

大規模水循環と全地球ダイナミクス

大 谷 栄 治*

Global Water Circulation and Dynamics in the Earth

Eiji OHTANI*

Abstract

The transportation and circulation of water in the Earth is global from the surface of the Earth to the lower mantle and the core. Water is trapped in hydrous minerals in subducting slabs, and is transported into the deep mantle. One of the most important water reservoirs is the mantle transition zone. Measurements of the diffusion of hydrogen in high-pressure minerals together with seismic and electrical conductivity measurements indicate that water is concentrated locally in the mantle transition zone beneath the subduction zone. The contrast in water solubility between upper mantle and transition zone minerals suggests that there is dehydration melting, and dense hydrous magma might exist in a stable state at the base of the upper mantle, which is consistent with seismic observations suggesting a low-velocity region at this depth.

Key words : circulation, water, slab, mantle transition zone, core, magma

キーワード：循環，水，スラブ，マントル遷移層，核，マグマ

I. はじめに

地球は水の惑星と呼ばれている。水は地球上の生命にとって、不可欠の物質である。それは大気・海洋・地表において私たちの生活に様々な影響を及ぼし、自然の風物詩を奏でている。このように私たちにとって不可欠な水は、どのようにして地球に存在するようになったのであろうか。また、過去の地球においてはどのようなのであろうか。未来の姿はいかなるものであろうか。このような疑問に対する解答を得ることは、私たちの研究目標の一つである。

水の移動と循環の研究はこれまで、大気・海洋・地表付近に議論が限られてきた。しかしながら、私たちの研究をはじめとする最近の研究によって、地球内部の水の分布状態が解明されつつ

あり、水の移動と循環の様式は従来考えられてきたものよりも、もっと大規模な固体地球の深部を含むものであることが明らかになりつつある。ここでは、地球内部での水の存在様式と水の地球内部への移動に関する私たちの得た最近の知見を紹介しよう。本論文において、「水」というのは、やや不正確な表現ではあるが、 H_2O の液体・液体とともに、固体としての氷、広い意味でケイ酸塩中のヒドロキシ基 OH、そして格子欠陥中のプロトン H^+ 、金属鉄中に合金として固溶している H や O などすべてを総称している。

II. 高温高压実験による地球内部の探索

地球内部における水の存在様式や移動様式を解明するためには、高温高压下で安定な含水鉱物の結晶構造とその安定領域を解明し、それらの高压

* 東北大学大学院理学研究科地学専攻

* Department of Earth Science, School of Science, Tohoku University

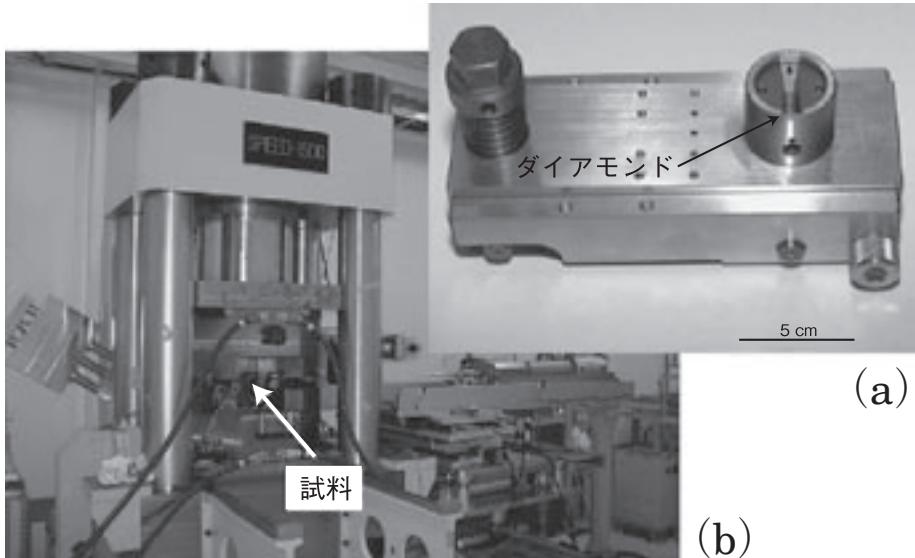


図 1 地球内部を解明する高压装置. (a) ダイヤモンドアンビル高压装置, (b) マルチアンビル型 (川井型) 高压装置.

Fig. 1 High-pressure apparatus used for studying the Earth's interior. (a) Diamond anvil apparatus, (b) Multi-anvil (Kawai-type) apparatus.

相の密度、弾性的性質、相転移速度や拡散速度などの物性を解明することが不可欠である。地球内部のダイナミクスの解明には、密度分布、地震波速度分布、電気伝導度分布などの野外観測のみでは不可能であり、観測結果を理解するためには高温高压下での地球内部物質の物性の情報が必要になる。このような物性の測定のために、大きく分けて二種類の高温高压発生装置が用いられている。第一はダイヤモンドアンビル高压装置（図 1a）であり、この装置によって、地球の核・マントル境界（136 GPa）や核内部に相当する圧力（136 ~ 360 GPa）の発生が可能になっている。現在での静的超高压の発生の記録はこの装置によってなされており、地球中心部を超える 360 GPa 以上の超高压の発生が記録されている。第二はマルチアンビル型高压装置であり、装置の発明者にちなんで我々は Kawai (川井) 型高压装置と呼んでいる（図 1b）。この装置によって、ダイヤモンドアンビルでは達成不可能な大きな容積に地球内部の深さ 1500 km を超える 60 GPa(60 万気圧) 以上の圧力を発生することができる。この装置を

用いて、高温高压下で安定な鉱物の合成、それらの大型単結晶の合成、地球内部物質を模した組成の複雑な多成分系の相平衡実験、融解実験、拡散・相転移速度の測定実験などが行われている。さらに、西播磨の高輝度光科学研究中心の SPring-8 および筑波の高エネルギー加速器研究機構の Photon Factory (PF) の放射光による高輝度 X 線を用いて、超高压高温下で X 線回折や X 線イメージング等の「その場観察」実験が行われている。

III. マントル遷移層への水の移動と濃集

これまでの多くの研究によって、地表や海洋の水は、プレートの沈み込みにともなって、マントル深部に運び込まれることが明らかになってきた。図 2 は、プレートの沈み込みにともなう物質の地球内部への移動と高温物質の地球深部からの上昇という地球物質の移動と循環の様子を模式的に示したものである。マントル深部からブルームによって上昇した物質は、上部マントル最上部で融解しマグマを生成する。海嶺においては、マ

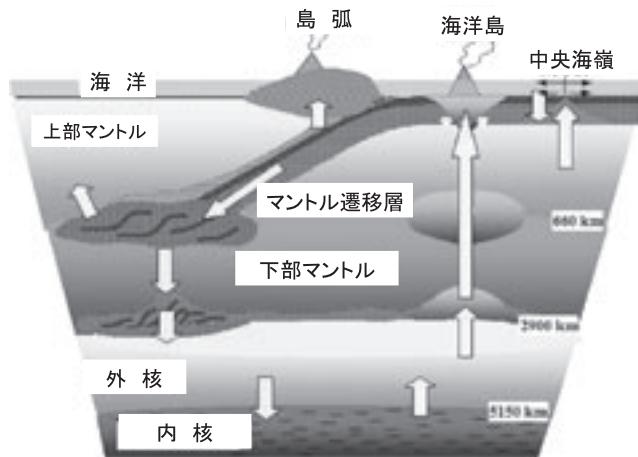


図 2 地球内部での物質の移動と循環。スラブと同様に水も地球内部を大規模に循環する (Ohtani, 2005).

Fig. 2 Transportation and circulation of materials in the Earth's interior. Water also circulates in solid earth from the surface to the bottom of the mantle, and even into the core (Ohtani, 2005).

グマが固化することによって海洋底が作られる。一方、海溝付近では海洋プレートがマントル深部に沈み込む。海洋底は生成したあと約2億年かけて消滅する。海洋底が生成し海溝で沈み込むまでに、プレート物質には水が結晶粒間や結晶内部の包有物として、また鉱物中のOH基として取り込まれる。プレートがマントルに沈み込むにしたがって、このような水分も同時にマントル深部に運ばれる。

このような水分は、プレートの沈み込みにともなう高温高圧のもとで、一部は含水鉱物の分解と脱水を引き起こし、これがプレート内部の地震の引き金になる。また、脱水した水はマントルウェッジに供給されマントルと地殻の融点を下げ火山活動を引き起す。しかしながら、最近の研究によると、このようにして脱水する水分は一部であり、地表では記載されたことがない様々な含水鉱物が生成し、それらによってマントル遷移層や下部マントルにも水が供給されていくことが明らかになってきた(例えば, Ohtani, 2005)。さらに、マントル遷移層の50～60%を構成するカンラン石($(\text{Mg}, \text{Fe})_2\text{SiO}_4$ 固溶体)の高压多形であるウォ

ズレアイト(β 相) やリングウッタイト(γ 相)と呼ばれる高压鉱物中には、1%を超える水がOH基として存在し得ることが明らかになってきた (Inoue *et al.*, 1995; Kohlstedt *et al.*, 1996; Ohtani *et al.*, 2000)。そして、マントル遷移層は地球内部のもっとも大きな貯水池であるという共通認識が、地球内部研究者の間で確立しつつある。もし、マントル遷移層が1%の水を含んでいたら、それは海洋全質量の数倍の量に相当する。図3は地球内部に存在する水を含む鉱物の安定領域を示す相平衡図である(例えば, Ohtani *et al.*, 2004)。図の灰色の領域は、含水鉱物が安定に存在する温度圧力条件である。この図に示すように、沈み込む低温のプレート(スラブ)内部では含水鉱物が安定に存在し、これらの鉱物にOH基として取り込まれた水分は、深さ410～660 kmのマントル遷移層およびさらに下部マントルに運ばれる。

これまでの研究によると下部マントルを構成するマグネシオブサイトやMgペロブスカイトは、100 ppm以下の微量の水を含むに過ぎないとみなされている(例えば, Litasov *et al.*, 2006)。

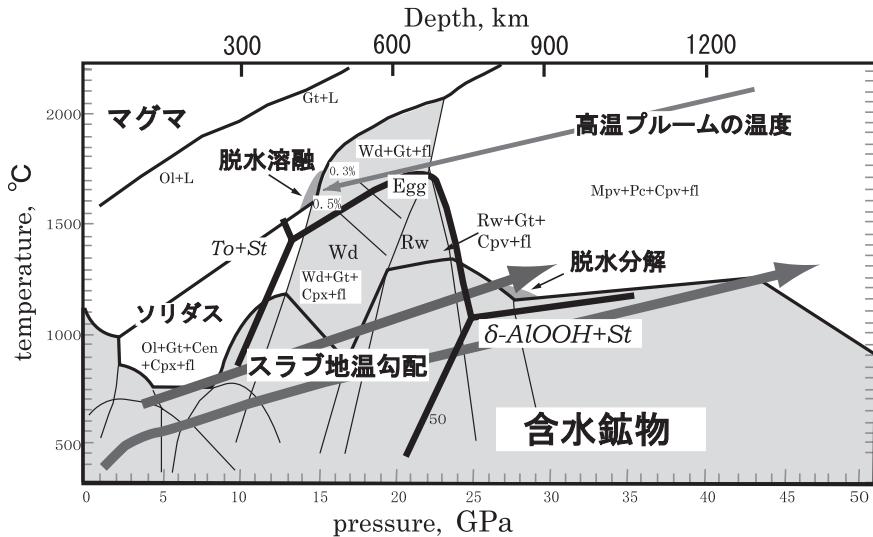


図 3 含水鉱物の安定領域。図の灰色の温度・圧力領域においては、含水鉱物が安定である。沈み込む冷たいスラブの温度分布のもとでは、マントル遷移層や下部マントルに水が取り込まれる。高温のブルームは上部マントル最下部において、脱水反応によって融点が低下し部分溶融する (Ohtani *et al.*, 2004).

Fig. 3 The stability relations of hydrous minerals. The shaded area in the diagram shows the stability fields of hydrous minerals. Water can be transported into the mantle transition zone and lower mantle by slabs with cold temperature profiles. Dehydration melting occurs in high-temperature plumes ascending in the mantle transition zone due to a decrease of melting temperature with the addition of dehydrated water at the base of the upper mantle (Ohtani *et al.*, 2004).

一方マントル遷移層の深さにおいては、低温の含水スラブの内部には、含水リングウッダイト相やスーパーハイドロス B 相などのように水を大量に含む高压鉱物が存在する。もしこれらの含水鉱物が普遍的に存在すると、マントル遷移層の下部では、沈み込む低温のスラブの水の貯蔵量は 1 wt.% 程度にも及ぶ。沈み込んだスラブは、遷移層下部や下部マントル最上部に滞留し、温度の上昇とともに含水鉱物が分解し脱水する。また、下部マントルに沈み込む際に水を多量に含むリングウッダイトが水をほとんど含まないマグネシオブースタイトとペロブスカイト相への分解反応にともなって、鉱物間の含水量の大きな違いによっても脱水反応が生じる。一方、図 3 に示すように、マントル遷移層で水分を含んだ高温のブルームは上部マントル最下部で脱水反応し、生じた水によって融点が低下し、この領域は部分溶融するこ

とが予想される (Ohtani *et al.*, 2004)。

VI. マントル遷移層への水の濃集機構

図 4 に 660 km の地震波不連続面の近傍における脱水と水の濃集メカニズムを示す。すでに述べたように、リングウッダイトはマントル遷移層下部の温度圧力では、約 1 wt.% もの水を固溶するのに対して、下部マントルを構成する鉱物はほとんど水を含まない。含水量が 0.01 ~ 0.1 wt.% のスラブが約 10 cm/年で下部マントルに沈み込む場合 660 km 地震波不連続面においてはスラブの含水量の 90 ~ 99% が脱水する。脱水した水は、上部のリングウッダイト中に再び吸収される。吸収された水は、拡散によって均質化されることはない。我々の最近の予備的実験によると、リングウッダイト中の水素の拡散速度は、カンラン石やウォズレイトと同程度であり、一般の陽イオン

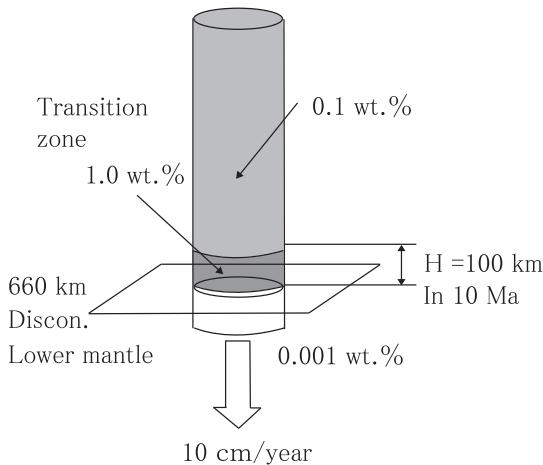


図 4 マントル遷移層下部での水の濃集モデル。リングウッダイトと Mg-ペロブスカイト + マグネシオブスタイトの大きな含水量の違いによって、マントル遷移層の最下部で脱水反応が生じる。鉱物中の水素の拡散速度は非常に遅く、沈み込み帯下部のマントル遷移層に水素の局所的な濃集が起こる。

Fig. 4 A model of water concentration at the base of the mantle transition zone. A large contrast in water solubility between ringwoodite and Mg-perovskite + magnesiowustite causes dehydration at the base of the transition zone. Water (hydrogen) is locally concentrated in the slab at the base of the mantle transition zone because the hydrogen diffusion is sluggish compared to the rate of slab subduction.

や陰イオンに比べてはるかに早いが、それでも大変遅く 10^8 (1 億) 年で約 0.5 km 程度しか移動しないからである (Hae *et al.*, 2006)。流体の浸透は、リングウッダイト中の水の溶解度を超えた場合、すなわち含水量が 1 wt.% を超えた場合にのみ有効に働くことになる。したがって、もしスラブが継続的に沈み込み 660 km の不連続面で脱水すると、マントル遷移層の下部には含水量が約 0.5 wt.% 程度 (含水量 1 wt.% のリングウッダイトを約 50% 含む) の領域が発達することになる。沈み込むスラブが 0.01 ~ 0.1 wt.% の水を含み、10 cm/年のスピードで下部マントルに沈み込む場合には、マントル遷移層下部のスラブには

0.5 wt.% 程度の厚さ 10 ~ 100 km 程度の水を含む領域が形成されることになる。このような水の局所的な濃集は最近の地球物理学的な観測結果とも調和する (Koyama *et al.*, 2006)。

それでは、現在のマントル遷移層には、実際にどの程度の水が存在するのであろうか。実際に存在する水の量は、地球内部の地震波速度や電気伝導度の観測結果にもとづいて明らかにできる。マントル遷移層を構成する主要鉱物であるウォズレアイトやリングウッダイト中の水素の拡散係数を測定し、水素拡散にもとづく電気伝導度を推定することができる (Hae *et al.*, 2006)。この結果と遷移層を含むマントルの電気伝導度分布の観測結果によって、マントル遷移層内部の水の分布を明らかにできる (Koyama *et al.*, 2006)。図 5 はその結果を示している。マントル遷移層付近の地震波トモグラフィと電気伝導度分布を比較する。両者は一般に相互依存関係を持つが、温度圧力依存性で説明できない電気伝導度異常が見られる領域がある。その異常を含水量としてみなすことができる。こうして、フィリピン海溝やマリアナ海溝付近の含水量 (すなわち水素量 ppm H/Si) を推定した。その結果、12,000 ~ 20,000 ppm H/Si もの水分が沈み込み帯付近のマントル遷移層に局在する様子が見えた。この解析結果からも明らかなように、マントル遷移層内部でも含水量に不均質性があることがわかった。

V. 上部マントル最下部のマグマ

上部マントルの最下部は、高温のブルームの上昇にともない、脱水とそれによる溶融温度の低下によって常に部分溶融している可能性がある。地震波の低速度域がこの領域に存在することが、一部の地震学者によても報告されている (Revenaugh and Sipkin, 1994)。マグマは一般的に水が溶け込むと密度が減少する。図 6 に、含水マグマの密度と周囲のマントルの密度分布を示す。我々が最近行った含水マグマの密度の測定結果によって、約 5.4 wt.%までの水を含むマグマは、まわりのマントルよりも重く、上部マントルの最

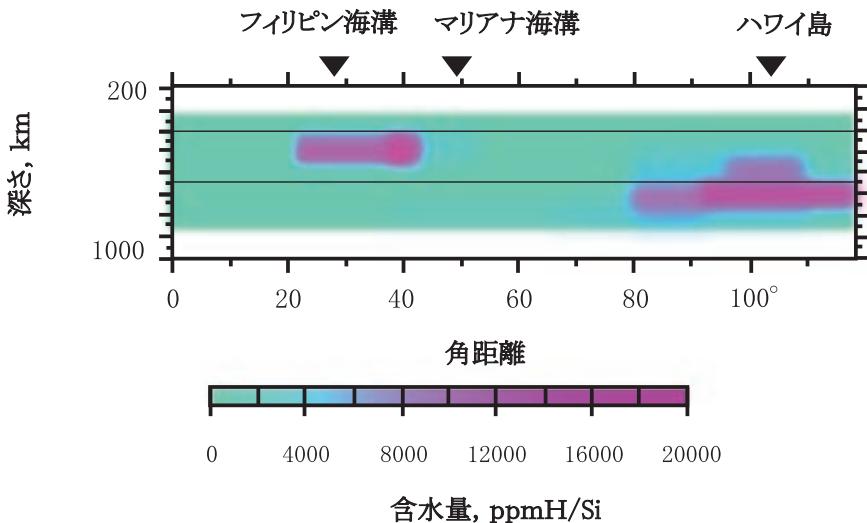


図 5 地震波速度分布・電気伝導度分布の温度圧力依存性では説明できない電気伝導度の異常域は、水（水素）の存在で説明することができる。マントル遷移層には局所的に水素が濃集しているらしい（例えば、Koyama *et al.*, 2006）。

Fig. 5 The electrical conductivity anomaly, which cannot be accounted for both by the temperature dependencies of the seismic wave velocity and electrical conductivity anomalies can be explained by local concentration of water (hydrogen). Water might be locally concentrated in the mantle transition zone (e.g., Koyama *et al.*, 2006).

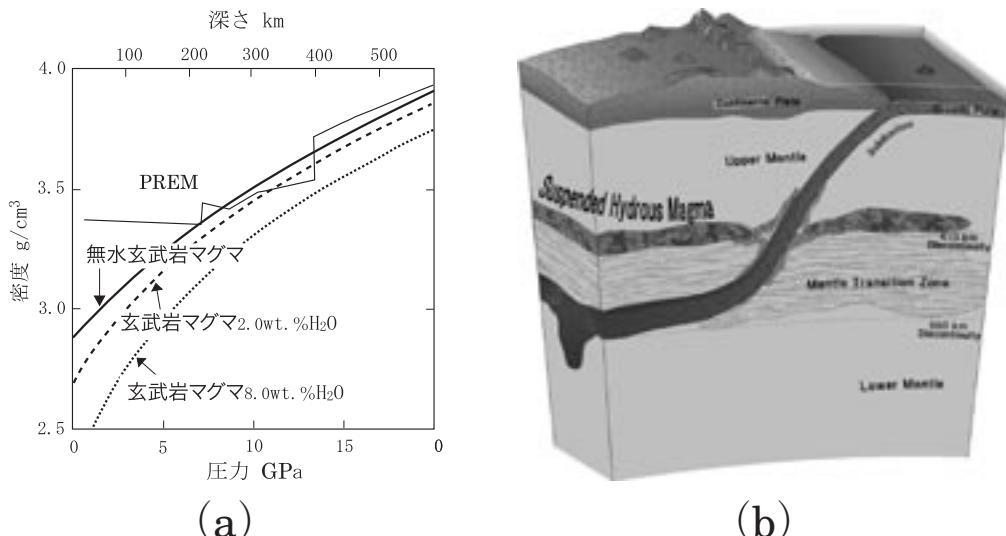


図 6 (a) 含水マグマと標準マントル (PREM) との密度の比較 (Sakamaki *et al.*, 2006)。5.4 wt.%までの H_2O を含むマグマは重力的に安定である。(b) 上部マントル最下部には、重力的に安定な含水マグマが存在し得る（イメージは根本潤氏による）。

Fig. 6 (a) A contrast between the density of hydrous magma and that of the standard mantle model (PREM) (Sakamaki *et al.*, 2006). The hydrous magma containing water up to 5.4 wt. % is gravitationally stable. (b) A gravitationally stable hydrous magma may exist at the lowermost part of the upper mantle (the image was designed by J. Nemoto).

下部に重力的に安定にとどまり得ることが明らかになった (Sakamaki *et al.*, 2006)。これまで地震学的に報告してきた上部マントル最下部の地震波速度の低速度異常が、そこに含水マグマが存在する可能性があることを、この実験結果は強く示唆している。

VII. まとめ

水の移動と循環はマントル遷移層や下部マントルを含み全地球規模の大規模なものである。また、そのような水の輸送の結果、マントル遷移層は地球内部の深さ 410 ~ 660 km は大きな水の貯留層になるだろう。沈み込み帯付近の遷移層に水が局所的に濃集している領域が存在することが明らかになりつつある。そして、上部マントル最下部（深さ 410 km 付近）には、周囲よりも重い含水マグマが存在している可能性のあることが明らかになった。

謝 辞

本研究は、これまで私たちが行ってきた地球内部への水の移動と濃集過程に関する研究結果の一部を紹介したものである。この研究を行うにあたって、東北大学の鈴木昭夫博士、寺崎英紀博士、K.D. Litasov 博士、佐野亜沙美博士をはじめとする東北大学大学院理学研究科地学専攻地球惑星物性学分野の関係者・学生、高輝度光科学研究所 (SPring-8) の船越賢一博士、物質構造研究所放射光研究施設 (PF) の亀卦川卓美博士に感謝します。この研究は、文部科学省科学研究費特定領域研究「地球深部スラブ」(no. 16075202) により行われた。

文献

- Hae, R., Ohtani, E., Kubo, T., Koyama, T. and Utada, H. (2006): Hydrogen diffusivity in wadsleyite and water distribution in the mantle transition zone. *Earth Planet. Sci. Lett.*, **243**, 141–148.
- Inoue, T., Yurimoto, H. and Kudoh, Y. (1995): Hydrous modified spinel, $Mg_{1.75}SiH_{0.5}O_4$: A new water reservoir in the mantle transition region. *Geophys. Res. Lett.*, **22**, 117–120.
- Kohlstedt, D.L., Keppler, H. and Rubie, D.C. (1996): Solubility of water in the α , β , and γ phases of $(Mg, Fe)_2SiO_4$. *Contrib. Mineral. Petrol.*, **123**, 345–357.
- Koyama, T., Shimizu, H., Utada, H., Ichiki, M., Ohtani, E. and Hae, R. (2006): Water contents in the mantle transition zone beneath the north Pacific derived from the electrical conductivity anomaly. in *Earth's Deep Water Cycle* edited by Jacobsen, S. and van der Lee, S., *American Geophysical Union, Monograph*, **168**, 171–179.
- Litasov, K., Ohtani, E. and Sano, A. (2006): Influence of water on major phase transitions in the Earth's mantle. in *Earth's Deep Water Cycle*, edited by Jacobsen, S. and van der Lee, S., *American Geophysical Union, Monograph*, **168**, 95–112.
- Ohtani, E. (2005): Water in the mantle. *Elements*, **1**, 25–30.
- Ohtani, E., Mizobata, H. and Yurimoto, H. (2000): Stability of dense hydrous magnesium silicate phases in the systems Mg_2SiO_4 - H_2O and $MgSiO_3$ - H_2O at pressures up to 27 GPa. *Phys. Chem. Miner.*, **27**, 533–544.
- Ohtani, E., Litasov, K.D., Hosoya, T., Kubo, T. and Kondo, T. (2004): Water transport into the deep mantle and formation of a hydrous transition zone. *Phys. Earth Planet. Inter.*, **143–144**, 255–269.
- Revenaugh, J. and Sipkin, S.A. (1994): Seismic evidence for silicate melt atop the 410-km mantle discontinuity. *Nature*, **369**, 474–476.
- Sakamaki, T., Suzuki, A. and Ohtani, E. (2006): Stability of hydrous melt at the base of the Earth's upper mantle. *Nature*, **439**, 192–194.

(2007年9月3日受付, 2007年11月12日受理)