

# 秋田県の温泉の同位体組成および化学組成の特徴

秋田大学鉱山学部

松葉谷 治

## Isotopic and Chemical Features of Hot Springs in Akita Prefecture

Osamu MATSUBAYA

Mining College, Akita University

### Abstract

All over the Akita Prefecture, many hot springs are located. Most of them are of meteoric water, fossil sea water and volcanic gas origins. In the Ohdate-Kazuno area, moderate temperature hot springs of meteoric water origin are found, which may exist as rather shallow formation water in the Green Tuff formations. On the contrary, high temperature geothermal waters of meteoric origin, which are used for power generation, are obtained in two volcanic area of Hachimantai and Oyasu. Those geothermal waters are expected to come up through vertical fissures from depth deeper than 2km. The difference of these two manners of meteoric water circulation should be necessarily explained to understand the relationship of shallow and deep geothermal systems.

About some hot springs of fossil sea water origin, the relationships of  $\delta D$  and  $Cl^-$  don't agree to the mixing relation of sea water and meteoric water. This may be explained by two different processes, one of which is mixing of sea water with saline meteoric water ( $Cl^- = ca. 12g/kg$ ). The other is modification of  $\delta D$  by hydrogen isotopic exchange with hydrous minerals underground, or by exchange with atmospheric vapor during a relic lake before burying.

Key words : Hot springs in Akita, Hydrogen and oxygen isotopic ratios, Fossil seawater type hot spring, Formation water type hot spring, Fissure type hot spring

キーワード : 秋田県温泉, 水素・酸素同位体比, 化石海水型温泉, 層間水型温泉, 割れ目型温泉

### 1. はじめに

水の水素と酸素の同位体比は、温泉水、地熱水、火山ガスなどの起源を判定し、その成因を推定するための有力な手がかりとなる。日本の温泉の水素・酸素同位体比については、1970年代初めに著者ら<sup>1)</sup>により大略が示されて以来、多くの研究成果が報告されている<sup>2~12)</sup>。それらの成果から、温泉水や地熱水の起源としては、①天水、②火山ガス(マグマ水)、③海水、これは現在の海水あるいは地層中に取り残された堆積当時の海水(化石海水)、および④岩石との反応が十分に進んだ水の4種類が考えられる<sup>13, 14)</sup>。

そのうち、火山ガスを起源とするものについては、日本のような島弧の火山ガスは水素同位体比が特徴的に $\delta D = -10 \sim -40\%$ の値を持つことが知られている。その値は海嶺やホットスポッ

トの火山に見られるマントル起源の水の値(-70~-100‰)とは明らかに異なり、その水の起源が島弧マグマの成因と深く関係すると考えられる<sup>15, 16)</sup>。そのような火山ガスあるいはそれを起源とする温泉水についてもいくつかの火山について詳しく論じられている<sup>8, 14, 17~22)</sup>。

この論文では、秋田県の温泉を例に挙げながら天水起源および化石海水起源の温泉について現在問題になっている点を考察する。なお、秋田県の温泉水の水素と酸素の同位体比については既に多くの論文<sup>2, 5, 23~28)</sup>が報告されているので、ここでは主にそれらの値を用いて考察する。

## 2. 秋田県の温泉の概略

秋田県の温泉は、Fig. 1に示すように県内全域に分布しているが、地域により成因の異なる温泉が特徴的に存在する。

天水起源の温泉としては、グリーンタフ型と命名された温泉が大館市と鹿角市の間に分布する。これらの温泉は、グリーンタフ累層中に浸透した天水が地層中の海塩を溶出したものと説明されている<sup>1, 2, 29)</sup>。また、八幡平地熱地域の大沼および澄川の地熱発電所<sup>14, 30)</sup>や小安地域の上の岱地熱発電所<sup>31)</sup>では地下1~2 kmの深さから200~250℃の高温の天水起源の地熱水が得られている。天水起源の温泉はこれらのほかにも広く県内に分布するが、それらについては特に地域的な偏りはない。

化石海水起源の高塩濃度泉は海岸地域や米代川と雄物川沿いに存在する。これらの温泉は、森岳温泉や強首温泉など石油探査のための試錐により見つかったものが多く、新第三紀の堆積層中に当時の海水が取り込まれたものである。このような温泉は、海岸地域だけではなく米代川の最上流地点の矢立峠や雄物川の中流域にも存在する<sup>23, 24)</sup>。特に最近になり秋田市内をはじめ県内各地で温泉探査のために1,000mを超す深いボーリングが行われ、しばしばこの種の高塩濃度の温泉が見つけれられている。

火山ガス起源の温泉は北部の八幡平地域と南部の小安川原毛地域に存在する。八幡平地域は、岩手県側の岩手山周辺と合わせて多くの火山活動やそれに伴う温泉活動がある。また、小安地域は宮城県側と合わせた栗駒岳周辺および鬼首・鳴子の形成する火山地域の一角を占めている。両地域に共通した特徴として、八幡平地域の4ヶ所および栗駒地域の2ヶ所に地熱発電所があり、上記のような地下1~2 kmの深さから高温の天水起源の地熱水が得られている。これらの温泉水・地熱水についても多くの同位体地球化学的研究が行われている<sup>25, 26, 32~34)</sup>。

今年(1997年)の日本温泉科学会大会が開催された湯瀬温泉は天水型が分布する大館・鹿角地域と八幡平火山地域の間位置する。湯瀬温

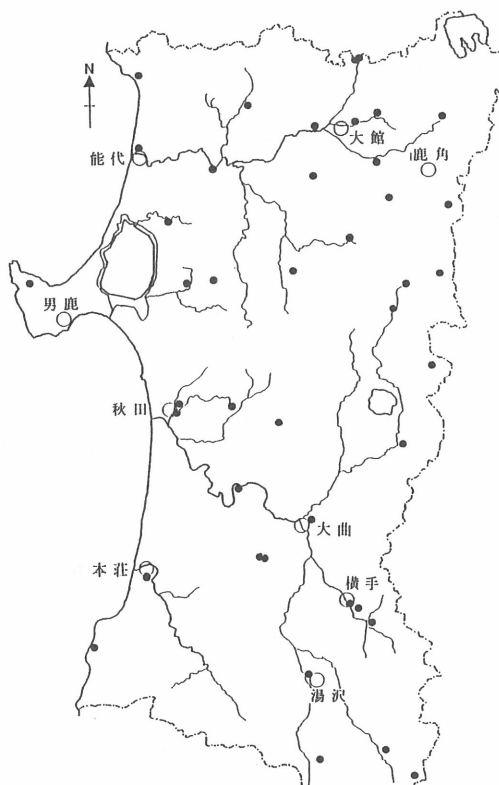


Fig. 1 Map showing locations of hot springs in Akita Prefecture.

泉は後述のように近隣の大葛温泉とともに特異的な水素・酸素同位体比の関係を示し、その水の起源・成因に興味を持たれる。また、男鹿湯元温泉はCl濃度が2.1~2.4 g/lのNa-Cl型であるが、水素・酸素同位体比は天水起源の可能性を示唆している<sup>35)</sup>。

### 3. 天水起源の温泉水の貯留構造

天水起源の温泉水は、Fig. 2に大館・鹿角地域の温泉の例を示すように、その水素と酸素の同位体比の関係( $\delta D$ 対 $\delta^{18}O$ )がその地域の地表水(天水)とほぼ同じであることから天水を起源とすると判断される。温泉水の酸素同位体比は多くの場合天水よりもわずかに高くなっている。これは地下の岩石との間の酸素同位体交換によるものである。この種の地熱水は、地下の比較的浅いところ、恐らく深くても1 km程度までのところにある地層中に層間水として存在していると考えられてきた。したがって、天水の循環は、Fig. 3 (a)に示すように地表から浸透した水がその地層中を水平方向に流動する形態と考えられる。

ところが、同じ天水起源でも地熱発電所で利用される地熱水は、Fig. 3(b)に示すように少なくとも2 kmより深いところから鉛直方向の割れ目を上昇して来るものと推定される。その根拠は、地熱発電所や地熱エネルギー開発調査の目的で掘削されたボーリングの結果、地下1~2 kmの深さにおける地熱水の貯留構造はある地層中に広く存在する層間型ではなく、局所的に各々独立する割れ目中に存在することが明らかにされていることによる。特に、八幡平地域では焼山火山や玉川温泉などの火山ガス起源の温泉水と大沼や澄川の地熱発電所の地熱水やそれと同質の銭川温泉など

天水起源の温泉水の両者がわずか数kmの距離の間に点在し、しかも両者の分布域が一部重なり合っている。このことは、それらの温泉水が各々独立した鉛直方向の割れ目を上昇してくることを強く示唆する<sup>14, 36)</sup>。その場合、天水の循環は恐らくさらに深所から鉛直方向の割れ目を上昇してくるものと推定される。この2種類の循環形態が、いずれも実際に存在するものであるか否かが天水起源の温泉水・地熱水の成因を解明するための重要な問題である。この2種類の循環形態の間では循環の規模および時間に大きな差があると考えられる。もし、この両者がいずれも実際に存在する場合は、循環をひき起こす要因にどのような差があるかが、浅部の温泉水と深部の地熱水の関連性を理解するために今後解明されねばならない問題である。他方、天水の循環は基本的には鉛直割れ目型であり、層間水型はその下部に鉛直割れ目型が存在し、そこを上昇して

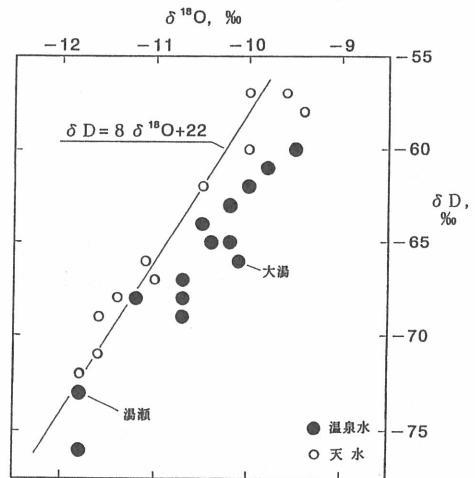


Fig. 2  $\delta D$  vs.  $\delta^{18}O$  on hot springs of meteoric origin in the Ohdate-Kazuno area. Data; Ref. 5

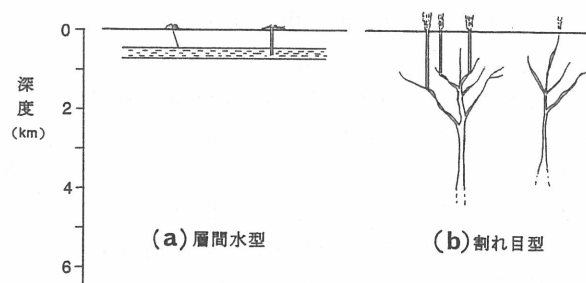


Fig. 3 Schematic ideas of the formation water type and the vertical fissure type reservoirs on hot springs of meteoric origin.

くる熱水が地表近くで層間水型の地下水に混入する可能性が考えられる。これが事実であるとする、今後の温泉開発の目標を深部に置くことが考えられる。これらの問題を解明するためには、天水そのものの循環形態、すなわち、降水が地下に浸透しどのように循環するかについてより普遍的な理解が求められる。それと同時に、熱の供給源が何か、また熱の移動過程が何かについての理解が重要になる。

湯瀬温泉と大葛温泉の水素と酸素の同位体比は、大館・鹿角地域の天水型のものと比較すると、例えば大湯温泉よりも $\delta D$ で10‰程、 $\delta^{18}O$ で2‰程低い値である(Fig. 2)。そのような低い同位体比を持つ温泉水(地熱水)は、地下に高温の地熱水が存在し、その地熱水の沸騰により生じた水蒸気の可能性が考えられる。地下の地熱水が天水起源かそれとも火山ガス起源かは現在のところ定かではないが、ある深度から水蒸気が上昇してくることはこの地域の熱水の循環を理解する上で重要なことと考えられる。

#### 4. 化石海水起源の温泉水の $\delta D$ とClの関係

化石海水あるいは現在の海水を起源とする温泉水・地熱水は、その水素同位体比( $\delta D$ )と塩化物イオン濃度(Cl)の関係がFig. 4に示すように海水とその地域の天水の混合関係を持つことから海水起源であると判断される。他方、水素同位体比と酸素同位体比( $\delta^{18}O$ )の関係は、海水と天水の混合関係に一致するものから、その混合関係から $\delta^{18}O$ が著しく高くなるものまで様々である。この酸素同位体比のずれは地下の岩石との酸素同位体交換による。したがって、化石海水のように地下に長期間滞留する場合、地熱発電所の地熱水のような高温の場合<sup>37)</sup>、あるいは地下で石灰岩のような炭酸塩鉱物と酸素同位体交換を起こした場合などに酸素同位体のずれが大きい。

ところが、化石海水起源の温泉水について同位体比の測定結果が蓄積されてくると、中には $\delta D$ とClの関係が海水と天水の混合関係から外れるものがあることが明らかになってきた。その不一致には2通りがあり、秋田県の温泉を例にするとFig. 5に示すように、一つは森岳温泉のように海水と天水の混合関係よりもClが高い方向にずれるものであり、他は $\delta D$ が $-10 \sim -15$ ‰で

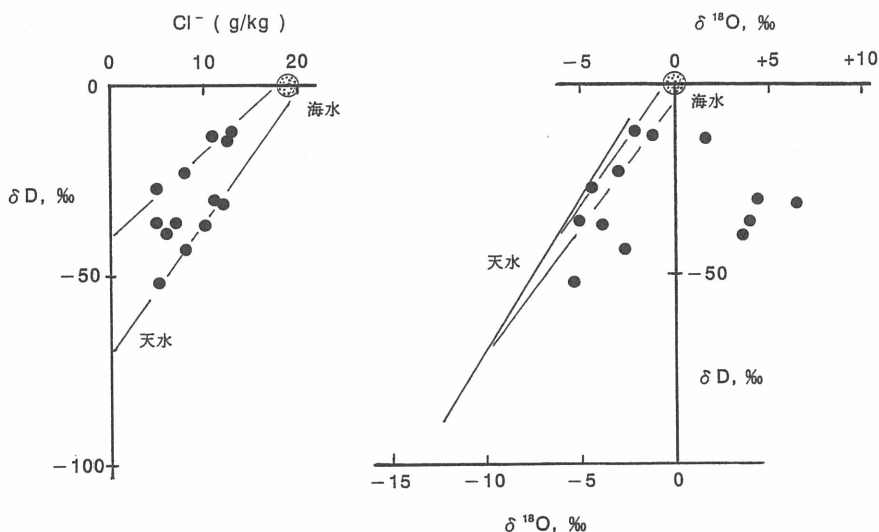


Fig.4 Relationships of  $\delta D$  and Cl- or  $\delta^{18}O$  on hot spring of sea water origin. Data; Ref. 1, 3 23, 24, 37 and 38.

ば一定であるにもかかわらず、Clが混合関係から低い方向に様々にずれるものである。

森岳温泉の場合は、群馬県の大戸の塩水<sup>39)</sup>と同様に海水起源のものとのCl濃度が12 g/kg程度の天水起源の塩水との混合の可能性が示唆される。森岳では、そのような天水起源の高塩濃度水は見つかっていないが、その成因は興味ある問題である。大戸の場合、成因はまだ明らかにされていないが、臭素/塩素比(Br/Cl)は $3.1 \times 10^{-3}$ であり海水の値( $3.4 \times 10^{-3}$ )と類似している。

したがって、エバポライトのような海水から晶出したNaClを溶出した可能性は考えにくい。天水が地層中の海塩を溶出するとき、水/岩石比が上記のグリーンタフ型の場合よりも数倍小さければこのような高塩濃度の水の生成も可能であるが、そのような状況が生じる要因は不明である。

2番目のClに関係なく $\delta D$ が一定なものは、Fig. 5に示したものは能代、金浦、切石および金照寺であり、これらは石油を伴うものであり、海水を起源とすることは確かである。したがって、Fig. 5に示すような $\delta D$ とClの関係は、海水と天水が混合後 $\delta D$ かClが何らかの要因で変化したものと考えられる。その場合、 $\delta D$ が保持されClが変化することは考えにくいので、Clが保持され $\delta D$ が変化したのではないかと推定される。 $\delta D$ を変化させる要因としては、まず初めに地層中での塩水と岩石の反応が考えられる。地層中に十分の量の含水鉱物が含まれており、その $\delta D$ が地域によらずほぼ一定であるとする、塩水と含水鉱物との水素同位体交換の結果塩水の $\delta D$ がほぼ一定になることが期待される。この考えは、アイスランド、レイキャビックの地熱水が海水を起源とし、Cl濃度が19 g/kgであるにもかかわらず、 $\delta D$ が $-22\%$ であること<sup>40)</sup>をも説明できるものである。

岩石との水素同位体交換に代わる可能性として、海水が地層中に取り込まれる前に $\delta D$ が変化することが考えられる。海水が残存湖となり、その水収支が海水や天水の流入と蒸発による散失により保たれる場合、湖水の同位体比は、現在火口湖など流出河川のない湖で見られるように、大気中の水蒸気との交換により、大気中の水蒸気同位体比を反映したある一定の値になる<sup>41,42)</sup>。その場合、湖水の同位体比が一定になるまでに要する時間は短く、恐らく数年以内であろう。 $\delta D$ の変化が起こる場合と起こらない場合の差は、海水が残存湖状態である期間存在する場合と海底堆積物中に間隙水として取り込まれる場合によるのではないかと考えられる。化石海水が地層中に取り込まれ現在まで貯留される機構は、興味深いものであり、今後の解明が期待される。

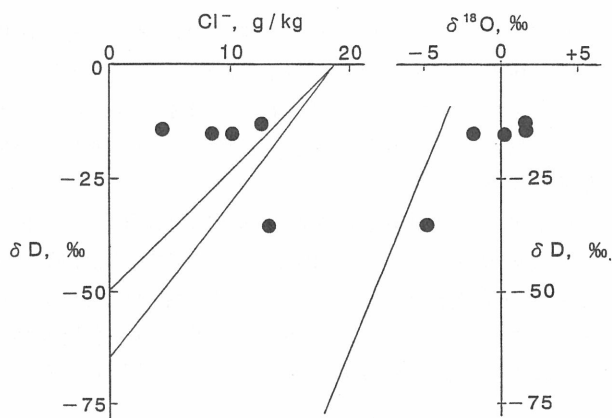


Fig.5 Relationships of  $\delta D$  and  $Cl^-$  or  $\delta^{18}O$  on hot springs of fossil sea water origin in Akita Prefecture, of which  $\delta D$  vs.  $Cl^-$  relations don't agree to the mixing relation of sea water and meteoric water.

## 引用文献

- 1) Matsubaya, O., Sakai, H., Kusachi, I., Satake, H.: *Geochem. J.*, **7**, 123-151, 1973.
- 2) 松葉谷治, 酒井均, 佐々木昭: *地調月報*, **26**, 1-11, 1975.
- 3) 松葉谷治, 酒井均, 上田晃, 堤真, 日下部実, 佐々木昭: *岡山大学温研報*, **47**, 55-67, 1978.

- 4) 松葉谷治, 酒井均, 日下部実, 佐々木昭: 岡山大学温研報, **50**, 17-24, 1980.
- 5) 松葉谷治, 越中浩, 小室昭一: 秋田大学鉱山学部地研報, **48**, 11-24, 1983.
- 6) 松葉谷治, 酒井幸子, 越中浩: 温泉科学, **36**, 1-11, 1985.
- 7) 水谷義彦, 浅井寛, 浜砂武聖: 火山第2集, **19**, 139-150, 1975.
- 8) Kiyosu, Y.: J. Volcanol. Geotherm. Res., **26**, 25-36, 1985.
- 9) Matsuo, S., Kusakabe, M., Niwano, M., Hirano, T., Oki, Y.: Geochem. J., **19**, 27-44, 1985.
- 10) 阿部修治, 酒井均: 温泉工学会誌, **18**, 37-50, 1983.
- 11) 北岡豪一, 由佐悠紀, 神山孝吉, 大沢信二, Stewart, M.K., 日下部実: 地下水学会誌, **35**, 287-305, 1993.
- 12) 松波武雄, 鈴木隆広: 北海道地下資源調査所報, **68**, 149-152, 1997.
- 13) 松葉谷治: 温泉科学, **31**, 47-56, 1981.
- 14) 松葉谷治: 月刊地球, 号外No.6, 154-158, 1996.
- 15) 日下部実, 松葉谷治: 火山第2集, **30**, S267-S283, 1986.
- 16) Giggenbach, W.F.: Earth, Planet. Sci. Lett., **113**, 495-510, 1992.
- 17) Matsuo, S., Suzuoki, T., Kusakabe, M., Wada, H., Suzuki, M.: Geochem. J., **8**, 165-173, 1975.
- 18) Mizutani, Y.: Geochem. J., **12**, 57-63, 1978.
- 19) Kazahaya, K., Takahashi, M., Ueda, A.: Geochem. J., **27**, 261-270, 1993.
- 20) Shinohara, H., Giggenbach, W.F., Kazahaya, K., Hedenquist, J.W.: Geochem. J., **27**, 271-285, 1993.
- 21) 北岡豪一, 大沢信二, 由佐悠紀, 日下部実: 温泉科学, **46**, 156-175, 1996.
- 22) Ohba, T., Nogami, K., Hirabayashi, J.: Bull. Volcanol. Soc. Japan, **42**, 1-15, 1997.
- 23) 松葉谷治, 北逸郎, 越中浩, 小室昭一: 秋田大学鉱山学部報, **2**, 101-106, 1981.
- 24) 松葉谷治, 北逸郎, 越中浩, 小室昭一: 秋田大学鉱山学部報, **3**, 85-90, 1982.
- 25) 松葉谷治, 内田秀明: 秋田大学資源地学研報, **55**, 1-8, 1990.
- 26) 阿部喜久男, 茂野博, 池田喜代治, 安藤直行, 後藤隼次: 地調月報, **30**, 177-197, 1979.
- 27) Shigeno, H., Abe, K.: Ab. 5th Intern. Conf. Geochronol. Cosmochronol. Isotope Geol., (Nikko), 344-345, 1982.
- 28) 高橋正明, 野田徹郎: 地調月報, **266**, 285-293, 1987.
- 29) Sakai, H., Matsubaya, O.: Econ.Geol., **69**, 974-991, 1974.
- 30) Ueda, A., Kubota, Y., Katoh, H., Hatakeyama, K., Matsubaya, O.: Geochem. J. **25**, 223-244, 1991.
- 31) 中東策, 岡田博: 資源地質, **42**, 223-240, 1992.
- 32) 松葉谷治, 竹中照雄, 吉田裕, 越中浩: 秋田大学鉱山学部地研報, **50**, 19-25, 1985b.
- 33) 清棲保弘: 地球化学, **20**, 59-68, 1986.
- 34) 柳谷茂夫, 笠井加一郎: 地熱, **33**, 1-18, 1996.
- 35) 松葉谷治, 福留高明: 秋田大学鉱山学部資源地学研報, **54**, 1-6, 1989.
- 36) Matsubaya, O.: Water-Rock Interaction, ed. by Y.K. Kharaka and O.V. Chudakov (Balkema), p 519-522, 1995.
- 37) Yoshida, Y.: Geochem. J., **25**, 203-222, 1991.
- 38) 柳谷茂夫, 梅津芳生: 温泉科学, **43**, 47-55, 1993.

- 39) 酒井幸子, 松葉谷治 : 地球化学, **23**, 45-52, 1989.
- 40) Kristmannsdottir, H. , Matsubaya, O. : Water-Rock Interaction, ed. by Y.K. Kharaka and O.V. Chudaev (Balkema), p 199-202, 1995.
- 41) Sakai, H. , Matsubaya, O. : Geothermics, **5**, 97-124, 1977.
- 42) Matsubaya, O. , Sakai, H. , Torii, T. , Burton, H. , Kerry, K. : Geochim. Cosmochim. Acta, **43**, 7-25, 1979.