

海底電磁気機動観測でスタグナントスラブを診る

歌 田 久 司 (東京大学地震研究所)

1. 研究班の目的

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

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

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

2. これまでの経過と得られた成果

2.1. 海域機動観測の完了

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

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

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

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

2.2. フィリピン海上部マントルの標準1次元構造モデル

3次元電気伝導度構造を、インバージョンを用いて求

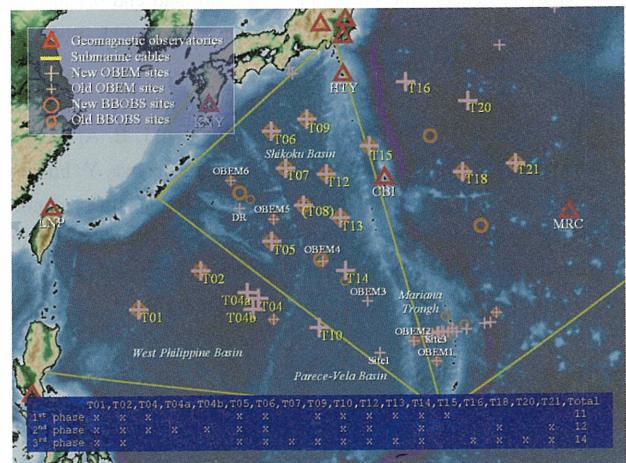


図1 海底電磁気観測点の分布。

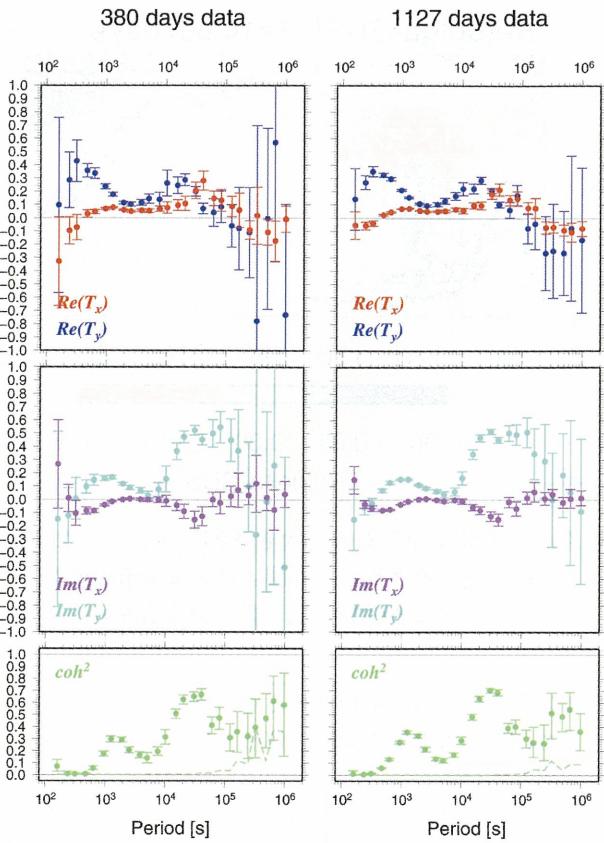


図2 観測点T14におけるGDS応答関数。左は、第1次観測で得られた380日間のデータを用いて解析記した結果。右は、第1次観測から第3次観測までのデータを統合し、全1137日間のデータを用いて解析した結果。

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

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

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

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

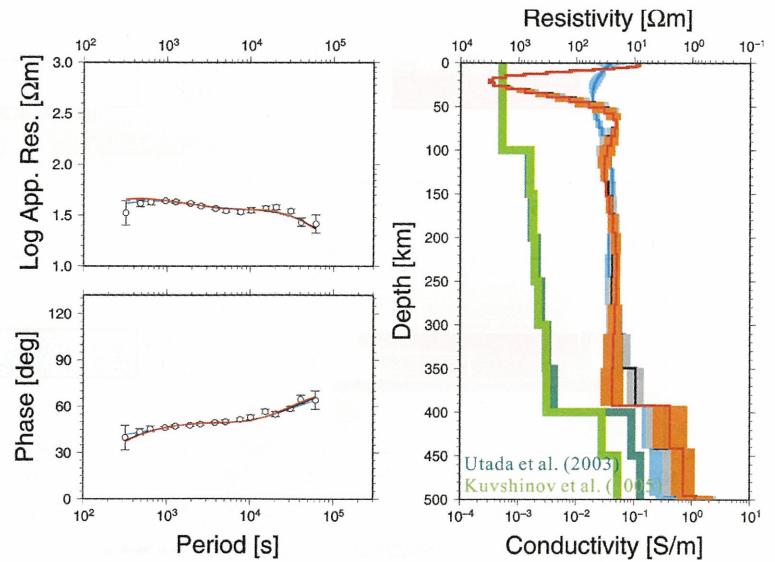


図3 海底地形・海陸境界効果を除去したあとの14観測点の平均的MT応答関数（左）とそのインバージョン解析で得られた1次元電気伝導度構造モデル。青、灰色、オレンジ色の線は、それぞれインバージョンの際に、モデルに制約条件を与えない場合、最上層と深さ約20kmの電気伝導度に制約（0.1S/m, 0.0032S/m）を与えた場合、更に深さ約400kmで不連続を許した場合に得られたモデル。

定である。

2.3. セミグローバル電磁気トモグラフィー

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

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

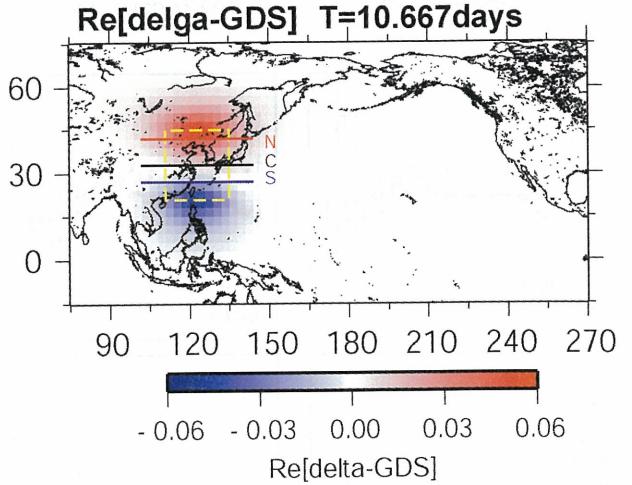


図4 地下400kmにある、大きさ $24^{\circ} \times 24^{\circ} \times 200\text{km}$ の電気伝導度異常（周囲よりも電気伝導度が5倍高い）によるGDS応答関数の異常分布。

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

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

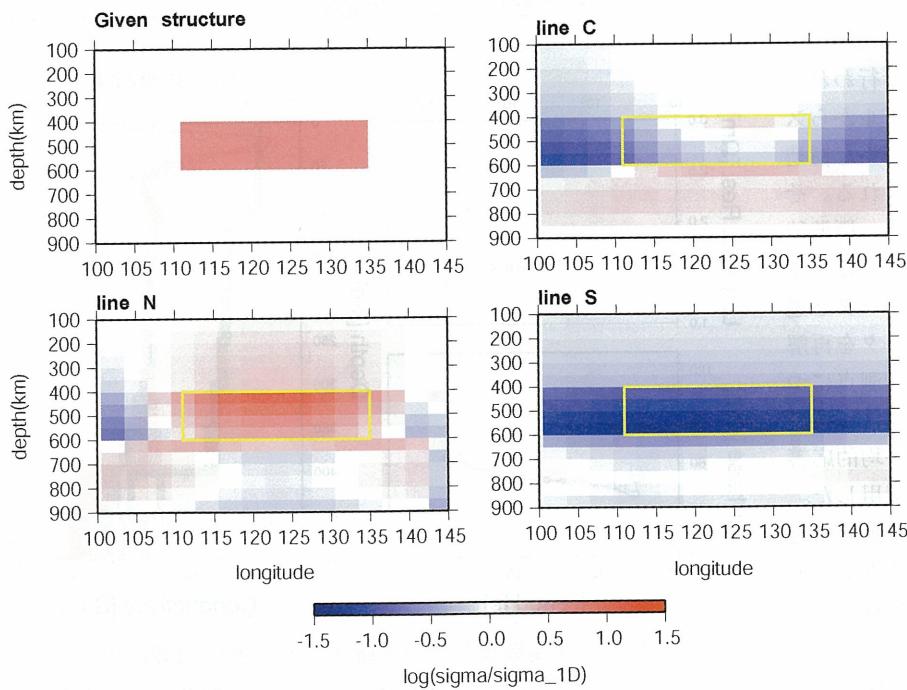


図5 図4の観測線N (42N), C (33N) およびS (27N) 上の仮想的な観測点におけるGDS応答関数からそれぞれの観測点での1次元構造を求め、それらをまとめて作成した電気伝導度擬似断面。GDS応答関数は、電気伝導度異常に対して図4に示すような分布をするため、この方法では正しく電気伝導度構造を求めることができない。

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

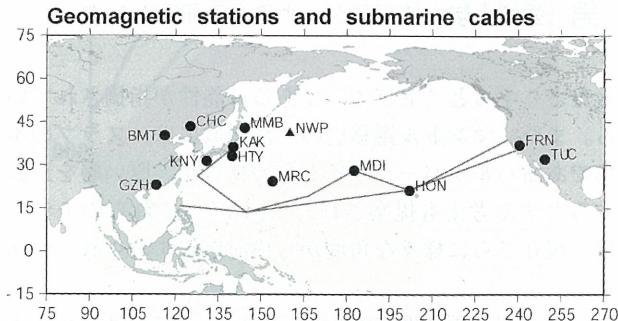


図6 1次元標準電気伝導度構造を求めるために用いた磁場観測点（●, ▲）と海底ケーブルの分布。▲は海底磁場観測点。

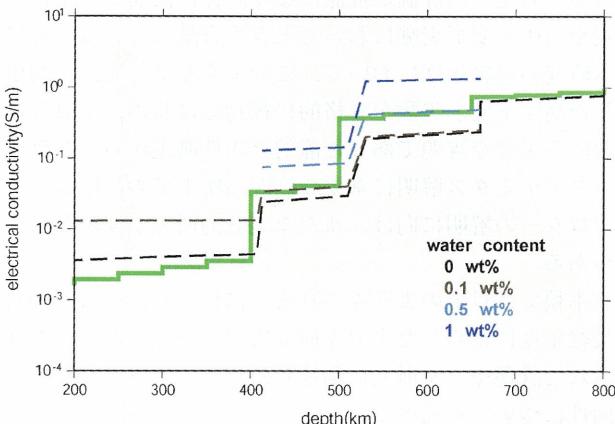


図7 今回更新された北太平洋域1次元標準電気伝導度構造（実線、緑）。深さ400, 500, 650kmにおいて、電気伝導度の不連続を許容したインバージョンにより求められたモデル。比較のため、Yoshino et al. (2008) の室内実験により測定された、含水鉱物の電気伝導度（破線、色は水の量による）もプロットしてある。

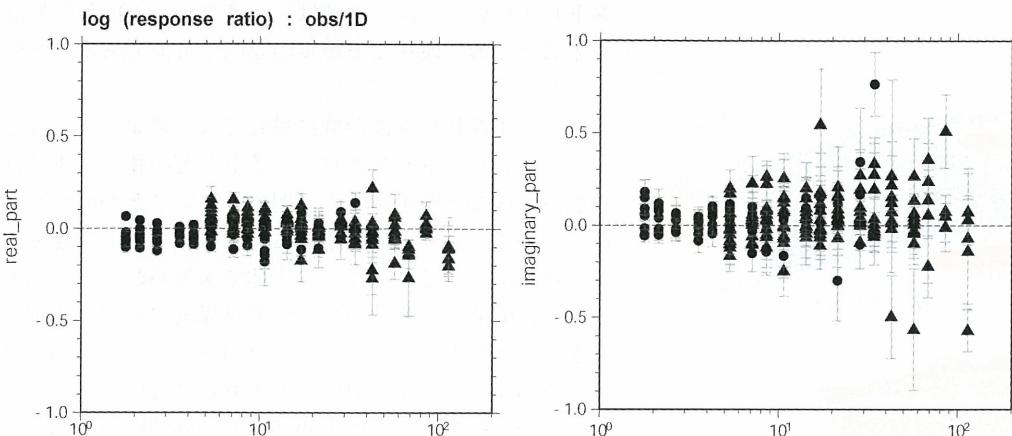


図8 観測された応答関数と1次元標準モデルによる応答関数の比の対数。0の周りのばらつきは、観測誤差のみではなく、マントルに3次元構造が存在することを示す。

度の電気伝導度コントラストが存在することを示唆している。

3.まとめ

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

マントル遷移層とスタグナントスラブの物質科学的モデリング

入 船 徹 男 (愛媛大学地球深部ダイナミクス研究センター)

1. はじめに

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

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

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

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

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

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

2. 弾性波速度測定とスタグナントスラブ

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

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

一方、従来の超音波測定に基づく上部マントル～マン

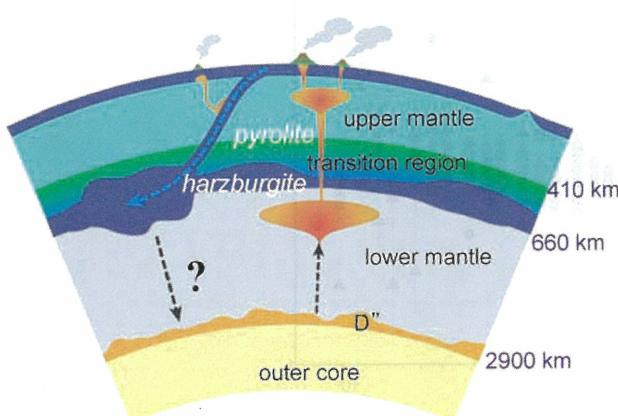


図1 マントル遷移層の化学組成モデル

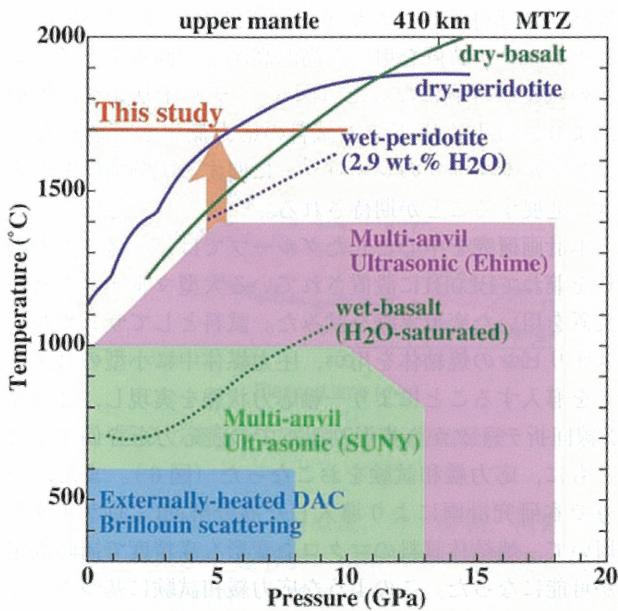


図2 部分熔融状態での弾性波速度測定を目指した高圧下超音波測定温度領域の拡大

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

3. 電気伝導度測定とマントル遷移層中の水

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

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

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

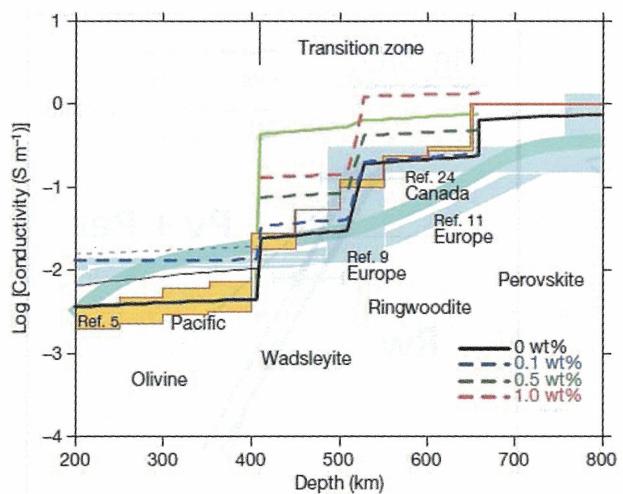


図3 高温高圧下での電気伝導度測定と観測プロファイルの比較によるマントル遷移層における含水量の推定

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

4. 下部マントル領域でのP-V-Tデータ収集と状態方程式

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

これらの状態方程式に基づき、MgOを圧力スケールとして用いている過去のスピネル-ポストスピネル転移境界圧力の再評価をおこなった。この結果、いずれの圧力スケールも誤差の範囲で一致する結果を与え、660kmに対応する圧力より若干(0.5-1GPa)低い圧力でこの相転移が起こることが示された（図4）。このような新しい圧力スケールに基づき、この相転移のX線その場観察実験による再決定が望まれる。また、このような研究とは独立に、MgSiO₃ペロブスカイト試料の大量合成により、より高精度な熱測定に基づくスピネル-ポストスピネル転移境界の再決定も試みられつつある。

焼結ダイヤモンドアンビルを用いた実験では、MgOと同様の手法によるAuの状態方程式の決定版を構築しつつあるとともに、下部マントルの主要高圧相であるMgSiO₃ペロブスカイトの状態方程式の精密決定も平行しておこないつつある。これらの実験的研究に基づき、660km不連続面の成因解明とともに、下部マントル領域におけるスラブのダイナミクスにおいて重要な制約が与えられつつある。

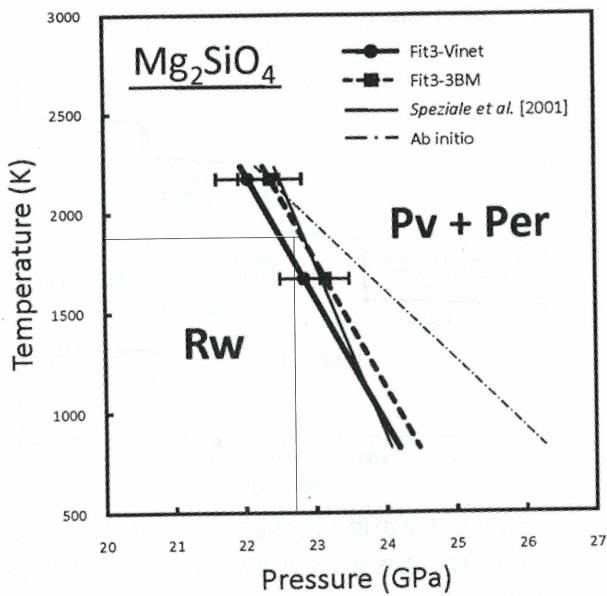


図4 新しいMgO圧力スケールによる、 Mg_2SiO_4 のスピネル→ポストスピネル相転移境界の再評価

5. 蛇紋石の脱水過程と変形挙動

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

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

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

6. 単色光源を用いた応力測定とスラブのダイナミクス

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

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

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

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

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

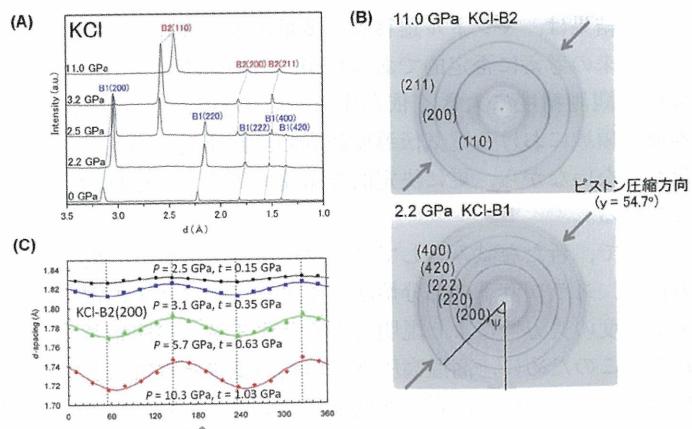


図5 SPring-8に導入された単色化装置と検出システムにより得られた（A）高压下での回折プロファイル、（B）回折デバイリング、（C）差応力解析

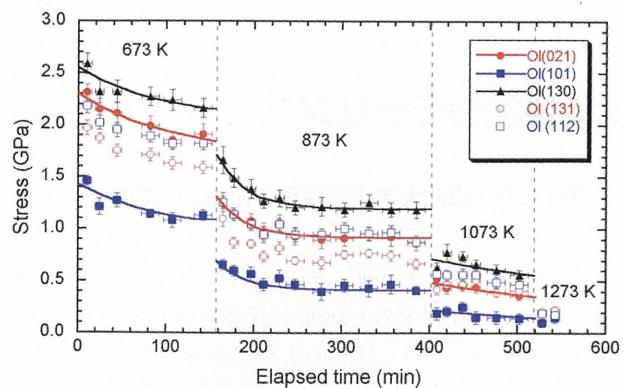


図6 高圧下における応力緩和試験

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

スラブ滞留・崩落過程の物質科学的モデリング

大 谷 栄 治 (東北大学大学院理学研究科 地学専攻)

1. 研究の目的

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

2. 研究成果

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

I. 東北大グループの成果は以下にまとめられる。

今年度の成果

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

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

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

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

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

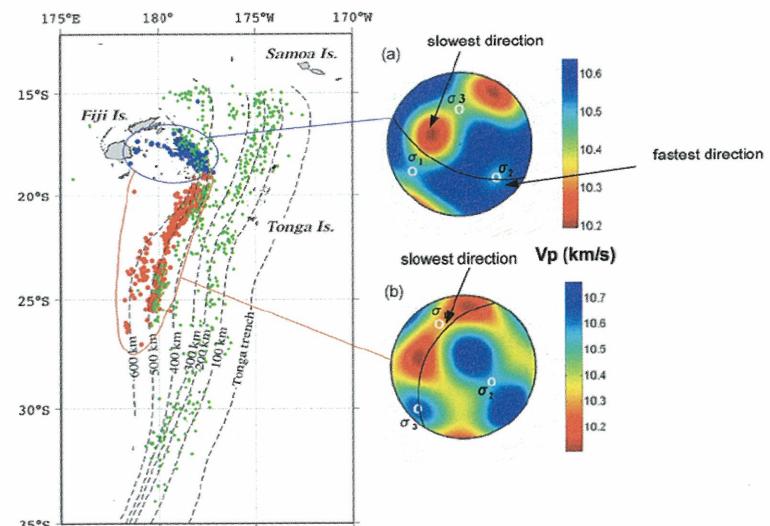


図1 トンガ海溝下のマントル遷移層の地震波異方性とアキモタイトの選択配向：(a) (b) の図は地震波の異方性、白丸は実験から予想される圧縮主応力軸 (Shiraishi, Ohtani, et al., Nature, 2008)

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

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

マントルの条件で安定な含水鉱物としては、Wadsleyite, Ringwoodite, 含水D相MgSi(OH)₃, 含水δ相AlOOHなどが知られており、後者の2種類は下部マントル深部まで安定である。D相は、橄欖岩組成のマントル中に存在しえる含水鉱物であり、Shieh et al. (1995) によって約45GPaで脱水分解することが示されている。他方、地殻物質中に含まれる含水のアルミナ化合物Topas-OHは、含水phase Egg相となり、さらにマントル遷移層の深さでSiO₂スチショバイトとδ-AlOOH phaseに分解する。本研究においては、分解生成物であるδ-AlOOHの安定領域を明らかにする実験を行った。また、含水相δ-AlOOHおよびRingwooditeと金属鉄の反応実験を行った。

1) δ-AlOOH phaseの安定領域

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

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

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

含水δ-AlOOHとFeの反応についても、類似のFeH生成反応が確認された。すなわち、反応によって15GPa以上130GPaまでの広い圧力範囲において、約1300K以上でAl₂O₃の高圧多形とFeHが生成することが明らかになった。δ-AlOOHは核マントル境界に水素を運ぶ。したがって、今回明らかになった水素の挙動は、最下部マントルに運ばれた水素が核内部に運ばれることを示している。

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

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

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

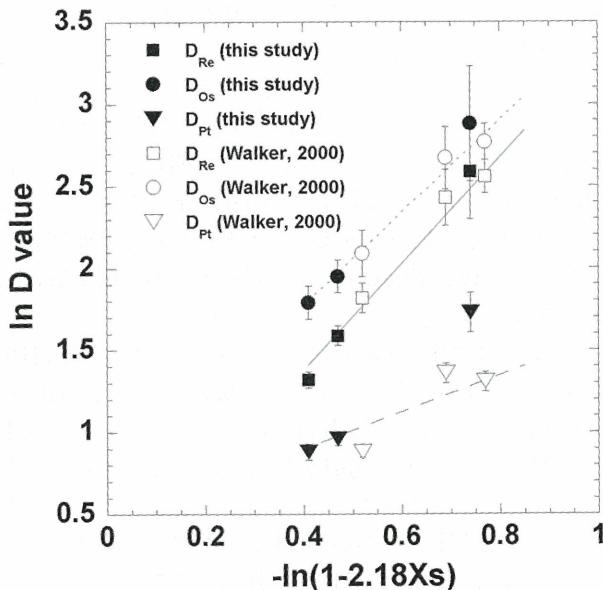


図2 金属鉄固相と液相間のPt, Re, Osの分配。イオウの効果は大きい。実験は20GPa, 1470–1670°Cで行っている。

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

5年間の成果

- マントル遷移層に滞留するスラブと関連する上部マントル、マントル遷移層、下部マントルの諸過程
- 相転移境界に対する水の影響の解明：マントル遷移層に存在するolivine-wadsleyite相転移境界とRingwooditeの分解反応境界をDryおよびWet条件で決定し、含水系では、Olivine-Wadsleyite境界低圧側にずれ、Ringwooditeの分解は高压側にずれることを明らかにした（図3）。
- マントル遷移層の主要鉱物Ringwoodite, Wadsleyite中の水素の拡散係数：
- WadsleyiteおよびMajoriteと流体との間の二面角の測定：流体はマントル遷移層で非常にぬれやすいことが明らかになった。
- WadsleyiteとRingwoodite中のSiとOの拡散係数の測定をし、マントル遷移層に沈み込んだスラブの流動特性を推定した。
- 含水マグマと含CO₂マグマの密度をダイヤモンドの浮沈法およびX線吸収法によって測定し、これらのマグマが上部マントル最下部で安定に存在することを明らかにした。
- 1)～6)を総合して、滞留した深部スラブからの脱水と上部マントル再下部での部分溶融と重い含水マグマの生成、さらにプレート内部での火成作用と

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

2. 核マントル境界の過程の解明

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

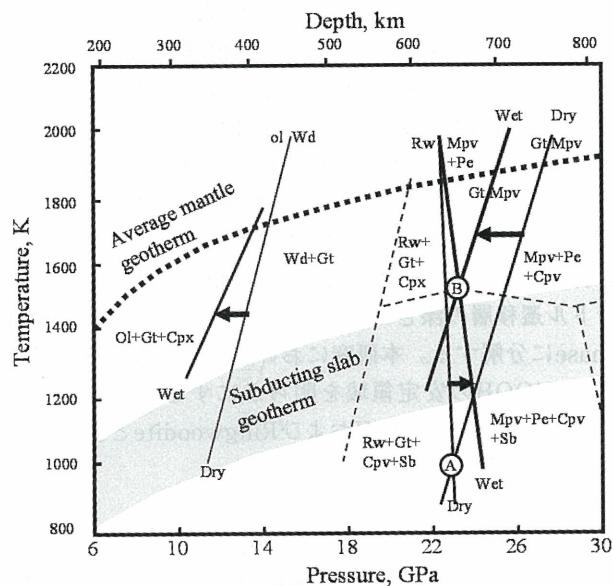


図3 相転移境界に与える水の影響。

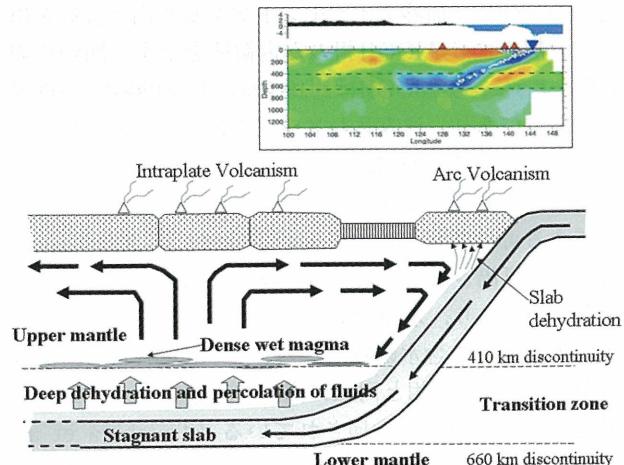


図4 マントル遷移層に滞留するスラブからの脱水による諸過程。DD-BMWモデル (Ohtani and Zhao, 2009)

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

II. 東工大の広瀬敬教授らのグループは以下の成果は以下のようである。

今年度の成果

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

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

レーザー加熱式ダイヤモンドセル実験では通常10%程度の大きな温度の誤差があるため、相転移境界を正確に決定することが困難である。しかし今回東工大的グループは、1330から4400Kまでのかなり広い温度範囲で実験を行うことにより、相転移境界を以前より精度よく決定することに成功した (Tateno et al., 2009 EPSL)。得られたMgSiO₃の状態図を図5に示す。実験による相境界の決定には圧力マーカがいつも問題になる。今回はMgOをマーカに用いた。MgOの状態方程式は実験によるものと理論計算によるものが存在するが、両者はよい一致を示す。また、MgOマーカを用いた場合、ポストスピネル相転移とポストペロフスカイト相転移の圧力が、それぞれ深さ660kmと2600kmの地震波不連続面の圧力にほぼ等しい。これらのことからMgOの圧力マーカは現状ではもっとも信頼性が高いと考えられる。今回の実験で決定されたクラペイロン勾配は13.5MPa/Kであり、絶対値としては遷移層における相転移境界とくらべて少なくとも4倍大きい。それゆえ、密度変化は比較的小さいものの、マントルダイナミクスへの効果は遷移層のそれと同程度に大きいものと考えられる。

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

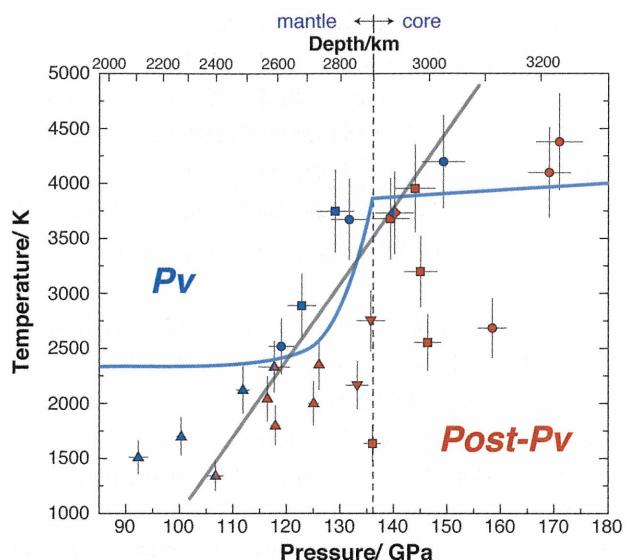


図5 MgSiO₃の状態図。ペロフスカイト (Pv) 相とポストペロフスカイト (PPv) 相の境界を示す。青い線はマントル最下部で観測される対の地震波不連続面の深さと相境界をもとに推定した、コアマントル境界付近の温度構造。

れは従来の推定値より小さい値である。

2. ポストペロフスカイト相の電気伝導度測定

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

5年間の成果

(1) ポストペロフスカイト相

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

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

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

(2) 沈み込んだMORB地殻

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

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

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

(3) ブリルアン散乱法による弾性波速度の測定

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