

地下水で見つかる異常に軽いリチウム同位体組成の謎

Enigmatic ground water enriched in isotopically light lithium

*西尾 嘉朗¹*Yoshiro Nishio¹

1.高知大学

1.Kochi University

地殻深部流体は、地震や火山といった地殻活動に大きく関わる。「地殻内の流体分布」を可視化できる地震波トモグラフィーや電気比抵抗構造探査といった地球物理学的手法は、地殻流体の起源や挙動の解明において極めて強力なツールであるが、流体がある程度濃集していないと検出できない。そこで、地下水の同位体組成といった地球化学的情報と併せることで、地殻流体の起源に関して、より高度な知見が得られることが期待される。しかし、湧水や井戸水といった地表で採取できる地下水試料の地球化学的情報を基に、地殻流体の起源に迫った研究はこれまで極めて限られていた。これは、地下水の地球化学研究に用いられてきた元素同位体指標の多くが、表層水混入の影響を非常に受けやすかったためである。また、地下水試料から地殻深部流体の情報を得ようとした場合、深部流体上昇時における地殻との反応の影響も大きい。加えて、深部流体が上昇して温度が低下する際に、流体が高温時に獲得した地球化学情報は時間の経過と共に失われていく。リチウム

(Li)は、非常に流体相に分配されやすい元素の1つである。系の温度が上昇するにつれて、流体相の濃度は急速に上昇する。その結果、高温を経験した深部流体は、低温しか経験していない表層水に比べて著しくに富むため、他の元素に比べて深部流体表層水間の濃度のコントラストは極めて大きくなり、表層水混入の影響を他の元素に比べると受けにくい。また、高温となって流体相に分配されたは、他の元素に比べると温度降下の際も流体相に保持される。そして、は質量数との安定同位体比の情報が利用できる。反応温度が高温になるほど、流体の同位体組成は反応した固相側の値に近づいて、軽い同位体組成を持つようになる。私達の研究グループでは、温泉水や鉱泉水等の地下水試料の同位体結果を用いて、地殻深部流体の地球化学的研究を行ってきた。これまでの同位体研究を通して解明できていない大きな謎の1つに、ある種の地下水試料の中に地殻やマントルより有意に軽い同位体組成が見つかることがあげられる。前述の通りに、高温を経験した流体ほど軽い同位体組成を持つが、固相側の値より低くはならない。よって、地殻やマントルより有意に軽い同位体組成は、他の物質と反応した結果といえる。は、木曾御嶽火山の南東麓の地下水に地殻やマントルより有意に軽い同位体組成を発見した。この場所では、年から群発地震が続いており、比抵抗の調査結果からも深部流体の上昇が指摘されていた。では、木曾御嶽山周辺の群発地震域と非群発地震域のとストロンチウム (Sr) の同位体データと比較することで、群発地震域 (南東麓) で見つかった軽い同位体組成は、表層水が浅部マグマと反応した火山性流体では説明できないことを指摘した。しかしながら、群発地震域の地下水がどのようにして地殻平均より有意に軽い同位体組成を獲得したかについては不明のままであった。その後、木曾御嶽山南東麓で見つかったような著しく軽い同位体組成は、神戸や高知で見つかった。本発表では、この幾つか見つかった地下水中の軽い同位体組成の成因についての可能性を議論する。

参考文献：

Nishio et al., 2010. Lithium and strontium isotopic systematics of waters around Ontake volcano, Japan: Implications for deep-seated fluids and earthquake swarms. *Earth Planet. Sci. Lett.* 297, 567-576.

キーワード：リチウム同位体、地殻深部流体、スラブ起源流体、地球化学温度計

Keywords: lithium isotope, deep crustal fluid, slab-derived fluid, geochemical thermometer

地殻応力場と地質構造の関係から考える西南日本紀伊半島陸域での深部流体の上昇

Relationships between crustal stress fields and geological structures on pathways of upwelling deep-seated water at Kii Peninsula, southwest Japan

*大坪 誠¹、清水 徹¹、宮川 歩夢¹、佐藤 努¹、大和田 道子¹、風早 康平¹

*Makoto Otsubo¹, Tooru Shimizu¹, Ayumu Miyakawa¹, Tsutomu Sato¹, Michiko Ohwada¹, Kohei Kazahaya¹

1.産業技術総合研究所 地質調査総合センター

1.Geological Survey of Japan/AIST

The natural and hot springs with $^3\text{He}/^4\text{He}$ ratios higher than the atmospheric values are recognized to occur in nonvolcanic regions on the Kii Peninsula in the forearc regions of southwestern Japan arc (Sano & Wakita, 1985; Wakita et al., 1987; Matsumoto et al., 2003; Umeda et al., 2006, 2007), indicating that there are upwelling paths of the mantle-derived fluids in this region. A number of deep groundwater and natural spring water in this region are found to contain the slab-derived deep-seated fluid component, whose isotopic composition is similar to magmatic with the high Li/Cl ratio (>0.001 in wt. ratio) (Kazahaya et al., 2014). The upwelling of the deep-seated water provides significant information to understand the fluid movement in the crust and the water cycle in the subduction system (e.g. Hacker, 2008).

In this study, we present the upwelling of water and gas along the fractures and the relationships between orientations of the veins and the upwelling of the deep-seated water in the Shiotakibashi outcrop located to the north of Median Tectonic Line (MTL). And, we discuss the upwelling process of the deep-seated water at Kii Peninsula by using the relationships between crustal stress field and geological structures.

The Shiotakibashi outcrop along the Ishikawa river at the Kawachinagano city of Osaka prefecture is one of regions where the upwelling of the water and gas containing deep-seated water along the fractures can be observed (Tanaka et al., 2013). In the upwelling points at the outcrop, the patches of fractures that cut the Cretaceous granite belonging to the inner zone are filled by the calcite crystalized from the water. Furthermore, the water and gas are flowing so as to avoid the filled fractures. And, we can observe many mineral veins with several orientations in this outcrop. Mineral veins can provide evidences of the ancient fluid migration along the fractures.

In this study, we measured the strike, dip and width of the veins in a single outcrop of the Shiotakibashi outcrop (~100 veins). On the veins, the fractures that cut the cretaceous granite are filled by the calcite. The veins have thicknesses with a few mm to 2 cm. The most of the veins have NNE-SSW and ENE-WSW striking and dip with high angle while some veins have horizontal dip. The dilation tendency (Ferrill et al., 1999) for the filled fractures in the present stress inferred from the major active faults in the eastern part of the southwestern Japan including the Kii Peninsula (Tsutsumi et al., 2012) indicate that the fractures with upwelling of water and gas have high tendency on the pass ways of deep-seated water. Hence, the present tectonic stress may be feasible for upwelling of the deep-seated water along the fractures for a part of the fractures. At the map scale, the Cretaceous-Paleogene accretionary complex, Shimanto Belt is exposed in the region located to the south of MTL in Kii Peninsula. The most of deformation structures of the Shimanto Belt have northward plunging thrusts. Based on the relationships between crustal stress field and attitudes of the geological structures, the dilation tendency is high on the geological structures. Hence, we suggest that the geological structures of the region under the present crustal stress are favorable pathways for deep-seated fluids.

キーワード：応力、流体移動、断層、地殻、深部低周波微動、沈み込み帯

Keywords: stress, fluid migration, fault, crust, deep low-frequency tremors, subduction zone

紀伊半島西部における3次元地震波減衰構造の推定

Three dimensional attenuation structure beneath the northwestern part of Kii peninsula, central Japan

*津村 紀子¹、水野 直希²、梅山 恵理¹、加藤 愛太郎³、蔵下 英司⁴、飯高 隆⁴、酒井 慎一⁴、雑賀 敦⁵
 *Noriko Tsumura¹, Naoki Mizuno², Eri Umeyama¹, Aitaro Kato³, Eiji Kurashimo⁴, Takashi Iidaka⁴, Shin'ichi Sakai⁴, Atsushi Saiga⁵

1.千葉大学大学院理学研究科、2.千葉大学理学部、3.名古屋大学大学院環境学研究科、4.東京大学地震研究所、5.日本原子力研究開発機構

1.Graduate School of Science, Chiba University, 2.Faculty of Science, Chiba University, 3.Graduate School of Environmental Studies, Nagoya University, 4.Earthquake Research Institute, University of Tokyo, 5.JAEA

紀伊半島の下に沈み込んだフィリピン海プレート上面の深さ30~40km付近では非火山性の低周波地震の発生している[Kato et al.,2010]. また、紀伊半島西部の和歌山市周辺では深度10km以浅で非常に活発な群発地震活動が報告されている[溝上他, 1983; Kato et al.,2010]. 既存研究から、これらの地震イベントの発生には流体が関与していることが指摘されている[Hirose et al.,2008;Kato et al.,2010&2014]. 本研究ではクラックや流体の存在や温度に敏感な地震波の減衰パラメーターQ値を3次的に求めることにより、詳細な地下構造を求めることを試みたので報告する。

地震波減衰構造はTsumura et al.(2000)の震源パラメーター、減衰、観測点近傍の影響を同時推定するインバージョン法を適用して推定した。インバージョンに使う地震は、防災科学技術研究所のHi-net定常観測点及び2009年~2010年に紀伊半島南部に設置された東西群列地震観測点と2010~2011年に紀伊半島西部に設置された南北群列地震観測点で記録されたものから選択した。また、波線分布の偏りを少なくするため、上述の期間以外に2004年6月~2010年5月にHi-net観測点で観測された地震もあわせて解析を行った。113観測点で得られた247個の地震の8616本の波線についてP波に関する減衰インバージョンを行った。

得られたQp構造を見ると、深さ15kmまでの浅部では紀伊半島北西部にQp値が200以下となる高減衰域が存在する。その高減衰域は群発地震発生域とほぼ同じ広がりを持つ。それ以外の領域のQp値は400~800程度で、半島南端部にもQp<400となる領域が存在する。深さ15~38kmの層でも紀伊半島北西部に地震波減衰域が存在するが、深さ25km以深ではその広がり浅部に比べて小さくなる。フィリピン海プレートの等深度線30~40km付近の直上に高Qpを示す領域がパッチ状に分布する。これらの高Qp領域は低周波地震の発生場所と空間的に対応することがわかった。特に観測点密度の高い紀伊半島西部の北西-南東断面で見ると、群発地震域の直下に高減衰域が存在すること、その高減衰域が走時トモグラフィで求められた地震波低速度域に一致することが明らかになった。レシーバ関数解析から群発地震域の下のフィリピン海プレート海洋地殻ではエクロジャイト化が進んでいると指摘されており、群発地震直下からマントル部分に続く高減衰域はその脱水過程で出た流体と関係しているかもしれない。さらに低周波地震の発生域直上のマントルウェッジ部分は低減衰域となり、その領域の地震波速度は高速度であることも示された。他の地球物理学的データと合わせ、これらの領域の物性についての議論を行いたい。

[参考文献]Hirose et al., J. Geophys. Res., 113, B09315, doi:10.1029/2007JB005274; Kato et al., Geophys. Res. Lett., 37, L15302, doi:10.1029/2010GL043887; Kato et al., EPS, 66:18,2014; 溝上他., 震研彙報, 58,287-310,1983; Tsumura et al., Tectonophysics, 319, 241-260, 2000

キーワード：地震波減衰、群発地震、非火山性低周波地震、紀伊半島

Keywords: Q attenuation, seismic swarm, non-volcanic low frequency earthquake, Kii peninsula, southwest Japan

スロー地震発生域における高圧流体の存在：ScSp波による新しい制約

Control of episodic tremor and slip by high-pressurized fluids: a new constraint from ScSp waves

*鳥家 充裕¹、加藤 愛太郎¹、前田 拓人²、小原 一成²、武田 哲也³、山岡 耕春¹

*Mitsuhiro Toya¹, Aitaro Kato¹, Takuto Maeda², Kazushige Obara², Tetsuya Takeda³, Koshun Yamaoka¹

1.名古屋大学大学院環境学研究科、2.東京大学地震研究所、3.防災科学技術研究所

1.Graduate School of Environmental Studies, Nagoya University, 2.Earthquake Research Institute, the University of Tokyo, 3.National Research Institute for Earth Science and Disaster Prevention

1. Introduction

High-pressurized fluids are thought to play an important role in controlling episodic tremor and slow slip (ETS) in subduction zones [e.g., Shelly et al., 2006; Audet et al., 2009]. Therefore, constraining the along-dip distribution of ETS is necessary to better understand its source mechanism, and particularly the role played by fluids in ETS generation. Here, we report clear observations of coherent ScSp phases with a dense seismic array in western Shikoku, Japan. To reproduce these observations, we performed numerical simulations of elastic-wave propagation using a finite difference method (FDM) that incorporated a three-dimensional structural model. The combination of coherent ScSp phases and numerical simulations allows us to investigate the depth dependence of Poisson's ratios within the LVZ, and to quantitatively estimate local changes in fluid pressure in the ETS zone.

2. Data and Method

We deployed a dense linear seismic array from October 2011 to April 2013 on western Shikoku Island, SW Japan. We also used permanent stations near the array from the Hi-net network, operated by the National Research Institute for Earth Science and Disaster Prevention [Okada et al., 2004], and stations of the Japan Meteorological Agency. During the deployment period, we visually inspected seismograms of $M_w \geq 6$ deep earthquakes with focal depths greater than 90 km and epicentral distances $D < 25^\circ$. Using the transverse components of rotated seismograms from the array, we shifted the ScS phases relative to the arrival at the station having the highest S/N ratio by cross-correlating the ScS phase from the station with other ScS waveforms to achieve the maximum correlations. The vertical component data at each station were then time shifted by the corresponding time lags, relative to the station.

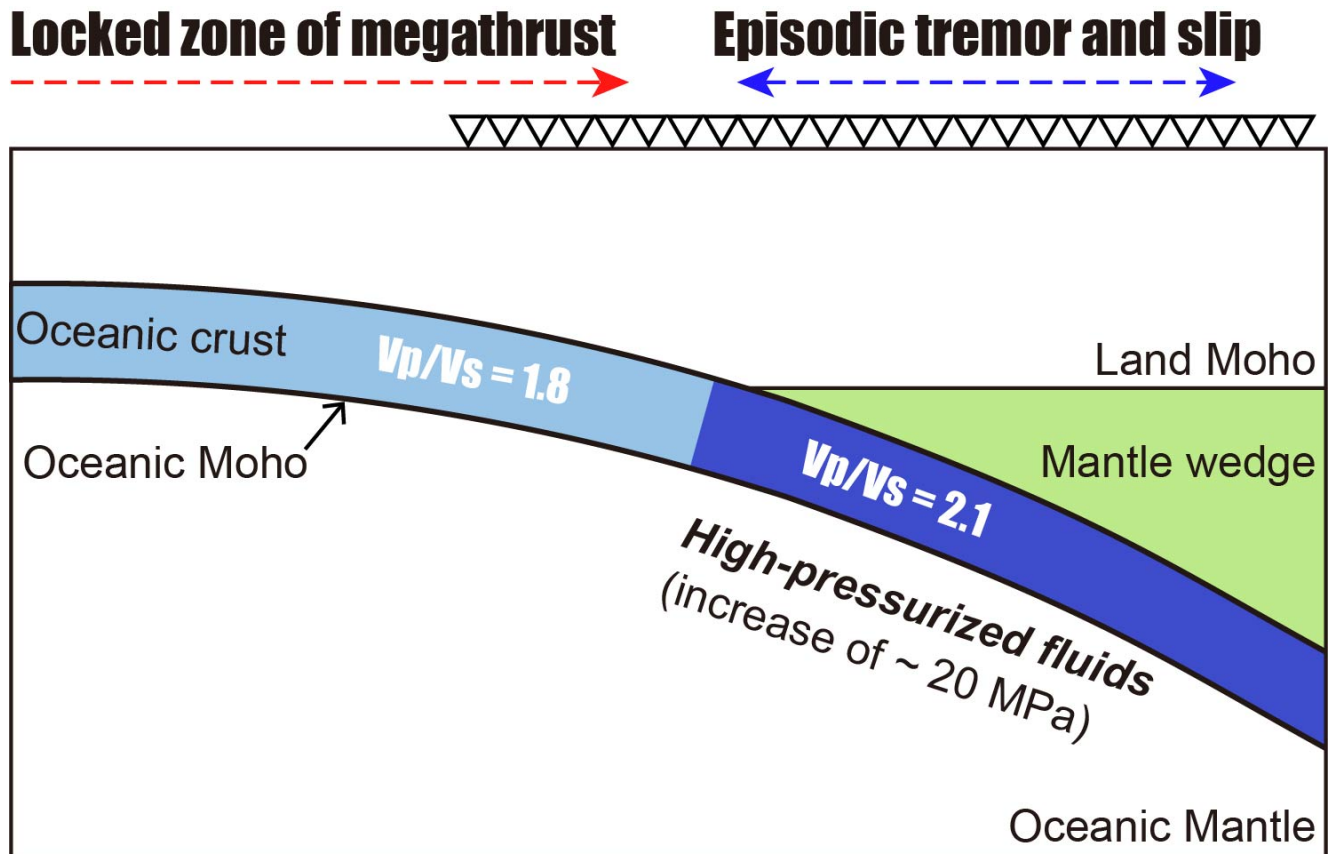
3. Results and Discussion

Based on comparisons of transverse and vertical component waveform data, we found clear, coherent signals arriving before ScS on the vertical components of most stations in the array. The travel time differences between ScS and ScSp increase along the direction of subduction. This means that the ScS-to-ScSp conversion point deepens to the northwest, indicating in turn that the converted waveforms propagate from the top of the subducting PHS Plate. Then, we simulated the propagation of synthetic ScSp waveforms using the JIVSM model [Koketsu et al., 2012]. However, the calculated ScS-ScSp travel time differences were systematically smaller than predicted by our observations. To improve the goodness of fit, we partitioned the LVZ into shallower and deeper parts around the upper corner of the mantle wedge, because the travel time difference between the observed and simulated waveforms was larger at the northern stations, toward which the LVZ is subducting. This change gave two different S-wave velocities in the LVZ. We conducted a grid search over the three-parameter space defined by two velocities, and the layer thickness h of the LVZ. To quantify the fit, we averaged the cross-correlation coefficients between observed and simulated ScSp phases. From the grid search results, the V_p/V_s ratio must be higher beneath the mantle wedge

corner than at shallow depths, regardless of the assumed LVZ thickness. In the best model, V_p/V_s ratios within the subducting oceanic crust increase by 0.3 beneath the mantle wedge corner, where ETS has been observed. This high- V_p/V_s layer indicates the presence of high-pressurized fluids confined at ETS source depths. Based on extrapolation of laboratory measurements [Peacock et al., 2011], we infer that the observed changes in V_p/V_s ratios correspond to an increase in fluid pressure of ~20 MPa relative to the updip, locked zone (Figure 1).

キーワード：スロー地震、ScSp波、高圧流体

Keywords: episodic tremor and slow slip, ScSp phase, high-pressurized fluid



微小地震から探る岩石き裂浸透率ダイナミクス

Dynamics of rock fracture permeability explored through MEQs

*石橋 琢也¹、渡邊 則昭²、岡本 敦²、平野 伸夫²、浅沼 宏¹、土屋 範芳²*Takuya Ishibashi¹, Noriaki Watanabe², Atsushi Okamoto², Nobuo Hirano², Hiroshi Asanuma¹, Noriyoshi Tsuchiya²

1.産総研 福島再生可能エネルギー研究所、2.東北大学 大学院環境科学研究科

1.Fukushima Renewable Energy Institute, AIST, 2.Graduate School of Environmental Studies, Tohoku University

For the success of unconventional geothermal reservoirs (i.e. EGS), maintaining conduits with high-fluid-throughput is desirable. Hydraulic stimulation for such reservoirs is recognized as one of the most general ways to improve or maintain their crustal permeability, which is known as the key parameter controlling crustal fluid flow [Ingebristen and Manning, 2010]. During the hydraulic stimulation, in-situ microearthquakes (MEQs) data are basically recorded to capture the underlying active processes and the permeability evolution within the reservoir [Majer et al., 2007], and these MEQs are in general regarded as signals that somehow represent permeability change in a fractured reservoir. If we have an insight into quantitative linkage between the permeability change and MEQ, such an insight is definitely useful for mapping in-situ permeability evolution in a reservoir. However, it remains ambiguous how much the fracture permeability is enhanced by a MEQ.

In the present study, we explore a linkage between fracture permeability change and MEQs. For this purpose, we first prepared heterogeneous aperture distributions for rock fractures with various combination of fracture length (m), l , and shear displacement (m), d , according to the method of Ishibashi et al [2015]. Through the analyses of these aperture distributions, scale dependencies of fluid flows through joints, i.e. fractures without shear displacement, and faults, i.e. fractures with shear displacement of d (m), are predicted as followings. Both joint and fault aperture distributions are characterized by a scale-dependent geometric mean and a scale-independent geometric standard deviation of aperture. Changes in the geometric means of joint and fault apertures (mm), $e_{m, joint}$ and $e_{m, fault}$, with fracture length (m), l , are approximated by $e_{m, joint} = 1.3 \times 10^{-1} l^{0.10}$ and $e_{m, fault} = 1.3 \times 10 (d/l)^{0.59} l^{0.71}$, whereas the geometric standard deviations of both joint and fault apertures are approximately 3. Fluid flows through both joints and faults are characterized by formations of preferential flow paths (i.e., channeling flows) with scale-independent flow areas of approximately 10%, whereas the joint and fault permeabilities (m^2), k_{joint} and k_{fault} , are scale dependent and are approximated as $k_{joint} = 9.8 \times 10^{-13} l^{0.16}$ and $k_{fault} = 2.3 \times 10^{-6} (d/l)^{1.18} l^{1.08}$. By coupling these scaling laws with the concept of moment magnitude [Hanks and Kanamori, 1979], quantitative change in mean aperture ($e_{m, fault}/e_{m, joint}$) and fracture permeability (k_{fault}/k_{joint}) are successfully linked with moment magnitude of MEQs (M_w) during hydraulic stimulation for a reservoir as $e_{m, fault}/e_{m, joint} = 1.0 \times 10^{0.35M_w}$ and $k_{fault}/k_{joint} = 116.4 \times 10^{0.46M_w}$. Validity of the equation will be discussed through comparisons with some data of real field development/experiments (e.g., EGS system in Basel and Soultz-sous-Fôret).

In summary, such linkages may enable rough inverse-mapping of evolving fracture permeabilities using in-situ MEQ data. This mapping will facilitate new insights into transport phenomenon within the Earth's crust and it relevant to engineering and scientific applications such as the development of geothermal or hydrocarbon reservoirs and clarification of earthquake mechanisms.

キーワード：岩石き裂、浸透率、表面粗さ、微小地震

Keywords: rock fracture, permeability, surface topography, microearthquake

かんらん石の交代作用時に発達する双方向の反応進行フロント：メッシュ組織形成過程への示唆
Bidirectional replacement zoning developed in metasomatic reaction of olivine and its
implication for development of mesh zoning of serpentinites

*大柳 良介¹、岡本 敦¹、土屋 範芳¹

*Ryosuke Oyanagi¹, Atsushi Okamoto¹, Noriyoshi Tsuchiya¹

1.東北大学大学院環境科学研究科

1.graduate school of environmental studies, tohoku university

蛇紋岩化作用は元素移動、表面反応及び体積膨張を伴う複合プロセスであり、マンツルの化学的・物理的特性を大きく変化させる。海洋底の蛇紋岩化したかんらん岩には、しばしばメッシュ組織と呼ばれる産状が観察される。メッシュ組織はリムとコアで構成鉱物が異なることが多く、メッシュリムは蛇紋石に過飽和な流体が外部から流れてきて析出した(Andreani et al., 2004; Andreani et al., 2007), もしくは最初に形成したコアが後のステージに流れてきた流体によって置換されてリムが生成した(Beard et al., 2009; Schwarzenbach et al., 2016)といった解釈がなされているが、メッシュの形成過程やそれに伴う体積変化や物質移動を、天然組織から読み解くことは難しい。

本研究では、かんらん石と斜長石の鉱物粉末を用いた水熱実験により、かんらん石と斜長石の境界から離れた箇所では蛇紋石+ブルース石+磁鉄鉱が生成する一方で、境界から約1.5mm内において、SiやAlの交代作用の進行とともに特徴的な組成累帯構造をもったAlに富む蛇紋石(Al蛇紋石)の集合体を生成させることを見いだした。Al蛇紋石のAl量は、コアからリムへかけて一旦減少し再び上昇する傾向をとる。Alの量が低い累帯構造の中心付近では、明瞭な境界が観察される。この明瞭な輪郭は元のかんらん石の外形を示し、反応フロントが元のかんらん石の内側と外側に進行していると解釈される。Al蛇紋石が組成累帯構造を示すのは、かんらん石の交代作用フロントの進行に伴い、反応する流体のSi, Al濃度が時々刻々と変化しているためだと考えられる。かんらん石内部への内側への反応は、Mg, Fe及びSiが除かれる蛇紋石化であり、そのMg, Fe及びSiが空隙まで輸送されて外部から供給されたSiと反応して外側の蛇紋石部分が成長することを見出した。

本実験は鉱物粉末を用いており約40%の初期空隙率をもつ。そのため本研究の知見はき裂の多いかんらん岩の蛇紋岩化作用へ適用することができると考えられる。メッシュリムとメッシュコアは別のステージで生成したと解釈されることが多いが、本研究の結果は、反応が内側にだけ進行する等体積の変化は大きな元素移動を必要とし、反応が内側に進行してメッシュコアをつくと同時に外側へも進行しメッシュリムをつくる。つまり、メッシュコアとメッシュリムが同ステージで形成しうることを示唆する。この際、メッシュコアが元のかんらん石の外径を保存し、ジャッキアップのようなメカニズムで全体が膨張してメッシュリムが太くなった可能性を示唆する。

キーワード：蛇紋岩化作用、物質移動、置換反応、交代作用、水熱実験

Keywords: serpentinitization, mass transfer, mineral replacement, metasomatism, hydrothermal experiment

北海道東部下における海洋性地殻の地震波速度と地震活動

Seismic velocity and seismicity in the subducting crust of the Pacific slab beneath the eastern part of Hokkaido

*椎名 高裕¹、中島 淳一²、松澤 暢¹、豊国 源知¹、北 佐枝子³

*Takahiro Shiina¹, Junichi Nakajima², Toru Matsuzawa¹, Genti Toyokuni¹, Saeko Kita³

1.東北大学大学院理学研究科地震・噴火予知研究観測センター、2.東京工業大学理工学研究科、3.広島大学理学研究科

1.Research Center for Prediction of Earthquakes and Volcanic Eruptions, Graduate School of Science, Tohoku University, 2.Graduate School of Science and Engineering, Tokyo Institute of Technology, 3.Graduate School of Science, Hiroshima University

沈み込む海洋プレート（スラブ）とともに地球内部へ運び込まれる水は、沈み込み帯における地震・火成活動と密接に関係していると考えられている(e.g., Kirby et al., 1996; Nakajima et al., 2013). 特に、スラブ最上部に存在する海洋性地殻は多量の水を含水鉱物として含み、これらの含水鉱物の脱水を伴う相転移の進行が地震波速度の変化や流体の分布に影響していると考えられている(e.g., Hacker et al., 2003). したがって、海洋性地殻の詳細な不均質構造を明らかにすることは、スラブ内地震の発生メカニズムや沈み込み帯における水循環過程を理解する上で非常に重要である。

日高山脈西部の観測点で観測された北海道東部下の太平洋スラブ内地震の観測波形記録にはしばしば顕著な後続波が観測されることが知られている(e.g., 清水・前田, 1980; Abers, 2005). 特に、スラブ上部境界付近で発生する地震に対して観測される後続波は海洋性地殻内部を伝播したガイド波であると解釈されている(Shiina et al., 2014). ガイド波が観測されるためには日高山脈下にスラブ直上まで分布する低速度域(Kita et al., 2010, 2012)の存在が重要であり、同一の観測点で観測されたガイド波は、観測点近傍で同じような伝播経路を持つと考えられる。

そこで、本解析では北海道東部下のスラブ内地震で観測されるガイド波の走時差を用いて海洋性地殻の地震波速度の推定を試みた。解析では海洋性地殻内部をP波として伝播したガイド波 (guided-P波)とS波として伝播したガイド波 (guided-S波)の2つの後続相に注目し、guided-P波は315個、guided-S波は275個の地震で到着時刻を読み取った。その結果、深さ50-100 km程度のP波速度は6.5-7.5 km/s, S波速度は3.6-4.2 km/s, V_p/V_s は1.80程度の値が推定された。特に、深さ80 km以浅のP波・S波速度は岩石学的に期待される地殻の地震波速度(e.g., Hacker et al., 2003)よりも遅く、この速度低下は1 vol%程度の流体の存在により説明することができる。また、深さ80-100 kmでは地震波速度の増加が観測された。この深さ範囲は上面地震帯の分布(Kita et al., 2006)や含水鉱物の脱水(e.g., Hacker et al., 2003)が生じる深さに対応しており、地殻内の地震活動には脱水により生じた水が密接に関係していることが示唆している。

本解析で推定された海洋性地殻のP波速度は、深さ80km以浅では東北地方の結果(Shiina et al., 2013)と同程度であり、それよりも深部(80-100 km程度)では北海道東部のP波速度の方が速い。太平洋スラブが斜めに沈み込む北海道東部では、東北地方に比べてスラブ上部境界付近の温度が高いと考えられている(e.g., Kita et al., 2010; Abers et al., 2013; Wada et al., 2015). 北海道東部では地殻周辺部での温度が高いことで含水鉱物の脱水反応の進行や流体の移動経路が東北地方とは異なる可能性がある。このような違いにより、北海道東部下の深さ80-100 km付近では東北地方下に比べて速いP波速度が観測されるのかもしれない。

キーワード：海洋性地殻、地震波速度、ガイド波、上面地震帯

Keywords: Subducting crust, Seismic velocity, Guided wave, Upper plane seismic belt

関東から東北地方で沈み込み熱構造, スラブ脱水、マンツルフローについての三次元数値モデリング
Three-dimensional numerical modeling for subduction thermal regime, slab dehydration, and
mantle flow beneath Kanto to Tohoku, Japan

*季 穎鋒¹、吉岡 祥一¹

*Yingfeng Ji¹, Shoichi Yoshioka¹

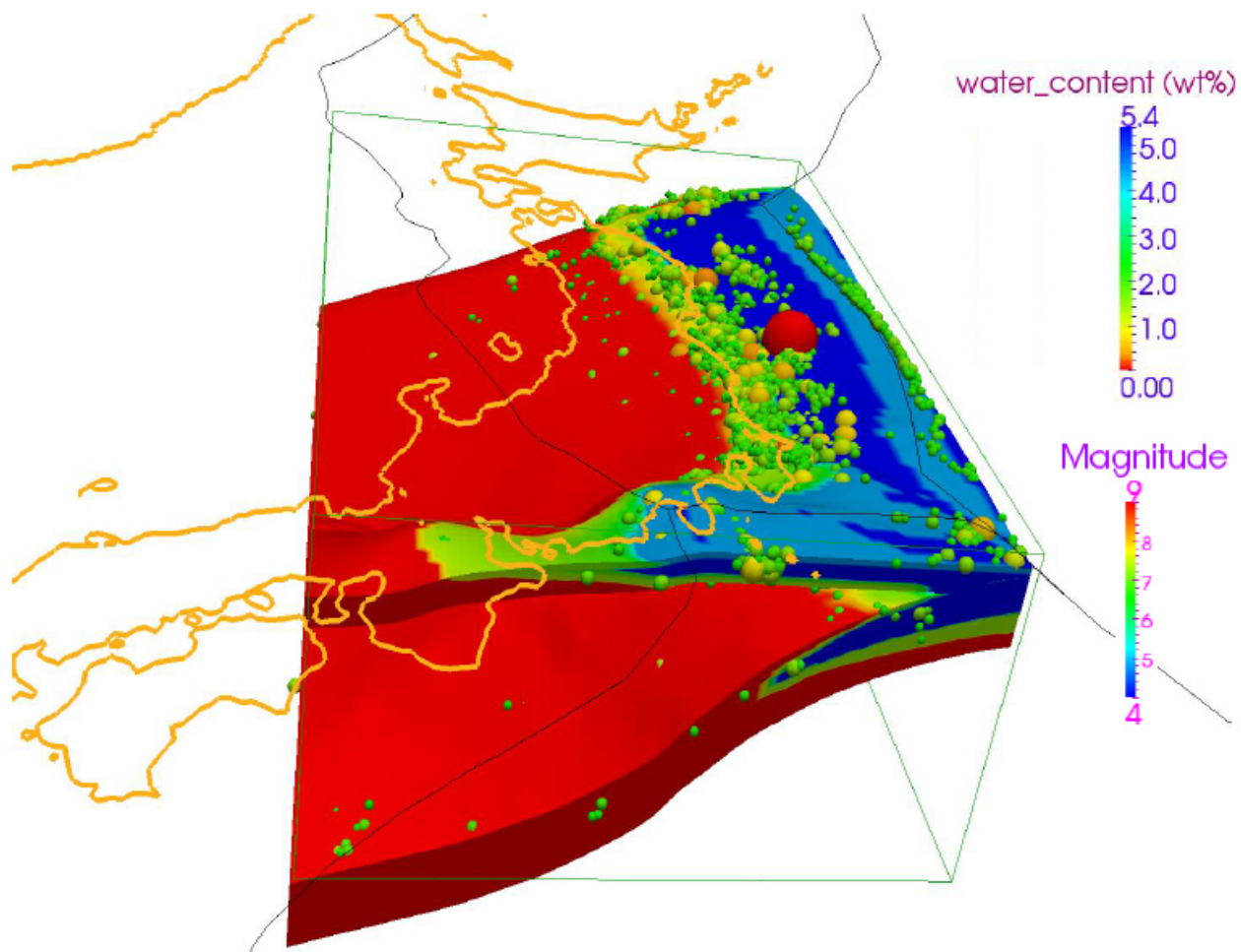
1.神戸大学都市安全研究センター

1. Research Center for Urban Safety and Security, Kobe University

To better understand thermal regimes of the interplate and slab-slab contact zone undergoing subduction upon convergence such as in Kanto to Tohoku, Japan, we developed a parallelepiped three-dimensional thermal convection model to simulate simultaneous subduction of the overlapped Philippine Sea and the Pacific plates. We investigated the interactive slab thermal regime and mantle flow associated with such a unique geodynamic process, using simplified and realistic models. Results showed that: (1) cold anomaly was found to exist predominantly on the slab contact zone, resulting in a cold triple-plate junction corner immediately above the zone with an estimated temperature colder by approximately $\sim 300^{\circ}\text{C}$ beneath Kanto than Tohoku. As a result, delay in slab dehydration takes place and accounts for the distribution of low seismic velocities in the slab contact zone; (2) a relative subduction direction that yields the obliquity or asymmetry of the thermal structure in the slab contact zone, which corresponds to thermally controlled clustered seismicity on the southwestern half of the slab contact zone probably due to the delayed slab dehydration; (3) induced flow in the continental mantle was related to the straight component of subduction velocity of the lower oceanic plate more than to slab thickness. Interaction between the two oceanic plates determined the induced poloidal and toroidal convections in the continental mantle. In the sandwiched mantle wedge, the mantle flow induced by the Pacific plate is predominant, and reaches depths of 30-100 km beneath Kanto, which is shallower than Tohoku, and attributable to the double subduction; (4) thermal regime and dehydration of MORB near the upper surface of the subducted Pacific plate is considered to control distribution of seismicity beneath Tohoku and Kanto.

キーワード：スラブ脱水、二重沈み込み、数値シミュレーション、熱構造

Keywords: slab dehydration, dual subduction, numerical simulation, thermal regime



九州地方の電気伝導度構造と温度構造から求められたマンツルの流体分布

Geo-fluids distribution in mantle inferred from the electrical conductivity and simulated thermal structures beneath Kyushu

*畑 真紀¹、上嶋 誠²、吉岡 祥一³

*Maki Hata¹, Makoto Uyeshima², Shoichi Yoshioka³

1.産業技術総合研究所、2.東京大学地震研究所、3.神戸大学都市安全研究センター

1.Advanced Industrial Science and Technology, 2.Earthquake Research Institute, The University of Tokyo, 3.Research Center for Urban Safety and Security, Kobe University

The Kyushu Island, at which the oceanic Philippine Sea Plate subducts into the mantle beneath the continental Eurasia Plate, is characterized by the northern and southern volcanic regions and the central non-volcanic region. Magmatism in the subduction zones is triggered by the addition of the oceanic slab-derived aqueous fluids (water) to the mantle, because solidus of the mantle rock falls by the addition of the aqueous fluids and partial melting of the mantle occurs. Thus the determination of geo-fluids (the aqueous fluids and the melts) distribution is essential to understand the magmatism in the Kyushu subduction zone including the non-volcanic region between the two volcanic regions.

We obtained an electrical conductivity structure (model) beneath the entire Kyushu Island using three-dimensional inversion analyses and found three conductive anomalies, which indicate the different intensity and spatial extent for the three regions, at the mantle in the model [Hata et al., 2015]. The difference is considered to originate in the content of geo-fluids in the mantle. We determined the temperature and melt fraction distributions (structures), as a function of a fixed water content, inferred from the electrical conductivity structure beneath the Kyushu Island by using petrological laboratory-derived results [Hata and Uyeshima, 2015]. The laboratory-derived results are the relation between electrical conductivity and temperature for four nominally anhydrous minerals (Olivine, Orthopyroxene, Clinopyroxene, and Garnet) and hydrous basaltic melt in solid and liquid phases of the mantle, and the relation between melt fraction and temperature for mantle rocks (peridotites) under a condition of isobaric hydrous mantle melting.

In this study, we aim to determine the content of both geo-fluids in the mantle beneath the Kyushu Island. Thus we use a fixed thermal structure, which is a simulated thermal model associated with the subduction of the Philippine Sea Plate [e.g., Yoshioka et al, 2008]. Then we determine the geo-fluids distribution by integrating the simulated thermal structure of the mantle, field-derived electrical conductivity structure of the mantle, and laboratory-derived electrical conductivity of the four mantle minerals and the basaltic melt. We will describe our approach to determine the content of the geo-fluids and show the water content distribution and the melt fraction distribution in the mantle beneath the Kyushu Island.

瀬戸内火山帯における沈み込み開始期の熱および物質輸送のダイナミクス

Dynamics of heat and material transportation during subduction initiation in the Setouchi Volcanic Belt

*森里 文哉¹、飯塚 毅¹、角野 浩史²、柴田 知之³、芳川 雅子³、小澤 一仁¹

*Fumitoshi Morisato¹, Tsuyoshi Iizuka¹, Hirochika Sumino², Tomoyuki Shibata³, Masako Yoshikawa³, Kazuhito Ozawa¹

1.東京大学大学院理学系研究科地球惑星科学専攻、2.東京大学大学院総合文化研究科広域科学専攻関連基礎科学系、3.京都大学大学院理学研究科附属地球熱学研究施設

1.Department of Earth and Planetary Science, Graduate School of Science, The University of Tokyo,

2.Department of Basic Science, Graduate School of Arts and Sciences, The University of Tokyo,

3.Beppu Geothermal Research Laboratory, Kyoto University

Knowledge of subduction initiation is critical for better understanding dynamics of plate tectonics, but is difficult to obtain because of its episodic and transient nature resulting in incomplete and fragmental records. The key issue is elucidation of heat and material transportation in a subduction zone during the subduction initiation. The aim of this study is clarify spatial and temporal changes of thermal state and material distribution involved in volcanisms of the Setouchi Volcanic Belt to scrutinize subduction initiation by exploiting its excellent records of the processes of subduction initiation.

The Setouchi Volcanic Belt (SVB) in the Southwest Japan arc has a record of igneous activities which show temporally and spatially continuous distributions in the forearc region in the Miocene period. The SVB is characterized by the occurrence of primitive volcanic rocks such as high-Mg andesite (HMA) and basalt. Previous studies in the Shodoshima Island and Osaka argued that HMA magmas are generated by highly wet melting of the wedge mantle involving slab melt from the subducting young and hot Shikoku Basin in the early stage of subduction initiation (Furukawa & Tatsumi, 1999; Shimoda & Tatsumi, 1999; Tatsumi et al., 2006). However, there are several issues that must be addressed: (1) HMAs are very poor in water; (2) the estimated melting conditions for HMA and basaltic magmas are very disparate: hydrous and 1050 to 1150 °C vs. less hydrous and 1300 °C, which are supposed to have been close in time and space in the mantle; and (3) the proposed magma genesis is highly dependent on data in a particular and restricted domain (< 20 km in width) in spite of the wide extension of SVB (600 km in width) consisting of several domains with higher concentration of volcanisms.

There are three sectors of higher frequency of volcanic rock distribution in the SVB on the scale of about 100km scale, each of which may correspond to a separated domain of magma generation. We selected north-eastern part of the Shikoku (NE Shikoku), as study area, where magma genesis has not scrutinized yet. We measured whole rock composition of lavas by using XRF, LA-ICP-MS, and ICP-MS and mineral chemical compositions of phenocrysts with EPMA, and obtained K-Ar ages for samples collected from this sector in the SVB.

Our estimation of a primary magma for HMAs in the north-eastern Shikoku, which is based not only on whole rock major element compositions but also on chemical zoning of phenocrysts, is more magnesian (> 11.6 wt% MgO) than that of the previous study. Geothermometer of Sugawara (2000) combined with liquidus drop after Méderd & Grove (2008) and alpha MELTS program (Ghiorso et al., 2001; Asimow et al., 2003) constrains melting condition of the primary magma as 1GPa and 1200-1240 °C with 1.5-0.9 wt % H₂O. The pressure and temperature are close to the basaltic magma generating conditions proposed by Tatsumi (1982). Because of the similarity of major element compositions, the generation conditions of the HMA magma could be common throughout the SVB. By contrast, the whole

rock trace element compositions and K-Ar ages show spatial and temporal variations, which suggest variability in timing and extent of supply of a slab-derived component (marked by high LILE/HREE) and/or an enriched mantle component (marked by high HREE abundance). There is a tendency that these components were added in a later stage in a given area.

We argue that achievement of temperature over 1200°C just beneath the crust for generation of HMA and basalt magmas with temporal changes of source material and involvement of slab-derived fluid components were caused by several local mantle upwellings. Such upwelling induced by the subduction initiation might have entrained slab and/or enriched source components at the leading edge of subducting slab.

キーワード：沈み込み開始期、高Mg安山岩、瀬戸内火山帯

Keywords: subduction initiation, high-Mg andesite, The Setouchi Volcanic Belt

ピナツボカンラン岩の微細組織観察：交代作用及び変形履歴の推定

Deformation and metasomatic histories of Pinatubo peridotite estimated from microstructural observation

*山本 貴史¹、安東 淳一¹、富岡 尚敬²、小林 哲夫³

*Takafumi Yamamoto¹, Jun-ichi Ando¹, Naotaka Tomioka², Tetsuo Kobayashi³

1.広島大学大学院理学研究科地球惑星システム学専攻、2.海洋研究開発機構高知コア研究所、3.鹿児島大学理学部地球環境科学科

1.Department of Earth and Planetary Systems Science, Hiroshima University, 2.Kochi Institute for Core Sample Research, Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology, 3.Department of Earth and Environmental Science, Kagoshima University

Deformation microstructures of olivine in naturally deformed peridotites are useful for examining the rheological properties and deformation history in the upper mantle. Particularly, slip system of deformed olivine is especially well known as an indicator for the deformation conditions, such as temperature, stress, pressure or water content. Here, we try to estimate the deformation history of deformed peridotite by means of the microstructural observation and slip system determination. Two types of amphibole-bearing harzburgite samples (namely P-3 and P-4) collected from Pinatubo volcano were analyzed using optical microscope, SEM, EBSD, TEM and STEM. Kawamoto et al. (2013) suggests that these peridotites were affected by the intense metasomatism. We report the relationship between the deformation history and metasomatic reaction.

Pinatubo peridotites are composed of relatively coarse olivine grains with several mm in size, and partly fine orthopyroxene and amphibole aggregate with tens to hundreds μm in size. The fine grained aggregate in P-4 is more than in P-3. The grain boundaries of the coarse grains exhibit irregular shapes. And these grains show the undulose extinction and well-developed subgrain boundaries. The coarse olivine grains contain a lot of fluid inclusions. Additionally, the fine olivine grains exist along the secondary inclusions within some coarse olivine grains.

The LPO patterns of the coarse olivine grains in the both samples imply the dominant activation of $[100]\{0kl\}$ slip system, which is developed under high temperature, low pressure and dry deformation conditions. On the other hand, the dominant slip systems obtained from the direct characterization of dislocations by TEM are $[100](001)$, $[001](010)$ or $[001](100)$, which activate under moderate to high water content condition. The discrepancy of the obtained slip systems is probably caused by the overprinting due to the changing of deformation conditions. Dislocation microstructures are more easily modified by later deformation events than LPOs.

We conclude from the characterization of microstructures in combined with the result of Kawamoto et al. (2013) that Pinatubo peridotite experienced deformation and metasomatic events in the following manner. Pinatubo peridotites have originally deformed under high temperature, low pressure and dry conditions in the back-arc region. Then, they have moved to the fore-arc region due to the corner flow, and have been affected by the fluid-related metasomatism. Finally, they have undergone the annealing process within the upwelling magma.

Referenece: Kawamoto et al. (2013) PNAS, 110, 9663.

キーワード：カンラン石、変形、交代作用、すべり系

Keywords: Olivine, Deformation, Metasomatism, Slip system

背弧拡大のダイナミクス

Dynamics of back-arc spreading

*石井 和彦¹、野嶽 弘継¹*Kazuhiko Ishii¹, Hirotsugu Nodake¹

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

背弧拡大は数1000万年の時間スケールで間欠的に起きており、そのような周期性のメカニズムを理解することは、地球全体のテクトニクスや物質循環を理解する上でも重要である。本研究では、数値モデルにより背弧拡大とスラブ-マントル間相互作用の関係を検討し、実際の沈み込み帯の背弧拡大史や地震波トモグラフィーから推定されるスラブの形状と比較することにより、背弧拡大のダイナミクス、とくに背弧拡大の開始や停止の条件について検討した。

数値モデルは深さ1200 km、幅4000 kmの領域で、大陸地殻、海洋地殻、上部マントル、マントル遷移帯、下部マントルからなり、さらにスラブ表面深度が80~200 kmの範囲の上部マントルをより粘性の低いマントルウェッジとしている。各物質に対して、温度圧力に依存する粘性と有効摩擦係数と最大降伏応力によって決まる粘塑性の構成則を仮定し、最大降伏応力（スラブの強度）、410km相転移のクラペイロン勾配、および海洋地殻の有効摩擦係数（プレート境界の強度）の条件を変えて計算を行った。

多くの計算条件において、スラブ-マントル相互作用を通して、スラブ形状の変化と背弧拡大が周期的に起こる結果が得られ、その周期は計算条件に応じて変化する。最大降伏応力が小さい（200 MPa）と、座屈を繰り返し折りたたまれたスラブの形状を示すのに対し、最大降伏応力が大きい（800 MPa）とあまり座屈せず背弧が拡大し続ける結果となった。多くの背弧海盆は10~20 Myrの期間で形成されていること、および最近の地震波トモグラフィーでは折りたたまれたスラブの形状は認められないことから、最大降伏応力500 MPaの計算結果が実際の沈み込み帯の現象をよく再現していると考えられる。これらの結果を伊豆-小笠原-マリアナ弧のスラブの形状や背弧拡大の歴史と比較することにより、背弧拡大の開始や停止の条件について議論する。

キーワード：沈み込み帯、スラブ-マントル相互作用、数値モデル

Keywords: subduction zones, slab-mantle interaction, numerical model

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¹

*Kazuhiko Ishii¹

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・熔融・固結に加え、流体の移動や流体による粘性の変化（部分熔融・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¹

*Manabu Morishige¹

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¹、平原 和朗¹*Takuo Shibutani¹, Kazuro Hirahara¹

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の下部地殻に 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使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、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¹、中村 美千彦¹

*Takayuki Nakatani¹, Michihiko Nakamura¹

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 7.0×10^{-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 a 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¹、清水 浩之²

*Atsushi Okamoto¹, Hiroyuki Shimizu²

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¹、横山 正¹*Takuya Horikawa¹, Tadashi Yokoyama¹

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 μm 、ベレア20では約1-10 μm 、白浜砂岩では約0.4 μm 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Vp/Vsの成因

Effect of pore fluid on seismic velocity of serpentinite and the origin of high Vp/Vs in mantle wedge

*片山 郁夫¹、リュウ ウンシ¹、財間 寛太¹

*Ikuo Katayama¹, Yunxi Liu¹, Kanta Zaima¹

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Vp/Vs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Vp/Vs (>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（Vp, Vs）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、VsはVpよりも速度低下が大きいため、その比であるVp/Vs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Vp/Vs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Vp/Vs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Vp/Vs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¹、渡辺 了¹

*Fumie Sema¹, Tohru Watanabe¹

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^{1,2}、岩森 光^{1,2}、中久喜 伴益³

*Atsushi Nakao^{1,2}, Hikaru Iwamori^{1,2}, Tomoeki Nakakuki³

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¹、西原 遊²、Liu Xingcheng¹、鈴木 敏弘¹、瀬戸 雄介³、高橋 栄一¹*Kyoko N. Matsukage¹, Yu Nishihara², Xingcheng Liu¹, Toshihiro Suzuki¹, Yusuke Seto³, Eiichi Takahashi¹

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_{0.5}H-TiO₂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_{0.5}H-TiO₂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_{0.5}HとTiO₂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°Cで合成実験を行った。その結果、(FeH)_{1-x}Ti_xO₂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_{0.5}H (斜方晶系, *P2₁nm*)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-PbO₂型(斜方晶系, *Pbcn*)の結晶構造を有していた。このa-PbO₂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-PbO₂型のFeTi水酸化物は、 $x = 0.75$ の場合、圧力は8-18GPa、温度は約1600°C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¹*Masami Kanzaki¹

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-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-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パラメーター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-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-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。

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¹、鳥本 淳司²、山本 順司³

*Kohei Takahata¹, Junji Torimoto², Junji Yamamoto³

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 $\pm 11\%$ (1σ)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

