

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 28 年 6 月 15 日現在

機関番号：82706

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2013～2015

課題番号：25400524

研究課題名(和文) 温泉水でスラブ起源流体を捉える

研究課題名(英文) Tracking the slab-derived fluid in spring water

研究代表者

中村 仁美 (NAKAMURA, Hitomi)

国立研究開発法人海洋研究開発機構・地球内部物質循環研究分野・研究員

研究者番号：60572659

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,800,000円

研究成果の概要(和文)：沈み込み帯前弧域において、スラブ流体が直接的に上昇・湧出している可能性を、スラブ流体検出の有効性が高い重元素を用いて制約することを目指し、温泉水に含まれる低含有量重元素の濃縮、抽出手法の開発と分析を行った。

その結果、鉄共沈法を用いてSr-Nd-Pb同位体組成を得ることに初めて成功し、有馬温泉水の起源がフィリピン海スラブにあることを明らかにした(Nakamura et al., 2014)。また、温泉水中の希土類元素の効率的分析方法を開発し、その濃度やパターンから、スラブ由来流体が構造線沿いに余り地殻物質と反応することなく上昇し、浅部で天水と混合して組成多様性を生むことを明らかとした。

研究成果の概要(英文)：Possibility of upwelling of slab-derived fluid in the non-volcanic fore-arc region has been examined, by using heavy elements that are known as a powerful tracer for slab-derived materials. We have developed the analytical methods for condensing and extracting low-abundance heavy elements from a brine, and then applied them to the natural samples for quantitative analyses.

As a result, we have successfully determined the Sr-Nd-Pb isotopic composition of the Arima spring waters by the co-precipitation method with iron hydroxide, which indicates that the brine is originated from the Philippine Sea slab (Nakamura et al., 2014). We have also established the effective method for rare earth element analysis in spring water, based on which we found that (i) the slab-derived fluid has ascended along the tectonic lines without much interaction with crustal materials, then (ii) the fluid was mixed with meteoric water at a shallow depth, to produce the wide compositional variation.

研究分野：地球化学

キーワード：温泉水 スラブ起源 塩水 深部流体 沈み込み帯 構造線 同位体 REE

1. 研究開始当初の背景

近年、流体が地震現象に関与していることが明らかになりつつあるが、その実体は分かっておらず、物質的側面からの実証が期待されている。

第四紀火山生成に関与するスラブ起源流体は、火山岩中の重元素やその同位体を用いて検出され、起源と供給量が日本全域でマッピングされている。これにより、スラブの幾何学的形状に支配された流体の挙動が分かってきた。

一方、非火山域の構造線沿いにも、マグマを介さずに、スラブ起源流体が上昇している可能性が指摘され、“有馬型温泉水”と呼ばれている。しかし、軽元素 (H-O, He など) からの制約であり、スラブを起源とする決定打に欠けていた。

2. 研究の目的

火山のない前弧域において、温泉水によってスラブ起源流体を捉えることを目的とし、重元素に着目してスラブからの寄与を検出する。これにより、火山岩との対比が可能になり、島弧全域における流体の挙動を包括的に把握することに繋がる。

3. 研究の方法

温泉水中の重元素濃度は極微量であり、また、高濃度で含まれる主溶存元素が元素のイオン化を妨害するため、分析が容易ではない。そこで、まず、有馬温泉水を試験的に用い、従来から行ってきた重元素を抽出する方法を完成させる。

次に、中央構造線～糸魚川静岡構造線沿いの温泉水を調査・採取し、地球化学的分析を行う。また、得られたデータに対し、火山岩を用いた先行研究で確立された方法を適用し解析を行うことで、スラブ起源流体の挙動に制約を与える。概要は以下の通りである。

- (1) 産総研の深層地下水データベース・シームレス地質図・活断層データベース、更に、各自治体や温泉協会の発信する泉源情報を用いて、深部由来の可能性のある温泉や湧水を選ぶ。
- (2) 泉質に応じた処理を行い、化学組成 (重元素、重元素同位体) を測定する。
- (3) 火山岩やテクトニクスとの比較から、深部における流体の挙動を解く。

4. 研究成果

スラブ起源流体の検出には、原子量が高い・流体に移動しやすい・放射性という特徴を持つ元素を用いる。火山岩中では一般に ppm レベルで含有されるが、温泉水中ではこれらの元素濃度が極めて低く (ppb-ppt)、質量分析機器で分析可能な濃度にするための手法の開発が不可欠であった。

(1) そこで、有馬型温泉水の模式地である有馬温泉の金泉を用いて、鉄共沈法で重元素を回収し、濃度の定量と同位体 (Sr, Nd, Pb) を測定することに成功した。この結果を、火

山岩から得られているスラブ起源流体の特徴と比較することで、有馬温泉金泉の起源がフィリピン海プレートであること (図 1)、また、その脱水温度を制約することができた (Nakamura et al., 2014, JGG)。これにより、温泉水における重元素分析の必要性を示すことができた。

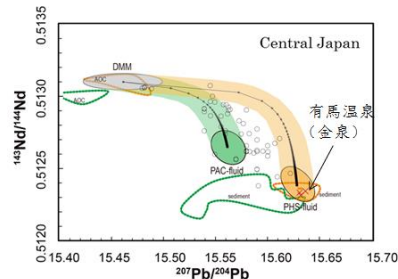


図 1 : 本研究で得られた温泉水 (x) の Pb-Nd 同位体組成と、中部日本の火山岩 (o) との比較図。緑とオレンジは、太平洋スラブとフィリピン海スラブを示す。刻み付きの実線は、マントルと流体間の混合線。点線で示される形状は各スラブ構成物質の組成範囲であり、そこから派生するスラブ起源流体の推定幅を楕円で示した。Nakamura et al., 2014, JGG の Fig.7 に加筆

しかし、同時に、酸処理と段階的加熱を繰り返すことで元素を濃縮させる鉄共沈法では、多量の副生成物が生じてしまい、当初想定していた以上に非効率であることが分かった。そこで、元素吸着フィルタとレジンをを用いて元素分離を行う方向に転換し、元素毎に回収率を決めるための試行実験を行った。これにより、元素吸着フィルタの有効性を示すことになり、前処理の迅速化に繋がった。

(2) 一方、濃度を測定した重元素のうち、REE パターンに、河川水や海水には見られない特異な特徴を見出した (図 2)。これは、温泉水の上昇過程における元素分別を示唆しており、重元素同位体だけでなく、REE パターンや濃度が成因の指標として有効であることが分かった。

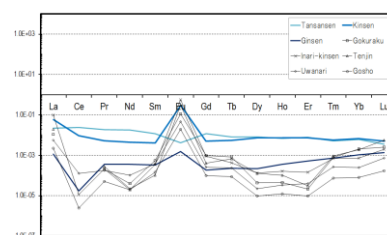


図 2 : 本研究で得られた 8 泉源の有馬温泉水の REE 組成。マントル (DMM) で規格化している。周辺河川水よりも、100 倍～1000000 倍ほど高い濃度をもち、元素毎に異なる振る舞いをしていることがわかる。Nakamura et al., 2015, JGG の Fig.4 に加筆。

(3) 高感度 ICP-MS (iCAP-Q) の導入により、分析技術面では、当初想定していた前処理が不要になった。そこで、標準添加希釈法で定量分析を行うために、採取した試料の簡易測定を行い、希釈率を見積もった後に本分析を行うというルーティンを組んだ。これは温泉水に時々高濃度で含有される元素 (例えば、Ba) が、他元素のイオン化を阻害するので、それらの干渉を減らすためである (Chan et al., 2015, 地球化学学会年会)。

(4) 迅速かつ高感度の REE 分析により、有馬温泉の 8 泉源の成因を突き止め、流体の上昇過程を明らかにすることに成功した (Nakamura et al., 2015, JGG). これにより、深部由来の水溶液とガスが浅所で分離して振る舞い、天水層と独立に反応することで、泉源の多様性が生じることが分かった (図 3).

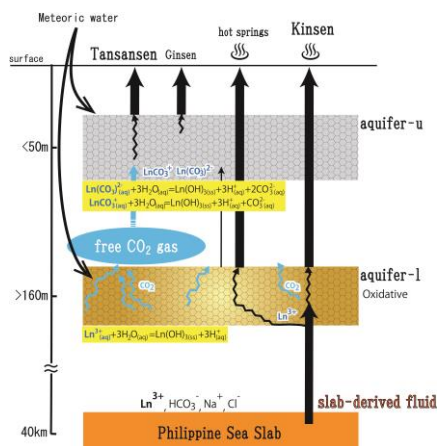


図 3: 有馬温泉水の上昇経路と反応を示すモデル図。フィリピン海スラブから脱水した流体は、下部の帯水層 (aquifer-l) でガスを分離すると沈殿物を生じ、残った上澄みが上昇する。これが有馬で一般的に見られる泉質 (hot springs) である。一方、沈殿物を生成せずに上昇している泉源 (Kinsen) のほかに、ガスが上部の帯水層 (aquifer-u) で岩石と天水の反応を促進させることで生じる泉源 (Tansansen) がある。Nakamura et al., 2015, JGG の Fig.7 より引用。

(5) 中央構造線～糸魚川静岡構造線沿いの対象地域から採取した温泉水の測定を行い、従来の温泉水区分 (単純泉, 酸性泉, アルカリ泉, 塩化物泉, 炭酸水素塩泉など) によらず、広域で特異な REE パターンを示す泉源があることが判明した。また構造線沿いに、これらの特異な泉源が湧出していることも明らかになりつつある。

(6) 通常 REE は一様にふるまう元素群であるが、理論的研究によると、pH・温度・溶

存元素 (特に HCO_3^-) の影響で、元素毎に振る舞いが異なってくる (e. g., Ohta and Kawabe, 2000). 本研究で検出された特異なパターンは、上昇過程におけるこれらの要素を反映した結果と考えられる (図 4A, B). そこで、微々なパターンの違いを定量的に決定づけるため、統計解析を行った (Nakamura et al., 2016, JGG). その結果、深部に由来する炭酸ガスの効果により地殻との反応が促進される泉源が新たに検出された。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計 24 件)

- ① Nakamura, H., Chiba, K., Chang, Q., Morikawa, N., Kazahaya, K. and Iwamori, H., Origin of the Arima-type and associated spring waters in the Kinki district, southwest Japan. 査読有, Journal of Geology & Geophysics, 2016, 5, doi:10.4172/2381-8719.1000240.
- ② Nakamura, H., Chiba, K., Chang, Q., Nakai, S., Kazahaya, K. and Iwamori, H., Rare Earth Elements of Arima Spring Waters, Southwest Japan: Implications for Fluid-Crust Interaction during Ascent of Deep Brine. 査読有, Journal of Geology & Geophysics, 2015, 4, doi:10.4172/jgg.1000217.
- ③ Iwamori, H. and Nakamura, H., Isotopic heterogeneity of oceanic, arc and continental basalts and its implications on mantle dynamics. 査読有, Gondwana Research, 2015, 27, 1131-1152, doi:10.1016/j.gr.2014.09.003.
- ④ Nakamura, H., Oikawa, T., Geshi, N. and Matsumoto, A., Migration of volcanic front inferred from K-Ar ages of late Miocene to Pliocene volcanic rocks in central Japan. 査読有, Island Arc, 2014, 23, 236-250, doi:10.1111/iar.12073.
- ⑤ Kusuda, C., Iwamori, H., Nakamura, H., Kazahaya, K. and Morikawa, N. Arima hot spring waters as a deep-seated brine from subducting slab. 査読有, Earth, Planets and Space, 2014, 66:119, doi:10.1186/1880-5981-66-119.
- ⑥ Nakamura, H., Fujita, Y., Nakai, S., Yokoyama, T. and Iwamori, H., Rare Earth Elements and Sr-Nd-Pb isotopic analyses of the Arima hot spring waters, southwest Japan: Implications for origin of the Arima-type brine. 査読

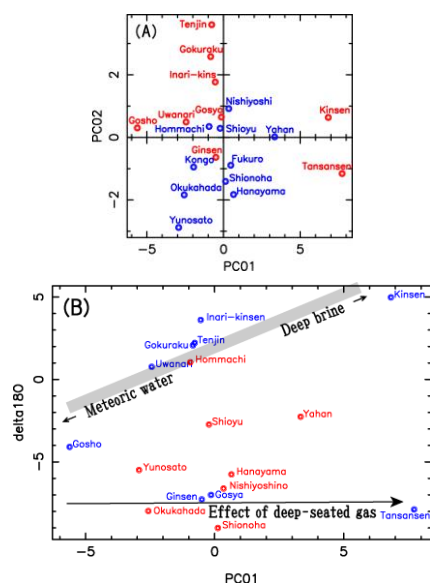


図 4A, B: (A) 近畿地方の温泉水の主成分分析による分類。横軸 PC01, 縦軸 PC02 は成分を示す。紀伊半島には、有馬と生成プロセスの異なる泉源が分布していることを示す。(B) 紀伊半島には、炭酸イオンによる効果が卓越している。いずれも、Nakamura et al., 2016, JGG より引用。

有, *Journal of Geology & Geosciences*,
2014, 3:161,
doi:10.4172/2329-6755.1000161.

[学会発表] (計 27 件)

- ① 中村仁美, 千葉紀奈, 常青, 森川徳敏, 風早康平, 岩森光, 紀伊半島における有馬型温泉水の上昇過程: REE 組成からの制約. 日本鉱物科学会, 東京大学 (東京都文京区), 2015 年 9 月 25 日
- ② Q. Chang, H. Nakamura, H. Iwamori, Interference of Ba induced molecular ions in solution ICP-MS and their correlation for direct determination of REEs in geothermal waters. 日本地球化学会年会, 横浜国立大学 (神奈川県横浜市), 2015 年 9 月 16 日
- ③ 中村仁美, 千葉紀奈, 常青, 中井俊一, 風早康平, 岩森光, 有馬温泉水の希土類元素から探る深部流体上昇過程. 日本地球化学会, 横浜国立大学 (神奈川県横浜市), 2015 年 9 月 16 日
- ④ H. Nakamura, Y. Fujita, S. Nakai, T. Yokoyama, H. Iwamori, Rare earth elements and Sr-Nd-Pb isotopic analyses of the Arima hot spring waters, Southwest Japan: Implications for origin of the Arima-type brine. AGU Fall Meeting 2014, San Francisco, 2014 年 12 月 17 日
- ⑤ H. Nakamura, H. Iwamori, K. Chiba, Y. Fujita, S. Nakai, J. Kimura, Q. Chang, K. Kazahaya, REEs compositions of non-volcanic Arima-type hot spring waters along the Median Tectonic Line: Possible origin from subducting slab. 8th Biennial Workshop on Japan-Kamchatka-Alaska Subduction Processes, Hokkaido University (Hokkaido, Sapporo), 2014 年 9 月 24 日
- ⑥ 中村仁美, 岩森光, 千葉紀奈, 中井俊一, 木村純一, 常青, 風早康平, 中央構造線沿いに湧出する有馬型温泉水の分布と起源~REEs 組成からの考察~. 日本地球化学会, 富山大学 (富山県富山市), 2014 年 9 月 18 日
- ⑦ 中村仁美, 岩森光, 荒木修平, 稗田祐樹, 藤永公一郎, 加藤泰浩, 中井俊一, 木村純一, 常青, 重元素同位体比から探る鉱化熱水の起源. 日本地球惑星科学連合 2014 年大会, パシフィコ横浜 (神奈川県横浜市), 2014 年 4 月 30 日
- ⑧ H. Nakamura, H. Iwamori, C. Kusuda, Y. Fujita, S. Nakai, T. Yokoyama, K. Kazahaya, Geochemical characteristics of non-volcanic Arima hot spring waters, southwest Japan: Possible origin from subducting slab. Geofluid3 International Symposium,

Tokyo Institute of Technology (Tokyo, Meguro), 2014 年 3 月 3 日

- ⑨ 中村仁美・及川輝樹・下司信夫・松本哲一, 火山フロントの移動とマントル構造の変化: 関東山地火山岩の K-Ar 年代からの制約. 日本鉱物科学会, 筑波大学 (茨城県つくば市), 2013 年 9 月 13 日
- ⑩ 中村仁美・岩森光, 火山岩から推定される日本列島下マントルの物理化学的状态. 日本地球惑星科学連合 2013 年大会, 幕張メッセ (千葉県千葉市), 2013 年 5 月 22 日

6. 研究組織

(1) 研究代表者

中村 仁美 (NAKAMURA, Hitomi)
国立研究開発法人海洋研究開発機構・地球内部物質循環研究分野・研究員
研究者番号: 60573659

(2) 研究分担者

中井 俊一 (NAKAI, Shunichi)
東京大学・地震研究所・教授
研究者番号: 50188869

岩森 光 (IWAMORI, Hikaru)
国立研究開発法人海洋研究開発機構・地球内部物質循環研究分野・分野長
研究者番号: 80221795