

電気伝導度構造・地震波速度構造からみた九州地方フィリピン海スラブ沈み込み帯の脱水様式

An interpretation of dehydration process in the subduction zone beneath Kyushu Island, Northwestern Japan

半田駿¹, 畑真紀², 趙大鵬³, 中島淳一³, 市來雅啓^{3*}, 藤田清士⁴

Shun Handa¹, Maki Hata², Dapeng Zhao³, Junichi Nakajima³, Masahiro Ichiki^{3*}, Kiyoshi Fuji-ta⁴

¹ 佐賀大学農学部, ² 京都大学大学院理学研究科, ³ 東北大学大学院理学研究科, ⁴ 佐賀大学国際交流推進センター

¹Faculty of Agriculture, Saga University, ²Graduate School of Science, Kyoto University, ³Graduate School of Science, Tohoku University, ⁴Center for Promotion International Exchange, Saga University

九州地方は東側から約 10-50Ma のフィリピン海プレートが火山前線直下付近で約 60 度で沈み込み、霧島火山群、桜島など活発な活動を続ける火山体が数多く存在している。100Ma を超える太平洋プレートが 45 度程度で沈み込む東北地方とは異なっており、火山活動の違いやスラブからの脱水様式が異なることが期待されてきた (例えば Iwamori, 2007; Ichiki et al., 2009)。本研究では九州地方で得られている電気伝導度構造 (Handa et al., 1992; Handa et al., 1999; Ichiki et al., 2000; Hata et al., 2012) と地震波速度構造 (Nakajima et al., 2007; Zhao et al., 2012) をコンパイルし、九州地方下でのスラブ脱水様式は東北地方と同じメカニズムで解釈できることを示す。具体的には、1) 沈み込む海洋地殻から脱水した流体が、マントルウェッジ最下部の橄欖岩に吸収され、含水鉱物が深部に引きずり込まれ、より深部の背弧下で脱水すること、2) 脱水した流体は、上昇する過程において Rayleigh-Taylor 不安定を起こし、桜島・霧島火山群などの活発な火山地域と九州中部地方の無火山地域の空間分布が現れることである。

一方、九州地方の前弧域では顕著な負のフリーエア異常乃至ブーゲー異常が観測される (河野・古瀬 1992; 志知 1997; Nakada et al., 2002 を参照) と同時に 2.0 を超える V_p/V_s 異常体が深さ 40km 程度に存在している (Saiga et al., 2010)。電気伝導度構造でもその領域が 0.05 S/m 程度と高い値を示す (Ichiki et al., 2000)。このことから九州地方前弧域のモホ面直下付近には蛇紋岩ダイアピルが存在することが示唆される。しかし東北地方では、これまで前弧域にそのようなモデルは得られていない。前弧域で沈み込む海洋プレートから脱水した流体の大陸地殻内での振る舞いに対して、地球物理学的データの蓄積と今後の検討が必要である。

キーワード: 電気伝導度, 地震波速度, 沈み込み帯, 脱水, 背弧, 蛇紋岩

Keywords: Electrical conductivity, Seismic wave velocity, Subduction zone, Dehydration, Backarc, Serpentine

スラブ流体：前弧では塩水で火山弧下では超臨界流体

Slab-fluids: saline fluids in fore arc regions and supercritical fluids under volcanic arcs

川本 竜彦^{1*}, 熊谷 仁孝¹

Tatsuhiko Kawamoto^{1*}, yoshitaka kumagai¹

¹ 京都大学理地球熱学

¹ Inst Geotherm Sci, Grad School Sci, Kyoto Univ

沈み込むスラブからの流体がさまざまな地質現象を引き起こしている。そのスラブ流体の化学組成を理解することは重要と考える。スラブ流体に塩素が含まれている可能性は、火山ガス、火山岩、変成岩の研究により指摘されてきた。特に、Scambelluri たち (2004, Earth Planet Sci Lett) は沈み込む深さにしたがって塩濃度が低下すると提案する。また、Sumino たち (2010, Earth Planet Sci Lett) は、エクログナイト岩体の希ガスとハロゲン元素の分析により、深さ 100km まで、スラブの堆積岩層中の間隙水が沈み込んで脱水加水作用を起こす可能性を提案する。塩濃度の多い少ないは、水流体への微量成分元素の溶存や、電気伝導度による物理探査に影響を与える。そのため、マントルウェッジ中のスラブ流体の塩濃度を知ることが重要である。

私たちは、芳川雅子博士や小林哲夫博士らと共同で、1991年に噴火したピナツボ火山のマントル捕獲岩中に含まれる水に富む流体包有物の観察を行った。サンプルは角閃石やフログバイトを含むハルツパージャイトで、流体包有物は粗粒なカンラン石に多く存在する。顕微ラマン分光法と、流体包有物を含む結晶の温度を上げ下げするマイクロサーモメトリ法を用いて分析を行った。流体包有物にはマグネサイト(炭酸塩鉱物)とタルク・クリソタイルなどの含水鉱物が含まれ、水に富む流体の塩濃度は平均で 5.1±1 重量% (NaCl equivalent) である。ピナツボ火山は、比較的生成年代の若い南シナ海プレートが、西から沈み込み作るルソン火山弧の火山フロントに位置する。そのため、私たちは、火山フロント直下あるいは前弧域で炭酸ガスに富む塩水がマントルウェッジに存在すると結論する。(Kawamoto ほか、投稿中)

さらに、私たちは、東北日本弧背弧側の一の目瀉火山のマントル捕獲岩(角閃石含有斜長石-スピネルレゾライト)中に含まれる炭酸ガスと水にとむ液体包有物を上記と同じ手法で分析した。流体包有物中の流体の塩濃度は 3.7±0.8 重量% (NaCl equivalent) である。ほかに、ピナツボの流体包有物では存在しなかった S が存在する。一ノ目瀉火山の下には部分融解温度に達しているアセノスフェアが存在するため、この流体はマグマの脱ガスによってマントルリソスフェアを加水した流体であろうと推論する。炭酸ガス?水流体とマグマの間での塩素の分配係数などを考慮すると、マグマ発生時に加わった水流体の塩濃度は 1.1±1.4 重量%と推計する。

同一の火山弧ではないが、火山フロントのピナツボ火山の下の流体よりは、低濃度である。スラブから徐々に脱水していく仮定で、塩素は流体に分配されやすいため、深さとともに徐々に塩濃度は低くなっていると考え。Kawamoto たち (2012, Proc Nat Acad Sci USA) は、火山弧の下のスラブ流体はマグマと水流体の中間の性質を持つ超臨界流体だとしているが、その流体中の塩素濃度は、前弧域でのそれよりも低いと考える。また、一ノ目瀉の流体包有物に S が存在することにも注目する。なぜならば、西南日本弧の前弧で産出する温泉や熱水は NaCl?CO₂ 型と呼ばれるもので、S の濃度は低い。一方、火山フロント近くに産出するものは、S を含むことが特徴である。このことは、前弧では NaCl?CO₂?H₂O 流体がスラブからマントルウェッジ・地殻に来るのに対し、火山弧ではマグマを介して、NaCl?CO₂?H₂O?S 流体が来ることを示すと解釈する可能性はあるが、S がスラブ起源かマントル起源かわからないので、判断できない。

以上述べたように私たちは、スラブ流体が塩水であるらしいと主張するが、その起源が海水であるかどうかはわかっていない。スラブ流体が塩水である場合に、マントルの鉱物との濡れ角は純水と異なるのか? マグマと流体の臨界終端点の温度圧力条件はどうなるのか? など、塩水を含むケイ酸塩の高温高压実験は少なく、まだ確定していない。今後、マントル岩の流体包有物や火山岩中のガラス包有物の分析などとともに、高温高压実験による塩水の挙動についても理解が進み、スラブ流体の沈み込み帯での役割が明確になることを期待する。

キーワード: 沈み込み帯, マグマ, 流体包有物, マントルウェッジ, 脱水分解, 塩素

Keywords: subduction zone, magma, fluid inclusion, mantle wedge, dehydration, chlorine

シリカ鉱物の析出が支配する地殻中熱水対流域の最大深度

The maximum depth of the hydrothermal-convection zone in the crust controlled by the precipitation of silica minerals

最首 花恵^{1*}, 岡本 敦¹, 土屋 範芳¹

Hanae Saishu^{1*}, Atsushi Okamoto¹, Noriyoshi Tsuchiya¹

¹ 東北大学

¹Tohoku University

Precipitation of silica minerals ubiquitously occur in crustal environments. Quartz is the most stable phase of silica. Metastable silica polymorphs, such as amorphous silica, cristobalite, and chalcedony, also form in the surface and subsurface silica deposits. The dissolution-precipitation of silica minerals has a significant effect on both mechanical and hydrological properties of the Earth's crust. However, the structure of the crust has been studied mostly in geophysics, not in geochemistry.

Here we interpret the maximum depth of the hydrothermal-convection zone at Kakkonda geothermal field, Japan, on the dissolution-precipitation of silica minerals. The drilling of the well WD-1a at Kakkonda encountered the temperature exceeding the hydrostatic boiling-point curve, over 500 C at 3729 m depth (Doi et al., 1998). The boundary between the hydrothermal-convection zone and the heat-conduction zone was found at 3100 m depth because of the critical change of permeability.

First we calculated the quartz solubility along the P-T conditions of the WD-1a (Ikeuchi et al., 1998). The quartz solubility had the local minimum value at 3100 m depth which coincided with The boundary between the hydrothermal-convection zone and the heat-conduction zone, suggesting that quartz could precipitate from both upflow and downflow fluid at the boundary.

Next we conducted the hydrothermal flow-through experiments to investigate the temperature dependence of the precipitation of silica minerals. The P-T conditions for precipitation were from 170 to 430 C and 24 MPa. Any rock/mineral substrates were not used in the precipitation vessel. The initial solution was made by dissolution of granite at 350 C and 24 MPa. The Si concentration in the input solution, from 330 to 350 ppm, rapidly decreased to the quartz solubility at over 400 C. The experimental results indicated that quartz precipitation associated with nucleation occur dominantly at high temperature whereas it associated with quartz growth on quartz surfaces only occur at low temperature.

A large amount of quartz precipitate is expected to seal the fractures and to block the downflow fluid efficiently. The maximum depth of the hydrothermal-convection zone in the geothermal fields may reflect the significant precipitation of quartz at high temperature.

References) Doi, N., Kato, O., Ikeuchi, K., Komatsu, R., Miyazaki, S., Akaku, K., and Uchida, T., *Geothermics*, 27, 663-690, 1998.; Ikeuchi, K., Doi, N., Sakagawa, Y., Kamenosono, H., and Uchida, T., *Geothermics*, 27, 591-607, 1998.

キーワード: シリカ鉱物, 析出, 熱水実験, 地熱地帯

Keywords: Silica minerals, Precipitation, Hydrothermal experiment, Geothermal field

日本海溝プレート境界断層の鉱物学的特徴 Clay mineral characteristics of the plate-boundary fault at the Japan Trench

亀田 純^{1*}, 氏家 恒太郎², 廣瀬 丈洋³, Matt Ikari⁴, Francesca Remitti⁵, 清水麻由子¹, 濱田 洋平³, 木村 学¹, Frederick Chester⁸, ジェームズ モリ⁸, 江口暢久³, Sean Toczko³, Exp 343 Scientists⁶
Jun Kameda^{1*}, Kohtaro Ujiie², Takehiro Hirose³, Matt Ikari⁴, Francesca Remitti⁵, Mayuko Shimizu¹, Yohei Hamada³, Gaku Kimura¹, Frederick Chester⁸, James Mori⁸, Nobu Eguchi³, Sean Toczko³, Exp 343 Scientists⁶

¹ 東京大学, ² 筑波大学, ³ JAMSTEC, ⁴ University of Bremen, ⁵ Universita' di Modena e Reggio Emilia, ⁶ Texas A&M University, ⁷ Kyoto University, ⁸ Exp 343

¹ The University of Tokyo, ² Tsukuba University, ³ JAMSTEC, ⁴ University of Bremen, ⁵ Universita' di Modena e Reggio Emilia, ⁶ Texas A&M University, ⁷ Kyoto University, ⁸ Exp 343

The 2011 Tohoku-oki earthquake (Mw9.0) rupture propagated along the plate-boundary megathrust and caused a huge tsunami. One anomalous aspect of this earthquake is that the seismic slip broke through the up-dip limit of the seismogenic zone, with slip propagating as far as the trench axis. In order to elucidate the physical mechanisms responsible for such unexpected behavior of the shallow fault, the IODP Ex 343 The Japan Trench Fast Drilling Project (JFAST) was carried out one year after the earthquake. It succeeded in recovery of material from within the plate boundary shear zone. Our data illustrate how mineralogical properties vary through a depth-section including the plate boundary fault rock, and we discuss the mechanical significance.

At the drilling site (C0019E) where the largest fault slip (>50m) occurred, a plate boundary shear zone was identified around 820 mbsf. X-ray diffraction (XRD) analysis of clay-fraction samples reveals that relative abundance of smectite is markedly higher at the fault (74-94 wt.%) than in the surrounding host rocks. Bulk-XRD results indicate the absolute smectite abundance in the fault rock reaches more than 70 wt.%, suggesting (by correlation with previous experimental studies of smectitic clays) the shear zone material had low intrinsic friction coefficient.

Because it has such a high smectite content, the shear zone is also expected to be influenced by physico-chemical interactions between smectite and interstitial water. In particular, the swelling behavior of smectite will affect the in-situ mechanical state of the fault. We estimated osmotic swelling forces the shear zone rock could cause by applying the Gouy-Chapman theory of diffuse double layer states under the restricted swelling strain condition. Based on measurements of exchangeable cation content, cation exchange capacity and BET surface area for some bulk rock samples (including 2 fault rocks), the theoretical estimate suggests osmotic repulsive forces of the order of ~5MPa could act between the smectite particles within the fault. Thus, in addition to its contribution to a low friction coefficient, the swelling behavior of smectite might further reduce effective pressure (and therefore shear strength) of the plate-boundary fault, and help to promote localized slip on it.

Keywords: 2011 Tohoku-oki earthquake, JFAST, smectite

深発地震と脱水流体の関係 三波川白髪山蛇紋岩体の解析例 - Relationship of intra-plate earthquake and dehydrated fluid -Example of the analysis of serpentinite body in Mt. Shiraga-

福村 成哉^{1*}, 岡本 和明²

Seiya Fukumura^{1*}, Kazuaki Okamoto²

¹ 埼玉大学大学院教育学研究科理科教育専攻, ² 埼玉大学教育学部, ³ 東京学芸大学連合大学院

¹Department of Science Education, Saitama University, ²Faculty of Education, Saitama University, ³Graduate School, Tokyo Gakugei University

沈み込む海洋リソスフェアや2次対流により引きずり込まれるマントルウェッジ中で起こる脱水流体は、地震や島弧マグマの生成に深く関与している。低温高圧型変成岩は、沈み込み帯深部から地表に上昇した過去の海洋物質（海洋地殻とその上位の堆積物）だと考えられている。低温高圧型変成岩中に含まれる蛇紋岩は、海洋リソスフェアもしくはマントルウェッジを構成していたかんらん岩が加水により蛇紋岩化して形成された、と考えられている。蛇紋岩の脱水反応のうち、最も重要なものは、蛇紋石の分解反応である。特に沈み込む海洋リソスフェア中での蛇紋石の脱水分解は、2重深発地震面の下面で起こるやや深発地震の成因として注目されている。しかしながら沈み込み帯起源の低温高圧型変成岩における蛇紋石の脱水分解反応の研究は少ない。太平洋プレートの沈み込み、付加により形成された環太平洋造山帯中には、三波川変成岩に代表される低温高圧型変成岩が含まれている。しかし蛇紋岩は、沈み込み帯から上昇する際の加水反応により形成されたと考えられてきた。ところが大陸衝突帯に含まれる超高压変成岩帯中の蛇紋岩では、蛇紋石の脱水分解組織が記載されている (e.g. Scambelluri et al.2011)。アルプス変成帯では、蛇紋岩マイロナイト中に存在するせん断脈中にはかんらん石が析出している。このかんらん石の流体包有物には塩素や希土類元素が含まれており、スラブ中の蛇紋石からの脱水流体と解釈されている (e.g. Jhon wt al.2011)。これらの解析が環太平洋造山帯で検証されれば、スラブやマントルウェッジ中での流体移動や岩石変形の実態に大きな制約を与える。そこで三波川変成岩中の蛇紋岩で蛇紋石の脱水分解反応を記載すべく、文献調査から開始した。

蛇紋石の脱水分解により生じる変成かんらん石の記載は、1980年代に三波川帯で報告されていた (e.g. Kunugiza et al.1986)。そこで重要な岩石記載を行った梶原教授（富山大学）との議論により、四国中央部汗見川流域の蛇紋岩体（白髪山岩帯）を研究対象とした。白髪山蛇紋岩体においては、源岩岩層単位の地質図の作成、岩石変形組織の野外観察を行い、さらに岩石薄片の偏光顕微鏡、SEM-EDS および EPMA による組織観察および元素分析、レーザー顕微ラマンによる鉱物同定、酸素質量分析計を用いたかんらん石の酸素同位体測定を行った。

その結果、予察的な地質調査により白髪山蛇紋岩体は3層のスライスであることが明らかになった。そして中間層の蛇紋岩層下底部がマイロナイト化（脆性延性破壊化）していることがわかった。この部分で特にせん断歪の集中している領域は、蛇紋石が分解し、タルクとともにブレード状の変成かんらん石が存在する。この観察事実により、蛇紋石 = かんらん石 + タルク + 流体の反応式が考えられる。この反応は P-T 図上で正の P/T 勾配を持っており、三波川変成岩の最高変成温度圧力条件（2GPa, 600℃）がこの反応曲線より高温低圧であることと調和する。またこの部分のかんらん石は $Fo = (Mg/Fe+Mg)$ 値が約 98 と非常に高く（初生的なかんらん石は $Fo = 90$ 前後）、蛇紋石が脱水分解してできた変成かんらん石であると考えられる。一方、山頂付近のかんらん石は、マイロナイト化はしていないものの、ペインとしてかんらん石が存在しているものがある。これは脱水流体からかんらん石が沈殿したものであると考えられる。分析の結果、これらの山頂付近のかんらん石は $Fo = 95$ 前後であり、初生的なかんらん石よりも高いことがわかった。またこのかんらん石の酸素同位体測定を行ったところ、 $\delta^{18}O$ 値が通常のマントル起源のかんらん石よりも低いことが明らかになった。この同位体測定から、このかんらん石は、海水によっての蛇紋岩化された蛇紋石が、沈み込み帯の変成作用によって脱水分解することによって生じた変成かんらん石であることが分かった。

引用文献

- John, T., Scambelluri, M., Frische, M., Barnes, J. and Bach, W. (2011) Earth and Planetary Science Letters, 308, 65-76.
 Kunugiza, K., Takasu, A. and Banno, S. (1986) In: Blueschists and Eclogites (ed. B. Evans and E.H. Brown), pp.375-385, The Geological Society of America Memoir 164.
 Scambelluri, M., Bottazzi, P., Trommsdorff, V., Vannucci, R., Hermann, J., Gomez-Pugnaire, M.T. and Lopez Sanchez-Vizcaino, V. (2001) Earth and Planetary Science Letters, 192, 457-470.

キーワード: 沈み込み帯, 脱水流体, 蛇紋石, 地震, 地質学, 岩石学

塩素同位体分別効果への脱水影響：沈み込み帯を通じた親水性塩素動態に関する考察

Influence of dehydration to Cl isotopic fractionations: implication for behavior of hydrophilic Cl during subduction

武蔵 正明^{1*}

Masaaki Musashi^{1*}

¹ 首都大学東京 理工 化学

¹ Department of Chemistry, Tokyo Metropolitan University

Chlorine, which is known as a hydrophilic element, has been used for elucidating mechanisms of the oceanic materials recycling during subduction (Philippot et al., 1998). Since Cl-bearing minerals such as NaCl are highly dissociative in solution, chloride can be a sensitive proxy for fluid mobility in crustal and subduction-related environments (Barnes et al., 2008).

Chlorine isotopic ratio ($d^{37}\text{Cl}/\text{permil}$ vs. SMOC, standard mean ocean chloride) varies in a range of ± 10 permil. The highly positive $d^{37}\text{Cl}$ values were found in the MORB while the negative $d^{37}\text{Cl}$ values were seen in subduction-zone pore fluids. Serpentinized ultramafic rocks from ODP sites showed negative $d^{37}\text{Cl}$, indicating that a result of hydration of the ultramafic rock by infiltrating ^{35}Cl -enriched pore fluids from the overlying sediments (Barnes and Sharp, 2006). The pore fluids having strongly negative $d^{37}\text{Cl}$ values (Ransom et al., 1995) are also consistent with preferential retention or fixation of ^{37}Cl in silicates.

However, the mechanism of Cl isotopic fractionation between two phases occurring phase separation along dehydration and recrystallization at subduction related environments has not been described well. To elucidate an influence of water to the Cl isotope fractionation, we have conducted anion exchange chromatographic experiments. The results showed the heavier isotope, ^{37}Cl , enriched into liquid phase while the lighter, ^{35}Cl , enriched into anion-exchange resin phase (Musashi et al., 2007).

The trend of the heavier isotopic enrichment into liquid phase by the chromatography was agreeable to the theoretical and experimental studies on Li isotope effect: dehydration of the Li hydrate influenced on ^7Li enrichment into the liquid phase (Oi et al., 1991). Controversially, Schauble et al. (2003) theoretically estimated the lighter isotope, ^{35}Cl , enriched into liquid phase by the Cl isotope equilibrium of the anhydrates.

To understand the Cl isotopic fractionation factor (S) experimentally obtained, the reduced partition function ratios (named f value) of several Cl-hydrates were computed after geometrical structures of the Cl-hydrates were optimized by ab initio molecular orbital calculation. Remarkably, the Cl-hydrates were not optimized until hydration number being more than 100, although the number of the primary hydration sphere around a Cl⁻ in aqueous solution was seven. This implied that the extremely dissociative Cl⁻ was negatively hydrated and the hydration structure was unstable. The f value of the Cl-(H₂O) _{n} was calculated and $1000 \cdot \ln f(100) = 1.658$ ($n=100$) (Oi, private comm.). The S value is expressed by the theory of two phases' separation as follows: $\ln S = \ln F(m) - \ln f(n)$ (Eq.1), where $F(m)$ is a RPF of Cl-(H₂O) _{m} adsorbing to resin with the hydration number of m , and $f(n)$ is that of Cl-(H₂O) _{n} dissolved in solution with the number of n . Since the m becomes less than the n by dehydration, symmetry of the molecular structure of the former $F(m)$ is less than that of the latter $f(100)$. We speculate that $F(m) < f(100)$, implying that ^{37}Cl preferably can be enriched into solution phase by dehydration effect.

When we summarize from the above-mentioned things, the thermo-dynamical stability of the primary hydration sphere around Cl⁻ ion is an important factor controlling the tendency of Cl isotope fractionation between liquid and solid phases of geochemical interests. Assuming an anion exchange resin as oceanic sediment, we may say that ^{35}Cl preferentially enriches into the sediment phase while ^{37}Cl enriches into the subduction-zone pore fluid phase. However, only if Cl⁻ incorporated into the solid phase such as oceanic sediment is stable thermo-dynamically, as $F(m) > f(n)$ (Schauble et al., 2003), the ^{37}Cl may enrich into the sediment phase rather than the pore fluid phase. Similarly, in case of the ultimate dehydration such as recrystallization of NaCl from the saturated solution, the ^{37}Cl may enrich into crystal phase (Eggenkamp et al., 1995).

キーワード: 塩素同位体分別, 親水性元素, 水和構造, 沈み込み帯間隙流体, 分子軌道計算, 陰イオン交換平衡

Keywords: chlorine isotope fractionation, hydrophilic, hydration structure, subduction-zone pore fluid, molecular orbital calculation, anion exchange equilibrium

塩水-岩石相互作用の数値シミュレーション A numerical simulation of brine-rock interaction

盛田 唯花^{1*}, 星野 健一²Yuika Morita^{1*}, Kenichi Hoshino²¹ 広島大・理・地球惑星システム, ² 広島大・理・地球惑星システム¹Dept. Earth and Planet. Sci., Hiroshima Univ., ²Grad. Sch. Sci., Hiroshima Univ.

SUPCRT92 (Johnson et al., 1992) は、水 - 岩石相互作用の解析に広く使われている熱力学データベースであり、多くの溶存化学種の熱力学的データを広範囲の温度・圧条件で取り扱うことができる。しかしながら、SUPCRT92 が与える溶質の熱力学的諸関数はすべて純水溶媒中の値であり、一般的に水 - 塩 - ガス成分系混合流体であると考えられる地殻流体にはそのままでは適応できない。

Hoshino et al. (2009) によると、誘電率は溶媒の化学的性質を特徴づける最も重要なパラメーターで、SUPCRT92 に用いられている静電学的アプローチによれば、溶存種の自由エネルギーは溶媒和に関係しない項と溶媒和に関係する項とに分けられ、後者は溶質の Born パラメータと溶媒の誘電率を用いた Born の式によって表される (Akiniev and Zotov, 1999) ことから、塩水の誘電率を見積もることが出来れば、SUPCRT92 により求めた純水溶媒中の溶媒種の熱力学的状態関数 (自由エネルギーなど) を、塩水溶媒中にも適応出来るはずであるとしている。

一方、Hoshino et al. (2006) は、CO₂ のような無極性ガス-水系混合溶媒は、適当な混合規則によって容易に計算することができるが、水 - 塩系混合溶媒 (塩水) の誘電率を広範囲な温度範囲で見積もることは出来ないと述べており、その理由は水 - 岩石相互作用の主要な温度場である 300 - 400 °C 付近より高温側では NaCl は中性種として溶存し、低温側でイオン化していることによると推定している。つまり、この温度を含む広範囲な温度での塩水の誘電率を見積もることが出来れば、SUPCRT92 により求めた溶質の自由エネルギーを、水 - 塩 (- ガス) 系混合流体の地殻流体に適応出来ることになる。このことから、前者らは、これまでの H₂O-NaCl 系流体中の石英の溶解度測定実験の結果から同流体の有効誘電率を見積り、上記の温度付近で誘電率が急変すると推定したが、様々な温度・圧条件でそれぞれ異なる塩濃度である実験データをかなり強引に内挿・外挿したものであり、より精密な溶解度測定実験が必要であると述べている。

従って本研究では、同系流体の有効誘電率を求めるため、100 MPa, 300 と 400 °C の圧・温度で、1 モル NaCl 溶媒中の石英と珪灰石の溶解度測定実験を行った。溶解度測定実験は、岡山大学地球物質科学研究センターの内熱式ガス圧装置 (Dr. HIP) を使用した。金チューブに 1 モル NaCl 溶液と石英と珪灰石の細粒結晶を封入し、そのカプセルを目的の温度・圧で一定時間 (64 時間及び 91 時間) 保持した後急冷させた。その後カプセル内の実験溶液を回収・希釈し、ICP-AES により溶液中の Si と Ca の濃度を測定し、両鉱物の溶解度を求めた。

実測された両鉱物の溶解度 (即ち、石英と珪灰石に飽和した Si と Ca の濃度) となる有効誘電率を、SUPCRT92 のデータを組み込んだ MIX99 (Hoshino et al., 2000) を用いて見積もった。400 °C の実験試料の Si 及び Ca の各々の濃度から見積もった誘電率は、それぞれ 15.83 と 19.32 であり、300 °C の実験試料のそれら各々の濃度から見積もった誘電率は 27.84 と 34.38 となった。また、400 と 300 °C それぞれの実験において急冷後も反応が続いたと仮定し、Si と Ca 両濃度を単一の誘電率で説明できる反応停止温度は、400 °C の実験では 384.6 °C, 300 °C の実験では 290 °C であり、それぞれ誘電率は 20.14 と 34.51 と見積もられ、上記の Ca 濃度から見積もった 300 °C と 400 °C における誘電率に近い値を得た。

塩水溶媒中と純水中の溶存種の化学ポテンシャルの差は、Born パラメータと誘電率の逆数の差に比例するが、Ca²⁺ の Born パラメータは SiO₂ (aq) より一桁程度大きいため、Ca 濃度の方が Si 濃度より誘電率の違いによる影響がはるかに大きい。また、実験溶液の Ca 濃度測定のための希釈倍率は、Si のその 1/10 である。これらから、Ca 濃度から見積もった有効誘電率の方が信頼度が高いと思われる。ところで、純水の誘電率は 400 °C で 16.07, 300 °C で 25.27 である。従って、見積もられた 1 モル NaCl 溶媒の有効誘電率は純水のそれよりも、400 °C で 20 % 程度、300 °C で 36 % 程度大きく、Hoshino et al. (2009) が予想したように、NaCl の溶存形態が中性から帯電溶存種へと移化する 400 °C 付近から低温に向けて純水の誘電率からの乖離が増大すると思われる。

この有効誘電率を用いて、石英-カリ長石-白雲母からなる岩石と 1 モル NaCl 孔隙溶液の温度低下に伴う反応を、MIX99 によりシミュレートした。その結果、温度が 10 °C 低下するごとの沈殿 (体積) 量は、350 °C 付近で極大となることが示された。

キーワード: 誘電率, H₂O-NaCl 系流体, 溶解度, SUPCRT92, 地殻流体Keywords: dielectric constant, H₂O-NaCl solution, solubility, SUPCRT92, geological fluid

蛇紋岩化反応とシリカの拡散とのカップリング Coupling of serpentinization reactions and silica diffusion

岡本 敦^{1*}, 小笠原 由一¹, 大柳 良介¹, 土屋 範芳¹

Atsushi Okamoto^{1*}, Yuichi Ogasawara¹, Oyanagi Ryosuke¹, 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

Silica activity is considered to be one of the key factors in controlling reaction paths and rates of serpentinization (e.g., Frost and Beard, 2007; Klein et al., 2009). There are many experimental studies on serpentinization during mantle peridotites and water interaction, focusing on extent of serpentinization, evolution of fluid chemistry and generation of hydrogen and hydrocarbons. However, all of these studies focused on bulk solid materials and solutions within the reaction vessel, and local changes of products and silica concentration gradient have not been clarified; therefore, the role of silica transport on progress of serpentinization is still unclear. In this study, we conducted hydrothermal experiments in the olivine (Ol)-orthopyroxene (Opx)-H₂O system at 250 degreeC and at a vapor-saturated pressure of 3.98 MPa to explore the role of silica diffusion in aqueous fluids during serpentinization. Olivine (Fo91), orthopyroxene (En92), or their composite powders (with Ol/Opx/Ol zones) were set in tube-in-tube vessels, and solution chemistry and the extent of serpentinization were analyzed in detail.

In the Ol-H₂O experiments, the product changed from serpentine + magnetite to serpentine + brucite + magnetite, accompanied by a Si-drop in the solutions, that is similar to the results of our previous observations (Okamoto et al., 2011). Serpentinization proceeded uniformly throughout the reaction tube, indicating that the supply of water was not the rate-determining process. In the Opx-H₂O experiments, orthopyroxenes were dissolved along the cleavages, and a small amount of serpentine + talc was formed. The silica activity of the solutions in the Opx-H₂O experiments was at the level coexisting serpentine + talc, that is 1-3 orders higher than in the Ol-H₂O experiments.

In the Ol-Opx-H₂O experiments, serpentinization proceeded in both the Ol and Opx zones, and white-colored reaction zone (2 mm thick) was developed at the boundary of the Ol and Opx zones. In the Opx zone, the extent of serpentinization was nearly constant, and mixture of serpentine + talc was formed. In the Ol zone, the total amount of H₂O revealed by thermogravimetry and SEM observations was most extensive along the boundary between the Ol and Opx zones, and it decreased gradually away from the boundary. Based on the Mg/Si values of the products, the ratio of talc in the products (M_{talc}/M_{talc}+M_{srp}) is highest in the Opx zone, and decreased steeply in the boundary zone, and talc was absent away from the boundary. The silica concentration in the bulk solution is lower than the stability field of talc, indicating the high Si gradient within the cm scale reaction tube.

Serpentinization in the Ol-Opx-H₂O experiments was modeled simply by coupled processes involving silica diffusion and three reactions: (1) a silica-consuming reaction after olivine, (2) a silica-releasing reaction after orthopyroxene and (3) talc-forming reaction after serpentine. We will discuss the kinetic model explain the reaction progress and evolution of solution chemistry, and the role of silica on the rate of serpentinization. Our experimental results represent an analogue of serpentinization in natural hydrothermal systems with a high porosity, and we suggest that the spatial variation of serpentine as a function of the distance from a source of silica could be a useful indicator of the relative magnitudes of reaction, mass transport, fluid flow as well as temperature during hydrothermal alteration of oceanic lithosphere.

Okamoto, A., Ogasawara, Y., Ogawa, Y., Tsuchiya N., 2011. *Chemical Geol.*, 289, 245-255.

Frost, B.R., and Beard, J.S., 2007. *J. Petrol.*, 48, 1351-1368.

Klein, F., Bach, W., Jons N., McCollom T., Moskowitz B., Berquo, T. 2009. *Geochim. Cosmochim. Act.*, 73, 6868-6893.

キーワード: 蛇紋岩化作用, シリカの拡散, 律速過程, かんらん石-斜方輝石-水

Keywords: serpentinization, silica diffusion, rate-determining process, olivine-orthopyroxene-H₂O

スラブ-マントル境界のレオロジーに対するシリカ交代作用の影響 Influence of Si-metasomatism on slab-mantle interface rheology

平内 健一^{1*}, Sabine den Hartog², Christopher Spiers²
Ken-ichi Hirauchi^{1*}, Sabine den Hartog², Christopher Spiers²

¹ 京都大学大学院人間・環境学研究科, ² Faculty of Geosciences, Utrecht University

¹ Graduate School of Human and Environmental Studies, Kyoto University, ² Faculty of Geosciences, Utrecht University

Aqueous fluids liberated during dehydration of the subducting slab cause hydration of the overlying forearc mantle wedge, changing the mechanical properties of the slab-mantle interface. Antigorite, a high-temperature serpentine mineral, is expected to be the main hydrous mineral present in the forearc wedge, while slab-derived fluids are likely to contain significant amounts of dissolved silica, leading to Si-metasomatism and replacement of antigorite by talc. However, it remains unclear how the strength and internal structure of antigorite-rich rocks evolve in the presence of reacting silica-rich fluids.

To determine the effect of Si-metasomatism on the rheological properties of antigorite, we performed a series of frictional sliding experiments on 100% antigorite, 100% talc and antigorite (70%) plus quartz (30%) gouges under hydrothermal conditions, using a ring shear machine. The pure antigorite and talc gouges showed steady-state shearing at a friction coefficient of 0.63 and 0.21, respectively. In contrast, the antigorite/quartz (atg/qtz) gouges exhibited a peak friction coefficient of 0.40-0.62 followed by strain weakening towards a quasi-steady-state strength with the friction coefficient of 0.25-0.47. The degree of weakening of atg/qtz relative to pure antigorite increased with increasing temperature and decreasing sliding velocity. The weakening was mainly due to the development of through-going, talc-bearing boundary shears, which widened until the steady-state sliding was attained.

Our experiments indicate that in the lowermost part of the forearc wedge, where silica-saturated fluids infiltrate from the dehydrating slab, metasomatically produced talc slip surfaces or shear bands will form in the intensely sheared plate interface, causing a much larger weakening effect than expected for antigorite, even if the total amount of talc formed is minor (<10 vol%).

キーワード: アンチゴライト, 流体, マントルウェッジ, 交代作用, 沈み込み帯, タルク

Keywords: antigorite, fluids, mantle wedge, metasomatism, subduction zone, talc

スラブ温度のちがいが引き起こすさまざまなスラブ流体の発生：サンギヘ弧の例 Geochemical variations in the Sangihe arc: Fluid and melt slab fluxes in response to slab temperature

羽生 毅^{1*}, James B. Gill², 巽 好幸³, 木村 純一¹, 佐藤 佳子¹, 常 青¹, 仙田 量子¹, 宮崎 隆¹, 平原 由香¹, 高橋 俊郎¹, Iskandar Zulkarnain⁴

Takeshi Hanyu^{1*}, James B. Gill², Yoshiyuki Tatsumi³, Jun-Ichi Kimura¹, Keiko Sato¹, Chang Qing¹, Ryoko Senda¹, Takashi Miyazaki¹, Yuka Hirahara¹, Toshiro Takahashi¹, Iskandar Zulkarnain⁴

¹ 海洋研究開発機構, ² カリフォルニア大学サンタクルズ校, ³ 神戸大学, ⁴ インドネシア科学機構

¹Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology, ²University of California at Santa Cruz, ³Kobe University, ⁴Indonesian Institute of Science

The Sangihe arc, northeastern Indonesia, is an oceanic arc situated in unique tectonic settings where the active arc-arc collision is ongoing in the northern arc sector. The compositional diversity of lavas from south to north in the arc should reflect influx from subducted slab in response to slab components and P-T conditions in the sub-arc mantle. To elucidate magma genesis and slab thermal structure in such a setting, we have obtained new geochemical data for lavas from the entire Sangihe arc. In the southern arc where is away from the collision zone, the across-arc geochemical variation demonstrates that slab component changes in character from low-temperature fluid, through high-temperature fluid, to partial melt from the volcanic front to the rear arc. The geochemical systematics, the estimated mass fraction of the slab component, and the inferred stability of accessory rutile, zircon, and phengite in the slab are all similar to other oceanic arcs, such as Izu arc, indicating that the thermal structure of the slab is not affected by impending collision. In contrast, volcanic front lavas from the dormant northern Sangihe arc are systematically more enriched in fluid-immobile elements than the southern volcanic front lavas. This may be related to advanced collision in the northern arc that could have slowed the subduction rate and heated the slab in the Pliocene followed by cessation of volcanic activity in the Quaternary.

キーワード: 沈み込み帯, スラブ脱水, スラブ融解, サンギヘ弧, 島弧衝突

Keywords: subduction zone, slab dehydration, slab melting, Sangihe arc, arc collision

Lateral variation of trace element of volcanic rocks from East Java, Sunda arc: estimation of slab fluid contributions

Lateral variation of trace element of volcanic rocks from East Java, Sunda arc: estimation of slab fluid contributions

Esti Handini^{1*}, Toshiaki Hasenaka¹, Haryo Edi Wibowo⁴, Tomoyuki Shibata², Yasushi Mori³, Agung Harijoko⁴
Esti Handini^{1*}, Toshiaki Hasenaka¹, Haryo Edi Wibowo⁴, Tomoyuki Shibata², Yasushi Mori³, Agung Harijoko⁴

¹Graduate School of Science and Technology, Kumamoto University, ²Beppu Geothermal Research Laboratory, Kyoto University, ³Kitakyushu Museum of Natural and Human History, ⁴Department of Geological Engineering, Gadjah Mada University
¹Graduate School of Science and Technology, Kumamoto University, ²Beppu Geothermal Research Laboratory, Kyoto University, ³Kitakyushu Museum of Natural and Human History, ⁴Department of Geological Engineering, Gadjah Mada University

We analyzed volcanic rocks from eastern part of Java island in order to estimate the influence of slab-derived fluid across the arc. Such lateral variation of slab-derived fluid contributions, from both sediment (SED) and altered oceanic crust (AOC), to arc magmas has been documented in central and western sections of Java island. The ratios of fluid-mobile elements to HFS (High Field Strength) elements (e.g. Ba/Nb, Ba/Zr, Ba/La) were examined as well to reveal the lateral variation of subduction components. We also evaluate the mantle source variability across this arc magmas by using Nb/HFSE (e.g. Nb/Ta, Nb/Zr) ratios.

Volcanic rocks from eastern part of Java island show general enrichment of LILE and LREE, and negative anomaly of Nb and Ti, in both the frontal-arc and back-arc regions. These arc magma's characteristics are also well observed in the volcanic rocks from central and western parts of Java island. The increasing ratios of Nb/HFSE in the back-arc region of eastern part of Java imply particular mantle source enrichment in this part. Subduction components, as represented by Ba/HFSE, are well observed all across the arc. These ratios decrease from volcanic front toward back arc, which suggests a recognizable influence of slab-derived fluid in this particular part of Java island. The back-arc alkaline volcanoes, such as Ringgit-Beser, are low in terms of Ba/HFSE ratios, suggesting the small input of subduction components. In terms of across-arc variation of slab-derived fluid, volcanic rocks from East Java show similar decreasing pattern, which is also shown by magmas from Central Java. However, the appearance of back-arc alkaline volcanism at 220 km depth of Wadati-Benioff zone, which is much shallower compared to 370 km in central part of Java, raises a question of different controls on back-arc volcano formation in Java island.

The decreasing patterns of slab-derived fluid across the eastern part of Java, which is recognized in Central Java as well, suggest the distinct contributions of slab-derived fluid into arc magmas in Sunda arc. In addition, this finding implies that subduction signature is observed not only in the frontal arc region, but also in the back-arc region of both East and Central parts of Java island.

キーワード: East Java, Sunda arc, slab fluid, lateral variation, trace elements

Keywords: East Java, Sunda arc, slab fluid, lateral variation, trace elements

高温高圧下における高濃度塩水溶液の電気伝導度 Electrical Conductivity of Highly Concentrated Salt Solution at Elevated Temperature and Pressure

佐久間 博^{1*}, 市来 雅啓², 河村 雄行³, 藤田 清士⁴

Hiroshi Sakuma^{1*}, Masahiro Ichiki², Katsuyuki KAWAMURA³, Kiyoshi Fuji-ta⁴

¹ 東京工業大学, ² 東北大学, ³ 岡山大学, ⁴ 佐賀大学

¹Tokyo Institute of Technology, ²Tohoku University, ³Okayama University, ⁴Saga University

Introduction: Aqueous fluids in the Earth's crust would have large effect on the occurrence of earthquake and volcanic eruptions. To understand the effect of aqueous fluids, it is necessary to delineate their distribution in the Earth's crust. The distribution of the fluids has been expected to be revealed by electromagnetic observation, e.g. magnetotellurics. Electrical conductivity distribution in the crust is considered to roughly correspond to the fluids distribution because of the high electrical conductivity of fluids relative to solids. To develop a plausible model of the fluids distribution to explain the electromagnetic observations, we have to construct a database of the electrical conductivities of fluids over a range of pressure (p), temperature (T), and electrolyte concentrations (c). Classical molecular dynamics (MD) simulations are useful to obtain the physical properties of fluids at a range of p , T and c and to understand the underlying atomic-scale mechanism of the electrical conduction. Liquid and supercritical phases of water and aqueous NaCl solutions are dominant at the p - T conditions of the Earth's crust. The aims of this study are (1) to develop a database of electrical conductivity of aqueous NaCl solution at a range of temperature, pressure, and salt concentrations and (2) to understand the physics and chemistry of the electrical conductivity of NaCl solution at extremely supercritical conditions.

Computational Methods: We used a flexible and induced point charge (FIPC) water model [1]. The point charges are fluctuated during the MD simulations. The MD simulations were performed using the code MXDORTO with some modifications. The database of electrical conductivity was developed for NaCl solution at $T < 2000$ K, $p < 2$ GPa, and $c < 9.5$ wt%

Results and Discussion: The electrical conductivity was almost constant at $T > 673$ K, $p > 0.5$ GPa, and low salt concentration $c = 0.6$ wt%. This is because the association of ions canceled out the mobility of ions at these conditions. At the salt concentration $c = 3.3$ wt%, which corresponds to the concentration of sea water, the electrical conductivity showed large temperature and pressure dependences at $T > 1000$ K and $p < 1.0$ GPa. The values were a function of temperature and density of the solution. The maximum conductivity was ~ 25 S/m. The behavior of highly concentrated salt solution $c = 9.5$ wt%, which is a few times higher than the sea water, will be discussed in the presentation. In this study, we explain the underlying mechanism of the change of the electrical conductivity of aqueous NaCl solution in the supercritical phase from atomistic view and try to construct the useful equations for the electrical conductivity of aqueous NaCl solution in the supercritical phase.

[1] Sakuma, H., Ichiki, M., Kawamura, K., and Fuji-ta, K., under revision.

キーワード: NaCl, 地殻流体, MT, 誘電率, 水, 粘性率

Keywords: NaCl, geofluid, MT, static dielectric constant, water, viscosity

フィールドスケール岩石き裂ネットワーク内での3Dチャネリングフロー 3-D Channeling Flow through Rock Fracture Networks in Field-scale

石橋 琢也^{1*}, 渡邊 則昭¹, 櫻井 圭介¹, 平野 伸夫¹, 岡本 敦¹, 土屋 範芳¹

Takuya Ishibashi^{1*}, Noriaki Watanabe¹, Keisuke Sakurai¹, Nobuo Hirano¹, Atsushi Okamoto¹, Noriyoshi Tsuchiya¹

¹Graduate School of Environmental Studies, Tohoku University

Rock fractures are recognized as the predominant pathways of fluid in the Earth's crust, because fractures usually have much greater permeability than the matrix permeability. Fluid flow through rock fractures is characterized by formation of preferential flow path (i.e. channeling flow) due to the heterogeneous aperture distribution created by the rough surfaces contacting, in part, each other.

In understanding the fluid migration within Earth's crust, discrete fracture network (DFN) model is one of the most powerful techniques to incorporate geometrical properties in fractures (fracture size, location, orientation, and density), and can account explicitly for the contribution of individual fractures on fluid flow. However, in the conventional DFN models, individual fractures were characterized by a single aperture value despite the fact that the real fractures had heterogeneous aperture distributions, and as a result the formation of 3-D preferential flow paths thorough fracture network were neglected. Therefore, the authors have developed GeoFlow, a novel DFN model simulator, where fractures are characterized by aperture distribution [Ishibashi et al., 2012]. In order to utilize GeoFlow for a field scale problems, the authors also developed a prediction method of fluid flow within multi-scaled fractures under confining stress [Ishibashi et al., 2012].

In the present study, we challenged to construct the precise fracture network with heterogeneous aperture distribution in field-scale. The Yufutsu oil/gas field in Hokkaido, Japan is well known as fractured type of reservoir, and selected as the subject for study. This is because reliable DFN models can be developed based on 3-D seismic data, acoustic emission data, in-situ stress measurement, and well logging for this field [Tamagawa et al., 2010]. The modeling domain is 1,050 (East-West) x 1,050 (North-South) x 1,050 (Depth) m³, and fractures are represented by squares of 50-390 m on a side. Aperture distributions are numerically determined by contacting a pair of fractal fracture surfaces to have the lab-scale non-scale-dependent contact area, and considered for the critically stressed fractures, which have high permeability due to shear dilation. Constructed DFN models are, then, converted into equivalent permeability continua that reflected contributions of both the matrix and fracture permeabilities. For the equivalent permeability continua, steady-state laminar flow of a viscous, incompressible fluid is simulated by GeoFlow under the unidirectional flow geometry.

The simulation results by GeoFlow show that the localization of flow paths in the fracture networks is much more remarkable than that simulated by conventional DFN models due to the 3-D channeling flow. Subsequently, percentage of total area of flow paths to total area of the fracture plane (flow area) is calculated for quantitative evaluation of flow path localization. As a result, the actual flow area is estimated to be around 20-50% of the flow area predicted by conventional DFN models. This finding implicates the followings: the reactive fields where water-rock interaction takes place are limited to narrower area than predicted by conventional DFN models, or 3-D channeling flow have a significant impact on well productivity of fractured type of reservoirs. In understanding the reality of the fluid migration within Earth's crust, 3-D channeling flow is one of the key phenomenon, and the suggested method in this presentation enables us to address this phenomenon.

キーワード: 岩石き裂, ネットワークモデル, チャネリングフロー, 不均質間隙構造, フィールドスケール

Keywords: rock fracture, network model, channeling flow, heterogeneous aperture distribution, field-scale

含水岩石の弾性波速度および電気伝導度の流体量依存性 Fluid fraction dependence of elastic wave velocity and electrical conductivity of a water-saturated rock

樋口 明良^{1*}, 渡辺 了¹
Akiyoshi Higuchi^{1*}, Tohru Watanabe¹

¹ 富山大学理工学教育部

¹Graduate School of Science and Engineering, University of Toyama

中部地殻程度の深さでは、流体を含むクラックが岩石の電気伝導度を支配していると考えられる。電気伝導度の値はクラックの連結度に強く依存するはずである。どれだけのクラック量が連結に必要なのか？クラック量とともに連結度はどのように変化するのか？これらの問題を解明するために、封圧によって岩石の流体量を変化させながら、弾性波速度と電気伝導度の測定を行った。

試料は香川県庵治産の花崗岩を用いた。空隙率は0.68%、密度は2.656 g/cm³である。円柱状の試料は直径25mm、高さ30mmである。あらかじめ試料は0.01mol/lのKCl水溶液で飽和した。弾性波速度をパルス透過法(PZT圧電素子, 中心周波数: 2 MHz), 電気伝導度を2電極法(Ag - AgCl電極, 周波数: 1Hz - 100kHz)によって測定した。

間隙流体圧を常圧に保ちながら封圧のみを増加させて、弾性波速度と電気伝導度を測定した。弾性波速度は、常圧から封圧25MPaでは5%増加したが、封圧25MPaから125MPaでは2%しか増加しない。電気伝導度は、常圧から封圧25MPaでは約1桁減少したが、封圧25MPaから125MPaでの減少は1%程度であった。弾性波速度の増加は封圧の増加に伴って微小クラックが閉鎖したことを反映し、電気伝導度の減少はクラックの閉鎖に伴う流体連結の低下を反映する。封圧の増加に伴い閉鎖したクラックのアスペクト比を弾性定数から推定した。常圧から封圧25MPaの変化ではアスペクト比が 3.6×10^{-4} 以下のクラックが閉鎖する。約1桁の電気伝導度の減少をもたらしたのは、このようなアスペクト比の小さいクラックである。一方、封圧25MPaから125MPaの変化で閉鎖したのはアスペクト比 3.6×10^{-4} から 1.8×10^{-3} のクラックである。これらのクラックの閉鎖によって、弾性波速度は2%増加したが、電気伝導度はほとんど変化していない。したがって、封圧125MPaでも閉鎖しないアスペクト比が 1.8×10^{-3} より大きいクラックの連結が電気伝導を支配していると考えられる。封圧125MPaまでの変化では、このように2つのグループのクラックが流体の連結を支配していることが明らかになった。

キーワード: 含水岩石, 弾性波速度, 電気伝導度, 流体量, 空隙のアスペクト比

Keywords: water-saturated rock, elastic wave velocity, electrical conductivity, fluid fraction, aspect ratio of crack

アジア東縁の沈み込み帯に産するマントルかんらん岩中の間隙水起源ハロゲンと希ガス

Sedimentary pore fluid-like halogens and noble gases in mantle peridotites from the Western-Pacific subduction zones

小林 真大^{1*}, 角野 浩史¹, 齋藤 健彦¹, 長尾 敬介¹, 石丸 聡子², 荒井 章司³, 芳川 雅子⁴, 川本 竜彦⁴, 熊谷 仁孝⁴, 小林 哲夫⁵, Ray Burgess⁶, Chris J. Ballentine⁶

Masahiro Kobayashi^{1*}, Hirochika Sumino¹, Takehiko Saito¹, Keisuke Nagao¹, Satoko Ishimaru², Shoji Arai³, Masako Yoshikawa⁴, Tatsuhiko Kawamoto⁴, Yoshitaka Kumagai⁴, Tetsuo Kobayashi⁵, Ray Burgess⁶, Chris J. Ballentine⁶

¹ 東京大学地殻化学実験施設, ² 熊本大学理学部地球環境科学講座, ³ 金沢大学理工学域地球学コース, ⁴ 京都大学理学研究科地球熱学, ⁵ 鹿児島大学理学部地球環境, ⁶ 英国マンチェスター大学

¹GCRC, Univ. of Tokyo, ²Dept. of Earth Environ. Sci., Kumamoto Univ., ³Dept. of Earth Sci., Kanazawa Univ., ⁴Inst. Geothermal Sci., Kyoto Univ., ⁵Earth and Environ. Sci., Kagoshima Univ., ⁶Univ. of Manchester, UK

ハロゲンと希ガスは高い流体濃集性、起源によって大きく異なる元素または同位体組成を持つことから、マントルにおける水の起源、挙動を明らかにするための有用なトレーサーになると期待されている。非放射壊変起源の希ガスは、海水または海底堆積物中の間隙水に含まれる形でマントルの中へと沈み込んでいると考えられている [1]。また、沈み込むスラブの直上で流体を捕獲したかんらん岩からは、間隙水を起源とするハロゲン組成が報告されている [2]。このようなハロゲンと希ガスは、海洋リソスフェアが上部の堆積物からの間隙水により蛇紋石化する際に取り込まれマントルへと運ばれているとも考えられている [2,3]。本研究では、沈み込み帯に産するマントルかんらん岩のハロゲンと希ガス組成から、沈み込む水がマントルのどこまで影響を及ぼしているかについて制約を与えることを目的とした。

マントル物質中のハロゲン濃度は非常に低いため、通常用いられるような手法での定量は困難である。本研究では、従来の手法より検出限界が桁桁低い「希ガス化法」を用いた。この手法では、原子炉で試料に中性子を照射してハロゲン等の元素を特定の希ガス同位体へと変換し、高感度希ガス同位体分析をおこなうことにより多元素を同時に分析できる [4]。

試料はロシア・カムチャツカ半島のアパチャ火山とフィリピン・ピナツボ火山のマントル捕獲岩 (ハルツバージャイト) と北海道・幌満かんらん岩体のダナイトであり、いずれも水に富む包有物を含んでいることが報告されている [5,6,7]。得られた Br/Cl、I/Cl 比には、スラブ由来流体 [2] とマントル的な成分 [8] が、産地によって異なる割合で寄与していた。希ガス組成も先行研究 [9,10] と同じくスラブ由来流体起源を示唆する、水に溶解した大気的な組成を示した。

これらのマントルかんらん岩にスラブ由来流体の影響が見られたことは、沈み込んだ水が少なくとも火山フロント直下のマントルウェッジまで及んでいることの有力な地球化学的証拠である。

参考文献 [1] Holland and Ballentine (2006) *Nature* 441, 186-191. [2] Sumino et al. (2010) *Earth Planet. Sci. Lett.* 294, 163-172. [3] Kendrick et al. (2011) *Nature Geosci.* 4, 807-812. [4] Bohlke and Irwin (1992) *Geochim. Cosmochim. Acta* 56, 203-225. [5] Ishimaru et al. (2007) *J. Petrol.* 48, 395-433. [6] Kumagai et al. (2011) *JpGU Meeting 2011, SCG060-P07*. [7] Hirai and Arai (1987) *Earth Planet. Sci. Lett.* 85, 311-318. [8] Johnson et al. (2000) *Geochim. Cosmochim. Acta* 64, 717-732. [9] Hopp and Ionov (2010) *Earth Planet. Sci. Lett.* 302, 121-131. [10] Matsumoto et al. (2001) *Earth Planet. Sci. Lett.* 185, 35-47.

キーワード: ハロゲン, 希ガス, かんらん岩, マントル, 沈み込み帯, 間隙水

Keywords: halogen, noble gas, peridotite, mantle, subduction zone, pore fluid

蛇紋岩の存在から推定される東北日本弧下のスラブ・マントル間カップリング条件 Slab-mantle coupling condition beneath northeastern Japan estimated from distribution of serpentinite

石井 和彦^{1*}
Kazuhiko Ishii^{1*}

¹ 大阪府立大学大学院理学系研究科
¹ 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。比較的単純で基本的なモデルとして、沈み込むスラブの年齢・沈み込み速度・沈み込み角度などを与え、それによって生じるウェッジマントルの流れなど物質と熱の輸送を計算するものがある。その際、ウェッジマントルがスラブとともに沈み込むのは約80kmより深い部分であり、それより浅い部分ではスラブとウェッジマントルはデカップルしていると仮定することが多い。その根拠の一つは、前弧域の低い地殻熱流量と前弧域マントルウェッジの地震学的特徴から、前弧域マントルウェッジが低温で滞留していると考えられることである。一方で、スラブとウェッジマントルが深さ100km以上までデカップルしていると弧火山直下のマントルが低温になりすぎるからである。

しかし、Kawakatsu & Watada (2007) や Tsuji et al., (2008) の結果は、その仮定と矛盾している。すなわち、東北日本下のスラブでは、90? 130kmの深さのスラブ直上に蛇紋岩層が存在すると推定されており、その部分の温度は700度より低いと考えられる。一方数値モデルでは、スラブ上面の温度はデカップリング深度を境に急増し、深さ130kmのスラブ直上に蛇紋岩は存在できないからである。そこで、数値モデルにおいて、スラブ?マントル間のカップリング条件を変化させて検討した結果、デカップリング深度は130kmと深い方が、浅い方に向かって徐々にデカップルと仮定することによって、観測結果と矛盾しない温度分布が得られた。また、このことはデカップリング深度が温度によって決まり、沈み込み帯によってかなり異なる可能性を示しており、他の沈み込み帯についても比較検討する。

キーワード: 沈み込み帯, 蛇紋岩, マントルウェッジ, 温度構造
Keywords: subduction zone, serpentinite, mantle wedge, thermal structure

稍深発地震：地殻流体と差応力 Intermediate-depth earthquakes: Role of geofluids and stresses

中島 淳一^{1*}, 吉田 圭佑¹, 長谷川 昭¹
Junichi Nakajima^{1*}, Keisuke Yoshida¹, Akira Hasegawa¹

¹ 東北大学大学院理学研究科

¹ Graduate School of Science, Tohoku University

本発表では、太平洋プレートの下部地殻および関東下のフィリピン海プレートのマントルで発生した稍深発地震の2つのクラスターに注目し、波形相関処理を行い震源決定および震源パラメータの推定を行い、稍深発地震の発生メカニズムを考察する。

地殻内地震：新潟県新発田市下の深さ 155km で定常的に活動している地震クラスターの波形解析を行ったところ、(1) 正断層地震と逆断層地震に分類され、それぞれ波形の非常によく似た地震が含まれること、(2) 正断層地震の約 1km 深部で逆断層地震が発生していること (図 1a)、(3) 地震は面状に分布しており、互いの破壊域は重ならないことなどが明らかになった。応力場の急変はエクロジャイト化に伴う体積減少による浅部での引張と深部での圧縮 (Hacker, 1996) で説明可能である (図 1b)。また、エクロジャイト化によって生じた水が既存の弱面の強度を低下させ、隣り合うパッチで地震が順次発生していると考えると面状の震源分布を説明できる (Nakajima et al., *Geology*, 2013)。

マントル内地震：東北地方太平洋沖地震の 8ヶ月後に、フィリピン海プレート内で活発化した地震活動 (M4.1 の最大地震とその余震) を解析した。地震活動の特徴は以下の通りである。(A) 震源の広がりは深さ方向に 5km 程度であり、M4.1 の地震はその最深部で発生した。(B) 深部から浅部への地震活動の移動がみられる。(C) 地震は面状に分布しており、破壊域は重ならない。地震活動が活発化するまでに要した 8ヶ月とその後の震源の移動は、間隙水圧の上昇および脆性破壊を伴う水の移動の時間発展を反映している可能性が高い。

キーワード: スラブ内地震, 脱水

Keywords: Intraslab earthquakes, fluids, dehydration

亜臨界 - 超臨界流体 (H₂O - (CO₂) - X) の分光特性 Spectroscopic properties of sub- and supercritical fluid(H₂O - (CO₂) - X)

関口 知寿^{1*}, 平野 伸夫¹, 岡本 敦¹, 土屋 範芳¹

Chizu Sekiguchi^{1*}, Nobuo Hirano¹, 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

Physicochemical states of H₂O are divided into three phases, solid, liquid and vapor. Especially, the vapor-liquid phase boundary is called the saturated steam pressure curve. The terminated point of this curve is called the critical point. Liquid density becomes equal to gas density at that point. The fluid's state above the critical point is called supercritical fluid (water). Supercritical fluids exist near the deep-sea hydrothermal vent or in the deep earth's crust.

Supercritical fluid has a characteristic property that chemical reactivity, solubility and/or ion product. It is very important for the understandings of fluid/crustal rocks interaction. Therefore, decision of supercritical point of crustal fluid and characterization of fluid's state is very important.

The fluid near the critical point has intense density fluctuation, so, it is considered that the optical transmissivity is very low.

In present study, spectroscopic measurements for pure H₂O, CO₂ and C₂H₅OH fluids under high temperatures and high pressures up to 400 °C/30 MPa were carried out by using visible-type autoclave. It was observed the state of the optical property of the fluid near the critical point. In addition, it was considered a method for the critical point determination of multicomponent fluid by the spectral measurement of the transmitted light through the fluid. On the critical point, intensity of transmitted light though each fluid became low drastically. The minimum intensity of transmitted light was corresponded to critical temperature and pressure of each fluid. Differences between experimentally determined critical temperature and reference data in literature of pure fluids were within about 1.6 °C, and pressure differences were less than 0.3 MPa. It is practically well coincide and it is possible to evaluate critical temperature and pressure of multicomponent geofluids by using spectroscopic measurement under hydrothermal conditions.

Intensity between about 940 and 960 nm of H₂O and of C₂H₅OH was always dark through entire temperature range in both cases of heating and cooling stages. Those absorptions in near-infrared region were corresponded to a combination of fundamental vibrations of -OH. It indicates that spectral measurement of multicomponent fluid will also lead to a further understanding of the fluid composition and the molecular structure.

キーワード: 臨界点, 超臨界流体, 分光計測

Keywords: critical point, supercritical fluid, spectroscopic measurement

超臨界 H₂O 流体に対する希土類元素 Ce の溶解度測定手法の開発

Development of solubility measurement technique of rare earth element (Ce) in supercritical aqueous fluids

阿部 健康^{1*}, 中村美千彦¹, 佐々木理², 小川泰正³, 山田亮一¹

Takeyasu Abe^{1*}, NAKAMURA, Michihiko¹, SASAKI, Osamu², OGAWA, Yasumasa³, YAMADA, Ryoichi¹

¹ 東北大学理学研究科地学専攻, ² 東北大学総合学術博物館, ³ 東北大学環境科学研究科

¹Tohoku University, Earth Science, ²Tohoku University, Museum, ³Tohoku University, Environmental Studies

沈み込み帯における元素の化学輸送を理解する上で、鉱物と平衡共存する超臨界 H₂O 流体の化学組成を測定することは重要である。従来、鉱物の溶解度測定には重量変化法が用いられてきた(例えば Manning, 1994)。出発物質として単結晶の鉱物を用いた溶解実験を行い、実験前後の重量変化を測定して溶解度を算出するこの手法は、ppm オーダーの測定精度にはまだ議論の余地がある(例えば Antignano and Manning, 2008)。そこで本研究では、その溶解度が新しい地質温度計に応用できるとして近年注目されている Ce (例えば Plank et al., 2009) を測定対象とし、ICP-MS を利用した二つの実験手法の開発を行った。

初めに、高温高圧下で H₂O 流体を石英中の流体包有物としてトラップし、合成した流体包有物を分析した。出発物質として人工的に微細な割れ目を入れた石英を用意し、CePO₄ の粉末状試薬及び蒸留水と共にカプセルに封入した。実験は、ピストンシリンダー型高圧発生装置を用いて行い、0.8-1.2 GPa, 700-900 degC で 6 時間-1 週間保持した。実験後、東北大学総合学術博物館の X 線 CT 装置を用いて石英を撮影し、三次元画像解析ソフト Slice を用いて流体包有物の体積を見積もった。その後、石英ごとフッ酸分解して試料溶液を用意し、東北大学環境科学研究科の ICP-MS を用いて分析を行った。

次に、ダブルカプセルを用いて CePO₄ に飽和した H₂O 流体をアウターカプセルにトラップし、実験後、カプセルに形成された急冷結晶を利用して溶解度を見積もった。インナーカプセルに CePO₄ の粉末状試薬、アウターカプセルに蒸留水を封入し、ピストンシリンダー型高圧発生装置を用いて 1.0 GPa, 800 degC で 24 時間保持した。回収したカプセル全体の重量変化を用いて H₂O の重量を決定した。その後、急冷結晶を硝酸洗浄して溶液試料を作成し、ICP-MS を用いて分析を行った。

流体包有物合成法により、石英に飽和した H₂O に対する Ce の溶解度を得ることができた。しかし、今回用いた分析手法では、包有物の体積分率が小さいため、検出限界は重量変化法よりも大きい。一方で溶質トラップ法によって得られたデータは先行研究 (Tropper et al., 2011) と調和的な結果を示している。また、この方法による検出限界を見積もると 0.1 ppm 程度であることがわかり、精度の高いデータが期待される。今後、溶解度に対する温度、圧力、塩濃度、珪酸塩濃度などの影響を調べていく予定である。

キーワード: 重量変化法, 流体包有物合成法, 溶質トラップ法

Keywords: weight loss method, synthetic fluid inclusion method, solute trap method

シリカ析出に伴うき裂間隙構造の変化と透水率変化

Evolution of aperture distribution and permeability change during fracture sealing by silica minerals

山田 稜^{1*}, 岡本 敦¹, 最首 花恵¹, 中村 美千彦², 奥村 聡², 佐々木 理³, 土屋 範芳¹

Ryo Yamada^{1*}, Atsushi Okamoto¹, Hanae Saishu¹, Michihiko Nakamura², Satoshi Okumura², Osamu Sasaki³, Noriyoshi Tsuchiya¹

¹ 東北大学大学院環境科学研究科, ² 東北大学大学院理学研究科, ³ 東北大学博物館

¹Touhoku University, ²Tohoku university, ³The Tohoku university museum

Fractures are dominant fluid pathways in the upper crusts. Ubiquitous occurrences of quartz veins suggest that precipitation of quartz provides significant effects on the hydrological and mechanical properties of crustal environments. For example, a model has been proposed that fracture sealing processes control the change of pore fluid pressure and thus earthquake cycle. Previous studies on quartz veins have focused on the P-T conditions, stress and strain fields and fluid compositions; however, details of dynamics of fluid flow and how fractures are sealed during vein formation are still unclear. In this study, we carried out the hydrothermal experiments to synthesis quartz veins, and observed the aperture structures by using X-ray CT. The purpose of this study is to clarify how aperture structures evolve by quartz precipitation in fractures and to understand the behavior of permeability evolution during vein formation.

We conducted the hydrothermal flow-through experiments for quartz precipitation from Si-supersaturated solutions at 430C and 30 MPa (supercritical region). The experimental apparatus consists of two vessels for preparation of the Si-supersaturated solution and for precipitation, respectively. The precipitation vessel has double-structure: the main flow path was the inner alumina tube, and the outer SUS tube was filled with static solutions connected with the flow path. A granite core (Westerly granite, diameter=3.6mm, length=50mm) with a slit of 300 micro-meter width was placed in the alumina tube. Inner and outer pressure of the inner tube was almost same (31MPa). Precipitation occurred preferentially within the alumina tube (mainly in the slit of granite), and alumina tube was broken when fracture was sealed and upstream fluid pressure was raised toward ~35 MPa. The fluid pressure was recorded by the second to calculate the change of the permeability during run. The advantage of this system is that we can take out the non-destructive sample. We observed the aperture sizes of fractures before and after of run by computer tomography.

The mineralogy and aperture structures changes systematically along the fluid flow path. Near the inlet of the precipitation vessel, only amorphous silica precipitated predominantly. From the inlet to 35mm of fracture, nucleation and growth of quartz predominantly occurred, regardless of vein wall minerals. In this region, precipitation of quartz occurred preferentially on top wall rather than bottom wall, indicating the effects of the gravity on the density fluctuation of supercritical water. From 35mm to outlet of fracture, silica precipitates occurred as epitaxial overgrowth from quartz crystal. The wavelength of aperture structures is controlled by distribution and grain size of quartz of the host granite. Accordingly, fractures are not sealed homogeneously, but complex 3D flow pathways are evolved during vein formation.

Keywords: Hydrothermal experiments, Quartz vein, aperture

四万十帯・室戸地域における流体包有物中のC-H-O流体分布 Distribution of C-H-O fluids deduced from fluid inclusions from the Shimanto belt in the Muroto area, SW Japan

武者 倫正^{1*}, 土屋 範芳¹, 岡本 敦¹

Michimasa Musha^{1*}, Noriyoshi Tsuchiya¹, Atsushi Okamoto¹

¹ 東北大学大学院環境科学研究科

¹Tohoku University

Geofluids have compositions in C-H-O system, mainly composed of H₂O, CO₂ and CH₄, and the compositional variation of fluids within the Earth's interior is of special importance for understanding the global carbon cycle. In this study, we characterized the C-H-O fluids in the ancient subduction zone, that were trapped in mineral veins as fluid inclusions within the accretionary complex, Shimanto belt, SW Japan. Although calcite-bearing veins commonly occur in the Shimanto belt, it is known that fluid inclusions were mainly composed of H₂O and CH₄; therefore it is unclear why calcite precipitated from the fluids in absence of CO₂.

The Muroto Peninsula belongs to the Tertiary (Paleogene and Neogene system) Shimanto belt, and it is mainly composed of sandstones, mudstones and conglomerates with small amount of basalt. The ages of accretion become younger toward the south, and maximal temperature evaluated from the vitrinite reflectance increased from north(214C) to south(278C) in this area (DiTullio, 1993). Mineral veins were mainly composed of quartz, with small amount of calcite. We collected the mineral veins from the 9 outcrops along the coast, W1 to W5 in the western side, and E1 to E4 from the eastern side from Paleogene system. Lewis (2000) reported the fluid inclusions of CH₄ and CO₂ mixture at the locality W5, but the regional distribution of CO₂ fluids is not clear.

The mole fraction of CH₄ and CO₂ gasses in the two-phase fluid inclusions in quartz veins and carbonic(one-phase) fluid inclusions in quartz and calcite were measured by the Laser Raman Spectroscopy (HoloLab, KAISER OPTICAL SYSTEMS Co.) with thin sections of veins. Homogenization temperatures of water-rich inclusions were measured by microthermometric techniques.

Two-phase fluid inclusions in the mineral veins in the Muroto area show the following features: (1) The gas phase of fluid inclusions are composed of pure CH₄, or CO₂-CH₄ mixture, with various XCO₂(=nCO₂/nCO₂+nCH₄) values ranging from 0 to 0.8. Fluid inclusions with pure CH₄ gas were found in the northern parts of the Muroto area (W1 - W4 and E1 - E3). (2) The average XCO₂ values increased toward south, and the most southern points W5 and E4 shows XCO₂ of 0.3~0.8. (3) The XCO₂ values are various within individual veins; fluids including CO₂ (XCO₂ > 0) were located only close to vein walls, whereas gas phase of fluid inclusions composed only CH₄ were located in the center of the vein. Even in a single quartz crystals in mineral vein, the XCO₂ values are scattered, 0.18~0.88.

One-phase carbonic fluid inclusions were composed of CH₄. Calcite veins also contain this type of CH₄ one-phase inclusion. Primary fluid inclusions were composed of CO₂ and CH₄ mixture as mentioned above, but gas phase of secondary inclusions were all composed of only CH₄ in the whole Muroto area. The average homogenization temperature of W1 and W5, are 216 C at W1, and 226 C at W5, respectively.

The increase of CO₂ gas with increasing temperature (W1 to W5) and occurrence of CO₂-bearing inclusions near vein wall imply that CO₂ fluids were generated by diagenetic processes of carboniferous materials in host rocks. We will discuss the timing and controlling factor to produce variation in C-H-O fluid inclusions both in regional and local scales.

Referances:DiTullio L., Laughland M. M., Byrne T., Thermal maturity and constraints on deformation from illite crystallinity and vitrinite reflectance in the shallow levels of an accretionary prism: Eocene-Oligocene Shimanto Belt, southwest Japan, Geological Society of America, special paper (1993), 273, 63-82

Lewis J. C., Byrne T. B., J.D.Pasteris, (2000) Early Tertiary fluid flow and pressure-temperature conditions in the Shimanto accretionary complex of south-west Japan: constraints from fluid inclusions, J. metamorphic Geol., 2000, 18, 319-333

キーワード: 流体包有物, 方解石, 付加体, 鉱物脈

Keywords: fluid inclusions, calcite, accretionary complex, mineral veins

Antigorite の水流体中での脱水分解反応における分解溶解のその場観察 In-situ observation of dehydration and incongruent dissolution of antigorite into aqueous fluids

西崎 遼^{1*}, 川本 竜彦¹

Ryo Nishizaki^{1*}, Tatsuhiko Kawamoto¹

¹ 京都大学大学院理学研究科

¹ Graduate School of Science, Kyoto univ

近年、スラブ内やマントルウェッジ中における蛇紋岩の脱水不安定が地震発生の原因になっていると考えられている (Yamasaki and Seno (2003 J. Geophys. Res.)). そこで我々は今回、蛇紋岩の脱水分解反応をバセット型外熱式ダイヤモンドアンビルセル (W.A.Bassett et al. 1993 Rev. Sci. Instrum.) を用いて直接その場観察することを試みた。

ダイヤモンドアンビルセル内に antigorite ($Mg_{51}Si_{36}O_{90}(OH)_{66}$) と水、気泡を入れ、温度を上昇させた。その際、温度を上昇させる前に forsterite がダイヤモンドアンビルセル内に存在しないことをラマン分光法で確認した。ラマンスペクトルに関しては、Enami(2006 岩石鉱物科学) を参照した。その後もラマン分光法で antigorite に変化がないか確認しながら実験を行った。

今回この実験によって antigorite が水の存在下で脱水分解反応をする際は、antigorite が一旦水に溶けてから、forsterite が析出してることが観察された。(550-600 , 0.2-0.7GPa) さらに析出した forsterite は1時間で約 30 μ m まで成長した。また本実験から考えられる安定領域は先行研究 (Evans et al.1976 Schweiz. Mineral. Petrogr. Mitt.) と矛盾しないものであった。

Takahashi et al.(2011 J. Geophys. Res.) は間隙水の存在下で antigorite の摩擦係数を測定し、antigorite の脱水分解反応によって、forsterite が生成することで硬くなり、滑りを引き起こすということを提案した。今回のその場観察実験からもこの説を支持する結果となった。また低圧域での antigorite の脱水分解反応で生成するはずの talc は観察できなかったの、今回わかった反応方法から、talc は水に溶けてしまったのだと考える。

キーワード: アンチゴライト, 脱水分解反応, その場観察, 高温高圧, 地震活動, 分解溶解

Keywords: antigorite, dehydration, in situ observation, high temperature and high pressure, seismicity, incongruent dissolution

X線その場観察を用いた高圧下における緑泥石の脱水分解反応 In situ X-ray diffraction analysis of the experimental dehydration of chlorite at high pressure

末次 秀規^{1*}, 井上 徹²
Hideki Suenami^{1*}, Toru Inoue²

¹ 愛媛大学大学院理工学研究, ² 愛媛大学地球ダイナミクス研究センター

¹ Graduate School of Science and Engineering, Ehime University, ² Geodynamics Research Center, Ehime University

1. Introduction

Water in hydrous minerals is transported to deep Earth by subducting slab, which dehydrate at certain pressure and temperature. Exist of deep Earth's water affect the physical properties of Earth's minerals such as melting point, viscosity, elastic velocity, and so on. Therefore it is important to study the effect of water for the subducting slab materials. Moreover determination of the stability region of hydrous minerals is important to understand the mechanism of transport of water.

Serpentine ($Mg_6Si_4O_{10}(OH)_8$) is major hydrous mineral in subducting slab. There are many experimental reports for serpentine under high pressure. The stability field has already determined by in situ X-ray diffraction experiments. Chlorite ($(Mg,Al)_6(Si,Al)_4O_{10}(OH)_8$) should be also an important hydrous mineral in the subducted slab, because Al is included in slab materials. However there are few experimental reports for chlorite under high pressure.

So in this study, the dehydration reactions of chlorite have been studied by time-resolved X-ray diffraction analysis under high pressure and temperature.

2. Experimental

Time-resolved dehydration experiments of chlorite were conducted by in situ X-ray diffraction using the high-pressure apparatus MAX80 at PF-AR, KEK. Natural chlorite was used as a starting material, and sealed by Au caps plus diamond sleeve. Temperature was measured by W-Re thermocouple, and pressure was calculated by equation of state of NaCl and Au. Experiments were conducted between 3 to 8 GPa and up to 900 deg C. Time-resolved X-ray diffraction was measured at intervals of 50 deg C with checking diffraction change. When dehydration occurred at each pressure, it kept a few hours, and quenched. The quenched sample was analyzed by scanning electron microscope.

3. Results and discussion

In all experiments, chlorite was quickly dehydrated to forsterite + pyrope + fluid within 1 hour. Dehydration boundaries of chlorite were determined at 3 to 8 GPa, with compared with the previous works. The boundary has negative P/T slope at 5 to 8 GPa. Chlorite was stable at ~ 800 deg C below 4 GPa. The dehydration boundary in the present study is consistent with previous phase equilibrium boundary by quench experiment. This means that, chlorite become to equilibrium state rapidly when slab cross the dehydration boundary.

The dehydration boundaries of chlorite and serpentine are compared. Pressure range of dehydration of chlorite is narrower than that of serpentine, which means that dehydration depth of chlorite does not change so much compared to serpentine by temperature profile of slab.

キーワード: 緑泥石, 脱水分解反応, 高圧相関係, X線その場観察

Keywords: Chlorite, Dehydration, High pressure phase relation, In situ X-ray diffraction

高間隙水圧下における蛇紋岩の弾性波速度 Elastic-wave velocity of serpentinites under high pore-fluid pressure

原田 裕也¹, 片山 郁夫^{1*}, 河野 義生²
Yuya Harada¹, Ikuo Katayama^{1*}, Yoshio Kono²

¹ 広島大学地球惑星システム学, ² カーネギー研究所

¹Department of Earth and Planetary Systems Science, Hiroshima University, ²Geophysical Laboratory, Carnegie Institution of Washington

蛇紋岩はかんらん岩に比べ著しく遅い弾性波速度や高いポアソン比を持つため、沈み込み帯でみられる地震波低速度層や高ポアソン比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プレート境界で報告されるポアソン比 0.31 は、蛇紋岩（アンチゴライト 0.28）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圧の効果を定量的に検証することを試みた。

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 10-200MPa、間隙水圧 10-100MPa、室温の条件で行った。試料は円柱状（直径 20mm、長さ 10mm）に整形し、端面は平面研削盤により 0.005mm 以内の精度で平行度を整えた。試料の上面には圧電素子を貼付したステンレスを配置し、下面には音響インピーダンスの低いテフロンを配置することにより、反射法を用いて弾性波を測定した。なお、弾性波のトリガーは 5V で入力し、サンプルの上面と下面で反射する波形の相互相関から travel-time を見積もり、弾性波速度を計算した。

間隙水圧をかけない無水の条件では、蛇紋岩の弾性波速度は封圧の増加に従い P 波 S 波とも上昇し、 V_p/V_s は若干減少した。これは封圧の増加に伴い、蛇紋岩中に潜在していた微小クラックが閉じたためと考えられる。水圧下での実験では、間隙水圧と封圧の差を一定にした場合、弾性波速度はほぼ変化せず、有効圧が成り立っていると考えられる。封圧一定のもと間隙水圧のみを変化させた場合、間隙水圧の増加に従い P 波 S 波とも遅くなり、 V_p/V_s は若干増加する。この結果は 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 は高くなるのに対し、無水の条件では V_p/V_s は低くなる。

今回の実験により、間隙水圧を上昇させると蛇紋岩の弾性波速度は遅くなり、ポアソン比は高くなることが分かったが、その変化幅は非常に小さい。間隙水圧を 10MPa から 100MPa に変化させた場合、ポアソン比は 0.278 から 0.281 に上昇し、その変化幅は 0.003 である。沈み込み帯でみられる高ポアソン比領域は 0.31 であることから、蛇紋岩に比べ約 0.03 のポアソン比の上昇が必要であるが、今回測定したような空隙率の低い蛇紋岩ではいくら間隙水圧を増加させてもそのような高ポアソン比を発生することは難しい。このことは、沈み込み帯でみられる高ポアソン比領域では、岩石が破壊することにより空隙率が上昇し、そのような空隙を流体が充填しポアソン比が異常に高くなっていると予想される。

キーワード: 弾性波速度, 間隙水圧, V_p/V_s , 蛇紋岩

Keywords: Elastic-wave velocity, pore-fluid pressure, V_p/V_s , serpentinite

ザクロ石-H₂O フリイド間の二面角と上部マントル深部での地震波低速度層 Dihedral angle of garnet-H₂O fluid in eclogite: Implication for low S-wave velocity regions at lowermost upper mantle

橋本 美華^{1*}, 松影 香子²Mika Hashimoto^{1*}, Kyoko N. Matsukage²¹ 愛媛大学理学部地球科学科, ² 愛媛大学地球深部ダイナミクス研究センター¹Department of Earth Sciences, Ehime University, ²Geodynamics Research Center, Ehime University

ウェッジマントルの深さ 300–400 km 付近の一部地域に S 波の低速度域が存在することから、H₂O 流体が鉱物粒界に存在する可能性が示唆されている [1]。これら H₂O 流体の地球内部でのふるまいを明らかにするため、マントル中における水の浸透性に焦点を当てた研究が行われている [3–5]。岩石中に存在する流体の浸透性は固-液間の界面エネルギーのつり合いによって決まる二面角（濡れ角）によって支配され、二面角が 60° 以下になるとごく少量の流体でも岩石中で連結し、移動するようになる。

かんらん石-H₂O 流体の系では、温度や圧力の増加にともなって二面角は小さくなり [3]、流体は岩石中にとどまることができない。一方でパイロープ-H₂O 流体の系では、二面角は圧力増加とともに大きくなることが報告されている [4]。本研究では、より複雑な化学組成を持つ、エクロジャイト組成のザクロ石と H₂O 流体の系で実験を行い、二面角の圧力依存性を調べた。そしてウェッジマントルでの H₂O 流体のふるまいについて考察した。

JB-2 (玄武岩) に H₂O が 3.5 wt% になるように Mg(OH)₂ を加えたものを出発物質とし、実験は、マルチアンビル型高圧発生装置 (ORANGE1000) を用いた。温度は 1000 °C で一定、圧力は 4–13 GPa、保持時間は 24 時間とした。二面角の測定には NIH の Scion Image を用い、FE-SEM で得られた画像をもとに見かけの二面角をランダムに 200 ヵ所測定し、中央値を真の二面角とした。鉱物化学組成分析は SEM-EDS を用いて行った。

低圧 (4–8 GPa) では、ザクロ石、輝石、コーサイト、ルチルが存在しており、高圧 (10–13 GPa) では、ザクロ石の組成がメジャーライト化し、輝石の量が減少していった。ルチルの代わりに FeTi 水酸化物が晶出した。また、8 GPa 以下では、試料カプセル内で高温側に H₂O 流体が分離しており、急冷物質も存在していた。さらにザクロ石の粒界の一部にも急冷物質が観察でき H₂O 流体相は連結ネットワークを形成していたと考えられる。この連結ネットワークは、輝石-輝石の粒界では見られず、輝石-H₂O 流体の系では二面角は 60° 以上である可能性が考えられる。一方、10 GPa 以上では、H₂O 流体は分離しておらず、流体相の連結ネットワークは見られなかった。しかし、微小領域を拡大して見ると鉱物粒界に粒径 1 μm 以下の急冷物質がみられ、鉱物粒界に H₂O 流体が存在していたといえる。また、急冷物質が多く観察されたことから、ここでいう H₂O 流体にはケイ酸塩成分が多く溶け込んでいる可能性がある。

ザクロ石の二面角は、圧力が高くなるにつれ大きくなり、10 GPa 付近で 60° 以上となり、さらに圧力が増加するにつれ 60° 以下へと変化していった。

二面角の圧力変化と鉱物組織の変化から、約 10 GPa (= 深さ~300 km) ではザクロ石の富んだ岩石は流体を粒界にトラップしようと考えられる。また、輝石を含むことによって、さらに二面角は大きくなり、濡れにくくなる可能性があることから、ザクロ石や輝石に富んだ岩石が上部マントル最下部に存在し、その鉱物粒界に少量の流体がトラップされれば、S 波速度の減衰、減少を引き起こしうると推定する。

キーワード: 二面角, H₂O 流体, 地震波低速度層, ザクロ石, マントルウェッジ, 連結性Keywords: Dihedral angle, H₂O-fluid, seismic low velocity zone, garnet, wedge mantle, connectivity

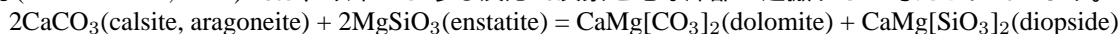
上部マントル条件下における $\text{MgCO}_3 + \text{SiO}_2 = \text{MgSiO}_3 + \text{CO}_2$ 反応境界の決定 Determination of the reaction boundary $\text{MgCO}_3 + \text{SiO}_2 = \text{MgSiO}_3 + \text{CO}_2$ in the upper mantle conditions

柿澤 翔^{1*}, 井上 徹², 山田 明寛², 末次 秀規³
Sho Kakizawa^{1*}, Toru Inoue², Akihiro Yamada², Hideki Suenami³

¹ 愛媛大学スーパーサイエンス特別コース地球惑星科学コース, ² 愛媛大学ジオダイナミクス研究センター, ³ 愛媛大学理工学研究科

¹Earth Planetary Science Course, Super Science Special Course, Ehime University, ²Geodynamics Research Center, Ehime University, ³Graduate School of Science and Engineering, Ehime University

スラブは層構造を形成しており、上部から海洋性堆積物, MORB, かんらん岩から構成されていると考えられている。最上部の海洋性堆積物は、炭酸塩鉱物を含んでおり、スラブが沈み込むことにより地球深部へ CO_2 を運搬していると考えられている。これは地球深部における炭素循環や CO_2 に関連しているマグマ発生などを考える上で重要である。先行研究 (Kushiro et al., 1975) では、以下のような反応で炭素を地球深部へ運搬すると考えられています。



この反応より地球深部で安定な炭酸塩鉱物は magnesite のみだと考えられる。magnesite 単相では核-マントル境界まで安定だと報告されている (Isshiki et al., 2004)。一方、ケイ酸塩鉱物との反応を考慮した脱 CO_2 に関する研究はあまり多くなく、正確に制約されているとは言い難い。本研究では、MORB に含まれる SiO_2 との反応 $\text{MgCO}_3 + \text{SiO}_2 = \text{MgSiO}_3 + \text{CO}_2$ を考え、その反応境界を決定した。そして、地球内部の地温勾配を考えることで、この反応の振る舞いを考察した。

高温高压実験は、愛媛大学における急冷回収実験と PF-AR(KEK) での高压 X 線回折実験を行った。実験装置は、それぞれマルチアンビル型高压発生装置 ORENGE-2000, MAX-80 を用いた。出発物質は天然の magnesite と quartz を 1:1 のモル比で混合したものを使用した。実験条件は、それぞれ 5, 7, 9 GPa, 1200-1800 と ~4.2, ~4.8, ~8.3 GPa, <1700 である。回収試料は、エネルギー分散型 X 線分析装置付き走査型電子顕微鏡 (SEM-EDS) で像観察および化学組成の分析を行い、微小部 X 線回折装置 (XRD) で相の同定を行った。結果は発表にて報告する。

キーワード: マグネサイト, 脱二酸化炭素反応, 炭素循環, 地球深部

Keywords: magnesite, decarbonation, carbon cycle, deep Earth

東北日本・鳴子地域における Geofluid Map Development of "Geofluid Map" in the Naruko district, NE Japan

星出 隆志^{1*}, 中村 美千彦¹

Takashi Hoshide^{1*}, Michihiko Nakamura¹

¹ 東北大学大学院理学研究科

¹Tohoku University

深部流体が地震やマグマの発生に重要な役割を果たしていると考えられるようになって久しいが、実際に島弧の地下でどのくらいの量の流体がどこに分布しているかについてはまだよくわかっていないというのが現状である。我々は日本列島地下深部での流体分布を表現した「Geofluid Map」作成に取り組んでいる。今回東北日本・鳴子地域について試みた Geofluid Map 作成の方法について概説する。

地下の岩相推定: まず、東北日本の地質図やマントル捕獲岩の研究から推定されている岩相断面図 (Takahashi, 1978 など) をレビューし、東北日本・鳴子地域周辺の地殻~上部マントルに存在する可能性の高い岩相を選定した。ここで選定された岩石種についてコンパイルした高温・高圧下での弾性波速度実験データ (Kern et al., 2002; Wang et al., 2005 など) を、 V_p -ポアソン比関係図にプロットした (地温勾配は田中ほか (1999) のデータを用いた)。東北日本の場合、 V_p -ポアソン比関係図にプロットされる岩石種は主に V_p の違いにより 3 つの岩石タイプに分けることができる (C1: 花崗岩類、C2: 斑れい岩・角閃岩類、M1: かんらん岩・輝岩類)。東北日本・鳴子地域で得られている最新の地震波トモグラフィデータ (東北大・岡田知己氏らの観測データ) を V_p -ポアソン比関係図上にプロットし、上で分けられたどの岩石タイプに分類されるかを読み取ることにより、(流体を含まないとした場合の) 鳴子地域における地下の岩相分布を推定した。

岩相を考慮した地質流体分布の推定: 電気伝導度観測データを用いた地下深部での流体量推定は、これまでも上嶋 (2005) や Mishina (2006) により試みられている。天然の岩石の実効電気伝導度は岩石種、含水量、間隙水のつながり方、間隙水の塩濃度によって決まるが、本研究では新たに地震波トモグラフィデータから推定された地下の岩相分布を考慮して、鳴子地域で観測された電気伝導度データ (東工大・小川氏による観測データ) から地下深部での流体量の推定を試みたので紹介したい。

レシーバ関数解析によって明らかにした九州地方の上部マントルにおける流体の分布

Water distribution in the upper mantle beneath Kyushu, Japan, as derived from receiver function analyses

安部 祐希^{1*}, 大倉敬宏¹, 平原和朗¹, 澁谷拓郎²

Yuki Abe^{1*}, Takahiro Ohkura¹, Kazuro Hirahara¹, Takuo Shibutani²

¹ 京都大学大学院理学研究科, ² 京都大学防災研究所

¹ Graduate School of Science, Kyoto Univ., ² DPRI, Kyoto University

九州地方は、フィリピン海 (PHS) スラブが沈み込んでおり火山活動の活発な地域である。九州地方の火山活動の特徴として、火山フロント上に阿蘇から霧島まで 110km にわたって火山のない非火山地域が存在することや、多様な化学組成の火山岩が分布することが挙げられる。このような火山の分布や火山岩の化学組成の成因を説明しマグマの生成過程を理解するためには、PHS スラブによってどのように流体が輸送されているのかを明らかにすることが重要である。

私たちは、九州地方に防災科学技術研究所が設置した Hi-net の観測点と、気象庁、九州大学、鹿児島大学、京都大学が設置した J-array の観測点の波形データをもとにレシーバ関数 (RF) を作成した。そして、傾斜する不連続面による地震波の屈折を考慮して RF をスタック (Abe et al., 2011, GJI) し、上部マントルの速度不連続面の検出および形状推定を行った。その結果、大陸モホ面、海洋モホ面および PHS スラブ上面に相当する速度不連続面を検出し、その形状を推定することができた。

九州地方の中部・南部では、海洋モホ面に相当する不連続面が 70-90km の深さまで検出され、その深さまで海洋地殻がスラブマントルに対して低速度であることがわかった。北部では、その不連続面が 50km より深部では検出されなかった。このことから、PHS スラブの海洋地殻は、九州地方の中部・南部では 70-90km の深さまで含水鉱物を含んでおり、北部では 50km よりも浅部で含水鉱物が脱水していると解釈できる。

大陸モホ面における速度コントラストから、直下のマントルの速度を推定したところ、九州地方中部では前弧側のマントルウェッジが非常に低速度 ($V_s=2.8-3.5\text{km/s}$) であることがわかった。S 波速度の値から、この低速度領域には蛇紋岩および間隙水が含まれていると考えられる。九州地方の南部と北部では、このような低速度領域は検出されなかった。九州地方北部では海洋地殻が浅部で脱水するため、多量の流体がマントルに持ち込まれないと考えられる。九州地方中部では海洋地殻から脱水した流体が前弧側へと移動し、蛇紋岩化領域や火山フロント上の非火山地域が形成され、九州地方南部では海洋地殻から脱水した流体が背弧側へと移動し、火山活動を引き起こしていると考えられる。九州地方中部の中でも南側の地域では低速度領域がマントルウェッジの先端付近に限られるが、北側の地域ではそれが火山フロント (阿蘇や九重) 付近まで広がっている。火山岩の化学分析の結果から、別府島原地溝沿いの火山には、スラブ起源流体の影響を受けた火山岩とそうでない火山岩が共存していることが示されている (Kita et al., 2001, JVGR; Miyoshi et al., 2008, JVGR)。マントルウェッジに広く分布する蛇紋岩とマントルの上昇流がそのような火山岩の化学組成の特徴を生み出している可能性がある。

キーワード: 九州, フィリピン海スラブ, レシーバ関数, 沈み込み帯, 流体輸送, 火山活動

Keywords: Kyushu, Philippine Sea slab, receiver function, subduction zone, water transportatio, volcanism

浅部ゆっくり地震に伴う地殻変動の検出可能性 Detectability of crustal change accompanied with shallower slow earthquakes

有吉 慶介^{1*}, 中田 令子¹, 松澤 暢², 堀 高峰¹, 日野 亮太², 長谷川 昭², 金田 義行¹

Keisuke Ariyoshi^{1*}, Ryoko Nakata¹, Toru Matsuzawa², Takane Hori¹, Ryota Hino², Akira Hasegawa², Yoshiyuki Kaneda¹

¹ 海洋研究開発機構 地震津波・防災研究プロジェクト, ² 東北大学大学院理学研究科附属地震・噴火予知研究観測センター
¹JAMSTEC, Earthquake and Tsunami Research Project for Disaster Prevention, ²RCPEV, Graduate School of Science, Tohoku University

陸上の稠密観測網の発展により, 西南日本では10年ほど前から約30kmの等深線に沿って, ゆっくり地震が発生していることが捉えられるようになった [e.g., Obara, 2002, Science]. さらに最近では, 海底観測によって海溝に近い浅部でも, ゆっくり地震が発生していることが確かめられている [Sugioka et al., 2012, Nature Geosci.]. この現象は, 東北地方太平洋沖地震の震源域付近を含む領域でも観測されており [松澤・他, 2012, 日本地震学会], 海溝型巨大地震震源域における固着の強さの分布を推定する [有吉・他, 2012, 日本地震学会] 上でも, 浅部ゆっくり地震を観測から確実に検出することは重要である.

そのような領域の一部である東南海沖において, 2011年8月に地震・津波観測監視システム [Dense Ocean-floor Network system for Earthquake and Tsunamis: DONET] が稼働を開始し, 現在に渡り順調に稼働している. このDONETの観測網は, 陸域の尾鷲から熊野灘沖合の海溝付近まで及び, 東南海地震震源域よりも浅部側を含む領域を網羅している. また, 深部ゆっくり地震については, 微動と同期した短期的スロースリップが傾斜計で観測されている [e.g., Hirose and Obara, 2006, GRL]. このため, 浅部ゆっくり地震の活動に伴う地殻変動についても同様に, そのすべり域の近傍にある海底圧力計によって検出されることが期待される. また, 日本海溝では, 東北地方太平洋沖地震が発生する前から間欠的に発生する浅部ゆっくりすべりを水圧計から捉えられた例もある [Ito et al., 2013, Tectonophys., in press]. そこで, 本研究では, その可能性について, 数値シミュレーションからの検証を試みた.

浅部ゆっくり地震のモデル化として, 有吉・他 [2012, 日本地震学会] では, 深部と同一の摩擦不安定性かつ有効法線応力も1割程度しか変わらない摩擦特性を想定した. その結果, 巨大地震震源域が固着している期間では, 固着の影響を強く受ける浅部が深部よりも低調な活動で, 移動現象が深部しかみられない特徴を説明することができた. 本研究では, このモデルを東南海地域で適用し, 浅部ゆっくり地震に伴う上下変動を見積もった.

その結果, 巨大地震発生直前になると, 浅部ゆっくり地震のモーメント解放のレートが大きくなるため, 上下変動の変化率が海底圧力計でも検知し得るほど増加する傾向がみられた. さらに, 浅部ゆっくり地震の活動自体も活発化してくることを考えると, 海底圧力計で検知できるイベントは, 巨大地震発生に近づくにつれて頻度が高くなることが予想される. 一方で, 巨大地震震源域が固着している期間では, たとえゆっくり地震が発生したとしても, その地殻変動の時間変化率は小さいため, 検知できない可能性がある.

以上のことから, 浅部ゆっくり地震について, 海底地震計と併せて海底圧力計を用いて監視することは, 海溝型巨大地震の発生過程を捉える上で重要なツールになると期待される.

キーワード: ゆっくり地震, 海底観測網, 圧力計, 海溝型巨大地震の数値シミュレーション, 沈み込み帯における流体の働き, 摩擦構成則

Keywords: slow earthquake, ocean-floor network observation, hydraulic pressure, megathrust earthquake cycle simulation, role of geofluid in subduction plate, friction law