

スラブ・マントル反応による元素移動多様性の実験的研究

加藤 工, 富永愛子, 久保友明 (九州大理) 黒澤正紀 (筑波大生命環境)

我々は、地球内部物質の輸送過程解明の実験的研究を大局的課題としている。地球化学的に不均一な海洋プレートは、沈み込みによってマントル遷移層に到達し、周囲のマントルとの混合が進行する。しかし、スラブサイズの完全な均一化は困難であり、元素種と鉱物特性に支配される特徴的な不均一性が必然的に生ずる。本研究では、スラブ停留条件のマントル遷移層から最上部マントル条件で、不均一性の端成分である玄武岩物質とマントル・ペリドタイトの一連の反応実験を行った。高精度微量元素分析により、元素移動度の多様性を明らかにし、これまで考慮されていなかった遷移層、最上部下部マントルのスタグナント・スラブに起源を持つ地球化学的起源領域の特性を解明することが目的である (News Letter 4, p65)。

必要な実験条件と分析試料合成を実現するため、マルチアンビル型高圧装置とLA-ICPMS装置の組み合わせを採用し、多元素の拡散同時測定が可能なDepth-Profile法を検討確立した。マントル最上部条件でのペリドタイト中の元素拡散について、得られた拡散分布パターンは、単純な玄武岩メルトの付加あるいは玄武岩由来の水流体の付加では説明が困難であり、オリビンの粒界拡散メカニズムが移動性を支配していると結論した (Preliminary analysis on the mobility of trace incompatible elements during the basalt and peridotite reaction under uppermost mantle conditions, Tominaga et al., Phys. Earth Planet. Inter., in press, online available)。

スラブ停留環境の低温で進行する準安定相転移 (olivine-wadsleyite-ringwoodite), 細粒化を伴う転移 (ポストスピネル) は、超細粒条件の粒界拡散支配によって、元素移動特性で特徴付けられる大きな元素分別を広範な領域で生み出す可能性がある。引き続いて、マントル遷移層を構成する高圧相鉱物の多結晶中の拡散を求めるための実験手順の確立を検討した。高圧鉱物-メルトの元素分配、鉱物内の元素拡散に関する研究は、これまでにも蓄積されつつあるが、混合途中過程での移動性の差異による分化の可能性に焦点を当てた研究は前例がない。

高圧実験には、愛媛大学から移設された500ton二段式装置 (EUDES→QDES) を使用した (<http://mineral2.geo.kyushu-u.ac.jp/NEW%20MIN%20HP/index2.html>)。高圧相転移に伴う細粒化により粒界拡散の役割が顕著になることが予測されるため、細粒の高圧相多結晶体が発物質として必要である。これらはOlivine単結晶 (San Carlos産) から比較的高温での相転移により得られることがわかった。拡散実験は合成時より低温で行い、保持中の粒成長効果を抑制した。図1は、実験セルの断面模式図と回収試料断面である。図2は、拡散媒体であるwadsleyite多結晶側からのlaser ablation pitを示す。連続元素濃度測定からpit底はbasalt拡散ソースまで達していることが確認された。現在、Depth-Profile法によって得られた拡散データの解析を行っている。

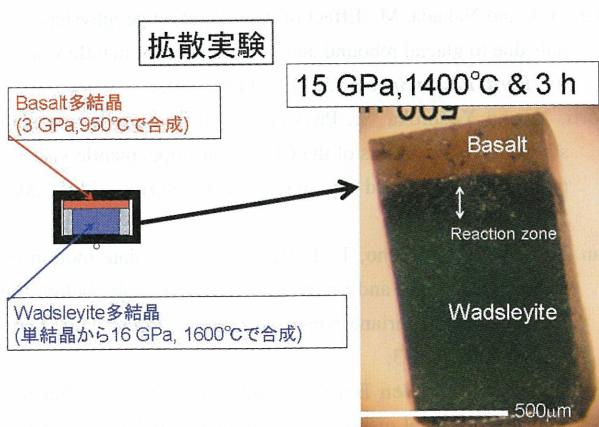


図1 高圧相多結晶体中での拡散実験の実験手順、試料セルデザインと生成物の顕微鏡写真

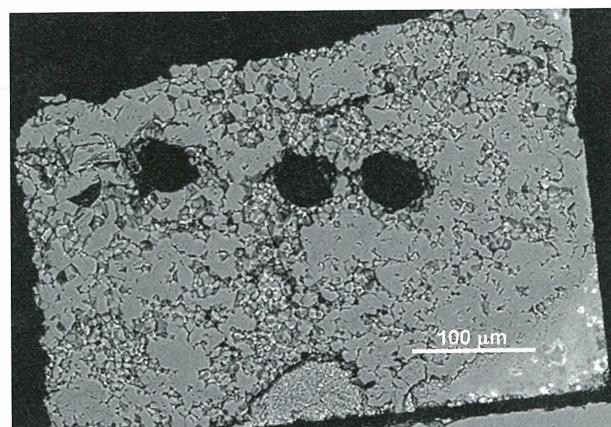


図2. Laser ablation pits on wadsleyite polycrystal

核共鳴散乱法による下部マントル物質の電子・振動状態研究への展開

平尾直久（高輝度光科学研究センター） 小林寿夫（兵庫県立大学）

1. はじめに

地球の全体積の半分以上を占めている下部マントルは、主に鉄を含む珪酸塩ペロブスカイト（～75%）とマグネシオウスタイト（～20%）から構成されている。最下部マントルの数百kmの領域では、ペロブスカイト構造はより高密度であるポストペロブスカイト構造へと相転移する。下部マントルの地震波トモグラフィの結果を物質科学的に理解するためには、下部マントル物質の弾性波速度を測定することが重要である。我々は、高温・高圧力下での核共鳴非弾性散乱測定法を確立し、下部マントル物質中の鉄原子の振動状態から下部マントル物質の弾性波速度を導きだすことを最終目的としている。そのため、核共鳴非弾性散乱測定用大開口型ダイヤモンド・アンビル・セルの開発などの研究を実施してきた（図1）。

一方、最近の研究から、下部マントル物質中に含まれる鉄原子の電子状態が、全マントルの構造やダイナミクスに大きな影響を及ぼし、深部地球を考える上で非常に重要なことが分かってきた。その理由は、鉄の価数やスピニ状態が下部マントル物質の弾性・輸送特性、元素分配など鉱物の物理化学的特性に重大な変化をもたらすためである〔1〕。核共鳴非弾性散乱法では、測定試料中に含まれる全ての鉄原子の振動状態を測定する。すなわち、複雑な下部マントル物質では、様々な価数・スピニ状態にある鉄原子の振動状態が畳み込まれた情報となる。下部マントル物質の弾性波速度を物質科学的に理解するためには、鉄原子の電子状態と振動状態との関係を理解することは不可欠である。そこで、まず初めに、我々は研究対象鉱物中の鉄原子がどのような電子状態で存在するのかをメスバウアーフ分光法を利用して調べた。

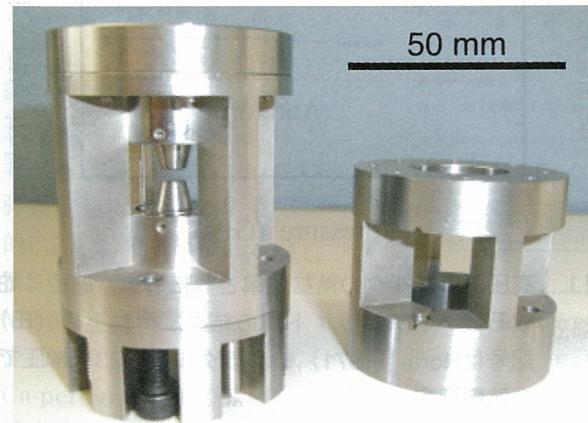


図1 核共鳴非弾性散乱測定用大開口型ダイヤモンド・アンビル・セル

2. 高圧力下珪酸塩ペロブスカイトおよびポストペロブスカイトのメスバウアーフ分光測定

最近放射光を利用した分光測定により、二価の鉄を含む珪酸塩ペロブスカイトの高圧力下での鉄原子のスピニ状態の研究が盛んに行われてきている。その結果、下部マントル条件では、二価の鉄原子は高スピニと低スピニの中間状態である、という提案が受け入れられ始めている〔2, 3〕。しかしながら、下部マントル条件下での珪酸塩ペロブスカイト中の鉄原子は、およそ50%が三価の状態で存在していると考えられている。すなわち、三価の鉄原子の鉱物物性への影響を無視することはできない。我々は、核共鳴プラグ散乱を利用した超単色X線を入射光に用いた、エネルギー・ドメイン放射光メスバウアーフ吸収分光法により、ペリドタイト組成の珪酸塩ペロブスカイトおよびポストペロブスカイト中の鉄原子の電子状態の理解に焦点を当て超高压下実験を実施した。高温高圧力（144GPa, 2000K）下で合成したポストペロブスカイトに関して、予備的な解析ではあるが約50%の三価の鉄が存在し、高スピニ状態にあることを示唆する結果がその場観察により初めて得られた（図2）。本研究で明らかとなった下部マントル条件下でのペリドタイト組成の珪酸塩中の鉄原子の電子状態に関する新しい情報は、マントルダイナミクスのモデル形成に重要な知見をもたらすことが期待される。

参考文献

- [1] McCammon, J. Min. Petro. Sci. 101, 130 (2006).
- [2] McCammon et al. Nature Geosci. 1, 684 (2008).
- [3] Lin et al. Nature Geosci. 1, 688 (2008).

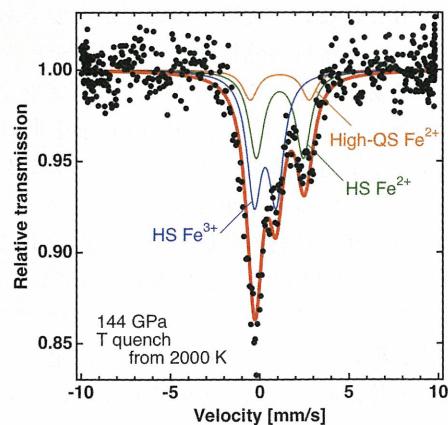


図2 144GPaにおけるペリドタイト組成の珪酸塩ポストペロブスカイト相の57Feメスバウアーフスペクトル

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）

本研究では、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を目的にした。測定方法には円盤形状の試料を用いる一次元のパルス加熱法を採用し、加圧には岡山大学地球物質科学研究センターの川井型装置を用いた（本ニュースレターNo.2）。なお実験には表記の3名に加えて岡山大学地球物質科学研究センターの米原光秀が後に加わった。

スラブを特徴づける含水物質の一つ蛇紋石について測定し、蛇紋石の熱伝拡散率と熱伝導率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。後者の結果はやや予想外であった。熱伝拡散率と熱伝導率の温度効果はカンラン石と同様で、温度の上昇とともに速やかに（ほぼ絶対温度に逆比例して）減少する。圧力5GPaにおいて蛇紋石は800Kあたりで分解したとみられる。これ以上の温度では測定用のセルまたはヒーターなどに障害が出たらしく、データの追跡はできなかった。ついでタルクの測定を行った。同じくMgの含水珪酸塩鉱物であるが、タルクの熱伝導率と熱拡散率は蛇紋石よりかなり大きい。また、圧力効果は蛇紋石と同じく小さいことがわかった（図1）。タルクでも温度の上昇とともに熱拡散率・熱伝導率とも速やかに減少するという一応の結果を得ているが、確定すべく測定を進めている。また、天然のタルクは結晶粒の配向が強いので、それによる熱伝導の異方性も方向を変えて測り調べる必要がある。蛇紋石・タルクでの測定結果からしてみると、含水マントル相の熱物性に関しては未知のところが多いと思われる。他の主要な含水相（角閃石、phase-Dなど）でさらに予測しえないような結果がもたらされるかもしれない。実測することが重要である。同時に主要マントル物質の熱物性についてもデータを補完することが必要である。これにより、スラブやマントルウェッジの熱伝導率/熱拡散率の値の分布を求め、そこで詳細な温度構造の議論やスラブのダイナミクスについての基礎を提供することができるであろう。

カンラン石とザクロ石の熱伝導率・熱拡散率については圧力8GPa、温度1100Kまでの結果を得ているが、これに相当するような輝石のデータがない。そこで、ヒサイの集合体を輝石のアナログ物質として測定した。輝石の熱伝導率・熱拡散率の高圧下のふるまいはカンラン石

と同様であることがわかった。しかしながら試行ごとのデータのばらつきが大きく、落ち着いた結果が得られなかつた。粗粒の集合体であることが原因と考えられる。ガンカ輝石の単結晶が入手できたので、それを使って測定を行うことにしている。温度・圧力効果に加えて輝石の熱伝導の異方性も見ることができる。カンラン石やザクロ石にくらべ試料が小さいので、測定用セルも小さくしなければならず、実験は難しくなる。しかしセルを小さくすれば測定圧力の上限が上部マントルの底（15GPa）を超えることが期待できる。輝石の測定に加えて、カンラン石・ザクロ石の圧力範囲を伸ばしての再測定も予定している。

なお、本実験の方法では熱伝導率と熱拡散率を同時測定しているので、そこから比熱の値を求めることができる。比熱の圧力効果は小さいので、有意な結果を得るためにには測定精度を今より格段に上げる必要がある。それには測定条件の有限要素法解析による評価が有効であり、これを援用して測定の改良を進めるこも目標のひとつにしている。

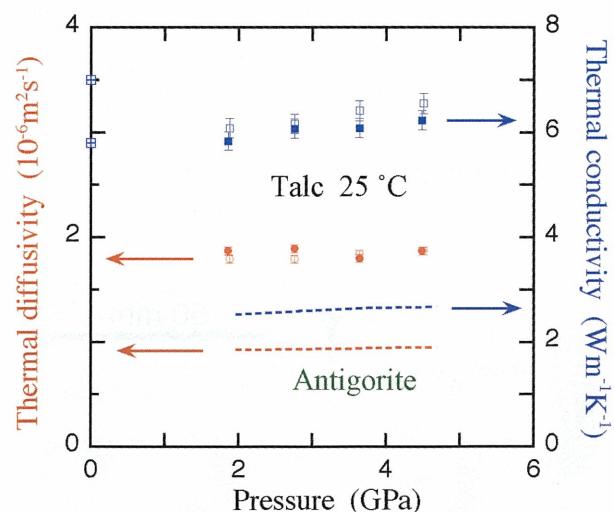


図1 高圧下のタルクの熱拡散率と熱伝導率。破線は蛇紋石（アンチゴライト）の結果。縦軸上の（田）記号はHorai (1971) によるタルクの23°C常圧での熱伝導率。

スタグナントスラブ複雑系の地震学的解析による微細構造の研究

田島文子（広島大学）

当公募研究グループでは、トモグラフィーで捉えられた高速度異常域（スタグナントスラブ）を強くサンプルした広帯域実体波形（1Hz）を解析し、スラブを含むマントル遷移層および660km不連続面付近の構造の不均質性を詳細に調べてきた。結果として、かなりの部分がモデルM3.11（遷移層下部に高速度異常があり、不連続面が下降している）ないしモデルM2.0（遷移層下部に高速度異常があるが、不連続面は下降していない）などの層構造モデルで説明がつくことが確認できた一方、トモグラフィーでは捉えられていない短波長の（あるいは局所的な）不均質性も検知することができた。

具体的には、M2.0構造がM3.11構造に隣り合って分布していることを示し、スタグナントスラブを含む遷移層最下部にはringwoodite（rw）で代表される領域に接してmajorite（mj）に富んだ含水鉱物が溜まっているという仮説をたてた（Tajima et al., 2008）。相転移面が下降していないことは、含水のmjのClapeyron slopeは660km付近で正で、低温異常のあるスラブの相転移面は下降しないという実験結果（Sano et al., 2006）に裏付けられるが、それではなぜそのような組成を持つ物質がrw組成に対応する速度構造を持った領域に隣り合って存在するかという疑問が出てくる。この疑問に対しては、遷移層では、含水のgarnetはolivineよりも流れやすく（Katayama and Karato, 2008）密度が高いという裏づけがあり、重たくて流れ易ければ、rw組成の両側にmjに富んだ含水鉱物が溜るという状況は考えられる。一方、mjの弾性波速度はrwより系統的に遅い、という端成分の測定に基づく実験結果は

M2.0モデルの説明として矛盾するように思えるが、Ca-perovskiteは600kmを越える深さからでき始め（Irfune and Ringwood, 1987），高速度を示す

stishoviteの混在（10%程度）なども考慮すると、M2.0は含水mjを主成分とする物質が遷移層下部に溜った構造を表すという仮説は可能と思われる。

M3.11とM2.0の境界付近を強くサンプルした広帯域P波形では、まれに顕著なbroadeningを起こしていることはすでに報告しているが、これらの波形は、伝播経路の局所的な低速度域でSV→P変換を起こしたものと推測し、波形モデリングでその可能性を裏付けた（Nakagawa and Tajima, 2008）。スラブ内では、低温異常のみならず“水あるいは含水鉱物”的影響で、マントル組成鉱物の相転移が多様であり、広帯域実体波形解析では、これらの多様性の結果創りだされたと思われる局所的な低速度異常を含む構造の変化を鮮明に捉える解像力があることを実証した。このような微細構造の研究は、ミクロな物理過程（鉱物物性）に支配されているマクロの物理（スラブダイナミクス）を理解するヒントを探ることに繋がると思う。

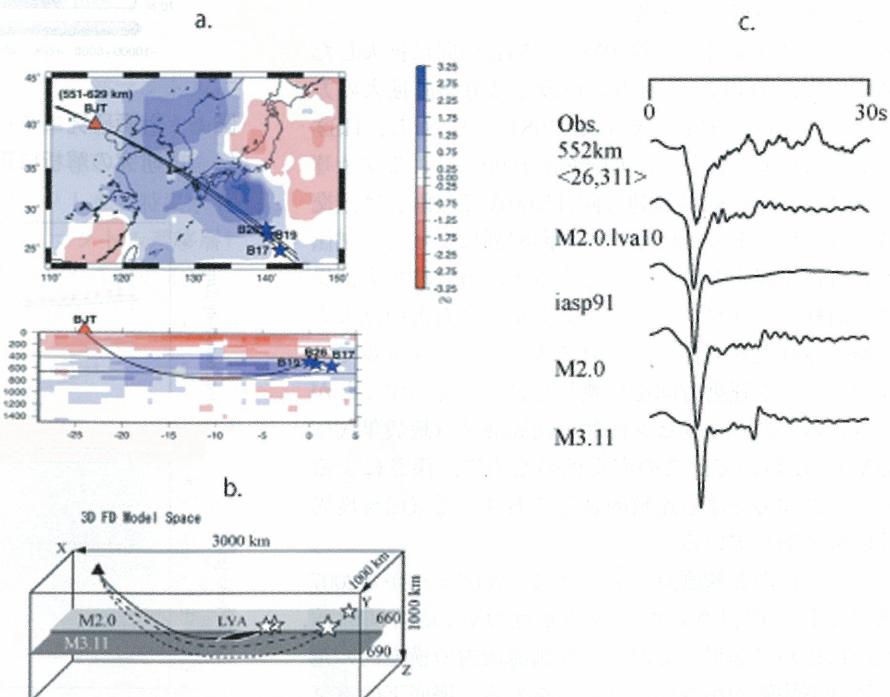


図1 a. 伊豆・小笠原付近のトモグラフィーイメージ（Fukao et al. (2001) モデルによる）および、P波形に異常を示す深発地震源と観測点を結ぶ波線。波線が最深点に達する付近で、高速度異常域の下に低速度異常のイメージが薄い層で捉えられている。b. 3D 差分法計算でのモデルスペースのイメージ。c. 異常を示す観測P波形（トップ；a. で示された震源B17の波形）と理論波形。M2.0.lvaは、M2.0モデルの660km不連続面の下に低速度異常を入れて計算した波形。

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 2

馬場聖至（東京大学地震研究所）

本研究は、計画研究工で行われる海底電磁気機動観測において、西フィリピン海盆北部に展開された3観測点（図1）のデータを解析し、この海域下の電気伝導度を異方性の有無・方向・強度を含めて明らかにしようとするものである。

東太平洋海嶺における海底マグネットテルリック（MT）観測データの逆解析から、上部マントルの電気伝導度異方性が客観的に求められた（Evans et al., 2005; Baba et al., 2006）ことを契機とし、含水オリビンの電気伝導度測定実験（Yoshino et al., 2006; Wang et al., 2006）が行われるなど、電気伝導度を通じて海洋リソスフェア・アセノスフェアの理解を深めようとする気運が高まっている。電気伝導度異方性はオリビン中の水素イオンの拡散率の異方性と結晶の定向配列を反映しているという解釈や、部分溶融帯がチューブ状に連結しているとする解釈が可能である。アセノスフェアの高電気伝導度・異方性の原因を結論する上で、観測的アプローチからは、地殻年代やテクトニックセッティングの異なる様々な海域でデータを取得し、高電気伝導度・異方性の分布を明らかにすることが不可欠である。

西フィリピン海盆は、約60Ma～35Maの間に拡大した背弧海盆で、約45Maより古い地殻では海洋底拡大の方向はN30Eである（Hilde & Lee, 1984）のに対し、HS2-NUVEL1モデル（Gripp & Gordon, 1990）によるフィリピン海プレートの絶対運動方向はN60Wで、両者は直交する。仮にマントル構成鉱物の定向配列によって電気伝導度異方性が規定されているとすると、地震波の方位異方性と同様に、リソスフェアマントルでは過去の拡大方向に凍結された異方性を、アセノスフェアマントルでは現在のプレート運動方向を反映した異方性を示すことが期待される。西フィリピン海盆の調査海域（地殻年代は約52Ma）においてはこの直交性のために、深さによる異方性の方向の分離も比較的容易であり、電気伝導度異方性解析に適している。

解析に用いた3観測点のデータは、2006年秋から2007年秋にかけて取得された。各観測点のMT応答関数は、お互いに極めて類似しており、観測海域内の横方向の電気伝導度不均質が小さいことを示唆する。海底下の電気伝導度構造を求めるに当たり、観測点周辺の海底地形および海陸分布がMT応答関数に及ぼす影響を除去するために、Baba and Chave (2005) の反復的補正法を適用した。海陸境界・海底地形効果を補正したMT応答関数から電気伝導度構造の主軸方

向を求めるに、最短周期（240秒）ではほぼN30Eであるが、長周期になるにしたがいN70E程度まで変化する。試行錯誤的フォワードモデリングによって、標準的1次元等方モデルに対し、深さ約30～45kmに東西方向の電気伝導度が南北方向の電気伝導度に対して1.5桁大きい異方性を持たせた場合に、観測されたMT応答関数を比較的よく再現する（図2）。しかしながら両者のフィットは必ずしも十分でなく、最終的な結論を得るには更に詳細な解析が必要である。

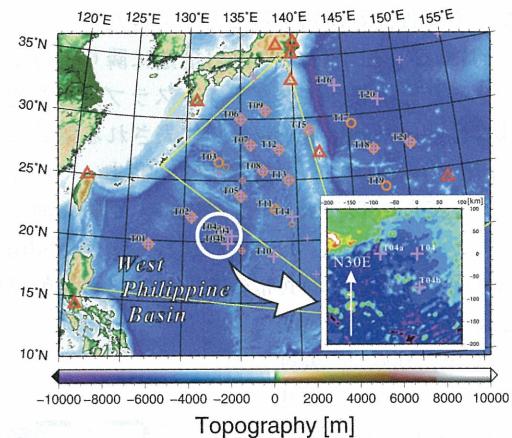


図1 計画研究工で行われた海底電磁気起動観測点と本研究の解析に用いた観測点（+）。

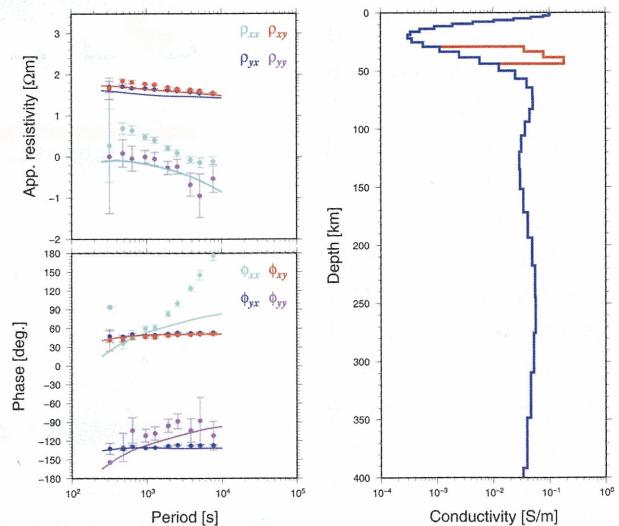


図2 左：T04点における表層不均質効果を取り除いた後のMT応答関数。
x, yはそれぞれ、N30E, N60W方向。実線は右に示した電気伝導度構造モデルから計算されるMT応答関数。右：暫定的な1次元電気伝導度異方性構造モデル。深さ約30km～45kmでは、東西方向の電気伝導度（赤）が南北方向（青）の電気伝導度よりも1.5桁高い。

最終国際シンポジウム報告

鶴大 大平

川勝 均

2009年2月25日～27日に京都御所蛤御門前「京都ガーデンパレスホテル」に於いて“Stagnant Slab Project: Final International Symposium: Deep Slab and Mantle Dynamics”と題して特定領域研究の最終国際シンポジウムが開催され、外国からの参加者13名（うち招待11名）を含む計約70名の参加者によって地球深部スラブのダイナミクスに関して活発な議論がなされた（口頭発表25件、ポスター発表37件）。主催者側の代表としてまず特定領域研究代表の深尾良夫氏による基調講演“Integration of efforts in different disciplines towards the goal of the stagnant slab project”がなされ、「スタグナントスラブ」をキーワードとした地球物理観測、高圧実験、計算機シミュレーションの統合を目指す研究領域の説明がなされた。続く初日と2日目前半は今回のシンポジウムの中心トピックのひとつであるマントル深部での“水”的役割に関する発表が続いた。日本研究者の地震・電磁気観測によるマントル深部での水の挙動に関する最新の成果報告がなされ、高圧実験結果・計算機シミュレーション結果とあわせた議論は、国内外の参加者から一部驚きを持って受け入れられ、この分野における本特定領域研究の先導性が確認された。海洋地殻に蓄えられた水が脱水しスラブ沈み込みとともにマントルウェッジ内でスラブ上面に沿って取り込まれ、さらにフィリピン海下の上部マントル、マントル遷移層上部に蓄えられていることが明らかとなり、今後は遷移層深部、下部マントルにどのように水が取り込まれていくのかが（取り込まれないという可能性も含めて）重要な課題となることが確認された。また沈み込み帯以外の上部マントル（特に水を多く取り込む可能性が示唆されているマントル遷移層）にどれだけの水があるか定量化することも今後の重要な課題となるであろう。



写真1 質疑応答風景。

続いて、スラブがマントル遷移層下部に滞留する原因に關係して、特定領域開始時のkick-off集会以来問題となっているRingwoodite→Perovskite相転移のClapeyron勾配について、地震学的観測と高圧実験成果の不整合が議論され、相転移の反応速度を取り入れることにより問題が解決される可能性があることが実験的・数値的に明らかなことになった。高圧実験においては、圧力スケールの不確実性が解決されて信頼性の高い勾配値が得られた一方、シミュレーションでは系統的な探索によって「地球的なマントル対流」を実現するための条件の絞り込みが行なわれたことが、本特定領域の大きな成果としてあげられる。グローバルシミュレーションによっても、スタグナントスラブを再現することが可能になり、滞留のメカニズムをほぼ解き明かす事ができた。

シンポジウムの後半では、スタグナントスラブの最終的な行き先と考えられるマントルの底CMBの研究発表がなされた。このセッションでは、実験研究における本領域研究グループの先導性、それに基づく深部スラブとD"構造の関係を示す新たな考え方の提示がなされ、今後も研究対象として我が国研究者の優位性が強く發揮されるであろうことを伺わせた。

今回のシンポジウムでは、日本側（特定領域側）は若手・中堅の研究者の台頭を反映し、半分以上の口頭発表が若手・中堅の研究者によって行われた。これらの人材は、特定領域研究「スタグナントスラブ」の成果を継承する今後のプロジェクトにおいて、中心的役割を果たす事が期待される。シンポジウムは全体的にfriendlyな雰囲気で進行し、多くの前向きな議論が海外および国内の参加者との間でなされたことは会議を成功に導いた大きな要因と考えられる。



写真2 ポスターセッション。

PEPI特集号“Deep slab and mantle dynamics”的お知らせ

末次 大輔

2009年2月の国際シンポジウム“Deep Slab and mantle dynamics”での発表論文を中心とした論文集をPhysics of Earth and Planetary Interior (PEPI, Elsevier社) 特別号として発行することになりました。スラブの沈み込みやそれに伴う水の輸送、スラブ滞留と崩落やそれに関係するマントルダイナミクスについての論文を、地球物理学・鉱物物理学・対流シミュレーション

等の広い分野から募集します。この特集号のためのゲストエディターは、Craig Bina, Douglas Wiens, 井上徹, 末次 大輔です。投稿締め切りは7月末予定, 発行は2010年春を予定しております。投稿論文は編集者による検討の後に査読作業に付されます。皆様の積極的な論文投稿をお願いします。

平成21年3月発行

発 行：特定領域研究「スタグナントスラブ：マントルダイナミクスの
新展開」総括班

編 集：塩原 肇・清水久芳・横山景一

東京大学地震研究所 海半球観測研究センター
〒113-0032 東京都文京区弥生 1-1-1
Phone: 03-5841-5701
Fax: 03-3812-9417
