

平成 21 年 4 月 16 日現在

研究種目：特定領域研究

研究期間：2004～2008

課題番号：16075202

研究課題名（和文） スラブ滞留・崩落過程の物質科学的モデリング

研究課題名（英文） Modeling of slab stagnation and falling processes

研究代表者

大谷 栄治 (Ohtani Eiji)

東北大学・大学院理学研究科・教授

研究者番号：60136306

研究成果の概要：

水の存在下でマントル遷移層の相転移境界の深さが変化する。揮発性物質を含むマグマの密度測定によると、このマグマが上部マントル最下部で安定である。これらの結果から滞留した深部スラブからの脱水と上部マントル下部での重い含水マグマの生成というDeep Dehydration modelを提案した。パイロライトや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。下部マントル全域でMORB成分はカンラン岩成分より重く、核マントル境界にMORB成分が堆積する。

交付額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2004年度	37,000,000	0	37,000,000
2005年度	56,000,000	0	56,000,000
2006年度	71,500,000	0	71,500,000
2007年度	66,200,000	0	66,200,000
2008年度	27,500,000	0	27,500,000
総計	258,200,000	0	258,200,000

研究分野：固体地球物理学

科研費の分科・細目：

キーワード：岩鉍・鉍物・鉍床、固体地球物理学、地殻・マントル物質、地球・惑星内部構造、水循環

## 1. 研究開始当初の背景

地震波で地球内部をイメージすると、プレート沈み込み帯の上部マントルから下部マントルにかけての遷移層（400-1000kmの深さ）に、地震波高速度領域が存在する。これは沈み込んだ海洋プレート（スラブ）の滞留している姿を表すものと考えられ、「スタグナントスラブ」と命名されている。この現象は、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一つの鍵と見ることができる。この特定領域研究は、物質科学的側面からスラブの滞留と崩落の諸過程を解明しようとするものである。沈み込んだスラブはなぜ滞留し、なぜ

崩落するか、スラブが滞留すると何が起こり、崩落すると何が起こるかの問題についての解答を得るためには、スラブと周囲のマントルとの相転移反応の違い、物性（密度・弾性波速度・電気伝導度・レオロジー）の違いを明らかにし、また両者の間の（特に脱水反応を媒介とした）熱的・化学的相互作用を解明することが必要である。

## 2. 研究の目的

本研究では、スラブがマントル遷移層と下部マントル上部でなぜ滞留するのか、そして滞留したスラブが、その後なぜ大規模な崩落を起こすのか、その原因はなにか、崩落にと

もなつ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。本研究では、このような問題を高温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、本特定領域の数値モデリング研究および地球物理的観測・解析研究に対して、信頼できる物性値を提供し、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イクスを解明し、それに対する水の影響を明らかにする。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が、相転移反応がどの程度進行するのかが、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するために、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。

### 3. 研究の方法

本研究にはマルチアンビル高圧装置とダイヤモンドアンビルセルの2種の高圧装置を用いて、マントルおよび核マントル境界の研究が行われた。また、それぞれの装置とともに放射光による強力X線をもちいたその場観察法による研究と試料急冷法による回収試料の解析が行われた。

(1) マルチアンビルを用いたマントルの物性研究：RingwooditeおよびWadsleyite中における水素、珪素、酸素の拡散係数を測定した。水素の拡散係数の測定は、高温高圧から回収試料の水素量を顕微FTIR法によって測定した。水素量の定量にはPatersonの較正法を採用した。珪素、酸素の拡散係数には、 $^{26}\text{Mg}$ および $^{28}\text{Si}$ の同位体からなる $\text{Mg}_2\text{SiO}_4$ を蒸着し、高温高圧下で試料をアニールし、

同位体の深さ方向の濃度変化は二次イオン質量分析装置(SIMS)を用いて測定した。同位体からなる $\text{Mg}_2\text{SiO}_4$ の蒸着にはBochum大のChacraborty教授にお願いした。一方、SIMSは九州大学の中村和樹博士の強力を得た。

揮発性マグマの密度の測定は、ダイヤモンドを密度標準とする浮沈法、および、試料によるX線の吸収率から密度を決定するX線吸収法を用いて測定した。測定には高輝度光化学研究センター(SPring8)のビームラインBL22XUの強力X線とそこに設置されたDIA型キュービックアンビル高圧装置、および高エネルギー加速器研究機構放射光研究施設(PF)のBL14C2設置のMAX-III高圧装置を用いて行われた。

Olivine-wadsleyiteおよびRingwooditeの分解の相境界への水の影響の測定に関しては、SPring8のビームラインBL04設置のマルチアンビル高圧装置SPEED-1500およびSPEED-MkIIを用いて行った。実験は20GPaから28GPaの条件で行い、実験の圧力は、試料の混合した金の状態方程式にもとづいて行った。

さらに、高圧鉱物アキモトアイトAkimotoiteの選択配向性の測定実験は、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、アキモトアイトの安定な20GPa程度の圧力および1000~1300°Cの温度領域において行った。千葉大学金川久一教授との共同研究として、回収試料の選択配向性の測定を、同大設置のEBSD装置を用いて行った。

### (2) ダイヤモンドアンビル高圧装置による下部マントルおよび核マントル境界の研究

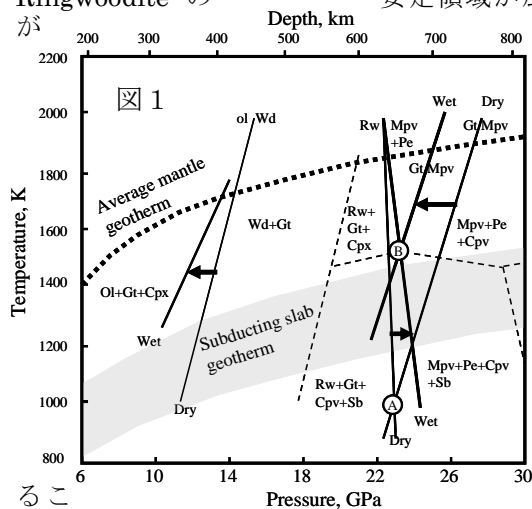
下部マントルおよび核マントル境界における元素分配および反応の解明には、両面レーザー加熱式ダイヤモンドアンビル高圧装置を用いて高温高圧で試料を処理した。回収した試料は収束イオンビーム装置(FIB)を用いて加工し、その試料の分析電子顕微鏡によって定量分析した。この方法によって、金属鉄中の固溶する酸素と珪素を定量した。また、同様の方法をも用いて、共存したフェロペリクレス、ペロブスカイト、ポストペロブスカイトの化学組成の測定を行った。

ペロブスカイトーポストペロブスカイトの境界決定、MORBの状態方程式の決定には、SPring8のビームラインBL10XUにおいて、両面加熱レーザーダイヤモンドアンビル高圧装置を用いて行った。また、このビームラインに設置したブリリアン散乱測定装置とダイヤモンドアンビルセル高圧装置を用いて、下部マントルの主要鉱物の音速の測定を行った。

### 4. 研究成果

(1) マントル遷移層における $\text{Mg}_2\text{SiO}_4$ 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、リングウッドイト  $Mg_2SiO_4$  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、 $Mg_2SiO_4$ -2 wt.% $H_2O$  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 23.5 GPa 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



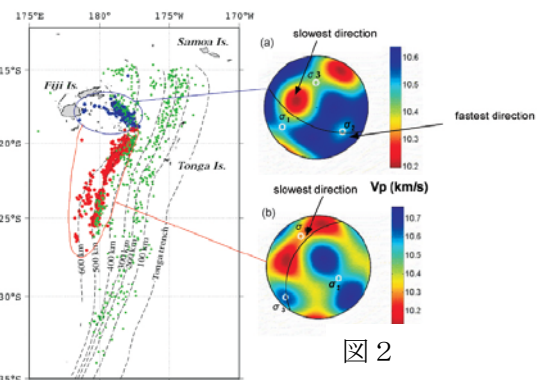
ることが明らかになった。このことは、Ringwoodite の含水量に温度依存性があり、低温ほど含水量が大きくなり、高温になると少なくなることに調和的である。すなわち、Post-spinel の相境界の勾配は、含水量に依存することが明らかになった。また、マントル遷移層に水が存在すると 660km 不連続面がより深くなることで  $Mg_2SiO_4$ -2wt% $H_2O$  の実験によって明らかになった。単純な系において  $H_2O$  の効果が明らかになり、この結果を用いて任意の含水量の系において、相境界の移動の程度が熱力学的に推定することが可能である。(図 1)

(2) マントル遷移層に沈み込んだスラブ中のアキモトアイト ( $MgSiO_3$ ) 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、南北こ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トア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。

実験の結果、低温(1000°C)の条件でのアキモトアイ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。得られたアキモトアイ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こ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)(図 2)。



(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  $MgSiO(OH)_3$ 、含水  $\delta$  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  $SiO_2$  スチショバイトと  $\delta$ - $AlOOH$  phase に分解する。本研究においては、分解生成物である  $\delta$ - $AlOOH$  の安定領域を明らかにする実験を行った。また、含水相  $\delta$ - $AlOOH$  および Ringwoodite と金属鉄の反応実験を行った。

1)  $\delta$ - $AlOOH$  phase の安定領域

出発物質は、diaspore  $AlOOH$  または gibsite  $Al(OH)_3$  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。 $\delta$ - $AlOOH$  は約 19GPa 以上約 120 GPa、2000 K 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、 $\delta$ - $AlOOH$  相は、これまで見出されている含

水鉱物のうち最も高圧まで安定なものであり、水をマントル最下部まで輸送すること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)。今回得られた超高圧高温での安定性は、この相における、水素と酸素の結合が対象とするためである可能性もある。

## 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圧高温その場 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 15 GPa 以上 130 GPa までの広い圧力範囲において、約 1300 K 以上で Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 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

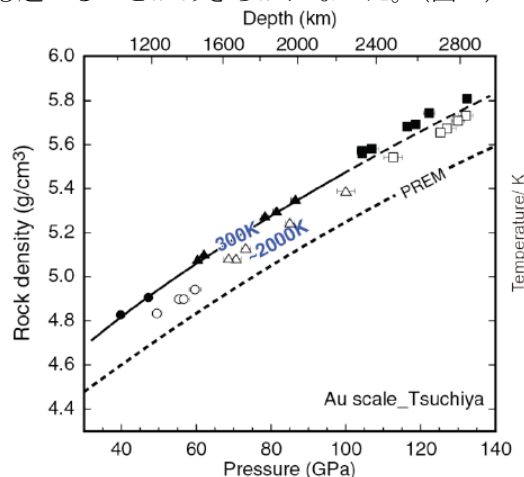
下部マントル起源のブルームにおいては、オスミウムの同位体の異常が見出されている。この異常は、核の物質が少量混入した最下部マントルの同位体を反映していると考えられている (例えば Brandon et al., 2004)。Brandon et al. (2004)によれば、核が結晶化する際に、液体の外核がオスミウム同位体異常をもち、これが CMBにおいて最下部マントルに混入することによって、最下部マントルがこのような同位体異常をもつこと解釈される。Os の同位体は、Pt および Re の同位体の崩壊によって生じる。したがって、Os の同位体異常の原因が、外核の金属鉄融体が最下部マントルを汚染し、ブルームがここから由来したものと解釈されてきた。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, Ot, 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 1470-1670C 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。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。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に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) 沈み込む MORB 地殻の密度と相転移  
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。

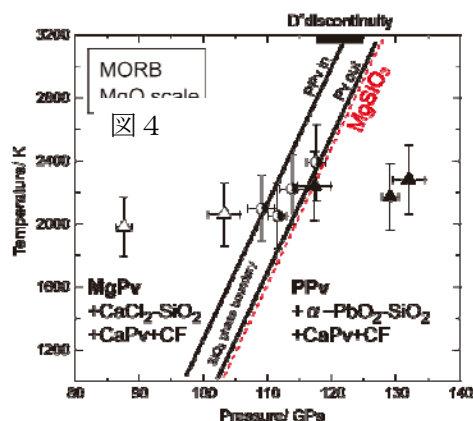
マントルの底へ蓄積した MORB パイルの検出を試みた。レーザー加熱式ダイヤモンドセルを用いた超高圧実験により、最下部マントルにおけるパイロライト的マントルと MORB の状態図をできるだけ詳細に作成したところ、MORB 中では約 4GPa 低圧でポストペロフスカイト転移が起こること、また MORB 中では同じ圧力でシリカ相の相転移も起こることがあきらかになった。(図 3)



## (6) 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に関する実験的研究

沈み込むスラブの行き着く先とされる D' 層の理解に以下のような貢献した。1) MgSiO<sub>3</sub> 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た。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。(図4)



3) ブリルアン散乱法によって、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。下部マントルの代表的鉱物 MgSiO<sub>3</sub> 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。4) 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ス相に濃集することをあきらかにした。5) 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明らかになった。6) 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。

#### 5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計 238 件)

1. Tateno S., Hirose K., Sata N., Ohishi Y., Determination of post-perovskite phase transition boundary in MgSiO<sub>3</sub> up to 4400 K and implications for thermal structure at the base of the mantle, Earth and Planetary Science Letters, 277, 130-136, 2009, 査読有
2. Shiraishi R., Ohtani E., Kanagawa K., Shimojuku A., Zhao D., Crystallographic preferred orientation of akimotoite and seismic anisotropy of Tonga slab. Nature, 455, doi:10.1038/nature07301, 2008.
3. Ohtani E. and Sakai T., Recent advances in the study of mantle phase transitions. Physics of the Earth and Planetary Interiors 170, 240-247, 2008, 査読有
4. Ohta K., Onoda S., Hirose K., Sinmyo R., Shimizu K., Sata N., Ohishi Y., Yasuhara A., The electrical conductivity of post-perovskite in Earth's D'' layer. Science, 320, 5872, 89-91,

doi:10.1126/science.1155148, 2008, 査読有

5. Hirose K., Lay T., Discovery of post-perovskite phase transition and new views of core-mantle boundary region. Elements, 4, 3, 183-189, doi:10.2113/GSELEMENTS.1.3.183, 2008, 査読有
6. Sakamaki T., Suzuki A., Ohtani E., Stability of hydrous melt at the base of the Earth's upper mantle. Nature, Vol.439, 192-194, 2006, 査読有
7. Ohtani E., Litasov K.D., Hosoya T., Kubo T. and Kondo T., Water transport into the deep mantle and formation of a hydrous transition zone. Phys. Earth Planet. Inter., 143-144, 255-269, 2004, 査読有

[学会発表] (計 328 件)

1. Ohtani E., Chemical reactions and element partitioning at the core-mantle boundary. Goldschmidt 2008, Vancouver, July 13-18, 2008.
2. Ohtani E., Kudo T., Ghosh S., Shimojuku A., Suzuki A., Role of Hydrogen in the Mantle Transition Zone. AOGS 2008, Busan, June 16-20, 2008.
3. Ohtani E., Physical and chemical properties of melts under deep earth conditions and their importance in geodynamics. 2007 AGU Fall Meeting, San Francisco, USA, December 10-14, 2007. (Bowen Lecture, Invited),
4. Ohtani E., Takeshi Sakai, Takaaki Kawazoe, Tadashi Kondo. Metal-silicate fractionation in the deep magma ocean and light elements in the core, 16th Annual V.M. Goldschmidt Conference 2006, S3-03, Melbourne, Australia, August 26- September 2, 2006. 招待講演
5. Ohtani E., S. Enomoto, Energetics of the earth derived from the Kamland observation and radiogenic heat source in the core. AGU 2006 Joint Assembly, U41E-01 (INVITED), Baltimore, May 23-26, 2006.
6. Ohtani E., Melt-Crystal Density Crossover in the Earth: its importance in Mantle Dynamics. 2005 AGU Fall Meeting, MR11A-01, San Francisco, California, December 5-9, 2005 (Invited).
7. Ohtani E., Kubo T., Hosoya, T. and Funakoshi, K., Use of Kawai-type apparatus combined with synchrotron X-ray radiation for study of kinetics of phase transformation in mantle minerals. 2004 AGU Fall Meeting, MR13A-06, San Francisco, December 13-17, 2004 (Invited).
8. Ohtani E., Water transport into the transition zone and lower mantle, and its effect on mantle dynamics. International Union of Crystallography High Pressure

Commission, Session VIII, Canadian Light Source, Saskatchewan (Canada), August 18-21, 2004 (Keynote).

〔図書〕 (計 4 件)

1. Ohtani, E. (Editor), Advance in High Pressure Mineralogy. Geological Soc. Am., Monograph volume421, Geological Soc. Am, P.P242, 2007.
2. Suzuki, A., Nishida, K., Sakamaki, T., Terasaki, H. and Ohtani, E., X-ray radiography technique at high pressures and high temperatures. in Recent development of the experimental techniques in high-pressure research on synchrotron radiation sources, edited by K. Kusaba, T. Kikegawa, K. Takemura, O. Ohtaka, T. Kondo, C. Sekine and T. Hattori, High Energy, Accelerator Research Organization (KEK), Tsukuba, pp. 61-64, 2007.
3. 大谷栄治・掛川武 「地球・生命 その起源と進化」 共立出版, 189P, 2005.
4. Rubie, D.C., Duffy, T.S. and Ohtani, E., New developments in high pressure minerals physics and applications to the earth's interior, Elsevier, 625P, 2004.

〔その他〕

ホームページ :

<http://ohp-ju.eri.u-tokyo.ac.jp/tokutei/menu-a03/index.html>

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

大谷 栄治 (Ohtani Eiji)  
東北大学・大学院理学研究科・教授  
研究者番号 : 60136306

### (2) 研究分担者

鈴木 昭夫 (Suzuki Akio)  
東北大学・大学院理学研究科・准教授  
研究者番号 : 20281975

寺崎 英紀 (Terasaki Hidenori)  
東北大学・大学院理学研究科・助教  
研究者番号 : 50374898

長瀬 敏郎 (Nagase Toshio)  
東北大学・大学院理学研究科・准教授  
研究者番号 : 10237521

廣瀬 敬 (Hirose Kei)  
東京工業大学・理工学研究科・教授  
研究者番号 : 50270921

村上 元彦 (Murakami Motohiko)  
東北大学・大学院理学研究科・准教授  
研究者番号 : 50401542

境 毅 (Sakai Takeshi)  
国際高等研究教育機構・国際高等融合領域

研究所・助教

研究者番号 : 90451616

### (3) 連携研究者

近藤 忠 (Kondo Tadashi)  
大阪大学・大学院理学研究科・教授

研究者番号 : 20252223

久保 友明 (Kubo Tomoaki)  
九州大学・大学院理学研究科・准教授

研究者番号 : 40312540

小宮 剛 (Komiya Tsuyoshi)  
東京工業大学・理工学研究科・准教授

研究者番号 : 30361786

大石 泰生 (Ooishi Yasuo)  
(財) 高輝度光科学研究センター・構造物  
性極限構造チーム・主幹研究員

研究者番号 : 20344400