学ビームラインでおこなう。特定領域研究「超高压地球科学」において、新たな放射光専用超高压装置SPEED-MkIIが設置されたが、本特定領域研究では更にこれを改良・発展させるとともに新たな測定装置を導入することにより高度化を図る。

最初の重点課題である多成分系の相変化と密度変化に関しては、試料の封入方法や酸素雰囲気制御、また得られた混合相の回折プロファイルの精密解析において、すでに技術的にほぼ確立されている。また、白色X線を用いながら角度分散的手法を導入したX線その場観察実験技術も開発しつつあり、高温高圧相の高温高圧下での高精度結晶構造解析の試みもなされている。

第2の高温高圧下での弾性波速度測定に関しては、既に15GPa、1000K程度の条件下



で放射光 X 線回折および超音波測定を同時におこなう技術を達成しており、現在より高い圧力温度下での測定をめざした技術開発がおこなわれている(図4)。一方でこのような測定に適した高圧相焼結体合成技術

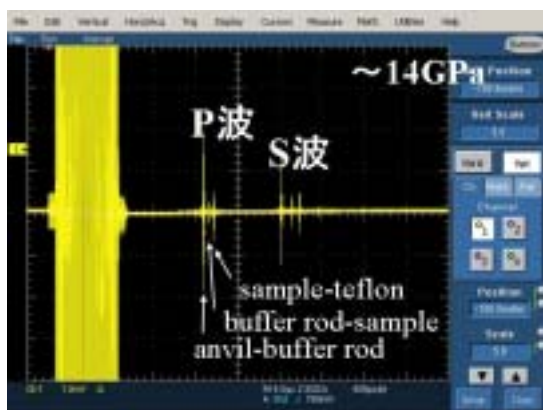


図4

の開発や、大型単結晶の合成技術の開発もおこなっており、超音波測定用の良質な試料が得られつつある。

また、高圧下でのレオロジーに関連しては、放射光と SPEED-MkII あるいは D-DIA を用いた試験的な研究がおこなわれるとともに、回収試料の組織観察に基づく高圧相の粒径変化などからスラブの粘性を制約する試みが始まっている。その他の関連研究においても、技術開発を含めた取り組みが開始されており、一部には新しい実験結果も得られつつある。

## 研究計画

(平成 16, 17 年度)

本研究の重要目的である放射光とマルチアンビル装置を組み合わせた、マントル遷移層領域での高圧相の各種物性精密測定をめざし、必要なハードウェアやソフトウェアの整備や開発、また実験技術の開発を主要な課題とする。そのためには、本計

画研究の中心舞台である SPring-8 の高圧地球科学ビームラインに設置されている SPEED-MkII 関連の整備・高度化および維持・管理が必要である。平成 16, 17 年度にはこれに関連した高分解能 CCD カメラや各種物性測定に必要な直流電源等の機器の設置および調整、またその他の測定系や関連するソフトウェアの高度化をすすめる。このために博士研究員を採用し、SPring-8 に常駐できる体制を整え、自らの研究とともにこれらの機器の高度化や整備、また維持・管理をその業務の一部とすることを要請する予定である。

技術開発面においては、特にこの間に 20GPa、2000K 領域での超音波と X 線同時測定の達成をおこなうとともに、高圧下焼結技術の開発により、リングウッダイトおよびメージャライトの良質多結晶焼結体試料の合成をおこなう。また高圧下での大型単結晶合成法を開発し、ステショバイトなど高圧相の 100 ミクロン~ミリサイズの良質単結晶の合成をおこなう。更に D-DIA による変形実験や、高温高圧 X 線回折プロファイルの精密解析技術の開発や応用をおこない、多成分系の精密相同定や多結晶試料の結晶構造解析をマントル遷移層条件下で可能にする。

研究体制は図 5 にあるように愛媛大 GRC を中心に研究を統括するとともに、岡山大 ISEI のグループによる高圧下物性測定、広島大理および APS・シカゴ大のグループによるレオロジー関連の研究、また SPring-8 のグループによる測定系の開発や粘性測定を、個別および共同研究として遂行する。

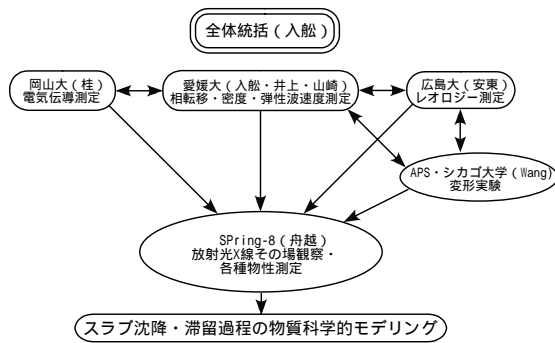


図 5

(平成 18-20 年度)

平成 16、17 年度に開発された技術や導入された装置をもとに、以下のような具体的研究をおこなう。

- ・ リングウッドイトおよびメージャライトの弾性波速度を、マントル遷移層に対応する 20GPa、1800K 程度の温度圧力領域まで 1%程度以下の精度で決定する。
- ・ スラブおよびマントルを構成する、現実的で複雑な化学組成を持った主要高压相の熱膨張率や非圧縮率を同様の精度で決定する。また、代表的なバルク組成であるパイロライトおよび MORB の密度変化を、マントル遷移層～下部マントル上部までの圧力と、様々な温度において決定する。
- ・ リングウッドイトおよびメージャライトのレオロジーを、X 線その場観察実験および急冷試料の微細組織の観察に基づいて明らかにする。特にこれらの強度や粘性についての実験的データを得る。
- ・ 含水鉱物を含有するかんらん岩や、単純

な含水系を出発物質とし、脱水した水の動的挙動や相転移に及ぼす影響を明らかにする。またメルトの構造や粘性に及ぼす水の効果を X 線その場観察に基づいて解明する。

- ・ リングウッドイトやメージャライトなど、マントル遷移層主要高压相の電気伝導度や熱伝導度の測定、またこれらの単結晶の弾性波速度測定や結晶構造解析を高温高压下でおこなう。

以上のような高温高压実験に基づく精密実験データをもとに、本特定領域で得られたスラブの地震学的微細構造や計算機シミュレーションの結果も組み合わせ、特に 1) マントル遷移層の化学組成の 2 つの対立した説 (パイロライト vs ピクロジャイト) のいずれが正しいかを明らかにする。また、2) マントル遷移層内部に横たわっているようにみえる多くのスラブがどうしてこの深さに滞留するのかを解明する。更には 3) 下部マントルに直接沈み込むように見えるスラブもあるが、なにがそのような違いをもたらしているかなど、スラブの沈降・滞留過程に関連する重要な未解決な問題の物質科学的解明をめざしたい。

## 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

ここでは私たちの研究グループが、何をどこまで明らかにしようとしているのかについて、紹介する。

遷移層から下部マントル最上部付近に滞留したスラブは、その後下部マントル深部へ崩落していく。しかしマントル最下部まで落下するか否かについては、現在大きな議論がある。最近の地震学的な観測結果からは、日本の地下の核マントル境界部に堆積したスラブ物質を想像させる地震波速度の高速度異常が認められる。その一方で、スラブは深さ 2000km 以深へは沈み込まないというモデルも提唱されている。

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、その後大規模な崩落を起こすのか否か、崩落するならばその原因はなにか、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だろうか。この研究グループは、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、以上の問題を超高圧高温実験を駆使した物質科学的モデリングによって解明する。

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を目指します。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、透水度、含水マグマの密度と粘性を決定する。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する。下部マントルに滞留するスラブの含水量の推定は、スラブ物質の熱・電気伝導度弾性波速度の測定とそれらへの水素の影響を明らかにすることによって、行う。(2)私たちは、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目的としてる。そこで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する。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ます。このためには、核マントル境界部までの圧力・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し、核マントル境界部におけるスラブ物質の存在様式を明らかにする。

以上の諸過程は模式的には図1に示します。この図のようなマントルの諸過程をモデル化し、観測量との対比を可能にするため、スラブ物質の弾性定数をブリュアン散乱法や非弾性散乱法によって測定し、観測される地震波速度と比較する。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。

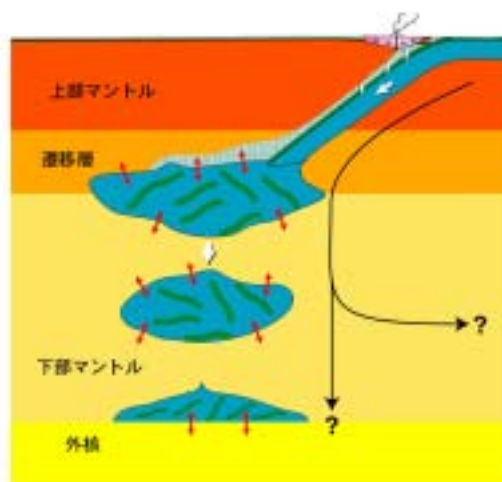


図1 マントル遷移層に滞留し、下部マントルに崩落するスラブ。

この研究には、以下のような**特色および意義**がある。

スラブの沈み込みはマントル対流を駆動する原動力のひとつである。また下部マントルに崩落したスラブの行方を明らかにすることは、マントルの対流パターンや化学的層構造の解明に大きな意味がある。スラブ物質の高圧高温下における密度、相転移速度などを決定するには、高輝度な放射光X線が必要不可欠である。我々は、放射光X線とレーザー加熱式ダイヤモンドアンビルセルとを組み合わせて、160GPa・3000Kの超高圧高温下におけるX線その場観察実験を可能にしている。また我々は放射光施設スプリングエイトやフォトンファクトリーにおいてパワーユーザーとなっており、豊富なビームタイムを確保し、スラブの密度決定を世界の他のグループに先駆けて行

うことが可能である。現状では地球深部物質の弾性定数の測定例は限られており、特に温度依存性に関する理解はきわめて乏しい。本研究ではこれまで培ってきた高圧高温発生技術を活かし、下部マントルを構成する鉱物の弾性定数を決定し、その温度依存性についても明らかにする。これによって、本領域研究で得られる地震波や電気伝導度の観測によって観測された下部マントルに崩落するスラブの実態に迫ることができる。

### 準備状況

以下では、この研究グループの研究の準備状況を、さらに詳しく紹介する。この研究グループでは平成15年6月開催の地球惑星科学関連合同学会において共通セッション「超高圧地球科学」を主催し、地球内部構造論・超高圧地球科学・マントル対流論を融合し、新たなマントルダイナミクス論展開の必要性とこの特定領域の中での物質科学研究の方針を詳細に検討した。また、本計画研究の代表者が領域代表を務めた平成14年度終了の特定領域研究「超高圧地球科学」によって、高輝度光科学研究センター(SP8)と物質構造科学研究所放射光施設(PF)の強力な放射光源のもとで焼結ダイヤモンドマルチアンビル高圧装置(SPEEDM-MkII)を開発・導入し、さらにレーザー加熱単結晶ダイヤモンドアンビル高圧装置を活用する技術的開発を行い、マントル遷移層から核にいたる広い温度圧力条件下の高温高圧X線その場観察実験を可能にした。これらの装置を用いて、マントル遷移層や下部マントルに存在する鉱物の相平衡関係、密度や圧縮率の測定、相転移メカニズムと相転移速度の測定、ケイ酸塩マ

グマの密度・粘性などの物性測定に大きな成果を挙げている。さらに、高圧鉱物中の水素を含む様々な元素の拡散係数などが測定されつつある。

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、高圧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小領域分析によって化学組成を明らかにする必要がある。私たち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) 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160万気圧・3000 KにおけるX線回折データの取得に成功し結晶構造を特定している。また我々は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。また高圧高温下におけるブリュアン散乱測定やX線非弾性散乱の測定にも、これまで培ってきた高圧高温発生技術を有効に活かすことができる。この場合、は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る。現在、抵抗加熱法の技術開発を進めており、すでに1000 Kまでの安定した高温の発生に成功している。

### (話題)

この研究グループではAGU fall meetingにおいて、海外の研究者とともに以下の2つのシンポジウムを企画している。「ポストペロブスカイト相の発見と下部マントル深部」(Discovery of Post-perovskite phase transition and the deep lower mantle I,II  
Covenor:Hirose, Wentzcovitch, Lay, and Duffy)、「地球の深部水循環」(Earth's

deep water cycle I, II, III, van der Lee, Jacobsen, Koch-Mueller, Pawley, Smyth and Ohtani)

スラブの沈み込みのダイナミクスを解明する上でもっとも重要な領域はマントル遷移層と核マントル境界である。マントル遷移層には沈み込むプレートが滞留し、核マントル境界は沈み込んだプレートの堆積場所となっている可能性がある。この二つの領域を解明することが、この特定領域の重要な課題である。

私たちは、この二つの領域の物性に関して2004年夏のIGCやEGUなどの国際会議において新しい成果を報告し、さらに、2004年秋のAGU(2004年12月13日-17日)においては、海外の研究者とともにコンベンターとして上記の二つのセッションを提案している。

このセッションでは、この研究グループから、以下のような研究発表を行う。

Hirose et al., Discovery of MgSiO<sub>3</sub> post-perovskite phase transition; Murakami et al., Mineralogy of the Earth's lowermost mantle.

Koyama et al., Water content in the mantle transition zone beneath the north Pacific derived from the electrical conductivity; Ohtani et al., Water transport into the transition zone and lower mantle by high pressure hydrous phases in the slabs; Hosoya et al., Water controls fields of metastable olivine in subducting slabs; Hirao et al., Iron-nickel-water system under high pressure and high temperature; Sano et al., Effect of water on garnet-perovskite

phase transformation in MORB system; Lakshatanov et al., Equation of state of aluminous H-bearing stishovite to 60 GP.

私たちは、この特定領域において、この方向の研究をさらに発展させる計画である。

### 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圧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。また、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、地震学的情報と対比するために、ブリュアン散乱法や X 線非弾性散乱法を用いて、高圧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。

次年度以降は、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レーザー加熱法や抵抗加熱法の技術を活かし、高温高圧下での弾性定数の直接測定を目指す。また、マルチアンビルを用いて行われた相転移速度や拡散速度の測定を焼結体ダイヤモンドアンビル高圧装置と単結晶ダイヤモンドアンビル高圧装置を駆使して、下部マントル深部に拡大する。研究組織内の役割分担は図 2 に示す。

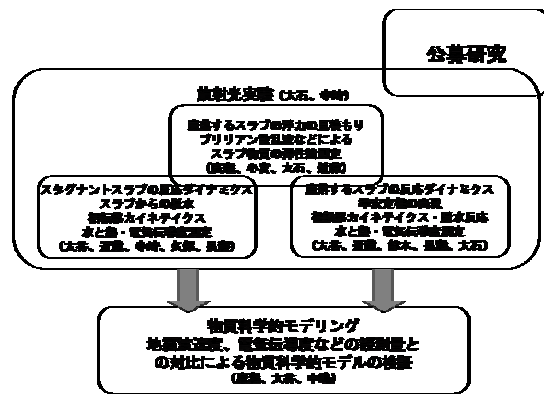


図 2 本研究の構成員の役割分担

## 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

浜野洋三（東京大学・大学院理学系研究科）

### 本研究計画の目的と研究内容

マントル対流を根源とする現在の地球のグローバルな活動は、マントル下降流の沈み込み、滞留、崩落等のプロセスによって大きく影響されている。沈み込むスラブの滞留と崩壊の過程は、一方向に冷却する地球の活動の歴史において、突発的な事件や変動のリズムを作り出すと考えられる。本計画研究では、これらの地球史上の出来事の原因である地球内部の熱/物質輸送に焦点をあて、マントル下降流の振る舞いが（１）プレート運動や対流モードの変動を通して全マントル規模の熱輸送過程、地球熱進化過程に与える影響、（２）沈み込み帯における火成活動、熱輸送や物質循環（特に水分布）等に与える影響、について数値シミュレーションを実施し、その結果を、観測グループにより得られる沈み込み帯の詳細な力学構造や温度構造、高圧物性グループによる物性測定の結果等と結合させることによって、地球深部で実際に起こっている、または起こってきた現象を明らかにする。また、（３）熱/組成分布の推定に有用な電気伝導度構造に着目し、3次元不均質電磁気構造場中を伝わる電磁場のシミュレーションにより、マントル対流場が観測データに如何に反映するかを明らかにする。（４）以上の個別モデルの解析から得られる、実際の地球深部の物性、熱輸送や物質循環をグローバルモデルに組み込み、時間と共に変動する地球進化過程を復元することにより、マントル下降流の振る舞いが地球の熱的・物質的進化過程に与えてきた影

響を解明することを目指す。現在の地球では、スラブの滞留が世界中の様々な場所で観測されている。これらの滞留したスラブはいずれは崩落を開始する。このようなスラブの滞留と崩落が過去に与えてきた影響を調べることによって、今後、スラブの崩落に伴ってどのようなことが起こるかを予測することも可能となることが期待される。（浜野）

### 本研究計画の組織

研究代表者

浜野洋三（東京大学・大学院理学系研究科）

研究分担者

本多 了（東京大学・地震研究所）

小河正基（東京大学・大学院総合文化研究科）

岩森 光（東京大学・大学院理学系研究科）

柳澤孝寿（海洋研究開発機構・IFREE）

吉田晶樹（海洋研究開発機構・ESC）

### 本計画研究の平成16年度までの研究成果

本計画研究の出発点として、平成16年度までに得られた研究成果として、上記課題（１）での、マントル遷移層660km不連続面の相転移がマントル進化に及ぼす影響（ア）進化過程でおこるマントル変動のリズムに及ぼす影響（イ）についてのモデリング、課題（２）については、プレート沈み込みによって陸側におこる小規模対流による熱輸送のモデリング（ウ）及びプレー

ト沈み込みに伴う水輸送のモデリング(エ)の結果について、報告する。

(ア) 地球進化過程にマントル下降流の滞留が及ぼす影響のモデリング

マントル遷移層における、固相・固相転移によるマントル対流の流れを止めようとするバリアー効果の強さがプレート運動を伴うマントル対流のダイナミクスやマントルの熱・化学的状態にどのような影響を及ぼすかを明らかにすることを目標として火成活動・マントル対流結合系の数値実験を行っている。固相・固相転移としては、深さ 660km におけるポストスピネル転移とガーネット・ペロフスカイト転移を考慮している。

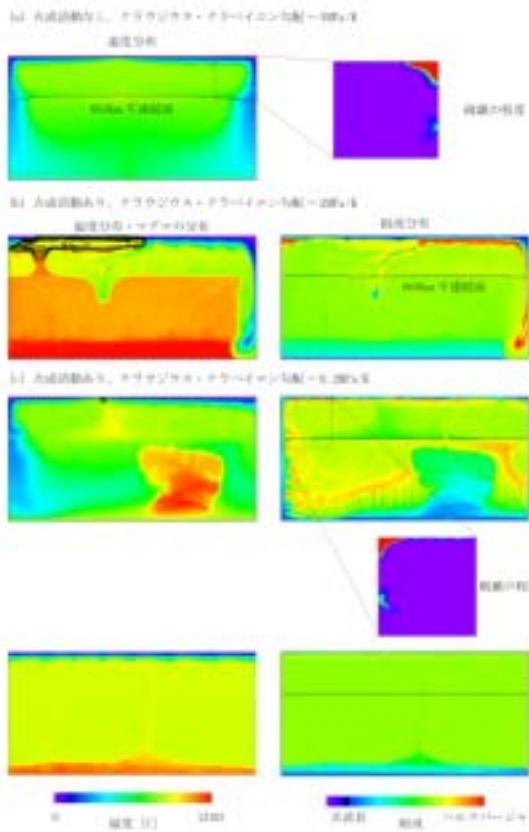


図 1

まず、火成活動が全く起こらず、マントルが組成的に均質で、ガーネット・ペロフスカイト転移のバリアー効果が全く効かない場合は、ポストスピネル転移のクラウジウス・クラペイロン勾配が  $-3\text{MPa/K}$  と高压実験から示唆される範囲ではかなりきつい場合でも、プレート運動に特に目立った影響はなく、沈み込んだスラブは下部マントルまで突っ込むこという結果を得た(図 1(a))。これは、沈み込むスラブが固いため、相境界でスラブを曲げて下部マントルへの侵入を妨げるのが容易でないためである。ただし、粘性率の圧力依存性とこの相境界のため、上部マントルのスラブ内には「破壊の程度」の図で示されたように、共役な断層が発達し、この断層沿いに滑りが起こる。これは深発地震に対応すると考えられる。スラブをポストスピネル転移で食い止めるためには、この数値実験では再現されていない海溝の後退の効果を取り入れる必要があると考えられる。

次に、火成活動が起こると仮定し、マントルが組成的に不均質で、ガーネット・ペロフスカイト転移のバリアー効果も有効な場合の数値実験を行った。ポストスピネル転移のクラウジウス・クラペイロン勾配が  $-2\text{MPa/K}$  のときは(図 1(b))、プレート運動の時間依存性が強まり、海嶺の位置が大きく揺らぎ、やがて海嶺と沈み込み帯が合流し、プレート運動が止まってしまった。このため、下部マントルの温度が著しく上昇し、この下部マントルの熱的浮力によりフラッシングとそれに伴う非常に激しい火成活動が起こった。この激しい火成活動により、マントルは強く化学成層し、その結果として生じる組成的浮力のため、プ



プレート運動は完全に止まってしまった。最後に、一方で火成活動は起こると仮定し、他方、ポストスピネル転移の効果はほとんど効かない場合の数値実験を行った(図1(c))。現在の比較的低温のマントルで、ポストスピネル転移を単独で考えると、ここで仮定したようにバリアー効果が効かないとは考えにくいように見える。しかし、現実のマントルでは、オリビン・スピネル転移というマントル対流を促進する相転移が深さ400kmで起こっており、また、ポストスピネル転移の相境界の勾配は温度に依存する。このため、マントル遷移層全体としてみると、そのバリアー効果は、660km相境界のクラウジウス・クラペイロン勾配から期待されるよりはるかに弱いと考えられる。結果、プレート運動は数十億年という長い時間スケールでは継続したが、海嶺の位置は時間とともに大きく揺らぎ、時としてプレート運動が止まってしまう時期もあった。また、沈み込むスラブの中では、火成活動が起こっていない場合と同様に共役な断層が発達した。プレート運動が起こっているときは、海嶺火山活動と、下部マントル深部まで沈み込んだスラブにおける海洋地殻とその抜け殻(ハルツバージャイト)の分離のためマントルは化学成層し、また、マントル深部にブロードな水平不均質構造が現れた。また、660km不連続面直下に海洋地殻の残渣としてのハルツバージャイトの集積した薄い層が、直上のマントル遷移層には沈み込んだ後リサイクルした海洋地殻を比較的多く含む薄い層が発達した。しかし、プレート運動が止まってしまうと、マントル深部のブロードな水平不均質構造やこの660km不連続面沿いの化学成

層構造は消えてしまった。この結果は、マントル深部の構造だけでなく、660km不連続面近傍の化学成層構造も、決して静的なものではなく、時間とともに、また地域によっても大きく変化することを示唆している。(小河)

#### (イ)660kmの相転移が引き起こす地球変動のリズム

地球シミュレータ用に改良した三次元球殻マントル対流シミュレーションコードにより、今までに無い高解像度で広範囲なパラメータ領域での計算を行うことが可能となった。現在のところ、粘性変化のない系でマントル遷移層の存在がマントル対流に与える影響を調査中である。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)が負であることが確立されており、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、比較的低いレーリー数に相当するものであった。我々は実際のマントルの厚さに対応した球殻の形状、かつ地球に想定される高レーリー数の領域で、クラペイロン勾配と対流パターンの相図を作り上げた。図2にはレーリー数 $\sim 6 \times 10^6$ 、下部加熱のケースについて、クラペイロン勾配が-2、-4、-8、-12MPa/Kの場合の対流パターンの様子を示す。クラペイロン勾配が-2Mpa/Kの場合は全層対流、-12MPa/Kの場合は常に二層対流の状態をしめす。興味深いのは全層対流と二層対流の間の領域である。この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。この崩落の空間スケールや間欠性の時間間隔はクラペイロン勾配の絶対値が大きくなるほど増大するということが分かってきた。内部加熱も考慮した現実的な地球パラメータの計算では、遷移層での崩落に伴う2カ所程度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

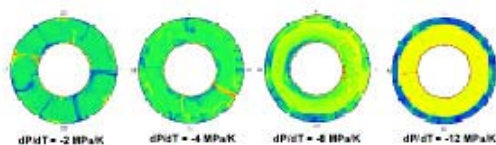


図2

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。(柳澤)

### (ウ) プレート沈み込みに伴うマントルウエッジ内の小規模対流

東北日本の沈み込み帯を模した三次元沈み込み帯の数値シミュレーションを行っている。仮定としてトモグラフィーで明らかにされている速度異常は温度異常(深さ平均からのずれ)と相関があるとし、また、温度の水平方向変化はマントルウエッジ内に生じている小規模対流に起因しているとする。また、小規模対流は、スラブの脱水反応によって放出された水がマントル物質の粘性を下げるために生じるという仮定もする。このようにして生じた低粘性層の形状は、小規模対流のパターンを決め、温度異常つまり速度異常のパターンを決める。従

って実際の速度異常のパターンより低粘性層の形が推定される。その結果によれば、小規模対流が生じるためには、低粘性層は少なくとも~60kmより浅い所まで広がっていないと判明した。低粘性層の背弧側の範囲は、ホットフィンガー状の速度異常が、どこまで広がっているかによって決まるが、現在のトモグラフィーの結果から、少なくとも日本海沿岸程度まで広がっていると推定される。この位置は、スラブ上面の深さが~150kmに位置し、過去の数値計算による脱水反応の推定位置と同程度である。図3に得られた三次元モデルの例を示す。左は等温面で右は温度異常の図である。火山フロント直下の

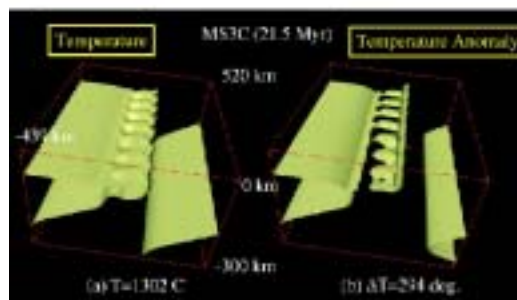


図3

連続的な高温異常、その背後のフィンガー的な高温異常は、トモグラフィーの結果と良く一致している。これらの結果の妥当性を調べる鍵は、マントルウエッジから広がる低速度層のパターンを調べる事である。図3から判明するように、マントル下部からの低速度層とマントルウエッジの低速度層は単純に繋がっていない(小規模対流が起こるための低粘性層の深さの制限のため)。こういう点を明らかに出来れば、マントルウエッジ内に放出される水の分布等に

ある程度の制限を与え、また最終的には速度異常の原因、島弧火成活動の原因を解明する鍵となろう。(本多)

### (エ) プレートの沈み込みに伴う水輸送のモデリング

水和したプレート(海洋地殻およびその下のマントル部分)の沈み込みに伴うマントルへの  $H_2O$  の輸送とそれに引き続く脱水過程は、沈み込み帯における火成・変成作用・地震活動の一因として重要である。同時に、マントルに持ち込まれた  $H_2O$  は、マントルの物性を大きく変化させるため、沈み込み帯周辺および全地球規模の対流・温度構造にも大きな影響を及ぼす。これらの過程・影響を実証的に理解するための第一段階として、沈み込むプレートが輸送する最大  $H_2O$  量を、マントルにおける含水条件下での相平衡および沈み込み帯の温度・

対流構造に基づいて見積もることが可能である(図4)。この単純なモデルの結果は、沈み込むプレートの熱構造(主に、沈み込むプレートの年齢と沈み込み速度に依存)が、地表付近からマントル深部(例えば、マントル遷移層)への  $H_2O$  の最大輸送量を示している。実際に沈み込むプレートやその周辺に含まれる  $H_2O$  量を見積もるには、地震波速度構造(ポワソン比分布、減衰構造を含む)や電気伝導度構造から、含水鉱物(特に蛇紋石、緑泥石、Phase A)およびメルト・水溶液の分布について、比較的小さなスケールの不均質構造の検討(例えばプレートに沿った厚さ 5km - 長さ 100km 程度の広がりをもつ蛇紋石を含む層の有無の検出)が鍵となる。これらの観測およびメルト・水溶液の移動を考慮したダイナミックなモデルによって、実際に沈み込む  $H_2O$  量を制約して行くことが、今後の当面の課題となる。(岩森)

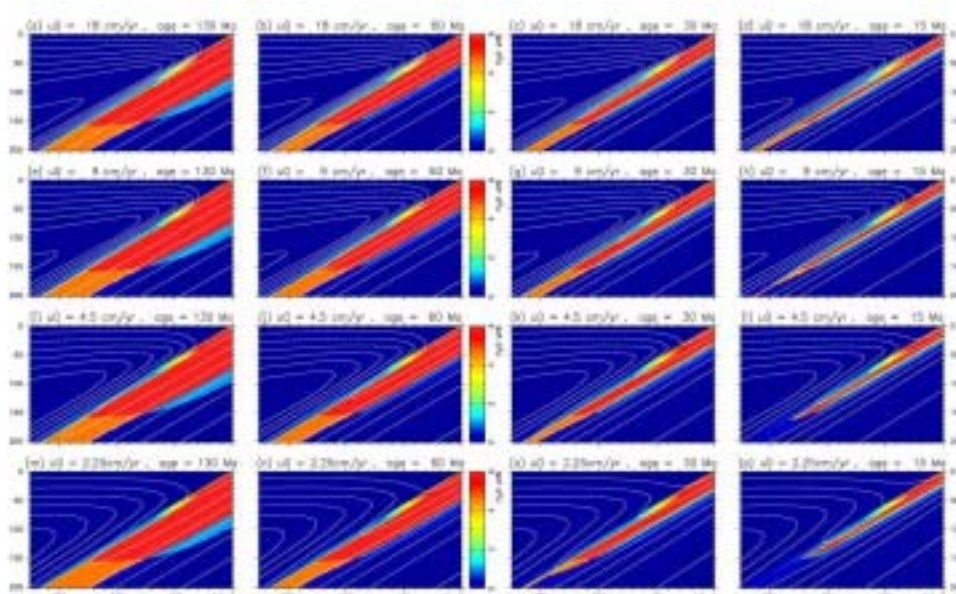


図4

## 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

吉岡 祥一・田端 正久・中久喜 伴益・  
岩瀬 康行・鈴木 厚・亀山 真典  
備状況について具体的に述べる。

本研究計画では、マントル下降流の相転移面、特に、深さ 660km 相転移面での挙動を数値シミュレーションにより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挙げるカムチャッカ～マリアナの北西太平洋縁辺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、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、粘性ジャンプ、相転移、スラブの斜め沈み込み、スラブ内鉍物の細粒化などを考慮した、超高分解能の「部分 3 次元高度スラブ沈み込みモデル」を構築する。このモデルによる計算プログラムを開発し、それを世界最高速レベルのスーパーコンピューターである地球シミュレータに移植し、大規模計算を行う予定である。

さしあたっては、本研究計画の構成メンバーを 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・岩瀬）球殻モデル（田端・鈴木）」、「2 次元高度スラブ沈み込みモデルの構築（中久喜・吉岡）」の研究を推し進めることとした。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、それぞれの今年度の研究実施計画、狙い、準

## 部分 3 次元対流基礎プログラムの開発（箱型）

本研究計画の目的を達成するためには、数 km の空間分解能で、(数千 km)<sup>3</sup> の領域のマントル対流数値シミュレーションを行う必要がある。しかし、これまではこのような計算はハードウェア・ソフトウェア的な制約から事実上実現不可能であった。しかし、地球シミュレータを使用すること、及び、高速計算可能なマントル対流シミュレーションプログラムを開発することで現実的な時間内で上記のシミュレーションを実現することは可能と考えられる。本研究グループは、まず、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・高速マントル対流数値シミュレーションプログラムの開発を行っている。箱型モデルを採用することで地球の曲率の影響は無視することになるが、単純な形状であるために球殻モデルよりも高分解能・高速なプログラムの開発が容易であるという利点がある。また、箱型・球殻モデルの結果を相互に比較することで曲率の影響を検討することは可能である。

さて、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。加えて、マントル物質の粘性率は空間的に大きく変化することから、マントル対流の速度場を正確に求めることは非常に困難であった。そこで我々は、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。新しい数値解法は、多重格子法に擬似圧縮性法と局所時間刻み法を組み合わせた反復解法であり、運動量と質量の保存則を同時に満たす速度場と圧力場を逐次的に求めていく。この方法は (i) マトリックスを構成する必要がないため使用メモリ量が少ない、(ii) ポアソン方程式を陽に解く必要がない、(iii) ベクトル化・並列化が容易である、という優れた特徴を持っており、3次元大規模数値シミュレーションに適した手法になっている。

この計算手法を用いて、有限体積法に基づく3次元矩形領域内でのマントル対流シミュレーションプログラムを構築した。粘性率に温度及び深さ依存性を与えたモデルで過去の2次元及び3次元シミュレーションとのベンチマークテストを行ったところ、粘性率の空間変化がある場合でも精度のよい解が得られていることを確認した。図1に粘性率の温度依存性を取り入れたマントル物質の熱対流シミュレーションの例を示す。また粘性率の空間変化が大きくなるほど反復解法の収束性が悪くなるものの、多重格子法の反復サイクル中のpre-smoothing及びpost-smoothingの回数を増やすことで解法の頑健さを向上させることができ、粘性率の空間変化が最大で $10^{10}$ にも及ぶ問題も解くことが可能になった。同様の修正は、粘性率が局所的に大き

く変化する領域（例えば、地表面のプレート境界域）を伴う問題を解く際にも有効であると期待される。

さらに現在は、このシミュレーションプログラムの地球シミュレータ上への移植と最適化作業を行なっている。これまでに総自由度が約13.4億（ $1024 \times 1024 \times 256$ メッシュ、速度3成分+圧力+温度の5変数）の系までの計算規模の拡大を達成した。また、ベクトル及び並列計算の効率化作業により、このプログラムは良好なスケーラビリティを示し、本研究班が目標とするマントル対流数値シミュレーションが現実的な時間内で実行可能であることを確認した。さらなる計算規模の拡大と最適化作業を現在も継続しており、より高分解能なシミュレーションを実現する準備は整いつつある。

今後は深さ400km、660km付近での相転移や粘性ジャンプ、スラブ内の鉱物組成を考慮した現実的なマントル対流数値モデルの構築を行う。これらの物性パラメータは物質科学的モデリング班によって得られた値を採用する。また、本研究の最初の段階では、沈み込むスラブの走向方向の形状の対流運動へ与える影響を調べるためにプレートの運動をキネマティックに与える。本研究で得られた数値シミュレーションの結果と「部分3次元基礎対流プログラム（球殻）の開発」グループの結果とを比較することでプログラムのクロスチェックや地球の曲率の影響の検討を行う。また、「2次元高度スラブ沈み込みモデルの構築」グループによる超高分解能な2次元モデルの結果との比較により、より適切なパラメータ範囲を推定することができる。さらに、観測班により得られたスラビメージと比較検討す

ることで、スラブの滞留・崩落の力学的な過程が明らかになると考えられる。

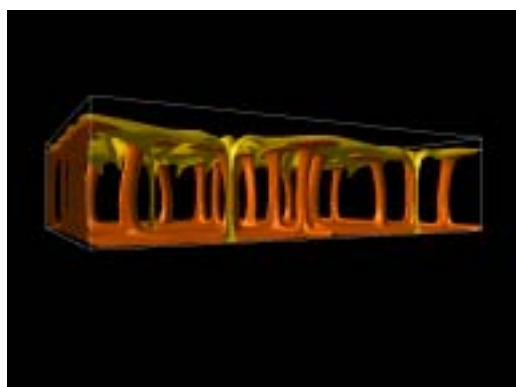


図1 粘性率の温度依存性を取り入れた3次元箱型マン  
トル熱対流シミュレーションの例。このモデルでは、箱  
の上面での粘性率は下面での粘性率よりも  $10^5$  倍高くな  
っている。図には無次元温度  $T=0.8$ (黄色)と  $T=0.9$ (橙)  
の等温面を示す。

### 部分3次元対流基礎プログラムの開 発（球殻モデル）

本研究グループでは、スラブの沈み込みにより、深さ 660km の相転移境界付近でスラブがどのように滞留し、崩落を起こすかのシミュレーションを部分3次元球殻モデルで行うことを目的としている。このため次の特徴を持つモデルを構築する。計算領域を限定して、大陸、海洋プレートモデル化するために要求される解像度を確保する。海洋プレートの沈み込み方向と速度を地表面からある深さまで既知とし、境界条件として与える。深さ 660km での相転移を取り入れ、粘性率の温度依存性を考慮する。

準備状況としては、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、温度を変数とする有限要素計算コードを開発済みである。このコードは全球殻

領域を四面体に分割し、要素内で一次多項式近似を行う四面体区分一次要素を用いることで計算量を削減している。また安定化手法により高いレイリー数の現象を過度に鈍らすことなく安定した計算が可能である。粘性率の温度依存性は線形化アレニウス則に対応し、粘性比が1万倍程度でも、計算時間は若干増加するが、問題なく計算可能である。有限要素法の特徴をいかして熱境界層付近にメッシュを集中させる非構造分割を用いることで解像度の向上を図ることができる。

現有のコードは深さ 660km 付近での相転移モデルに対応していない。手始めに、3次元の全球殻領域で相転移の効果を取り込むモデルを Christensen and Yuen [1985] の手法に基づいて作成し、数値計算を行っている。図2と図3にテスト計算の結果を示す。図2は相転移なし、図3は相転移ありのモデルである。粘性率は地表付近で大きくなるため 0.8 の等温度面は表面付近までは到達しない。相転移ありの場合は 0.5 の等温度面も下部マントル内にとどまっておき、0.8 の等温度面は相転移境界の下で広がっていることがわかる。

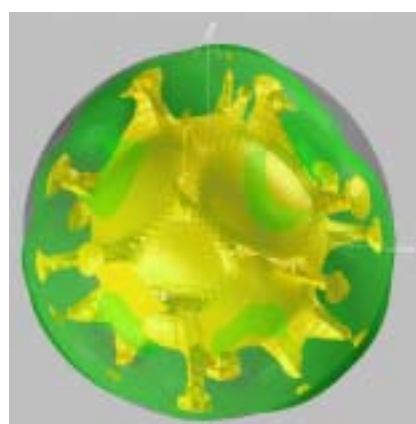


図2 粘性率の温度依存性を取り入れた3次元球殻マン  
トル熱対流シミュレーションの例。  $Ra=10^4$ 、粘性比  $=10^4$ 。

灰色の球表面は 660km の相転移境界面を表す。無次元温度 0.8(橙色)と 0.5(緑色)の等温度面を表示している。深さ 660km での相転移を考慮していないモデル。

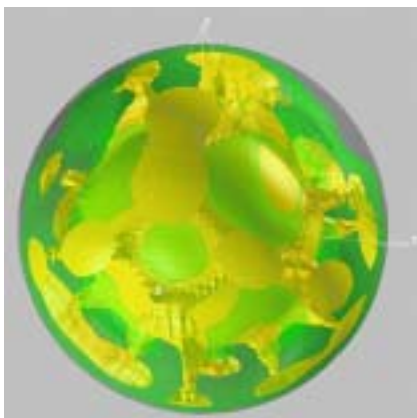


図 3 図 2 と同様。ただし、深さ 660km での相転移を考慮している。

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の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

本研究グループでは、計算機のメモリや計算時間の制約上、上記の3次元モデルでは計算できないような時空間的に細かいスラブ内現象や複合的な要素を取り扱える2次元モデルを構築し、それらの特性を明らかにすることを目的としている。

我々はこれまで、有限体積法を用いて、マントル対流系内部において表面のプレート運動、スラブ及び陸側プレート内応力が、マントルの物性のみによって自己整合的に決まる2次元箱型モデルの構築を進めており、現実に近い非対称構造を持つプレートの沈み込みを実現できつつある。

このモデルでは、プレート境界を扱うために過去の応力履歴に依存するレオロジーの層(履歴効果層)を沈み込むプレート表面に設定している。また、基礎方程式において、運動方程式のみを非圧縮性流体とする拡張ブジネスク近似を用いている。現在のところ、深さ 410km、660km での相転移を取り入れ、スラブとマントル遷移層との相互作用が扱える状況にある。また、不均一メッシュを導入することにより、分解能の向上や計算時間の短縮が実現した。

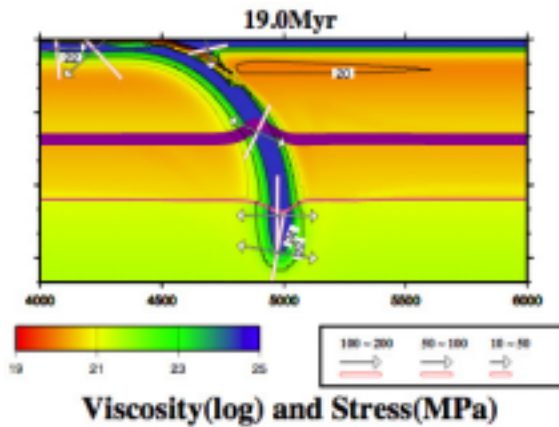


図4 2次元箱型モデルでのスラブの沈み込みのシミュレーションの例。粘性率 (Pa s) を対数スケールで示したものを色の違いで示している。深さ 410km と 660km の相転移境界面を紫色で示している。スラブ内応力の主軸の方向と大きさ (MPa) を赤色のバー (最大圧縮軸) と白抜きの矢印 (最大伸張軸) で示している。スラブが沈み込み始めてから 19.0My 経過したときの計算結果。(Tagawa et al., 2004)

これまでの研究では個別に扱われていたプレート運動速度、スラブ内応力を統一的に説明可能なモデルを作成することが可能である。本研究では、これらを拘束条件として動力学的及び物性パラメーターの値を評価しつつある。

図4に $\alpha$   $\beta$ ,  $\gamma$  Pv+Mw の相転移のみを考慮した自発的に沈み込むスラブに伴う粘性率と応力場の空間分布の計算結果を示す。

図には示していないが、スラブの沈み込みに伴う応力場の時間変化を見てみると、スラブが 410km を通過した直後は $\alpha$   $\beta$ 相転移を反映して、スラブは沈み込み方向へ大きな伸張力を受けている。さらにスラブが 660km に達すると、スラブは $\gamma$  Pv+Mw の相転移による浮力を受け、660km 直上で大きな鉛直方向の圧縮応力が支配的となる。さらに、スラブはやや粘性率の高い下部マントルでの抵抗も受けながらそこでは同様の応力場の卓越が見られている (図4)

今後は、相転移の反応速度、スラブ内鉱物の細粒化・鉱物種や相の違いによるレオロジー変化の影響を精査すること、3次元モデルでは計算不可能な広大なパラメーター空間を探索し、3つの研究グループの統合モデルである「部分3次元高度スラブ沈み込みモデル」の基礎となる物理パラメーターを決定すること、プレート運動を制約条件としたモデルを作成すること、海溝移動 (背弧海盆形成) を再現すること、を目指した研究を行う予定である。



## 研究集会のおしらせ

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2度の全体の研究集会を予定しています。

春の地球惑星科学関連学会合同大会では、新たな特別セッションとして「地球深部スラブ」を設定しました。“スタグナントスラブの概念をひとつのキーワードとし、地球物理観測・超高圧地球科学・計算機科学・地球化学・地質学の先端的成果を結集しマントルダイナミクス研究に新たな潮流を作り上げるべく議論をおこなう。あつかう内容は、地球深部スラブのマッピング / モデリング、マントル内物質循環のマッピング / モデリング、スラブの滞留と崩落のダイナミクスと地球史への影響、などマントルダイナミクス全般多岐に亘る”ということで、特定領域研究のメンバーだけでなく、地球深部のスラブに関連した研究に関わる広く多くの方の発表・参加を呼びかけます。

一方秋には計画研究主要機関持ち回りで、国際（第3/5年度）または国内の集会を計画しています。2年度目の来年度は九州大学国際ホールでの開催が決定しています。本研究集会は、地震研究所共同利用の研究集会としても申請しており、計画研究・公募研究に不参加の研究者の方も参加しやすいように計画しています。参加希望の方は事務局までご連絡下さい。

また年明け早々の1月20-21日にKickoffワークショップが開かれますので多くの方の参加をお待ちしております。ここでは、それぞれの研究分野の現状をお互いに共有し、今後の研究相互乗り入れを計ることをひとつの目標とします。具体的には各分野の「到達点と問題点」に焦点を当てた本格的レビュー講演等を企画しています。異種格闘技戦に遅れて参加する飛び入り講演もあるかもしれません。サップ、曙たらん方の飛び入りも歓迎致します？！プログラムの詳細は随時ホームページ

<http://ohp-ju.eri.u-tokyo.ac.jp/tokutei/>

に載せる予定です。(東京大学地震研究所・川勝均)

<<予定>>

年度	集會名	日時	開催場所
16	<b>Kick-off ワークショップ</b>	<b>1月20-21日</b>	<b>地震研究所</b>
17	合同大会特別セッション 「地球深部スラブ」(各年度)	5月22-26日	幕張メッセ
	<b>国内ワークショップ</b>	<b>11月17-18日</b>	<b>九州大学</b>
18	国際ワークショップ	秋	北海道
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

## 特定領域『地球深部スラブ』Kickoff ワークショップ

地球深部スラブとマントルダイナミクス（#1）暫定プログラム

### 1月20日（木）

13:30 領域設定に当たって（深尾良夫）

13:40 現在の到達点と問題点」セッション1

レビュー 40分（発表）+5分（質疑）

計画研究 10分 +5分

計算機科学：レビュー（本多了）

「マントル対流論：観測に即したマントル対流シミュレーションへ」

計画研究1（浜野洋三）

計画研究2（吉岡祥一）

15:15 高圧実験科学：レビュー（廣瀬敬）

「スラブの物質科学的モデリング」

計画研究1（大谷栄治）

2（入船徹男）

16:30 コメント「特定領域に期待すること」（20分×3）

巽好幸（IFREE）

高橋栄一（東工大）

???

18:00-19:30 懇親会

### 1月21日（金）午前

9:00 「現在の到達点と問題点」セッション2

内部構造科学：レビュー（原辰彦）

「地震学から見た深部スラブのイメージ」

計画研究1（笠原稔）

計画研究2（末次大輔）

Break

10:30 海底観測科学：レビュー（塩原肇）

「（長期）海底観測：世界の現状と日本の将来計画」

計画研究1（金沢敏彦）

計画研究2（歌田久司）

11:45（20分×1）

趙大鵬（愛媛大）「Multiscale tomography によるスラブの浅部と深部構造」

丸山茂徳（東工大）「西太平洋ダイナミクス研究の意義」

**1月21日(金)午後 話題提供(20分×11)**

13:30 「深部スラブ/遷移層のダイナミクス」セッション

- 中久喜伴益(広大) 「自発的沈み込みモデルによるスタグナントスラブ形成」  
小河正基(東大) 「マンツルの相転移:マンツル物質の相転移とマンツル進化」  
柳澤孝寿(IFREE) 「マンツル変動のリズム:マンツル物質の相転移とスラブの挙動」  
山崎大輔(愛媛大) 「リングウッドイトの粒成長」  
馬場聖至(IFREE) 「マンツル電気伝導度の異方性」

15:30 「深部スラブと水」セッション

- 小野重樹(IFREE) 「マンツルにおける水の存在様式」  
志籐あずさ(地震研) 「トモグラフィーと温度・物質不均質」  
市來雅啓(IFREE) 「電気伝導度構造から推定されるマンツルの水」  
岩森光(東大) 「沈み込み帯での水とメルトの分布,および地球規模の水循環」  
大森聡一(東工大) 「稍深発~深発地震分布が示すスラブペリドタイト含水化の可能性」  
久保友明(九大) 「Water controls fields of metastable olivine in subducting slabs」

17:30 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

裏表紙：海底広帯域地震計（上、研究項目 A02）と高温高圧実験装置（下、研究項目 A03）。

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

