

研究の対象としての温泉

—ある地球化学の研究成果を温泉法に見る定義に照らし合わせると—

大 沢 信 二¹⁾

Hot Spring as the Subject of Natural Science

Shinji OHSAWA¹⁾

1. はじめに

温泉科学の研究分野は広く、「各分野の研究者が温泉をどのように定義しているのか、どのような問題を投げかけ解決しようとしているのか」をまとめるというのが、今回の公開討論会の講演者に与えられた課題である。私は自然科学分野で指名を受けたが、温泉の自然科学だけでも温泉化学、温泉物理学、温泉生物学、温泉地質学と多岐にわたり、場合によってはこれらに温泉医学も含まれ、温泉の自然科学が受けもつ範囲は広範で、ひとりの研究者がとうてい対応できるものではない。私の専門は地球流体化学なので、与えられた課題を「地球化学の研究者が温泉をどのように定義し、どのような問題を投げかけ解決しようとしているのか」とスケールダウンすれば、ある程度ご期待に沿えるのではないかと考え、その方向でまとめさせていただくことにした。「ある地球化学の研究成果を温泉法に見る定義に照らし合わせると」という副題を付けたのはそのような理由からで、まずはそのあたりをご了解いただきたい。

さて、一口に温泉の地球化学的研究と言っても、温泉成分の化学分析、温泉水の質的变化、温泉水の生成機構（水質形成）、温泉水の（水や成分の）起源、温泉排水の環境負荷などと研究テーマは多種多様で、取り組む研究の内容によっては研究者ごとに温泉のとらえ方は相当に異なるのではないと思われる。最近、日本温泉科学会の英文名が The Japanese Society of Hot Spring Sciences に変更されたが、Hot Spring Sciences 以外に Hydrothermal Sciences という案もあった。そこには、「温泉には温度が 100℃ より高い熱水や蒸気までも包含される」という考えをしたためたいという思いがあり、噴気ガスを取り扱った研究の成果を日本温泉科学会の機関誌『温泉科学』に寄稿してきた私もそのように考えた中の一人であった（大沢ら, 1997; 大沢ら, 1998; 大沢ら, 2000）。そして、非火山性の温泉を手がけるようになってからは（大沢ら, 2006）、私の温泉のとらえ方はさらに大きく変わってきている。

¹⁾ 京都大学・理学研究科・地球熱学研究施設 〒874-0903 大分県別府市野口原. ¹⁾ BGRL, Graduate School of Science, Kyoto University, Noguchi-baru, Beppu, Oita 874-0903, Japan.

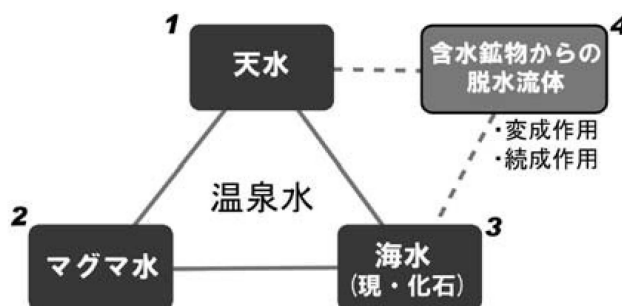


図1 これまでに認知されている温泉の起源流体（1, 2, 3）と新たに温泉起源流体として認識されつつある含水鉱物からの脱水流体（4）

非火山性温泉の地球化学的研究における私のねらいは、岩石学の分野で関心の高い、含水鉱物の脱水分解で生成するとされる高塩分の流体（以下、脱水流体）を、マグマ性流体の影響が現れにくい火山前線より海溝側の前弧域と呼ばれる地域において、大深度掘削井から流出する温泉水に見出し、天水、マグマ水、海水に続く第4の温泉起源流体として認知することである（図1）。私たちは、これまでに大分平野と紀伊半島の中央構造線沿いで掘削された温泉井から流出する温泉水が、マントル内へ深く沈み込む、含水鉱物を含んだ海洋プレートの高圧変成作用で生じる脱水流体に由来するという手がかりを得ることができ（網田ら, 2005; 大沢ら, 2007）、温泉の起源流体として変成脱水流体があるに違いないと強く思うようになった。また、その一方で、宮崎平野とその周辺地域の非火山性温泉の研究から、プレートの沈み込みには関係しない堆積盆地における堆積物・堆積岩の埋没過程で発生する続成脱水流体も温泉起源流体として存在するという認識ももつに至り（大沢ら, 2006）、「京都盆地の地下にも同種の続成脱水流体が潜在している」という内容の発表を今年度（平成21年度）の日本温泉科学会京都大会で行った（大沢ら, 2009）。

本公開討論会における私の講演では、まず私の知る非火山性温泉、特に信憑性が高いと考えている続成脱水流体由来の温泉水について紹介し、その水温、水質等を温泉法の言う「温泉」の定義に照らし合わせて問題点の洗い出しを行い、提起した問題点に対する私の考えを述べた。この要旨はその「講演記録」であるが、実際の討論の場では、私の問題提起等に対して様々なご意見をいただいたので、その紹介とそれらに対する私の思いを新たな章を設けて本文に付け足させていただいた。また、講演の直前に「専門家以外の方々も参加する公開討論会なので、難しい内容はできるだけ避けてください」との要望があり、準備した発表内容を急遽手直ししたため、本文の内容が先に配布された講演要旨集にあるものとは幾分異なっている。以上の点をここでおことわりしておく。

2. 続成作用に係る非火山性温泉の地球化学的特徴

地質学で言う『続成過程』とは、「堆積物が定着してから固結して地層になるまでの、物理的及び化学的変化を含む一連の過程」と定義されており、それが起こる温度・圧力の上限はおよそ200℃、2kbarぐらいまでとされ、主として堆積岩岩石学の研究対象となっている。堆積物はスメクタイトや沸石など含水性の粘土鉱物に富み、続成過程ではそれらの脱水分解によって流体（水）が発生すると古くから考えられていたが、それを深く掘削された温泉井から流出する温泉水に見出し、岩石学的アプローチからは十分な理解が得られなかった続成脱水流体の化学的素性を温泉水や付随ガスから明らかにする手段を手にいれたというのが私たちの研究成果の骨子である。なお、続成作用より高い温度・圧力条件では変成作用が進むが、それらには明瞭な境界があるわけではなく、定義に

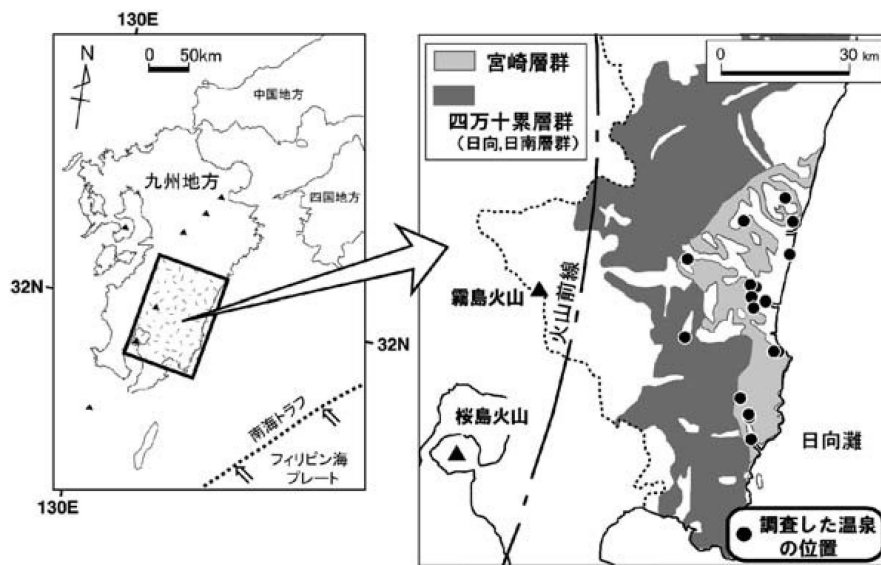


図 2 宮崎平野とその周辺地域の地質と調査した温泉井の位置

よって便宜的に分けられているもので、変成作用は変成岩岩石学の研究対象となっている。

私たちの研究成果（下記の【注記】参照）は、前述のように、宮崎平野とその周辺地域の大深度掘削温泉（最大深度 1700 m）で得られたものである。それらの地域の地下は基本的に第三紀の泥岩と砂岩の地層からなり（図 2）、層序的には厚い四万十累層群を宮崎層群が不整合で覆っている。調査の対象とした温泉井（17 ヶ所）は、表層の宮崎層群だけでなく、四万十累層群にまで達しているものもあった。温泉井から流出する温泉水の水素と酸素の同位体分析を実施し、同位体組成図（ δD - $\delta^{18}O$ ダイアグラム）上で起源の推定を行ったところ、海底堆積物間隙水と同様な同位体組成を示すものの他に、現海水より高い酸素同位体比（ $\delta^{18}O$ ）と低い水素同位体比（ δD ）をもつ起源不明の水と天水性地下水の混合線上に大多数の温泉水がならぶことを見出した。そして、起源不明の水の同位体組成が、堆積岩地域や海洋底の泥火山から流出する水のそれと類似していることなどから、泥岩の主要鉱物のひとつであるスメクタイトが続成過程でイライトへ相転移する際にスメクタイト層間から放出される水（層間水）であるという予想を立て、起源水に近い同位体組成をもつ温泉水の水質データを使った化学熱力学的解析を行い、それが妥当であることを示した。

また、それとは別に、石油・天然ガス資源研究分野で汎用される炭化水素の同位体地球化学的解析法を温泉付随ガスに応用し、海底堆積物間隙水起源の温泉水に付随するメタンが微生物の作用で発生したもの（microbial）であるのに対し、粘土鉱物の脱水によって発生する流体を起源とする温泉水に付随するメタンは熱分解性（thermogenic）であることを示し、2 種類の温泉起源流体が堆積物・堆積岩の続成過程の異なるステージで形成されたものであることを示唆することができた。

3. 研究で得た地化学データを温泉法の「温泉」の定義に照らし合わせると

さて、「温泉」の定義というと、温泉法に著されている定義をまず思い浮かべる方が多いであろう。周知のように、この法律では「温泉とは、地中から湧出する温水、鉱水及び水蒸気その他の

【注記】公開討論会での講演では、得られたデータや解析結果の図を提示しながら研究成果の紹介をしたが、研究論文として近々投稿する予定であり、2 重掲載を避けるために本文（講演記録）には掲載しなかった。

ガス（炭化水素を主成分とする天然ガスを除く）で、別表に掲げる温度又は物質を有するものをいう。」となっており、その別表には、水温の下限值（25℃）とともに、19の成分と常水と区別するための限界濃度が著されている（表1）。そこで、冒頭で予告したように、まず、その定義を前出の宮崎平野とその周辺地域の温泉に照らし合わせ、問題点となる内容を洗い出してみることにする。

表 1 温泉法における温泉の定義（別表）

- 1 温度（温泉源から採取されているときの温度）：25℃ 以上
- 2 温泉水 1 kg 中に溶けている物質の量：下記のうちいずれかの一つ満たせばよい

物質名	含有量（1 kg 中）
1 溶存物質（ガス性のものを除く）	総量 1000 mg 以上
2 遊離二酸化炭素（CO ₂ ）（遊離炭酸）	250 mg 以上
3 リチウムイオン（Li ⁺ ）	1 mg 以上
4 ストロチウムイオン（Sr ²⁺ ）	10 mg 以上
5 バリウムイオン（Ba ²⁺ ）	5 mg 以上
6 総鉄イオン（Fe ²⁺ +Fe ³⁺ ）	10 mg 以上
7 マンガン（Ⅱ）イオン（Mn ²⁺ ）（第一マンガンイオン）	10 mg 以上
8 水素イオン（H ⁺ ）	1 mg 以上
9 臭化物イオン（Br ⁻ ）	5 mg 以上
10 ヨウ化物イオン（I ⁻ ）	1 mg 以上
11 フッ化物イオン（F ⁻ ）	2 mg 以上
12 ヒ酸水素イオン（HAsO ₄ ²⁻ ）（ヒドロヒ酸イオン）	1.3 mg 以上
13 メタ亜ヒ酸（HAsO ₂ ）	1 mg 以上
14 総硫黄（S）[HS ⁻ , S ₂ O ₃ ²⁻ , H ₂ S に対応するもの]	1 mg 以上
15 メタホウ酸（HBO ₂ ）	5 mg 以上
16 メタケイ酸（H ₂ SiO ₃ ）	50 mg 以上
17 炭酸水素ナトリウム（NaHCO ₃ ）（重炭酸ソーダ）	340 mg 以上
18 ラドン（Rn）	20×10 ⁻¹⁰ Ci=74 Bq 以上（5.5 マッヘ単位以上）
19 ラジウム塩（Ra として）	1×10 ⁻⁸ mg 以上

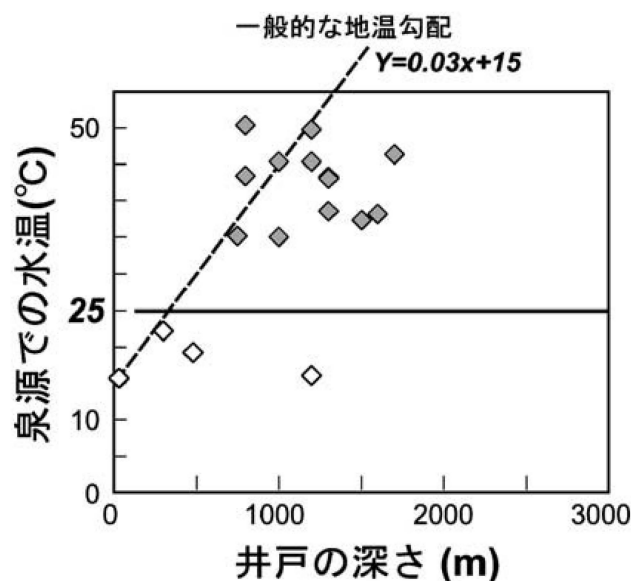


図 3 宮崎平野とその周辺地域の温泉井の深さと流出する温泉水の温度の関係

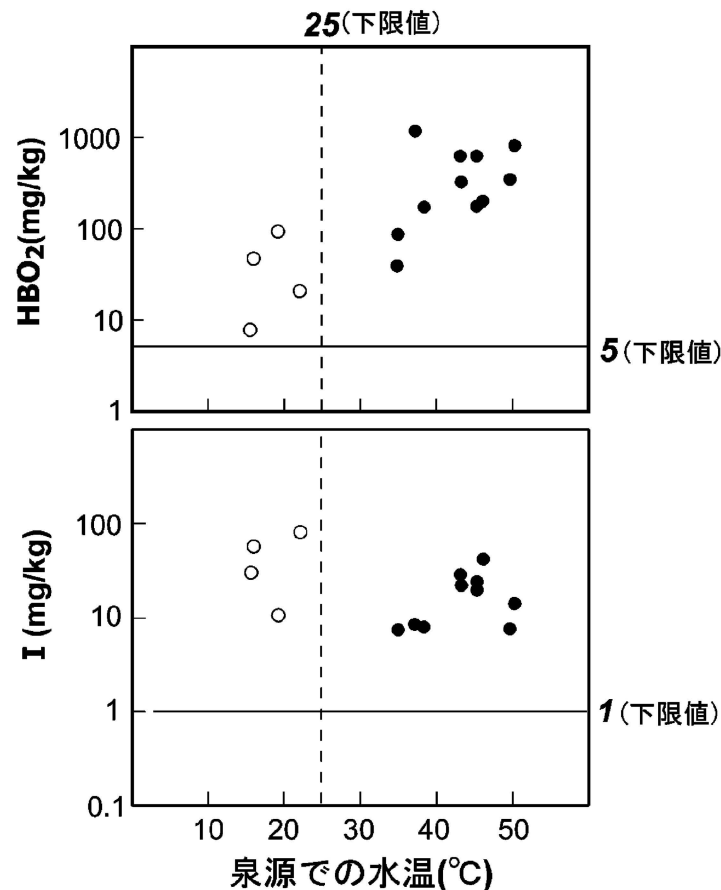


図 4 宮崎平野とその周辺地域の温泉井から流出する温泉水の温度とホウ素濃度およびヨウ素濃度の関係。図中の実線と破線は、それぞれ温泉となる濃度と温度の下限値を表す。〈講演で提示した図を加筆・変更した図〉

最初に温度であるが、図 3 に示すように、1 例を除くと掘削深度が 500 m を超える温泉井 (17 中 13) は温泉となり、残り 4 つは温度が 25°C 以上でないため、温泉にはならないことがわかる。しかし、水温が 25°C に達しないものについても、含まれる成分に着目すると温泉に“格上げ”される。図 4 には、温泉法別表に挙がっている 19 の成分の内、ホウ素とヨウ素の含有量を示したものであるが、その“格上げ”の様子が良くわかる。私は、このような作業を通して、温泉法が温泉として利用したいとする水をできるだけ温泉に認めようとする好意的な法律であるように感じた。

以上のように (液体の) 水の側から見ると、研究に利用した温泉は、温泉法上は全て疑う余地の無い温泉であるが、付随ガスの化学組成に目を転じると事情が変わる。表 2 は、調査した 19 の温泉井の内、付随ガスを採取できたものの化学組成 (数値データ) を示したものである。酸素 (O_2) の存在は試料採取時の大気の混入などによると思われるので、その寄与分を差し引くと、90% 以上がメタン (CH_4) からなることがわかる。メタンは水溶性のガスであるため、地表流出前の地下深部では温泉水に溶けていた可能性があり、温泉水の成分であるとみることができる。

表 2 宮崎平野とその周辺地域の温泉井から流出する温泉水に付随するガスの化学組成の例

試料番号	5	6
CO_2 (%)	1.01	1.16
N_2 (%)	8.24	4.43
O_2 (%)	0.89	0.29
CH_4 (%)	89.84	94.09
C_2H_6 (%)	0.02	0.02

4. 浮かびあがった問題点と討論

ご存知の方も多いと思うが、宮崎平野とその周辺地域は天然ガス田鉱床の有望地域として古くから研究されてきた地域であり、資源科学的視点からの地球化学的研究もなされてきた（例えば、Igari and Sakata, 1989；猪狩, 1996）。また、私が調査した温泉井のいくつかでは流出するメタンガスを資源として採取しており、温泉水とともに住民に供給しているという実態もある。このようなことから、宮崎平野とその周辺地域は、まさに、温泉とメタン（天然ガス）が共存している地域であると言えるが、このような実状を「炭化水素を主成分とする天然ガスを除く」と明言している温泉法はどのように見るのか？が気がかりなことであり、この点を公開討論会では問題として提起した。また、問題点の指摘とまでは行かないが、そもそも、なぜ温泉法に「炭化水素を主成分とする天然ガスを除く」という文言が掲げているのかを素朴な質問として投げかけた。

投げかけた質問に対しては、私があらかじめ予想していたように、温泉法以外の法律などとの兼ね合いで「炭化水素を主成分とする天然ガスを除く」と明記せざるを得なかったといったという旨の回答を複数の方々からいただいた。温泉施設のメタンガス爆発事故を契機に温泉法が昨年改正されたものの、「炭化水素を主成分とする天然ガスを除く」という文言が手付かずに残っているという不自然さは納得いかないままであるが、皆様のご意見から一応の理解ができた。一方、問題として提起した「温泉とメタンの共存を温泉法はどう見るか？」については、法文の読み違いによる問題誤認というご指摘も受けたが、少なくとも私が理解できる答えを会期中に得ることはできなかった。しかし、「温泉法で除外しているメタンに対処するために温泉法の改正が行われたことは奇異に感じられる」というようなご意見も聞け、提起した問題や投げかけた質問がそうそう簡単には答えられない難しい問題であることを認識した。

5. おわりに

本公開討論会の講演者に与えられた課題の前半にある「温泉科学の各分野の研究者が温泉をどのように定義しているのか（とらえているか）」については、「それぞれが独自の視点で温泉をとらえてかまわないのでは…」というのがあくまでも私の個人的な意見である。それは、変に定義を与えてしまうと、自由な発想による研究、特に他分野の研究者の温泉科学への参入や分野横断型の研究の発展を阻害してしまうことにもなりかねないと思うからである。しかしながら、温泉の自然科学の研究者が実社会と深く関わるようになった場合は、自らのとらえ方と実社会のそれ（温泉法がひとつの指標となるであろう）のずれを確認しておくことは肝要だと考える。

私は、今回、課題の後半にある「どのような問題を投げかけ解決しようとしているのか」ということへの回答を準備して公開討論会には臨まなかった。本音を言うと、課題を与えられたので、投げかける問題を考えはしたが、それをどのように解決すればよいかというところまでは薄学ゆえに準備できなかったのである。私の言う問題提起を話題提供と言い換えられた方がいらしたが、まことに的をえた“指摘”であったと思う。しかし、私の“話題提供”にはそれなりの反響があり、今回の公開討論会ではある程度の役目が果たせたのではなかと内心思っている。

実は、公開討論会での私の講演中に投げかけた質問にはもうひとつ、「温泉関係者にとってメタンガスの付随は盲点であったか？」というものがあつたのであるが、こちらにはどなたからもコメントをいただけなかった。触れて欲しくないことだったのかもしれないが、非火山性温泉の開発には多かれ少なかれメタンが付きまとうのだから、これからは直視していくことが不可避であろう。温泉掘削によってどのくらいの濃度のメタンが噴出してくるのか？さし当って、そのような質問が寄

せられそうであるが、それに答えられるようになることも温泉科学の研究者の役目のひとつのように思う。言うは易し、行うは難しであるが、私は地元大分県の非火山性温泉に対して噴出メタンガス濃度の予測値(目安)を得るための基礎的な研究を行おうと考えている。そのことをもって、本公開討論会の講演者に与えられた課題の後半にある「どのような問題を投げかけ解決しようとしているのか」の最後の部分への回答とさせていただきます、ご容赦いただければ幸いです。

私の講演が今回の公開討論会でどのくらい役に立ったか分からないが、少なくとも私にとっては、実社会における温泉の問題に強く関心を寄せるといふこれまでにない姿勢や意識をもつことができ、実り多き会合であったと考えている。最後になったが、その機会ときっかけを与えて下さった西村進先生と甘露寺泰雄先生に感謝いたします。

引用文献

- 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.
- 猪狩俊一郎 (1996): 日本の天然ガスの炭化水素比間の関係について. 地球化学, **30**, 47-54.
- Igari, S. and Sakata, S. (1992): Fractionation of light hydrocarbons through GC columns packed with rocks and minerals-Implications for natural gas migration. *Geochemical J.*, **26**, 37-43.
- 大沢信二, 由佐悠紀, 大上和敏, 北岡豪一 (1997): 阿蘇火山地域から放出される噴気ガスの不活性ガス組成. 温泉科学, **47**, 56-67.
- 大沢信二, 由佐悠紀, 大上和敏, 北岡豪一 (1998): 海洋地域の沈み込み帯から放出される低 N_2/He 比のマグマ性ガス—伊豆・マリアナ弧の小笠原硫黄島について—. 温泉科学, **48**, 9-14.
- 大沢信二, 由佐悠紀, 大山正雄 (2000): 噴気ガスの化学組成から得られる箱根火山の地熱情報. 温泉科学, **49**, 151-161.
- 大沢信二, 網田和宏, 山田 誠, 風早康平 (2006): 宮崎県の大深度掘削温泉から流出する続成流体. 第 59 回日本温泉科学会秋田大会講演要旨集, p. 34.
- 大沢信二, 網田和宏, 山田 誠, 森川徳敏, 高橋正明, 風早康平 (2007): 中央構造線沿いで掘削された温泉井から流出する温泉水の地球化学的特徴. 第 60 回日本温泉科学会鹿児島大会講演要旨集, p. 27.
- 大沢信二, 山田 誠, 三島壮智 (2009): 京都・竹の郷温泉の温泉水の起源と生成機構. 第 62 回日本温泉科学会京都大会講演要旨集, p. 13.