

沈み込み帯の温度・流れ場と流体過程：熱水鉍脈型鉍床の成因

Thermal-flow structure and fluid processes in subduction zones: implications for hydrothermal vein-type ore deposits

岩森 光¹, 中村 仁美^{1*}, 稗田 裕樹², 藤永 公一郎², 加藤 泰浩²

Hikaru Iwamori¹, Hitomi Nakamura^{1*}, Yuki Hieda², Koichiro Fujinaga², Yasuhiro Kato²

¹ 東京工業大学, ² 東京大学

¹Tokyo Institute of Technology, ²The University of Tokyo

Fluid processes in subduction zones are key to understanding the Earth's fundamental features distinct from other solar planets, with respect to geological, geochemical and geophysical aspects; e.g., active tectonics including earthquake, hydrothermal activity, ore formation and arc magmatism, as well as longer-term evolution of the continental crust and orogeny, all of which are thought to be assisted or driven by presence of fluids. This subduction zone system with fluids involves the following schemes:

- (1) thermal and flow structure associated with mantle convection and slab subduction,
- (2) phase relation and chemical reaction, including generation of fluids,
- (3) fluid migration and its interaction with the solid convective flow.

First, we discuss these schemes mainly based on numerical simulation, in which importance of non-linear feedback via water-rock interaction has been found (Horiuchi, 2012). Second, we compare the model predictions with the observations, such as geochemistry of volcanic rocks and hydrothermal fluids, which highlights the trace element and isotopic characteristics of slab-derived fluids (e.g., Nakamura et al., 2008), particularly lead geochemistry, as well as those of volcanic rocks and the arc crust.

Then, hydrothermal activity, including vein-type ore formation, is discussed in this framework of the subduction zone system. Unlike conventional studies based on isotopic compositions of hydrogen and oxygen, this study tracks directly ore-forming metals in terms of their abundances and isotopic compositions. New geochemical data on ore deposits from the Toyoha mine (Hokkaido) and the surrounding country rocks includes trace element abundances and Nd-Pb-He isotopic compositions, many of which are the first-ever data (Hieda, 2013). The results suggest that the ore deposits exhibit appreciable enrichment in "slab-fluid component" (e.g., more radiogenic Pb isotopic ratios) compared to the nearby Muine volcanic rocks contemporary with the ore deposits, together with a mantle He component. Based on the elemental partitioning and mass balance calculations, two plausible models have been proposed to explain the isotopic compositions and the total Pb reserve (5.3 x 10⁵ ton): one assumes direct contribution of slab-fluid (Nakamura and Iwamori, 2009), whereas another involves the Muine magma-derived lead as well as slab-fluid contribution. Both models may explain the characteristics of the Toyoha ore deposits, suggesting potential importance of deep circulation with slab-derived fluid as a source of hydrothermal vein-type deposits.

Keywords: subduction zone, fluid, ore

島弧・背弧海底熱水系の熱水中ホウ素濃度及び同位体組成

Boron content and isotopic composition of vent fluids from seafloor arc-backarc hydrothermal systems

洪恩松¹, 山岡香子^{2*}, 石川剛志³, 蒲生俊敬¹, 川幡穂高¹

Ensong Hong¹, Kyoko Yamaoka^{2*}, Tsuyoshi Ishikawa³, Toshitaka Gamo¹, hodaka kawahata¹

¹ 東京大学大気海洋研究所, ² 産業技術総合研究所地質情報研究部門, ³ 海洋研究開発機構高知コア研究所

¹Atmosphere and Ocean Research Institute, The Univ. of Tokyo, ²Geological Survey of Japan, AIST, ³Kochi Institute for Core Sample Research, JAMSTEC

Boron content and isotopic composition of vent fluids collected from seafloor arc-backarc hydrothermal systems in the western Pacific are determined in order to investigate boron behavior during water-rock reaction at high temperature. In sediment-starved hydrothermal systems (Manus Basin, Suiyo Seamount, and Mariana Trough), the boron content and isotopic composition of vent fluids are dependent on type of host rock. The vent fluids from MORB-like basalt-hosted Vienna Woods in the Manus Basin showed low boron content and high $\delta^{11}\text{B}$ value, while dacite-hosted PACMANUS and the Suiyo Seamount showed high boron contents and low $\delta^{11}\text{B}$ values. The Alice Springs and Forecast Vent field in the Mariana Trough showed values intermediate between them, reflecting reaction of seawater and basalt influenced by slab material. In phase separated hydrothermal systems (North Fiji Basin), boron content and isotopic composition of vent fluids were similar to those in the Vienna Woods. Considering little fractionation of boron and boron isotope during phase separation demonstrated by the previous experimental studies, it is suggested that the host rock in the North Fiji Basin is MORB-like basalt. In sediment-hosted hydrothermal system (Okinawa Trough), the reaction with boron-enriched sediment following seawater-rock reaction resulted in significantly high boron contents and low $\delta^{11}\text{B}$ values of vent fluids. The water-sediment ratio was estimated to be ~ 2 .

キーワード: 海底熱水系, ホウ素同位体

Keywords: seafloor hydrothermal system, boron isotope

浅熱水性金鉱床形成につながるマグマ起源流体の解明 - 日本における斑岩型鉱床の蓋然性 - Magmatic fluid leading to epithermal gold deposits; probability of porphyry copper deposits in Japan

村上 浩康^{1*}Hiroyasu Murakami^{1*}¹ 産業技術総合研究所 地圏資源環境研究部門¹ Institute for Geo-Resources and Environment, AIST

浅熱水性金鉱床は、深部(2-5km)マグマの貫入(斑岩型鉱床の形成)に伴う地表浅部(1km内外)の熱水系に発達するモデルが提唱されている。しかし、その鉱化流体の実態は未だ議論の最中にある。浅熱水性金鉱床には、硫砒銅鉱やルソン銅鉱の出現で特徴づけられる高硫化型と、氷長石や方解石で特徴づけられる低硫化型とがあるが、この違いが生じる要因もよく解っていない。

本論では、浅熱水性金鉱床である鹿児島県の菱刈鉱床(低硫化型)、赤石・春日鉱床(高硫化型)及び熱水性鉱床である愛知県の振草セリサイト鉱床を対象として、LA-ICPMSにより石英などに包有される鉱化流体の化学組成を実証し、浅熱水性金鉱床と斑岩型鉱床との化学的・空間的血縁関係について論じる。

菱刈鉱床産石英、氷長石中の流体包有物(n=225, 200~250, 0.1~0.8 wt%, NaCl相当濃度)を分析した。平均金含有量は、脈形成初期の“マグマ起源熱水”で最も高く(Au:2.9 µg/g)、極めて高い金濃度(>10 µg/g)を示す流体も多く認められる。脈形成末期の金濃度は減少する(Au:0.22 µg/g)。硫黄濃度は初期で200 µg/g以下、末期で200~400 µg/gを示す。Cu及びAs濃度は初期、末期ともにそれぞれ10-20 µg/g及び30 µg/g前後を示す。Sb濃度は初期(100 µg/g)に比べ末期で250 µg/gと増加し、天水循環による酸化的環境が末期に卓越していたことを示唆する。流体包有物の温度・塩濃度組成から形成深度は0.3~0.4kmと推定される。

赤石・春日鉱床産含金珪化岩の石英中に認められる流体包有物(n=151, 220~270, 0.5~4.8 wt%, NaCl相当濃度)を分析した。平均金含有量は、赤石はAu:6.5 µg/g(n=22)、春日でAu:2.8 µg/g(n=55)を示す。硫黄濃度は赤石で10,000 µg/g、春日で6,200 µg/gと菱刈鉱床に比べて一桁高い。As濃度は赤石で54 µg/g、春日で384 µg/gの値を示す。Cu濃度は15 µg/g(赤石)、43 µg/g(春日)である。Sb濃度は両鉱床とも100~200 µg/gであった。黄鉄鉱を含む流体包有物では、金や銅濃度が特に高い(平均Au:25 µg/g, Cu:590 µg/g; 赤石)。推定形成深度は0.5km前後である。

振草セリサイト鉱床産の石英中の流体包有物のうち、鉱床下部に産する気相包有物(n=32, >330, 5 wt%, NaCl相当濃度)では、平均でAu:1.8 µg/g, S:18,000 µg/g, Cu:596 µg/g, As:101 µg/g, Sb:56 µg/gを示す。セリサイトの水素同位体比などから、この流体は金、硫黄、銅に富むマグマ起源流体と考えられる。形成深度は1.0~1.2kmと推定される。

これらの結果から、浅熱水性金鉱床の鉱化流体における主な元素濃度はAu:1.5 µg/g~6.5 µg/g, As:数十 µg/g, Sb:数百 µg/g, Cu:数十 µg/gと考えられる。極めて高い金濃度(>10 µg/g)を持つ流体包有物は、熱水中で既に晶出した金の微粒子を含むと推定され、金濃度の高い流体包有物には黄鉄鉱なども伴われることから、鉱石鉱物の沈殿ステージの流体を捕獲したと考えられる。

硫黄濃度は高硫化型で数千 µg/gを示すのに対し、低硫化型では数百 µg/g以下であり、浅熱水性金鉱床における硫黄分圧の違いを反映している。斑岩銅鉱床における気相の元素濃度と比較すると、金濃度は同程度であるが、銅濃度が二~三桁低く、硫黄濃度は低硫化型金鉱床で極めて低い。これらの特徴は、深部マグマから派生した沸騰流体により、1) 斑岩型鉱床が形成され、2) 気相が浅部へ上昇する過程で硫化鉱物を形成しながら(e.g., 斑岩銅鉱床におけるD脈: 石英-黄鉄鉱-セリサイト脈)、3) 金がチオ錯体として浅部に運搬されることを示唆する。このプロセスの1及び2で流体中の銅及び硫黄濃度が消費される。つまり、地表から深部マグマまでの距離が比較的近い場合は高硫化型、遠い場合は低硫化型の金鉱床が形成されたと推測される。一方、斑岩型鉱床の形成深度が浅い(平均2.1km)鉱床は金と銅に富み、深い(平均3.7km)鉱床では銅とモリブデンに富む。この違いは、「揮発性で流動性を持ち、硫黄に富む気相が金を地表浅部に運搬する」ことを裏付けており、深成の斑岩型鉱床ではそれが促進されている。言い換えれば、地表近くで金鉱床があるという事実は、深部で銅鉱床が形成されている可能性があることを示している。これらの考察から、“斑岩型鉱床の形成深度の違いによって浅熱水性金鉱床のタイプに違いが生じる”というパラダイムを提案する。これは、環太平洋地域に属する日本でも、とりわけ低硫化型金鉱床下部にも、斑岩型鉱床が深部(地表下2~3km以上)に賦存する可能性があることを意味する。

キーワード: 浅熱水性金鉱床, 斑岩銅鉱床, 鉱化流体, 流体包有物

Keywords: Epithermal gold deposit, Porphyry copper deposit, Magmatic fluid, LA-ICPMS, Fluid inclusion

ネバダ州塩湖におけるリチウムの起源：リチウム同位体比による制約 Lithium origin in playa at Nevada, USA: constrains by lithium isotope ratio

荒岡 大輔^{1*}, 川幡 穂高², 高木 哲一³, 渡辺 寧³, 西村 光史⁴, 西尾 嘉朗⁵

Daisuke Araoka^{1*}, hodaka kawahata², Tetsuichi Takagi³, Yasushi Watanabe³, Koshi Nishimura⁴, Yoshiro Nishio⁵

¹ 東大・院・新領域, 東大・大気海洋研, ² 東大・大気海洋研, ³ 産総研・地圏資源環境, ⁴ 東洋大学, ⁵ 海洋研究開発機構

¹GSFS and AORI, The University of Tokyo, ²AORI, The University of Tokyo, ³GREEN, AIST, ⁴Toyo University, ⁵JAMSTEC

地球上で最大のリチウム資源は塩湖であり、乾燥気候下で蒸発・濃縮を繰り返すことで、塩湖（特にブラヤ）には高濃度のリチウム資源が形成されていることが知られている。ブラヤにおけるリチウムに富んだブライン水は、現在のところリチウム生産において最もメジャーな原料として世界中で利用されている。一方、リチウムは質量数6と7の2つの安定同位体をもち、その相対質量差の大きさゆえに、リチウムの安定同位体比は、変質や風化等の水を媒介してリチウムが動く際に大きな同位体分別が起きる。そのため、リチウム同位体比は水・岩石反応の指標として近年注目を集めている。そこで本研究では、ネバダ州の4つのブラヤから得られた蒸発岩および湖成堆積物試料について、2種類のリーチング実験を行った。各段階における各元素濃度とリチウム・ストロンチウム同位体比を測定し、その変化について考察を行い、ブラヤにおけるリチウムの起源を推定した。

試料から得られたリチウム同位体比は、世界の河川水や地下水の値と比べ総じて低く、温泉水や火山岩の値に近い結果が得られた。今回の結果より、ブラヤに濃集しているリチウムの大部分が、地上での低温風化反応によるものではなく、ローカルな熱水活動による高温での水・岩石反応により供給された可能性が高い。またこの結果は、先行研究で報告されている水・岩石反応におけるリチウム同位体比の温度依存性とも調和的である。

この研究は、初めてブラヤにおける蒸発岩中のリチウム同位体比を報告したものであり、リチウム同位体比がブラヤにおけるリチウムの起源やその濃集プロセスを理解するのに多大なポテンシャルを持つことが示された。

キーワード: リチウム同位体, ブラヤ, 蒸発岩, 湖成堆積物, リチウム資源, ネバダ州

Keywords: lithium isotope, Playa, evaporite, lacustrine deposit, lithium resource, Nevada

酸性泉起源の人工鉱床の可能性 - 秋田県玉川温泉下流の例 - Possibility of man-made ore deposit originated from acid hot spring

土屋 範芳^{1*}, 岡田宏信¹, 小川泰正¹, 渡邊隆弘¹, 山田亮一¹
Noriyoshi Tsuchiya^{1*}, Hironobu Okada¹, Yasumasa Ogawa¹, Takahiro Watanabe¹, Ryoichi Yamada¹

¹ 東北大学大学院環境科学研究科

¹ Graduate School of Environmental Studies, Tohoku University

秋田県玉川温泉は、pH1.2 毎分 9000 リットル (大噴) の温泉を湧出する日本有数の酸性泉である。この温泉水には、レアメタル元素、レアアース元素が相当量含まれている。玉川温泉は、宿泊施設の直下に建設されている中和処理プラントで中和処理されたのち、渋黒川に放流され、その後玉川と合流したのち、玉川ダム (宝泉湖)、鎧畑ダム (秋扇湖) をへて、田沢湖およびその周辺域を流下する。

玉川ダムおよび鎧畑ダムは、玉川温泉の強烈な酸性水とそこに含まれる金属元素等の流下を防ぐ目的で建設されているが、このダムの堆積砂は、金属元素等の人工的な堆積場と考えることもできる。本講演では、レアメタル元素、レアアース元素および有害元素としてヒ素の河川水からの沈殿挙動を明らかにして、ダム堆積物の希少元素資源としての可能性について言及する。

参考文献

Ogawa et al., 2012, The role of hydrous ferric oxide precipitation in the fractionation of arsenic, gallium, and indium during the neutralization of acidic hot spring water by river water in the Tama River watershed, Japan. [Geochimica Cosmochimica Acta, 86, (2012), 367-383]

梶原ら (2011), 酸性河川中でのレアメタル (In, Ga) および有害元素 (As, Pb) の吸着・分別挙動に関する実験的研究. [資源地質, 61 (3), (2011), 167-180]

キーワード: レアメタル元素, レアアース元素, 人工鉱床, 酸性泉

Keywords: rare metal elements, rare earth elements, man-made ore deposit, acid hot spring

酸性泉の溶存成分濃度の規制要因

Control factors for concentrations of elements dissolved in acid hot-spring waters

佐々木 宗建^{1*}, 土屋範芳², 小川泰正²

Munetake Sasaki^{1*}, Noriyoshi Tsuchiya², Taisei Ogawa²

¹産業技術総合研究所, ²東北大学大学院環境科学研究科

¹National Institute of Advanced Industrial Science and Technology, ²Graduate School of Environmental Studies, Tohoku University

火山 - マグマ - 熱水系は、深部から熱と物質を活発に供給する場であり、温泉資源や鉱産物資源並びに地熱エネルギー資源を育み、恩恵となる場でもある。火山 - マグマ - 熱水系における酸性泉は、系の中心に位置し、マグマ性流体の寄与が大きいことと、低 pH のため岩石との反応性に富むことを特徴とし、その帰結として種々の溶存成分を含有している。また、酸性泉は、マグマ性流体が種々の物理化学的過程を経た後の最末端の湧出物である。本研究では火山 - マグマ - 熱水系における物質移行過程を、酸性泉の溶存化学成分から紐解くことを試みた。そこで、幾つかの酸性泉で温泉水を採取・分析し、各溶存成分の濃度範囲を明らかにすると共に、文献の岩石や火山ガス組成と比較することで各溶存成分の起源を推定し、地化学的数値解析手法を適用することで各溶存成分の濃度の規制要因を検討した。

酸性泉の溶存成分の多くは、濃度が pH と負相関し、低 pH の酸性泉ほど溶存成分量が多い傾向を呈した。溶存成分は暫定的に、(I) マグマ性流体を起源とし酸性泉の泉質を特徴づける成分 (S と Cl) (II) マグマ性流体に由来し高温の火山ガスに比較的富む成分 (B, F, As, Br, Cd, In, Sb, I, Tl, Pb)、(III) 岩石の溶解に由来する成分 (Li, Na, Mg, Al, Si, K, Ca, Sc, V, Cr, Mn, Fe, Co, Ni, Zn, Ga, Ge, Rb, Sr, Y, Cs, Ba, REEs, Mo, W, U) (IV) 酸性環境下でも不溶性の成分 (P, Ti, Zr) と湧出までの間に既に沈殿したと推定される成分 (Cu, Se, Ag, Mo, Sn, Au, Bi, Be, Co, Hf, Th) に分類された。酸性泉の溶存成分の濃度の規制要因として (a) マグマ性流体の天水との混合による希釈 (b) 流体の酸化還元状態の遷移 (c) 他の起源に由来する分の添加、が推定された。マグマ性流体の天水との混合による希釈は、最も大きな濃度変化の要因であり、酸性泉間の比較においては Cl 濃度の相違が希釈率の相違を反映すると考えられる。流体の酸化還元状態の遷移の影響は Pb, Tl, Cd, Zn, Cu 等に対し可能性として推定された。これらの溶存成分は酸化環境下では塩化物錯体を形成し、濃度を規制する鉱物種が少ないために高濃度を呈し得るが、H₂S 成分が存在する還元環境下では硫化物錯体を形成し、硫化物による濃度の規制を受け著しく濃度低下し得ると推定された。このような可能性をより明確にするためには、温泉水の高温時における酸化還元状態を特定する必要がある。他の起源に由来する分の添加は As に認められ、浅所の酸化環境下で生じていると推定された。また、K, Si, Al は温泉水が高温でカオリナイトと明礬石に過飽和状態を呈し、Ba は湧出口付近で温泉水と重晶石がほぼ平衡状態を呈することから、これら鉱物による濃度規制を受けていると推定された。

これらの結果は、温泉資源や鉱産物資源並びに地熱エネルギー資源の探査・開発・維持管理にとって、基礎的情報の提供として役立つと思われる。

キーワード: 酸性泉, 溶存成分, 濃度, 規制要因

Keywords: acid hot springs, dissolved elements, concentrations, control factors