

放射光による単一流体包有物の化学分析: 熱水鉱床への応用 Chemical analysis of individual fluid inclusion by SXRF: application to hydrothermal ore deposits

林 謙一郎^{1*}
HAYASHI, Ken-ichiro^{1*}

¹ 筑波大学生命環境系
¹ Faculty of Life and Environmental Sciences, University of Tsukuba

鉱床生成に関与した熱水溶液の化学組成の情報は、鉱液の起源とその進化、重金属の溶存状態や運搬機構、鉱液から鉱石鉱物の沈殿機構などを議論する際には基礎的な資料として重要である。鉱液の組成として、流体包有物の塩濃度は従来から報告されてきたが、重金属の組成の情報は限られている。近年微小部分分析技術の発展により単一流体包有物の組成分析値が報告されるようになった。ここでは放射光蛍光X線法 (SXRF) による単一流体包有物の化学分析の試みを報告する。

茨城県高取鉱床における熱水系の変遷について議論するために、石英中に包有される流体包有物の重金属元素の定量分析を行った。高取鉱床の鉱化は、鉄マンガン重石・螢石・トパズ・白雲母・リシア雲母が形成された初期ステージ、硫化鉱物・螢石が形成された中期ステージ、炭酸塩鉱物・錫石が形成された後期ステージ、炭酸塩鉱物・粘土鉱物が晶出す末期の4期のステージに区分される。石英は全ステージにわたって晶出しており、各ステージの石英試料から両面研磨薄片を作成し、流体包有物の産状を詳細に記載した。試料内において、石英結晶にみられる成長縞と一連の擬二次包有物群の交差関係から、一つの結晶内での擬二次包有物群の捕獲順序を正確に決定した。SXRF 定量分析の結果、初期ステージの流体には W が 1400~3700 ppm、Fe が 4100~6200 ppm、Mn が 1000~1800 ppm、Cu が 1500~3000 ppm、Zn が 1800~2900 ppm と高濃度の重金属が含まれていることがわかった。一方、中後期ステージの流体包有物から W は検出されず、Fe が 300~600 ppm、Mn が 100~300 ppm、Cu が 50~100 ppm、Zn が 50~100 ppm 程度含まれ、鉱化作用の進行につれて重金属濃度は顕著に減少することが明らかとなった。

H₂O-NaCl 系で Cu および Zn の気/液分配実験を行った。ここで Cu は揮発性を有する金属、一方 Zn は揮発性の低い金属であると考え、両者の気/液分配係数を比較することにより、この問題へのアプローチとした。マグマ近傍の高温熱水系で起こる物理化学的過程を再現するために、650℃までの高温条件で、共存する気相および液相中への金属の分配を求めた。通常のバッチ法によって気相および液相を高温状態で個別にサンプリングする事はこの温度領域では実験的に困難である。従って、気相と液相の共存下で流体包有物を合成し、流体包有物中に取り込まれた溶液を分析することにより共存する液相および気相の組成を求めた。流体包有物の分析は SXRF によって単一流体包有物中に取り込まれた気相および液相中の Cu および Zn 濃度を定量分析することにより求めた。その結果、硫黄が存在すると Cu の分配係数が 1.0 を越えることが明らかとなった。斑岩型鉱床に伴われる気相および液相包有物は、ここで報告した銅の気/液分配係数物の分析から得られる値とほぼ一致し ($\log K_D \approx -1$)、天然の現象を実験的に再現することに成功した。この結果は、銅は硫黄と安定な錯体を形成して気相中に選択的に分配するためであると解釈することができる。硫黄との親和性が弱い亜鉛は塩化物錯体として溶存するので液相中に留まる事を示唆している。

キーワード: 流体包有物, 放射光蛍光X線法, 化学分析, 鉱化流体
Keywords: fluid inclusion, SXRF, chemical analysis, ore-forming fluid

Characteristics of Magmatic Hydrothermal System at Southeastern Martabe High Sulfidation Epithermal Deposit, Indonesia Characteristics of Magmatic Hydrothermal System at Southeastern Martabe High Sulfidation Epithermal Deposit, Indonesia

SAING, Stephanie^{1*}; TAKAHASHI, Ryohei¹; IMAI, Akira¹
SAING, Stephanie^{1*}; TAKAHASHI, Ryohei¹; IMAI, Akira¹

¹Graduate School of Engineering and Resource Science Akita University

¹Graduate School of Engineering and Resource Science Akita University

The Martabe Au-Ag deposit, North Sumatra Province, Indonesia is a high sulfidation epithermal deposit, which is hosted by Neogene sandstone, siltstone, volcanic breccia, and andesite to basaltic andesite of Angkola Formation. The deposit has six ore bodies that occur as silicified massive ore (enargite-luzonite-pyrite-tetrahedrite), quartz veins (tetrahedrite-galena-sphalerite-chalcocopyrite), banded sulfide veins (pyrite-tetrahedrite-sphalerite-galena) and cavity filling. All ore bodies were controlled by N-S and NW-SE trending structures. The Barani and Horas ore bodies are located in the southeast of the Purnama ore body. Fluid inclusion microthermometry and alunite-pyrite pairs sulfur isotopic geothermometry show slightly different forming temperature among the ore bodies. Formation temperature of the Purnama ore body ranges from 215 to 260°C and salinity from 5 to 8 wt% NaCl equivalent. Formation temperature of the Barani ore body ranges from 200 to 240°C and salinity from 0 to 2.5 wt% NaCl equivalent and those of the Horas ore body ranges from 240 to 260°C and from 2 to 3 wt% NaCl equivalent, respectively. The general sequences of mineralization at Martabe are divided into the early stage as main high sulfidation mineralization stage and the late stage of oxidation and brecciation, which were followed by weathering. Sulfides (enargite-luzonite-pyrite-tetrahedrite) that were associated to gold and silver are abundant at the Purnama ore body. The Barani and Horas ore bodies are less silicified and sulfide abundance is less than the Purnama ore body. The salinity and sulfur isotopic values indicate a mixing trend among different fluids. Salinity of fluid inclusion decrease from higher salinity (> 5 wt% NaCl equivalent) in the Purnama ore body to lower salinity (< 3 wt% NaCl equivalent) in the Barani ore body which is directly located in southeast of the Purnama ore body. The sulfur isotope ratio values of sulfide and sulfate in Purnama range from -4.2 to +5.5 ‰ and from +1.2 to +26.7 ‰, and those in the Barani range from -4.3 to +26.4 ‰ and from +3.9 to +18.5 ‰, respectively. The Horas ore body shows low salinity but higher formation temperature compared to Barani which possibly indicate different mixing condition unrelated with Purnama and Barani ore bodies. The sulfur isotope ratio values of sulfide and sulfate in the Horas ore body range from -11.8 to +3.5 ‰ and from +1.37 to +25.7 ‰. At the Purnama and Barani ore bodies, alteration assemblages consist of quartz-kaolinite-dickite - alunite - illite - pyrophyllite and ore mineral assemblages are mostly composed of enargite-luzonite-pyrite-tetrahedrite. In contrast, mineralization style at the Horas ore body including the alteration assemblages (quartz - alunite - illite - dickite - muscovite) and ore forming temperature is different from the Purnama and Barani ore bodies.

キーワード: epithermal high sulfidation, sulfur isotope, fluid inclusion microthermometry

Keywords: epithermal high sulfidation, sulfur isotope, fluid inclusion microthermometry

資源地球科学におけるリチウム同位体ツールの可能性 Lithium isotope index as powerful research tool for earth resource

西尾 嘉朗^{1*}
NISHIO, Yoshiro^{1*}

¹ 海洋研究開発機構
¹JAMSTEC

電気自動車やハイブリッド車での二次電池として需要がさらに高まることが予想されているLiの濃集メカニズムの解明は、資源地球科学における重要な研究課題である。最も軽いアルカリ金属元素であるLiは、流体と共に挙動しやすい元素でもある。堆積物等の岩石と流体が共存する系においては、流体に分配されるLi量は温度と共に増加する。そして、高温で流体に分配されたLiは他の元素と比較して、冷却過程においても鉱物相に再び取り込まれにくい。その結果、高温を経験した深部流体と低温しか経験していない表層水のLi濃度の違い極めて大きい。この深部流体と表層水の大きなLi濃度差ゆえに、Liは他の元素に比べて表層水混入の影響を受けにくい。また、Liの⁷Li (7.5%)と⁶Li (92.5%)の2つの安定同位体比 (⁷Li/⁶Li)は流体の起源等において重要な指標となる。流体と堆積物等の固体が共存する場合、流体の⁷Li/⁶Li比は、共存する岩石の⁷Li/⁶Li比より常に高いが、その差は温度が上昇するにつれ小さくなる。それゆえ、Li同位体組成を用いて、深部流体の生成温度を推定することができる。

本発表では、このLi同位体指標の基本的特徴を話した後に、資源地球科学ツールとして利用の可能性について述べる。

キーワード: リチウム同位体, 地殻深部流体, 地球化学温度計, 流体包有物

Keywords: lithium isotope, deep crustal fluid, geochemical thermometer, fluid inclusion

西太平洋の島弧・背弧域の海底熱水系における噴出熱水中のリチウム同位体比組成 Li isotopic composition of submarine vent fluids from arc and back-arc hydrothermal systems in the western Pacific

荒岡 大輔^{1*}; 西尾 嘉朗²; 蒲生 俊敬³; 山岡 香子⁴; 川幡 穂高³

ARAOKA, Daisuke^{1*}; NISHIO, Yoshiro²; GAMO, Toshitaka³; YAMAOKA, Kyoko⁴; KAWAHATA, Hodaka³

¹産総研・地圏資源, ²海洋研究開発機構, ³東大・大気海洋研, ⁴産総研・地質情報

¹GSJ, AIST, ²JAMSTEC, ³AORI, The Univ. of Tokyo, ⁴GSJ, AIST

Submarine hydrothermal systems significantly contribute to heat and elemental fluxes to the ocean. Vent fluid geochemistry in mid-ocean-ridge (MOR) hydrothermal systems were well-studied, while studies on vent fluid geochemistry in arc and back-arc systems with various geological characteristics were insufficient, especially in terms of lithium. To reveal control factors on lithium in arc and back-arc hydrothermal systems and lithium isotopic behavior in water-rock interaction at high temperature, we determined Li contents and its isotopic compositions of 11 vent fluids collected from 5 submarine arc/back-arc hydrothermal systems in the western Pacific.

Based on mass balance calculation, Li in vent fluids are dominated by seawater-rock (seawater-sediment) interaction in sediment-starved (sediment-hosted) hydrothermal systems in arc and back-arc basins at equilibrium. Li contents in vent fluids is also influenced by phase-separated processes, by temperature-related partitioning of rock Li into fluid phase, and by host rocks and sediments. In contrast, Li isotopic composition in vent fluids is affected by host rocks and sediments, but not by phase-separated processes. These results demonstrate that lithium is a useful tracer for investigating geological processes occurred underground such as a phase separation process and water-rock/water-sediment interaction at high temperature.

キーワード: 海底熱水系, リチウム同位体比, 噴出熱水, 島弧, 背弧海盆

Keywords: submarine hydrothermal system, lithium isotope ratio, vent fluid, arc, back-arc basin

地温勾配下における堆積盆間隙水の塩分濃度分布 Salinity of pore waters in sedimentary basins under geothermal gradients

吉村 俊平^{1*}
YOSHIMURA, Shumpei^{1*}

¹ 山形大学理学部地球環境学科

¹Dept. Earth Environ. Sci., Yamagata Univ.

<はじめに>

堆積盆の間隙水は、続成作用、鉱床形成、炭化水素類の生成・輸送などにおいて重要な役割を果たしている。これまでの研究により、間隙水はしばしば海水より高い塩分濃度を有し、その濃度は深部ほど高く、400g/Lを超える場合もあることが知られている (e.g., Kharaka and Hanor, 2003)。そのような高濃度の塩水の成因としては、堆積盆深部からの岩塩の溶出、海水の蒸発、水-岩石相互作用、炭化水素形成に伴う H₂O の枯渇、高温下での気液分離、海水の凍結、頁岩による濾過効果など、様々なプロセスが提案されてきた。中でも、多くの堆積盆において岩塩が存在することから、岩塩の溶出が主要な原因と考えられている。しかし、岩塩が存在しない場でも塩分濃度が下部ほど高くなる傾向が見いだされることから (e.g., Xie et al., 2003)、岩塩を必要としない、より普遍的な塩分濃縮メカニズムの存在が示唆される。

本研究では、鉛直方向に地温勾配・圧力勾配・重力ポテンシャル勾配の存在する場に塩水が置かれ、平衡状態に達すると、塩分濃度勾配が自然に生じ、深部ほど高濃度になることを理論的に示した。間隙水の塩分の化学ポテンシャルは、温度項・圧力項・濃度項・重力ポテンシャル (位置の関数) の和で表される。深部ほど高圧のため、圧力項は増加する一方、高温のために温度項は低下する。また重力ポテンシャルは低下する。これらの総和は、一般に深部ほど低下する。最終的な平衡状態では、どの深度でも化学ポテンシャルが等しいはずであるから、濃度項が増加することで低下した分を補い、その結果、深部ほど高濃度になると考えられる。この考えのもと、各深度の塩濃度を計算した。

<化学平衡モデルと計算結果>

簡単のため、間隙水を塩化ナトリウム水溶液で近似し、Pitzer et al. (1984), Rogers and Pitzer (1982) のモデルを用いて状態変数を計算した。その際、純水の誘電率と状態方程式には、それぞれ Archer and Wang (1991), IAPWS97 を用いた。まず、堆積物コラムの各深度において、温度・圧力を与え、重力項も含めた化学ポテンシャルを計算した。次に、その値とコラムの最上部 (海底面に相当) での値の差を濃度項に帰し、塩化ナトリウムの濃度を算出した。その結果、深部ほど濃度は増加し、実際に観測されている塩濃度と同程度となった。また、濃度勾配は、温度勾配の大きさにほぼ比例した。例えば、温度勾配を 0.05K/m、最上部の温度と塩分濃度をそれぞれ 2℃、32g/L とすると、厚さ 2000 m の堆積物の底部では 208g/L まで増加した。温度勾配がない場合でもごくわずかに増加し、同じ条件で 36g/L となったが、これは、重力ポテンシャルだけでは実際の塩分濃度分布を説明できないとする Mangelsdorf et al. (1970) の結論と調和的である。また、淡水~汽水域の堆積盆を想定し、最上部の塩分濃度を 1g/L とすると、同じ条件で 24g/L に達した。以上から、間隙水が鉛直方向に平衡の状態に達すれば、下部ほど塩分濃度が高くなる分布が普遍的に作られることが示された。

<応用可能性>

本研究の手法は、流体が静的とみなされる場にさえあれば、地殻内流体、変成流体、マグマ性流体、マントル流体など、堆積盆以外の流体の研究にも応用可能と考えられる。また、この濃度分布は化学平衡によって決まるものであるため、流体の組成分布や流れを理解するための基準になると考えられる。

キーワード: 間隙水, 塩分濃度, 堆積盆

Keywords: pore waters, salinity, sedimentary basins

深部花崗岩中の地下水と二次鉱物中における希土類元素の分配 Distribution of rare earth elements between deep granitic groundwater and fracture filling carbonate

宗本 隆志^{1*}; 大森 一秋¹; 岩月 輝希¹
MUNEMOTO, Takashi^{1*}; OHMORI, Kazuaki¹; IWATSUKI, Teruki¹

¹ 日本原子力研究開発機構
¹ Japan Atomic Energy Agency

水-鉱物反応は地質環境における物質移動特性に影響を及ぼす重要な地球科学プロセスの一つである。水-鉱物反応による元素の移動性は水質条件によって複雑に変化し、鉱物の溶解/沈殿、酸化/還元、吸着/脱着といった化学反応によって支配されるため、それらに関わる調査解析手法の開発は、地球表層環境における物質移動プロセスを明らかにするうえで重要な研究課題の一つである。特に、希土類元素 (YREE: La-Lu, Y) の鉱物中への分配挙動は環境条件の変化にしたがって、YREE 存在度パターンとして保存されるため、地球化学プロセスを把握するための指標として利用されてきた。本研究では深部花崗岩中の地下水と二次鉱物を対象に地下水の水質条件の変化にともなう YREE の分配挙動について把握し、地質環境における物質移動プロセスを明らかにするための調査解析手法の開発を目指す。

研究を実施した岐阜県瑞浪地域には、堆積岩中では Na-HCO₃ 型、花崗岩の浅部では Na-Cl 型の地下水が分布し、深度の増加にしたがって Ca-Cl 型に近づくことが明らかとなっている。また、ボーリングコア試料から、花崗岩の割れ目には充填鉱物として炭酸塩鉱物の生成が確認されている。炭酸塩鉱物は反応性が高く、地下水中から容易に沈殿するため、沈殿時の水質環境や沈殿後の移動性を反映している可能性がある。本研究では瑞浪超深地層研究所の地下坑道 (深度 200, 300, 400 m) から掘削されたボーリング孔および地表から掘削したボーリング孔の深度 650 m および 1150 m から採取した地下水と、ボーリングコアから採取した炭酸塩鉱物中の YREE 濃度の測定を行った。また、炭酸塩鉱物中の酸素・炭素同位体比の測定を行い、炭酸塩鉱物の生成環境についての検討を行った。

ボーリング孔から採取した地下水中の元素分析結果から、深度 200~400 m では Na-Cl 型、深度 650 m および 1150 m では Ca-Cl 型の地下水が分布していることが確認された。地下水中の全 YREE 濃度は深度の増加にしたがって増加し、地下水中の YREE パターンは深度 200~400 m では原子番号の大きい REE(HREE) に富み、深度 650 m および 1150 m では原子番号の中間的な REE(MREE) に富む形状を示した。また、深度 650 m および 1150 m の地下水から負の Y 異常が確認された。熱力学的解析により、深度 200~400 m の地下水において、YREE は炭酸錯体が主要な溶存種であることが確認されたことから、HREE に富む地下水は炭酸錯体の寄与によって形成したと考えられる。MREE に富む YREE パターンは鉄酸化水酸化物等による吸着とそれらの溶解が原因であると考えられており、鉄酸化水酸化物への YREE の分配係数は負の Y 異常が報告されている [1, 2]。このことから深度 650 m および 1150 m の地下水では、地下水中で生成した鉄酸化水酸化物が一度 YREE を吸着し、現在の還元的な地下水中で溶解することで放出されて YREE パターンが形成したと考えられる。

ボーリングコアから採取した炭酸塩鉱物中の酸素・炭素同位体組成について、酸素同位体は深度の増加に関わらず、試料によるばらつきが見られたため、深度の変化による炭酸塩鉱物の生成温度の変化は確認されなかった。一方、炭素同位体比は深度の増加によって重くなる傾向を示したことから、過去にこの地域に涵養した淡水と海水の混合した地下水から沈殿したと考えられる。炭酸塩鉱物中の YREE を花崗岩中の YREE で規格化したところ、深度 200~400 m では花崗岩と同様の負の Eu 異常が確認された一方 [3]、地表からのボーリング孔の掘削長 670~1294 m では正の Eu 異常が確認された。このことから、掘削長 670m~1294 m で生成した炭酸塩鉱物は花崗岩と比べて Eu に富む水質条件で沈殿したと考えられる。

以上の結果から、深部花崗岩中における地下水と二次鉱物中の YREE の分配挙動は、地球表層環境における物質移動プロセスを明らかにするうえで有用な指標になりうると考えられる。

引用文献

- [1] Johannesson and Zhou, 1999, *Geochim. Cosmochim. Acta* 63, 153-165.
- [2] Bau, 1999, *Geochim. Cosmochim. Acta* 63, 67-77.
- [3] Takahashi et al., 2002, *Chem. Geol.* 184, 311-335.

キーワード: 希土類元素, 花崗岩, 地下水
Keywords: rare earth elements, granite, groundwater

珪長質火成活動に伴われる熱水における軽希土類と重希土類の分別 Fractionation between LREE and HREE in hydrothermal fluids associated with felsic magmatism

実松 健造^{1*}; 星野 美保子¹
SANEMATSU, Kenzo^{1*}; HOSHINO, Mihoko¹

¹ 産業技術総合研究所 地圏資源環境研究部門
¹ Geological Survey of Japan, AIST

希土類元素(REE)の中でも、重希土類(HREE)は軽希土類(LREE)に比べ地殻存在量が少なく、市場での価格も高い。HREEに富む鉱床(例えば、中国のLongnanやカナダのNechalacho)は熱水変質を受けた珪長質火成岩(花崗岩や閃長岩)に関係している。本研究では、先行研究をレビューしながら、このような珪長質火成岩のLREEとHREEとの分別を引き起こす要因について論じる。

マグマ中ではHREEに比べてイオン半径が大きいLREEがより不適合元素として挙動するため、部分熔融度の低いマグマから形成されたアルカリ岩は一般にLREEに著しく富むがHREEには若干富む程度である。HREE鉱床となり得る火成岩が形成されるためには、特定の元素に富んだアルカリ岩(カーボナタイトを除く)メルトの形成と極度な結晶分化作用といった2つの過程が主に考えられる。前者はNechalacho鉱床のような大陸内のアルカリ岩に代表され、REE、HFSE(high field strength elements)、フッ素、炭酸塩に富む。既報の実験学的研究は、アルカリ元素やフッ素に富むマグマ中ではジルコンが晶出しにくくなることを指摘しており、そのマグマ残液はHREEやZrに富むようになる。一方、Longnan鉱床などに代表されるように、カルクアルカリ花崗岩でも極度に分化することによって、LREEが取り除かれて相対的にHREEに富むようになる場合もある。ただし、このような鉱床は花崗岩が自生変質作用を被り、風化によりREE含有鉱物が分解し、REEが粘土に吸着することによって初めて鉱床になる。

珪長質火成岩から生成した熱水中では、様々な配位子との錯体形成によるLREEとHREEの分別が起こると考えられる。様々な先行研究は熱水中でREE³⁺イオンが炭酸塩、炭酸水素塩、フッ素、塩素、硫酸イオンと錯体を形成することを示唆している。最近の研究ではフッ素REE錯体は150℃以上では安定度定数が低く、フッ素は塩素や硫酸イオンと比べてREEの運搬や分別に重要でないと考えられている(Migdisov et al., 2009)。ただし、REE鉱床では炭酸塩や蛍石が多いのに対し、塩や硫酸塩鉱物の産出は少ないようである。

HREEに富む珪長質岩にはアルカリ変質や蛍石を伴うことが多くの鉱床・鉱微地で確認されているが、アルカリ元素やフッ素に富むアルカリ岩が必ずしもHREEに富むというわけではない。また、熱水中でフッ素がHREEとの錯体形成で重要な役割を果たすわけではないが、塩素、硫酸イオンが重要であるという証拠も十分ではない。REE鉱床のLREEとHREEとの分別については不明な点も多く、マグマ活動と熱水変質のどちらがその分別において重要であるかを明らかにする研究が期待される。

参考文献

Migdisov, A.A., Williams-Jones, A.E. and Wagner, T. (2009) *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 73, 7087-7109.

キーワード: 重希土類, 軽希土類, 熱水, 分別, 鉱床, 珪長質火成岩

Keywords: HREE, LREE, hydrothermal fluids, fractionation, ore deposits, felsic igneous rocks

Petrogenesis of granitoids in northern Palawan (Philippines) and its implications on rare-earth element mineralization
Petrogenesis of granitoids in northern Palawan (Philippines) and its implications on rare-earth element mineralization

PADRONES, Jenielyn^{1*}; IMAI, Akira²; TAKAHASHI, Ryohei²; GABO, Jillian aira³; TANI, Kenichiro⁴
PADRONES, Jenielyn^{1*}; IMAI, Akira²; TAKAHASHI, Ryohei²; GABO, Jillian aira³; TANI, Kenichiro⁴

¹Graduate School of Engineering and Resource Sciences, Akita University, Japan, ²Faculty of International Resource Sciences, Akita University, Japan, ³Department of Earth Resources Engineering, Kyushu University, Japan, ⁴Department of Geology and Paleontology, National Museum of Nature and Science, Japan

¹Graduate School of Engineering and Resource Sciences, Akita University, Japan, ²Faculty of International Resource Sciences, Akita University, Japan, ³Department of Earth Resources Engineering, Kyushu University, Japan, ⁴Department of Geology and Paleontology, National Museum of Nature and Science, Japan

Global attention brought about by the increasing demand of rare earth elements (REE) has paved the way for various exploration efforts worldwide. Areas with promising REE deposits were revisited. In the Philippines, explorations are now on-going with studies focused on several granitic intrusions. Some of these granitic bodies are distributed in northern Palawan, which is a rifted fragment of the southeastern Eurasian margin during the opening of the South China Sea basin in the Oligocene.

The granitic bodies were investigated for possible concentration of REE during magmatic differentiation. The Kapoas granitoids include granites and granodiorites that are metaluminous, high-K calc-alkaline, and belong to the I-type and ilmenite-series. The granitoids are mostly biotite-rich and contain xenoliths of schists and diorite, quartz xenocrysts, and mafic enclaves. Two separate intrusive bodies are observed: the Mt. Kapoas which is 13.2 Ma in age; and the Bay Peak granite which is dated 14.1 Ma. However, both intrusives have similar geochemical signature, which show LREE enrichment. These granitic rocks were more evolved or highly differentiated I-type, probably generated in the middle to lower continental crust. The REE-bearing minerals are allanite and monazite. The weathered crust also show LREE enrichment. Weathered crust profile shows Ce-anomaly in the B-horizon portion where kaolinite, muscovite and illite act as absorptive materials.

This study also confirmed the presence of the Cretaceous Daroctan granitoids aside from the well-studied Middle Miocene Kapoas granitoids. The Daroctan granitoids include granodiorites and granites which belong to ilmenite-series. The granodiorites contain xenoliths of metasedimentary rocks, quartz xenocrysts and mafic enclaves. It is also sporadically distributed in the northern part of the island but these different intrusive bodies have almost similar ages. The REE-bearing minerals are monazite. Enrichment of LREE in the weathered crust is relatively higher than that of the Kapoas.

Allanite and monazites in the study areas are enriched in Ce, La, Nd, and Sm with associated radioactive element Th. Heavy minerals concentrated in the beach in Erawan and Ombo, which is part of the Kapoas granitoids, contain up to >10,000 ppm of La, Ce, and Sm.

キーワード: Palawan Continental Block, Kapoas granitoids, rare earth element mineralization, monazite, allanite
Keywords: Palawan Continental Block, Kapoas granitoids, rare earth element mineralization, monazite, allanite

琉球弧トカラ列島宝島における浅熱水鉱化作用 Epithermal mineralization at Takarajima of the Tokara Islands

長原 正人^{1*}; 石橋 純一郎²; 奥村 良³; 高宮 幸一³; 横瀬 久芳⁴
NAGAHARA, Masato^{1*}; ISHIBASHI, Jun-ichiro²; OKUMURA, Ryo³; TAKAMIYA, Koichi³; YOKOSE, Hisayoshi⁴

¹九州大学大学院理学府,²九州大学大学院理学研究院,³京都大学原子炉実験所,⁴熊本大学大学院自然科学研究科
¹Graduated School of Science, Kyushuu University, ²Faculty of Science, Kyushu University, ³Kyoto University Research Reactor Institute, ⁴Graduate School of Science and Technology

【はじめに】琉球弧は九州南西部に伸びる島弧である。トカラ列島より西側では海底火山になることもあり研究があまり進んでいない。横瀬ほか(2007, 2010)は、琉球弧の火山フロントにほぼ100 kmの間隔で大型なカルデラが見いだされることを提唱している。その一つが、奄美大島の北方80 kmに位置する宝島と小宝島を外輪山の一部とする宝島カルデラである。宝島では、凝灰角礫岩中に金属硫化物を含む石英脈があることが知られており(大迫1976、中野ほか2008)、過去には宝島金山、鷲ヶ崎鉱山等の鉱山開発の試みもあった。我々は、2013年に宝島の調査を行い、東部の積石海岸において石英脈を胚胎した数m大の転石を発見した。この石英脈とそれに含まれる硫化鉱物を分析し、鉱化の生じた深度・温度を推定することが本研究の目的である。

【手法】宝島の積石海岸および金山跡から鉱石試料を約10個採取した。積石海岸の試料は砂浜に見られた数m大の転石から割り出して採集した。金山跡の試料は廃石所跡から採取した。鉱物同定には偏光顕微鏡及び反射顕微鏡による検鏡、EPMA及びXRD分析を用いた。硫化鉱物の化学組成の分析をEPMA分析を用いて行った。石英脈中の微量元素を定性的に調べるため放射化分析を行った。石英脈中の流体包有物の均質化温度の決定を透過顕微鏡及び加熱ステージを用いた観察により行った。

【結果】採取した鉱石中の石英脈は、幅が最大で数10 cmに及ぶものから数 μ mの網状の組織に至るまで様々なものが見られた。鉱石の造岩鉱物としては、石英の他に緑泥石、輝石、斜長石があり、輝石の一部が緑泥石化していたものが認められた。鉱石鉱物としては、黄銅鉱、方鉛鉱、閃亜鉛鉱、黄鉄鉱がほぼすべての試料に認められた。一部の試料からは、銅藍、四面銅鉱、輝銅鉱、硫カドミウム鉱、重晶石が認められ、エレクトラムが金山跡の試料に認められた。また放射化分析によって、金山跡及び積石海岸の鉱石の双方からAuが検出された。石英には、擬針状、モザイク状組織といった特徴的な組織が観察された。また石英中に含まれる流体包有物のうち気液二相分離を示すものについて均質化温度を決定したところ、210℃を最低温度とする分布を示した。

【考察】先行研究(e.g., Henley, 1985)によると石英に見られた特徴的な組織は沸騰を示唆するものであり、二相分離を示す流体包有物があることもこれを支持する。石英脈中の金属硫化物形成は、熱水の沸騰に伴う浅熱水性鉱化作用で説明できる。石英脈中の流体包有物の均質化温度からは、深度200~300 mで熱水の二相分離が起こったと考えられる。この推定された鉱化深度と観察された硫化鉱物の組合せは、浅熱水性鉱化作用の中でも中硫化型のものとして一致している。一般に中硫化型浅熱水鉱化作用は熱源から数kmの距離で見られるとされており(Sillitoe, 2010)、宝島カルデラのカルデラ底直下にマグマを想定してこれが熱源となる熱水循環系の存在を考えることができる。現在、小宝島の海岸には100℃近い高温の温泉が湧出しており、この熱水循環系が長期にわたり活動を継続している可能性も考えられる。

キーワード: 熱水鉱化作用, 海底カルデラ, 硫化鉱物

Keywords: Hydrothermal mineralization, Submarine volcanic caldera, sulfide mineralization

沖縄トラフ鳩間海丘熱水域における熱水性鉱石の鉱物学的特徴 Mineralogical and Geochemical Study of Hydrothermal Ores from the Hatoma Knoll Hydrothermal Field in the Okinawa Trough

戸塚 修平^{1*}; 中野 宏樹¹; 島田 和彦¹; 石橋 純一郎¹; 野崎 達生²
TOTSUKA, Shuhei^{1*}; NAKANO, Hiroki¹; SHIMADA, Kazuhiko¹; ISHIBASHI, Jun-ichiro¹; NOZAKI, Tatsuo²

¹九州大学大学院理学府地球惑星科学専攻, ²海洋研究開発機構海底資源研究開発センター

¹Department of Earth and Planetary Sciences, Graduate School of Sciences, Kyushu University, ²Research and Development Center for Submarine Resources, JAMSTEC

南部沖縄トラフに位置する鳩間海丘の頂上火口では熱水活動が確認されている。鳩間海丘熱水域の熱水性鉱石は硬石膏や重晶石といった硫酸塩鉱物に富み、熱水の組成はCl⁻に乏しく最高300℃の温度が記録されている。硫酸塩鉱物に富むという特徴は、気液分離の際に金属元素が気相に取り込まれにくいことに関連すると考えられ、硫化鉱物の沈殿が海底下で起こっていることが期待できる。海底下における硫化鉱物の鉱化作用の可能性を調べるため、我々は鳩間海丘熱水域の熱水性鉱石で堆積物に埋まっていた試料を集中的に採取した。本講演では、そのような様々な鉱石試料の分析結果に基づいて、鉱物学的、地球化学的特徴を議論する。

試料はYK07-04、NT08-13、NT11-20、KY14-02の各航海において、しんかい6500およびハイパードルフィンによって海底から採取された15試料を使用した。鉱物同定には反射顕微鏡での観察とXRD(X線回折)、EPMA(電子線マイクロアナライザ)を使用した。またEPMAで硫化鉱物の化学組成を分析した。

各試料の鉱物組み合わせと組織から、試料を5つのタイプに分類した。Type I (fine-grained sulfide ore) は dendritic 組織が見られたことから急冷で生じたものだと思われた。Type II (sulfide dominant ore) は閃亜鉛鉱、方鉛鉱、四面銅鉱といった硫化鉱物に富んでいた。Type II のなかでも特異な2試料を、(1)Sbを化学組成に含む鉱物が非常に多く見られた Type II' (Sb-rich chimney) と、(2)結晶の粒径が1cmと大きい Type II'' (coarse-grained sulfide ore) に分類した。Type III (barite dominant As-rich chimney) は重晶石とAsを含む鉱物がよく観察された。

硫化鉱物の化学組成から2つの興味深い特徴がわかった。1つは閃亜鉛鉱中のMnの濃度で、Type Iの試料で最大11.4%と高い値を示した。またMnに乏しくFeに富む試料も見られた。もう一つは四面銅鉱中のAg濃度で、Type II'の試料で8.27~18.90%と高い値を示した。四面銅鉱ではAgの濃度とSb/(Sb+As)の値に正の相関があった。またその他のAg鉱物の組成からもAgはSbとよく挙動を共にしていると考えられた。

キーワード: 沖縄トラフ, 鳩間海丘, 海底熱水鉱床, 含銀四面銅鉱

Keywords: Okinawa Trough, Hatoma Knoll, Seafloor massive sulfide ore deposit, Ag-rich tetrahedrite

ミャンマー南部アンチモニー鉱床の輝安鉱の硫黄同位体比 Sulfur isotopic compositions of stibnite in antimony deposits, southern Myanmar

実松 健造^{1*}; 間中 崇行²
SANEMATSU, Kenzo^{1*}; MANAKA, Takayuki²

¹ 産業技術総合研究所 地圏資源環境研究部門, ²Neko Minerals Co., Ltd.

¹Geological Survey of Japan, AIST, ²Neko Minerals Co., Ltd.

アンチモニーは一般に変成(続生)流体や熱水から沈澱して鉱床を形成することが多く、金やタンゲステンなどを伴うこともある。ミャンマー南部には小規模なアンチモニー鉱床が南北に多数分布するが、その成因はよく分かっていない。本研究では、いくつかのアンチモニー鉱床から採取した輝安鉱(Sb_2S_3)の硫黄同位体比について論じる。

鉱床は石炭紀からペルム紀前期の Mergui Group および Lebyin Group の泥岩、砂岩、石灰岩に胚胎されており、輝安鉱-石英脈や鉱染状鉱体から構成される。これらの鉱体は変成流体により形成されたのか、またはマグマ性の熱水が混入した流体によって形成されたのかは不明である。鉱床周辺には火山岩はまれであるが、熱源となりうる花崗岩類(磁鉄鉱系及びチタン鉄鉱系)は広域的に分布している。鉱石中では輝安鉱と石英以外の鉱物の産出は少ない。輝安鉱は自形で長柱状を呈し、石英は緻密で乳白色を呈する。顕微鏡下では輝安鉱や石英中に細粒の自形黄鉄鉱が多少確認される。一部の試料では輝安鉱が変質鉱物である cervantite (Sb_2O_4) に縁取られている。

輝安鉱から得られた硫黄同位体比は $\delta^{34}\text{S} = -9.4 \sim +8.2 \text{ ‰}$ まで幅広く変化した。軽い同位体比 ($\delta^{34}\text{S} < 0 \text{ ‰}$) は堆積岩母岩の硫黄に由来すると考えられ、一方で比較的重い同位体比 ($\delta^{34}\text{S} > 0 \text{ ‰}$) はより高温または酸化的な熱水の寄与に起因するのかもしれない。一般的に磁鉄鉱系列花崗岩類はチタン鉄鉱系に比べて重たい硫黄同位体比を示すが、本研究では硫黄同位体比と花崗岩類の分布には関係が見られなかった。

いくつかのアンチモニー鉱床は金の鉱化作用を伴っており、金が回収されていた。これらの鉱石中を fire assay 法で分析した結果、0.1~3 ppm 程度の金が確認された。金含有鉱石の輝安鉱の硫黄同位体比は全て正の値であった。

キーワード: アンチモニー, 輝安鉱, 硫黄同位体, 鉱床, 金, ミャンマー

Keywords: antimony, stibnite, sulfur isotope, deposits, gold, Myanmar

REE-bearing Minerals in Granitoids at Sibolga and Panyabungan, North Sumatra, Indonesia

REE-bearing Minerals in Granitoids at Sibolga and Panyabungan, North Sumatra, Indonesia

IWAN, Setiawan^{1*}; TAKEYUKI, Ogata²; TAKAHASHI, Ryohei²; IMAI, Akira²
IWAN, Setiawan^{1*}; TAKEYUKI, Ogata²; TAKAHASHI, Ryohei²; IMAI, Akira²

¹Graduate School of Engineering and Resource Science, Akita University, Japan, ²Department of Earth Resource Science, Faculty of International Resource Sciences, Akita University,

¹Graduate School of Engineering and Resource Science, Akita University, Japan, ²Department of Earth Resource Science, Faculty of International Resource Sciences, Akita University,

Granitoids in the western part of North Sumatra are being studied to elucidate the genesis of REE mineralization on the basis of mineralogical and geochemical methods. Eleven samples were analyzed by petrography, XRF, SEM and ICP-MS to identify REE-bearing minerals and determine REE concentration.

The granitoids at Sibolga and Panyabungan are separated by 166 km distance, which formed in different settings, but both of the two magmas share ilmenite-series and metaluminous affinity. Petrographic study revealed that granitoids in Sibolga are A-type and ilmenite-series alkali feldspar granite and quartz syenite, formed within plate setting, and that I-type and ilmenite-series quartz syenite in Panyabungan was formed in volcanic arc setting. Allanite, apatite and titanite in the granitic rocks at Sibolga and Panyabungan contain Y, Ce, La, Pr, Nd, and Yb.

The setting changed due to change in tectonics during Late Permian to Cretaceous, from continental rift to magmatic arc setting. The enrichment of REE in the Sibolga and Panyabungan granitoids was caused by crystallization of allanite, apatite, and titanite.

キーワード: Sibolga, Panyabungan, Granitoids, A-type, I-type, ilmenite-series

Keywords: Sibolga, Panyabungan, Granitoids, A-type, I-type, ilmenite-series

中央ラオス、Phon Tiou - Boneng 錫鉱山地域における金属鉱化作用と花崗岩類の岩石記載 Metallic mineralization and petrography of granitoids at the Phon Tiou - Boneng tin mining area, central Laos

高橋 亮平^{1*}; 伊藤 祥也²; Charusiri Punya³; 今井 亮¹; Veeravinantanakul Apivut³; 渡辺 寧¹
TAKAHASHI, Ryohei^{1*}; ITO, Yoshiya²; CHARUSIRI, Punya³; IMAI, Akira¹; VEERAVINANTANAKUL, Apivut³; WATANABE, Yasushi¹

¹ 秋田大学国際資源学部, ² 秋田大学工学資源学部, ³ チュラロンコン大学地質学科

¹Faculty of International Resource Sciences, Akita University, JAPAN, ²Faculty of Engineering and Resource Science, Akita University, JAPAN, ³Department of Geology, Chulalongkorn University, THAILAND

Recently demand and price of tin have been increasing because of development of lead-free solder alloy as a global industry standard. Indium tin oxide (ITO) is also known as a high technology material used for liquid crystal display and so on.

The Phon Tiou and Boneng deposits located in central Laos are medium-scale (>10,000 t Sn) residual and placer tin deposits with total reserves of 10,100 t and 11,600t Sn, respectively. The mining target is cassiterite (SnO₂). Besides, there are several base metal and precious metal deposits and prospects in this area. Recently, Laotian, Thai, Chinese, Russian and North Korean companies are mining mainly tin and processing using shaking table method, in addition to small-scale miners. There are few studies that described metallic mineralization in this area. Objectives of this study are to elucidate petrographic and chemical characteristics of granitoids and metallic mineralization in the Phon Tiou - Boneng tin mining area, specially revealing a source rock of cassiterite, based on magnetic susceptibility, radioactivity, microscopic and EDS-SEM observation, bulk chemical compositions and sulfur isotopic compositions.

The Phon Tiou - Boneng tin mining area is located in Truong Son fold belt formed by Indosinian orogeny during Permian-Triassic period. Basement rock of the study area is Silurian-Devonian sandstone, mica schist and limestone. It is covered by Carboniferous and Jurassic sedimentary rocks, and Quaternary alluvial deposits. There are Triassic granitoids of the Say Phou Ngou and Phon Tiou complexess.

Magnetic susceptibility of the Say Phou Ngou and Phon Tiou granitoids complexes ranges from 0.02×10^{-3} to 1.5×10^{-3} SI and from 0.02×10^{-3} to 0.15×10^{-3} SI, respectively, indicating characteristics of almost ilmenite-series. The radio activity of granitoids ranges from 0.19 to 0.34 μ S and there is no distinct difference between the two complexes. Both the granitoids are composed mainly of quartz, K-feldspar, plagioclase, biotite of 300-700 μ m across and +/- zircon as primary minerals, showing equigranular texture. On the basis of the modal compositions, the Say Phou Ngou and Phon Tiou granitoid complexes are classified petrographically as syenogranite-monzogranite, and syenogranite, respectively. The granitoids of Say Phou Ngou complex (162-242 ppm Zr) contain relatively large amount of zircon included in biotite compared to those of the Phon Tiou complex (64-74 ppm Zr). The Phon Tiou complex (6-9 ppm Sn) is slightly enriched in tin compared to the Say Phou Ngou complex (2-3 ppm Sn).

Grain size of cassiterite contained in alluvial deposits and the concentrate after the table shaking separation ranges from 50 to 200 μ m. The SnO₂ concentrate is ca. 60 wt% and the concentrate contains magnetite, goethite, zircon (ca. 1,500 ppm Zr) and wolframite (ca. 450 ppm W). A sample of cassiterite-bearing alluvial deposits collected from a mining site contains ca. 1,000 ppm Sn and ca. 500 ppm Zr. The Sn content of a hard rock collected from the outcrop beside the mine is up to ca. 1,500 ppm, and we concluded that it is the source rock of cassiterite. The rock is composed mainly of equigranular quartz of 150-200 μ m across and their interstice is filled by goethite and cassiterite, implying that it is a hydrothermally altered and/or leached granitoid.

$\delta^{34}S_{CDT}$ of sulfides from sulfide veins in an outcrop and ores in a stockpile are negative suggesting that the sulfur was derived from biogenic sulfide of sedimentary rocks and/or from ilmenite-series granitoid magma into which biogenic sulfide of sedimentary rocks was incorporated.

キーワード: ラオス, Phon Tiou - Boneng, 風化残留錫鉱床, 錫石, 花崗岩類

Keywords: Laos, Phon Tiou - Boneng, residual and placer tin deposits, cassiterite, granitoids