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

田中 和広^{*1}・東田 優記^{*2}・村上 裕晃^{*3}

Deep-seated fluid around the Median Tectonic Line, Kii Peninsula and its relationship to geologic structure

Kazuhiro TANAKA^{*1}, Yuki HIGASHIDA^{*2} and Hiroaki MURAKAMI^{*3}

Abstract

Through a geological survey, this study examines the geochemical properties of groundwater and river water distributed in the environs of the Median Tectonic Line (MTL) on Kii Peninsula, Japan, and their upwelling paths in the upper crust. Carbon dioxide-bearing water spouting in the environs of the MTL is assumed to be contaminated by Arima-type fluid derived from the subducted Philippine Sea slab, based on the result of water quality, oxygen–hydrogen isotope ratio, and helium isotope ratio. Arima-type fluid is presumed to ascend along the MTL fracture zones and related faults parallel to the MTL. NaCl-type and $\text{Ca}(\text{HCO}_3)_2$ -type groundwaters with high concentrations of Cl^- discharge in the northern part of the study area at the related faults, and CaSO_4 -type and $\text{Ca}(\text{HCO}_3)_2$ -type groundwaters including some high concentrations of Cl^- spout out on the MTL in the southern part of the study area. Arima-type fluid is diluted by the local groundwater system and erupts at the intersection of faults and rivers. Cataclasites and microfractures accompanied in the faults are filled with calcite veins, showing that the fluid penetrates into them, where calcite then precipitates. As a result, the discharge path to the ground surface is sealed and eruption points then migrate to fresh fractures.

Key words: Median Tectonic Line, highly saline groundwater, geologic structure, slab-derived fluid

I. はじめに

近年、地下深部の利用開発計画、建設が進められている。重要な地下構造物の立地選定や安全性の評価においては構造物の力学的安定性に加え、深部地下水の地化学的特性や地下水流動特性に関する評価が求められている。

地下深部には天水や海水を起源とする地下水が分布しており、イオンの溶出、イオン置換、酸化

還元反応により水質が形成されることなどが明らかとなっている（核燃料サイクル開発機構, 1999）。一般に深部岩盤は透水性が低く、動水勾配が小さいことから地下水の流動速度は極めて遅く、放射性核種の移行を遅延させる還元的環境であることが明らかとなりつつある。

一方、300 m以深に分布する深部地下水には、スラブ起源とされる高塩濃度地下水（深部流体）、地熱流体、背弧側の堆積岩分布地域に分布する高

* 1 山口大学理工学研究科 Graduate School of Science and Engineering, Yamaguchi University

* 2 (株)ニュージェック NEWJEC Inc.

* 3 日本原子力研究開発機構 Japan Atomic Energy Agency (JAEA)

塩濃度深部地下水などがあり、それらは、様々な地質変動により地表付近に上昇、湧出することが知られている（産業技術総合研究所深部地質環境研究センター，2007）。

火山フロントより前弧側の非火山性地域には中央構造線（以下MTLと呼ぶ）などの断裂系に沿って高塩濃度地下水の湧出が知られており（Umeda et al., 2006），希ガスの同位体比などより、これらはスラブ起源の深部流体とされ（産業技術総合研究所深部地質環境研究センター，2007），有馬型熱水と呼ばれている（松葉谷ほか，1974）。有馬型熱水は、天水起源の地下水とは異なり、深部から上昇すること、 Cl^- や CO_2 を多量に含み反応性に富むことなどから、深部地下水環境に大きな影響を与えられとされる。そのため、安定な地下水環境が期待される高レベル放射性廃棄物の地層処分においては地下施設のサイト選定や地下水環境の長期安全性評価を行う際、有馬型熱水の影響の有無は重要な調査・評価項目の一つとなっている（産業技術総合研究所深部地質環境研究センター，2007）。特に、有馬型熱水が上昇する場を一般化することは、上記地下施設のサイト選定において重要な検討課題と考えられる。

紀伊半島には、高塩濃度地下水の湧出が知られており、水質と同位体分析の結果より、調査地域北部の地下水は有馬型熱水と天水の混合と考えられている。また、ガスのヘリウム同位体比（ $^3\text{He}/^4\text{He}$ ）は $2.1 \sim 6.1R_A$ （ R_A ：大気成分で規格化した値）を示し（東田・田中，2009）， $1.0R_A$ よりも大きいことからマントル起源のヘリウムが卓越していると考えられる（Matsumoto et al., 2003）。

既に我が国の主要な構造線に沿って、スラブ起源の深部流体が存在することや、地下深部における流体の上昇・移動に関する研究がなされている（風早ほか，印刷中）。しかし、上部地殻における流体の移動経路や地表における湧出地点と地質構造との関連性に関する議論は進んでいない。本研究では、紀伊半島内陸部における有馬型熱水の上昇過程や流動形態との関係について、主に、地表

部における構造地質学調査と地下水の地化学調査の結果から考察を行い、有馬型熱水の湧出する場を規制する要因を検討することを目的とする。

II. 調査地域の概要

1. 地形および地域概要

調査地域は、大阪府南東部の河内長野市から和歌山県北東部の橋本市にかけての地域である（Fig. 1）。周辺には、標高700～800 mの峰々からなる和泉山脈が連なる。

調査地域北部を流れる石川や加賀田川、天見川などの河川は大和川水系であり、和泉山脈から北に向かって流下している。一方、調査地域南部には、一級河川である紀の川が東から西に向かって流下しており、紀の川の支流である橋本川や山田川、田原川などの河川は和泉山脈から南に向かって流下している。

2. 地質概要

Fig. 1に調査地域周辺の地質図（水野ほか，1994；産業技術総合研究所地質調査総合センター，2010）に流体の湧出地点（Loc.）および試料番号（no.）を示す。中沢ほか（1987）によると、MTLより北側は西南日本内帯にあたり、白亜紀の領家帯花崗岩類と泉南流紋岩類を基盤とし、その南側には上部白亜系和泉層群が東西に延びて分布している。北部には領家帯花崗岩類を不整合に覆う鮮新～更新世の大阪層群、段丘堆積物および完新統が分布する。

一方、MTLの南側は西南日本外帯にあたり、三波川結晶片岩類を基盤とし、これを覆って鮮新～更新世の菖蒲谷層、段丘堆積物、扇状地堆積物および完新統が分布する（Fig. 1）。

小林（1951）によると、MTLの運動時期は鹿塩時階（白亜紀）、市の川時階（漸新～中新世）、砥部時階（鮮新世）および菖蒲谷時階（更新世）の4時階に分けられる。狭義のMTLである和泉層群と三波川結晶片岩類との境界をなす地質上の大きな構造線は市の川時階に活動した断層とされ

Fig. 1 Maps of the study area, showing its location, geology, groundwater discharge points (Loc.) and sample number (no.). Compiled from Mizuno et al. (1994) and AIST (2010). Fluid spouts from basement rocks (blue circle), boreholes (red circle), and unidentified points (green circle).

ている。また、MTLの新期の活動は北方に分布する根来断層、五条谷断層および金剛断層に移行しており、中央構造線活断層系を構成している(岡田・寒川, 1978)。調査地域に分布するMTLは、地質境界としてのMTLと菖蒲谷時階の菖蒲谷断層、後期更新世～完新世にかけて活動的とされる五条谷断層からなり(寒川・岡田, 1977)、およそENE-WSW方向に並列して分布している。また、調査地域北部には、MTLに平行してNE-SWやEW方向の断層が分布している。

Ⅲ. 地下水の湧出箇所と地質構造

1. 地下水の湧出箇所の一般的特徴

調査地域には三波川結晶片岩類や和泉層群、領

家帯花崗岩類が分布する箇所では岩盤から地下水が直接湧出している。また、CO₂ガスを採取するためのボーリング孔(Fig. 1; Loc. A, B)からも地下水が湧出している。このような地下水の湧出は大部分が河床や谷底に限られる。

地下水の湧出箇所周辺には、MTL活断層系に属する菖蒲谷断層や北部のMTLに平行な断層群が推定されている(水野ほか, 1994)。ここでは、大阪府河内長野市南西部の石川河床部(Fig. 1; Loc. F)における地下水やガスの湧出の状況と地質・地質構造について述べる。

2. MTL北方、河内長野市汐滝橋露頭 (Loc. F) に見られる湧水

MTL北方の大阪府河内長野市南西部を流れる

石川の汐滝橋上流の河床部において、上下流150 m区間に分布する片状組織を呈する領家帯古期花崗岩類に発達する割れ目から、方解石や赤褐色沈殿物を伴う地下水の湧出や二酸化炭素ガスの噴出が認められる。

Fig. 2に露頭の地質・地質構造と地下水・ガスの湧出箇所を示す。露頭は全体に著しく割れ目が発達し、特に、北部には幅数10 cmの破碎帯を伴う断層が2条認められ (f-1, f-2)、それぞれ幅1~2 mの破碎の著しいカタクレサイトを伴う。断層の方向がそれぞれN40°W/54°N, N40°E/50°Nであることや、カタクレサイトの連続性などの検討結果により、これらはMTLの北方に推定されている東西方向の断層群 (水野ほか, 1994) と同様の成因をもつ断層と考えられる (以下RFと呼ぶ)。

地下水の湧出箇所は露頭全域に認められるが、

主な湧水地点は北部に片寄っており、中央部、南部ではスポット状に分布する。ガスの噴出箇所は、北部~中央部にのみ認められ、スポット状に分布する。地下水、ガスの湧出箇所の分布配列はその場所における卓越する割れ目の方向と良い相関が認められる。

露頭観察の結果、白いにじみとして方解石が岩盤を覆っている箇所や割れ目やカタクレサイトの基質部を方解石が充填している箇所が認められる (Fig. 3)。さらに、方解石の沈殿物であるトゥファ (狩野, 1997) も認められる。方解石の沈殿や充填は有馬型熱水の湧出の際にCO₂ガスの脱ガスによるCO₂分圧の低下が原因と考えられ、方解石の充填は過去に有馬型熱水が浸透し、割れ目間隙中を流動した痕跡と考えられる。河床部の岩盤上には方解石が数cmの円錐状の石筍状沈殿物からなる小さな高まり (calcite cone)

Fig. 2 Sketch of the outcrop at Loc. F. Blue arrow shows the river flow direction.

Fig. 3 Photographs of outcrop at Loc. F. Matrix of cataclasite (a) and fractures (b) are filled with calcite veins.

Fig. 4 Distribution of stalagmite-shaped precipitation (calcite cone), groundwater discharge points, and fractures in the southern part of Loc. F, shown in Fig. 2. Fracture mapping area is indicated by a square.

を形成している。

露頭に発達する割れ目の方向と石筍状沈殿物や地下水の湧出箇所との関係について検討を行うため、露頭南部のFig. 4の枠内において詳細な割れ目のマッピング、卓越方向の検討を行った。抽出した割れ目の総数は123本である。卓越する割れ目は、NS走向／中角～高角傾斜及びN50°W走向／中角傾斜に卓越方向を持つ2グループに区分することができ、特にNS方向の割れ目が卓越している (Fig. 5)。方解石の沈殿物は全体的にNS～NNW-SSE方向に配列し、湧水を伴う石筍状沈殿物 (calcite cone) にはNS方向とEW方向の配列が認められることから、卓越した割れ目

Fig. 5 Schmidt stereonet plots (lower hemisphere) of fractures measured in the fracture mapping area shown in Fig. 4.

沿いに流体が滲出しているものと考えられる。

カタクレーサイトは鏡下観察の結果、全体に鉱物単位で破碎が進んでおり (Fig. 6)、割れ目沿いには幅0.5 mmの微角礫を含む脈状の構造が認められる (Fig. 6; (1) A and (2) B)。微角礫の構成鉱物は、石英、斜長石、黒雲母および方解石であり、基質部には水酸化鉄の沈殿が見られる。微角礫の外縁は明瞭で、微角礫と微角礫の間は方解石もしくは不透明鉱物が充填しており、不透明鉱物中には微小な方解石結晶を伴う。微角礫を含む脈状構造の境界面に沿って0.1～0.3 mmの層

Fig. 6 Photomicrographs of cataclasite (cross-polarized light). Cataclasite is composed of fragments of quartz, feldspar, biotite, and calcite. The matrix is composed of calcite and hydrated iron. Fractures 0.5 mm wide (A and B) are composed of microfragments of quartz, feldspar, biotite, and calcite with sizes from 0.1 to 0.3 mm. In photograph (1), the boundary between fracture A and its surrounding fragments is filled with calcite veins, shown as Cal (a). Microfractures are filled with calcite veins, shown as Cal (b), (c) in photograph (1), and Cal (d) in photograph (2).

状の方解石結晶が認められることから (Fig. 6; (1) Cal (a)), 破碎により形成された割れ目をその後の深部流体の活動により方解石が充填したことを示唆している。

さらに、割れ目の発達する岩盤には微小変形構造 (金折ほか, 1988) が認められ、微小割れ目が複雑に結合し、網目状を呈しており、大部分の割れ目を方解石もしくは不透明鉱物が充填している (Fig. 6; (1) Cal (b), Cal (c); (2) Cal (d))。このことから、有馬型熱水が微小割れ目にも浸透した可能性が示唆される。

方解石により充填された割れ目付近では、現在は地下水の湧出や滲み出し等は確認されない。

IV. 地下水・河川水の地化学特性

調査地域に湧出する地下水、河川水の水質を明らかにするため、pH、電気伝導度 (以下 EC と省略する)、一般水質分析および酸素水素同位体分析を行った。試料採取地点および試料番号を Table 1, Fig. 1 に示す。なお、1 地点 (Loc.) で複数の試料を採取した場合は、まとめて記述した。Table 1 において灰色に塗色したデータは採

取地点において溶存イオン量が多い試料をその地点の代表として、ヘキサダイアグラムを Fig. 7 に示した。河川水の試料は Fig. 7 において採取地点にヘキサダイアグラムを示した。

1. 調査手法

一般水質：陽イオンは Na^+ , K^+ , Ca^{2+} , Mg^{2+} の 4 成分を山口県産業技術センターの ICP 発光分光分析装置 (Varian Technologies Japan Limited 社製 VISTA-PRO) により、陰イオンは Cl^- , SO_4^{2-} の 2 成分を同センターのイオンクロマトグラフィー (日本分光社製イオンクロマトグラフ) により、 HCO_3^- はアルカリ度測定により分析した。

pH, EC：現地での測定は、pH は簡易 pH 計 (新電元工業社製 ISFET pH METER KS701) を、EC は簡易 EC 計 (堀場製作所社製 Compact Conductivity Meter) を用いて行った。採水した試料を室内へ持ち帰った後、pH は東亜 DKK 社製 pH Meter HM-25G を、EC は東亜 DKK 社製 EC Meter CM-30G を用いてそれぞれ測定を行った。

酸素水素同位体：調査地域に湧出する地下水の起源を明らかにするため、地下水、河川水、井戸水

Table 1 Geochemical data on groundwater in the study area. Water samples listed in the gray rows are plotted as the hexa-diagrams in Fig. 7.

No.	City	Loc.	Discharge	Date	pH	EC	$\delta^{18}\text{O}$	δD	Na	K	Ca	Mg	Cl	HCO_3	SO_4
						mS/m	‰								
1	Kawachinagano	A	Spring	2008/3/28	6.6	2120	-8.3	-57	171.3	4.1	208.3	23.5	59.3	0.0	5.3
2	Kawachinagano	A	Spring	2008/3/28	6.6	2130	-7.3	-53	1449.7	9.3	199.7	112.0	1239.5	4368.9	0.0
3	Kawachinagano	B	Spring	2008/5/16	—	—	—	—	1623.7	2.9	326.4	82.7	1467.3	3197.7	0.0
4	Kawachinagano	B	Spring	2008/5/16	—	—	—	—	1854.4	5.1	489.3	97.6	1625.0	4112.6	0.0
5	Kawachinagano	E	Spring	2009/11/26	6.5	1026	-7.0	-51	1684.4	15.3	205.0	75.8	3628.8	1523.0	3.7
6	Kawachinagano	E	Spring	2009/11/26	7.7	257	-7.3	-49	340.7	4.3	133.1	58.0	822.7	380.8	12.9
7	Kawachinagano	E	Spring	2009/11/28	6.2	349	-7.5	-51	447.6	5.7	271.0	73.2	675.6	1347.3	5.4
8	Kawachinagano	F	Spring	2008/3/27	6.4	718	-6.3	-51	2973.3	75.9	354.2	120.1	2577.4	1625.5	20.5
9	Kawachinagano	F	Spring	2008/3/27	6.9	2270	-8.2	-55	4630.3	137.6	579.0	186.5	3493.1	2201.5	0.0
10	Kawachinagano	F	Spring	2008/3/27	6.8	2290	-6.9	-55	36.2	0.9	103.7	6.3	11.2	331.9	5.7
11	Kawachinagano	F	Spring	2008/3/27	6.8	2310	-6.7	-52	4977.9	54.5	268.1	96.5	3116.7	1952.6	0.0
12	Kawachinagano	F	Spring	2008/3/28	6.0	990	-7.4	-57	1664.4	49.7	111.4	30.5	1186.7	546.7	9.5
13	Kawachinagano	F	Spring	2008/3/28	6.8	2060	-8.3	-57	951.2	22.7	134.1	30.6	1064.8	1337.5	5.8
14	Kawachinagano	F	Spring	2009/11/17	6.7	1924	-5.4	-48	4761.8	168.1	348.5	277.9	6335.8	4451.4	0.0
15	Kawachinagano	F	Spring	2009/11/17	6.6	601	-6.8	-47	1286.2	53.3	229.0	72.8	1489.2	1996.4	0.0
16	Kawachinagano	F	Spring	2009/11/18	—	—	-4.0	-46	7315.6	144.4	523.7	507.6	10645.2	5461.7	0.0
17	Kawachinagano	F	Spring	2009/11/18	—	—	—	—	7433.7	138.4	267.6	511.5	10741.0	4841.2	0.0
18	Kawachinagano	G	Spring	2009/9/18	6.3	1057	-5.8	-47	2063.3	29.2	284.1	131.3	6570.5	61.0	8.6
19	Kawachinagano		River	2009/9/22	7.1	21	-8.0	-52	21.7	0.6	24.0	2.7	57.0	35.8	9.1
20	Kawachinagano		River	2009/9/19	7.3	103	-7.5	-51	129.1	2.0	77.7	16.5	314.6	100.3	18.4
21	Kawachinagano		River	2011/1/17	7.0	24	—	—	28.5	2.3	33.2	4.0	40.7	78.1	12.2
22	Kawachinagano		River	2011/1/17	7.4	50	—	—	73.8	3.5	42.7	8.0	138.4	112.3	12.5
23	Hashimoto	C	Spring	2009/11/24	7.1	47	-8.4	-55	34.5	0.5	75.3	12.8	5.5	194.6	143.0
24	Hashimoto	C	Spring	2009/11/27	6.3	65	-8.1	-53	38.6	0.7	74.3	32.1	11.4	92.7	225.8
25	Hashimoto	C	Spring	2009/11/27	6.5	106	-8.2	-52	70.7	0.9	167.4	57.3	10.7	244.1	391.5
26	Hashimoto	C	Spring	2009/11/27	8.5	23	-8.0	-55	18.4	0.3	36.5	8.4	4.8	73.2	69.1
27	Hashimoto	C	Spring	2009/11/27	7.7	42	-8.4	-56	25.9	0.5	48.0	22.7	1.8	146.4	107.5
28	Hashimoto	D	Spring	2009/9/21	8.3	29	-7.6	-51	19.3	1.1	34.9	5.6	25.7	87.8	43.6
29	Hashimoto	D	Spring	2009/9/21	6.9	250	-8.1	-56	104.9	0.9	108.7	21.6	186.4	391.7	5.4
30	Hashimoto		River	2009/9/21	7.2	27	-7.9	-52	18.2	0.7	34.8	4.9	24.5	104.5	26.5
31	Hashimoto		River	2009/9/17	7.3	19	-7.4	-50	9.0	0.5	25.5	2.9	8.9	72.7	22.9
32	Hashimoto		River	2009/9/21	7.2	63	-7.5	-51	23.8	0.9	106.8	16.9	17.9	197.1	194.2

の酸素水素同位体分析を行なった。

水素同位体はクロミウム還元法、酸素同位体は同位体平衡法を前処理とする質量分析法により測定を行った。分析は、熊本大学嶋田研究室の質量分析装置 (Thermo Fisher Scientific 社製 Delta S) を用いた。

2. 測定結果

一般水質、酸素水素同位体の測定結果を Table 1 に示す。EC および pH は室内で計測した結果を示す。

2.1 一般水質

ヘキサダイアグラムで比較すると、調査地域北部の地下水は、南部の地下水に比べ2桁ほど全溶存イオン量が多い (Fig. 7)。また、北部の地下水は Na^+ 、 Cl^- および HCO_3^- に富んでおり、南部の地下水は Ca^{2+} や SO_4^{2-} に富んでいる。トリリ

ニアダイアグラムにおいて、北部の地下水試料は、ほとんどが NaCl 型および $\text{Ca}(\text{HCO}_3)_2$ 型にプロットされるのに対し、南部の地下水試料は CaSO_4 型と $\text{Ca}(\text{HCO}_3)_2$ 型にプロットされる (Fig. 8, 山本, 1983)。一方、Loc. D のボーリング孔からの湧水 (Fig. 7; no. 29) は Cl^- 濃度が 186.4 mg/l であり、周辺の湧水の Cl^- 濃度と比較して高い値を示す。

河川水の多くは河川に一般的な $\text{Ca}(\text{HCO}_3)_2$ 型を示すが、河内長野市天見川上流の天見駅近傍 (Fig. 7; no. 20) や下流の長野温泉近傍 (Fig. 7; no. 22) の河川水は NaCl 型地下水の湧出の影響を受け、 NaCl 型を示している。

2.2 河川水の EC

河川水の 60～80% は、地下水の流入が占めるといわれており (辻村・田中, 1996)、河川水の EC を測定することで周囲の岩盤から河川に流出

Fig. 7 Hexadiagram showing the quality of groundwater and river water. The hexadiagram of the water sample with the highest concentration of dissolved ions at the location is plotted as a representative example. Numbers correspond to the water sample numbers shown in Table 1.

Fig. 8 Trilinear diagram showing the types of groundwater and river water quality. Groundwater quality types are referred to Yamamoto (1983).

する地下水のECを推定することができ、有馬型熱水の湧出箇所を面的に捉えることができると考えられる。河川水のECは現地において簡易EC

計により測定した (Fig. 9)。河川に湧水が流入している箇所では、部分的に河川水のECが増加しており、流下するに従い減少している。Fig.

Fig. 9 Distribution of electric conductivity (EC) of river water. Blue arrows show the river flow direction. Stars (★) show groundwater discharge points. A and B indicate high EC zones.

10に測定した河川水のEC値を整理した。測定した河川水のECの平均値は22 mS/mであり、一般的な河川のECが数～10数mSであることを考慮すると調査地域の河川水のECは高い値を示し、全域にわたって有馬型熱水が混入している可能性がある。EC値の分布より40 mS/mを超える河川水は、近傍において湧出する有馬型熱水の混入の影響を強くうけていることが示唆される。このような高EC箇所は、広がりをもって分布しておらず、スポットとして湧出していることが明らかとなった (Fig. 10; A, B)。さらに尾根部では認められず、支沢の出口においても高いECは観測されていない。また、地質構造との関係から、湧出

Fig. 10 Frequency distribution of river water EC shown in Fig. 9.

点の多くはMTLおよび派生する東西方向の断層に沿って分布している。以上より有馬型熱水は河床や谷底において、断層と河川が交差する場所においてスポット的に湧出していると考えられる。

2.3 酸素水素安定同位体

デルタダイアグラムによると、ほとんどの試料が天水線付近にプロットされる (Fig. 11)。一部の地下水は酸素同位体比が天水線より重い方にシフトしており、有馬型熱水端成分と天水との混合線上にプロットされ、有馬型熱水と天水との混合により形成されたものと考えられる。調査地域の有馬型熱水は天水線近傍にプロットされることから天水による希釈の影響が大きいものと考えられる。

V. 考 察

MTL沿いにおける有馬型熱水の上昇・湧出

紀伊半島MTL沿いに湧出する地下水は、その地化学特性より、沈み込むスラブから放出された流体である可能性が指摘されている。ここでは、スラブの沈み込みと同時に地下にもたらされた流体が、脱水過程を経た後に上昇し、地殻においてMTLに遭遇し上昇を始めたことを前提として、その後どのような経路により地表にもたらされたかについて考察する。

Fig. 11 Delta diagram of $\delta^{18}\text{O}$ and δD of groundwater and river water. The solid line ($\delta\text{D} = 8\delta^{18}\text{O} + 10$) represents the meteoric line (Craig, 1961). End member of the Arima-type fluid is given from AIST (2012). Data on the Arima hot spring are from Matsubaya et al. (1974).

1. スラブ脱水流体の上昇

マントル内での上昇プロセスについては不明だが、超臨界流体として移動し、マントル起源ガスを溶かし込んだ後、地殻にもたらされたものと想定される（風早ほか，印刷中）。高温高压の延性領域である下部地殻において、どのような経路を通り上部地殻へ流体が移動するかは現状不明であるが、広角反射法地震波探査などにより明らかとなった地殻構造（Ito et al., 2009）などにより、上昇した流体はMTLに沿って上昇を継続し、一部はMTLの上盤側に発達するRFに分岐し、上昇すると考えられる。高塩濃度の流体が分岐したRF沿いに上昇した後に、南部のMTLを上昇することにより、有馬型熱水のフラックスは減少し、希釈率が高くなるため、調査地域の北部では高塩濃度のNaCl型およびNaCl-HCO₃型地下水が、南部ではCaSO₄型とCa(HCO₃)₂型地下水が湧出したものと考えられる。南部においても一部でCl⁻濃度の高い湧水が認められており、一般に、岩石中のCl含有量は少なく地下水中の溶存量も少ないことから（山本，1983），南部においても天水起源の地下水による希釈率は大きいものの深部流体の混入した地下水が地表部へ達している可能性がある。本調査で確認できた流体の湧出

の認められる断層の分布範囲はMTLの周辺南北約15 km区間である。

2. 地表付近における流体の浸透・湧出

地表における湧出箇所は河床部に限られている。これは、尾根部における地下水は鉛直下向きの流動が卓越するために、上昇してきた有馬型熱水は地表付近では上昇するための駆動力が衰えており、尾根部では地表に湧出できず、河川や谷部では被圧に伴う地表への流動が卓越するため、河川や谷部においてのみ地下水流動に押し上げられる形で湧出していると考えられる（Toth, 1963）。

流体は脆性領域にもたらされた後、MTLを通して上昇し、天水による希釈を受け、主に断層破碎帯を上昇し地表へ湧出するが、断層活動に伴い形成されたカタクレサイトや周辺に発達する網目状に発達する割れ目など透水性の高い箇所も通路として流動すると考えられる。さらに、顕微鏡スケールの微小割れ目にも深部流体の浸透が起こったものと考えられる。流体はこれらの間隙に方解石の脈を沈殿させ、充填鉱物により閉塞した箇所は通路としての役割をなくし、新たな割れ目へと湧出の場を移動させたものと考えられる。

以上を整理し作成したMTL沿いに上昇する有

Fig. 12 Upwelling and spouting model of Arima-type fluid in the upper crust. Red lines show the flow paths of the Arima-type fluid, and blue lines show the shallow groundwater flow. Arima-type fluid ascends through the MTL and related faults and penetrates into cataclasites and microfractures.

馬型熱水の上昇、湧出モデルを Fig. 12 に示す。

VI. まとめ

紀伊半島の MTL 沿いにおける有馬型熱水の湧出する場を規制する要因を検討することを目的として、地表地質調査および地下水の地化学調査を行い、有馬型熱水の分布域と地化学特性を明らかにするとともに、有馬型熱水の上昇過程や流動形態について考察を行い、以下の結論を得た。

1. 有馬型熱水の分布と地化学特性

調査地域北部に湧出する地下水は、NaCl 型および $\text{Ca}(\text{HCO}_3)_2$ 型の水質を示し、高 $^3\text{He}/^4\text{He}$ を示すガスを伴う（東田・田中，2009）。一方、南部に湧出する地下水は、 CaSO_4 型と $\text{Ca}(\text{HCO}_3)_2$ 型地下水が大部分であるが、一部に Cl^- 濃度の高

いものがあり、天水による希釈率は非常に高いが、有馬型熱水が上昇し混入している可能性がある。

2. 有馬型熱水の上昇過程

沈み込むスラブより脱水した流体は、MTL もしくは MTL の上盤側に発達する RF を通路として上昇する。その後、地表付近では上昇する駆動力が衰えており、尾根部では地表に湧出できず、河川や谷部において被圧された局地的地下水流動系に伴い天水による希釈を受け、断層破碎帯や周辺に発達する網目状の割れ目などの透水性の高い箇所を通過して地表に湧出すると考えられる。

3. 有馬型熱水の湧出を規制する要因

紀伊半島の MTL 周辺における有馬型熱水の湧出する場は、MTL の分布に規制され、MTL を含

む南北約15 km区間が影響範囲と考えられる。また、数kmスケールにおいても湧出の場合は小規模な断層に規制されるが、浅層地下水流動にも規制されるため、断層と河川が交差する場所においてスポット的に分布する。さらに、露頭スケールにおいては、割れ目密度、方向、形状、充填鉱物の有無などによる透水性の違いが湧出を規制し、顕微鏡スケールにおいては、割れ目周辺の微小割れ目にも浸透する。

謝 辞

本論文の作成にあたり、熊本大学大学院自然科学研究科嶋田純教授には酸素水素同位体分析装置の使用を快く許可して頂くとともに、有益な助言をいただいた。山口県産業技術センターの有村一雄氏には一般水質分析においてご指導いただいた。産業技術総合研究所地質情報研究部門深部流体研究グループの風早康平博士、安原正也博士をはじめ同グループの方々には有馬型熱水に関して有益なご助言・ご指摘を頂いた。2名の匿名査読者の指摘により論文が大きく改善された。以上の方々に對して、感謝の意を表します。

参考文献

- 岡田篤正・寒川 旭 (1978) : 和泉山脈南麓域における中央構造線の断層変位地形と断層運動。地理学評論, **51**, 385–405.
- 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・大沢信二・尾山洋一・大和田道子・塚本 齊・堀口桂香・戸崎裕貴・切田 司 (2013) : 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 (印刷中).
- 核燃料サイクル開発機構 (1999) : わが国における高レベル放射性廃棄物地層処分の技術的信頼性—地層処分研究開発第2次取りまとめ—。総論レポート, 632p.
- 金折裕司・矢入憲二・宮腰勝義 (1988) : 跡津川断層北東部における花崗岩類の微小変形構造とその形成過程。地質学雑誌, **94**, 887–901.
- 狩野彰宏 (1997) : 淡水成炭酸塩トUFFAの特徴と成因 : レビュー。地球科学, **51**, 177–187.
- 小林貞一 (1951) : 日本地方地質誌「総論—日本の起源と佐川輪廻—」。朝倉書店, 353p.
- 寒川 旭・岡田篤正 (1977) : 紀伊半島西部の中央構造線の新时期活動に関する断層露頭について。MTL, no. 2, 51–60.
- 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 (2010) : 20万分の1日本シームレス地質図データベース, 産業技術総合研究所研究情報公開データベース, DB084.
- 深部地質環境研究コア編 (2012) : 概要調査の調査・評価項目に関する技術資料—立地要件への適合性とその根拠となる調査結果の妥当性—。地質調査総合センター研究資料集, no. 560, 産業技術総合研究所地質調査総合センター.
- 辻村真貴・田中 正 (1996) : 環境同位体を用いた降雨流出の研究。恩田裕一・奥西一夫・飯田智之・辻村真貴編, 水文地形学, 古今書院, 79–87.
- 中沢圭二・市川浩一郎・市原 実 (1987) : 日本の地質6, 近畿地方。日本の地質「近畿地方」編集委員会編, 共立出版, 297p.
- 東田優記・田中和広 (2009) : 大阪府河内長野市におけるNaCl型地下水の研究。平成21年度日本応用地質学会研究発表会講演要旨集, 159–160.
- 松葉谷治・酒井 均・鶴巻道二 (1974) : 有馬地域の温泉, 鉱泉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.
- 水野清秀・寒川 旭・佃 栄吉 (1994) : 中央構造線活断層系 (近畿地域) ストリップマップ。地質調査所.

- 山本荘毅 (1983): 新版地下水調査法. 古今書院, 490p.
- Craig, H. (1961): Isotopic variations in meteoric waters. *Science*, **133**, 1702–1703.
- Ito, T., Kojima, Y., Kodaira, S., Sato, H., Kaneda, Y., Iwasaki, T., Kurashimo, E., Tsumura, N., Fujiwara, N., 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.
- Matsumoto, T., Kawabata, T., Matsuda, J., Yamamoto, K. and Mimura, K. (2003): $^3\text{He}/^4\text{He}$ ratios in well gases in the Kinki district, SW Japan surface appearance of slab-derived fluids in non-volcanic area in Kii Peninsula. *Earth and Planetary Science Letters*, **216**, 221–230.
- Toth, J. (1963): A theoretical analysis of groundwater flow in small drainage basins. *Journal of Geophysical Research*, **68**, 4795–4812.
- Umeda, K., Ogawa, Y., Asamori, K. and Oikawa, T. (2006): Aqueous fluids derived from a subducting slab: Observed high ^3He emanation and conductive anomaly in a non-volcanic region, Kii Peninsula southwest Japan. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, **149**, 47–61.

(原稿受付：2013年4月11日)

(原稿受理：2013年8月2日)

この論文に対する「討論」を2014年5月31日まで受け付けます。

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

田中 和広・東田 優記・村上 裕晃

要 旨

紀伊半島の中央構造線近傍に湧出する流体は水質、酸素水素同位体比、ヘリウム同位体比などにより、スラブ起源と考えられる有馬型熱水が混入していることが想定される。本研究では地下水や河川水の地化学特性の検討を行うとともに、露頭における地質学的観察結果にもとづき、流体の上昇経路の検討を行った。流体は幅15 km以内に分布するMTLおよびそれに平行な分岐断層に伴われる断層破碎帯に沿って上昇する。その結果、北部の分岐断層からは主に高塩濃度のNaCl型および $\text{Ca}(\text{HCO}_3)_2$ 型地下水が、南部のMTLからは一部に Cl^- の溶存量の高い地下水を含む CaSO_4 型と $\text{Ca}(\text{HCO}_3)_2$ 型地下水が湧出する。

流体は、被圧された局所地下水流動系による希釈を受け、河川と断層の交差する箇所でも局地的に湧出している。断層破碎帯中のカタクレサイトや微小割れ目は方解石脈に充填されており、流体は断層破碎帯を上昇する際に、これらにも浸透し、炭酸カルシウムを沈殿させたものと考えられ、その結果、上昇経路は閉塞され、流出箇所の移動を引き起こしたものと考えられる。

キーワード：中央構造線，高塩濃度地下水，地質構造，スラブ起源水