

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、日本列島下に局在化しつつ広く分布し、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いないが、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 (コートランダイト) 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石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 分ごとに行なった。

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應について 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碎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碎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。一方で複数の破碎帯湧水からは、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、断層破碎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