西南日本におけるスラブ起源深部流体の分布と特徴

風早 康平^{*1}・高橋 正明^{*1}・安原 正也^{*1}・西尾 嘉朗^{*2}・稲村 明彦^{*1}・
森川 徳敏^{*1}・佐藤 努^{*1}・高橋 浩^{*1}・北岡 豪一^{*3}・大沢 信二^{*4}・
尾山 洋一^{*1}・大和田 道子^{*1}・塚本 齊^{*1}・堀口 桂香^{*1}・
戸崎 裕貴^{*1}・切田 司^{*1}

Spatial distribution and feature of slab-related deep-seated fluid in SW Japan

Kohei KAZAHAYA^{*1}, Masaaki TAKAHASHI^{*1}, Masaya YASUHARA^{*1}, Yoshiro NISHIO^{*2},
Akihiko INAMURA^{*1}, Noritoshi MORIKAWA^{*1}, Tsutomu SATO^{*1}, Hiroshi A. TAKAHASHI^{*1},
Ko-ichi KITAOKA^{*3}, Shinji OHSAWA^{*4}, Yoichi OYAMA^{*1}, Michiko OHWADA^{*1},
Hitoshi TSUKAMOTO^{*1}, Keika HORIGUCHI^{*1}, Yuki TOSAKI^{*1} and Tsukasa KIRITA^{*1}

Abstract

Recent seismic monitoring mainly by the Hi-net (High sensitivity seismograph network in Japan) for the last decade has been revealing the 3D structure of velocity anomaly in the crust and mantle due to heterogeneous presence of deep-seated fluids and fluid-related deep low frequency earthquakes in subduction zones of Japan arc. Petrological water circulation models combined with geophysical subduction models quantitatively show the water budget in the solid earth. The recent findings infer the importance of deep hydrothermal fluid on the occurrence of inland earthquakes. As the models are built with the result obtained by monitoring, experimental techniques or simulations, implications from evidence-based geochemical and geological studies are expected for the proof of water circulation models. Hence, we examined chemical features of deep groundwaters in SW Japan arc, and showed spatial distribution of deep-seated fluid mixed into groundwater. We found that the deep-seated fluid, whose isotopic composition is similar to magmatic, has the high Li/Cl ratio (>0.001 in wt. ratio), and concluded that Li/Cl is a good indicator for detecting the slab-related deep-seated fluid in groundwaters. 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. In most cases, 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, slab-related deep-seated fluid, stable isotope ratio, lithium concentration

* 1 産業技術総合研究所地質情報研究部門 Geological Survey of Japan, AIST

* 2 海洋研究開発機構海底資源研究プロジェクト Submarine Resources Research Project, Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology (JAMSTEC)

* 3 岡山理科大学理学部 Faculty of Science, Okayama University of Science

* 4 京都大学大学院理学研究科附属地球熱学研究施設 Beppu Geothermal Research Laboratory, Institute For Geothermal Sciences, Kyoto University

I. はじめに

日本列島はプレートの沈み込み帯に位置し、スラブを起源とする水が地球内部を定常的に循環している場であると考えられ、島弧マグマの発生やスラブ起源熱水の上昇場となっている (Tatsumi, 1989; Giggenbach, 1992; 風 早, 1997; Iwamori, 1998)。Hacker (2008) は、沈み込むスラブに含まれる鉱物や間隙水について熱力学的に検討し、スラブの脱水により地殻深部やマントルに供給される水の量的検討を行っている。近年、Hi-net地震観測網等の整備 (Obara et al., 2005) によって地震観測が飛躍的に向上したことにより、日本列島下の精密な地震分布や地殻・マントルの三次元地震波速度構造が解明され、地殻流体の存在や流路に関する知見が集積されつつある。西南日本においては、1995年兵庫県南部地震、2002年鳥取県西部地震に共通する特徴として、三次元地震波速度構造や深部低周波地震などから地殻内深部流体の関与が示唆されている (Zhao et al., 1996; 2004)。また、南海トラフから沈み込むフィリピン海プレートでは、紀伊半島から四国にかけての広範囲にわたって深さ35～40 kmのプレート境界付近でスラブの脱水にともなう熱水活動に起因すると考えられる深部低周波微動を生じている (Obara, 2002)。西南日本 (特に近畿地方の大阪周辺部) においては、孤立的に深部低周波地震も多く発生しており (高橋・宮村, 2009)、これらも第四紀火山活動がない地域であるので、地殻下部の深部流体活動が原因であると考えられている (例えば、大見, 2002)。

一方で、深部流体の地球化学的な検討も古くから行われている。1970年代頃から、安定同位体比を用いた手法により温泉の起源の研究が急速に進展した。松葉谷ほか (1974; 1980) は、日本列島各地に湧出する温泉水の化学・同位体の研究を行い、有馬温泉、宝塚温泉 (兵庫)、石仏 (大阪) および鹿塩 (長野) の湧出水が高塩濃度で酸素同位体比が高い端成分を持つ“地下の塩水”であり、それらを「有馬型」と名付け、成因につい

て考察している。最近では、西村ほか (2006) が有馬温泉の起源について、海水の2倍以上の塩濃度でCO₂に富む熱水はフィリピン海プレートの脱水によるものと言及している。網田ほか (2005; 2014) は、大分県内および中央構造線沿いの温泉について、有馬型温泉水に似た高いLi, B, Cl濃度を持つNaCl-CO₂型の温泉水の端成分がスラブの脱水起源の熱水であるとしている。このように、地震観測や地球化学的調査等の研究から、地殻内部の水の分布や化学・同位体的特徴についてのデータが得られつつあり、急速に本分野の進展が見られる。

このような背景に沿って、本論文では、地球内部の水循環について概説し、スラブから地殻深部へ供給される熱水について議論する。そして、スラブ起源と考えられる熱水の化学的特徴や産状について述べる。次に、西南日本の中国-四国-近畿地方における深部流体の分布を示し、その分布の特徴と原因について考察したい。なお、深部流体は、非天水起源の地下水、流体と定義されているが (産業技術総合研究所深部地質環境研究センター, 2007)、本論文においては、化石海水や油田鹹水と称される長期滞留している停滞型の水や続成流体等は含めないで、特に深部から上昇している流体について深部流体と呼ぶことにする。

II. 沈み込み帯の水循環

1. 島弧の水循環モデル

日本列島は、間隙水や含水鉱物の形で水を含んだ海洋プレートが沈み込むため、固体地球における水循環の場となっている。海洋プレートは中央海嶺などのマグマ活動で海水と反応し、玄武岩が変質して含水鉱物を含む。また、プレート運動により移動している間に堆積物をプレート上面に集積し、含水鉱物や間隙水を持つ。これらの水は、プレートが沈み込む際に、浅所においては圧密作用による間隙水放出や続成作用による脱水によって、スラブ (沈み込んだ海洋プレート) から水が放出される。さらに深所では、変成作用によって

スラブ脱水が生じると考えられている。変成作用によるスラブ脱水が島弧マグマ発生の原因となっている (Tatsumi, 1989; Giggenbach, 1992) が、脱水から火山噴火にいたるプロセスには、まだ不明点が多い。日本列島では、東北日本弧は東から太平洋プレートが沈み込み、西南日本弧では南からフィリピン海プレートが沈み込む。この両プレートは生成年代や沈み込む角度が異なることにより、スラブの厚さや温度などの違いを生じ、脱水プロセスに大きな差をもたらす (Peacock and Wang, 1999)。東北日本弧の沈み込み帯の水循環モデルには、岩石—水反応の温度圧力依存性からモデル化した Iwamori (1998) を地震波速度構造の観測結果に基づき改訂した長谷川ほか (2008) によるものがあり、西南日本弧におけるモデルは、マンテル対流の様式と含水鉱物の安定性などを考慮し作成した片山ほか (2010) によるものがある。

片山ほか (2010) のものにスラブ水の移動を加えた固体地球内部の水循環について、東北日本弧と西南日本弧を比較したものを Fig. 1 に模式的に示す。以下、モデルについて概説するが、ほとんどは片山ほか (2010) による。東北日本弧では太平洋プレートが古くて厚いため、スラブは比較的低温 (深さ 50 km で 210°C) であり、温度の上昇による脱水反応が生じるのは深さ 100 km 程度 (Fig. 1A) になる。この位置でスラブが脱水し、直上のマンテルを蛇紋岩化する。沈み込み角が大きいのでマンテル対流がウェッジマンテル内に深く入り、蛇紋岩はスラブに引きずられる形でマンテルの深部に向かう。蛇紋岩の分解温度に達すると脱水し、水は熱水流体としてマンテル内を上昇し、ある場所 (温度の高いマンテル) でマンテルを部分熔融し、メルトを形成する。一方、西南日本弧では、深さ 50 km でスラブは 510°C であり、すでに脱水反応を起こす。沈み込み角が小さいためスラブ上面において下降するマンテル対流はウェッジ深くに入らず、生成した蛇紋岩は浮力等によりスラブに沿って上昇する (Fig. 1B)。このとき脱水により生成した熱水がマンテルの蛇紋岩

Fig. 1 Schematic diagrams of water circulation at NE and SW Japan arcs (revised from Hasegawa et al., 2008 for NE Japan arc, and from Katayama et al., 2010 for SW Japan arc). Blue and red arrows indicate water paths for aqueous solution or hydrous mineral, and for melt or magma, respectively. Dehydration (dewatering) place is noted as “dh”. A) NE Japan arc: Dehydration of Pacific slab at 80~100 km depth makes serpentinite in the mantle, and serpentinitized mantle descends parallel to slab driven by mantle flow and releases water. The water ascent causes mantle melting. Thus water circulation at forearc position is very minor, and the main process of water transport to the crust at NE Japan arc is the magma process. B) SW Japan arc: Dehydration of the Philippine Sea slab subducted from Nankai Trough occurs at shallower depth due to higher temperature of the slab than that of NE Japan arc. Serpentinite probably rises by buoyancy and excess water flow occurs parallel to the serpentinite layer, and water circulation is concentrated in shallow part of subduction zone in SW Japan arc. Vigorous water flow makes DLF tremors or DLF earthquakes at lower crust.

化よりも過剰に放出されれば、蛇紋岩層に沿って熱水流体が上昇するだろう。蛇紋岩はマントル深部に運ばれないため、脱水分解はしない。西南日本弧におけるマグマは、東北日本弧のようなスラブ水のマントルへの付加による部分溶融によるのではなく、スラブの直接融解（スラブ水も含む）により生成する。山陰地方に存在する大山や三瓶火山について、マグマの成因がフィリピン海プレートの融解であることが岩石学的にも支持されている（片山ほか，2010）。

詳しくは後述するが、西南日本弧においては、非火山性の深部低周波（DLF）微動やDLF地震が生じており、それらにも熱水流体が関与していると推定されている（Obara, 2002; Ohmi and Obara, 2002）。Shelly et al. (2006) は、四国西部から広島県にいたる断面で地震波の速度構造を示し、四国西部のDLF微動発生域がプレート境界にあり、地震波速度構造が低速度かつ高 V_p/V_s 比であることを明らかにし、蛇紋岩と流体の存在を示唆した。しかし、Nugraha and Mori (2006) によれば、DLF微動はスラブ上面より約5 km浅いところで生じている。つまり、それはスラブから脱水した流体がモホ面近傍あるいはプレート境界などの不連続面に移動していることを示唆する。以上のように、西南日本弧は若いフィリピン海プレートが熱いマントルに沈み込むことにより、スラブの脱水が比較的浅い深度で効率的に生じる場であり、東北日本弧ではマグマ生成に関与するスラブ水が西南日本弧ではマグマをつくらずそのまま熱水流体として上昇する場であるといえる。

2. 地殻深部への熱水供給量

存在が明らかとなってきたスラブ起源の深部流体は、Ito et al. (1983) およびHacker (2008) による解釈とモデルをもとに、その地殻への流量を算出することができる。Ito et al. (1983) は、地球内部の水循環において、沈み込みに伴いマントルウェッジへ供給される水の量とマグマを介して地殻へ放出される量に大きな差があり、地球内部

への供給過多であることを示した。この差は、マントルに供給される水とマグマではなく熱水流体として地殻に供給される水が大量に存在することを示唆する（風早，1997）。Ito et al. (1983) によると、全地球における沈み込む水の量とマグマにより地殻にもたらされる水の量の差は、 $(1.3 \sim 10.8) \times 10^{14}$ g/yである。差の推定値の幅が大きいのは、それぞれの元の見積値に大きな誤差があるためである。全地球の島弧の総延長を36000 km (Parsons, 1981) とすると、平均的島弧100 kmあたりでは、 $(4 \sim 30) \times 10^{11}$ g/yの水がスラブ起源熱水流体として地殻に供給されていることになる。フィリピン海プレートが若く、プレートの沈み込む運動速度（6 cm/y）が、海洋プレートの平均運動速度（7 cm/y）よりも遅く（Shiono and Sugi, 1985）、プレートの厚みも薄いということから、ここでは大洋の大部分を占める古くて厚い海洋プレートの海洋地殻の1/3程度の厚みとして計算する。プレートの違いを考慮すると、西南日本弧（南海トラフにおける沈み込みに対応）においては平均的島弧の30%のスラブ起源水が地殻に供給され、四国西端から紀伊半島の島弧長約500 kmあたり $(6 \sim 50) \times 10^{11}$ g/y（ $= 20 \sim 180$ L/sec）の水供給率となる。一方、Hacker (2008) では、沈み込みの速度や海溝の長さ、プレートの厚さや温度の違いなどがプレート毎の脱水量の違いを決定している。Hacker (2008) の岩石学的スラブ脱水モデルを元に算出したマントルに供給される水の量は、西南日本弧の本論文で扱う範囲（島弧長500 km）あたり約40 L/secである。

この供給量は観測可能な量であろうか。西南日本弧における流量推定値が満遍なく定常的に地表に供給されとした場合、中国-四国-近畿地方の前弧側の陸地面積が約50000 km²であるから、平均的な地表へのスラブ起源深部流体のフラックスは0.0008 L/sec/km²となる。降水を起源とする表層～浅層の天水循環系は、年間平均浸透量を1 mとした場合に32 L/sec/km²であるから、天水循環量の0.0025%にすぎず、1/40000に希釈され

ることになる。有馬型温泉水はCl濃度で4wt%以上と考えられている（松葉谷ほか，1974）。希釈により，表層～浅層の天水循環系では，深部流体の寄与は1 ppm程度のCl濃度になり，風送塩の濃度よりも低くなるので，流動が活発な浅層地下水流動系において観測するのは難しいはずである。しかし，流動が緩慢な深層地下水系では逆に十分検出可能な流量である。Morikawa et al. (2005) は，深部流体の混入がみられる神戸地域の深層地下水について，年代と深部流体の流量を同時に推定する手法を提案している。彼らはヘリウム同位体比を用いて平均滞留時間を600～1006 m深度の深層地下水系で2.5万年から11万年，地下1600 mでは23万年と推定している。帯水層の体積（50 km³），間隙率（30%）等を考慮し，滞留時間を2.5～11万年とすると，神戸地域（100 km²）の天水起源の深層地下水の流動量は0.04～0.19 L/sec/km²である。一方，Morikawa et al. (2005) によれば，有馬型の深部流体の流量（Cl濃度4wt%の水として）は神戸地域において0.008 L/sec/km²になる。つまり，天水循環量の1/5～1/25に匹敵する量の深部流体が深層地下水系に流入している。この結果は，流入する深部流体がスラブ起源の深部流体であることを示唆するとともに，水質や同位体組成等から深部流体の混入を容易に検出できることを意味する。

神戸地域全体の深部流体流量は0.8 L/secであり，有馬温泉における湧出量（2.7 L/sec：Cl濃度4wt%換算）にほぼ匹敵する量になる（Morikawa et al., 2005）。この神戸および有馬の狭い地域においてHacker（2008）による西南日本弧全域の上昇量（60 L/sec）の約6%を占めていることになる。これは，深部からの流体供給は，実際には均一的な拡散過程によるのではなく，断層，構造線などの水みちを利用し上昇するためであろう。有馬型温泉水として分類された有馬や宝塚の温泉水は，有馬-高槻構造線に沿って湧出し，神戸地域では六甲断層系から帯水層へ供給される（Morikawa et al., 2005）。また，石仏においても花崗岩体の断層系から湧出する（田中ほか，

2013）。さらに，鹿塩の鉱泉水が中央構造線の近傍で三波川帯の中の断層岩中から湧出していることから裏付けられる。

Ⅲ. 深部流体の分布

1. 深部流体指標としてのLi/Cl比

有馬型深部流体は，NaCl濃度が非常に高く，CO₂を多く含む傾向にある（松葉谷ほか，1974；西村ほか，2006）。同時にLiやBを多く含む特徴もある（網田ほか，2005）。地下水中に含まれるLiイオンは，深部から供給される熱水に多く含まれ，地表水の影響を受けにくいことから地下深部から上昇する熱水の指標として有効である（Nishio et al., 2010）。これは，Liは水—岩石反応により，一度水溶液相に移動すると，固相に戻らないというYou et al. (1996) やJames et al. (2003) による実験結果からも定性的に示されている。彼らの実験によれば，Liは温度上昇とともに岩石から溶液相に溶け出してくるが，その後温度を常温に戻しても，溶液中のLi濃度は変化しない。また，Liは350°Cで急激に溶出する特徴も示した。したがって，深部から上昇してくる高温を経験した熱水成分のLi濃度が高いことが期待される。

我々が保有する深層地下水試料のうち，水の安定同位体比や水質により起源・成因が分類可能と考えられる計50地点の深層地下水について，イオンクロマトグラフ（Dionex DX-500, Thermo Fisher Scientific社）により，LiおよびCl濃度を，質量分析計（Delta plus, Delta V advantage, Thermo Fisher Scientific社）によりδDおよびδ¹⁸Oを分析した。選定した水試料は，先行研究の記載等を基にa) 有馬型深部流体の寄与があるグループとして有馬周辺地域（兵庫），石仏（大阪）地域（松葉谷ほか，1974），中央構造線周辺および鹿塩（長野）（益田ほか，1988）地域，b) 油田鹹水グループとして新潟地域（加藤・梶原，1986），秋田地域（加藤ほか，2000），北海道北部地域（鈴木・柴田，2007），およびc)

変質海水グループとして関東平野南部地域（関ほか，2001），青森東部地域のそれぞれ3つのグループに分類した。分析結果をTable 1に示す。Fig. 2にこれらの深層地下水試料の水の安定同位体比とCl濃度の関係を示す。3つのグループは， δD とClの関係（Fig. 2A）においても δD と $\delta^{18}O$ の関係（Fig. 2B）においてもそれぞれ明瞭な違いと特徴的組成を示し，a) 有馬型深部流体，b) 油田鹹水，c) 変質海水の分類が妥当であることを示す。次にこれらのLi/Cl比の値を調べた結果をFig. 3に示す。Li/Cl比（重量比）で0.001以上の水が有馬型深部流体と分類された水と一致することがわかる。この結果から有馬型深部流体は，地殻深部において高温熱水であったことを示す。指標としてLi濃度ではなくClとの比をとったのは，深部から上昇する熱水がNaCl型と考えられるためであり，Li/Clのように比を用いることにより浅層地下水等による希釈を受けても評価ができると考えられるからである。

有馬型深部流体と分類（Table 1）した有馬，宝塚地域をはじめ，石仏や鹿塩で湧出する深部流体は，Fig. 2Bにおいて，混合端成分がマグマ水の方方向にあり，マグマ水と同様の起源を持つと考えられる。しかし，同時にこれらの水はすべて前弧側にあり，地下にマグマが存在するとは考えにくい。Fig. 1に示したように，島弧においてはスラブから脱水した流体はマントル内でマグマを生成するものとそのまま熱水として上昇する水の2種類がある。この違いは水の上昇経路の違いにのみ依存し，水がマントルの岩石を融解させるかどうかの違いであり，大本の水はどちらもスラブの脱水を起源とする。また，西南日本弧においては，スラブ脱水により生成された水の大部分は，ウェッジマントルの蛇紋岩化に寄与し，過剰の熱水流体はそのままマグマを生成せず，地殻下部に供給されると考えられる（Fig. 1）。以上より，西南日本弧の前弧側に存在が確認される高いLi/Cl比を持つ深部流体成分は，深部から直接熱水として上昇するスラブ起源深部流体であると考えられる。

Table 1 Lithium and chlorine concentrations, stable isotope composition of deep groundwaters and spring waters collected from the places of known water origin; a) Arima-type deep-seated fluid group: Arima hot spring and Median Tectonic Line (MTL) area, b) oil field brine and formation water group: north Hokkaido area, Niigata and Akita oil fields, and c) altered seawater group: south Kanto area and east Aomori area. Seawater data is listed for comparison.

	Cl (mg/L)	Li (mg/L)	δD_{SMOW} (‰)	$\delta^{18}O_{\text{SMOW}}$ (‰)
a) Arima-type deep-seated fluid group				
Arima area 1	36500	52.2	-35	4.5
Arima area 2	32800	47.7	-37	3.3
Arima area 3	29100	37.7	-39	1.8
Arima area 4	21700	37.0	-44	-2.7
Arima area 5	16400	20.4	-46	-3.9
Takarazuka area 1	16300	23.5	-42	-0.3
Takarazuka area 2	4400	7.23	-50	-7.0
MTL (Ishibotoke) area 1	24800	83.5	-44	-3.1
MTL (Ishibotoke) area 2	15100	15.7	-51	-6.1
MTL (Kashio) area 1	4250	8.20	-55	-2.3
MTL (Kashio) area 2	1430	4.11	-58	-5.0
MTL (Kashio) area 3	23100	80.7	-63	-6.8
MTL (Kashio) area 4	16900	55.4	-66	-7.7
MTL (Wakayama) area 1	12800	43.9	-33	5.2
MTL (Wakayama) area 2	7370	23.2	-52	-7.4
b) oil field brine and formation water group				
north Hokkaido area 1	9500	3.00	-15	5.9
north Hokkaido area 2	11900	11.3	-18	5.5
north Hokkaido area 3	9940	2.45	-14	5.2
north Hokkaido area 4	16400	2.13	-8	4.9
north Hokkaido area 4	16200	2.64	-16	3.9
Niigata oil field 1	9010	0.80	-11	1.0
Niigata oil field 2	22000	1.66	-4	-3.4
Akita oil field 1	2640	0.07	-13	3.7
Akita oil field 2	3280	0.11	-13	3.1
Akita oil field 3	5970	0.06	-12	1.6
Akita oil field 4	9840	0.13	-12	0.6
Akita oil field 5	17000	0.56	-5	0.3
Akita oil field 6	15300	0.64	-8	-0.5
Akita oil field 7	12000	0.22	-9	-1.1
Akita oil field 8	13900	0.48	-8	-2.1
Akita oil field 9	14700	1.30	-9	-3.4
c) altered seawater group				
south Kanto area 1	11200	0.14	-10	-0.1
south Kanto area 2	12100	0.28	-14	-0.7
south Kanto area 3	12100	0.16	-19	-2.3
south Kanto area 4	9370	0.21	-26	-3.0
south Kanto area 5	14000	0.39	-11	-3.8
south Kanto area 6	13300	0.25	-19	-4.0
south Kanto area 7	9070	0.13	-32	-4.5
south Kanto area 8	2800	0.14	-53	-8.0
south Kanto area 9	1270	0.05	-56	-8.5
south Kanto area 10	1110	0.09	-61	-9.1
south Kanto area 11	18600	0.90	-4	-2.0
south Kanto area 12	17200	0.62	-8	-2.3
east Aomori area 1	6920	1.37	-37	-5.7
east Aomori area 2	5180	1.44	-44	-6.6
east Aomori area 3	5850	0.15	-50	-7.6
east Aomori area 4	4450	0.07	-57	-8.9
east Aomori area 5	2220	0.06	-64	-9.6
east Aomori area 6	1370	0.04	-71	-10.5
seawater	19000	0.17	0	0.0

Fig. 2 Relations (A) between Cl concentration and hydrogen isotope ratio, and (B) between hydrogen and oxygen isotope ratios of deep groundwaters taken from the places of known water origin listed in Table 1.

Fig. 3 Variation of Li/Cl weight ratio of selected deep groundwaters and spring waters listed in Table 1. All the points grouped as Arima-type deep-seated fluid show Li/Cl weight ratio of higher than 0.001.

が妥当であろう。

2. 深部低周波微動・地震および第四紀火山の分布

前述したようにDLF微動の原因は、フィリピン海プレートの沈み込みに関連するスラブの脱水により発生した熱水活動によるものと推測されている (Obata, 2002)。Fig. 4に深部流体の発生や

上昇に関連するDLF微動・DLF地震 (気象庁一元化震源データ, 第四紀火山 (西来ほか (編), 2012), 活断層 (活断層データベースによる; 産業技術総合研究所, 2009) および地質断層・構造線 (シームレス地質図による; 産業技術総合研究所地質調査総合センター (編), 2012) の分布を示す。火山の存在は、地殻下部にマグマを集積するため、マグマ固化に伴い放出される深部流体が周辺断層あるいは旧火道等を通して上昇する。また、活断層や構造線の存在は、深部流体上昇の水みちとして機能するはずである。西南日本弧では、特徴的なDLF微動が東海-紀伊半島-四国にいたる約1000 kmにわたって帯状に生じ、その深度は四国で35~40 km、紀伊半島では40~45 kmで沈み込むフィリピン海プレートと上盤のユーラシアプレートの境界に位置する (Obata, 2002)。また、本地域においては、孤立型のDLF地震も多数起きており、火山の存在していない大阪湾、有馬、京都府中部、鳥取県西部、三次北部に加え、第四紀火山である三瓶山等でも生じている (高橋・宮村, 2009; Fig. 4)。これらの震源の深さは主に20~40 kmの範囲であり、地殻下部に相当する。Ohmi and Obata (2002) によれば、2000年に起きた鳥取県西部地震の震源域では、それ以前からDLF地震が起きており、DLF

Fig. 4 Spatial distribution of tectonic lines, active faults, geological faults, DLF events, and Quaternary volcanoes in SW Japan (Chugoku–Shikoku–Kinki district). The active faults, geological faults and tectonic lines are plotted using the active fault database of Japan (AIST, 2009) and the seamless digital geological map of Japan (GSJ, 2012). The DLF events are plotted from the data in JMA unified earthquake catalog, and are shown separately as the isolated DLF earthquakes (Takahashi and Miyamura, 2009) and the DLF tremors in a belt in Shikoku and Kii Peninsula (Obara, 2002). The points of Quaternary volcanoes are plotted using the database of Quaternary volcanic and intrusive rock bodies in Japan (Nishiki et al., 2012).

地震の解析結果から地震断層の活動における流体の関与を指摘している。また、長谷川ほか (2008) は、それまでの地震波の研究の総括として、スラブからの水の供給と地震の関係をまとめており、その中でDLF地震が内陸型の地震を引き起こす引き金となる熱水活動の存在を示しているとしている。

3. 西南日本における深部流体の空間分布

前述したようにLi/Cl比は深部流体混入の指標となる。我々が保有する深層地下水データベース (高橋ほか, 2011) の水質データのうち、西南日本 (中国–四国–近畿地方) におけるLi/Cl比が利用可能なものを抽出した。この際、Cl濃度が低

い天水希釈度の高い地下水については、Li濃度も当然低いため、分析精度の誤差の問題がでてくる。したがって、ここではCl濃度が200 mg/L以上の水のみを検討対象とする。西南日本弧の深層地下水・湧水のLi/Cl比 (重量比) の空間分布をFig. 5に示す。同図中には、Fig. 4と同様に関連する可能性がある断層・構造線・第四紀火山等についても示した。山陰の火山列上、有馬–神戸–大阪周辺部、中央構造線沿い、瀬戸内海の一部、および高知、和歌山の一部などの地域でLi/Cl比の高い (重量比>0.001) スラブ起源深部流体の上昇が認められる。地殻深部から表層へ流体が上昇するには、上昇経路となる水みちが必要である。後述するように、たとえば中央構造線は地下

Fig. 5 Spatial distribution of Li/Cl weight ratio of saline deep groundwaters and spring waters ($\text{Cl} > 200 \text{ mg/L}$) in SW Japan (Chugoku–Shikoku–Kinki district). Red circle points are waters of the Li/Cl ratio greater than 0.001, indicating that they contain slab-related deep-seated fluid. Slab-related deep-seated fluid appears along the San-in volcanic belt, close to the isolated DLF earthquakes (Fig. 4) and on and around the active faults and tectonic lines.

深部に向かってどのように連続しているのかについて物理探査等により明らかになっているが、多くの活断層では明らかでない。しかしながら、近年生じている1962年M6.5宮城県北部地震 (Nakajima and Hasegawa, 2003), 1995年M7.2兵庫県南部地震 (Zhao et al., 1996), 2000年M7.2鳥取県西部地震 (Ohmi et al., 2004), 2004年M6.8新潟県中越地震 (Nakajima and Hasegawa, 2008), 2007年M6.8新潟県中越沖地震 (Nakajima and Hasegawa, 2008) などの大地震では、地震断層周辺の微小地震の震源分布から数十km下に達する断層の位置を推定することができ、深部からの流体上昇の水みちになりうる経路が存在することが示されている。さらに、上述の研究では、すべてにおいて、断層運動に伴う破壊場所のさらに下位に地震波の低速度域が広がっており、深部

流体上昇と地震発生の関連性が指摘されている。有馬–神戸–大阪周辺部および中央構造線沿いの地点については、有馬–高槻構造線、中央構造線、山崎断層 (兵庫県) や上町断層 (大阪府) 等の地殻深部と表層をつなぐ構造があり、それらが水みちとなり深部から熱水が上昇しやすいと考えられる。

これらの高いLi/Cl分布域のうち、中央構造線沿いに湧出するスラブ起源深部流体は、その位置関係から地下35~40 km付近で活動するDLF微動に関与する深部流体との関連性が疑われる。しかし、中央構造線、仏像構造線、安芸構造線などの付加体内の構造は、反射法探査等により鉛直面ではなく北に緩く傾斜している (30~40°; Ito et al., 2009) と推定されている。中央構造線は、その地表の位置から40~50 km北側の地下約

40 kmの深さでモホ面に到達しウェッジマントルにつながる。このような北傾斜の構造線などが水みちとして機能しているとすれば、四国-近畿地方に存在するDLF微動に関連する深部流体は、DLF微動のほぼ直上に位置する中央構造線や仏像構造線ではなく、安芸構造線あるいはさらに南に位置する高知沿岸域-紀伊半島の南部海域に上昇する可能性がある。Fig. 5の深部流体分布を見ると、実際に高知県沿岸部には広域に高いLi/Cl比の地下水が存在するので、これらの深部流体成分は、DLF微動に関連する可能性を指摘しておきたい。また、中央構造線やそれ以北に存在する非火山性深部流体は、Fig. 1においてマントルを蛇紋岩化する熱水流体の過剰部分が構造線を水みちとして上昇してきたものではないだろうか。

孤立型のDLF地震が大阪-京都-兵庫-和歌山に多い (Fig. 4) が、これらの震源も深度30～40 kmである。同地域ではスラブ起源深部流体が密集してみつかる (Fig. 5) ことと偶然ではないだろう。深部流体は断層等を利用して上昇すると考えられるが、神戸周辺-大阪平野の断層は主に横ずれ断層であり、傾斜は高角であるので、深部流体活動のソースと考えられるDLF地震の位置から平面的にはあまり離れない場所で湧出することが考えられる。上記の地域以外では、孤立型のDLF地震は香川中部、岡山南東部、広島北部 (三次) にみられ、対応する深部流体が近傍に上昇しているように見える (Fig. 5)。

山陰地方においては、火山性とみられるDLF地震が発生している (Fig. 4)。これらは、それぞれ島根県 (三瓶火山)、鳥取-島根県境 (横田単成火山群) などに対応すると推定される。この中で鳥取-島根県境のDLF地震は、鳥取県西部地震 (M6.7, 2002年) の震源と同じ場所で以前から起きており、深部流体と内陸地震の関連性が指摘されている (Ohmi and Obara, 2002)。これらの場所でもLi/Cl比の高い深部流体成分が確認される (Fig. 5)。

IV. まとめ

近年のHi-net地震観測網の整備等により、地震学的な地下構造の解明が急速にすすんでいる。一方では、プレートの構成物質も海洋掘削等の進展によってわかり、沈み込むスラブで起こる脱水反応や鉱物生成などの変成作用のプロセスも解析がすすめられている。そして、沈み込み帯における固体地球の水収支もわかってきた。また、DLF微動や地震の発見とともに内陸地震と深部流体の関連性なども、議論されるようになってきた。このような状況のなかで、深層地下水や温泉水の調査研究を主として行ってきた筆者らは、これまでの研究成果も顧みつつ、最新の固体地球内の水循環プロセスモデルと観測事実とを擦り合わせ、西南日本 (中国-四国-近畿地方) におけるスラブ起源深部流体の特徴と分布を示したのが本報告である。

本報告は結論として、下記のようにまとめることができる。

- 1) 沈み込み帯における水循環モデルのレビューを行い、西南日本弧は、若いフィリピン海プレートが熱いマントルに沈み込むことにより、スラブの脱水が比較的浅い深度で効率的に生じる場であり、マグマをつくらずそのまま熱水流体として上昇する場であるとした。
- 2) 水循環の定量的解釈に関するレビューを行い、西南日本弧における地殻深部へのスラブ起源熱水の供給量を推定し、その供給量は深層地下水系のような滞留時間の長い地下水系においては水質等により検出可能な量であることを示した。
- 3) 成因が判別可能な深層地下水50試料についてLi, Clおよび水の安定同位体比の分析を行い、深部流体の化学指標としてLi/Cl比が有効であることを示した。Li/Cl重量比が0.001以上の水 (ただし、Cl濃度200 mg/L以上) をスラブ起源深部流体 (マグマ起源水も含む) の指標とした。
- 4) 西南日本弧におけるスラブ起源深部流体の分

布を明らかにし、その分布と流体ソースの活動と考えられるDLF微動、地震の分布との関係や、上昇の水みちとしての断層・構造線や第四紀火山の分布との関係について議論し、相互に密接な空間的關係があることを示した。

最後に、日本列島全域のスラブ起源深部流体の地殻内における空間分布の解明、地殻内部あるいはマントル内における深部流体の流動の時定数、及び沈み込みプロセスにおけるスラブ内で生じる続成作用-変成作用などを今後の研究課題として挙げておきたい。

謝 辞

気象庁・文部科学省が協力してデータを処理して得られた気象庁一元化震源データを使用させていただきました。また、調査にあたっては、産総研地質情報研究部門の半田宙子、大丸純、岩田真理の各氏には、調査計画作成等で多くの助力をいただきました。ここに記して、深く感謝いたします。本研究は、平成18年度東南海・南海地震予測のための地下水等総合観測点整備プロジェクト、及び、文部科学省科研費新学術領域「地殻流体」(領域番号：2108)により採取した地下水試料について、一部原子力安全・保安院(現原子力規制委員会原子力規制庁)「平成24年度地層処分に係る地質評価手法等の整備」として実施した分析値を加えたものである。

参考文献

- 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・風早康平・森川徳敏・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.
- 大見士朗 (2002) : 西南日本内陸の活断層に発生する深部低周波地震. 月刊地球, 号外No. 38, 109–113.
- 風早康平 (1997) : 島弧の活火山から放出される水—その起源と量—. 日本水文科学会誌, **27**, 105–116.
- 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.
- 加藤 進・梶原義照 (1986) : 新潟地域油・ガス田付随水の酸素および酸素の同位体組成. 石油技術協会誌, **51**, 113–122.
- 加藤 進・安田善雄・西田英毅 (2000) : 秋田・山形地域油・ガス田の地層水の地球化学. 石油技術協会誌, **65**, 229–237.
- 産業技術総合研究所 (2009) : 活断層データベース2009年7月23日版. 産業技術総合研究所研究情報公開データベースDB095. 産業技術総合研究所. <http://riodb02.ibase.aist.go.jp/activefault/index.html>
- 産業技術総合研究所深部地質環境研究センター (2007) : 概要調査の調査・評価項目に関する技術資料—長期変動と地質環境の科学的知見と調査の進め方—. 地質調査総合センター研究資料集, **no. 459**, 191p.
- 産業技術総合研究所地質調査総合センター(編) (2012) : 20万分の1日本シームレス地質図データベース (2012年7月3日版).
- 鈴木隆広・柴田智郎 (2007) : 北海道, 日本海側北部の温泉資源. 北海道立地質研究所報告, **no. 78**, 15–20.
- 関 寿子・林 武司・丸井敦尚 (2001) : 関東平野における深層地下水の性状. 日本水文科学会誌, **31**, 11–24.
- 高橋浩晃・宮村淳一 (2009) : 日本列島における深部低周波地震の発生状況. 北海道大学地球物理学研究報告, **72**, 177–190.
- 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

風早・高橋・安原・西尾・稲村・森川・佐藤・高橋・北岡・大沢・尾山・大和田・塚本・堀口・戸崎・切田

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.

田中和広・東田優記・村上裕晃 (2013): 紀伊半島の中央構造線付近に見られる深部流体と地質・地質構造. 日本水文科学会誌, **43**, 137–150.

西来邦章・伊藤順一・上野龍之(編) (2012): 第四紀火山岩体・貫入岩体データベース. 地質調査総合センター速報, **no. 60**, 産業技術総合研究所地質調査総合センター.

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.

益田晴恵・橋爪 伝・酒井 均 (1988): 鹿塩地域に湧出する塩水の季節変動とその要因について. 地球化学, **22**, 149–156.

松葉谷治・酒井 均・鶴巻道二 (1974): 有馬地域の温泉, 鉱泉の水素と酸素の同位体比について. 岡山大学温泉研究所報告, **43**, 15–28.

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.

Giggenbach, W. F. (1992): Isotopic shifts in waters from geothermal and volcanic systems along convergent plate boundaries and their origin. *Earth Planet. Sci. Lett.*, **113**, 495–510.

Hacker, B. R. (2008): H₂O subduction beyond arcs. *Geochem. Geophys. Geosyst.*, **9**, Q03001, doi:10.1029/2007GC001707.

Ito, E., Harris, D. M. and Anderson Jr., A. T. (1983): Alteration of oceanic crust and geo-

logic cycling of chlorine and water. *Geochim. Cosmochim. Acta*, **47**, 1613–1624.

Ito, T., Kojima, Y., Kodaira, S., Sato, H., Kaneda, Y., Iwasaki, T., Kurashimo, E., Tsumura, N., Fujiwara, A., Miyauchi, T., Hirata, N., Harder, S., Miller, K., Murata, A., Yamakita, S., Onishi, M., Abe, S., Sato, T. and Ikawa, T. (2009): Crustal structure of southwest Japan, revealed by the integrated seismic experiment Southwest Japan 2002. *Tectonophysics*, **472**, 124–134.

Iwamori, H. (1998): Transportation of H₂O and melting in subduction zones. *Earth Planet. Sci. Lett.*, **160**, 65–80.

James, R.H., Allen, D.E. and Seyfried Jr., W. E.S. (2003): An experimental study of alteration of oceanic crust and terrigenous sediments at moderate temperatures (51 to 350°C): insights as to chemical processes in near-shore ridge-flank hydrothermal systems. *Geochim. Cosmochim. Acta*, **67**, 681–691.

Morikawa, N., Kazahaya, K., Yasuhara, M., Inamura, A., Nagao, K., Sumino, H. and Ohwada, M. (2005): Estimation of groundwater residence time in a geologically active region by coupling ⁴He concentration with helium isotope ratios. *Geophys. Res. Lett.*, **32**, L02406, doi:10.1029/2004GL021501.

Nakajima, J. and Hasegawa, A. (2003): Tomographic imaging of seismic velocity structure in and around the Onikobe volcanic area, northeastern Japan: implications for fluid distribution. *J. Volcanol. Geotherm. Res.*, **127**, 1–18.

Nakajima, J. and Hasegawa, A. (2008): Existence of low-velocity zones under the source areas of the 2004 Niigata-Chuetsu and 2007 Niigata-Chuetsu-Oki earthquakes inferred from travel-time tomography. *Earth Planets*

- Space*, **60**, 1127–1130.
- 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.
- Nugraha, A. D. and Mori, J. (2006) : Three-dimensional velocity structure in the Bungo Channel and Shikoku area, Japan, and its relationship to low-frequency earthquakes. *Geophys. Res. Lett.*, **33**, L24307, doi:10.1029/2006GL028479.
- Ohmi, S. and Obara, K. (2002) : Deep low-frequency earthquakes beneath the focal region of the Mw 6.7 2000 Western Tottori earthquake. *Geophys. Res. Lett.*, **29**, 1807, doi:10.1029/2001GL014469.
- Ohmi, S., Hirose, I. and Mori, J. (2004) : Deep low-frequency earthquakes near the downward extension of the seismogenic fault of the 2000 Western Tottori earthquake. *Earth Planets Space*, **56**, 1185–1189.
- Obara, K. (2002) : Nonvolcanic deep tremor associated with subduction in southwest Japan. *Science*, **296**, 1679–1681.
- Obara, K., Kasahara, K., Hori, S. and Okada, Y. (2005) : A densely distributed high-sensitivity seismograph network in Japan: Hi-net by National Research Institute for Earth Science and Disaster Prevention. *Rev. Sci. Inst.*, **76**, 021301, doi:10.1063/1.1854197.
- Parsons, B. (1981) : The rates of plate creation and consumption. *Geophys. J. Roy. Astron. Soc.*, **67**, 437–448.
- Peacock, S. M. and Wang, K. (1999) : Seismic consequences of warm versus cool subduction metamorphism: Examples from southwest and northeast Japan. *Science*, **286**, 937–939.
- Shelly, D. R., Beroza, G. C., Ide, S. and Nakamura, S. (2006) : Low-frequency earthquakes in Shikoku, Japan, and their relationship to episodic tremor and slip. *Nature*, **442**, 188–191.
- Shiono, K. and Sugi, N. (1985) : Life of an oceanic plate cooling time and assimilation time. *Tectonophysics*, **112**, 35–50.
- Tatsumi, Y. (1989) : Migration of fluid phases and genesis of basalt magmas in subduction zones. *J. Geophys. Res.*, **94** (B4), 4697–4707.
- You, C. F., Castillo, P. R., Gieskes, J. M., Chan, L. H. and Spivack, A. J. (1996) : Trace element behavior in hydrothermal experiments: Implications for fluid processes at shallow depths in subduction zones. *Earth Planet. Sci. Lett.*, **140**, 41–52.
- Zhao, D., Kanamori, H., Negishi, H. and Wiens, D. (1996) : Tomography of the source area of the 1995 Kobe earthquake: Evidence for fluids at the hypocenter? *Science*, **274**, 1891–1894.
- Zhao, D., Tani, H. and Mishra, O. P. (2004) : Crustal heterogeneity in the 2000 Tottori earthquake region: Effect of fluids from slab dehydration. *Phys. Earth Planet. Inter.*, **145**, 161–177.

(原稿受付：2013年5月14日)

(原稿受理：2013年7月8日)

この論文に対する「討論」を2014年8月1日まで受け付けます。

西南日本におけるスラブ起源深部流体の分布と特徴

風早 康平^{*1}・高橋 正明^{*1}・安原 正也^{*1}・西尾 嘉朗^{*2}・稲村 明彦^{*1}・
森川 徳敏^{*1}・佐藤 努^{*1}・高橋 浩^{*1}・北岡 豪一^{*3}・大沢 信二^{*4}・
尾山 洋一^{*1}・大和田 道子^{*1}・塚本 齊^{*1}・堀口 桂香^{*1}・
戸崎 裕貴^{*1}・切田 司^{*1}

要 旨

近年のHi-netによる地震観測網により、我が国の沈み込み帯における地殻・マントル中の熱水流体の不均質分布による三次元地震波速度構造の異常や深部流体に関連する深部低周波地震の存在などが明らかになってきた。地球物理学的な観測結果に基づく岩石学的水循環モデルは、固体地球内部の水収支を定量化し、滞留時間の長い深層地下水中には検出可能な濃度でスラブ脱水起源の深部流体が流入していることを示す。また、内陸地震発生における深部流体の役割も、近年重要視されている。モデルは主に地球物理学的観測やシミュレーション等の結果に基づいたものであるため、地球化学的・地質学的な物質科学的証拠の蓄積はモデルの高度化にとって重要である。そこで、我々は西南日本の中国-四国-近畿地方において深層地下水の同位体化学的特徴の検討を行い、地下水系に混入する深部流体の広域分布について明らかにした。その結果、マグマ水と似た同位体組成をもつ深部流体、すなわち、スラブ起源深部流体のLi/Cl比（重量比）が0.001より高いことを示した。Li/Cl比は、天水起源の淡水で希釈されても大きく変化しないことが期待されるため、深部流体の指標に最適である。Li/Cl比の広域分布は、スラブ起源深部流体が断層・構造線および第四紀火山近傍で上昇していることを示した。また、深部低周波（DLF）地震が起きている地域の近傍に深部流体が上昇している場合が多く見られ、DLF地震と深部流体の関連性を示唆する。

キーワード：深層地下水，スラブ起源深部流体，安定同位体比，リチウム濃度