

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¹Tatsuhiko Kawamoto^{1*}, yoshitaka kumagai¹¹ 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パ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 Università 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 Università 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²Seiya Fukumura^{1*}, Kazuaki Okamoto²¹ 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、海水によつ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つて脱水分解することによつ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¹Department 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. Acta.*, 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

¹ Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology, ² University of California at Santa Cruz, ³ Kobe University, ⁴ Indonesian 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 (ハルツバーグサイト) 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、東北日本の下のスラブでは、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