

何が火山弧の位置を決めているのか？

What control the position of volcanic arc?

\*石井 和彦<sup>1</sup>

\*Kazuhiko Ishii<sup>1</sup>

1.大阪府立大学大学院理学系研究科物理科学専攻

1.Department of Physical Science, Graduate School of Sciences, Osaka Prefecture University

沈み込み帯で起こる地震・火山活動や変成作用を総合的に理解するために、地球物理学的・岩石学的な実験・観測・解析のほか、それらから得られる多様な情報を相互に関連づける様々な数値モデリングが行われている。沈み込み帯ではスラブやマントルウェッジの脱水・加水・溶融・固結に加え、流体の移動や流体による粘性の変化（部分溶融・加水軟化）など、様々な過程が相互に関連しながら起こるため、各過程を個別にではなく総合的に理解する必要がある。本講演では、昨年の連合大会で紹介した数値モデルを5つの沈み込み帯に適用し、その結果を地質学的・地球物理学的観察結果と比較することにより、何が火山弧の位置をきめているのかについて議論する。

キーワード：沈み込み体、数値モデル

Keywords: Subduction zones, Numerical model

スラブ直上の薄い低粘性層によるスラブ・マントル間カップリングの弧に沿った方向の変化  
Along-arc variation in the slab-mantle coupling due to a thin, low viscosity layer just above the slab

\*森重 学<sup>1</sup>

\*Manabu Morishige<sup>1</sup>

1. 京都大学大学院理学研究科附属地球熱学研究施設

1. Institute for Geothermal Sciences, Graduate School of Science, Kyoto University

In order to understand how seismic and volcanic activities occur in the subduction zone, it is critical to better understand the thermal structure there. Previous studies have shown that many factors affect the thermal structure including slab velocity, plate age, temperature dependence of viscosity, viscous anisotropy, complex slab geometry, and slab-mantle coupling. Among these factors, I focus on slab-mantle coupling in this presentation. It is well known mainly based on the observed low surface heat flow and low seismic attenuation that the forearc mantle is cold and rigid. To explain such a "cold corner", the movement of slab and mantle need to be decoupled down to a certain depth by a thin, low viscosity layer (LVL) just above the slab so that hot material does not reach the corner of the mantle wedge. Many numerical studies have investigated the effects of slab-mantle coupling so far, although very few of them focus on its along-arc change. In this presentation, I will show how LVL at the plate interface affects the along-arc change in the degree of slab-mantle coupling.

I construct 3D finite element models to investigate a possible role of LVL in the subduction zone. The model domain is divided into crust, slab, and mantle wedge that includes LVL just above the slab. The flow is computed only in the mantle wedge and temperature is computed for the whole model domain. Buoyancy force is not considered and viscosity is assumed to be temperature and strain rate dependent except for LVL where it is constant. The model setting is exactly the same in the along-arc direction.

I find that when the viscosity of LVL is sufficiently low, the degree of slab-mantle coupling starts to change in the along-arc direction at some point and 3D flow and thermal structure develop. Temperature dependence of viscosity may be a key factor in producing such a feature. I also find that a thicker LVL leads to a longer wavelength of the 3D flow, and a deeper down-dip limit of LVL leads to a delayed onset of the 3D flow. In order to explain the spatial distribution of Quaternary volcanoes in Northeast Japan with this model, the viscosity and thickness of LVL need to be  $<5 \times 10^{18}$  Pa.s and ~6 km, respectively. These results show that a detailed understanding of LVL including its formation process and spatial extent is essential to constrain the thermal structure in the subduction zone.

キーワード：沈み込み帯、スラブ・マントル間カップリング、火山分布

Keywords: subduction zone, slab-mantle coupling, distribution of volcanoes

## 地震波走時トモグラフィから推定された紀伊半島下のスラブ起源流体の特徴（2）

## Characteristics of slab-derived fluids beneath Kii Peninsula inferred from seismic traveltime tomography (2)

\*澁谷 拓郎<sup>1</sup>、平原 和朗<sup>1</sup>\*Takuo Shibutani<sup>1</sup>, Kazuro Hirahara<sup>1</sup>

1. 京都大学

1. Kyoto Univ.

## 1. はじめに

我々は、紀伊半島下に沈み込むフィリピン海プレートから放出されたスラブ起源流体の挙動や性質を調べるために、以下に述べるような地震観測、レシーバ関数解析、地震波走時トモグラフィ解析を行ってきた。紀伊半島下のスラブ形状と地震波速度構造を推定し、低速度異常域の分布から流体の挙動を議論した。深部低周波イベントや和歌山県北部の活発な微小地震活動と流体の関係が理解されつつある。

## 2. これまでの結果

我々は、紀伊半島において2004年から2013年までリニアアレイ地震観測を行った。約5km間隔で線状に配置した地震計で記録された遠地地震のレシーバ関数解析によりS波速度不連続面のイメージングを行った。フィリピン海スラブ傾斜方向の4測線とこれらにほぼ直交する2測線について作成したレシーバ関数イメージから大陸モホ面、スラブ上面および海洋モホ面を読み取り、それらの3次元的形状を推定した。この解析で得られた新たな知見は、大陸モホ面が沈み込むフィリピン海スラブの上をせり上がるように南東方向に傾き上がっていることである。

本研究のトモグラフィ解析ではFMTOMO (Rawlinson et al., 2006) を改良したプログラムを用いた。波線追跡と理論走時の計算には波面法に基づくrobustな手法 (de Kool et al., 2006) が使われている。速度構造モデルに、レシーバ関数解析により推定した大陸モホ面、スラブ上面および海洋モホ面の3次元的形状を組み込んだ。さらに、定常観測点に加えて、アレイを構成する臨時観測点の読み取り値も使用した。臨時観測点の稠密な配置により、高い分解能が得られた。2010年途中までの74か月間の読み取りデータの解析から、(1) スラブ上面の深さ30~40 kmあたりの深部低周波イベント (DLFE) 発生域とその周辺でP波速度 ( $V_p$ ) とS波速度 ( $V_s$ ) はともに-5 %程度の低速度異常を示すこと、(2) 和歌山県北部の、上部地殻に微小地震が多発する領域の下下部地殻に $V_p$ と $V_s$ ともに-10 %にも及ぶ非常に強い低速度異常域がやや東西に広がる形で存在すること、がわかった。

## 3. 新たな試み

2010年以降のデータに対して、未読み取り期間については業者委託による自動読み取りを行い、33か月間のデータを追加した。この結果、トモグラフィ解析で利用できる地震数と走時数が2倍弱となった。この更新されたデータを用いてトモグラフィ解析を行った。その結果は、上述の(1)と(2)と同様の特徴を示した。深さ22 kmから34 kmにおいてチェッカーボードテストに改善が見られた。(1)は海洋地殻内の含水鉱物の脱水分解が進み、流体が放出されたためと考えられる。(2)は、和歌山県北部の下部地殻に存在する流体が浅部の脆性領域に上昇し、岩石中の間隙水圧を上げ、摩擦力を下げるため、この地域で微小地震が多発すると考えられる。和歌山県北部の下部地殻の低速度域での $V_p/V_s$ 比は1.6程度と低く、この領域の流体はシリカに富んでいるのかもしれない。DLFE発生域の低速度域での $V_p/V_s$ 比についても再検討する必要がある。今後、Ramachandran and Hyndman (2012, Solid Earth) 等を参考にして、 $V_p/V_s$ 比を推定する手法を工夫する。

防災科学技術研究所、気象庁、東京大学地震研究所、名古屋大学、京都大学防災研究所の定常観測点の波形データを利用した。

キーワード：トモグラフィ、スラブ起源流体、紀伊半島

Keywords: tomography, slab-derived fluids, Kii Peninsula

前弧かんらん岩の加水反応速度に対する実験的制約：有馬型熱水の湧出条件への応用  
Experimental constraints on the serpentinization rate of fore-arc peridotites:  
implications for the welling condition of the "Arima-type" hydrothermal fluids

\*中谷 貴之<sup>1</sup>、中村 美千彦<sup>1</sup>

\*Takayuki Nakatani<sup>1</sup>, Michihiko Nakamura<sup>1</sup>

1. 東北大学大学院理学研究科地学専攻地球惑星物質科学科

1. Division of Earth and Planetary Materials Science Department of Earth Science Graduate School of Science, TOHOKU Univ.

In order to place a constraint on the water circulation in subduction zones, hydration rates of peridotites have been investigated experimentally in fore-arc mantle conditions. Experiments were conducted at 400–580°C and 1.3 and 1.8 GPa, where antigorite was expected to form as a stable serpentine phase. Crushed powders of olivine + orthopyroxene and orthopyroxene + clinopyroxene were reacted with 15 wt% distilled water for 4–19 days. The synthesized serpentine was lizardite in all experimental conditions except that of 1.8 GPa and 580°C in the olivine + orthopyroxene system, in which antigorite was formed. In the olivine + orthopyroxene system, the reactions were interface-controlled except for the reaction at 400°C, which was diffusion-controlled. Corresponding reaction rates were  $7.0 \times 10^{-12}$ – $1.5 \times 10^{-11} \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$  at 500–580°C and  $7.5 \times 10^{-16} \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$  at 400°C for the interface- and diffusion-controlled reactions, respectively. Based on a simple reaction-transport model with these hydration rates, we infer that leakage of the slab-derived fluid from an water-unsaturated fore-arc mantle is allowed only when focused flow occurs with a spacing larger than 77–229 km in hot subduction zones like Nankai and Cascadia, whereas the necessary spacing is just 2.3–4.6 m in intermediate-temperature subduction zones like Kyushu and Costa Rica. These calculations suggest that fluid leakage in hot subduction zones may occur after the fore-arc mantle is totally hydrated, while in intermediate-temperature subduction zones, leakage through a water-unsaturated fore-arc mantle may be facilitated.

キーワード：加水反応、スラブ流体、蛇紋石、前弧マントル

Keywords: hydration reaction, slab-fluid, serpentine, fore-arc mantle

## 変成作用における反応-物質移動-破壊のフィードバックとパターン形成

Feedback among reaction, mass transport and fracturing during metamorphism: controls and pattern formation

\*岡本 敦<sup>1</sup>、清水 浩之<sup>2</sup>

\*Atsushi Okamoto<sup>1</sup>, Hiroyuki Shimizu<sup>2</sup>

1.東北大学大学院環境科学研究科、2.東北大学流体科学研究所

1.Graduate School of Environmental Studies, Tohoku Univ., 2.Institute of Fluid Science, Tohoku Univ.

Analyses of equilibrium phase relations with recently-developed thermodynamic dataset of rock-forming minerals has provided us significant information on distributions of stable mineral assemblage and water content within the Earth's interiors. However, based on the petrological observations of metamorphic rocks and serpentinites, thermodynamic equilibrium is not always attained during metamorphism at individual P-T conditions, and unreacted parts often remain. To understand the dynamic behavior of the Earth's interior, it is important to investigate essential controls on the progress of metamorphic reactions. We have developed a novel model for the coupled processes of surface reaction, fluid transport and fracturing during metamorphic reactions by a distinct element method (DEM) (Okamoto and Shimizu, 2015). This model considers a reaction rate as a function of fluid pressure, and revealed that contrasting fracture patterns are produced between volume-decreasing dehydration (typical in prograde metamorphism) and volume-increasing hydration reactions (retrograde metamorphism, or serpentinization).

In this contribution, we focus on the relative rate of fluid transport and surface reaction on the fracture pattern during the volume-increasing hydration reaction. The new DEM model treats transport of water in two ways; flow along the fractures and flow through matrix. The latter has the similar effects to diffusion. For evaluate the system, we introduce two nondimensional parameters; the ratios of the rates of fracture flow ( $Y_F$ ) and diffusion ( $Y_D$ ) to the surface reaction rate. We found systematic changes in fracture pattern and system evolution as a function of  $Y_D$  and  $Y_F$ . In the first case that reaction is faster than water transports ( $Y_D < 1$  and low  $Y_F < 1$ ), the reaction proceeds from the boundaries and forms fine fractures layer-by-layer. In the second case that reaction is faster than diffusive transport of water but much slower than flow along the fracture (low  $Y_D < 1$  and high  $Y_F > 1000$ ), the reaction proceeds inward effectively to form hierarchical fracture networks. In the third case with high diffusion rate ( $Y_D > 10$ ), the reaction tends to proceed from the boundaries without fracturing. The dependence of the fracture pattern on  $Y_F$  and  $Y_D$  suggests the importance of the rates of water transport relative to the surface reaction rate in studying the mechanism and overall rate of water-rock reactions. The fracture pattern generated in the second case is similar to mesh texture found in the partly serpentinized peridotite in oceanic peridotites. We also discuss the effects of grain boundaries and will develop the model to more realistic reaction system which incorporate element diffusion such as silica.

Okamoto and Shimizu (2015) Earth Planet Sci Let, 417, 9-18.

キーワード：反応-物質移動-破壊のフィードバック、離散要素法、蛇紋岩化作用

Keywords: reaction-transport-fracturing feedback, distinct element method, serpentinization

## 岩石の水飽和率－弾性波速度の関係における間隙径分布の影響

## Influence of pore size distribution on elastic wave velocities during evaporative drying

\*堀川 卓哉<sup>1</sup>、横山 正<sup>1</sup>\*Takuya Horikawa<sup>1</sup>, Tadashi Yokoyama<sup>1</sup>

1.大阪大学大学院理学研究科宇宙地球科学専攻

1.Department of Earth and Space Science, Graduate School of Science, Osaka University

弾性波速度 ( $V_p$ ,  $V_s$ ) は、岩石の水飽和率 ( $S$ )、間隙のサイズと形状、間隙水の分布状態、入射波の周波数などに依存することが知られており、その依存性を理解する目的で、Biot理論 (Biot, 1956) に基づいた様々な研究がなされている。しかし、従来の研究では、水飽和状態から完全に乾燥するまでに生じる弾性波速度の複雑な変化の全てを定量的に説明できるには至っていない。本研究では、間隙径の異なるベレア砂岩2種 (浸透率 300 mD, 20 mD; 以下それぞれベレア300, ベレア20と略記) と白浜砂岩1種 (浸透率: 0.6 mD未満) を用いて、乾燥により水飽和率を低下させながら  $V_p$ ,  $V_s$  を測定した (入射P波: 200 kHz, 入射S波: 100 kHz)。間隙径分布 (開口半径) の測定結果から、ベレア300では約5-100  $\mu\text{m}$ 、ベレア20では約1-10  $\mu\text{m}$ 、白浜砂岩では約0.4  $\mu\text{m}$ 未満の間隙が多いことが分かった。 $V_p$  を測定した結果、ベレア300については以下の4段階の変化が見られた [(1)  $S=1 \rightarrow 0.5$ :  $V_p$  低下、(2)  $S=0.5 \rightarrow 0.3$ :  $V_p$  上昇、(3)  $S=0.3 \rightarrow 0.1$ :  $V_p$  低下、(4)  $S=0.1 \rightarrow 0$ :  $V_p$  上昇]。また、同試料の $V_s$ 変化は以下の通りであった [(1)  $S=1 \rightarrow 0.15$ : 緩やかな $V_s$ 上昇、(2)  $S=0.15 \rightarrow 0$ : 急激な $V_s$ 上昇]。ベレア20では、 $V_p$  についてはベレア300における段階1の一部と段階2, 3, 4に相当する傾向が、 $V_s$  についてはベレア300と同様の傾向が見られた。白浜砂岩では、 $V_p$  についてはベレア300の段階3, 4に相当する変化のみが、 $V_s$  についてはベレア300やベレア20と異なり、一旦低下した後上昇する傾向が見られた。乾燥が進む際には、大きな間隙から先に水が失われることが知られている (Nishiyama et al., 2012)。したがって、各岩石の間隙径分布を用いることで、ある水飽和率においてどのサイズ以下の間隙が水で満たされているかが分かる。既存の理論に間隙径分布と体積弾性率の周波数依存性などの情報を加えることにより、 $S$  の変化に伴う  $V_p$ ,  $V_s$  の変化のより正確な再現を試みた。

キーワード: 弾性波、水飽和率、間隙径分布、砂岩

Keywords: Elastic wave, Water saturation, Pore size distribution, Sandstone

蛇紋岩の地震波速度に対する間隙水の効果とマントルウェッジでの高 $V_p/V_s$ の成因Effect of pore fluid on seismic velocity of serpentinite and the origin of high  $V_p/V_s$  in mantle wedge\*片山 郁夫<sup>1</sup>、リュウ ウンシ<sup>1</sup>、財間 寛太<sup>1</sup>\*Ikuo Katayama<sup>1</sup>, Yunxi Liu<sup>1</sup>, Kanta Zaima<sup>1</sup>

1. 広島大学大学院理学研究科地球惑星システム学専攻

1. Department of Earth and Planetary Systems Science, Hiroshima University

蛇紋岩はかんらん岩に比べて遅い地震波速度や高いポアソン比で特徴づけられるため、沈み込み帯でみられる地震波の低速度層や高 $V_p/V_s$ 領域の原因として注目されている。しかしながら、関東下や西南日本のマントルウェッジで報告されている著しく高い $V_p/V_s$  ( $>2.0$ ) は、蛇紋岩（アンチゴライト1.84）の存在だけでは説明がつかず、その領域には蛇紋岩に加え流体が共存している可能性が高い。そこで、本研究では間隙流体圧下における弾性波速度の測定システムの開発を行い、蛇紋岩の弾性波速度に対する間隙水の効果を定量的に検証することを試みた。なお、実験では、圧縮変形することで蛇紋岩中にクラックが生成し、そのクラックを流体が埋めることで弾性波速度がどのように変化するかを調べた。

実験は広島大学設置の容器内透水変形試験機を用い、封圧10-20MPa、間隙水圧5-10MPa、载荷速度0.1mm/min、室温の条件で行った。試料は円柱状（直径20mm、長さ40mm）に整形し、試料の両側面に圧電素子（ $V_p$ ,  $V_s$ ）を貼ることで透過法により弾性波を測定した。なお、弾性波のトリガーは5Vで入力し、入力波と透過波の初動からtravel-timeを見積もり、弾性波速度を計算した。蛇紋岩の弾性波速度は変形の進行とともに低下し、これは試料中にクラックが生成されることが原因と考えられる。なお、 $V_s$ は $V_p$ よりも速度低下が大きいため、その比である $V_p/V_s$ は変形とともに上昇した。この傾向はO'Connell and Budiansky (1974)が報告しているクラックモデルと調和的であり、含水条件ではクラック密度の増加により $V_p/V_s$ は高くなる。このように、蛇紋岩中の流体の体積（水が埋める空隙）が増加することで $V_p/V_s$ が上昇する傾向がみられたが、今後は流体の体積をシリンジポンプなどで計測し、空隙率による弾性波速度の変化を定量的に調べる予定である。そして、マントルウェッジでみられる高い $V_p/V_s$ 領域にどの程度の水が存在するのかを明らかにしていきたい。

キーワード：蛇紋岩、地震波速度、間隙水

Keywords: serpentinite, seismic velocity, pore fluid

## 球共振法により求めたトパーズ単結晶の弾性定数および温度依存性

Elastic constants of single-crystal topaz and their temperature dependence studied via sphere-resonance method

\*瀬間 文絵<sup>1</sup>、渡辺 了<sup>1</sup>

\*Fumie Sema<sup>1</sup>, Tohru Watanabe<sup>1</sup>

1.富山大学大学院理工学教育部

1.Graduate School of Science and Engineering, University of Toyama

Transport of ocean floor sediments by plate motions might play an important role in the circulation of materials within the Earth. Imaging subducted sediments through seismological observations requires a thorough understanding of elastic properties of sediment origin hydrous minerals. Topaz is a hydrous mineral, which can be formed from subducted sediment at high pressures. We have studied elastic constants of single-crystal topaz and their temperature dependence by the sphere-resonance method.

A sphere sample ( $D=6.483(1)$  mm) was made from a topaz single-crystal ( $\text{Al}_{1.97}\text{SiO}_4(\text{F}_{1.56}, \text{OH}_{0.42})$ ) collected from Nakatsugawa, Gifu Pref. by the two-pipe method. The uniformity of crystallographic orientation was confirmed with SEM-EBSD (Shizuoka Univ.) measurement. Resonant frequencies were measured at frequencies from 600 kHz to 1.5 MHz with different specimen-holding forces. Extrapolating to the specimen-holding force of zero, we obtained frequencies of "free" oscillation. The temperature was changed from 0 to 400°C. Elastic constants were determined by comparing measured and calculated resonant frequencies. The xyz algorithm (Visscher et al., 1991) was employed to calculate resonant frequencies of the sphere sample. At room temperature (18.7°C),  $C_{11}=281.3$ ,  $C_{22}=346.3$ ,  $C_{33}=294.8$ ,  $C_{44}=108.5$ ,  $C_{55}=132.5$ ,  $C_{66}=130.3$ ,  $C_{12}=121.5$ ,  $C_{13}=80.90$ ,  $C_{23}=81.73$  (GPa). Using determined elastic constants, compressional- and shear-wave velocities were estimated for an isotropic polycrystalline aggregate of topaz at high temperature. Compressional- and shear-wave velocities at 800°C are 9.32 km/s and 5.57 km/s, respectively. These values are significantly higher than those in minerals like olivine or garnet.

キーワード：弾性定数、共振法、含水鉱物、トパーズ

Keywords: elastic constants, resonance method, hydrous mineral, topaz



## マントル組成不均質の成因に関する新仮説： 660km不連続面におけるスラブの脱水

A new mechanism to produce chemical heterogeneity of Earth's mantle: Slab dehydration at 660-km phase boundary

\*中尾 篤史<sup>1,2</sup>、岩森 光<sup>1,2</sup>、中久喜 伴益<sup>3</sup>

\*Atsushi Nakao<sup>1,2</sup>, Hikaru Iwamori<sup>1,2</sup>, Tomoeiki Nakakuki<sup>3</sup>

1.東京工業大学大学院理工学研究科地球惑星科学専攻、2.海洋研究開発機構基幹研究領域地球内部物質循環研究分野、3.広島大学大学院理学研究科地球惑星システム学専攻

1.Department of Earth and Planetary Sciences, Tokyo Institute of Technology, 2.Department of Solid Earth Geochemistry, Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology, 3.Department of Earth and Planetary Systems Science, Hiroshima University

### Introduction

Dehydration-hydration processes are thought to be essential for creating chemical heterogeneity in the Earth's mantle: e.g., the mantle geochemical end-member "HIMU" likely represents recycling of an extremely dehydrated oceanic crust, and mantle geochemical hemispheres (Iwamori and Nakamura, 2012) seem to be originated from dehydration-hydration reactions in subduction zones. We investigate behaviors of hydrophilic components during mantle convection and water transport using a self-consistent numerical model in order to reveal the chemical evolution of Earth's mantle with geophysical validity.

### Methods

A 2-D fluid mechanical simulation with following characteristics is conducted.

- (1) Free convection of whole-mantle scale without synthetic forces (Tagawa et al., 2007).
- (2) Phase diagrams of hydrous peridotite and hydrous basalt (Iwamori, 2007) to introduce hydration and dehydration reactions.
- (3) Realistic constitutive and state equations for the hydrous rocks to make (1) and (2) interactive.
- (4) Transport of multiple elements that can be partitioned between mantle rocks and aqueous fluid using a Marker-in-Cell technique.

### Results and Discussion

During slab subduction, dehydration reactions occur at specific p-T conditions. Then instantaneous aqueous fluid enriched in hydrophilic components and less-hydrated residue minerals depleted in the components are produced. The aqueous fluid is assumed to be immediately incorporated into dry rocks through which the fluid percolates. The transported hydrophile elements are assumed to precipitate with the fluid. In each run, three major dehydration and fractionation processes are reproduced as follows.

[Process 1] (Depth < 200 km; under-arc process) Associated with dehydration of the subducted slab, discharge of highly hydrophilic elements results in depletion of the slab subducting into deeper mantle. The hydrophilic elements are deposited into the overlying lithosphere. This process does not contribute to global redistribution of hydrophile elements, because of high viscosity in the cold region. The depleted layer is fixed along the subducting slab for a long time.

[Process 2] (Depth = 660 km; slab penetration process) When the slab penetrates into the lower mantle, the hydrophiles are continuously emitted depending on their partition coefficients during dehydration associated with wet-Rw → Pv + MgO + Aq transition. This process helps heterogeneity in terms of the hydrophile elements to horizontally expand. During the slab penetration process, the depleted rock as a product of 660-km dehydration is produced just below the phase boundary, and descends into the deeper mantle.

[Process 3] (Depth = 410 km; upwelling wet plume process) If the water-saturated layer is formed just above the 660-km phase boundary, wet plumes enriched in the hydrophiles ascend due to their buoyancy. After plumes reach the 410-km phase boundary, dehydration by  $Wd \rightarrow Ol$  transition and the corresponding fractionation of the hydrophiles occur. However, the depleted plume tails are not well separated from the enriched plume head.

Among them, [Process 2] is the most efficient process for creating and distributing the geochemical heterogeneity. [Process 2] with wet plumes and aqueous porous flows from the 660-km phase boundary involves a possible mechanism to produce the observed geochemical hemispheres representing a hydrophile-rich part (eastern hemisphere) and a depleted part (western hemisphere) (Iwamori and Nakamura, 2012).

キーワード：親水性微量元素、水輸送、マントル対流、660km地震波不連続面、マントル組成不均質、元素分別  
Keywords: hydrophilic trace elements, water transportation, mantle convection, 660-km phase boundary, chemical heterogeneity of mantle, element partition

## 鉄チタン水酸化物によるマントル遷移帯への水輸送

Iron-titanium oxyhydroxides as a water transporter into the Earth's mantle transition zone

\*松影 香子<sup>1</sup>、西原 遊<sup>2</sup>、Liu Xingcheng<sup>1</sup>、鈴木 敏弘<sup>1</sup>、瀬戸 雄介<sup>3</sup>、高橋 栄一<sup>1</sup>\*Kyoko N. Matsukage<sup>1</sup>, Yu Nishihara<sup>2</sup>, Xingcheng Liu<sup>1</sup>, Toshihiro Suzuki<sup>1</sup>, Yusuke Seto<sup>3</sup>, Eiichi Takahashi<sup>1</sup>

1.東京工業大学地球惑星科学専攻、2.愛媛大学地球深部ダイナミクス研究センター、3.神戸大学惑星学専攻

1.Earth and Planetary Sciences, Tokyo Institute of Technology, 2.Geodynamics Research Center, Ehime University, 3.Department of Planetology, Kobe University

私たちは、上部マントル底部条件での高圧実験において、鉄とチタンを主成分とする新しい含水相を玄武岩＋水の系で発見した。化学組成からFe<sub>0.5</sub>H-TiO<sub>2</sub>系の固溶体である事が予想されたが、玄武岩の系では粒径が小さく、単独でのX線回折やIR分析が困難であったため、単相の合成を試みた。Fe<sub>0.5</sub>H-TiO<sub>2</sub>系で7種類の出発物質 ( $x = \text{Ti}/(\text{Fe} + \text{Ti})$ 原子比 = 0, 0.125, 0.25, 0.375, 0.5, 0.75) をFe<sub>0.5</sub>HとTiO<sub>2</sub>の試薬で混合し、河合型マルチアンビル装置にて圧力8-16GPa、温度900-1600℃で合成実験を行った。その結果、(FeH)<sub>1-x</sub>Ti<sub>x</sub>O<sub>2</sub>の化学組成を持つ2種類のFeTi水酸化物が合成された。一つ目は、Feに富んだ組成をもち ( $x < 0.23$ )、結晶構造はe-Fe<sub>0.5</sub>H (斜方晶系, *P2<sub>1</sub>nm*) と同じであった (例えば Suzuki 2010)。もう一つは Tiに富んでおり ( $x > 0.35$ )、a-PbO<sub>2</sub> 型(斜方晶系, *Pbcn*)の結晶構造を有していた。このa-PbO<sub>2</sub> 型のFeTi水酸化物はNishihara and Matsukage (2016)において世界で初めて報告された。a-PbO<sub>2</sub> 型のFeTi水酸化物は、 $x = 0.75$ の場合、圧力は8-18GPa、温度は約1600℃まで安定で、地球マントルの平均地温勾配でも存在可能である。

私たちはさらに玄武岩＋水の系でのFeTi水酸化物の安定領域も実験的に調べており少なくとも1000 °C、8-17GPaの範囲で安定である事が分かっている。17GPaを超えると、FeTi水酸化物は分解し、TiはCaTiペロブスカイトに分配され、水はAlを含んだphase-Dに引き継がれる (Liu et al., 本会議で発表予定)。先行研究においては、玄武岩質の海洋地殻には圧力10GPa以上で安定な含水鉱物が存在せず、そのため玄武岩地殻が直接マントル遷移帯まで水を運ぶことが出来ないと思われていた。しかし、本研究による新しい含水相の発見によって、玄武岩が効果的に水をマントル遷移層や下部マントルまで直接運びうる事が分かった。

キーワード：上部マントル深部、マントル遷移帯、水、チタン、含水相、玄武岩地殻

Keywords: deep upper mantle, mantle transition zone, water, titanium, hydrous phase, basaltic crust

## 流体－メルト間の元素分配予測の試み：bond valence法の応用

## Prediction of elemental partition between fluid and melt by bond valence method

\*神崎 正美<sup>1</sup>\*Masami Kanzaki<sup>1</sup>

1.岡山大学地球物質科学研究センター

1.Institute for Study of the Earth's Interior, Okayama University

元素分配については、小沼、松井らによるアラユルニウム計画により、結晶中のイオン席の局所構造が分配を主に制御していることが分かった(Matsui et al., Bull. Soc. fr. Mineral. Crystallogr., 1977)。そのエッセンスを持つ長沢モデルやその派生モデルを使って、元素分配の「測定後」予測がよく行なわれている。これらのモデルでは、メルトやフルイドは直接的に取り扱われていない。これはメルトやフルイドの局所構造や物性がよく分かっていないためである。そのため、例えばフルイドーメルト間の元素分配を予測することはできない。最近、著者はbond valence法が分配の理解に利用できるのではないかと思いつき、結晶相で試してみたところ、定性的によい結果を得た。それをフルイドーメルト系に応用することを試みており、その結果について報告する。

bond valence(bv)法とは、イオン結晶中において、陽イオンの価数を、それに配位している陰イオンとの結合に対して配分するもので（逆も可）、元はPaulingのbond strengthに由来する。その後、I.D. Brownらが発展させたbv法では原子間距離が定量的に考慮されている（原子間距離が長いとbvは小さくなる）。bvの計算式の1つは $\exp((R_0 - r_{ij})/B)$ の形を取り、 $r_{ij}$ は原子間距離、 $R_0$ ,  $B$ は元素固有のbvパラメータである。結晶では、中心原子についてbvの和(bvsum)を取ると、中心原子のvalenceとほぼ一致する。大きくずれる場合は構造に何らかの問題がある。結晶学では得られた構造のチェック、多価原子の価数の決定、OHやF席の同定などに広く使われている。結晶構造データベースを使って、特定の陰イオン(主に酸素)に対して、各陽イオンのbvパラメータがほとんどの元素について決められている。したがって、結晶構造が分かれば、そのデータを使って、たとえばforsteriteのM2席に仮想的にSrを入れた場合のbvsumを計算することができる。そのような大きすぎるイオンを入れた時のbvsumは、Mgの価数2からは大きくずれる。このずれは「歪み」エネルギーと捉えることもできる。なぜなら、bvの計算式は2対間ポテンシャルの反発エネルギー部分と相似となるためである。そこで、 $\text{misfit} = \text{abs}(\text{bvsum} - Q)$ と定義する( $Q$ は中心イオンの形式valence)。異なる席間のmisfit差をとると、これをその席間の分配係数と対応させられることが分かった。この方法でforsteriteのM1/M2, opxのM1/M2の結晶内「分配係数」、garnet/chloriteなどの結晶間「分配係数」を色々な元素について計算すると、実験データと相似のパターンが得られた。この計算は非常に単純で表計算ソフトで扱える。必要なのは各席における中心原子－酸素間距離とbvパラメータのみであるので、perovskite/postperovskiteの分配なども予想できる。bv法が元素分配の定性的な予測やその理解に使えることが分かったが、misfit差と分配係数をどう定量的に対応させるか、価数の異なる時の定量的取り扱いなどがまだ未解決で残っている。

さて、フルイドとメルトの局所構造が分かれば、上記の方法でフルイドーメルト間分配の定性的な予測ができる。しかし、残念ながらそれがまずよく分かっていない。そこで、フルイドとメルトそれぞれについて仮想的な席を1つ考えて(配位数8程度)、それらの席の大きさ(原子間距離)を変えて、分配の変化を見てみた。Pearceら(doi:10.1029/2004GC000895)によれば、フルイドーメルト間ではBa, Cs, K, Pb, Srがフルイド側へ、REE, Nb, Ta, Zr, Hfなどはメルト側へ強く濃集するとされている。そのようなパターンは、フルイド側の席が3.2 Åくらいの大きさ、メルト側が2.5 Åくらいの場合に得られた。かなり単純化されているが、このような局所構造モデルを使えば、他の元素の振る舞いを予測することができるだろう（この場合は大きなイオンのみ）。配位数および大きさにより、分配パターンは局所構造で大きく変わるので、正確な分配係数が多いの元素で実測されれば、逆にフルイドとメルトの局所構造を制約するために使えるかもしれない。今後、第一原理計算などでさらに検証する必要があるだろう。

キーワード：ボンドバレンス法、元素分配、流体、メルト、局所構造

Keywords: bond valence method, elemental partition, fluid, melt, local structure

ラマン分光法による非破壊炭素同位体比分析は使い物になるのか？

Is the non-destructive analysis of carbon isotope ratio useful?

\*高畑 幸平<sup>1</sup>、鳥本 淳司<sup>2</sup>、山本 順司<sup>3</sup>

\*Kohei Takahata<sup>1</sup>, Junji Torimoto<sup>2</sup>, Junji Yamamoto<sup>3</sup>

1.北海道大学大学院理学院自然史科学専攻地球惑星システム科学講座、2.国立研究開発法人海洋研究開発機構、3.北海道大学総合博物館

1.Earth and Planetary System Sciences, Hokkaido University, 2.JAMSTEC, 3.Hokkaido University Museum

炭素は地球上に存在する揮発性元素の一つであり、地球史を通して地球表層の環境に多大なる影響を与えてきた。中でも、炭素-酸素化合物である二酸化炭素は温室効果を持ち、我々の生産活動によって排出される二酸化炭素が現代の急激な地球温暖化をもたらしていると考えられている。二酸化炭素は地球深部物質であるマントル捕獲岩中にも流体包有物として観察される。地球史を通して地球深部から放出されてきた炭素量を積算した場合、現在の地球表層に存在する炭素量に匹敵するほどの二酸化炭素が放出されてきたとする研究もある。為、マントル捕獲岩を用いた地球深部炭素の起源や炭素循環を理解することは、地球環境問題のより深い議論にとって重要である。

現在のマントル捕獲岩の炭素同位体比分析にはサンプルの破壊が伴う、測定の空間分解能の低さという点で問題がある。これらの問題を解決できる可能性がある新たな測定手法として、ラマン分光法による炭素同位体比測定がある。しかし、この手法はマントル捕獲岩中の炭素の起源を定量的に議論出来るだけの精度をまだ持っていない。本研究では、先行研究よりも高波数分解能を持つラマン分光器を用いて、炭素の起源を定量的に議論出来る精度 $\pm 5\%$ を目指す。また、得られた結果を基に誤差の要因について考察をし、今後の精度向上の展望について議論していく。

測定の結果、炭素同位体比分析の精度は1500秒で $\pm 26\%$ であることが明らかになった。このような悪い精度になってしまった原因として、本研究で用いたラマン分光分析装置の感度の悪さが挙げられる。先行研究で用いられたラマン分光分析装置よりも本研究で用いた装置は約1/26倍の感度であった為、 $S / N$ を十分に稼ぐことが出来ず、ピークフィッティングを正確に行えなかった。そこで、より多くのカウント数を取得した場合に、どれだけ測定精度が向上するか推定を試みた。その結果、今回の測定での測定精度は最高で $\pm 11\%$  ( $1 \sigma$ ) であると推定できた。しかし、マントル捕獲岩の起源を定量的に議論するには未だ誤差が大きい。

この誤差の要因を精査した結果、室温変動による見かけのラマンシフトを考慮していなかったことが要因であることが明らかとなった。この要因を除去した結果、測定精度は1500 sec.で $\pm 17\%$ で補正前より $\pm 9\%$ 向上した。また、室温の変動による影響を考慮すれば、時間は掛かるもののマントル捕獲岩中の二酸化炭素流体包有物の起源を議論出来る、誤差 $\pm 5\%$ の測定を行えることが明らかになった。

キーワード：二酸化炭素、流体包有物、ラマン分光法、マントル捕獲岩、炭素同位体比

Keywords: carbon dioxide, fluid inclusion, Raman spectroscopy, mantle xenolith, carbon isotope ratio

