

島弧玄武岩マグマの含水量について：伊豆大島、三宅島、富士ならびに東北日本弧火山からの考察

On the Concentration of Water in Arc Basalts: case study in Izu Oshima, Miyakejima, Fuji and some perspectives

高橋 栄一^{1*}, 浜田 盛久¹, 潮田 雅司¹, 浅野 健太¹

TAKAHASHI, Eiichi^{1*}, HAMADA, Morihisa¹, USHIODA, Masashi¹, ASANO, Kenta¹

¹ 東京工業大学大学院理工学研究科地球惑星科学専攻

¹Magma Factory, Earth & Planetary Sciences, Tokyo Institute of Technology

Genesis, transportation mechanism and distribution of water in subduction system is very important to understand various geological phenomena in subduction zones. Origin of subduction zone magma is thought to be deeply connected with dehydration of subducting slabs. Because water degassed from magma prior to or during volcanic eruption, concentration of water in arc magma is not well constrained. In this study, we show evidences that basalt magma in volcanic front generally contains several weight percent of water. This is in contrast with previous view on lateral variation of water in Japanese Quaternary volcanoes (Sakuyama, 1979; Aoki et al, 1981). It also contradicts with estimated geographical variation of fluid components in Japanese Quaternary volcanoes by Nakamura et al.(2008) and Nakamura & Iwamori (2010).

Based on high-pressure melting experiments on primitive basalt of Izu-Oshima volcano, Hamada & Fujii (2007) concluded that presence of 3 to 6 wt% of water is necessary in order to explain very calcic (~An90) plagioclase phenocryst. Phase relation of primitive basalt from Ofunato stage of Miyakejima volcano has been studied experimentally (Ushioda et al, 2011) and it is found that about 3 wt% of water is necessary in order to explain its phenocryst assemblage (ol + pl) and the calcic plagioclase composition (An90-94). Moreover, Hamada et al. (2011) has established a new method to estimate pre-degassing water content of magma using hydrogen concentration in plagioclase phenocryst. Using this new technique, water content in main magma chamber of Izu-Oshima volcano prior to 1986 eruption was estimated to be ~5 wt%.

Presence of large amount of water in basalt magma is also supported from explosive volcanic eruption style of Fuji volcano (e.g. Hoei sub-plinian eruption of 1707). According to Machida (1977), amount of volcanic ash (tephra) from Fuji volcano may be equal or greater than its volcanic edifice. This indicates that the explosive eruption style of Fuji volcano continued through time and therefore high water content in its basalt magma is a continuous feature.

Basalt magma is less abundant in the volcanoes on Honshu Arc due to the extensive fractionation, magma mixing and crustal melting. Precise estimate of water content in their primitive basalt magma is therefore difficult. However, presence of very high modal amount of plagioclase phenocryst in basalt and basaltic andesite (usually 30~40 vol%), is a good indication of the presence of large amount of water in these mafic magmas. This is because, degassing of hydrous basalt at shallow magma chamber invariably accompanies crystallization of large amount of plagioclase (e.g., Hamada & Fujii, 2008).

We therefore propose that basalt magma in volcanic front of Izu Mariana Arc (e.g., Fuji, Izu-Oshima, Miyakejima) and those of North Honshu Arc are all wet, may be typically containing 5 wt% of water or even higher. This view strongly contradicts with previous works; 1) lateral variation of water content similar to potassium (Sakuyama, 1979; Aoki et al, 1981); 2) nearly anhydrous magma genesis model by Tatsumi et al.(1983) at the volcanic front, and 3) recent estimation of fluid component in magma based on systematics in Nd and Pb isotopes (e.g. Nakamura & Iwamori, 2010). Our model, however, is not inconsistent with a model proposed by Kimura et al.(2010). We will discuss origin of the discrepancy between our model and previous works. We will also emphasize the importance of the large water flux released by hydrous basalt magma at the volcanic front in considering circulation of water in subduction zone.

キーワード: マグマ, 含水量, 玄武岩, 島弧, 火山

Keywords: magma, water content, basalt, island arc, volcano

ボニナイト質メルト包有物から読む、沈み込み帯形成初期の流体の挙動 Volatile behaviors in an immature subduction zone inferred from boninitic melt inclusions

清水 健二^{1*}, 清水 ノブミチ²

SHIMIZU, Kenji^{1*}, SHIMIZU, Nobumichi²

¹ 海洋研究開発機構, ² ウッズホール海洋研究所

¹JAMSTEC, ²WHOI

Recent study suggests that boninites formed at the immature stage of subduction zone, whereas related arc tholeiites erupted 0-7 Ma after boninite formations (Ishizuka et al., 2011, EPSL, v306, p229-240). In order to constrain volatile behaviors of an immature subduction zone, we have analyzed major, volatile contents and sulfur isotopic ratios ($^{34}\text{S}/^{32}\text{S}$) of melt inclusions in Cr-spinel from fore-arc volcanic rocks in Bonin Islands and in Guam. All Cr-spinels are collected at volcanic sand beaches and purified for this study. Boninitic melt inclusions occur in Muko-jima, Chichi-jima and tholeiitic melt inclusions occur in Mukoo-jima and Guam. Cr-spinels in boninite are high in Cr# (mostly 80-90) and low in TiO₂ (< 0.1wt%), indicating highly depleted source. Whereas Cr-spinels in tholeiite vary in Cr# (45-80) and in TiO₂ (0.1-1 wt%). Compositions of melt inclusions fully cover compositional range of whole-rock. Some melt inclusions of boninites have MgO higher than 20 wt%, showing that they are very primitive magmas. H₂O and CO₂ contents of melt inclusions of Muko-jima boninite are high (up to 4 wt%) and low (< 50 ppm), respectively whereas those of Mukoo-jima tholeiite are lower (H₂O mostly ~1 wt%) and higher (CO₂ up to ~1000ppm). Except H₂O, volatiles of boninitic melt inclusions (F <20ppm; Cl <500ppm; S ~100ppm) are considerably lower than those in tholeiites (F up to 400ppm; Cl up to 3000ppm; S up to 3000ppm). High S content of tholeiitic melt inclusions may indicate high oxygen fugacity of the magmas. Sulfur isotope data of melt inclusions from boninites show the lightest value that reported from igneous rocks ($d^{34}\text{S}_{VCDT} = -5$ to -10), whereas those of tholeiites ($d^{34}\text{S}_{VCDT} = +2$ to $+5$) are comparable to reported arc tholeiite data. S source of tholeiite should be mixture of seawater-derived hydrothermal sulfites and mantle sulfide. Whereas S source of boninite can be seawater derived pyrite which precipitated in mantle, inorganically, because of reduced condition caused by water-mantle reaction. As source of boninite is hydrated hertzbergite, sulfur in the source before the hydration may be negligible. Therefore, all sulfur of boninite may be secondary origin. Assuming open system isotope fractionation, $d^{34}\text{S}_{VCDT}$ difference between seawater sulfate (20 permil) and pyrite (-5 to -10 permil) can be explained by pyrite precipitation at ~200°C, which is consistent temperature of serpentinization at subduction zone. Boninite may be formed by melting of this serpentinite at an immature stage. Further contaminations by fluid led higher oxygen fugacity at mantle wedge, forming arc tholeiites.

キーワード: ボニナイト, 島弧ソレライト, 硫黄同位体比, 揮発性成分, メルト包有物

Keywords: boninite, arc tholeiite, sulfur isotope, volatiles, melt inclusion

小笠原諸島の火山ガラスの酸化還元状態: Fe-K 端 XANES 微小領域分析による推定 The redox states of volcanic glasses from Bonin islands, Japan, estimated by Fe-K edge micro XANES study

石橋 秀巳^{1*}, 小竹 翔子², 金山 恭子³, 浜田 盛久⁴, 鍵 裕之⁵

ISHIBASHI, Hidemi^{1*}, ODAKE, Shoko², KANAYAMA, Kyoko³, HAMADA, Morihisa⁴, KAGI, Hiroyuki⁵

¹ 東京大学地震研究所, ² ハワイ大学ハワイ地球物理学研究所, ³ 金沢大学大学院自然科学研究科, ⁴ 東京工業大学地球惑星科学専攻, ⁵ 東京大学大学院理学系研究科

¹ERI, Univ. Tokyo, ²HIGP, Univ. Hawaii, ³Earth Sci., Kanazawa Univ., ⁴Department of Earth and Planetary Sciences, Tokyo Institute of Technology, ⁵Graduate School of Science, Univ. Tokyo

島弧マンツルの酸化還元状態は、地球化学的な興味の対象であるだけでなく、マンツルウェッジ内での物質循環やマグマ形成プロセスについて理解するうえでも重要な問題である。島弧マンツルは従来、主としてマンツルゼノリスの研究から、他のテクトニックセッティングに比べて酸化されていると考えられてきた (e.g., Parkinson and Arculus, 1998)。しかし、マンツルゼノリスによってもたらされる情報は冷たく堅いリソスフェアに関するものであり、マグマの発生する部分熔融領域の酸化還元状態は自明ではない。部分熔融領域の酸化還元状態に関する情報源として唯一期待できるのは、比較的未分化なマグマやメルト包有物である。近年、比較的未分化なマグマに関する研究から、島弧と中央海嶺でマンツルの酸化還元状態に大差ないとする説が提唱され (Lee et al., 2005; 2010) 従来説との間で論争中である。また、島弧マンツルを酸化させる原因として沈み込むスラブ由来の流体の関与が示唆されているもの (e.g., Brandon and Draper, 1996)、その詳細については未だよくわかっていない。そこで本研究では、島弧マンツル部分熔融領域の酸化還元状態およびスラブ由来流体の影響について検討するために、その成因において流体が強く関与した比較的未分化なマグマと考えられるボニナイト質マグマの酸化還元状態の測定を行った。

本研究で対象としたのは、小笠原諸島父島、弟島、賀島に産するボニナイト質の枕状溶岩・ハイアロクラスタイトに含まれる急冷ガラスである。また、比較のために、近隣の母島・姉島に産する玄武岩質ガラスについても分析を行った。これらのガラスは、伊豆-ボニン弧の形成初期 (約 48-44Ma) に噴出した比較的未分化なマグマに含まれている。また、水中で急冷されたために、噴出後の酸化の影響は小さいとみなせる。今回、マグマの酸化還元状態は、これらのガラス中に含まれる Fe の価数状態 (Fe^{3+}/Fe ; ここで Fe は Fe の総量) から Kress and Carmichael (1991) の方法によって推定した。ガラス中の Fe の価数状態は、放射光 X 線を用いた Fe-K 端マイクロ XANES (X 線吸収端近傍微細構造) スペクトル分析によって決定した。分析には、高エネルギー加速器研究機構 Photon Factory のビームライン 4A の装置を用いた。また、産総研の岩石標準試料 JA-1a、JA-2、JB2 を用いて、1250 °C、quartz-magnetite-fayalite (QMF) バッファーおよび Ni-NiO(NNO) バッファーの酸化還元条件で熔融・急冷ガラスを合成し、これらの XANES 分析もあわせて行った。XANES スペクトルの解析は、Cottrell et al. (2009) の方法に従って行い、 Fe^{2+} と Fe^{3+} それぞれの吸収に由来するピークの強度比から Fe^{3+}/Fe 値を見積もった。この方法を JA-1a、JA-2、JB-2 の合成ガラスに適用した結果、明瞭な組成依存性は見られず、 Fe^{3+}/Fe 値をおよそ ± 0.03 の標準偏差で再現した。これを $\log fO_2$ に換算すると、およそ ± 0.4 に相当する。

測定の結果、 Fe^{3+}/Fe 値として父島、弟島、賀島のボニナイトでそれぞれ約 0.21-0.23、0.23-0.24、0.17-0.24 の値を得た。一方、母島および姉島の玄武岩の Fe^{3+}/Fe 値はそれぞれ約 0.20、約 0.22 であり、ボニナイトの値とほぼ同等であった。これらの値はいずれも、MORB ガラスの平均的 Fe^{3+}/Fe 値である 0.16 よりも高く、MORB に比べて酸化的であったと考えられる。得られた Fe^{3+}/Fe 値は、マグマの酸素フュガシティー (fO_2) に換算すると、NNO バッファー程度に相当する。先行研究に従い、ガラスの酸素フュガシティーがマグマの起源マンツルの酸化還元状態を反映していると考えれば、今回の結果は、ボニナイトの起源マンツルの酸化還元状態が、噴出時代・地域の近い玄武岩のそれと同等であることを示している。このことは、ボニナイト形成に関わったスラブ由来流体が、マンツルの酸化にあまり影響を及ぼさなかった可能性を示唆している。また、小笠原諸島の火山ガラスが NNO バッファーの酸化還元状態を示したことから、島弧形成初期に既にこれらのマグマの起源マンツルは“島弧的”な性質を有していたと考えられ、Lee et al. (2005, 2010) の説とは反する。

キーワード: XANES, 酸素フュガシティー, 島弧マンツル, 火山ガラス, ボニナイト, 小笠原諸島

Keywords: XANES, Oxygen fugacity, arc mantle, volcanic glass, boninite, Bonin islands

高温高压条件下における水流体と花こう岩メルト間の鉛の分配：塩濃度と圧力の影響 In-situ determination of Pb partition between aqueous fluids and haplogranite melts under HTHP conditions

川本 竜彦^{1*}, 三部 賢治², Helene Bureau³, Solenn Reguer⁴, Cristian Mocuta⁴, Stefan Kubsky⁵, Dominique Thiaudiere⁴, 小野 重明⁶, 小木 曾 哲⁷

KAWAMOTO, Tatsuhiko^{1*}, MIBE, Kenji², Helene Bureau³, Solenn Reguer⁴, Cristian Mocuta⁴, Stefan Kubsky⁵, Dominique Thiaudiere⁴, ONO, Shigeaki⁶, KOGISO, Tetsu⁷

¹ 京都大学理学研究科地球熱学, ² 東京大学地震研究所, ³ IMPMC, Universite Paris VI et VII, ⁴ DiffAbs beamline, Synchrotron SOLEIL, ⁵ Surface Laboratory, Synchrotron SOLEIL, ⁶ 海洋研究開発機構, ⁷ 京都大学人間環境

¹ Inst. Geothermal Sci., Kyoto Univ., ² ERI, Univ. Tokyo, ³ IMPMC, Universite Paris VI et VII, ⁴ DiffAbs beamline, Synchrotron SOLEIL, ⁵ Surface Laboratory, Synchrotron SOLEIL, ⁶ IFREE, JAMSTEC, ⁷ Grad School Human & Environ. Kyoto Univ.

私たちは、マグマと水流体の間の微量成分元素の分配実験を行なっている。今回報告するのは、ダイヤモンドアンビルセル型高温高压発生装置を用いた放射光蛍光 X 線分析である。実験はフランスのパリ市の南郊外にある放射光施設ソレイユの DiffAbs ビームラインで行なった。実験で使用したメルトの組成は花こう岩 (haplogranite) と jadeite である。照射するエネルギーによって分析する元素は決まるが、今回報告するのは、鉛 (L 線)、ルビジウムとストロンチウム (いずれも K 線) である。出発物質にガラスを用いて、各ガラスに微量成分元素をドーブした。実験に使用する水流体には純水と高濃度の塩水を用いて塩濃度の効果を理解した。圧力範囲は 0.3-1.3 万気圧 (GPa) で温度範囲は (730-830) であった。

高温高压条件下においたダイヤモンドアンビルセル内で、メルトと水流体を共存させて、微小領域に単色光放射光 X 線を照射し、蛍光 X 線を採取した。その際、ダイヤモンドとダイヤモンドの間をメルトまたは流体が埋めていることを確認しながら実験を行なった。

結果は、(1) 各元素とも圧力の上昇にともない、分配係数 (流体 / メルト) は上昇する。また、(2) 塩濃度の増加にともない、分配係数 (流体 / メルト) は上昇する。従来、鉛の分配係数に与える塩濃度の効果に関して相反する結果が報告されていたが、圧力と塩濃度の効果を両方考慮することによって、塩濃度に対しては正の相関があることを確認した。ルビジウムとストロンチウムの実験結果は、これまでの急冷実験の一部と調和的であった。

Keppler(1996, Nature) が急冷実験によって提案した「スラブ流体は高塩濃度でなければ、鉛をマントルに付加できない」とする説を、その場観察実験によっても支持する結果を得た。純水では鉛を溶存させることは難しく、塩水、または、ケイ酸塩成分を多く含んだ超臨界流体によってのみスラブ中の鉛はマントルに付加されると考えている。

キーワード: マグマ, 水, 元素分配, 高温高压, 放射光蛍光 X 線, 鉛

Keywords: magma, aqueous fluid, elemental partition, high temperature and high pressure, synchrotron X-ray fluorescence, lead

H₂O-NaCl 流体の電気伝導度データベースの構築：分子動力学計算によるアプローチ

Development of a database of the electrical conductivity of H₂O-NaCl fluids: A molecular dynamics study

佐久間 博^{1*}, 市来 雅啓², 藤田 清士³, 河村 雄行⁴

SAKUMA, Hiroshi^{1*}, ICHIKI, Masahiro², FUJI-TA, Kiyoshi³, KAWAMURA, Katsuyuki⁴

¹ 東京工業大学大学院理工学研究科, ² 東北大学大学院理学研究科, ³ 大阪大学大学院工学研究科, ⁴ 岡山大学大学院環境学研究科

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

Introduction: Fluids in the earth's crust would have large effects on the occurrence of earthquake and volcanic eruptions. To delineate distribution of the fluids in the earth's crust is requisite to understand the effects of the fluids on the earthquake and volcanic activities. 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 the wide range of pressure (P), temperature (T), and electrolyte concentrations (c). The experimental approaches to measure the electrical conductivities of aqueous NaCl solution have been difficult at high P , T and c conditions and we can get only the data at $P < 4000$ bars, $T < 1100$ K and $c < 0.1$ m (mol/kg) [1]. Classical molecular dynamics (MD) simulations are useful to obtain the physical properties of fluids at high P , T and c conditions and to understand the underlying atomic-scale mechanism of the electrical conductivities. The phases of water and aqueous NaCl solutions at the P - T conditions of the Earth's crust are in liquid and supercritical states. The aims of this study are to make a reliable water model to simulate water in liquid and supercritical phases and to construct a database of electrical conductivity of aqueous NaCl solution at high temperature and pressure conditions.

Computational Methods: We have developed a flexible and polarizable water model based on our previous flexible model [2]. In our new model, the point charges are located on the hydrogen atoms and on the lone pairs of the oxygen atom. The point charges are fluctuated during the MD simulations. The MD simulations were performed using the code MXDORTO with some modifications.

Results and Discussion: Electrical conductivity of aqueous NaCl solution should depend on the density, viscosity, dielectric constant, and salt concentration (mol/kg) [1]. The density and salt concentration are the parameters of the number of ions per unit volume. In the atomic-scale view, the decrease of the viscosity corresponds to the increase of the ionic mobility. Since the viscosity sharply decreases with the increase of the temperature and shows no large dependence on P and T at $T > 600$ K, the density, salt concentration and dielectric constant are the most important parameters at $T > 600$ K. To construct a reliable water model for the supercritical phases, we should check the reproducibility of the physical properties compared with experimental results. Here we compared the structure, density, dielectric constants, and electrical conductivity of aqueous NaCl solutions in supercritical phases with some experiments. The radial distribution functions between atoms in the solution were good agreement with the experiments at 673 K and 3400 bar. The densities of 0.1 m NaCl solution and dielectric constants of water at $T = 573 \sim 973$ K and $P = 2000 \sim 5000$ bar were reasonable compared with the experiments. 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] Quist, A.S. and Marshall, W.L. (1968) JPC 72 684?703. [2] Kumagai, N., Kawamura, K. and Yokokawa, T. (1994) Mol. Simul. 12 177?186.

キーワード: 誘電率, イオンの会合, 分極モデル, 分子動力学

Keywords: dielectric constant, ion association, polarizable model, MD

日本列島におけるスラブ起源深部流体の分布 -内陸地震との関連について- Spatial distribution of slab-related fluid in Japan - Relation to inland earthquakes -

風早 康平^{1*}, 長谷川 昭², 高橋 正明¹, 尾山 洋一³, 高橋 浩¹, 岩森 光⁴, 松澤 暢², 切田 司¹

KAZAHAYA, Kohei^{1*}, HASEGAWA, Akira², TAKAHASHI, Masaaki¹, OYAMA, Yoichi³, TAKAHASHI, Hiroshi¹, IWAMORI, Hikaru⁴, MATSUZAWA, Toru², Tsukasa Kirita¹

¹産総研 地質情報研究部門, ²東北大学 地震・噴火予知研究観測センター, ³筑波大学生命環境科学研究科, ⁴東京工業大学大学院理工学研究科地球惑星科学専攻

¹Geological Survey of Japan, AIST, ²Research Center for Prediction of Earthquakes and Volcanic Eruptions, Tohoku Univ.,

³Graduate School of Life and Environmental Science, University of Tsukuba, ⁴Department of Earth and Planetary Sciences, Tokyo Institute of Technology

近年、流体が地震発生に関与している可能性が指摘されている。Hi-net 地震観測網等により、日本列島における微小地震～深部低周波 (DLF) 地震の震源分布等が正確に求められ、DLF 地震はその地震学的特徴からマグマではなく熱水流体の関与が指摘されている。本研究では、深部起源流体の分布と深さ 20-40km で生じる DLF 地震分布や深さ 20km より浅い内陸地震の分布と比較し、深部流体と地震の関係の意義について述べる。

全国で行っている深層地下水調査により DLF 地震の震源周辺に特徴的な深部流体が存在していることがわかった。その特徴は、1) 水の同位体組成はマグマ起源と同じ、2) NaCl-CO₂ 型の水質を持つ、3) Li/Cl 比が高い (重量比で 0.001 以上) などである。また、DLF 地震の近傍の有馬、五社、石仏等の近畿地方 6 カ所で河川調査により得られた自然湧出する有馬型熱水端成分の流量の合計は 8.5kg/sec である。文献値等を用いて算出された岩石学的に推定される西南日本におけるスラブ (フィリピン海プレート) の脱水量は島弧長 100km あたり 4-36kg/sec の範囲にある。現時点では、西南日本の一部地域でしかデータが得られていないが、推定値と湧出量観測値に矛盾はなく、この深部流体がスラブ起源であることを支持する。したがって、DLF 地震を引き起こしている流体は、地殻下部においてマグマが固化したときに放出される流体あるいはスラブから直接熱水流体として供給されたものである。一方で、DLF 地震が観測されていないにもかかわらず NaCl-CO₂ 型の温泉水がわき出している場所も存在する。これは熱水がもっと浅い地殻内に移動貯留され、さらに地表へ上昇している可能性がある。スラブ起源深部流体の分布域は深さ 10km より浅い微小地震の多い地域あるいは D90 が浅い地域とよく一致する。これは、深部流体の上昇が微小地震の発生を活性化する要因のひとつであることを示す。微小地震の多い地域が空間的な広がりを持つことは、深部流体の上昇域は点や線ではなく、ある程度の広がりを持つことを示唆している。流体の上昇には断層・構造線等に存在する亀裂などの水みちが必要であり、深部流体の上昇が微小地震活動を補助する、あるいは断層面の摩擦係数を下げる働きをしているのであろう。一方、最近の M7 以上の内陸大地震についても、DLF 地震活動のある場所、つまり深部流体活動がある場所で生じている (例: 神戸、岩手県内陸南部、鳥取県西部など)。また、深部流体の見られない空白地域が中国地方の一部、阿武隈地域に存在しており、同地域は地震活動も不活発である。つまり深部流体が存在していない場所では地震が起きていない。結論として、NaCl-CO₂ 型のスラブ起源深部流体は、日本列島下に局在しつつ広く分布し、内陸地震活動と密接に関連している。

キーワード: 深部流体, スラブ起源, 内陸地震, 深部低周波地震

Keywords: crustal fluid, slab-related, inland earthquake, deep low frequency event

温泉分析表を活用した地下水データベースとその解析 Groundwater database and its analysis utilizing the hot spring analysis table

杉本 雅明^{1*}, 田中 秀実¹

SUGIMOTO, Masaaki^{1*}, TANAKA, Hidemi¹

¹ 東京大学大学院理学系研究科地球惑星科学専攻田中研究室

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

我が国は沈み込み帯に位置しており、地震火山活動があってその発生機構と物質循環状況を明らかにすることは、自然災害の被害をできるだけ少なくすることに寄与する。また、沈み込み帯の物質循環において水の果たす役割が重要であることが分かっている。田中研究室では、2009年より温泉法第18条第1項に基づいた温泉分析表を各県庁、保健所の協力のもと独自に収集してきた。なぜなら、2009年度に全国で27,826件も存在する(環境省, 2011)温泉分析結果は、個人財産にも当たるため情報公開制度や情報提供などを受けたとしても生データの2次公開は困難であるためである。現在、田中研究室のデータベースには一部の地域が欠落した状態ではあるが、全国にわたって5998県の井戸データをGISに入力済みである。

上記のデータベースの紹介に加え、分析結果を発表する。今回特に注目したのがLi/Cl比とBr/Cl比である。富山平野と加賀平野は隣り合っているにも関わらず、それぞれの海岸線沿いに並ぶNa-Clを主成分とする温泉群のLi/Cl比と、Br/Cl比の特徴が綺麗に分かれることがわかった。他の地域も調べると、富山平野の温泉群のLi/Cl比及びBr/Cl比と同様の特徴を持つものが、有馬型深部塩水の関与があると考えられている温泉と重なることがわかった。

キーワード: 温泉, 地下水データベース, GIS, 有馬型, Br/Cl, Li/Cl

Keywords: Hot springs, Groundwater database, GIS, Arima-type deep brine, Br/Cl, Li/Cl

高压低温型变成堆積岩から発見された高 Li/B 流体包有物 Fluid inclusions with high Li/B ratio found from HP/LT type metasediments

吉田 健太^{1*}, 平島 崇男¹

YOSHIDA, Kenta^{1*}, HIRAJIMA, Takao¹

¹ 京都大学大学院理学研究科地球惑星科学専攻

¹ Graduate School of Sciences, Kyoto University

Recent studies invoked that the variation of peculiar fluid soluble light elements, such as Li, B and Cl, are capable of suggesting generation depths of fluid released in subduction zones (Scambelluri et al., 2004; Marschall et al., 2007). Crush-leached (CL) fluids extracted from quartz (Qz) veins intercalated with metabasites of the Sanbagawa metamorphic belt show high Li and B concentrations, whose Li/B ratios show a positive correlation with metamorphic grade of the host rocks, i.e., from 0.02 for pumpellyite-actinolite facies to 0.27 for eclogite facies (Sengen et al., 2009). Furthermore, CL fluids extracted from three samples of Qz veins (IR04, IR27 and IR28) intercalated with metasediments in proximal to the eclogite mass in the Besshi district show much higher Li/B ratio (0.36-1.99). Yoshida et al. (2011a) reported Li/B ratio of dehydrated fluids derived from tourmaline-free metasediments showing higher values than those expected from metabasites for the same grade, suggesting that Li/B ratio of dehydrated fluids was controlled by the rock types of host rocks.

To inspect other factors controlling Li/B ratio of dehydrated fluids, Qz fabric, microthermometry-Raman spectroscopy of fluid inclusions and hydrochemical facies of CL fluids were investigated for abovementioned three samples with high Li/B ratio.

Qz grains in the veins show foam microstructure with almost no intracrystalline deformation structures, suggesting that their fabrics are formed at high-T and low-differential stress conditions and that they have escaped from the later stage deformation during the exhumation stage of the metamorphic belt.

Each sample contains two or three kinds of fluid inclusion assemblage (FIA) indicating that they suffer multistage fluid activities in their P-T trajectory. IR04 has three kinds of FIA, FIA-04a, -04b and -04c. FIA-04a, composed of high saline aqueous fluid (7.0-8.7 mass% NaCl_{eq}) and CH₄ gas, are arranged at intragranular planes. Rare annular shaped fluid inclusions are observed within FIA-04a, suggesting that the host rock suffered compression after their entrapment. FIA-04b is arranged at intragranular planes, consisting of single/two phase inclusions of CH₄-CO₂-N₂-H₂ fluid. FIA-04c is two phase inclusions, composed of high saline aqueous fluid (8.7-9.5 mass% NaCl_{eq}) and CH₄-N₂ mixed gas. IR27 contains two kinds of FIA, FIA-27a and -27b, arranged at trans/intra granular planes, respectively. FIA-27a is composed of high saline aqueous fluid (5.7-10.5 mass% NaCl_{eq}) and CH₄-N₂ mixed gas. The occurrence of FIA-27b is restricted to the wall-adjacent Qz grains and their sizes are too small to determine the compositions, though part of them are considered to be aqueous fluid. IR28 has two kinds of FIA, FIA-28a and -28b. FIA-28a, arranged at intra/trans granular planes, is composed of CH₄-N₂ mixed gas and no water is detected. FIA-28b is characterized by the arrangement along intra/trans granular planes and composed of low-saline aqueous fluid (0.9-2.2 mass% NaCl_{eq}) and CH₄-N₂ mixed gas, showing irregular shapes with large size (up to ~40 micron).

CL fluid of IR28 shows dominance of HCO₃, which is known as the characteristics of pore fluid in near surface fracture of continental crust (Bucher and Stober, 2010), and is commonly observed in Qz veins showing strongly deformed fabric (Yoshida et al., 2011b). The low salinity of IR28 is also similar to that of later-stage veins (Okamoto et al., 2008), although the timing of entrapment of FIA-28a and 28b still remain unclear. However, textural observation shows FIA-04a was trapped during the prograde stage and FIA-04b, 04c, 27a, could have been trapped during peak stage or the early stage of the exhumation. CL fluids of IR04 and IR27 are dominant in Na-Cl type. These observations suggest that hydrochemical facies of deep fluids and texture and Qz veins are potential signposts looking for the pristine deep fluids.

キーワード: 流体包有物, Li/B 比, 沈み込み帯, 三波川帯, クラッシュリーチ法, エクロジヤイト

Keywords: fluid inclusion, Li/B ratio, subduction zone, Sanbagawa belt, Crush-Leach method, eclogite

熱水に含まれる Al と Na のシリカ鉱物析出に及ぼす影響 Effects of Al and Na on mineralogy of silica deposits from hydrothermal fluids

最首 花恵^{1*}, 岡本 敦¹, 土屋 範芳¹

SAISHU, Hanae^{1*}, OKAMOTO, Atsushi¹, TSUCHIYA, Noriyoshi¹

¹ 東北大学大学院環境科学研究科

¹Tohoku University

Silica is one of the most dominant components in the Earth's crust, and is characterized by high solubility with respect to water that is sensitive to temperature. An ubiquitous occurrences of the quartz vein in seismogenic depth of the subduction zones implies the importance of the quartz precipitation in fractures on earthquake cycle. However, the mechanism of quartz vein formation is still poorly understood. One of the difficulties is arisen by the fact that silica can precipitate from hydrothermal fluids as metastable polymorphs such as opals. Hydrothermal fluid contains various minor elements derived from the crustal rocks: and thus it is possible that kinetics of silica precipitation is affected by these minor elements. Our previous study (Okamoto et al., 2010) revealed that the mineralogy of silica from pure Si solutions are different from that from impure solutions including minor amounts of Al, Na and K derived from granite.

In this study, we conducted the hydrothermal flow-through experiments at 430 C and 31 MPa to investigate the effect of Al and Na on precipitation of silica minerals. We use a blank vessel for precipitation of silica minerals without rock/mineral substrates. The Si-supersaturated solutions (300-350 ppm, $C_{Si}/C_{Si,Qtz,eq} = 3-3.5$) were prepared by dissolution of quartz at 350 C, and the concentration of Al and Na in the input solution was systematically changed by dissolution of albite at different temperatures. The concentrations of Al and Na in the input solutions range from 0 to 7 ppm, and the atomic ratio of Al and Na were unity that is same as the stoichiometry of albite.

With increasing Al and Na concentration in the input solutions, the dominant silica mineral systematically changes from amorphous silica, cristobalite to quartz. The atomic ratio of difference of Al and Na between input and output solutions, dC_{Al}/dC_{Na} , was 1.06. The modal abundances of individual silica minerals were estimated from XRD spectra by using the internal reference addition method. With increasing Al concentration in the input solution, the modal abundance of amorphous silica monotonically decreases from 100 to 15 wt.%, whereas that of quartz increases from 0 to 82 wt.%. Cristobalite becomes dominant at the intermediate Al concentration (1-3 ppm) in the input solutions. In the experiments with low Al concentrations ($C_{Al} < 3.0$ ppm) in the input solution, the contents of Al₂O₃ and Na₂O of the products (amorphous silica and/or cristobalite) are less than 0.06 wt%, and no systematic relationship between Na and Al content. On the other hand, in the experiments with high Al solution ($C_{Al} > 3.0$ ppm), the products contains Al₂O₃ and Na₂O are contained up to 0.36 wt.% and 0.25 wt.%, respectively. These lines of evidences suggest that Al³⁺ coupled with Na⁺ substituted for Si⁴⁺ in quartz in our experiments.

Natural silica sinters, which form at shallow levels (< 1 km depth) of the crust, are composed mainly of opaline silica (amorphous silica and cristobalite) with lesser amounts of quartz. In contrast, the hydrothermal quartz veins do not contain the relic of other silica polymorphs, expect for chalcedony. Such contrasting mineralogy of silica deposits probably reflect the concentration of Al and Na in the solution. Because solubility and morphology of precipitates are quite different between quartz and amorphous silica, the minor amount of Al and Na in the hydrothermal fluids would affects the location and amount of silica deposits at the Earth's crust.

キーワード: シリカ鉱物析出反応, 石英, アルミニウム, ナトリウム, 熱水実験

Keywords: Precipitation of silica minerals, Quartz, Aluminum, Sodium, Hydrothermal experiment

水 岩石相互作用による方解石析出実験 Hydrothermal experiments on calcite precipitation via water-rock interaction

武者 倫正^{1*}, 土屋 範芳¹, 岡本 敦¹

MUSHA, Michimasa^{1*}, TSUCHIYA, Noriyoshi¹, OKAMOTO, Atsushi¹

¹ 東北大学・院・環境科学

¹ Grad. school of Environmental Studies, Tohoku Univ.

Calcite veins are very common within crusts and accretionary prisms. For example, calcite + quartz veins occur ubiquitously in the Shimanto belt. The solubility of calcite decreased with temperature, that is the opposite trend of quartz; and thus how calcite precipitated in the conditions that quartz also occurs is puzzling. Also, the fluid inclusions in the Shimanto veins are composed of CH₄, with exception of CO₂-dominant inclusions found in the southern parts of the Muroto Peninsula, that belongs to the Tertiary Shimanto belt (Lewis, 2000). In spite of its importance, the experimental studies on the calcite precipitation are very limited. Most experiments are carried out under near room temperature and controlled by pH change or synthetic CO₂ saturated fluids (Lee & Morse, 1999), that are far from natural conditions of calcite-vein formation. To best of our knowledge, there are no experimental studies on calcite precipitation under hydrothermal conditions (>100°C).

The purpose of this study is to understand the controlling factors on calcite precipitation under conditions of calcite-vein formation (fluid compositions, P-T conditions, host rock types). The solubility of calcite increases with decreasing temperature or pH, with increasing fluid pressures, and with increasing concentration of NaCl (Ellis, 1963). What is the most controlling factor that enhances the calcite-vein formation at the conditions of the Shimanto belt is unknown. We conducted two types of hydrothermal flow-through experiments for calcite precipitation by (1) temperature change and (2) water-rock interaction at constant P-T. In both experiments, the P-T condition for calcite precipitation is 300 °C and 30 MPa.

In the first experiments, the supersaturated solutions were prepared by dissolution of limestone sand (1-2 mm in size) in the distilled water at 100 °C. In the precipitation vessel, seven limestone substrates (5x5x15 mm) were set along the flow-path. The limestone is composed of fine grained aggregate of calcite (<0.03 mm). The temperature of the precipitation vessel was set to be 300 °C. The fluid flow rate was 2.5 ml/min. After the run of 240 h (10 days), the total increase of weight of limestone substrates was 0.051 g. Observations by SEM and by optical microscope reveal that epitaxial growth calcite from substrate crystals with size of 0.02-0.03 mm.

In the second experiment, we used NaHCO₃ solution (pH 8.4) as input solution. In the preparing vessel, sands of sandstone, mudstone or basalt from the Shimanto belt were set to dissolve Ca and other cations. In the second vessel, four limestone substrates as the same size as the first experiment. The measured fluid flow rate was 2.59 ml/min. After the run of 240 h, the total increase of weight of substrates was 0.037 g. Observation of the surface of the substrates by SEM and EDS reveal that calcite crystals with size of 0.01 mm precipitated together with clay minerals and apatite.

Our results suggest that calcite veins could be formed at high temperature around 300 °C, in higher pH fluids, if fluids saturated with calcite by Ca from host rocks and CO₂- in the crustal fluids. The possibility of the formation of quartz and calcite vein is also suggested from the precipitation of silicate and calcite from natural rock samples at the same temperature. The source of Ca and CO₂- would be the host sedimentary or basaltic rocks in the Shimanto belt.

References: Lewis J. C., Byrne T. B., J.D.Pasteris, (2000), *J. metamorphic Geol.*, 2000, 18, 319-333

Y. J. Lee, J. W. Morse, (1999), *Chemical Geology*, 156 (1999), 151-170

A. J. Ellis, (1963), *American Journal of Science*, 261, 1963, 259-267

キーワード: 方解石析出, 地殻流体, CO₂ 地中貯留, 四万十帯

Keywords: calcite precipitation, crustal fluid, CO₂ storage, Shimanto belt

地球の熱史と海洋の進化

Thermal history of Earth and the evolution of oceans

是永 淳^{1*}

KORENAGA, Jun^{1*}

¹ イェール大学

¹ Yale University

Our understanding of the thermal budget of Earth and its long-term evolution has been considerably improved in the last several years, owing to an unusual confluence of new theoretical developments and multi-disciplinary observations. In this contribution, I will present the latest summary on the thermal history of Earth during the last 4 billion years and discuss how it may be exploited to better understand the global water cycle and the evolution of oceans. To be consistent with the thermal evolution of Earth, the Archean oceans may have been twice as voluminous as the present-day oceans, and Earth's mantle is suggested to have been gradually hydrated by subduction. Net water exchange between the surface reservoir and the deep interior is likely to be essential for the stable operation of plate tectonics over Earth's history.

太平洋プレート内の深さ 155km で発生する地震クラスター：エクロジャイトへの相転移と応力擾乱

A seismic cluster at 155 km depth beneath Niigata: Implications for phase transformation from gabbro to eclogite

中島 淳一^{1*}, 内田 直希¹, Bradley Hacker², 長谷川 昭¹
NAKAJIMA, Junichi^{1*}, UCHIDA, Naoki¹, Bradley Hacker², HASEGAWA, Akira¹

¹ 東北大学大学院理学研究科地震・噴火予知研究観測センター, ²University of California, Santa Barbara

¹Graduate School of Science, Tohoku University, ²University of California, Santa Barbara

Intermediate-depth earthquakes occur at depths of 60-300 km, forming the double Wadati-Benioff zone in subduction zones as a global prevalence (Brudzinski et al., 2007). Because of high pressures that prohibit brittle failure at such depths, the genesis of intermediate-depth earthquakes has been discussed in terms of dehydration embrittlement (Seno and Yamanaka, 1996; Peacock, 2001; Jung et al., 2004) or periodic shear heating (Kelemen and Hirth, 2007).

We find a tiny seismic cluster in the lower crust of the Pacific plate at a depth of 155 km and analyze it based on waveform similarity. The cluster consists of sub-clusters with similar waveforms, and earthquakes in each cluster lie on single fault plane with complementary rupture areas. This result suggests that earthquake occur as a reactivation of pre-existing hydrated faults. We also reveal that in the cluster, tensional faulting occurs closer to the top of the slab and compressional faulting is dominant away from the slab surface. Since regional stress around the cluster is compression, we interpret that shallow tensional faulting occurs as a result of a stretching deformation in the transformed crust underlain by untransformed crust. Our observations may reflect ongoing gabbro-eclogite transformation at a pressure of ~5 GPa.

キーワード: 稍深発地震, 脱水, エクロジャイト, 弱面

Keywords: intermediate-depth earthquake, dehydration, weak fault

島弧深部における角閃石に富む岩石の存在検証とその意義：九州北部，志賀島の例 Insight into Amphibole-rich mafic-ultramafic rocks beneath island arc: an example from Shikano-shima, Kyusyu, Japan

森下 知晃^{1*}, ていえぼろ まっしも², らんごーね あんとにお², 柚原 雅樹³
MORISHITA, Tomoaki^{1*}, Massimo Tiepolo², Antonio Langone², YUHARA, Masaki³

¹ 金沢大学, ²CNR-パビア, ³ 福岡大学

¹Kanazawa Univ., ²CNR-Pavia, ³Fukuoka Univ.

島弧マグマ形成における角閃石野影響については十分に理解されてないが、地殻深部に角閃石が多く結晶化しているという考えも提案されている (Davidson et al., *Geology*, 2007)。しかし、その物証は乏しい。日本の領家帯相当花崗岩類に伴って、しばしば角閃石に富む苦鉄質岩類や超苦鉄質岩類 (コートランドイト) が産することが報告されている (Kamei et al., *Lithos*, 2004; 柚原・加々美, 福岡大学理学集報, 2007)。九州北部の志賀島には白亜紀の年代を示す花崗岩質岩石が分布し、角閃石に富む苦鉄岩類を伴う (柚原・宇藤, 地質学雑誌, 2007)。そこで、この角閃石に富む苦鉄質岩類に着目し、記載岩石学的特徴、鉱物科学組成、ジルコンの U-Pb 年代をもとにその成因と意義について検討した。角閃石は明瞭な光学的・化学的累帯構造を示し、それぞれに関与したメルトの組成は異なると考えられる。ジルコン年代は 100Ma と 120Ma の二つのピークを示す。これらのことから、本地域深部には、大陸弧マグマ組成と共存可能な角閃石に富む超塩基性岩類が存在し、それらが、高マグネシウム安山岩組成のメルトに捕獲されて混合した岩石である可能性が指摘される。また、このような岩石類は世界の造山帯から報告されており (Tiepolo et al., *Contrib. Mineral. Petrol.*, 2002; Kemp, *Lithos*, 2004; Tiepolo & Tribuzio, *Jour. Petrol.*, 2008)、このようなプロセスは造山帯地下深部で一般的に起きているプロセスである可能性が高い。

キーワード: 流体, 角閃石, 島弧

Keywords: fluid, amphibole, Island Arc

剪断変形中における蛇紋岩の電気伝導度その場測定

In-situ electrical conductivity measurement of serpentinite during shear deformation

川野 誠矢^{1*}, 芳野 極², 片山 郁夫¹

KAWANO, Seiya^{1*}, YOSHINO, Takashi², KATAYAMA, Ikuo¹

¹ 広島大学大学院地球惑星システム学専攻, ² 岡山大学地球物質科学研究センター

¹Department of Earth and Planetary Systems Science, Hiroshima University, ²Institute for Study of the Earth's Interior, Okayama University

沈み込み帯では沈み込むプレート上部のマントルウェッジに高電気伝導度異常の存在が報告されている (Yamaguchi et al., 2009)。沈み込む海洋プレートは沈み込みによる温度、圧力の上昇によって水を吐き出しカンラン岩と反応して蛇紋岩と少量のマグネタイトを形成する。蛇紋岩は高電気伝導度を呈するため、電気伝導度異常の候補としてあげられるが、沈み込み帯の高伝導度異常を説明するには蛇紋岩の存在だけでは不十分なことが知られている。しかしながら、蛇紋岩中に含まれるマグネタイトは伝導体であり、蛇紋岩化に伴って生じたマグネタイトが連結して存在すれば、沈み込み帯において報告されている高電気伝導度の値は十分説明可能である。先行研究では、マグネタイトの連結は局所的なものであり、数-数十 km スケールの高伝導度異常を説明することは難しいと考えられていた。(渡辺, 2005)。しかし、沈み込むプレート上部の蛇紋岩はプレートの沈み込みによる剪断変形を受け、面構造が著しく発達しているために偏在性に関係なくマグネタイトが定向配列し、剪断方向に高伝導度を呈している可能性がある。本研究では、変形中の電気伝導度測定セルを設計し、マグネタイトの定向配列が電気伝導度に与える影響を調べ沈み込み帯での高電気伝導度異常の成因を議論する。

出発物質には、蛇紋石とマグネタイトのパウダーを 1GPa、500 °C で焼結し用いた。実験では、マグネタイトの量比を変えて、焼結蛇紋岩を数種類作り、マグネタイトの効果を評価した。蛇紋石は中国で採取されたもの、マグネタイトは天然多結晶のものを用い、パウダーの粒径は 40 μm 以下であった。電気伝導度測定は沈み込み帯の高伝導度領域である 500-750 K、1GPa の条件、周波数帯は 10⁻¹-10⁶で行った。焼結したサンプルは 2-3mm の長さ、断面積が 0.8mm²(2mm × 0.4mm) に切り出し、単純剪断方向 (45 °) に切られたアルミナピストンに挟んだ。サンプル両端には電気伝導度測定のための Ni 電極を配置した。変形実験において、歪み量を 200 μm/h に設定し 8 時間変形させ、変形中での電気伝導度その場測定を 15 分ごとに行った。

蛇紋岩の電気伝導度は温度上昇に従って上昇し、温度下降によって減少した。マグネタイトの量比により系統的な違いが見られ、マグネタイトの量比が 20% 以下のものは蛇紋石と同様の活性化エネルギー、25% 以上のものはマグネタイトに近い活性化エネルギーを示した。750 K において蛇紋石の電気伝導度は先行研究と一致したが、マグネタイトには少量のケイ酸カルシウムが含まれており先行研究よりわずかに低い電気伝導度を示した。マグネタイトと蛇紋石の電気伝導度差は 7 桁に達した。

変形中の電気伝導度その場観察では、変形による電気伝導度の上昇が確認されたが、変形前と変形後の活性化エネルギーに変化は確認されなかった。このことは変形中に伝導メカニズムの変化が無かったことを示し、変形に寄って伝導度を支配する鉱物が変わらなかったことを示す。変形による電気伝導度の上昇は 2 つの要因に分けられる。一つは、変形によるマグネタイトの定向配列で蛇紋石を伝導する総距離が短くなること。もう一つはマグネタイトが繋がった状態でつながりが良くなり、マグネタイトを伝導する総断面積が大きくなる効果である。

上記の結果から、マグネタイトが少量の場合、変形によりマグネタイトが連結し伝導度を著しく上げることは難しく、沈み込み帯における高電気伝導度異常を説明するには大量 (約 20%) のマグネタイトを含んだ蛇紋岩が必要であることを示した。しかし、一般に蛇紋岩に含まれるマグネタイトの量比は 5% 以下であるため、変形によるマグネタイトの配列が沈み込み帯の高伝導度異常を説明することは難しく、他の要因が必要となる。その候補としてあげられるのは塩濃度の高い流体の存在である。沈み込み帯での高電気伝導度を説明するために必要な水は海水塩濃度で 0.5-10% と計算される。そのような水は、沈み込み帯の面構造が発達した蛇紋岩の浸透率異方性により供給されるのだろう。

キーワード: 電気伝導度, 蛇紋岩, 沈み込み帯, その場測定, 磁鉄鉱

Keywords: Electrical conductivity, Serpentinite, Subduction zone, in-situ measurement, Magnetite

蛇紋岩の地震波速度-アンチゴライト粒子形状の影響 Seismic velocities of serpentinites - Influence of geometry of antigorite grains

渡辺 了^{1*}, 白杉 勇人¹, 道林 克禎²

WATANABE, Tohru^{1*}, SHIRASUGI, Yuto¹, MICHIBAYASHI, Katsuyoshi²

¹ 富山大学, ² 静岡大学

¹University of Toyama, ²Shizuoka University

Serpentinites play key roles in subduction zone processes including transportation of water, seismogenesis, slab-mantle coupling, and exhumation of high-pressure rocks. Geophysical mapping of serpentinitized regions leads to further understanding of these processes. Direct study of serpentinites is critical to the interpretation of indirect geophysical observations.

Determination of elastic constants of antigorite (Bezacier et al., 2010) has enabled us to calculate Voigt and Reuss bounds of seismic velocity in serpentinites. There is, however, considerable difference between two bounds due to strong elastic anisotropy of antigorite. Seismic velocity in serpentinites cannot be properly constrained by these bounds that consider mineral composition and orientation of crystal grains. Geometry of antigorite grains (thin plate), which is not considered in Voigt and Reuss bounds, should be taken into account for a better constraint (Watanabe et al., 2011).

We calculated seismic velocity in serpentinites by using a differential effective medium method (DEM). An antigorite grain is treated as a spheroidal inclusion, and embedded in a homogeneous matrix. Strain in the matrix are disturbed by introducing an inclusion, and evaluated by Eshelby's method. Elastic constants of the composite material can be calculated by differentiating the elastic energy with respect to strain. Nishizawa and Yoshino (2001) calculated seismic velocity in mica-rich rocks by embedding spheroidal inclusions with an identical orientation in an isotropic matrix. We modified their method and applied it to the case where spheroidal inclusions with different orientations are embedded in an anisotropic matrix.

Decreasing aspect ratio of an spheroidal inclusion, seismic velocity in serpentinites decreases and approaches to Reuss bound. When spheroidal inclusions are aligned, seismic anisotropy is enhanced with smaller aspect ratio. Seismic velocity calculated by using orientations of crystal grains reasonably reproduces that measured in laboratory. The velocity calculation considering the geometry of antigorite grains is promising for a good prediction of seismic velocity in serpentinites.

キーワード: 地震波速度, 蛇紋岩, 蛇紋石, アンチゴライト, 水, 沈み込み

Keywords: seismic velocity, serpentinite, serpentine, antigorite, water, subduction

微小地震に基づく流体移動の評価法と地熱開発への応用

Microseismic-based detection of fluid flow in deep seated rock and its application to geothermal development

伊藤 高敏^{1*}

ITO, Takatoshi^{1*}

¹ 東北大学流体科学研究所

¹Institute of Fluid Science, Tohoku Univ.

深部にある地下岩体中の流体は、既存のき裂を主な流路として移動していると考えられている。したがって、流体移動を把握する一つの方法は、既存き裂の構造と連結性を把握することである。しかしながら、問題のき裂は、大きさも方向も一様ではなく複雑に分布しており、かつ、面としての広がりこそ数十から数百メートルという比較的大きな規模であるとしても、その厚みは高々数ミリメートルに過ぎない極めて薄い構造体である。そのように特異な構造のき裂とその内部の流れを、可視光はむろんのこと電波も通さない、数千メートル厚の岩体を隔てた地表から直接的に評価できる方法はない。

一方、既存のき裂内部の流動抵抗を減少させる、あるいは流路を人工的に作成する技術として水圧破砕法があり、石油開発のみならず、地熱開発の分野でも広く用いられている。また、水圧破砕を実施すると、それに伴って多くの微小地震の発生することが知られており、それらは注水によってき裂内の間隙水圧が上昇し、き裂面の間の摩擦力が低下してき裂の面同士がすべることによって起こると考えられている。このことは、微小地震の震源には滑りを起こしたき裂があり、さらに、その位置まで注水井の圧力が何らかの経路をたどって伝播したことを意味している。したがって、微小地震の震源位置として、注水井から圧力の伝播した位置がわかることになる。この原理によってき裂構造を評価するのが、従来型のいわゆる AE 法であり、現状では坑井から離れた位置のき裂情報を取得できる最も優れた方法である。しかしながら、原因はともかくとして微小地震は通常、時間的にも空間的にも不規則に分散して発生するため、その発生時刻と震源位置の情報だけからでは、どの震源位置を経由して流体が移動したのかを追跡することは難しく、仮に震源の並びからき裂面を推定できたにせよ、その内部の流れに関する情報を得ることは不可能である。この課題を解決すべく、我々は貯留層内の流れの情報を得るための微小地震の解析方法を提案した(長田ら, 2005, 伊藤ら, 2008)。この方法では、まず微小地震はクーロンの破壊基準に従ってき裂がすべることによって発生するという仮定により、観測された全ての微小地震に対して、その震源位置と微小地震発生時刻の間隙水圧を評価する。ただし、そのようにして得られた水圧の分布は、時間的にも空間的にも分散したものとなるため、そのままでは流れを評価できる情報にはならない。そこで、評価対象領域を適当な大きさの検査領域(ブロック)に分割し、ある時刻 t までにブロック内で起きた微小地震から求められる間隙水圧を比較し、その中で過去最大の値を同ブロックの位置と同時刻における水圧を表す代表値として抽出する。この規則を全てのブロックに適用した結果を、き裂ネットワークに沿う流体移動によって生じた、時刻 t の水圧分布とする。同様な手順によって水圧分布の時間変化を求めることができる。次に、貯留層内の流路構造を表す適当なモデルを基に水圧分布を求め、これが微小地震から求めた水圧分布とその時間変化と整合するようにモデルを最適化する。そして、その最適化されたモデルとして、貯留層内の流路構造を評価する。この方法を、次世代型地熱発電システムの構築を目指して開発が進められているオーストラリアのクーパー・ベイズン地区において 2003 年に実施された水圧破砕時の微小地震に適用した。これにより、水圧破砕井の西側に NNW-SSE に伸びる低浸透性領域があること、また、対する東側には高浸透性の領域が広がっていることがわかった。さらに、水圧破砕時における貯留層内の流体移動を評価したところ、水圧破砕井から NE 方向に卓越した流れが生じていることがわかり、このことは、その後実施された水圧破砕によって起きた微小地震の広がり調和的であった。

参考文献

1. 長田和義, 伊藤高敏, 林 一夫, Roy Baria, 微小地震情報に基づく水圧破砕時の貯留層における圧力伝播挙動の解析, 日本地熱学会誌 (2005), 27 (3), 211-222.

2. 伊藤高敏, 長田和義, 林 一夫, Roy Baria, 微小地震情報から求めた間隙水圧分布に基づく貯留層内の流路構造評価, 日本地熱学会誌 (2008), 30 (1), 49-61.

キーワード: 流体移動, 微小地震, クーロン則, 逆問題, 水圧破砕, 地熱開発

Keywords: Fluid flow, Microseismicity, Coulomb criteria, Inverse problem, Hydraulic fracturing, Geothermal development

チリ・アタカマ断層系カレタコロソ断層中軸部の熱水変質 Hydrothermal alteration in the Caleta Coloso fault core zone of the Atacama Fault System, Chile

藤田 一菜¹, Rodrigo Gomila², Jose Cembrano², 星野 健一^{1*}
FUJITA, Kazuna¹, Rodrigo Gomila², Jose Cembrano², HOSHINO, Kenichi^{1*}

¹ 広島大学大学院理学研究科, ²Dept. Struct. Geotech. Eng., Pontificia Univ. Catolica de Chile

¹Grad. Sch. Sci., Hiroshima Univ., ²Dept. Struct. Geotech. Eng., Pontificia Univ. Catolica de Chile

The Atacama Fault System (AFS) is a trench-parallel large-scale structure developed within mesozoic rocks of the present-day Coastal Cordillera in northern Chile (Cembrano et al., 2005). Its well-documented left-lateral activity has been interpreted as the result of the SE-ward oblique subduction of the Aluk (Phoenix) oceanic plate between 190 and 110 Ma (e.g., Schuber and Gonzalez, 1999). Recent activity of the AFS has been documented mainly as extensional and interpreted as a reactivation of the system in response to mega-thrust earthquakes (e.g., Gonzalez et al., 2006).

The Caleta Coloso Fault of the AFS is represented as a N-S to NNW-SSE west-ward concave-shape sinistral strike-slip fault showing a left-lateral displacement of about 3 km and a subvertical dip (Cembrano et al., 2005). The fault cuts through crystalline rocks of predominantly granodioritic composition (Gonzalez and Niemeyer, 2005) and its fault core currently displays hydrothermally altered cataclastic rocks (Olivares, 2004).

Two types of hydrothermal alteration, chloritization and propylitization, can be observed in the Caleta Coloso fault core zone. The former is characterized by the replacement of hornblende and biotite by chlorite, epidote mineralization and compositional changes in rims of plagioclase to albite-rich ones, while the latter by the intense plagioclase albitization and mineralization of chlorite, epidote and calcite. XRF analyses and density measurements of the rock revealed that contents of Al and Ca decrease with increasing Si, while Na increases and K, Fe and Mg are stable. The data suggest that the changes in the bulk chemical composition during alterations were mostly due to the plagioclase albitization. Hence, it can be concluded that the propylitization occurred later than the chloritization.

Faulkner et al. (2006) reported that the density of microfractures shown as fluid inclusion planes (FIPs) in quartz of the host rocks of the Caleta Coloso fault increases towards the fault core. Fujita et al. (2010) also noted that the FIPs in the rocks close to the fault tend to orientate along the shear planes (Y and P planes and between T and X planes of the fault). Those evidences indicate that the microfractures were formed during faulting and healed by mineral precipitation from fluids passing through the fractures and that the fluids have been preserved as the fluid inclusions in FIPs (Fujita et al., 2010).

The fluid inclusions in the chloritized rocks show a wide range in homogenization temperatures from 140 to 270 C with variable salinities of 6 - 18 wt.% NaCl_{eq.}, while the temperatures of those in the propylitized rocks are low as 150 - 190 C (av. = 170 C) with high salinities as 12 - 18 wt.% (av. = 15 wt.%). Therefore, the fluid inclusions trapped in the both alterations stages are probably included in the chloritized rocks partly overprinted by the later propylitization. However, since the fluid inclusions of only low-homogenization temperatures with high salinities can be seen in the highly propylitized rocks, the most propylitization might completely alter the chloritized rocks with the intense albitization, resulting in removal of older fluid inclusions trapped during the earlier chloritization. Hence, it is supposed that the fluids of high-homogenization temperatures (ca. 250 C) and low salinities (ca. 9 wt.%) caused the chloritization, while those of low-homogenization temperatures (ca. 170 C) and high salinities (ca. 15 wt.%) did the propylitization.

Chemical compositions of chlorite coexisting with quartz indicate the chloritization temperature as around 330 C. A pressure at 330 C on an isochore for the 9 wt.% NaCl solution projected from the homogenization temperature of 250 C is about 1.1 kb, representing the chloritization pressure. Therefore, the propylitization temperature might be around 220 C if the propylitization occurred at the same depth with the chloritization.

キーワード: 断層, 流体包有物, 熱水変質, 緑泥石化, プロピライト化

Keywords: fault, fluid inclusion, hydrothermal alteration, chloritization, propylitization

中央構造線の断層ガウジにおける地震時-非地震時の物理化学的反応について The physicochemical reaction during the coseismic-interseismic period of the fault gouge of the MTL, Japan

松多 範子^{1*}, 石川 剛志², 廣野 哲朗¹, 河本 和朗³, 藤本 光一郎⁴, 亀田 純⁵, 西尾 嘉朗²

MATSUTA, Noriko^{1*}, ISHIKAWA, Tsuyoshi², HIRONO, Tetsuro¹, KAWAMOTO, Kazurou³, FUJIMOTO, Koichiro⁴, KAMEDA, Jun⁵, NISHIO, Yoshiro²

¹ 大阪大学 理学研究科 宇宙地球科学専攻, ² 海洋研究開発機構高知コア研究所, ³ 大鹿村中央構造線博物館, ⁴ 東京学芸大,
⁵ 東京大学 大学院 理学系研究科 地球惑星科学専攻

¹Earth and Space Science, Osaka Univ., ²JAMSTEC Kochi, ³Oshika Geological Museum of Japan MTL, ⁴Tokyo Gakugei Univ.,

⁵Department of Earth and Planetary Science Graduate School of Science, The University of Tokyo

地震時の摩擦滑りによって、断層では摩擦発熱、流体移動、水-岩石相互作用、粘土鉱物の脱水などの各種反応が生じる。例えば台湾チェルンブ断層では、黒色ガウジにおいて350度以上の高温の流体との反応を示す微量元素・同位体異常や粘土鉱物の脱水反応が報告されている。しかし、これらの物理化学過程や地震時の滑り挙動との関係は未だ十分には理解されていない。そこで本研究では、長野県大鹿村に分布する中央構造線の安康地域の露頭を対象とし、フィールドでの調査に加え、断層試料の主要・微量元素・Sr同位体分析と粉末X線分析を実施した。

その結果、希土類元素・主要元素パターンより採取した断層ガウジは花崗岩、玄武岩を起源とするものに明確に区分ができた。さらに、花崗岩起源の黒色ガウジでは、粘土フラクションのX線回折ピークの強度減少、Li, Srなどfluid-mobileな元素の異常が認められた。前者は粘土鉱物の選択的粉碎と非晶質化に、後者は150度の流体と鉱物固体間の反応によるものと考えられる。本発表では、これらの分析結果に加え、地震性滑りに伴う断層で生じうる反応についての考察結果をお話する予定である。

湧水のリチウム同位体比を用いた跡津川断層周辺における深部流体の検出 Detection of deep fluid using lithium isotope of waters along the Atotsugawa fault system, central Japan

大橋 聖和^{1*}, 西尾 嘉朗², 谷川 亘³, 山口 飛鳥⁴

OOHASHI, Kiyokazu^{1*}, NISHIO, Yoshiro², TANIKAWA, Wataru³, YAMAGUCHI, Asuka⁴

¹ 千葉大学大学院理学研究科, ² 海洋研究開発機構, ³ 独立行政法人海洋研究開発機構高知コア研究所, ⁴ 東京大学大学院理学系研究科地球惑星科学専攻

¹Graduate School of Science, Chiba University, ²Agency for Marine-Earth Science and Technology, ³Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology, Kochi Institute for Core Sample Research, ⁴Department of Earth and Planetary Science, The University of Tokyo

中部地方北部に位置する跡津川断層系は、GPS 観測網の展開によって見出された新潟-神戸ひずみ集中帯 (Sagiya et al., 2000) の内部に位置する活断層群である。断層沿いでは活発な微小地震活動が起きており (和田ほか, 2007), 断層クリープ運動の可能性も指摘されている (多田, 1998; Ohzono et al., 2011)。跡津川断層系を含めたこの地域になぜ歪みが集中しているのかは、Iio et al. (2002) は広域的な比抵抗構造などから、フィリピン海プレートおよび太平洋プレートから脱水した水が上昇し、歪み集中帯下の下部地殻を軟化させているためとした。また、Yoshimura et al. (2009) は跡津川断層系直下の下部地殻に低比抵抗帯が、Nakajima et al. (2010) は低速度異常があることを見だし、流体によって弱くなった下部地殻の存在を支持した。しかしながら、流体の起源や上部地殻での分布については未だ不明確な点が多い。一方、上昇してくる水を用いた地球化学的手法を組み合わせることで、これらのより詳細な解明が期待できる (例えば Nishio et al., 2010)。そこで筆者らは、跡津川断層系において破砕帯直上およびその周辺で採取した湧水・温泉試料を対象に化学組成と同位体組成の解析を行い、深部流体の存在と起源について検討した。特に着目した元素はリチウム (Li) であり、これは高温時に岩石から水に溶け出し、冷却過程 (上昇時) においても流体中に残る特性を有するためである。水試料は跡津川断層、牛首断層とその周辺地域から採取し、断層直上においては破砕帯中軸部からの湧水を採取した。一般に、河川水等の表層水の Li 濃度は 1ppb 以下であり、⁷Li/⁶Li 比も基盤岩より有意に高い (⁷Li 値で +20% 以上)。本地域の河川水でも同様の低 Li 濃度と高 ⁷Li/⁶Li 比が河川水から観察された。一方で複数の破砕帯湧水からは、河川水よりも有意に高い Li 濃度と低い ⁷Li/⁶Li 比 (最低 +0.10 ± 0.3%) が認められた。温泉水からは高い Li 濃度が認められたが、⁷Li/⁶Li 比は河川水と同程度であった。これらの結果は、跡津川断層系下に天水や温泉水とは化学組成の異なる地殻深部流体が存在し、断層破砕帯を通じて地表に湧出していることを意味する。

[引用文献]

Iio et al., 2002, Earth planet Sci. Lett., 203, 245-253.

Nakajima et al., 2010, Earth Planets Space, 62, 555-566.

Nishio et al., 2010, Earth planet Sci. Lett., 297, 567-576.

Ohzono et al., 2011, Geophys. J. Int., doi:10.1111/j.1365-246X.2010.04876.x.

Sagiya et al., 2000, PAGEOPH, 157, 2303-2322.

多田, 1998, 月刊地球, 20, 142-148.

和田ほか, 2007, 京大防災研年報, 50, 313-320.

Yoshimura et al., 2009, Geophys. Res. Lett., 36, L20311, doi:10.1029/2009GL040016.

キーワード: 跡津川断層, 新潟-神戸ひずみ集中帯, 地殻流体, リチウム同位体, 断層流体, 内陸地震

Keywords: Atotsugawa fault, Niigata-Kobe Tectonic Zone, geofluid, lithium isotope, fault fluid, Intraplate earthquake

Trace elements and isotopic variations along Sunda arc, Java island, Indonesia: an evaluation of slab fluid contribution

Trace elements and isotopic variations along Sunda arc, Java island, Indonesia: an evaluation of slab fluid contribution

Esti Handini^{1*}, Toshiaki Hasenaka¹, Haryo Edi Wibowo¹, Tomoyuki Shibata², Yasushi Mori³, Agung Harijoko⁴
HANDINI, Esti^{1*}, HASENAKA, Toshiaki¹, HARYO EDI WIBOWO¹, SHIBATA, Tomoyuki², YASUSHI MORI³, HARIJOKO, Agung⁴

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

A geochemical dataset of lavas from Java island, Sunda arc is compiled for trace elements and isotopic variations, in order to understand along-arc variation of the contribution of slab-derived fluid to arc magmas. We divided the island into western, central and eastern sections in terms of volcanism and tectonics. Based on volcano distribution, the western section is subdivided into North-West Java (NWJ) and Central-West Java (CWJ) chains. The NWJ chain is considered to be tectonically affected by bending subduction structure that marks the transition from Sumatra arc to Sunda arc.

In general, lavas from this island are distinguished by enriched LILE and LREE, negative anomalies of Nb and Ti, and low Mg, Ni and Cr. We observed along-arc variation of subduction slab imprint including both sediment (SED) and altered oceanic crust (AOC) by examining fluid-mobile elements against HFSE ratios (e.g. B/Nb, B/Zr, Ba/La). We also evaluate depletion of Nb which characterizes arc magmas, by using Nb/HFSE (e.g. Nb/Ta, Nb/Zr) ratios, along this island. Radiogenic Sr-Nd isotopes were determined to examine contribution of SED and AOC to arc magma source. Then we combine these to find differences between western, central and eastern sections.

Nb/HFSE ratios are evenly low along western, central and eastern sections. However, these ratios increase from volcanic front toward back arc in central and eastern sections. In contrast, they are uniformly low across the western section, with little deviation in NWJ chain. The B/HFSE and Ba/HFSE ratios decrease from volcanic front toward back arc in the central and eastern sections. Whereas, they decrease but slightly across the western section. They are observed highest in lavas from central section compared to others. Isotopic ratios from all sections are shifted from Indian Ocean MORB field toward higher ⁸⁷Sr/⁸⁶Sr and lower ¹⁴³Nd/¹⁴⁴Nd ratios. Back-arc lavas from central section overlap with mantle array and exhibit the lowest ⁸⁷Sr/⁸⁶Sr in a wide range of ¹⁴³Nd/¹⁴⁴Nd ratios, whereas the volcanic-front samples overlap with compositions of Indian Ocean sediment. Back arc lavas from eastern section are displaced toward sediment composition, while the volcanic front is placed closer to MORB.

This increasing trend of Nb/HFSE from volcanic front toward back arc in central and eastern sections implies more enriched mantle source in the back arc. This back arc source enrichment is then confirmed by isotopic ratios. Despite the little deviation in NWJ chain, the general flat trend as observed in western section indicates similar mantle source across this section. Positive correlation between incompatible elements ratio and the depth of Wadati-Benioff zone denotes an identifiable influence of subducted slab along this island. The sharp decreasing trends of B/HFSE and Ba/HFSE in central and eastern sections suggest a definite reduced slab-fluid influence from volcanic front toward back arc. Compared to these sections, the western section is less pronounced in terms of subduction components enrichment. The greatest enrichment of subduction components in central section implies strongest slab fluid imprint in this section. The Sr-Nd isotopic pattern justifies the involvement of slab fluid in all sections. However, this pattern confirms the strongest subducted sediment-fluid contribution in volcanic front of central section. The more enriched mantle source in back arc compared to volcanic front is observed in eastern section. This evidence corroborates mantle source enrichment towards the back arc, in central and eastern sections.

キーワード: sunda arc, along arc variation, slab fluid, fluid-mobile element, isotope

Keywords: sunda arc, along arc variation, slab fluid, fluid-mobile element, isotope

日本列島下におけるマントル融解状態の推定 Geochemical tomography for melting condition beneath Japan arcs

中村 仁美^{1*}, 岩森 光¹

NAKAMURA, Hitomi^{1*}, IWAMORI, Hikaru¹

¹ 東京工業大学

¹Tokyo Institute of Technology

Slab-derived fluid (hereafter slab-fluid) plays an important role for generation of arc magmas. If the flux of slab-fluid is enhanced or reduced by variable tectonic settings and the corresponding thermal and flow regimes, it has effects on the mantle melting. The melting condition may contribute to infer the thermal, flow and fluid regimes. We focus on the melting condition in the mantle wedge beneath Central Japan, where the two overlapping slabs, Pacific and Philippine Sea plates, exist and the amount and composition of slab-fluids from the two slabs are well documented, as the regional variation of slab-fluid fluxes that are related to the geometry of the subducting plates.

Based on the chemical composition of major and trace elements, we construct forward and backward models to constrain the melting condition beneath Central Japan. The composition of the primitive rock can be corrected for fractionated phases to estimate backwardly that of primary magma, while the composition of melt generated in the mantle wedge can be forwardly modeled as a function of degree of melting (sensitive to temperature) and mineralogy (proportions of garnet/spinel peridotites, sensitive to pressure) based on the composition of fluid metasomatized mantle.

As a result, the melting condition is characterized by relatively low melting degrees and high proportions of garnet peridotite involved in melting compared to the adjacent arcs with a single subducting slab, e.g., the Izu-arc. This implies that, the melting occurred at deeper depths and lower temperature for Central Japan. This also consistently explains the existence of adakites occurred in this area, in spite of the cold setting. The same analysis for the volcanoes in the adjacent areas show transition the thermal and fluid conditions, according to the spatial variation of the tectonic regimes, suggesting that geochemical approach is useful to map the physical condition, and could be referred to as geochemical tomography.

キーワード: マントル, 融解, スラブ起源流体, 沈み込み帯

Keywords: mantle, melting, slab, slab-fluid, subduction, arc

斜長石-玄武岩質メルト間の水素の分配実験

Experimental constraints on partitioning of hydrogen between plagioclase and basaltic melt

浜田 盛久^{1*}, 潮田 雅司¹, 高橋 栄一¹

HAMADA, Morihisa^{1*}, USHIODA, Masashi¹, TAKAHASHI, Eiichi¹

¹ 東京工業大学地球惑星科学専攻

¹ Department of Earth and Planetary Sciences, Tokyo Institute of Technology

目的

無水の造岩鉱物は、ppm オーダーの水素を含むことが知られており、メルト中に溶存する水の量や挙動の指標、すなわち含水量計として有用であることが明らかにされつつある。斜長石はそのような無水鉱物の一つであり、赤外吸収スペクトルを用いた分光学的研究より、火山岩の斜長石に含まれる水は、OH基であると考えられている (Johnson and Rossman, 2003, *Am. Mineral.*)。本研究の目的は、島弧の火山フロントに噴出する玄武岩質の火山岩において (1) 斜長石-メルト間の水素の分配係数を実験によって決定すること、及び (2) 斜長石の OH 量をメルトの含水量計として応用することである。

手法

斜長石-メルト間の水素の分配係数を決定するため、内熱式ガス圧装置を用いて、玄武岩マグマの含水融解実験を行った。三宅島火山・澁ヶ平溶岩 (50.5 wt.% SiO₂, 18.1 wt.% Al₂O₃, 4.9 wt.% MgO) を含水ガラス化したものを出発物質として用いた。澁ヶ平溶岩の全岩化学組成は斜長石成分に富んでおり、0-6 wt.% H₂O の含水量の条件で斜長石がリキダス相として晶出する。本実験では、澁ヶ平溶岩中の斜長石斑晶 (An₉₅, 0.4 wt.% FeO*) 約 1 mg と含水ガラスの粉末 (約 10 mg) とを Au₈₀Pd₂₀ カプセルに封入して、350 MPa の圧力下における斜長石のリキダス近傍の温度で 24~48 時間融解・保持することにより、斜長石斑晶とメルトとの間で H を分配させた。実験中の酸素雰囲気は制御されていないが、Ni-NiO パッファーよりも約 3 log unit 高い雰囲気下で行われた。実験後に回収された斜長石斑晶と玄武岩質メルト (ガラス) を、フーリエ変換赤外分光光度計 (FTIR) を用いて分析し、それぞれの含水量を分析した。玄武岩質ガラスの含水量の分析に際しては、OH 基の含有量と H₂O 分子の含有量も定量化した。

結果

An₉₅ の斜長石斑晶中に分配される OH 量は、メルトの含水量の増加に伴って単調に増加する (図 1a)。メルトの含水量が 1 wt.% 以下の時、斜長石-メルト間の H の分配係数 (モル比) は約 0.01 であるが、含水量の増加に伴って分配係数は小さくなる。メルトの含水量が 4 wt.% 以上では、斜長石の OH 量は 200-250 wt. ppm H₂O で飽和に達する。斜長石の OH 量とメルトの OH 量とは相関しており (図 1b)、Johnson and Rossman (2003) が述べているように、斜長石中に H は OH 基として取り込まれていることを支持している。

応用

1986 年の伊豆大島火山山頂噴火で得られた斜長石斑晶 (An₉₀, 0.7 重量% FeO*) の含水量は、最小で <50 wt. ppm H₂O、最大で 300 wt. ppm H₂O という OH 量のバリエーションを示す (Hamada et al. 2011, *EPSL*)。Hamada et al. (2011) は、(1) 斜長石中の OH 量のバリエーション、(2) An₉₀ の斜長石を玄武岩質メルトから晶出させるための実験岩石学的制約、(3) 伊豆大島山頂噴火の地球物理学的観測事実、に基づき、メルト中に水が最大で 6 wt.% 程度溶存しており、噴火に至る過程でメルトが水に飽和して脱ガスした可能性を議論した。

本研究では、高 OH 量 (最大で 250 ppm H₂O) の斜長石は 4 wt.% 以上の含水量のメルトと平衡共存することが明らかとなった。すなわち、1986 年の伊豆大島火山山頂噴火の際に、マグマ溜まりではメルトは 4-6 wt.% の H₂O を溶存し、共存する斜長石に最大で 300 wt. ppm H₂O の H を分配させたと考えられる。これは、地下 8~10 km の深度に推定される伊豆大島火山のマグマ溜まり (Mikada et al., 1997, PEPI) における、メルトの飽和含水量に相当する。噴火に至るマグマの上昇の過程で、水に飽和したメルトは脱ガスし、共存する斜長石の OH 量を <50 wt. ppm H₂O にまで減少させたと考えられる。

実験生成物の An₉₅ 斜長石斑晶の OH 量が 250 wt. ppm H₂O で飽和してしまい、伊豆大島火山で得られるような 300 wt. ppm H₂O には達しない。その理由は、斜長石の化学組成の違い (An 量や FeO* の含有量の違い) で説明される可能性がある。

キーワード: 無水鉱物の水, 斜長石, 島弧玄武岩マグマ, 含水融解実験

Keywords: Water in nominally anhydrous minerals, plagioclase, arc basaltic magma, hydrous melting experiment

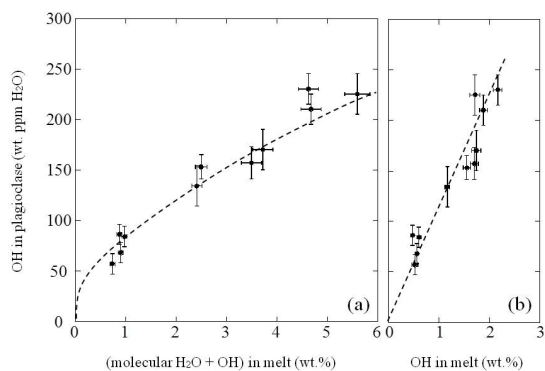


Fig. 1

スラブには何が残って何が地表へ帰るのか? 地球化学マスバランスモデル What stays in the slab and what returns to the surface? A geochemical mass balance model perspective

木村 純一^{1*}, 川畑 博¹, ハッカー ブラッドリー², バンケケン ピーター³, ギル ジェームズ⁴, スターン ロバート⁵
KIMURA, Jun-Ichi^{1*}, KAWABATA, Hiroshi¹, Bladley Hacker², Peter van Keken³, James Gill⁴, Robert Stern⁵

¹ 海洋研究開発機構, ² カリフォルニア大サンタバーバラ校, ³ ミシガン大, ⁴ カリフォルニア大サンタクルツ校, ⁵ テキサス大ダラス校

¹IFREE/JAMSTEC, ²University of California, Santa Barbara, ³University of Michigan, ⁴University of California Santa Cruz, ⁵University of Texas at Dallas

We have developed the Arc Basalt Simulator (ABS), a quantitative forward model to calculate the mass balance of slab dehydration and melting, and slab fluid/melt-fluxed mantle melting, in order to quantitatively evaluate magma genesis beneath arcs. ABS models can reproduce magma compositions in many arcs.

The model suggests that the slab-derived component at volcanic fronts (VF) is mostly generated by dehydration, but successful models for most VF and all rear arc (RA) magmas also require the slab to melt. The compositions of slab fluids and melts are controlled primarily by the breakdown of amphibole and lawsonite beneath the VF and by the breakdown of phengite beneath the RA in addition to residual eclogite mineral phases including garnet, clinopyroxene, and quartz.

In the model, about 78-98% of relatively fluid-immobile elements including Nd and Hf in the arc lavas come from mantle peridotite. However, most liquid-mobile elements come from the slab. Modeled residual peridotite compositions are similar to those in some supra-subduction zone ophiolites and mantle xenoliths, providing constraints on reactions in the mantle wedge.

Altered oceanic crust (AOC) and sediment in the residual slab are modified by the subtraction of melt- and fluid-mobile elements. Unmodified AOC potentially becomes the EM I mantle component after 1 Ga, whereas melted AOC can have extremely fractionated U-Pb and become the HIMU source after 1-2 Ga. Element re-distribution beneath arcs can form the recycled materials that have been detected in ocean island basalts.

キーワード: 島弧, マグマ, 地球化学, マスバランス

Keywords: arc, magma, geochemistry, mass balance

日本列島に分布する熱水性鉱床のPb同位体比組成 Pb isotopic compositions of hydrothermal deposits in the Japanese island arc

藤永 公一郎^{1*}, 加藤 泰浩¹, 稗田 裕樹¹, 高谷 雄太郎¹, 谷水 雅治², 清水 徹⁴, 中村 仁美³, 岩森 光³
FUJINAGA, Koichiro^{1*}, KATO, Yasuhiro¹, HIEDA, Yuki¹, TAKAYA, Yutarō¹, Masaharu Tanimizu², SHIMIZU, Toru⁴, NAKA-MURA, Hitomi³, IWAMORI, Hikaru³

¹ 東京大学大学院工学系研究科, ² 独立行政法人海洋研究開発機構, ³ 東京工業大学大学院理工学研究科, ⁴ 産業技術総合研究所

¹University of Tokyo, ²JAMSTEC, ³Tokyo Institute of Technology, ⁴Geological Survey of Japan

Quite recently, it has been pointed out that "geofluids" released from the subducting plates may be involved in various phenomena in subduction zone, such as young volcanic rocks, deep-seated hot springs and hydrothermal deposits. Systematical investigations of these various materials are needed for identifying the geochemical characteristics of the geofluids. Nakamura et al. (2008) revealed that the slab-fluids derived from two subducted plates (the Pacific plate and the Philippine Sea plate) contribute largely to the genesis of arc magmas in the Central Japan. Here we focus on hydrothermal deposits (vein-type and skarn-type) in the Japanese island arc. Hydrothermal fluids that formed sulphide mineral (galena, pyrite, chalcopyrite, sphalerite etc.) deposits are generally considered to have been derived from magmatic and/or meteoric waters based on H, C, O, and S isotopes in the deposit materials. However, ore fluids may be derived from deep slab-fluids. We report Pb isotopic compositions of hydrothermal deposits in the Japanese island arc and discuss about the origin of ore fluids.

Keywords: Pb isotopic composition, hydrothermal deposit, slab-fluid

有馬温泉のREE組成 -スラブ起源流体への示唆-

Rare earth element composition of the Arima-type brine and its implication for slab-derived fluid

富士田 祥之^{1*}, 中村 仁美¹, 楠田 千穂², 岩森 光¹

YOSHIYUKI, Fujita^{1*}, NAKAMURA, Hitomi¹, KUSUDA, Chiho², IWAMORI, Hikaru¹

¹ 東京工業大学 地球惑星科学科, ² 東京大学

¹Department of Earth and Planetary Sciences, Tokyo Institute of Technology, ²Department of Earth and Planetary Science, The University of Tokyo

The Arima-type brine has been known as one of the oldest hot springs in Japan, as well as its distinct geochemistry: in spite of its presence in the non-volcanic region in the forearc, the oxygen and hydrogen isotope compositions show a presence of deep brine similar to volcanic fluids. Mixing between the meteoric water and a deep brine with a high $\delta^{18}\text{O}$ and $\delta^2\text{H}$ (7 to 8, -40 to -30, respectively) explains the linear trend of the brine samples. The Arima-type brines are highly concentrated in the type locality, Arima, SW Japan. The two plates subduct beneath the area: the Pacific Plate subducts from the east and underlies ~400 km below the area, whereas the Philippine Sea Plate subducts from the southeast and is seismically observed 50 to 80 km below the area. In spite of this active subduction, there is no Quaternary volcano in this area, possibly because the Pacific Plate is too deep and the Philippine Sea Plate is too shallow to fulfill the physicochemical conditions for arc magma generation.

Here we report geochemical signatures, in particular the REE concentrations, of the Arima brine, and suggest that it could have originated directly from the subducting slab without any significant modification during its ascent. High salinity, high $3\text{He}/4\text{He}$ ratio and distinct oxygen, hydrogen and carbon and strontium isotope compositions also suggest that they have been derived possibly from the subducting Philippine Sea slab, hence may bring invaluable insights for the slab-derived fluid and the related fluid processes in subduction zones. In this study, we analyzed samples from 'Kinsen'. The Kinsen brine has a high salinity and the highest abundances of the trace elements in this area. We have also sampled a solid material precipitated within the pipe, in order to estimate the elemental fractionation during cooling of the hot spring and precipitation from it. Because of its high salinity (up to 6 wt.% NaCl) of the Arima-type brine, the matrix effects are extremely large to prevent accurate analysis of any trace element. We employ a standard addition method, aiming at rapid yet accurate analyses.

The DMM normalized composition of Arima brine exhibits broadly a flat pattern around the normalized concentration of 10-3 with a convex-down shape for mid-REE, except for positive anomaly in Eu. On the other hand, the precipitates consist of aragonite and magnesite, which do not contain REE above the detection limit, except for Gd which is likely derived as flakes from the pipe.

Alternatively, based on the reported partition coefficient and the numerical modeling of the thermal structure along the subducting slab, the REE concentrations in the slab-derived fluid (as a product of slab dehydration reactions) have been evaluated. The calculation results broadly coincide with the observed REE concentrations of the Arima-type brine. Together with these analytical results and forward calculation, we conclude that the REE composition in the Arima brine is straightly originated from the dehydration of subducting slab at 450 degree.

キーワード: スラブ起源流体, 有馬温泉, 希土類元素, 酸素水素同位体比, 有馬型温泉, 沈み込み帯

Keywords: slab-derived fluid, Arima brine, rare earth elements, isotopic compositions of oxygen and hydrogen, Arima-type brine, subduction zone

北海道神居古潭帯岩内岳超塩基性岩体にみられる2段階の蛇紋岩化作用 Two-stage serpentinization reactions: an example of Iwanai-dake ultramafic rocks, Kamukotan belt, Hokkaido, Japan.

三好 茜^{1*}, 小木曾 哲¹

MIYOSHI, Akane^{1*}, KOGISO, Tetsu¹

¹ 京都大学大学院人間・環境学研究科

¹ Human and Environmental Studies, Kyoto University

沈み込み帯において含水鉱物から放出された水は、島弧火成活動や地震の発生など様々な地球科学的現象を引き起こすとされる。特に、マントルウェッジのかんらん岩は水と反応して蛇紋岩化作用を被るが、それにより密度、初磁化率、浸透率などの岩石の物性は大きく変化し、地球全体の水循環やマントルダイナミクスに大きな影響を及ぼすと考えられている。しかし、かんらん岩の蛇紋岩化プロセスについては不明な点が多い。蛇紋岩化作用は一般的に、多量のマグネタイトの形成を伴う。近年の研究では、蛇紋岩化反応は少なくとも2段階のプロセスであり、2段階目の反応でマグネタイトが形成されると考えられているが、この反応については様々な解釈が提示されている。例えば Bach et al. (2006) は、ブルース石の分解によるものとしたが、Frost and Beard(2007) は、SiO₂ の活動度が低い条件下で蛇紋石が分解することによりマグネタイトが形成される可能性を示した。このように、岩石の密度や初磁化率を変化させる重要な要因であるにも関わらず、マグネタイト形成に寄与している要因についてはよく理解されていない。それだけでなく、2段階目の反応が起こったことを支持する岩石学的証拠も十分には提示されていない。本研究では、北海道神居古潭帯岩内岳超塩基性岩体について、岩石記載、鉱物組成分析、密度及び初磁化率の測定から蛇紋岩化プロセスを明らかにし、どのような反応がマグネタイトの形成に寄与しているのかを考察した。

岩内岳超塩基性岩体は神居古潭帯の南部に位置し、岩体の中央部には、蛇紋岩化をまぬがれた直径約1kmの新鮮なかんらん岩体が存在している。かんらん岩体から周囲の蛇紋岩体にかけて、蛇紋岩化度は漸次的に上昇しているとされる。かんらん岩体は主にハルツパージャイトからなり、一部にダナイトを含む。かんらん岩体から東西に走る林道沿いで、様々な蛇紋岩化度のサンプルを採取し、偏光顕微鏡観察及びラマン分光装置による鉱物同定、SEM-EDSによる鉱物化学組成分析、アルキメデス法による密度の測定、及び帯磁率計による初磁化率の測定を行った。

蛇紋岩には主に蛇紋石、ブルース石、マグネタイトが含まれている。蛇紋岩のメッシュ組織を形成する鉱物組み合わせは、Mg#95-97の蛇紋石とMg#75のブルース石がインターグロースしたもの(Aタイプ)と、Mg#93の蛇紋石からなるもの(Bタイプ)の二種類が存在する。Bタイプは中心部にブルース石脈を有する。さらにメッシュ組織は、AタイプあるいはBタイプのみからなるものと、AタイプとBタイプ両方からなる二重のメッシュをなすものの三種類が存在する。ハルツパージャイトでは蛇紋岩化の進行に伴い、Aタイプ A + Bタイプ Bタイプという変遷がみられた。蛇紋岩化度の高いハルツパージャイトでは輝石の蛇紋石化がみられたが、ほぼBタイプの出現時期と一致していた。しかしダナイトでは、蛇紋岩化度が高いサンプルでもBタイプやブルース石脈はみられなかった。ハルツパージャイトは密度2.9g/cm³付近で急激な初磁化率の上昇がみられたが、ダナイトでは蛇紋岩化が進んでも上昇は見られず、低い値のままだった。

以上のことから、本研究地域の蛇紋岩化には以下の2段階のプロセスが考えられる。1段階目では、かんらん石と水が反応し、Mg#95-97の蛇紋石とMg#75のブルース石が形成された。そして、2段階目の反応で、Mg#93の蛇紋石が形成された。後期の反応はダナイトではみられなかったことから、輝石の蛇紋石化によるSiO₂に富む流体の供給が関与していると考えられる。また、初磁化率と密度の関係から、マグネタイトは後期の反応で形成されたと考えられる。これらのことから、SiO₂の供給がマグネタイト形成の要因になったと考えられる。今回は、Frost and Beard(2007)の提案とは異なる結果となった。しかし、Bach et al. (2006) でみられた組織は本研究のものとは異なり、今回のタイプ分けは適用できない。テクトニックセッティングや原岩の違い、流体の組成などにより蛇紋岩化反応が異なるという可能性も含めて、慎重に議論する必要があると考えられる。

引用: Bach, W., H. Paulick, C. J. Garrido, B. Ildefonse, W. P. Meurer, and S. E. Humphris (2006), *Geophys. Res. Lett.*, 33, L13306, doi:10.1029/2006GL025681.; Frost, B. R. & Beard, J. S. (2007). On silica activity and serpentinization. *Journal of Petrology* 48, 1351-1368.

一ノ目潟のかんらん岩捕獲岩中のClを含むCO₂-H₂O流体包有物 Cl-bearing CO₂-H₂O fluid-inclusions of peridotite xenoliths from Ichinomegata

熊谷 仁孝^{1*}, 川本 竜彦¹, 山本 順司¹

KUMAGAI, yoshitaka^{1*}, Tatsuhiko Kawamoto¹, Junji Yamamoto¹

¹ 京都大学 理学研究科 地球熱学

¹Inst. Geothermal Sci., Kyoto Univ.

Hydrous minerals in a subducting slab carry OH- and H₂O into the Earth's interior, and at points beyond their stability conditions they release H₂O to the overriding mantle wedge (Tatsumi and Eggin 1995). The H₂O fluids transport materials from the slab to the mantle wedge. Recently, analyses of halogen elements of high-pressure metamorphic rocks suggest that saline fluids are preserved in the subducting slab as marine pore-fluids until the depths of at least 100 km (Sumino et al., 2010, EPSL). Salinity of H₂O fluids affects dissolution properties of metal ions (Keppler, 1996, Nature). It is, therefore, important to understand the salinity of the H₂O fluids in the mantle wedge in terms of subduction system of metal.

Fluid inclusions in mantle xenoliths preserve direct information of the fluids in the mantle. Mantle xenoliths from the Ichinomegata volcano, located in back-arc side in the northeast Japan arc, have CO₂-H₂O fluid inclusions (Roedder, 1965, Am Mineral). In the present study, we report salinity of the CO₂-H₂O fluid inclusions in the mantle xenoliths from the Ichinomegata volcano.

All mantle xenoliths studied are porphyroclastic lherzolite, composed of olivine, orthopyroxene, clinopyroxene, spinel and hornblende. The CO₂-H₂O fluid inclusions are occasionally present in orthopyroxene porphyroclasts. The fluid inclusions have not reacted with host orthopyroxene crystals after the formation. We suppose, therefore, that the salinity of the fluid inclusions represents the original value in the mantle. Formation depths of the fluid inclusions are estimated by the following steps: (1) estimating the bulk mole volume of CO₂-H₂O fluid inclusion using homogenization temperatures of CO₂ liquid-vapor and CO₂-H₂O (Bakker and Diamond, 2000, *Geochem. Cosmochim. Acta*), (2) calculating pressure of the formation of the fluid inclusion using equilibrium temperature estimated by a pyroxene geothermometer (Wells 1977, *Contrib. Mineral. Petrol.*) and isochore of CO₂-H₂O system (Loner AP, from Software Package FLUIDS, v.2, Bakker), (3) converting the pressure to depth by assuming densities of crust and mantle are 2.85 and 3.3 g/cm³, respectively, and Mohorovicic discontinuity is 27 km. Salinities of fluid inclusions are determined using melting temperature of clathrate (Darling, 1991, *Geochim. Cosmochim. Acta*). The depth is estimated to be about 30 km, which is consistent with the following petrographical feature. Some xenoliths have plagioclase and symplectites formed by reaction of plagioclase and olivine. This indicates that the xenoliths were from the boundary between plagioclase-peridotite and spinel-peridotite. The salinity of fluid inclusions is 3.93 ± 0.55 wt %. Using relationship between the molality of Cl and the fluid/melt partition coefficients (Zajacz et al., 2008, *Geochem. Cosmochim. Acta*), for example, the fluid/melt partition coefficients of Pb and Zn under this salinity are 7.8 and 18.6, respectively (those of Cl-free hydrous fluid are almost 0 and 8.2, respectively).

キーワード: 塩濃度, 流体包有物, 物質輸送, 沈み込み帯, マントル捕獲岩, 一ノ目潟

Keywords: salinity, fluid inclusion, material transport, subduction zone, mantle xenolith, Ichinomegata

東北地方と関東地方におけるプレートの沈み込みに伴う温度分布の数値シミュレーション

Numerical simulations of temperature distributions associated with subduction of the plate beneath Tohoku and Kanto

高木 瑠美^{1*}, 吉岡 祥一², 松本 拓己³

TAKAGI, Rumi^{1*}, YOSHIOKA, Shoichi², MATSUMOTO, Takumi³

¹ 神戸大・理・地球惑星, ² 神戸大・都市安全セ, ³ 防災科研

¹Dept. of Earth and Planetary Sci., Kobe Univ., ²RCUSS, Kobe Univ., ³Earthquake Research Department, NIED

1. はじめに

東北地方では太平洋プレートが沈み込んでいる一方で、関東地方には太平洋プレートの上に重なるようにフィリピン海プレートが沈み込んでいる。そこで、本研究では、まず東北地方において太平洋プレートの沈み込みに伴う温度分布の数値シミュレーションを行い、東北地方で再現した温度分布をもとにフィリピン海プレートの沈み込みを起こすことによって関東地方における2つのプレートの沈み込みに伴う温度分布を計算した。

2. モデルと手法

Yoshioka and Sanshadokoro(2002)の2次元箱型熱対流モデルを用い温度分布の計算を行った。太平洋プレートの沈み込み速度は、Sella et al.(2002)を参照し、沈み込む太平洋プレートの年齢を Sdrolias and Muller(2006)に基づいて時間変化させた。Nakajima et al.(2007,2009)と Hirose et al.(2008)による太平洋プレートとフィリピン海プレート上面の形状を与え、プレートが沈み込む際に与えるガイドの指標とした。地殻熱流量のデータとしては、Tanaka et al.(2004)、Yamano(2004)のボアホール、ヒートプローブ、松本(2007)によるHi-netの観測井でのデータを用いた。

高木・他(2011)のモデルでは、太平洋プレートの沈み込みに伴いマントルウェッジ先端部に高温のマントルの流れ込みが起こり、東北地方では観測データの地殻熱流量を大きく上回る高温場がマントルウェッジの先端付近にできてしまっていた。そこで、マントルの流れが入り込まない領域をマントルウェッジの先端付近に設置し、東北地方下に存在すると考えられている cold nose と呼ばれる冷たい領域をモデル化した。東北地方の温度分布から計算される地殻熱流量の値と地殻熱流量データを比較し、観測値を再現する温度モデルを構築した。関東地方においては、東北地方で構築した太平洋プレートの沈み込みモデルに、遅れてフィリピン海プレートを沈み込ませ、関東下に広がる低い地殻熱流量をフィリピン海プレートによって説明しようと試みた。

3. 結果

東北地方においては、cold nose の導入によって、海側の地域で地殻熱流量の観測値により合致する計算結果が得られた。関東地方においては、フィリピン海プレートの沈み込みにより、cold nose よりも陸側の領域で、地殻熱流量が低くなることが分かった。関東地方の地殻熱流量の観測値をうまく説明するため、太平洋プレート上面に発生する摩擦熱の導入についても検討中である。

キーワード: プレートの沈み込み, 温度分布, 流れ場, 地殻熱流量, 関東地方, コールドノーズ

Keywords: subduction, temperature distribution, flow field, heat flow, Kanto district, cold nose

東北日本の地殻流体の3次元電磁イメージング Three-dimensional electromagnetic imaging of NE Japan

小川 康雄^{1*}, 市来 雅啓², 神田 径¹
OGAWA, Yasuo^{1*}, ICHIKI, Masahiro², KANDA, Wataru¹

¹ 東京工業大学火山流体研究センター, ² 東北大学

¹Volcanic Fluid Res. Centr., Tokyo Institute of Technology, ²Tohoku University

Geofluid plays an important role in the genesis of crustal earthquakes and volcanoes. Magnetotelluric method uses natural electromagnetic fields and it can image the fluid distribution in terms of electrical resistivity. We have selected an area around Naruko volcano for our project target in order to get detailed three-dimensional distribution of fluids in the crust with a horizontal resolution of ~3km. From the analyses of previous data of 60 MT stations, we have found (1) sub-vertical conductors at the active volcanoes, like Naruko and Onikobe and (2) lower crustal conductors with SSW-NNE strike in the backarc side, and (3) upper to middle crustal conductors in the forearc. We have found high seismicity, located over or outside the crustal conductors.

In this presentation, newly obtained 81 MT data over the two large calderas, Mukaimachi caldera and Sanzugawa caldera, and three-dimensional modeling results will be presented.

キーワード: 地殻流体, 電磁探査, 比抵抗, 地震, 火山, カルデラ

Keywords: geofluid, electromagnetic exploration, resistivity, earthquake, volcano, caldera

紀伊半島下に沈み込むフィリピン海スラブ周辺の3次元地震波速度構造 3D seismic velocity structure around Philippine Sea slab subducting beneath Kii Peninsula

澁谷 拓郎^{1*}, 福居 大志², 平原 和朗³, 中尾 節郎¹

SHIBUTANI, Takuo^{1*}, FUKUI, Taishi², HIRAHARA, Kazuro³, Setsuro Nakao¹

¹ 京大・防災研, ² 日本電産, ³ 京大・理

¹ DPRI, Kyoto Univ, ² NIDEC, ³ Science, Kyoto Univ

1. はじめに

四国西部から東海中部に至る地域では、沈み込むフィリピン海プレートの深さ 30~40km において、深部低周波イベントが帯状に分布する (Obara, 2002; 鎌谷・勝間田, 2004; Obara and Hirose, 2006)。地震波走時トモグラフィーやレシーバ関数解析の結果から、フィリピン海プレートの海洋地殻は、低速度かつ大きな V_p/V_s 比を有することが明らかになった (弘瀬・他, 2007; Ueno et al., 2008)。近畿中部から紀伊半島にかけての地域では、前弧側にもかかわらず、温泉ガスの $^3\text{He}/^4\text{He}$ 比が高い (Sano and Wakita, 1985; Wakita and Sano, 1987)。これらの事象は、海洋地殻とともに沈み込んだ「水」が、深さ 30~40km で脱水し、深部低周波イベントの発生に関与するとともに、地下浅部まで移動するというプロセスを示唆している。

我々は、紀伊半島下に沈み込むフィリピン海プレートとその周辺の構造を推定するため、2004 年からアレイ地震観測を行ってきた。約 5km 間隔で線状に配置した地震計で記録された遠地地震のレシーバ関数解析により S 波速度不連続面のイメージングを行った。前回の発表 (澁谷・他, 2010) では、フィリピン海スラブの傾斜方向の 4 測線 (潮岬 - 田尻, 新宮 - 河内長野, 尾鷲 - 京丹後, 南伊勢 - 信楽) とこれらにほぼ直交する 1 測線 (松阪 - 白浜) の結果について紹介した。今回は、レシーバ関数解析で得られた不連続面の情報と、稠密リアアレイ観測点での読み取り値も用いた地震波走時トモグラフィーの結果について報告する。

2. 地震波走時トモグラフィー

本研究のトモグラフィーでは、速度構造モデルに、レシーバ関数解析により推定した大陸モホ面、海洋地殻上面および海洋モホ面の 3 次元的形状を組み込んだ。理論走時の計算には波面法に基づく手法 (de Kool et al., 2006) を用いた。さらに、定常観測点に加えて、稠密リアアレイを構成する臨時観測点の読み取り値も使用した。臨時観測点の稠密な配置により、高い分解能が得られた。

3. フィリピン海スラブ周辺の構造

トモグラフィーの結果を図 1 に示す。深さ 40 km では海洋地殻は低速度であり、浅くなるにつれて、その低速度領域はマントルウェッジ、下部地殻へと広がっていくように見える。紀伊半島北西部では深さ 16 km を中心とする大きな低速度域が存在する。その上方の上部地殻内では地震活動が非常に活発である。また、紀伊半島の東部に比べ、西部の方が低速度の程度が強い。

レシーバ関数イメージにも紀伊半島の中西部と東部とで違いが見られた。中西部では、低速度域がマントルウェッジへ張り出し、海洋モホ面が 40km 以深で不明瞭になり、スラブが上に凸に湾曲しているが、東部では、海洋モホ面は深さ 70km まで一様に明瞭であり、スラブ形状は直線的であった (澁谷・他, 2010)。

トモグラフィーやレシーバ関数イメージに見られるこれらの特徴は、海洋地殻の含水鉱物が深部低周波イベント発生域付近で脱水分解して、その結果放出された「水」がマントルウェッジや下部地殻に移動して、低速度域を作り出していることを示している。紀伊半島の中西部と東部に見られるスラブ周辺の構造や形状における違いは、脱水分解で放出される「水」の量や 40km 以深の海洋地殻に残留する「水」の量の違いで説明できるのではないかと考えられる。

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

キーワード: トモグラフィー, レシーバ関数, フィリピン海スラブ, 紀伊半島, スラブ起源流体

Keywords: tomography, receiver function, Philippine Sea slab, Kii Peninsula, slab-derived fluid

SCG65-P10

会場:コンベンションホール

時間:5月20日 17:15-18:30

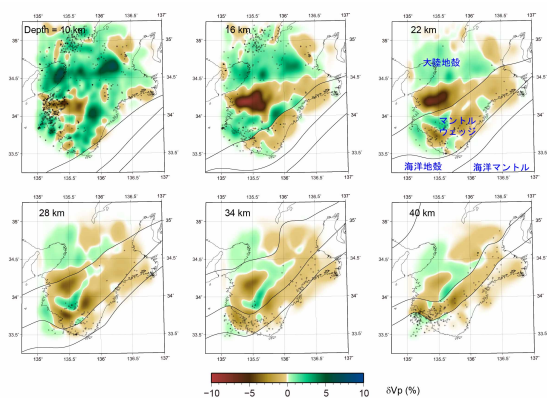


図1 P波速度の初期モデルからのパータベーションを深さ10, 16, 22, 28, 34, 40 kmにおいて示す。初期モデルはJMA2001(上野・他, 2002)を基準とし、海洋地殻の速度を-5%、海洋マントルとマントルウェッジの速度を+5%と与えている。○はトモグラフィーに用いた地震のうち各深さ断面の近傍で発生したものを表す。太線は北から大陸モホ面、海洋地殻上面、海洋モホ面を示す。

三波川変成岩中の深部流体の Li/B 比 : その空間分布 Li/B RATIO OF CRUSH-LEACHED FLUID OBTAINED FROM THE SANBAGAWA METAMORPHIC BELT: ITS AREAL DISTRIBUTION

平島 崇男^{1*}, 吉田健太¹, 千眼 喜照¹, 野口 直樹¹, 小林記之², 三島荘智², 大沢 信二²

HIRAJIMA, Takao^{1*}, Yoshida Kenta¹, Sengen Yoshiteru¹, Noguchi Naoki¹, Kobayashi Tomoyuki², MISHIMA Taketoshi², Oh-sawa shinji²

¹ 京都大学大学院理学研究科, ² 京都大学大学院理学研究科地球熱学研究施設

¹ Graduate School of Science, Kyoto University, ² Institute for Geothermal Sciences, Graduate School of Sciences, Kyoto University

We investigated species and compositions of deep fluids trapped as fluid inclusions (FIs) in high-P met-amorphic rocks formed in the subduction zones. One of major goals of our deep fluid study is to testify an idea whether peculiar fluid soluble light elements, such as Li, B and Cl, can be used as an indicator of fluid generation depths in the subduction zones or not (Scambelluri et al. 2004).

Quantitative analyses of major and trace element composition of the deep fluid are still in the hard task. We adopted crush-leach (CL) technique (e.g., Banks and Yardley, 1992) for extracting FI from quartz veins/lenses developing parallel to the main foliation of Sanbagawa metamorphic rocks crystallized at 20 - 60 km depths.

Major cations/anions of CL fluids were analyzed by ion-chromatography, and Li and B were done by ICP-MS. Raman spectroscopy is adopted to determine the liquid and gas species of fluid inclusions in quartz. Microthermometry is adopted to estimate NaCl salinity and to identify the formation stage of FIs.

We extracted CL fluids from three areas of the Sanbagawa belt, 1) Wakayama area, 2) Asemigawa area and 3) Besshi area.

In Wakayama area, CL fluids were extracted from three samples of quartz veins hosted by metabasites covering the metamorphic grade from the chlorite zone, pumpellyite-actinolite facies equivalent, to the biotite zone, amphibolite facies equivalent. Their Li/B ratios increase with metamorphic grade of the host rocks from 0.02 to 0.10 (Sengen et al., 2009). The hydrochemical facies of CL fluids are X-HCO₃ type and the intermediate type between Na-Cl type and X-HCO₃ type. The texture of quartz grains, which retain FIs, show pervasively deformed and recrystallized type for all studied samples.

In Asemigawa area, CL fluids were extracted from six samples of quartz veins covering the metamorphic grade from the chlorite zone to the oligoclase-biotite zone. Their Li/B ratios mainly vary from 0.03 to 0.38, but there is no correlation between Li/B ratio and the metamorphic grade of host rocks. The hydrochemical facies of CL fluids are X-HCO₃ type, except for one sample of Na-Cl type. The texture of quartz grains show pervasively deformed and recrystallized type for all studied samples. Some host rocks show distinct S-C fabrics. These observations suggest the rocks in the Asemigawa area pervasively deformed during the exhumation stage.

In Besshi area, studied sample were collected from eclogite facies unit and neighboring schist units, equivalent with amphibolite facies. Li/B value of CL fluids varies from 0.10 to 1.99. Among all studied samples, relatively high Li/B (> 0.4 up to 2.0) ratio is identified only in this area. The samples with high Li/B ratio are characterized by both the Na-Cl type hydro-chemical facies and undeformed polygonal quartz fabric.

Two samples of quartz vein intercalated with eclogite show high Li/B ratio (0.27, 0.44), higher ratio of which is almost identical with those of dehydrated fluid from eclogite (Sengen et al., 2009; Marschall et al. 2007). Furthermore, CL fluids extracted from three samples of quartz veins intercalated with metasediments in the neighboring schist unit show much higher Li/B ratio (0.36-1.99). Yoshida et al. (2011) pointed out that Li/B ratio of dehydrated fluids was also controlled by the chemical composition of the host rock.

Raman spectroscopy and microthermometry clearly suggest that all samples applied CL technique contain fluids trapped at multi-stages, covering from prograde, peak and/or retrograde stages. However, some CL fluids obtained from quartz veins mostly free from post-peak deformation in the Besshi area have high Li/B ratio, which is almost identical with eclogite facies dehydrated fluids obtained from meta-serpentinite in Liguria and Betic Cordillera (Scambelluri et al. 2004). These facts suggest that Li/B ratio of dehydrated fluid has a potential for the indicator of the dehydration depth after considering some controlling factors.

キーワード: 深部流体, Li, B, 高压変成帯, 三波川変成帯

Keywords: Deep fluid, Li, B, High-pressure metamorphic belt, Sanbagawa

三波川変成帯上昇期の流体流入と物質移動の変化 Fluid infiltration and change in mass transfer during the exhumation of Sanbagawa metamorphic belt, Japan

宇野 正起^{1*}, 岩森 光¹, 中村 仁美¹, 石川 剛志², 谷水 雅治², 横山 哲也¹

UNO, Masaaki^{1*}, IWAMORI, Hikaru¹, NAKAMURA, Hitomi¹, ISHIKAWA, Tsuyoshi², Masaharu Tanimizu², YOKOYAMA, Tetsuya¹

¹ 東京工業大学 地球惑星科学専攻, ² 海洋開発研究機構 高知コアセンター

¹Department of Earth and Planetary Sciences, Tokyo Institute of Technology, ²Kochi Institute for Core Sample Research, JAM-STE

Introduction: Individual parcel of regional metamorphic rock records physico-chemical conditions such as P-T path, mass transfer and deformation with the Lagrangian specification. On the other hand, a metamorphic belt as an ensemble of such parcels may provide a large-scale flow field of energy (e.g., temperature, entropy) and mass (including both solid and fluid phases with elements and isotopes) with the Eulerian specification. However, there are so far few models that integrate all the variables stated above. Phase petrology provides mostly the intensive variables (e.g., P-T path), whereas geochemistry provides mostly the extensive variables (time-integrated mass transfer), and these two have been treated separately. Here we combine phase petrology and geochemistry from a scale of mineral grain, and solve them under a simultaneous and consistent set of thermodynamic and mass balance equation. The results revealed the changes in mass transfer with changing P-T paths.

Method: The Sanbagawa metamorphic belt in Japan, the subduction-origin high-P type metamorphic belt, has been surveyed. To understand the nature of fluid during rehydration, we analyzed basic rocks that record retrograde reactions. Major and trace element compositions of each mineral, and bulk rock chemistry have been analyzed with EPMA, LA-ICP-MS, XRF and ICP-MS, respectively. Retrograde P-T path have been obtained by applying the Gibbs' method (e.g. Spear, 1993; Okamoto&Toriumi, 2001) to amphiboles and garnets.

Trace element budget along a specific P-T path were calculated by equating differential mass balance equation for major and trace elements as follows;

$$X_{fluid} dM_{fluid} = \text{Sum}(M_{solid} X_{solid}) + \text{Sum}(X_{solid} dM_{solid})$$

where X and M denote compositions and modes of minerals and dX and dM represent their changes along a specific P-T change. X_{solid} , M_{solid} , dM_{solid} for zoned minerals (amphibole and/or garnet) and X_{fluid} were derived from the results of Gibbs' method, X-ray map and fluid/mineral partition coefficients, respectively. Thus, the unknowns are dM s, and the equations are solved for them. As a result, the mass transfer during a specific P-T change ($X_{fluid} dM_{fluid}$) can be specified.

Furthermore, trace element budget during rehydration reactions were also constrained based on proportionality of bulk fluid-mobile element composition with H₂O (LOI (loss on ignition)). Based on a simple model that accounts for heterogeneity of protolith composition and devolatilization by dehydration reaction, the fluid composition during rehydration was estimated.

Results and Discussion: The P-T path obtained from the least rehydrated sample records the P-T path from 15kbar, 550°C to 11kbar 600°C, which corresponds to the exhumation just after the peak pressure condition. The mass balance analysis revealed that it was a dehydration reaction and Y and Cs increased whereas Ba decreased during this P-T path. No significant change was observed for Rb, Pb and Sr.

It is revealed that fluid mobile elements such as LIL elements, Sr and Pb are mostly proportional to LOI (loss on ignition). LOI and extent of rehydration are proportional in the Sanbagawa belt (Okamoto&Toriumi, 2005), thus the observed enrichment of LILE and Pb are interpreted to be associated with rehydration (from 11kbar 600°C to 3kbar 400°C). The Sr isotope ratios of the basic shists also increase with LOI, implying that the differences in bulk rock chemistry are due to an addition and/or reaction with external source of fluids with high ⁸⁷Sr/⁸⁶Sr. The estimated fluid composition is similar to calculated compositions of slab-derived fluids (Nakamura et al., 2008).

Comparing the results of (1) the mass balance analysis with early part of exhumation P-T path and (2) bulk composition analysis reveals that the mode of mass transfer changed from Y and Cs enrichment with Ba depletion, to LILE (Li, K, Rb, Cs, Sr, Ba) and Pb enrichment, associated with the change in P-T path.

キーワード: 流体, 物質移動, 変成作用, 沈み込み帯, 三波川変成帯, 微量元素

Keywords: fluid, mass transfer, metamorphism, subduction zone, Sanbagawa metamorphic belt, trace element

Isotope and Boron of Quaternary lava in Central Sunda arc, Indonesia: an assessment of slab influence to mantle wedge

Isotope and Boron of Quaternary lava in Central Sunda arc, Indonesia: an assessment of slab influence to mantle wedge

Haryo Edi Wibowo^{1*}, Toshiaki Hasenaka¹, Esti Handini¹, Tomoyuki Shibata², Yasushi Mori³, Agung Harijoko⁴

Haryo Edi Wibowo^{1*}, HASENAKA, Toshiaki¹, HANDINI, Esti¹, SHIBATA, Tomoyuki², Yasushi Mori³, HARIJOKO, Agung⁴

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

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

We estimated contribution of slab-derived fluid of the arc mantle beneath Central Sunda Arc (CSA) in order to better understand the subduction processes. Sunda arc, a part of Pacific ring of fire, extends from Sumatera to Flores. Magmatism beneath Sunda arc is associated with subduction process. CSA is represented by a series of Quaternary volcanoes from fore arc toward back arc, consisting of Merapi, Merbabu, Telomoyo, Ungaran and Muria. We analyzed samples from these volcanoes by using X-Ray Fluorescence, Prompt Gamma-Ray and Instrumental Neutron Activation Analysis. Representative samples were also analyzed by Thermal Ionization Mass Spectrometer to obtain ⁸⁷Sr/⁸⁶Sr and ¹⁴³Nd/¹⁴⁴Nd ratios.

Boron is distinctively enriched in ocean floor sediment and altered oceanic crust (AOC). Higher mobility of boron from sediment to sediment-derived fluid than that of altered oceanic crust makes distinction of fluid sources. Fluid contribution to source mantle was estimated by applying ratio of boron and other mobile elements against HFSE. Estimation at CSA shows general decreasing trend of fluid contribution toward back arc with the highest contribution observed in the middle (Telomoyo) of arc transect, instead of the volcanic front (Merapi). This pattern is different from that estimated by Sr-Nd isotope ratios which are sensitive to modification of mantle by sediment-derived fluid. These isotope ratios show that influence of slab smoothly decreases from volcanic front toward back arc. Distinction between contributions from sediment-derived fluid and AOC-derived fluid was generated by plots of B/La, Rb/La, B/Nb, Rb/Nb against those of Sr and Nd isotope ratios. These plots show that the highest contributions of sediment occur at the volcanic front, whereas that from AOC occurs just a little behind the volcanic front. In addition to the variability of slab-derived fluid contribution, the small variation in isotopic and Nb/Zr, Nb/Ta ratios among fore arc volcanoes of CSA indicate little heterogeneity of the mantle source beneath them. Exception comes from the back arc volcano, Muria, which indicates relatively enriched mantle with only a little slab influence.

キーワード: Boron, Subduction, Slab fluid, Sunda arc

Keywords: Boron, Subduction, Slab fluid, Sunda arc

流体を含む岩石の微細構造と観測物性の標準岩石モデル作成の試み Development of A Preliminary Reference Rock Model for Physical Properties of Fluid-bearing Rocks

中村 美千彦^{1*}, 渡辺 了², 岩森 光³

NAKAMURA, Michihiko^{1*}, WATANABE, Tohru², IWAMORI, Hikaru³

¹ 東北大学大学院理学研究科地学専攻, ² 富山大学大学院理工学研究部, ³ 東京工業大学大学院理工学研究科地球惑星科学専攻

¹Department of Earth Science, Graduate School of Science, Tohoku University, ²Graduate School of Science and Engineering, University of Toyama, ³Department of Earth and Planetary Sciences, Tokyo Institute of Technology

Backgrounds: Recent advances in seismic tomography and magneto-telluric (MT) imaging have increased the potential for mapping the distribution of geological fluids (i.e., aqueous fluids and silicate melts) in the Earth's crust and uppermost mantle, since seismic velocity is sensitive to the fluid fraction, while electrical conductivity is strongly dependent on the connectivity of conductive fluid phases. To interpret the observed physical properties into the nature of the fluid, their correlation with the microstructure of fluid-bearing rocks is essential.

Sources of uncertainty: The seismic wave velocities are dependent on temperature and lithology, i.e., the phase and solid-solution compositions of the major minerals composing the rocks, besides on the fluid fraction. Especially in the middle and lower continental crusts, there is often considerable uncertainty regarding the lithology and temperature. Therefore, when the lithological and thermal structures are not well constrained, the uncertainties of the estimation of fluid distribution becomes large. On the other hand, the electrical conductivity is less dependent on the mineral compositions and phases, compared to the large contrast between those of silicate minerals and fluid phases. Although experimental data of electrical conductivity of minerals and fluids at elevated pressure and temperature are still insufficient, MT observations provide important constrains on the fluid distribution in the crust and mantle.

Scale resolutions of the geophysical imaging and length scale of geological heterogeneity: The observed seismic velocity is an average value typically in a km scale. Space resolution of the MT imaging is a few to tens of km, dependent on the depth. Given the high electrical conductivity in the middle to lower crusts of active convergent margins, interconnection of the fluid phases should be established in these km scales.

Role of heterogeneity: Since the dihedral angles between aqueous fluids and minerals in crustal conditions are generally larger than 60 degree, large fluid fraction is required for the fluid interconnection. The saline components in the fluids decrease the dihedral angle, but carbon dioxide increases, counteracting with each other. The veins and cracks can increase the fluid connectivity locally and anisotropically, but their individual length scale is much smaller than the imaging resolution. There are several other mechanisms to produce small scale heterogeneity or fabrics of the fluid distribution, but they may not responsible for the pervasive fluid interconnection in a km scale. Therefore, grain-scale fluid interconnection is still the first hypothesis to be tested. The relation between the volume fraction and connectivity of the pore fluids should be quantitatively understood for major crustal rocks.

The PROM project: In this context, we have reviewed and compiled the data of seismic velocities, electrical conductivities, and dihedral angles and other microstructural factors that determine the grain-scale fluid distribution for the rocks of crust and uppermost mantle. Although lack of the physical property data at elevated pressure and temperatures does not allow us to develop a comprehensive data base, a possible data set composed of some major rock types and their physical properties as a function of fluid fraction can be presented as a preliminary reference model for the crustal rocks.

キーワード: 岩石物性, 粒間流体, 微細構造

Keywords: physical property of rocks, pore fluid, microstructure

九州地方南部下のC-typeカンラン石の選択配向に起因するS波偏向異方性と流体の分布

Shear wave polarization anisotropy induced by C-type olivine LPO and fluid distribution beneath southern Kyushu

寺田 正¹, 平松 良浩^{1*}, 水上 知行¹

TERADA, Tadashi¹, HIRAMATSU, Yoshihiro^{1*}, MIZUKAMI, Tomoyuki¹

¹ 金沢大学 地球学コース

¹Department of Earth Sciences, Kanazawa University

九州地方南部下のスラブ上面付近には高 V_P/V_S 領域が存在し、流体や蛇紋岩などの存在が示唆されている (Matsubara and Obara, 2011)。流体や蛇紋岩の存在は沈み込み帯における火山活動や地震活動と密接に関係しているため、これらの分布は、沈み込み帯におけるダイナミクスを考える上で重要である。本研究では高 V_P/V_S 領域が存在する九州地方南部において検出されたS波偏向異方性の観測値と鉱物の弾性定数から求められたS波偏向異方性の理論値を比較し、この領域でのS波偏向異方性の成因について考察する。また、九州地方南部下における流体や蛇紋岩の分布とその形態についても議論する。

利用したデータは九州地方南部において2004-2010年にHi-net観測点において観測された深さ30km以上、マグニチュード2.5以上の地震の波形のうち、地表での変換波の影響を避けるために入射角が35度以内であるものに限定した。S波偏向異方性解析では、Silver and Chan (1991)を参考にし、1-20Hzのバンドパスフィルターをかけた水平2成分の波形を用いて、S波部分のパーティクルモーションの共分散行列からその直線性を評価し、速いS波の偏向方向と直交する2つの波の到着時間差を求めた。

九州地方南部では、東北東-西南西から西北西-東南東の偏向方向を示し、到着時間差は0.04-0.63秒であった。地殻の異方性により生じる時間差は0.3秒であるため、0.3秒以上の到着時間差のS波偏向異方性はマントルウェッジにその成因があると考えられる。0.3秒以上の到着時間差を示す波形の波線は深さ100-150kmに存在する高 V_P/V_S 領域を通過する。他の波線経路との比較から、この領域が異方性領域と考えられる。S波偏向異方性の観測値とカンラン石の弾性定数から求められた理論値との比較から、観測値を最も良く説明するのはC-typeカンラン石の選択配向であり、九州南部の深さ100-150kmにおけるスラブ上面の地震波速度異方性層の厚さは到着時間差が0.3秒を超えるS波偏向異方性を示す波線が主に通過する高 V_P/V_S 領域の厚さと、C-typeのカンラン石の選択配向を想定して理論的に求められた地震波速度異方性層の厚さと到着時間差との関係から約13-30kmであると推定される。

上記の結果は、この地震波速度異方性層に流体が分布することを示唆し、二面角の低下 (Mibe et al., 1999) によるカンラン岩内での粒間流体の移動が100km以深で容易になっている可能性が高い。

一方、九州地方のように暖かいスラブが沈み込んでいるような沈み込み帯では、マントルカンラン岩の蛇紋岩化の進行が考えられる。本研究からは、前弧域での蛇紋石の存在を示唆するようなS波偏向異方性は観測されなかった。この観測結果は、Hilaret and Reynard (2009) によって推定された層厚1-3kmの薄い蛇紋岩層の存在と矛盾はしない。

謝辞：本研究では防災科学技術研究所のHi-netのデータを用いました。記して感謝いたします。

キーワード: S波偏向異方性, C-typeカンラン石, 選択配向, 流体, 蛇紋石

Keywords: shear wave polarization anisotropy, C-type olivine, LPO, fluid, serpentine

含水鉱物・炭酸塩鉱物起源の脱水・脱炭酸流体を石英中に包有する実験 SYNTHETIC EXPERIMENTS OF AQUEOUS AND CARBONATE FLUID INCLUSIONS

大井 修吾^{1*}, 小木曾 哲¹, 平島 崇男²
OHI, Shugo^{1*}, Tetsu Kogiso¹, Takao Hirajima²

¹ 京都大学大学院人間・環境学研究科, ² 京都大学大学院理学研究科

¹Human and Environmental studies, Kyoto University, ²Science, Kyoto University

Deep aqueous fluids from subducted slab affect volcanic activity and seismicity in the subduction zone. (e.g., Schmidt and Poli, 1998) To reveal the chemistry of slab-derived fluids is crucial for understanding the material circulation in subduction zones, but as yet it is very difficult to experimentally constrain the chemical composition of these fluids. Diamond-trap experiments in combination with LA-ICP-MS analyses of frozen samples have been used to analyze chemical compositions of aqueous fluids in equilibrium with complex mineral assemblages (e.g., Kessel et al., 2004). However, in order to accurately determine fluid compositions experiments also need to be designed to account for modification of the fluid during quenching. Synthetic fluid inclusions trapped during high-pressure experiments can keep the composition of the fluids produced at run conditions. We have developed a method to trap fluids liberated during decomposition of hydrous and carbonate minerals as fluid inclusions in a quartz crystal.

The synthetic fluid inclusion technique (Sterner and Bodnar, 1984) was employed in this study. Synthetic fluid inclusions were formed in synthetic quartz provided by Nihon Dempa Kogyo Co., LTD. Quartz single crystals were cut into about 1-2mm size, heated to 450 C, and then quenched in cold distilled water to make cracks within it. After drying in a vacuum oven at 150 C overnight, the quartz crystals with cracks were rapped in a piece of Pt foil (2.5um-thick) and sealed in Au or Pt capsules with various mineral assemblages, such as Mg(OH)₂, CaCO₃+SiO₂, CaCO₃+SiO₂+H₂O and mMgCO₃Mg(OH)₂nH₂O+SiO₂+Mg(OH)₂. The capsule was placed in a solid-media piston-cylinder apparatus and kept at the pressure range 0.5-1 GPa and at the temperature range 800-1100 C for 3-192 hours.

After quenching, thin sections (200-500um-thick) were prepared to examine with an optical microscope, Raman spectroscopy and microthermometry. The analyses for microthermometry were performed by referring Diamond (2001) and using the computer program Loner AP (e.g., Bakker, 2009).

Fluids liberated from Mg(OH)₂ were successfully trapped as fluid inclusions in all experiments. Microthermometry for a fluid inclusion in the sample synthesized at 800 C and 1 GPa for 3 hours showed the homogenization temperature of 251 C, molar volume of 22.8 cm³/mol. However, the calculated isochores shows that the temperature calculated for 1 GPa was 961 C, which was different from the run condition.

Fluid inclusions were not observed in experiments with CaCO₃+SiO₂, whereas were successfully synthesized in experiments with CaCO₃+SiO₂+H₂O. The size and amount of fluid inclusions in these samples were smaller than those in the experiments with Mg(OH)₂. Raman spectra showed the peaks of CO₂ but the broad peaks of H₂O were not observed clearly.

Fluids liberated from mMgCO₃Mg(OH)₂nH₂O+SiO₂+ Mg(OH)₂ were successfully trapped as fluid inclusions in all experiments. Raman spectra showed that the fluid inclusions in these samples were composed of H₂O and CO₂. Microthermometry for the three fluid inclusions in the sample synthesized at 850 C and 1GPa for 18 hours showed that the homogenization temperatures from vapor-liquid carbon phase to liquid carbon phase were 24-29.5 C and total homogenization temperatures were 255-269 C, yielding molar volumes of 24.2-26.3 cm³/mol and total mole fractions CO₂ of 12-18 mol%. The calculated isochores give 910-1033 C at 1GPa, which had wide distribution.

In the experiments of anhydrous systems, liberated fluid could not be trapped during crack healing or perhaps crack healing did not occur in the experimental conditions in present study. The temperatures estimated from microthermometry were different from run conditions.

To interpret the condition that fluid inclusions are produced, it is needed to figure out the reason of this discrepancy by more analyses with precise observations of occurrence.

Keywords: synthetic fluid inclusion, hydrous mineral, carbonate mineral, piston-cylinder

高封圧、間隙圧下における地殻岩石の地震波速度測定

Measurement of seismic velocity of crustal rocks under high confining pressure and pore pressure

原田 裕也^{1*}, 片山 郁夫²

HARADA, Yuya^{1*}, KATAYAMA, Ikuo²

¹ 広島大学大学院理学研究科地球惑星システム学専攻, ² 広島大学大学院理学研究科地球惑星システム学専攻

¹Department of Earth and Planetary Systems Science, Hiroshima University, ²Department of Earth and Planetary Systems Science, Hiroshima University

はじめに

地球内部の水は主にプレート沈み込み帯で供給されており、沈み込み帯における地震や島弧での火山活動において重要な役割を担っている。この領域で起こるスロースリップや微動はこの水が関係していると考えられている。関東地方における地震波モグラフィから、0.337の高ポアソン比領域が観測され、非地震性域となっていることが指摘された(Kamiya and Kobayashi.,2000)。また東南海、四国地方でも同様の0.3を超える高いポアソン比が観測され、これらの領域はスロースリップや低周波微動の発生域と一致している(Kodaira et al., 2004 ; Shelly et al., 2006)。関東地方から四国地方にかけて比較的若く温かい海洋プレートが沈み込んでいるため、この領域では0.29の高いポアソン比をもつアンチグライトが安定して存在しているかもしれない。この場合、高いポアソン比をもつにはマンツルの蛇紋岩化に加えて多量の水が必要である。この水の形状や量を解明することを目的とし、高封圧、間隙圧下における地殻岩石の地震波速度の研究を行った。

実験方法

地震波速度の測定には広島大学の油圧式圧力試験機を用いて、パルス反射法で算出した。試料はベルファースト産の斑禰岩と稲田産の花崗岩で、それぞれ直径20mm、長さ5~10mmの円筒形に整形されている。測定は封圧のみをかけた実験と封圧と間隙圧をかけた実験を行い、後者では50MPaの間隙圧を加えた。

結果と考察

封圧のみの実験では、斑禰岩と花崗岩の両方について最大封圧200MPaをかけて測定した。斑禰岩について各封圧(100, 140, 180MPa)における地震波速度はそれぞれ、 $V_p=6.88, 6.94, 6.83$ km/s, $V_s=3.85, 3.91, 3.79$ km/sで、花崗岩は200MPaにおいて $V_p=4.94-6.09$ km/s, $V_s=2.89-3.36$ km/sとなった。これらの値はChristensen,1996の値と比較して全体的に低いが、斑禰岩の V_s に関しては同様の値となった。加圧過程と減圧過程の両方の測定から、速度変化の再現性と封圧によるクラックや空隙の開閉の効果が確認できた。

間隙圧を加えた実験では、花崗岩のみについて封圧60MPa、間隙圧50MPaの加え、有効圧10MPaの状態での測定した。間隙圧を加える前の封圧60MPaでは、地震波速度は $V_p=5.17-5.60$ km/s, $V_s=2.84-4.36$ km/sとなった。その後間隙圧を50MPaまで加えると $V_p=5.02-5.18$ km/s, $V_s=2.13-3.64$ km/sとなり、わずかに変化した。しかし、試料の反射波の信号が非常に弱いためにそれらの値には大きな不確実性がある。このパルスの減衰は反射波の分裂やバックグラウンドとの重複、そして試料とアセンブリのスペーサーとの間の反射率が関係していると思われる。

キーワード: 地震波速度, 地殻岩石, ポアソン比, 地殻流体, 間隙圧, 沈み込み帯

Keywords: seismic velocity, crustal rock, Poisson's ratio, geofluid, pore pressure, subduction zone

東北地方 3次元上部マントル電気伝導度構造探査

A three-dimensional electrical conductivity distribution model of the upper mantle beneath Tohoku district

市來 雅啓^{1*}, 小川 康雄², Boonchaisuk Songkhun², 出町 知嗣¹, 吹野 浩美⁴, 平原 聡¹, 本蔵 義守², 海田 俊輝¹, 神田 径², 河野 俊夫¹, 小山 崇夫³, 松島 政貴⁴, 中山 貴史¹, 鈴木 秀市¹, 藤 浩明⁵, 上嶋 誠³
ICHIKI, Masahiro^{1*}, OGAWA, Yasuo², Songkhun Boonchaisuk², DEMACHI, Tomotsugu¹, FUKINO, Hiromi⁴, HIRAHARA, Satoshi¹, HONKURA, Yoshimori², KAIDA, Toshiki¹, KANDA, Wataru², KONO, Toshio¹, KOYAMA, Takao³, MATSUSHIMA, Masaki⁴, NAKAYAMA, Takashi¹, SUZUKI, Syuichi¹, TOH, Hiroaki⁵, UYESHIMA, Makoto³

¹ 東北大学大学院理学研究科, ² 東京工業大学火山流体研究センター, ³ 東京大学地震研究所, ⁴ 東京工業大学大学院理工学研究科, ⁵ 京都大学大学院理学研究科

¹Grad. Sch. of Sci., Tohoku Univ., ²Volcanic Fluid Res. Center, Tokyo Tech, ³Earthq. Res. Inst., Univ. Tokyo, ⁴Grad. Sch. of Sci. and Eng., Tokyo Tech, ⁵Grad. Sch. of Sci., Kyoto Univ.

While plenty of three-dimensional (3-D) seismic tomographic images has been revealed (e.g. Zhao et al., 1992; Nakajima et al., 2001), only a few 3-D electrical conductivity distribution model has been proposed in terms of wedge mantle in subduction zones (e.g. Patro et al., 2007). Introducing the state-of-the-art mobile magnetotelluric (MT) observation systems (LEMI-417 and NIMS), we have acquired MT data at Tohoku district, northeastern Japan for the aim of 3-D electrical conductivity distribution in the wedge mantle. Typical observation duration are three months at each site, and MT response functions from 10 to 20000 seconds in period have successfully collected with fine quality. The site location is arranged with ca. 20 km interval. The MT phase response functions at many sites show over 90 degrees over 5000 seconds and suggest that 3-D distribution beneath this area.

Simple checker board resolution tests have been performed to estimate resolution. Regular cubes with 40 km on side and 10 ohm-m in conductivity embedded in 1000 ohm-m matrix were clearly recovered down to 120 km in depth using the synthetic data, while those with 20 km on side were not recovered clearly.

We carried out the three-dimensional inversion analysis with WSINV3DMT code (Siripuvaporn et al., 2005). Although the inversion process is still on the way and the conversion is not enough, the east-west profile (across the Japan Arc) of the preliminary result shows that conductive region appears at about 120 km in depth beneath back-arc region and elongates obliquely towards the volcanic front. The north-south profile (along the Japan Arc) shows the vertical conductive and resistive columns appears alternatively. That basic images are well consisted with the seismic tomographic model (Nakajima et al., 2001), provided that conductive and low velocity zone should correspond with each other. Obtained the final 3-D model, our final destination is to estimate the mantle geotherm and fluid distributions in the wedge mantle using seismic tomographic and electrical conductivity images.

東北日本弧での溶融と水の量の数値的解析 Numerical analyses of water content and melting regimes in the NE Japan arc

堀内 俊介^{1*}, 岩森光²

HORIUCHI, Shyunsuke^{1*}, Iwamori Hikaru²

¹ 東京大学地震研究所, ² 東京工業大学

¹Earthquake Research Institute, The University of Tokyo, ²Tokyo Institute of Technology

Melting and seismic structure beneath the northeast Japan arc considering upon the uncertainties of H₂O content is modeled to estimate the relation between melting region and H₂O content, and restrict water content distributed in mantle wedge. This model results show that increasing water content, a weak melting starts to occur beyond $C_{H_2O} = 0.07$ wt%, and the calculated P-wave and S-wave velocity structures between $C_{H_2O} = 0.10$ wt% and 0.40 wt% can explain tomographic low velocity zones. The distribution of melt production rate ($C_{H_2O} = 0.15$ wt%) shows that all three mechanism (Flux, decompression, and compression melting) are necessary to explain volcanic activity at back arc, volcanic front, and intermediate region in the Northeast Japan arc. In the case of $C_{H_2O} = 0.15$ -0.34 wt%, the model results of volcanic eruption rate can explain observed across-arc features in terms of relative intensities (i.e., spatial location and pattern). Considering into the comparison with tomographic data, melting mechanism, and the comparison with volcanic eruption data, this model results for $C_{H_2O} = 0.15$ -0.34 wt% can explain volcanic activity in the Northeast Japan arc.

キーワード: 水, 溶融, 沈み込み帯

Keywords: water, melting, subduction zone