

## 温泉と地下水の接点

田 中 正<sup>1)</sup>

### Contact Point of Hot Spring and Groundwater

Tadashi TANAKA<sup>1)</sup>

#### Abstract

In order to clarify the contact point of hot spring and groundwater, the author considered the origin of hot spring waters using the  $\delta$  diagram of hydrogen and oxygen isotopic ratios of hot spring waters. The  $\delta$  diagram provides us an important information on the origin of hot spring waters from the hydrologic stand point of view. The results indicated that the hydrogen and oxygen isotopic ratios of the most of hot spring waters in Japan are plotted along the meteoric or local meteoric water lines on the  $\delta$  diagram, suggesting the origin of such hot spring waters is mostly the meteoric water. However, the isotopic ratios of several hot spring waters are shifted from the meteoric water line and distribute along the mixing lines bounding the weighted mean value of the meteoric water and the end member sources such as sea water, fossil sea water and volcanic thermal waters. The mixing ratio of the component of meteoric water in such mixing waters is usually higher than that of the end member sources except a few particular examples. Those results imply that it is reasonable to consider the origin of hot spring waters in Japan might be the meteoric water, namely the naturally occurring the hydrologic cycle water in basically. This stand point of view on the origin of hot spring waters maybe important for considering the conservation of hot spring resources in sustainable as shared resources as well as groundwater resources.

Key words : hot spring water, groundwater, stable isotopes,  $\delta$  diagram, meteoric water line, origin

#### 要 旨

温泉と地下水の接点を考えるために、本稿では $\delta$ ダイヤグラムを用いて温泉水の起源について考察を行った。これまでに測定された日本の温泉水の水素・酸素安定同位体比は、その多くが天水線に沿ってプロットされ、温泉水の起源が天水であることを示している。また、天水線からはずれる温泉水については、天水を一方の端成分として、火山性熱水や海水の同位体組成の

<sup>1)</sup> 筑波大学大学院生命環境科学研究科 〒305-8572 茨城県つくば市天王台 1-1-1. <sup>1)</sup> Graduate School of Life and Environmental Sciences, University of Tsukuba, Ibaraki 305-8572, Japan.

範囲に収れんする傾向が見られ、これらの温泉水は両端成分が混合することによって形成されたものであるといえる。すなわち、温泉水は循環水としての地下水が地質学的要因によって熱せられたものであるか、あるいは火山ガスや海水、化石海水といった塩化物イオン濃度の高い水が混入することによって生成されたものであると考えることができる。これらの点を踏まえて、温泉資源の保全を考えるに当たっては、温泉水は地下水と同様に自然界を循環する共有資源であるとの認識が重要であることを指摘した。

キーワード：温泉水，地下水，安定同位体， $\delta$  ダイアグラム，天水線，起源

## 1. はじめに

温泉はその成因から、大きくは火山性の温泉と非火山性の温泉に分けられる (Fukutomi, 1961)。また、温泉水の同位体組成と化学組成に基づいて、有馬型温泉、グリーンタフ型温泉、海岸型温泉、火山性温泉などの型に分けられる (Matsubaya *et al.*, 1973)。さらに天水起源の温泉、海水起源の温泉、火山性熱水起源の温泉、化石海水起源の温泉などに分類されることもある (松葉谷, 1991)。

温泉と地下水の接点を考える上では、水循環の観点から温泉水の起源を知ることがその手がかりになるものと思われる。またこのことは、温泉資源の保全・保護を考える上で重要である。この場合、空間情報を有する温泉水の水素および酸素の安定同位体組成が多くの情報を提供してくれる。本稿では、温泉水とともに降水、湧水、河川水など、水の水素および酸素の安定同位体組成に基づいて温泉水の起源について考えてみることにする。

## 2. 水循環研究における水素および酸素の安定同位体の有効性

水素および酸素の安定同位体については、多くの文献 (例えば、松尾, 1989; 酒井・松久, 1996) があるので、細部は省略し、ここでは水循環研究におけるその有効性について記すことにする。

水素の安定同位体である重水 (D あるいは  $^2\text{H}$ ) と酸素の同位体である酸素-18 ( $^{18}\text{O}$ ) は、 $\text{HDO}$ 、 $\text{H}_2^{18}\text{O}$  などの水分子を構成し、自然界を循環している。これらの同位体を含む水分子の存在割合は、 $\text{H}_2^{16}\text{O}$ : 99.73%,  $\text{HD}^{16}\text{O}$ : 0.032%,  $\text{H}_2^{18}\text{O}$ : 0.20% であり (榎根, 1989)、D や  $^{18}\text{O}$  を含む水分子はかなりの割合で存在している。また、化学的には水そのものであることから、D と  $^{18}\text{O}$  は理想的なトレーサー (追跡子) として水循環の研究に利用されている。

D と  $^{18}\text{O}$  のソース (供給源) は海洋にあり、塩分濃度が 19‰ 程度の標準的な海水ではその同位体比 ( $^2\text{H}/^1\text{H}$ ,  $^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$ ) はほぼ一定であり、標準平均海水 (Standard Mean Ocean Water, SMOW) と呼ばれている。水の同位体比はこの SMOW からの千分率 (‰) 偏差で表示され、これを  $\delta$  値と呼んでいる。したがって、 $\delta$  値が大きくなるほど重い同位体に富んだ水となる。また、同位体を含む水は、蒸発や凝結の過程で重い分子を含む水と軽い分子を含む水の分別が生じる。これは、重い分子を含む水と軽い分子を含む水とでは、水蒸気圧に差があるために生じる現象である。分別された水の同位体比は液体で相対的に高く、気体の状態では相対的に低くなる。したがって、海水面から水が蒸発するときは軽い水分子に富んだ水蒸気が生成される。また、この水蒸気が降水になるときは相対的に重い水分子からなる水蒸気が除かれ、大気中に残る水蒸気はさらに軽い同位体水分子を含む水蒸気となる。図 1 は、このプロセスを模式的に示したものである。安定同位体の高度効果 (あるいは内陸効果) と呼ばれる現象は、こうしたプロセスによって生じる。また、降水中の同位体比は、降水が形成されるときの温度の影響を強く受けることが知られており (榎根, 1980)、一般に温度効果と呼ばれている。すなわち、水の安定同位体比は循環の履歴を有しており、空間情報を持っていることになる。この空間情報を利用することによって温泉水の起源を探ることが可能となる。

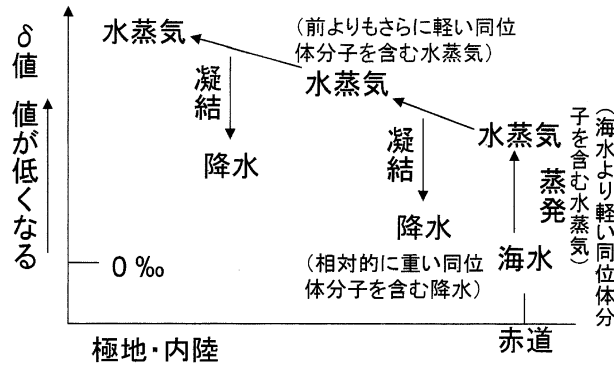


Fig. 1 Schematic diagram showing fractionation processes of isotopic water molecules during evaporation and condensation processes.

図 1 蒸発・凝結に伴う同位体水分子の分別プロセスを示す模式図

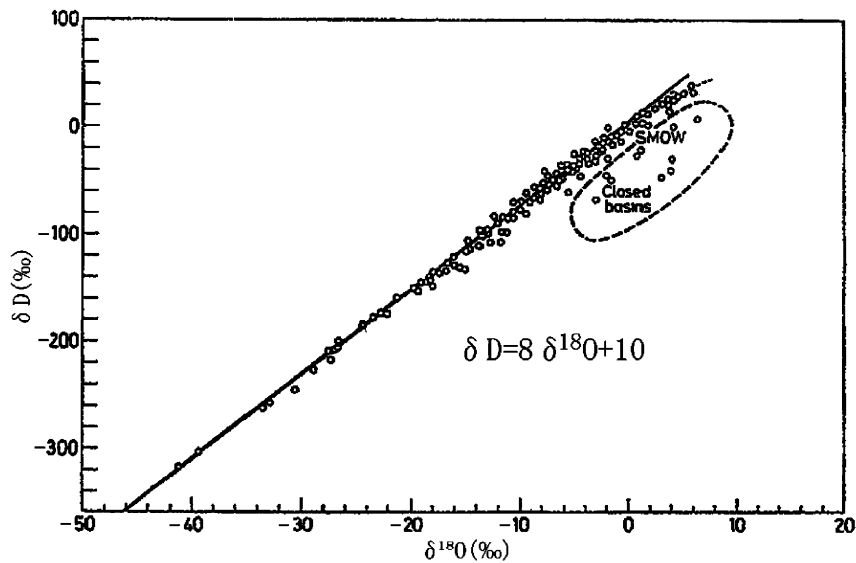


Fig. 2  $\delta$  diagram of meteoric waters in the world (Craig, 1961, partially corrected).

図 2 世界各地における天水の  $\delta$  ダイアグラム (Craig, 1961 を一部修正)

### 3. 天水線と $\delta$ ダイアグラム

世界各地の雨水や河川水、湖沼水、雪氷といった循環水の水素と酸素の安定同位体比の間には一定の関係があることが知られている (Craig, 1961). 図 2 は、この両者の関係を示したものである. Craig が見出した関係式は、 $\delta D = 8\delta^{18}O + 10$  という簡単な式で表され、天水線 (meteoric water line) と呼ばれている. なお、図 2 に示されている「closed basins」とは、流入・流出河川を持たない「閉鎖流域」を意味しており、これらの流域における水は循環が活発でないため、わずかに蒸発の影響を受け、その安定同位体比は天水線よりやや下方にプロットされる.

図 2 に示された関係図、すなわち横軸に  $^{18}O$  の同位体比、縦軸に D の同位体比をプロットした図

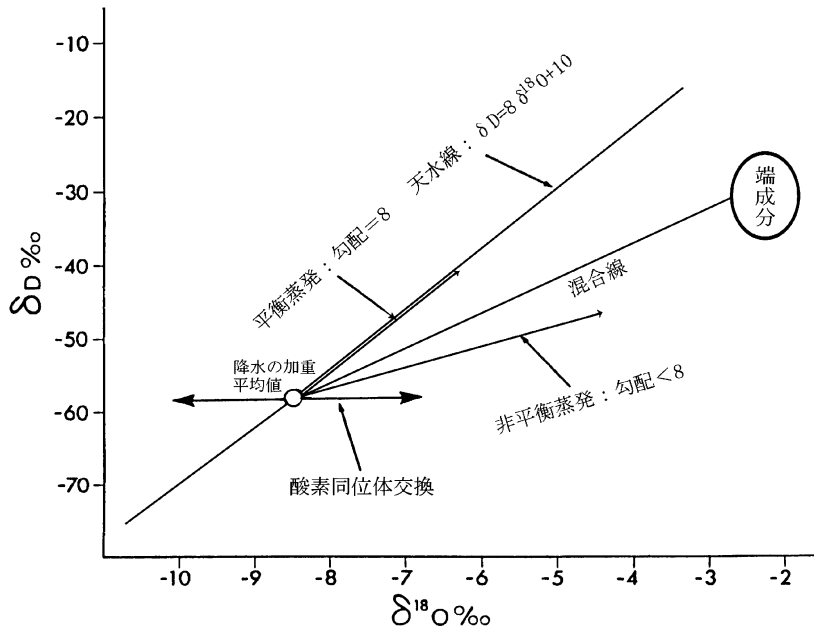


Fig. 3 Schematic diagram showing  $\delta$  diagram.

図 3  $\delta$  ダイアグラムの模式図

を  $\delta$  ダイアグラムと呼んでいる。図 3 は、 $\delta$  ダイアグラムを模式的に示したものである。降水を起源とする循環水の水素と酸素の安定同位体比は、ほぼ天水線上に沿ってプロットされる。天水線の係数 (勾配) 8 は、水蒸気が凝結したり、水が蒸発するときの D と  $^{18}O$  の同位体分別係数の差によって決定されるものであり、地域によるこの差は極めて小さい。しかし、湖などの水面から水が蒸発するときには、動力学的な (非平衡な) 同位体効果が働くため、蒸発の影響を受けた水の水素と酸素の安定同位体比の勾配は 8 より小さくなる。また定数項 10 は、水蒸気が生成されるとき蒸発速度によって決まるため、厳密にはそれぞれの地域によってこの定数項の値は異なる。例えば、日本の降水の安定同位体比の関係は図 2 の天水線よりやや左上にずれて、 $\delta D = 8\delta^{18}O + 17.5$  の関係が与えられる。したがって、より一般的に天水線は、 $\delta D = 8\delta^{18}O + d$  で表され、この右辺第 2 項は d 値 (または d-parameter) と呼ばれている。この d 値は、水蒸気が生成されるとき蒸発速度によって決まり、蒸発速度が速い場合には相対的に d 値は大きくなる。また、循環水と異なる同位体組成を持つ端成分と循環水とが混合した場合、その水の水素と酸素の安定同位体比は降水の加重平均値と端成分の同位体比とを結ぶ線上にプロットされる。地下水や海水が地下深くの高温・高圧下で熱せられる際には、周辺の岩石との間で酸素同位体交換 (oxygen isotope shift) が生じることが知られており、この影響を受けた水の同位体比は図 3 に示すように、酸素の同位体比だけが変化する。

以上のことから分かるように、 $\delta$  ダイアグラムは水の循環プロセスを考えるに際して、多くの情報を提供してくれる。

#### 4. 温泉水の水素および酸素の安定同位体比—関東地方北部の温泉水を例として—

図 4 は、群馬県、栃木県、茨城県に存在する 45 の温泉水の  $\delta$  ダイアグラムを示したものである。

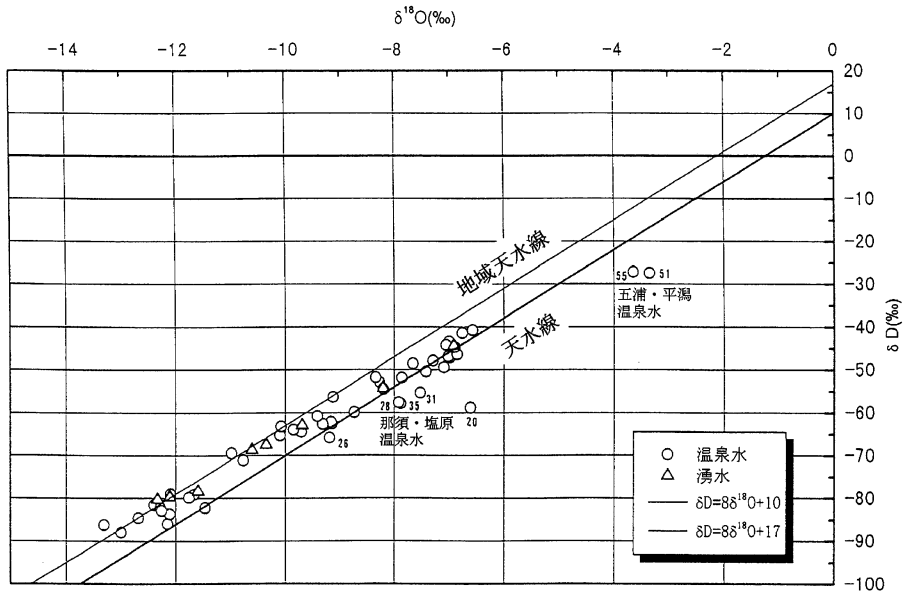


Fig. 4  $\delta$  diagram of hot spring and spring waters in the northern parts of Kanto region (Minagawa, 1997, corrected and revised).

図 4 関東地方北部の温泉水と湧水の  $\delta$  ダイアグラム (皆川, 1997 を修正して加筆)

またこの図には、採水した温泉周辺の 8 ヶ所の湧水（一部河川水）の  $\delta$  ダイアグラムも示されている。細線で示した  $\delta D = 8\delta^{18}O + 17$  の線は、日本の内陸での代表的な天水線（松葉谷, 1991）を示している。図から明らかのように、大部分の温泉水と湧水の  $\delta D - \delta^{18}O$  の関係は、2つの天水線に挟まれるか、あるいは天水線に近い値をとっていることが分かる。また図 5 は、温泉水および湧水の標高と水素安定同位体比の関係を示したものである。全体的に標高が高くなるにつれて同位体比が低くなる傾向があり、また内陸に向かうにしたがって同位体比が低くなる傾向が認められる。こうした傾向は、標高と酸素同位体比との関係においても認められ、降水の高度効果や内陸効果を反映したものであるといえる。すなわち、ここに示した温泉水の同位体比は、それぞれの地域における天水の同位体比によって支配されていることから、温泉水の多くは天水（降水）を起源としたものであるといえる。富山県の温泉水についても同様な指摘がなされている（水谷・吉田, 1991）。

図 4 において、一部の温泉水については  $\delta D - \delta^{18}O$  の関係が天水線からややはずれてプロットされている。茨城県の五浦・平潟温泉水および栃木県的那須・塩原温泉水が該当し、これらの温泉水は図 5 においても全体的な傾向線からはずれているのが認められる。五浦温泉と平潟温泉については、温泉水の水素と酸素同位体比の値が高いこと、塩化物イオン濃度も高い（約 7,500 mg/l）こと、またこの地域の地理的条件から判断して海水が温泉の生成に深く関わっていることが予想される。図 6 は、この地域の天水の値として平潟井戸水の値を用い、五浦温泉水と平潟温泉水の同位体比を  $\delta$  ダイアグラム上で結んだものである。この線を延長すると、 $\delta D$  値で 0‰、 $\delta^{18}O$  値で +2‰ の点に達する。海水の同位体比は  $\delta D$  値と  $\delta^{18}O$  値ともに 0‰ であるから、酸素同位体比で +2‰ のずれが生じることになる。先に述べたように、一般に地下水や海水が地下深くの高温・高圧下で熱せられる際には、周辺の岩石との間で酸素同位体交換が生じることが知られており、海水と玄武岩との接触実験では、350℃で +2‰ の酸素同位体交換が生じることが報告されている（Bowers and Taylor, 1985）。

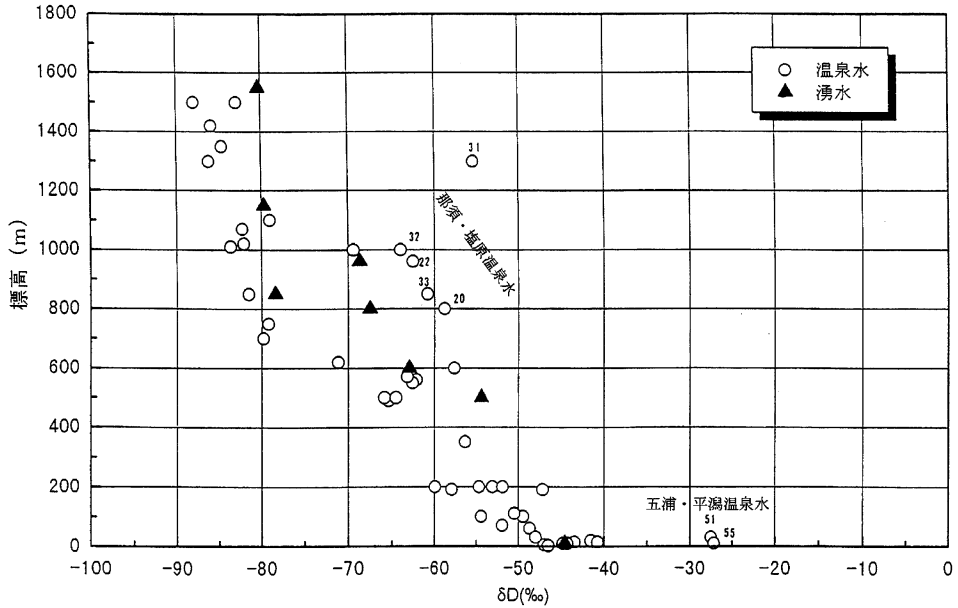


Fig. 5 Relationship between altitude heights and hydrogen isotopic ratios of hot spring and spring waters in the northern parts of Kanto region (Minagawa, 1997, corrected and revised).

図 5 関東地方北部の温泉水と湧水の標高と水素安定同位体比との関係 (皆川, 1997 を修正して加筆)

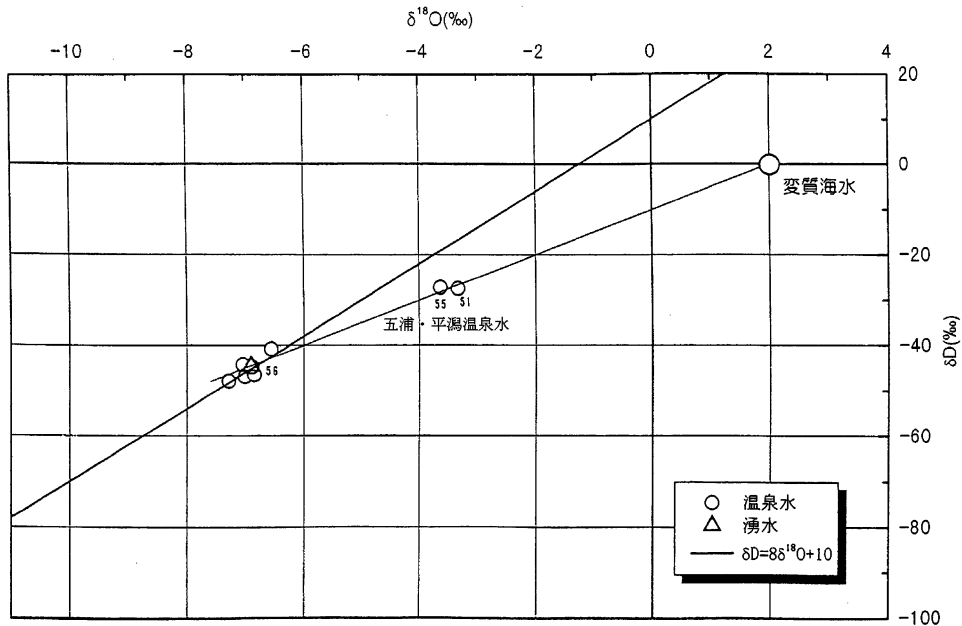


Fig. 6  $\delta$  diagram of the Iwaura and Hiragata hot spring waters (Minagawa, 1997, corrected and revised).

図 6 五浦温泉水と平潟温泉水の  $\delta$  ダイアグラム (皆川, 1997 を修正して加筆)

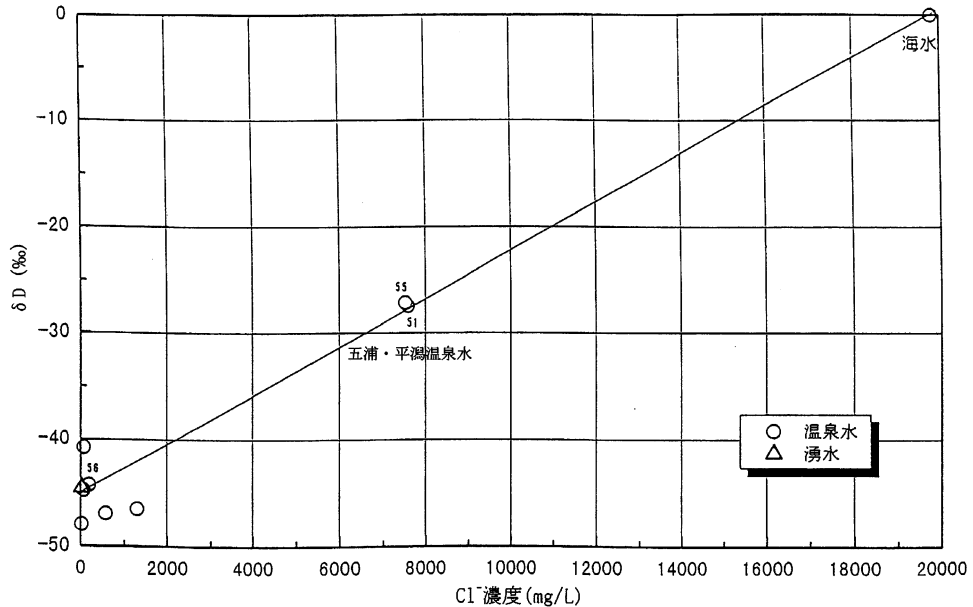


Fig. 7 Relationship between chloride ion concentrations and hydrogen isotopic ratios of hot spring and spring waters in the Itsuura and Hiragata areas (Minagawa, 1997, corrected and revised).

図7 五浦・平潟地域の温泉水と湧水の塩化物イオン濃度と水素安定同位体比との関係 (皆川, 1997 を修正して加筆)

図7は、五浦・平潟地域における温泉水の塩化物イオン濃度と水素の安定同位体比との関係を示したものである。図から、五浦温泉水と平潟温泉水は、平潟井戸水の値と海水の値 ( $\delta D=0\text{‰}$ ,  $\text{Cl}^- = 19,800 \text{ mg/l}$ ) を結ぶ線上に位置することが分かる。したがって、この両温泉水の生成は天水と海水との混合によって説明することができる。その混合割合は、天水が6に対して海水が4であり、天水の占める割合が多い。

図8は、那須・塩原地域の温泉水と湧水の $\delta$ ダイアグラムを示したものである。これらの温泉水や湧水を結ぶ直線は、天水線とは異なる傾きを有し、その値は約2.75である。この値は、火山ガスの発生に伴う同位体効果によって、天水を起源とする熱水の $\delta$ ダイアグラムの傾きは3になるという説明(酒井・松久, 1996)とほぼ一致する。また、この直線の延長は、島弧における火山性熱水の酸素および水素の同位体比 ( $\delta D = -20 \sim -40\text{‰}$ ,  $\delta^{18}\text{O} = +6 \sim 8\text{‰}$ ) (松葉谷, 1989) に達し、これらの温泉水の生成は天水と火山性熱水との混合によって説明される。しかし、これら温泉水の同位体比は天水線から大きくはずれるものではなく、火山性熱水の混合割合は僅かであると考えられる。群馬県の白根温泉や田代温泉、伊香保温泉も火山活動と関連する温泉であり、火山性熱水を含む可能性が考えられるが、その割合は多くて5%程度と見積もられている(松葉谷, 1989)。

## 5. おわりに

わが国において、これまでに報告された温泉水の $\delta$ ダイアグラム(産業技術総合研究所深部地質環境研究センター, 2007など)を模式的に示すと図9のようになる。これまでに測定された温泉水の酸素および水素の安定同位体比は、その多くが天水線に沿ってプロットされ、温泉水の起源が天水、すなわち降水を起源とする循環水であることを示している。また、この天水線からはずれる温



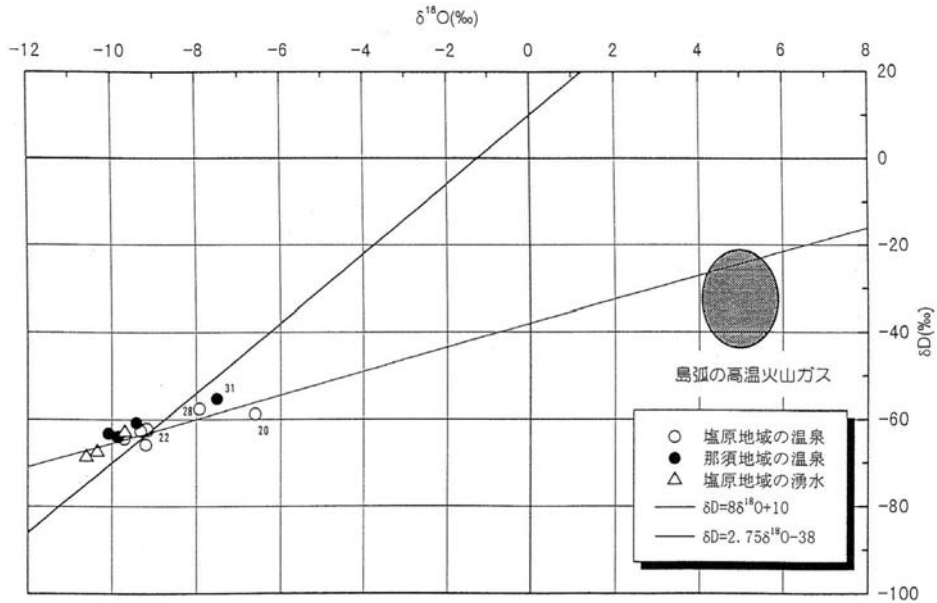


Fig. 8  $\delta$  diagram of hot spring and spring waters in the Nasu and Shiobara areas (Minagawa, 1997, corrected and revised).

図 8 那須・塩原地域における温泉水と湧水の  $\delta$  ダイアグラム (皆川, 1997 を修正して加筆)

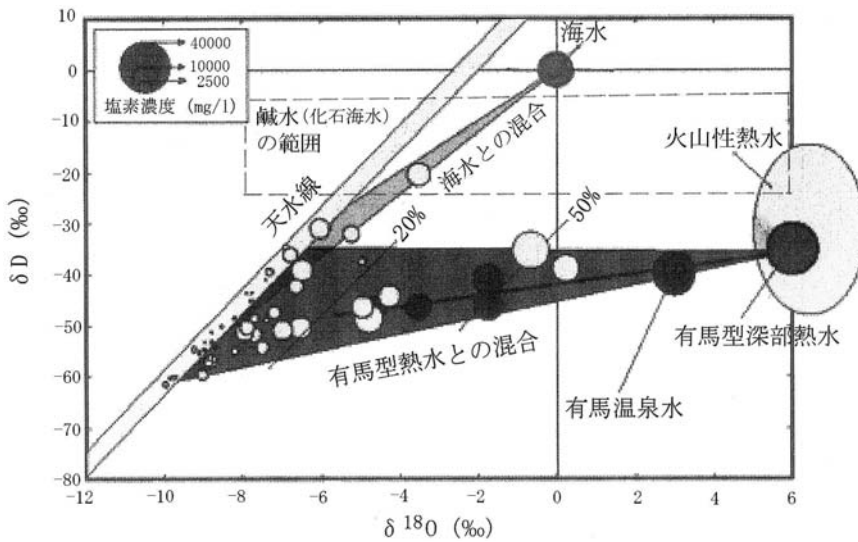


Fig. 9 Schematic diagram showing  $\delta$  diagram of hot spring waters in Japan (Ueda, 2007, originally by AIST, corrected and revised).

図 9 わが国における温泉水の  $\delta$  ダイアグラムの模式図 (上田, 2007 (原図は AIST) を修正して加筆)

泉水については、天水を一方の端成分として、火山性熱水や海水の組成の範囲に収れんする傾向が見られる。すなわち、これら両端成分の線上にプロットされる温泉水は、天水が火山性熱水や海水と混合することによって形成された温泉水と考えられる。有馬型温泉の場合、火山性熱水の混合割合



はかなり高く、50%以上の値を示す温泉水もあるが、その全てが火山性熱水から供給されているものではない。また、グリーンタフ型温泉に分類される北部フォッサマグナ地域における温泉水の多くも、 $\delta$ ダイアグラムから天水起源であることが報告されている（大野，2000）。

化学組成等から分類される各型の温泉水も天水ともう一方の端成分がある割合で混合したものであり、水循環の観点からはその起源は天水であるといえる。すなわち、温泉水は循環水としての地下水が地質学的要因によって熱せられたものであるか、あるいは火山ガスや海水、化石海水といった塩化物イオン濃度の高い水が混入することによって生成されたものであると考えることができる。

$\delta$ ダイアグラムから読み取れる温泉水の起源に関する情報は、温泉資源の保全・保護を考える上でも多くの示唆を与えてくれる。すなわち、温泉水の多くは循環する資源であり、使い方を誤らなければ永続的に利用可能な資源である。また、温泉資源の保全・保護を考えるに当たっては、温泉水は地下水と同様に自然界を循環する共有資源であるとの認識が重要であろう。

## 謝 辞

本稿は、2008年9月24日～27日に茨城県五浦温泉で開催された日本温泉科学会第61回大会において、特別講演として発表した内容を取りまとめたものである。発表の機会を与えていただいた大会運営委員長の野田徹郎氏ならびに日本温泉科学会会長の大山正雄氏をはじめとする学会各位にお礼申し上げます。

## 引用文献

- Bowers, T.S. and Taylor, Jr. H.P. (1985) : An integrated chemical and stable-isotope model of the origin of midocean ridge hot spring systems. *Jour. Geophys. Res.*, **90**, 12583-12606.
- Craig, H. (1961) : Isotopic variation in meteoric waters. *Science*, **133**, 1702-1703.
- Fukutomi, T. (1961) : Rates of discharge of heat energy from the principal hot spring localities in Hokkaidou, Japan. *Jour. Facal. Sci., Hokkaidou Univ, Seri. VII*, **1** (5), 315-330.
- 榎根 勇 (1980) : 「水文学」, 272 p., 大明堂, 東京.
- 榎根 勇 (1989) : 「水と気象」, 180 p., 朝倉書店, 東京.
- 松葉谷 治 (1989) : 同位体比からみた群馬県の温泉, *温泉科学*, **39**, 23-28.
- 松葉谷 治 (1991) : 「熱水の地球化学」, 139 p., 裳華房, 東京.
- Matsubaya, O., Sakai, H., Kikuchi, I. and Satake, H. (1973) : Hydrogen and oxygen isotopic ratios and major element chemistry of Japanese thermal water system. *Geochem. Jour.*, **7**, 123-151.
- 松尾禎士監修 (1989) : 「地球化学」, 266 p., 講談社サイエンティフィック, 東京.
- 皆川朋典 (1997) : 水素および酸素安定同位体比からみた関東地方北部の温泉水の起源, 筑波大学第1学群自然学類卒業論文, 46 p., 筑波.
- 水谷義彦・吉田健治 (1991) : 同位体比から見た富山県の温泉水の起源, *温泉科学*, **41**, 116-125.
- 酒井 均・松久幸敬 (1996) : 「安定同位体地球化学」, 83-139, 東京大学出版会, 東京.
- 産業技術総合研究所深部地質環境研究センター (2007) : 近畿～関東～北陸地方で採取した温泉水の水素・酸素同位体組成の関係, <http://unit.aist.go.jp/dgcore/works/2007/GS/img/023.html>
- 大野武志 (2000) : 北部フォッサマグナにおける温・鉱泉水の地域別湧出特性, 筑波大学第1学群自然学類卒業論文, 54 p., 筑波.
- 上田 晃 (2007) : 温泉化学—重い水と軽い水のお話し, 第47回温泉経営管理研修会テキスト, 4-1～4-10, 中央温泉研究所, 東京.