

高塩分温泉の成り立ち

大沢 信二

京都大学大学院理学研究科附属地球熱学研究施設 教授

1. はじめに

温泉とは、元々自然湧出のものを指していたが、井戸を掘ることができるようになってからは、地中から取り出される温かい地下水も温泉と呼ぶようになった。どのくらいの深さから取り出されているかと言うと、温泉として利用する目的で掘られた井戸で私が知りうる最も深いものは2,714m であり、近頃は、1,000m くらいは普通に掘るようになっている。地球の半径 637 万 8,000m に比べると取るに足らない深さだが、たくさんの深い温泉井が日本全国あちこちで掘られるようになったおかげで、それまであまり目にふれることがなかった塩分の濃い温泉水を普通に見ることができるようになった。

そのような高塩分の温泉水は、以前から知られる塩気のある自然湧出の鉱泉水にたどれることが多いのであるが、どれも海水と同じような化学組成を示し、古い時代の海水に由来すると見なされて、「化石海水型温泉」という風と呼ばれていた。そのいくつかの例を、私たちのデータから、現在の海水の水質とともに表1に示した。海水と同じように、主としてナトリウム(Na)イオンと塩化物(Cl)イオンからなることが一目瞭然であり、塩分濃度の違いは成分の薄い地下水が混ざること、副成分の違いは地下滞留中の化学反応で生じていると考えられてきた。

本講演では、そのような「化石海水型温泉」に対し、環境同位体 (D/H、¹⁸O/¹⁶O、³He/⁴He、¹²⁹I など) を使った地球化学の手法によって水や成分の由来を見直した私たちの研究を、物語風に紹介しようと思う。

2. 研究のきっかけ

1960 年代以降、非火山地域において深い井戸掘削によって温泉の開発が盛んに行われ、「深層熱水型温

表 1 自然湧出の高塩分鉱泉水の水質の例

	海水	塚野鉱泉 大分県	六ヶ迫鉱泉 下元湯 大分県	鹿野田神社 潮の井 宮崎県
水温(°C)		16.9	16.5	24
pH	~8	6.7	5.9	7.3
Na (mg/L)	10760	2920	1530	5520
K (mg/L)	390	67.7	76.9	42.3
Ca (mg/L)	410	240	91.5	243
Mg (mg/L)	1290	272	153	64.5
Cl (mg/L)	19400	4200	2290	8000
HCO ₃ (mg/L)	140	2960	550	323
SO ₄ (mg/L)	2710	検出されず	検出されず	検出されず
成分総和(g/L)	35.1	10.6	4.7	14.2
文献		大沢・他(2003) 大沢・他(2005) 大沢・他(2010)		

泉」と呼ばれ、一時活発に研究された。その起源については長らく、「地下深くに埋没した地層中の淡水性あるいは海水由来の間隙水が地温により加熱されたものである」とする考えが広く浸透していた。九州の東部、北東に瀬戸内海を望む大分平野にも、そのような深層熱水型温泉が多く分布しており、私はそれらに対して、温泉成分のホウ素と塩素の比 (B/Cl) を用いて起源に関する予察的研究を行い(大沢、1996)、続いて、熱水に溶存する炭酸の炭素安定同位体比 ($\delta^{13}\text{C}$) に着目した研究を行った(大沢、2001)。その結果、非火山地域である大分平野の温泉水の溶存炭酸にはマグマ起源の二酸化炭素(CO₂)と同様な CO₂ が様々な割合で混入しており、特に Na-Cl・HCO₃ 型に分類される高塩分の温泉水については、その炭酸成分のほとんどが土壌有機物とは異なる起源の地球深部に由来する CO₂ であることが明らかとなった(図1)。これは、深層熱水の起源を堆積層中の化石

海水に求める従来の解釈とはかけ離れたものであり、化石海水型温泉の起源や成因について考え直す契機となった。

その結果を受け、大分平野の深層熱水型温泉水に対して水素・酸素同位体比の測定を行い、溶存炭酸のほとんどが深部起源を示す温泉水の中に、有馬温泉とその周辺地域で見出されている「有馬型熱水」(例えば、松葉谷、2009)に酷似する異常な水素・酸素同位体組成を示す極めて塩分濃度の高い温泉水を発見した(網田ほか、2005)。そして、私たちは、地質学者が想像しているように(例えば、巽、1995;西村、2000)、火山前線より海溝側の非火山地域(地学では「前弧域」と言う)の地下深部で沈み込む海洋プレートの脱水が起こっていて、その脱水流体(「スラブ脱水流体」と呼ぶ)に由来する深部熱水が地表にまで上昇してきていて温泉の起源水になっているのではないかと予想した(図2)。

以上が高塩分温泉の成り立ちを見直す研究を始める直接のきっかけとなった出来事である。その後、私は有志を募って非公式な研究チーム「熱水流体研究グループ」をつくり、京都大学地球熱学研究施設のホームグラウンドである別府温泉を離れ、南九州の宮崎から四国、近畿地方まで西南日本の大調査旅行に出かけることにした。

その際、調査の大方針としたのは、「地表近くの地下水や起源の異なる浅層の温泉水の混入影響が少ないと期待されるできるだけ深く掘削された温泉井を探す」であり、温泉分析書や旅行誌などを手掛かりに調査計画を立てた。表2に、実際の調査で入手した代表的な高塩分

温泉水の分析データを示す。海水以上の塩分濃度(表の成分総和の欄)を示す高塩分温泉水が地下に“眠っている”ことを、実感いただけるものと思う。

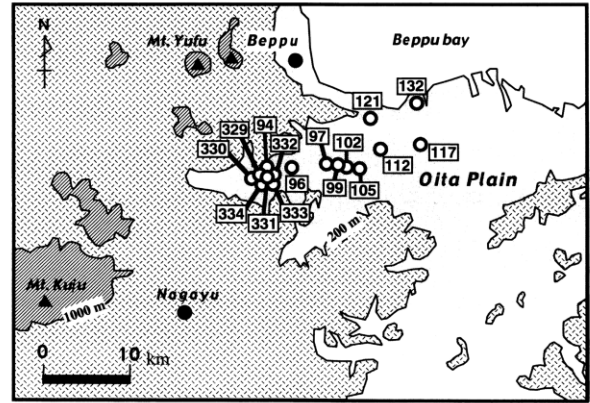


Fig. 1 泉源の位置

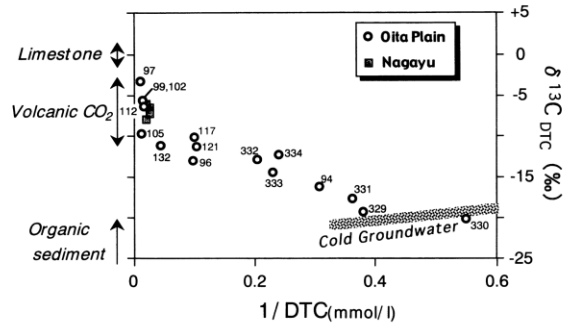


Fig. 2 深層熱水の溶存全炭酸(DTC)の濃度と炭素安定同位体組成($\delta^{13}\text{C}_{\text{DTC}}$)との関係

図1 大分平野の深層熱水型温泉水の溶存炭酸の起源を示す同位体地球化学データ(大沢(2001)の図(Fig. 1とFig. 2)を転載)。



図2 大分平野において有馬型熱水に酷似した温泉水が発見されたことを紹介した新聞記事。

表2 温泉掘削によって得られた高塩分温泉の水質の例

	海水	IKK温泉 宮崎市佐土原 宮崎県	FNB温泉 大分市坂ノ市 大分県	NHS温泉 かつらぎ町 和歌山県	KMP温泉 神戸市有馬 兵庫県	YKT温泉 三木市吉川 兵庫県
井戸深度 (m)		1200	900	741	300	1500
水温 (°C)		16.1	36.1	23.4	98.7	35.9
pH	~8	7.3	6.7	6.5	6.69	7.00
Na (mg/L)	10760	10500	15800	17500	17000	14800
K (mg/L)	390	81.5	231	284	2630	400
Ca (mg/L)	410	351	282	187	2590	263
Mg (mg/L)	1290	152	4040	174	23.7	212
Cl (mg/L)	19400	18500	23900	24900	36000	17000
HCO ₃ (mg/L)	140	223	5110	7410	110	10800
SO ₄ (mg/L)	2710	検出されず	検出されず	検出されず	1.0	19.8
成分総和 (g/L)	35.1	29.8	46.4	50.5	58.4	43.5
文献		大沢・他 (2010)	網田・他 (2005)	網田・他 (2014)	大沢・他 (2015)	大沢・他 (2015)

3. スラブ脱水流体にたどれる温泉を探し求める調査研究

宮崎平野の温泉 (大沢ほか、2010)

高塩分温泉には以前から考えられてきたような海水に直接由来するものもあるはずで、スラブ脱水流体に関連する高塩分温泉の探索には、海水由来の温泉水がどのような水質や同位体的特徴を示すかを比較のために是非知っておく必要がある。情報収集を既存論文に頼る方法もあるが、そもそも「高塩分温泉≒化石海水型温泉」という考えが主流であった時代に行われた研究から知りたい情報を手に入れることは難しいと考え、私たちは、まず、前弧域(火山前線より海溝側の非火山地域)に形成された堆積岩地域である宮崎平野の温泉を実際に調査して情報を集めることにした。

宮崎平野の温泉の多くは井戸掘削によって得られたもので、深度は最大で2,000 mあまりにも達し、表層に分布する宮崎層群の下位に潜在する四万十累層群にまで達していることが確認されているものもある。宮崎層群の分布域には水溶性天然ガス田が発達しており、一ツ瀬川流域を中心とする地域(佐土原地区)では現在でも天然ガスの生産が行われている。天然ガスには塩水が付随することは良く知られていることで、私たちはその付随塩水が化石海水型温泉であると目星をつけ、佐土原地区を含む平野全域から温泉水試料を採取した。

宮崎平野の温泉井から流出する温泉水の化学・同位体データに現れる系統的な関係の解釈や地下熱水温度の推定結果から(図4)、2種類の温泉起源流体の存在を認めた。1つは堆積物間隙から絞り出される海水で、

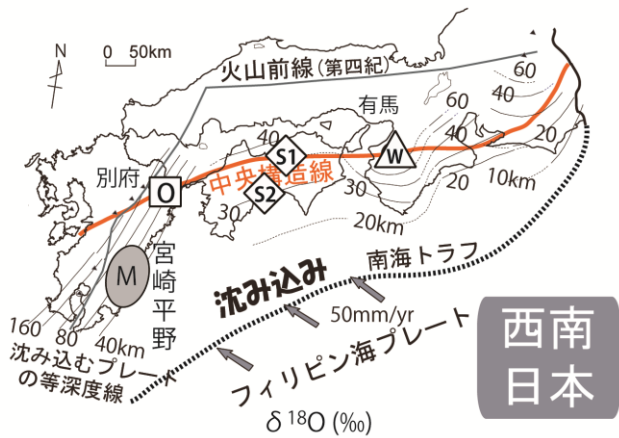
もう一つはおよそ 130°Cにおいて粘土鉱物(スメクタイト)の層間から排出される水である。前者が目星をつけていた化石海水型温泉の起原水であり、後者は当初存在を予想していなかったタイプの温泉起原水で、塩分濃度は低く、ホウ素(B)に富み、熱分解性メタンを含んでいるのが特徴である。これらは、海成の堆積物が地下に埋没して堆積岩を形成して行く過程(「続成過程」と呼ぶ)で堆積層から逐次排出される水に対応すると考えることができる。

四国・近畿地方の温泉(網田ほか、2014; 網田、2016)

喜ばしい予想外の成果もあったが、宮崎平野の温泉の調査研究によって、堆積物の間隙や堆積層の空隙に閉じ込められ水質や同位体組成に若干の変化が起こった海水、つまり典型的な化石海水型温泉を検分することができ、スラブ脱水流体にたどれる温泉の本格的な探索の準備ができた。その一方で、「目的のスラブ脱水流体にたどれる温泉は、どのようなテクトニック・セッティングに見出されやすいだろうか?」という小さいが重要な研究課題に取り組んだ。

図3の下図に表したように、構造地質学的に島弧地殻をマントルとの境界まで断裂させている可能性のある、西南日本を東は中部地方から西は大分平野まで縦断する大断層である「中央構造線(Median Tectonic Line)」に目を付け、そのような大きな断裂であればマントル内を上昇してきたスラブ脱水流体を地表近くまで誘導することが可能であろうと考え、それを温泉探索の際の指針に盛り込むことにした。温泉分析書や旅行誌に記載の泉質欄を手掛かりに炭酸成分を豊富に含んだ食塩(Na-Cl)型水質の高塩分温鉱泉をリストアップし、そのリストをもとに四国地方と紀伊半島西部地域の中央構造線沿い、ならびに中央構造線に準じる地質構造線である^{ぶつぞう}仏像構造線沿いに存在する温泉地を選び出し現地調査の候補地とした。

図5の上段の図は、調査した温泉から採取してきた温泉水ならびに網田ほか(2005)で研究対象とした大分平野の温泉水の同位体組成(δD と $\delta^{18}O$)のうち岩石-水相互作用で値が変動しにくい水素同位体比(δD)を取り出し、塩分濃度との関係を見てみたものである。海水より極めて低い水素同位体比を示す紀伊半島西部の中央構



「海洋プレートが島弧地殻に対して斜めに沈み込むところでは、島弧地殻をマントルとの境界まで断裂させる断層が、火山前線より海溝側に生じる」ことが構造地質学的に予想されており (Fitch, 1972), フィリピン海プレートが沈み込む西南日本では、そのような断層が中央構造線であると考えられる。

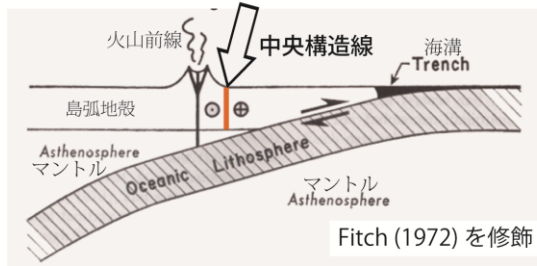


図3 [上]西南日本のテクトニック・セッティングと現地調査した主要な高塩分温泉の位置 (M、O、S1、S2、W)、
[下]斜め沈み込み帯の地下の断面模式図

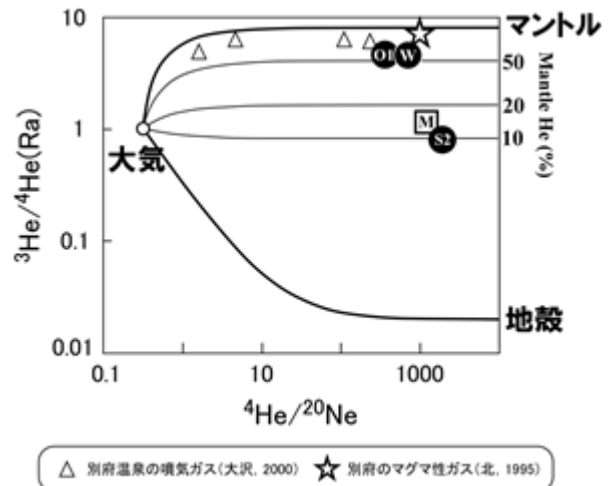
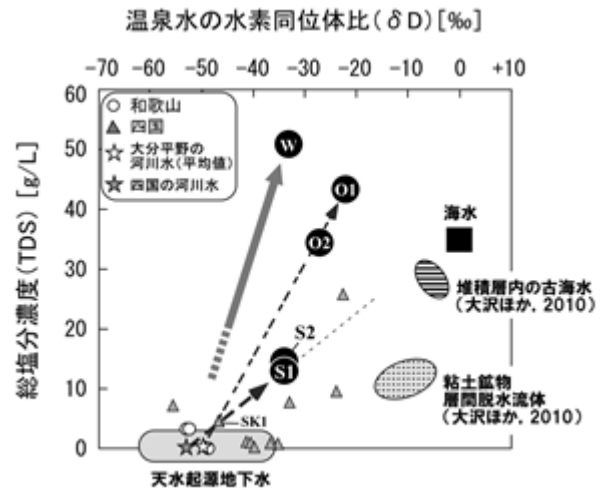


図5 四国・近畿地方の温泉水の同位体地球化学データの一部 (網田 (2016) に掲載の図 (図4と図7を転載)。

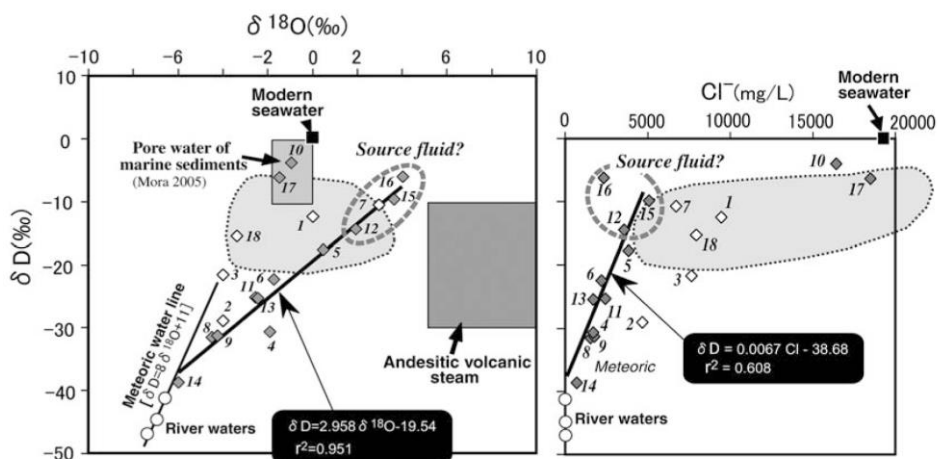


Fig. 4 Relationships of δD vs. $\delta^{18}O$ and δD vs. Cl^- of hot spring waters in Miyazaki with modern seawater, river waters in the study area, ranges of pore waters of marine sediments and andesitic volcanic steam. For data points shown by open diamond (Nos. 1, 2, 3, 7 and 18), see text or refer Fig. 3. Ranges circled by dotted lines indicate formation waters shown by Kato and Kajiwara (1986).

図4 宮崎平野の温泉水の同位体地球化学データの一部 (大沢ほか (2010) の図 (Fig. 4) を転載)。

造線沿いの温泉 W と大分平野の温泉 O1 と O2 については海水を上回る高い塩分濃度をもつ温泉起源水が存在することを示唆しており、その他の同位体データ(ヘリウム($^3\text{He}/^4\text{He}$)、炭素($\delta^{13}\text{C}$)、ヨウ素(^{129}I))の解析(一例として、ヘリウム同位体の解析の結果を図5の下段に示した。)ならびに総合的な考察からスラブ脱水流体に起源を求めると結論した。なお、四国地方の温泉は、宮崎平野の温泉の起源水のような水質・同位体的性質を持っており、海洋プレートの沈み込みの初期段階で海底堆積物の続成作用によって発生するスラブ脱水流体も存在するのではないかと考えている。

有馬地域の温泉(大沢ほか、2015;大沢、2018)

スラブ脱水流体由来温泉の起源水のことを、多くの研究者が研究対象としている有馬温泉(金泉)の名の一部

を冠して「有馬型熱水」と呼ぶようになった。しかし、図3に示されているように、有馬温泉の直下の地下深部には地震観測によるプレートの沈み込みが確認されないことから、温泉水のスラブ脱水流体由来についてこの温泉の調査で検証を行っても説得力に欠けると私たちは考えて、調査研究対象から外していた。しかし、ある機会に有馬温泉とその周辺地域のいくつかの温泉を調査することができたので、採取した試料からそれまでと同様の水質・同位体データを入手し、得られたデータをそれまでに培ってきた方法で解析したところ、図6のように有馬型熱水と水質はよく似ている(炭酸成分に富んだ Na-Cl 型高塩分水)が、水の同位体組成($\delta\text{D}-\delta^{18}\text{O}$)やヘリウム(He)同位体組成など同位体的な性質が全く異なる温泉水が、有馬温泉から 20 km も離れていない兵庫県三木市の吉川に流出していることを発見した。

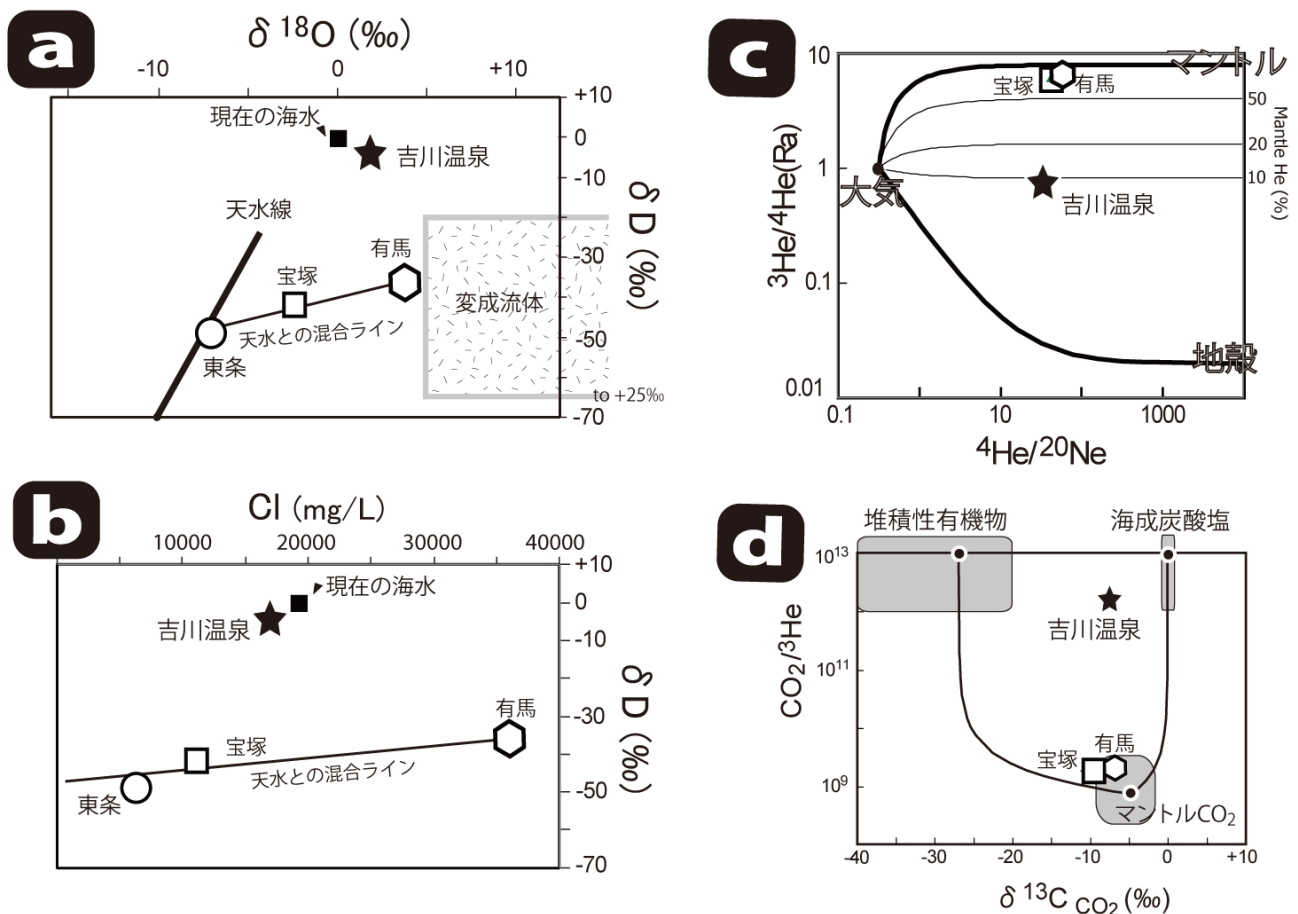


図6 有馬地域の高塩分温泉の同位体地球化学データの一部(大沢ほか(2018)の図(Fig. 2)を転載)。

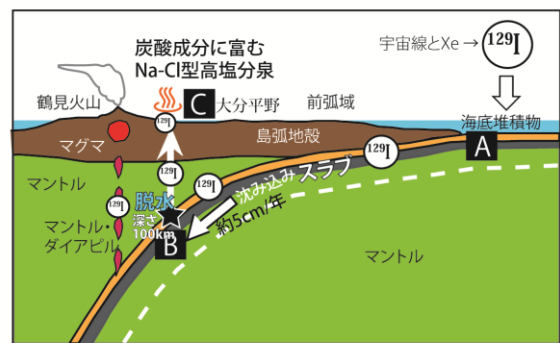
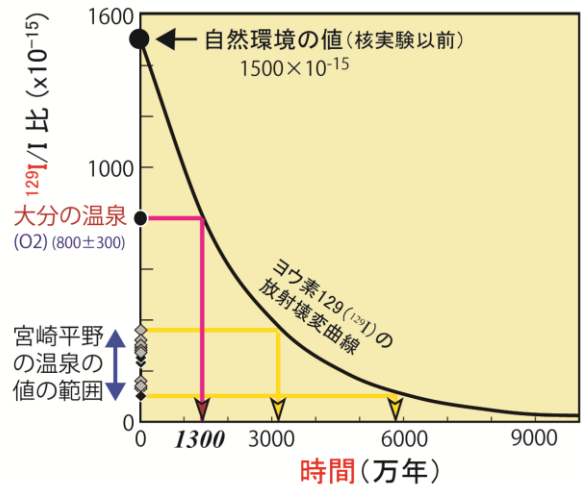
私たちは、それまでの研究を総括することによって、スラブが沈み込んで温度・圧力が增大するとともに、堆積物間隙海水の絞り出し、粘土鉱物層間の圧搾、変成脱水分解によって、それぞれ Na-Cl 型高塩分水、低塩分・Na-Cl、 HCO_3^- ~Na- HCO_3^- 型低塩分水、Na-Cl、 HCO_3^- 型高塩分水（前2者が続成脱水流体、最後者が変成脱水流体）が漸次放出されると考えている。しかし、すべての脱水流体が排水されずに蓄積されたとすると、各脱水流体の量比によっては蓄積によって生成する流体の水質は個々のスラブ脱水流体のそれとは違ったものになりうるということを、微量元素濃度を用いた混合計算のシミュレーションで示すことに成功し、吉川で発見した一見風変わりな高塩分泉は逐次放出される脱水流体が排水されずに蓄積した結果生じたものであるとして説明した。そして、逐次脱水してくる流体が蓄積しうる地質環境としては、堆積物の埋没が起こる深い堆積盆地を想定した。

このように、当初予定になかった調査を通して、生成過程の異なる新たな高塩分温泉の存在をまたひとつ知ることになるとともに、 CO_2 に富んだ食塩 (Na-Cl) 組成の高塩分温泉水の全てがスラブ脱水流体と関係づけられるわけではなく、高塩分温泉水の起源を議論するには同位体や微量元素のデータが不可欠であることを強く認識させられた。

4. おわりに

結びにかえて、ここでは、Rochester 大学(アメリカ合衆国)の Udo Fehn 教授と共同で行った、当時最新のヨウ素年代測定法をスラブ脱水流体由来の温泉に応用した研究 (Tomaru et al., 2007) で得たデータを再解析することで明らかとなったこと(大沢、2018)を紹介し、本講演を終えることにする。

網田ほか(2014)でスラブ脱水流体由来であると判定した大分平野の温泉(O2)の放射性ヨウ素同位体(^{129}I)の分析値を ^{129}I の放射壊変曲線(図7の上の図)に照らしてヨウ素年代を算出したところ、1,300 万年前という値が得られた。 ^{129}I は大気中で生成する放射性元素であるので、図7の下の方の図に表されているように、大気から海底堆積物に移行した ^{129}I がフィリピン海プレートに乗ってマントルへと沈み込み、温泉の直下深さ約 100 km で発生するスラブ脱水流体とともに上昇移動し、最終的に地表



- A→Cの時間(温泉水のヨウ素年代): 1300万年
- スラブの沈み込み速度から求めたA→Bの時間: 600万年
- B→Cの流体上昇速度: $100\text{km}/(1300-600)\text{万年}=1.4\text{cm/年}$

図7 [上]大分平野および宮崎平野の温泉のヨウ素年代、[下]九州中部地域の沈み込み帯における深部物質循環・流体移動とそれらの時間スケール

付近に到着したということを示しており、その移動に1,300 万年を要したということになる。沈み込み開始地点 A から温泉直下の脱水地点 B までスラブの移動に要する時間は、現在の沈み込み速度(およそ 5 cm/年)が続いてきたとして約 600 万年と見積もられる。従って、温泉の直下深さ約 100 km で発生した脱水流体が地表まで上昇してくるのに要する時間は、(1300-600) 万年となるので、流体の上昇速度は $100\text{km}/700\text{万年}=1.4\text{cm/年}$ となる。この値は、中島・鳥海(1996)によって推測されている地殻深部のクラックによる水の移動速度の 3 cm/年とよく合っており、地球内部における水の移動は実にゆっくりしたものであると思われる。参考までに、プレートの沈み込みと関係の無い宮崎平野の温泉のヨウ素年代はおよそ 3,000 万年~6,000 万年前の値が得られ、温泉水が

貯留されていると考えられる古第三紀の地層(日南層群や日向層群)の地質年代の範囲(2,400~6,500 万年)(小林・矢野、2007)内に収まり、温泉の成因と年代に矛盾がない。

以上紹介してきた私たちの研究は、「島弧に沈み込む海洋プレートから脱水する流体に由来する温泉を探す」というはっきりした目的をもって2003年11月に最初の野外調査に出かけているので、今年(2019年)でかれこれ15年近くが経過したことになる。その間、研究協力をして下さった多くの方々に様々な形で支えられながら何とか研究を続けることができ、研究成果もそれなりに公表することができた。特に、京都大学理学研究科教授(現在、研究科長)の平島崇男先生と秋田大学理工学研究科の網田和宏さんは、密に連絡を取りながら共同研究をして下さった。最後になりましたが、ここに記して深く感謝いたします。

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、大沢信二、西村光史、山田 誠、三島壮智、風早康平、森川徳敏、平島崇男(2014)中央構造線沿いに湧出する高塩分泉の起源。日本水文科学会誌, **44**, 17-38.
- ・網田和宏(2016)沈み込むプレートに辿り着く温泉。「温泉の地球科学大沢信二・西村進編 温泉と地球科学」, p.37-p.71, ナカニシヤ出版, 京都.
- ・小林哲夫、矢野 徹(2007)南九州の地質・地質構造と温泉。温泉科学, **57**, 11-29.
- ・松葉谷治(2009)有馬型温泉とはいかなる定義のものか。温泉科学, **59**, 24-35.
- ・中島善人、鳥海光弘(1996)地殻深部を水はどう流れるか:クラックの役割。科学, **66**, 873-879.
- ・西村 進(2000)紀伊半島における前弧火成作用と温泉。温泉科学, **49**, 207-216.
- ・大沢信二(1996)大分平野の温泉水の起源について。大分県温泉調査研究会報告, **47**, 37-42.
- ・大沢信二(2001)大分平野に産する深層熱水中の炭酸成分の起源。大分県温泉調査研究会報告, **52**, 21-26.
- ・大沢信二(2003)塚野鉱泉の水質形成機構。大分県温泉調査研究会報告, **54**, 7-14.
- ・大沢信二、網田和宏、杜建国、山田誠(2005)大分県南部地域の温泉の同位体地球化学的調査-臼杵市の六ヶ迫鉱泉-。大分県温泉調査研究会報告, **56**, 25-31.
- ・大沢信二、網田和宏、山田 誠、風早康平(2010)宮崎平野の大深度温泉井から流出する地熱流体の地化学特性と起源。温泉科学, **59**, 295-319.
- ・大沢信二、網田和宏、大上和敏、酒井拓哉、三島壮智(2015)有馬型熱水と水質のよく似た同位体的性質の異なる高塩分温泉-兵庫県の吉川温泉の例。温泉科学, **64**, 369-379.
- ・大沢信二(2018)スラブ脱水流体由来の温泉-地球流体化学的手法による研究-。温泉科学, **68**, 168-175.
- ・巽 好幸(1995)沈み込み帯のマグマ学。東京大学出版会, 200p., 東京.
- ・Fitch, T. J. (1972) Plate convergence, transcurrent faults, and internal deformation adjacent to Southeast Asia and the western Pacific. Journal of Geophysical Research, **77**, 4432-4460.
- ・Tomaru, H., Ohsawa, S., Amita, K., Lu, Z., Fehn, U. (2007) Influence of subduction zone settings on the origin of forearc fluids: Halogen concentrations and ¹²⁹I/I ratios in waters from Kyushu, Japan. Applied Geochemistry, **22**, 676-691.

講演者略歴

大沢信二(おおさわ しんじ)

京都大学大学院理学研究科附属地球熱学研究施設教授。1985年早稲田大学教育学部理学科地学専修卒業。東京大学教養学部化学教室研究生を経て、1989年東京大学大学院理学系研究科化学専攻修士課程、1992年同博士課程を修了し、東京大学博士(理学)を授与される。1992年に京都大学理学部附属地球物理学研究施設助手に採用され、同附属地球熱学研究施設助教授、准教授を経て、2010年より現職。2015年より研

究施設長を兼務。専門は『地球流体化学』で、地球の水を物質科学的に調べ、その起源や成分の由来などを探る研究をしている。2011年に阿蘇火山の火口湖の研究により日本陸水学会「吉村賞」を受賞。1960年生まれ。

主な著書

・「温泉科学の最前線(ナカニシヤ出版) 西村進編」

(2004) 分担執筆 <青い温泉水はどのようにしてできるのか>・

・「温泉科学の新展開(ナカニシヤ出版) 大沢信二編」

(2006) 分担執筆 <別府温泉は何歳か?-別府地熱系の年齢と熱水の起源->

・「温泉と地球科学(ナカニシヤ出版) 大沢信二・西村進編」(2016) 分担執筆 <火山に湧く冷たい炭酸泉>