



西南日本における温泉水の成因について： スラブ起源深部流体の特徴と分布

風 早 康 平¹⁾

(平成 26 年 12 月 5 日受付, 平成 26 年 12 月 21 日受理)

Feature and Spatial Distribution of Slab-derived Thermal Water in SW Japan Arc

Kohei KAZAHAYA¹⁾

Abstract

High sensitivity seismograph network in Japan (Hi-net) for the last decade has revealed the 3D structure of velocity anomaly in the crust. Some low-velocity anomaly is attributed to a heterogeneous presence of deep-seated fluids in subduction zones of Japan arc. Petrological water circulation models combined with geophysical subduction models quantitatively show that amounts of water dehydrate in the subducted slab and upwell as hydrothermal fluids to the surface. Here I show, chemical features of deep groundwaters in SW Japan arc, and spatial distribution of deep-seated fluid mixed into groundwater as geochemical and geological evidences, which is expected for the proof of water circulation models. Slab-derived aqueous fluid (including magma-derived aqueous fluid) in groundwater can be detected using a Li/Cl ratio (>0.001 in wt. ratio) for Cl concentrations higher than 200 mg/L. Groundwaters of Li/Cl higher than 0.001 is found to be Na · Cl-HCO₃-type in nonvolcanic areas in the forearc of SW Japan, and NaCl-SO₄-type close to Quaternary volcanoes, respectively. Spatial distribution of Li/Cl reveals that slab-related deep-seated fluid upwells along the faults and tectonic lines, and at close to Quaternary volcanoes in SW Japan arc. Upwelling places are found close to the areas where deep low frequency (DLF) earthquakes are occurring, implying that deep-seated fluid causes DLF events.

Key words : deep groundwater, hot spring, slab-derived aqueous fluid, Li/Cl ratio, SW Japan arc

¹⁾ 独立行政法人産業技術総合研究所活断層・火山研究部門 〒305-8567 つくば市東 1-1-1 中央第七. ¹⁾ Institute of Earthquake and Volcano Geology, AIST Tsukuba Central 7, Higashi 1-1-1, Tsukuba, Ibaraki 305-8567, Japan. E-mail kazahaya-k@aist.go.jp

要 旨

近年、Hi-net 地震観測網の整備などにより、日本列島の地殻内部の 3 次元地震波速度構造がわかってきた。地殻内部に不均質に存在する低速度異常は、火山のない地域では熱水に起因すると考えられている。このような地球物理学的観測結果と実験岩石学的結果をもとに、沈み込んだプレートから脱水する水の量や循環に関する研究も進められている。本講演では、温泉水や深層地下水に含まれるスラブ起源熱水の指標として Li/Cl 比（重量比で 0.001 以上；Cl 濃度 200 mg/L 以上のもに用いる）を用い、西南日本におけるスラブ起源水（マグマ起源水も含む）の広域分布、上昇場を示した。非火山地域では、スラブ起源水を混入する温泉水は NaCl-HCO₃ 型のもが多く、火山地域では NaCl-SO₄ 型のもがみられる。スラブ起源水は火山や断層・構造線など地下深部から地表へ水みちとなっている場所にみつかるとともに、下部地殻でみられる深部低周波地震の震源分布とスラブ起源水の上昇場がよく一致し、深部低周波地震の成因にスラブ起源水が関与している可能性がある。

キーワード：深層地下水、温泉、スラブ起源水、Li/Cl 比、西南日本弧

1. はじめに

日本列島は、海洋プレートが沈み込む帯に位置し、プレートに含まれる含水鉱物や間隙水などにより、マントルに水が供給され、マグマが発生する場である。つまり固体地球内部における活発な水循環の場である。近年、(独)防災科学技術研究所による Hi-net 地震観測網等の整備によって、地震波の 3 次元速度構造が明らかになりつつあり、地殻やマントル内での流体の不均質な分布がみえるようになってきた（例えば、長谷川他，2008）。これらの観測結果の集積と含水鉱物—熱水の相平衡に関する実験岩石学的成果により、沈み込む海洋プレートでどのような鉱物種が存在し、どのように脱水するのかについての情報も得られ、沈み込み帯におけるより詳細な水循環モデルも構築されている（Iwamori, 1998；片山他，2010）。また、広範囲にわたり深部低周波地震が深さ 20–40 km の地殻深部で生じていることが明らかとなり、地殻流体の活動を示していると注目されている。これらの地震は非火山地域にも生じることから地殻下部における熱水活動が原因であると考えられている（長谷川他，2008）。マントル内で放出された水の一部はマグマを生成し、最終的に火山ガスや火山性温泉水として地表に現れる。しかし、西南日本弧の前弧側では、マグマを生成せず、熱水のまま上昇して地表に到達するものもあると考えられる。

日本列島には内陸部においても塩水が地下水として存在している場合があり、最も高温かつ高濃度の塩水は、有馬温泉（神戸市）の温泉水である。その特徴は、水の酸素同位体比が非常に高く、CO₂ を多量に含み、塩分濃度が海水の 2 倍以上に達することであり、海水由来の塩水ではなく、地下深部から上昇してきたと考えられた（Matsubaya *et al.*, 1973；西村他，2006）。有馬温泉と似た安定同位体の特徴をもつものに、鹿塩（長野県：中央構造線近傍）や石仏（大阪府：中央構造線の北側）の鉱泉水がありいずれも非火山地域の内陸に自然湧出する塩水で塩濃度が高い（松葉谷他，1980）。水の酸素同位体比が非常に高い原因は、高温で岩石と酸素同位体交換を行った結果であると考えられ、非火山地域に産出するにもかかわらずマグマ起源水と同様の特徴を持っている。有馬温泉は、沈み込んだフィリピン海プレート（スラブ）の脱水作用により放出された熱水ではないかと考えられている（西村他，2006；Kusuda *et al.*, 2014）。また、網田他（2005；2014）も中央構造線に沿った地域で見つかる有馬温泉に似た組成特徴を持つ塩水がスラブの脱水起源の熱水であるとしている。このような天水以外に由来する水の成因や起源の解明は、変動帯における深部熱水の循環や地殻内での役割を考える上で重要である。

(独)産業技術総合研究所では、2000 年より深層地下水、温泉水、及び湧水の全国調査を実施しており、その水の主成分化学組成（Li, Na, K, Mg, Ca, F, Cl, Br, SO₄, HCO₃, CO₂ 等）や各種安定同

位体比 (D/H , $^{18}O/^{16}O$, $^{13}C/^{12}C$ (全無機炭素), $^3He/^4He$ 等) の分析結果を集積している (高橋他, 2011). 2014年3月現在で, 総数は6300地点以上となっており, ほぼ全国をカバーしている. これにより, 各種成分の空間分布や成因等を検討できるようになった (風早他, 2014). 本講演では, これらのデータを元に, 1) スラブ起源熱水の指標, 2) 西南日本弧におけるスラブ起源熱水上昇域の分布, そして, 3) その熱水の生成と上昇について, 西南日本弧における固体地球内部の水循環システムとともに考察する.

2. スラブ起源熱水の指標

有馬温泉水にはリチウム (Li) も多量に含まれ, Li/Cl比では海水より数百倍高い値を示す. 地下深部の高温環境ではLiは容易に液相に濃集するが, その後, 液相の温度下がっても沈殿しない特徴があるため, 深部熱水の指標として有効である (Nishio *et al.*, 2010). 風早他 (2014) は, 水の酸素同位体比がマグマ水方向にシフトした水のLi/Cl比が高く, 海水方向に向かう水のLi/Cl比が低いことを示し, Li/Cl (重量比) が0.001より高いものをスラブ起源水 (マグマ水も広義のスラブ起源水である) の混入を受けた水の指標とした. Li濃度ではなくLi/Cl比とすること, および, Cl濃度が200mg/L以上の水に適用することにより, 通常の希薄な地下水による希釈を受けても本来の値を保つことが期待される.

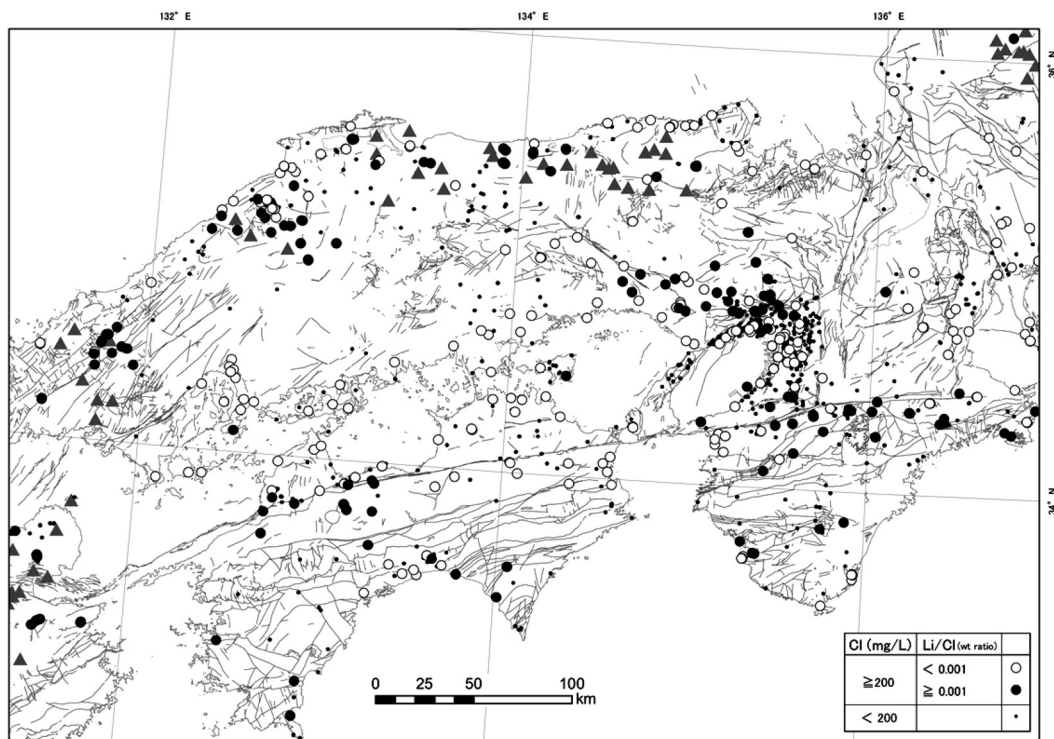


図 1 Li/Cl重量比によるスラブ起源水 (● : Li/Cl>0.001) の空間分布 (風早他, 2014 を改変)

3. 西南日本におけるスラブ起源水の分布

西南日本における Li/Cl 比の分布を図 1 に示す。Li/Cl 重量比が 0.001 より大きい地点 (●) がスラブ起源水を含んだ深層地下水、温泉水である。山陰地域では第四紀火山周辺に分布し、兵庫県南部 (有馬・高槻構造線～山崎断層) 及び大阪府南部に顕著にみられる。また、愛媛県及び紀伊半島では中央構造線に沿って分布する特徴がある。一方、山陰地方の第四紀火山近傍、兵庫県南部～大阪府及び中央構造線の南側においても広い範囲にわたり地殻下部を震源とする深部低周波地震が起きており、その活動場所と Li/Cl 指標によるスラブ起源水の分布範囲は整合的である。このように、地下水や温泉水中の混入成分として検出されるスラブ起源水の分布には地域的特徴があり、断層や火山周辺で見つかる。これは上昇経路として断層のような亀裂系を水みちとしているためであろう。また、その分布が深部低周波地震の分布とも整合的であり、現在生起している地殻下部の熱水活動を反映していると考えられる (風早他, 2014)。

4. スラブ起源水の組成特徴

マグマ起源ガスの組成等から類推するとスラブ起源水は元々 Cl の他に CO₂、硫黄種等を多く含んでいたと思われるが、その上昇過程で岩石-水反応等により組成を変化させると考えられる。図 2 に陰イオンの水質特徴を示す。西南日本のスラブ起源水の化学的特徴は、Na-Cl・HCO₃ 型が多く、大部分は硫酸イオン (SO₄) に欠乏することがわかる。地下深部は還元的环境であり、硫黄種は S²⁻ で存在しているため、上昇過程で硫化物として沈殿し失われた可能性を指摘しておきたい。図 3 に示したように、スラブ起源水が混入する地下水・温泉水のほとんどは Cl 型である。一部 SO₄ を含む水は山陰地方にのみ存在している。山陰地方では第三紀火山岩類 (グリーンタフ) が広く分布しており、地層との反応により Na-SO₄ 型のグリーンタフ型の温泉水が生成される可能性がある。以上より、スラブ起源水の組成は NaCl 型から Na-Cl・HCO₃ 型であることを特徴としている。また、一部は NaCl 型であるが遊離 CO₂ を非常に多く含んでいる。

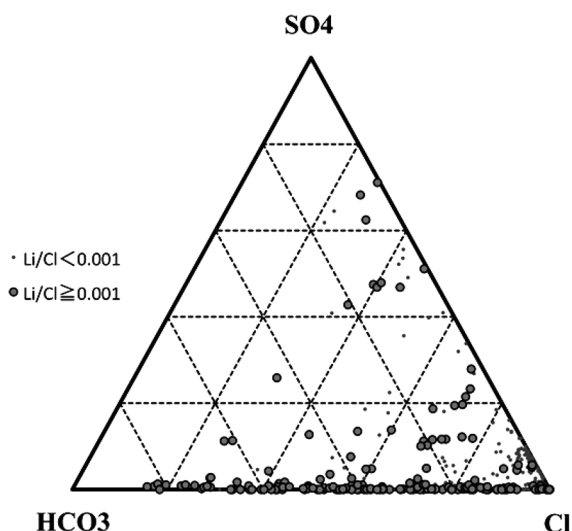


図 2 深層地下水・温泉水の陰イオン組成
Li/Cl > 0.001 がスラブ起源水を示す。

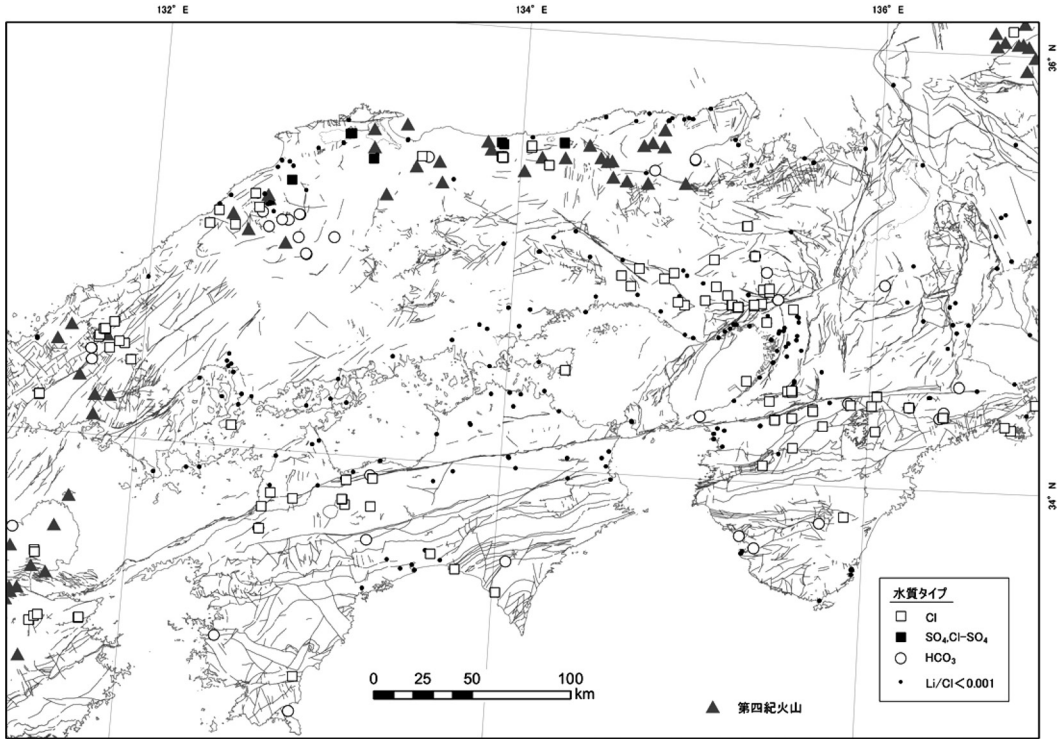


図 3 スラブ起源水の混入する深層地下水・温泉水の水質タイプの空間分布
Cl型が主流であり、HCO₃型が四国に、SO₄-Cl及びSO₄型が山陰地方の火山近傍に存在する。

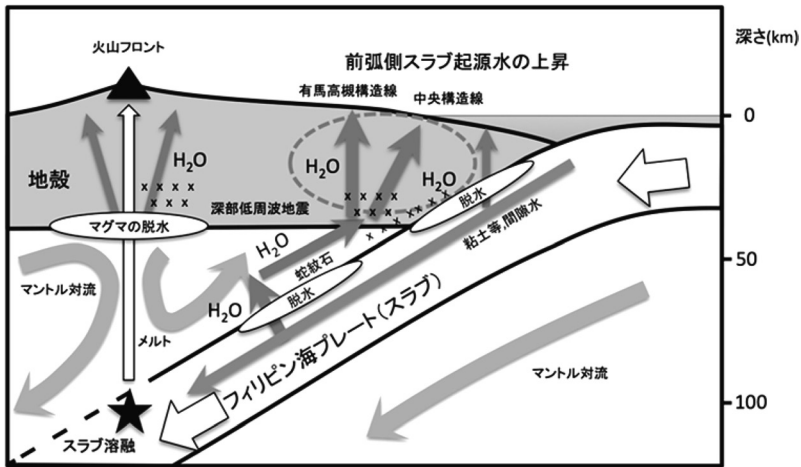


図 4 西南日本弧における固体地球内の水循環模式図
片山他 (2010) を元に作成した風早他 (2014) の図を改変

5. スラブ起源水の上昇域の原因と沈み込み帯における水循環の関係

図 1 により西南日本におけるスラブ起源水の上昇域の分布特徴は、第四紀火山周辺のみならず、

四国一近畿地方の前弧側に広く及んでいることがわかった。この原因は、西南日本弧における沈み込み帯の特徴に起因していると考えられる。図 4 に模式的に示すように、西南日本弧ではフィリピン海プレートの沈み込みが浅い角度であり、また、フィリピン海プレート自体が若く薄いため、マントル内の比較的浅所で脱水反応が起きる。さらに、ウェッジマントルの対流が限定されており、スラブから脱水した水は対流によってマントル深部に引きずり込まれることなく上昇しうる (片山他, 2010)。このことは、前弧側に広域的なスラブ起源水の上昇が起きていることを示す観測結果と非常によく整合している。したがって、西南日本におけるスラブ起源水の分布はフィリピン海プレートの沈み込みの様式に強く規制されていることを示している。前弧側に上昇するスラブ起源水は、マグマを生成することなく熱水流体としてマントル内を上昇し、地殻内では断層・構造線等を水みちとして地表付近に到達すると考えられる。一方、背弧側に見られるスラブ起源水は、マントル内でマグマを生成し、地殻下部に到達後、マグマの固化に伴い放出された熱水を起源とするものであろうと考えられる。

6. ま と め

スラブ起源水の温泉水への混入について、Li/Cl 指標が有効である。西南日本において温泉水中に混入するスラブ起源水の水質特徴と分布原因について考察した。スラブ起源水の水質特徴は、前弧側では $\text{Cl} \sim \text{Cl} \cdot \text{HCO}_3$ 型を主体としており、S 種に欠乏する。また、背弧側では $\text{Cl} \cdot \text{SO}_4 \sim \text{SO}_4$ 型が主体であることがわかった。この原因は、前弧側では、地殻深部の還元的環境下で溶存イオウ種が硫化物として沈殿し失われた可能性があり、背弧側では火山フロントに沿って存在する第三紀火山岩類 (グリーンタフ) との地層反応により SO_4 が付加された可能性を指摘した。スラブ起源水の広域分布は、西南日本弧におけるフィリピン海プレートの沈み込みに大きく関係しており、非火山性のスラブ起源水の上昇が前弧側でみられる。背弧側でみられるスラブ起源水は第四紀火山の分布と整合的でありマグマが地殻下部で固化した際に放出した熱水を起源としているものと考えられる。

謝 辞

北岡豪一大会委員長より、公開講演の機会をいただいた。本稿はその内容を示したものである。本講演にあたって用いたデータは、産総研活断層・火山研究部門深部流体研究グループの調査当時のメンバー (高橋正明, 安原正也, 稲村明彦, 森川徳敏, 佐藤 努, 高橋 浩, 尾山洋一, 大和田道子, 塚本 斉, 堀口桂香, 戸崎裕貴, 切田 司, 鈴木秀和, 芝原暁彦) の各氏および岡山理科大学北岡豪一氏とともに現地調査を行い、分析したものである。上記の皆様へ深く感謝いたします。

引用文献

- Matsubaya, O., Sakai, H., Kusachi, I. and Satake, H. (1973) : Hydrogen and oxygen isotope ratios and major element chemistry of Japanese thermal water systems. *Geochem. J.*, **7**, 123-151.
- 風早康平, 高橋正明, 安原正也, 西尾嘉朗, 稲村明彦, 森川徳敏, 佐藤 努, 高橋 浩, 北岡豪一, 大沢信二, 尾山洋一, 大和田道子, 塚本 斉, 堀口桂香, 戸崎裕貴, 切田 司 (2014) : 西南日本におけるスラブ起源深部流体の分布と特徴, *日本水文科学会誌*, **44**, 1-14.
- 西村 進, 桂 郁雄, 西田潤一 (2006) : 有馬温泉の地質構造, *温泉科学*, **56**, 3-15.
- 長谷川昭, 中島淳一, 北佐枝子, 辻 優介, 新居恭平, 岡田知己, 松澤 暢, 趙大鵬 (2008) : 地震波でみた東北日本沈み込み帯の水の循環, *地学雑誌*, **117**, 59-75.

- 片山郁夫, 平内健一, 中島淳一 (2010) : 日本列島下での沈み込みプロセスの多様性, 地学雑誌, **119**, 205-223.
- 高橋正明, 風早康平, 安原正也, 塚本 齊, 佐藤 努, 高橋 浩, 森川徳敏, 大和田道子, 尾山洋一, 芝原暁彦, 稲村明彦, 鈴木秀和, 半田宙子, 仲間純子, 松尾京子, 竹内久子, 切田 司, 大丸 純 (2011) : 深層地下水データベース, 地質調査総合センター研究資料集, no. 532, 産業技術総合研究所地質調査総合センター.
- Nishio, Y., Okamura, K., Tanimizu, M., Ishikawa, T. and Sano, Y. (2010) : Lithium and strontium isotopic systematics of waters around Ontake volcano, Japan: Implications for deep-seated fluids and earthquake swarms. *Earth Planet. Sci. Lett.*, **297**, 567-576.
- Kusuda, C., Iwamori, H., Nakamura, H., Kazahaya, K. and Morikawa, N. (2014) : Arima hot spring waters as a deep-seated brine from subducting slab, *Earth Planets Space*, **66** : 119 doi : 10.1186/1880-5981-66-119
- 網田和宏, 大沢信二, 杜 建国, 山田 誠 (2005) : 大分平野の深部に賦存される有馬型熱水の起源, 温泉科学, **55**, 64-77.
- 網田和宏, 大沢信二, 西村光史, 山田 誠, 三島壮智, 平島崇男 (2014) : 中央構造線沿いに湧出する高塩分泉の起源—プレート脱水流体起源の可能性についての水文化学的検討—. *日本水文科学会誌*, **44**, 17-38.
- Iwamori, H. (1998) : Transportation of H₂O and melting in subduction zones. *Earth Planet. Sci. Lett.*, **160**, 65-80.
- 松葉谷治, 酒井 均, 日下部実, 佐々木昭 (1980) : 長野県の温泉についての同位体化学的調査報告, 岡山大学温泉研究所報告, **50**, 17-24.