

平成13年9月

原 著

モンゴル・バヤンホンゴル州の  
シャルガルジュート温泉について

<sup>1</sup>京都大学大学院理学研究科附属地球熱学研究施設, <sup>2</sup>西日本技術開発株式会社地熱部

由 佐 悠 紀<sup>1</sup>・田 籠 功 一<sup>2</sup>

(平成13年4月24日受付, 平成13年7月26日受理)

Thermal Springs in Shargaljuut,  
Bayankhongor Province, Mongolia

Yuki YUSA<sup>1</sup>, Koichi TAGOMORI<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Beppu Geothermal Research Laboratory, Graduate School of Science, Kyoto University

<sup>2</sup>Geothermal Department, West Japan Engineering Consultants Inc.

Abstract

The Shargaljuut Thermal Spring Area is located at the foot (about 2000 meters above the sea level) of the Hangayn Mountains in a distance of about 60 km to the North-East from Bayankhongor City, Mongolia.

Thermal waters are discharged through about 200 holes/fissures of granitic rocks covering an area of 350 × 170 meters at the north bank of Shargaljuut River. Water temperatures are in a range of 45 ~ 90 °C, and high temperature waters are accompanied by bubbles containing mainly nitrogen. Total outflows are 0.05m<sup>3</sup>/s for water and 18.5 MW for heat respectively. Thermal waters are alkaline and in low chemical concentration of Na-HCO<sub>3</sub>·SO<sub>4</sub> type. Stable isotope compositions of hydrogen and oxygen in thermal waters indicate that they are originated from meteoric water.

The Shargaljuut Hydrothermal System is interpreted as follows; the infiltrated meteoric water is heated up to about 170 °C by terrestrial heat flow at about 4000 meters depth and is given chemical substances by water-rock interaction under a limited CO<sub>2</sub> supply, and then uprises through narrow holes of 0.1 ~ 1 cm in radius.

Key words : Shargaljuut Thermal Spring, Mongolia, alkaline thermal water, stable isotope, hydrothermal system

キーワード : シャルガルジュート温泉, モンゴル, アルカリ性温泉水, 安定同位体, 温泉水系

## 1. はじめに

アジア大陸の中央に位置するモンゴル地域について、我々の自然科学的知識はあまりにも貧弱であった。地球科学的には、その地質が中・古生代の古い地層を基本とした安定地塊であり、したがって新しい火山活動は無く、地熱・温泉活動も乏しいであろうというのが、一般的な認識ではなかったかと思われる。しかし、これらのいくつかは、情報不足による誤解あるいは無知以外の何ものでもない。

1980年代終わりから1990年代初頭にかけて始まった世界的な政治・社会体制の激変に伴い、モンゴル地域に関して蓄積されていた、さまざまな地球科学的研究の成果に触れることが容易になった。また、国際協力などによる各種地下資源調査も推進されて、多岐にわたる地球科学的情報が飛躍的に増大してきた。

地熱・温泉活動について言えば、モンゴル中西部のハンガイ(Hangayn)山脈周辺や首都ウランバートル(Uraanbaatar)北東のヘンティ(Hentyn)山地地域などに温泉が湧出しており、それらを利用した保養・療養施設も設けられ、湯治場となっている所もある(岩田, 1999)。

2000年6月末、筆者らは、ハンガイ山脈南東麓のバヤンホンゴル(Bayankhongor)州・シャルガルジュート(Shargaljuut)の温泉地を訪れる機会を与えられ、温泉の観察と温泉水の採取・分析を行うことができた。本小論では、シャルガルジュート温泉を紹介するとともに、得られたデータに基づいて、当温泉に関する予察的な解釈を述べる。

## 2. 広域の地質的・地球物理的背景

モンゴル国の大部分を含む2000km×700kmの面積を持つモンゴル台地は、北のアンガラ楕状地(シベリア楕状地)と南の中朝地塊(北中国クラトン)に挟まれた中央アジア-モンゴル変動帯(アルタイ褶曲帯)に属する(Fig.1)。台地内には、いくつかのリフトや東西性の大きな横ずれ断層が発達している。また、ハンガイ山脈やヘンティ山地などの大きなドームが存在し(Fig.2)、先カンブリア時代から新生代にいたるまで、断続的に火成活動があった。したがってモンゴル台地には、長期にわ

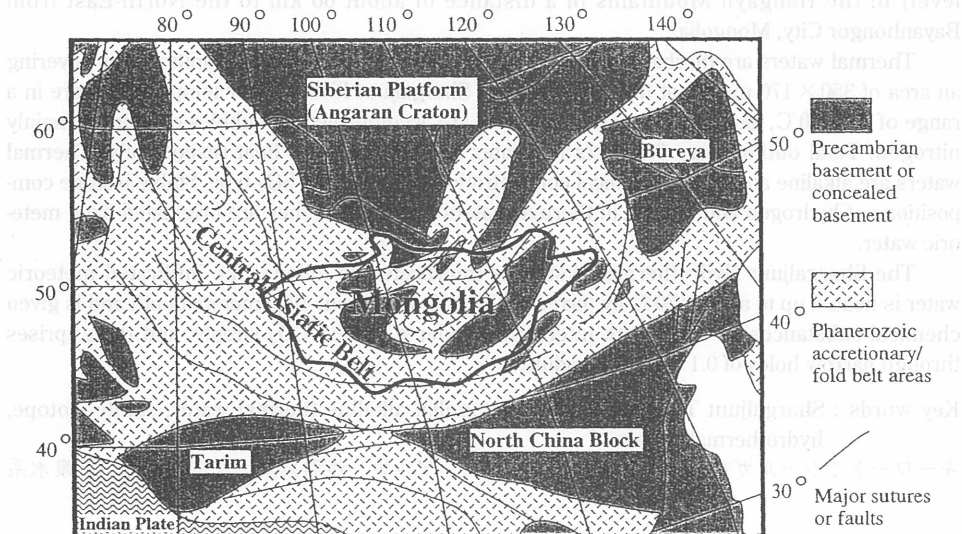


Fig. 1 Geologic setting of Mongolia and neighbouring (cited from Takahashi, 1999).



Fig. 2 Simplified topography of Mongolia (based on Kanisawa, 1999). Contour lines show elevation of 2000m above mean sea level. The rectangular area enclosed by broken lines corresponds to the area of Fig. 3.

たる地層が分布しており、地質構造は極めて複雑である。その概要は、高橋(1999)によってまとめられているので、それを参照していただくこととし、ここでは、シャルガルジュート温泉が位置する南ハンガイ地域における比較的新しい火成活動を、蟹澤(1999)の総説にしたがって、ごく簡単に紹介する。

モンゴル台地における新生代の火成活動は、つぎのようであった。

- 暁新世～始新世(62～47Ma)：ゴビアルタイ山脈とゴビ天山山脈の境界部におけるサブアルカリかんらん石玄武岩の活動。
- 始新世後期～漸新世初期(42～31Ma)：ゴビアルタイリフト帯東部におけるアルカリ玄武岩の活動。
- 漸新世後期(30～24Ma)：ゴビアルタイリフトに平行する地域におけるアルカリ玄武岩の活動。
- 中新世初期(20～16Ma)：一部の地域におけるアルカリ～サブアルカリ玄武岩の活動。
- 中新世中期(15～9Ma)：ハンガイ山脈中央部におけるサブアルカリかんらん石玄武岩の活動。
- 鮮新世(6～2.5Ma)：ハンガイ山脈北部におけるテフライトやサブアルカリかんらん石玄武岩の活動。
- 鮮新世～完新世(<2Ma)：ハンガイ山脈中央部・北部～北東部におけるアルカリ玄武岩を主とする活動。

蟹澤(1999)の総説には、以上の火山岩の分布が図示されているので参照されたい。これらの活動の原因については、インド・ユーラシア両プレートの衝突と、モンゴル台地地下における異常マンントルのダイアピル的な上昇、もしくはホットスポットの活動などとの相互作用の結果であるとの解釈がある。

他方、地球物理的調査によれば、この付近のマンントル、特にバイカルリフト [バイカル(Baykal)湖を中心とするリフト] の下部では地震波速度が非常に小さい。また、シベリア楯状地で200kmの厚さがあるリソスフェアは、バイカルリフト下部から西モンゴルにかけて急激に薄くなり、50km程度またはそれ以下になって、ハンガイ山脈でもっとも薄くなる。こうした構造もまた、異常マンントルのダイアピル的な上昇やホットスポットの存在と関連しているとの解釈がなされている。この構造の影響は地殻熱流量に現れ、ヘンティ山地で60～70mW/m<sup>2</sup>、ハンガイ山脈で70～90mW/m<sup>2</sup>、

フブスグルリフト [フブスグル(Hovsgol)湖を中心とするリフト] では $120\text{mW}/\text{m}^2$ に達する。これらのリフトは現在も活動しており、たとえばバイカルリフトでは、過去270年間にマグニチュード6.5以上の地震が13回も発生している(蟹澤, 1999)。

### 3. ハンガイ山脈南東麓の温泉分布

モンゴル国エネルギー地質鉱山省(MEGM)の地質鉱物資源研究所(IGMR)から、百万分の一のモンゴル水理地質図(1996:全14葉)が出版されている。今回の訪問で入手したハンガイ山脈南東部をカバーする2葉の図(東経96度~108度, 北緯44度~48度)に、21箇所の温泉(内2つは冷鉱泉)が記載されている。その内、東経100度~104度, 北緯46度~48度の範囲に分布する17の温泉をFig. 3に示す。原図に温泉地の名前は記されていないが、その位置からシャルガルジュート温泉が特定されるので、特に記した。図中に描かれている曲線は、標高2400mの等高線である。温泉は、概ねこれより低い所、すなわち山麓部に湧出している。

各温泉に付した数字は湧出温度( $^{\circ}\text{C}$ )であるが、それぞれの温泉地で測定された最高温度であろうと思われる。温度の範囲は $23^{\circ}\text{C}$ から $92^{\circ}\text{C}$ と、さまざまである。また、記載されている溶存物質総量は $0.2\sim 0.4\text{g}/\text{l}$ の範囲にあり(ただし、後に記すシャルガルジュート温泉の例から見て、ケイ酸を除いた量のようなものである)、低濃度のいわゆる単純温泉に当たる。なお、Fig. 3の範囲外(北東方向)にある冷鉱泉の溶存物質総量は $1.6\sim 3.8\text{g}/\text{l}$ と、かなり高濃度である。いくつかの温泉では、付随するガスとして硫化水素やラドンが挙げられている。

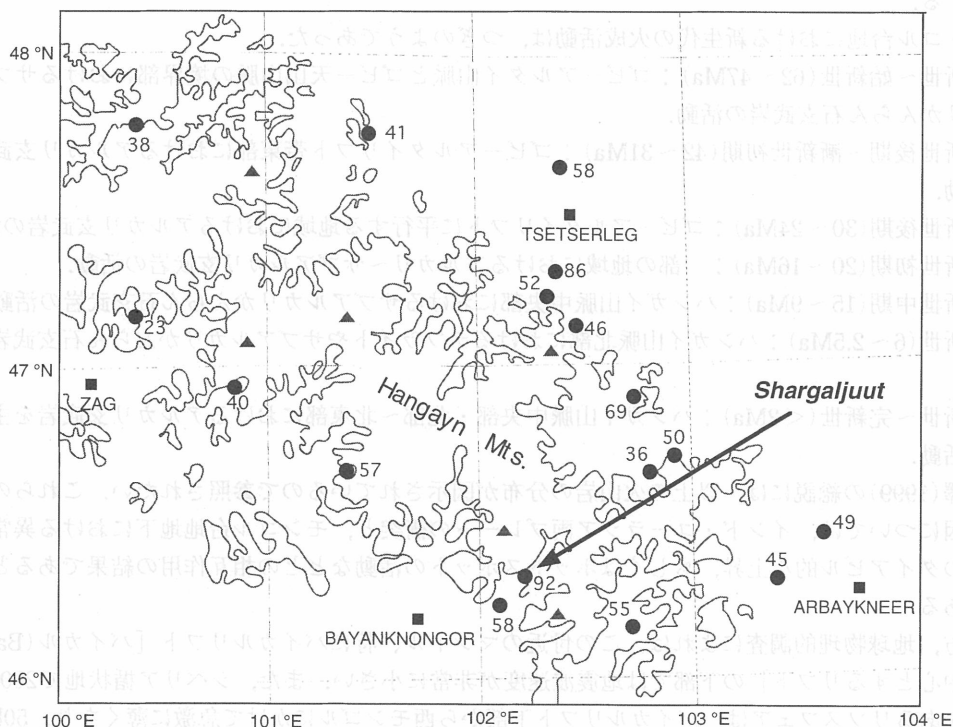


Fig. 3 Location map of thermal springs (●) around Hangayn Mountains. Numerals show discharging temperatures ( $^{\circ}\text{C}$ ). Contour lines show elevation of 2400 m above mean sea level.

#### 4. シャルガルジュート温泉の概要

ここでは、現地で収集した1990年発行の文献(Dorjsuren et al., 1990)および見聞をもとに、シャルガルジュート温泉の概要を紹介する。

シャルガルジュートは、バヤンホンゴル州の州都から約60km北東の海拔約2000 mの丘陵地帯に位置する(Fig.3)。一帯の気候条件は乾燥・冷涼である。冬季にはほとんど降水が無く、6月から8月にかけて数10mm/monthの降水がある。欠測期間があるため精度は低い。1977年から1985年における年平均降水量は、大目に見積もっても120mm程度である。他方、年平均気温は約0℃、夏季には20℃を越すが、冬季には氷点下20℃以下となり、氷点下40℃を下回ることも珍しくない。

シャルガルジュート域は、2本の構造線の会合部に当たる。温泉は、丘陵地帯を貫いて概ね北東から南西方向に流れるシャルガルジュート川右岸のなだらかな斜面に、およそ350 m×170 m(～0.06 km<sup>2</sup>)の範囲にわたって、花崗岩質の岩体の割れ目から湧出しており、高温のものはガス泡を伴っている。また、湧出孔付近の岩石には白色沈殿物の付着が見られる。

現地宿泊所の責任者によれば、旧ソ連との共同調査が4回実施されたとのことであるが、文献(Dorjsuren et al., 1990)は、1972年と1981年の調査に基づいて書かれている。それによれば、約200カ所から45～90℃の温泉が湧出しており、その付図には148箇所の温度測定点が記されている。その内、湧出量が比較的大きい26箇所の湧出孔の位置をFig. 4に示した。1981年の調査によれば、全湧出量は50～54l/s(4320～4670m<sup>3</sup>/day)、平均泉温は81.2℃、また、周辺温度を基準とした流出熱量は4400kcal/s(18.5MW)である。

現地での観察では、温泉水は無味・無臭でヌメリが感じられた。文献(Dorjsuren et al, 1990)によれば、pHは8.5～8.75(今回の測定では9.35～9.50)、Na-HCO<sub>3</sub>・SO<sub>4</sub>型、イオン総量は概ね0.25 g/l、ケイ酸濃度は0.15～0.24g/l、そのほかFが含有されている。しかし、独特の表示法のため、各イオンの濃度は判然としない。

文献(Dorjsuren et al, 1990)によれば、温泉水に付随する遊離ガスの主成分は窒素である(優勢な源泉で60～95.6%)。次に多いのは硫化水素であるが(0.5～6.9%；高温のものでは15～25%)、今回の調査では硫化水素臭は感じられなかった。その他に水素が検出されている。また、極く微量のアルゴンやメタンが検出され、ヘリウムが検出された源泉もある。温泉付随ガスに一般的な二酸化炭素については記述されていない。窒素を主成分とすることから、付随ガスの大部分は大気起源と思われる。

この温泉は、あらゆる病気に効能があると信じられており、モンゴル全国からの人々が長期滞在して、温泉医の指示に従って療養している。Fig.4の温泉湧出域内には、温泉療養の施設として、モンゴル伝統のテント(ゲル)があちこちに設けられている。また、対岸には鍼灸・マッサージなどの医療施設、滞在者のための宿泊施設、社交場を兼ねた集会場などがある。

このほか、最近、日本の技術指導によって、温室の熱源としての利用が始まり、キュウリ・トマト・キャベツなどの栽培が試みられている。

#### 5. 試料の採取と分析法

##### 【試料採取】

シャルガルジュート温泉の湧出状況を視察した後、湧出帯をできるだけ広くカバーするように、湧出口が明瞭な5カ所、および斜面の表流水1カ所で、熱電対型デジタル温度計を用いて温度を測定し、採水した。それらの位置は、採取した順に番号を付してFig.4に示されている。それらの内、

No.3は湧出帯の地面を流れている表流水である。なお、参考試料として、バヤンホンゴル市とウランバートル市の水道水(地下水)を採取した(No.7およびNo.8)。また、NO.2とNO.6では、白色沈殿物を採取した。

### 【分析法】

持ち帰った試料は、それぞれ以下の方法で分析した。

○pH：ガラス電極。

○Na, K, Ca, Mg, Cl, SO<sub>4</sub>：イオンクロマトグラフィー。

○HCO<sub>3</sub>, CO<sub>3</sub>：pH滴定によるアルカリ度(終点はpH4.3)を両イオンによるものとし、試水のpH値と炭酸の第二解離定数K<sub>2</sub>(=

$7.7 \times 10^{-11}$ )を用いて分離・算出した。

○SiO<sub>2</sub>：モリブデンイエロー比色法(分析は、No. 1, 3, 7の3試料のみ)。

○水素・酸素の安定同位体比( $\delta D$ ,  $\delta^{18}O$ )の分析は、Stable Isotope Laboratory, IGNS(Lower Hutt, New Zealand)に依頼して行った。

○沈殿物：粉末X線回折分析計(理学MiniFlex)による鉱物同定。

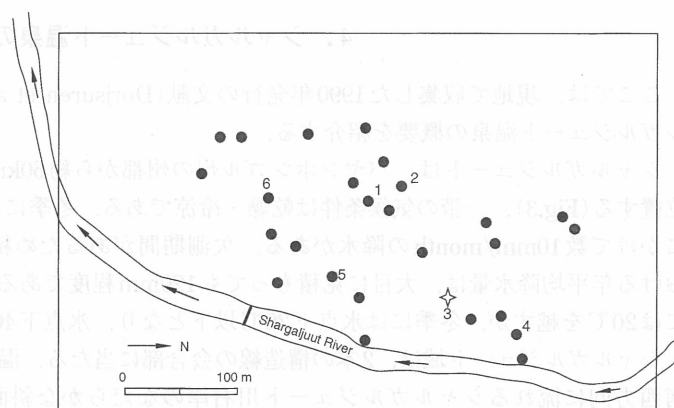


Fig. 4 Main spouts of thermal water and sampling points. Point 3 is running water on the ground surface, and others are thermal springs. Numerals correspond to numbers in Table 1.

## 6. 分析結果

### 【試水】

試水の分析結果をTable 1に掲げる。安定同位体比は、通例に従って、標準海水(SMOW)からの千分率偏差( $\delta$ :‰)で表示した。すなわち、

$$\delta D \text{ または } \delta^{18}O = (R_x/R_s - 1) \times 1000$$

ここに、 $R_x$ および $R_s$ は、それぞれ試料Xと標準海水Sの同位体比(D/H又は $^{18}O/^{16}O$ )である。

この温泉水の特徴の一つは、pH値が9.5程度と高いことである。したがって、かなりの量のケイ酸は解離しているものと思われる。試料No.1とNo.3の分析値が溶解性の全ケイ酸であるとすれば、その50%程度(約0.7 mequ/l)はイオン状態であろう(たとえば、半谷, 1960)。Table 1に掲げられた主要成分(Na, K, Ca, MgおよびCl, SO<sub>4</sub>, HCO<sub>3</sub> + CO<sub>3</sub>)における陰イオン当量値の不足は、主にケイ酸イオンによって補われるものと考えられる。

以上の成分の他に、温泉水についてはF、水道水についてはNO<sub>3</sub>の存在が検出された。Fについては定量していないが、イオンクロマトグラフィーのピークから見て数mg/l程度含まれているようである。NO<sub>3</sub>は、試料No.7(バヤンホンゴル水道水)で40mg/lを超える高い値であった。これらも陰イオンの不足分に相当する。

### 【沈殿物】

採取点6において採取された白色沈殿物の粉末X線回折分析(鉄管球を使用)の結果をFig.5に示す。

Table 1 Chemical and stable isotopic compositions of thermal waters in Shargaljuut Hydrothermal System, Mongolia: concentrations are in mg/l

No.	WT (°C)	pH	Na <sup>+</sup>	K <sup>+</sup>	Ca <sup>2+</sup>	Mg <sup>2+</sup>	Cl <sup>-</sup>	SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>
1	88.7	9.36	80.6	3.6	3.6	nd	7.6	56.2	78
2	85.5	9.44	89.5	3.4	3.7	nd	8.1	55.8	74
3	17.5	9.35	99.7	4.3	3.7	nd	7.5	62.6	83
4	87.9	9.50	90.0	3.8	3.8	nd	8.3	56.6	71
5	69.7	9.50	89.0	3.5	3.6	nd	7.2	56.7	70
6	83.1	9.51	87.6	3.7	3.7	nd	8.3	55.8	70
7	nm	6.93	13.7	2.1	53.0	13.7	21.0	25.8	119
8	nm	6.72	3.1	1.6	11.0	3.1	1.2	5.6	44

No.	CO <sub>3</sub> <sup>2-</sup>	NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	SiO <sub>2</sub>	δD (‰)	δ <sup>18</sup> O (‰)	Remarks
1	13	0.7	75.3	-97.1	-13.44	bubbling always
2	15	nd	na	-98.7	-13.40	
3	14	nd	83.3	-92.0	-11.84	flowing on surface
4	17	0.6	na	-98.5	-13.38	bubbling always
5	17	nd	na	-99.8	-13.34	
6	17	nd	na	-98.5	-13.48	bubbling sometimes
7	0	43.6	11.8	-86.0	-11.86	pipe water: Bayankhongor
8	0	2.0	na	-105.9	-14.26	pipe water: Uraanbaatar

Sampling dates No. 1~No. 7: June 28, 2000; No. 8: June 29, 2000

nm: not measured, nd: not detected, na: not analyzed

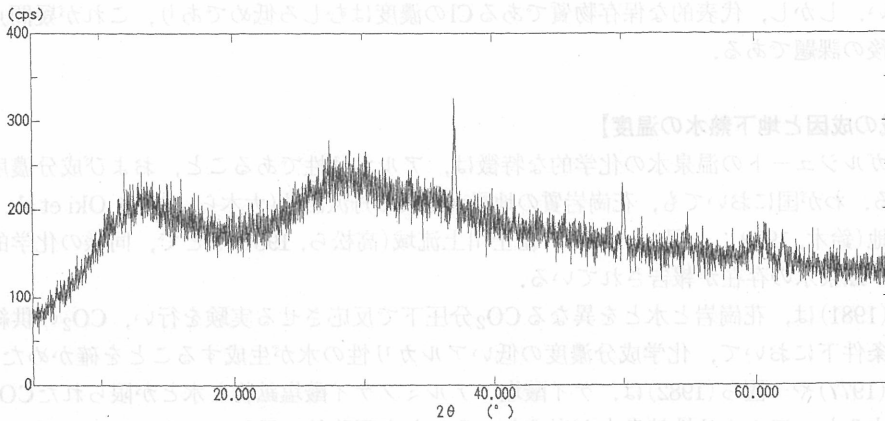


Fig. 5 X-ray diffraction pattern of white material deposited at No.6 sampling point, showing amorphous silica. Spikes indicate calcite. (Target: Fe)

全体にバックグラウンドが高く、非晶質のシリカを主成分としているようである。ピークは方解石に対応する。実際、希塩酸によってわずかに発泡した。採取点2における沈殿物も、同様の回折パターンを示した。

## 7. 考 察

### 【安定同位体比から見た温泉水の起源】

【糸木卓郎】

Table 1に掲げた温泉水の水素と酸素の安定同位体比は、ごくわずかな差異はあるもののほとんど同じ値を示しており、同一起源の水と思われる。この地域の天水である試料No.7とNo.8も含めて、

両同位体比の関係を、通例の方法に従ってFig. 6に図示する。表流水であるNo.3を除けば、両同位体比の間には天水線( $\delta^{18}\text{O} = 8 \cdot \delta\text{D} + d$ )に近い直線関係があり、温泉水は天水起源と考えられる。

Table 1に見られるように、試料No. 3の化学成分は濃度も組成も温泉水のそれとほとんど同じであるが、同位体比は温泉水の値より大きい。温泉水の値と比較すると、傾きがおよそ3の直線の方向(Fig.6の矢印)にある。このような関係は、火山地域に分布する酸性温泉水によく見られるものであり、蒸発に伴う動的同位体効果によるものと説明されている(大沢ら, 1995; 酒井・松久, 1996)。この水は湧出した温泉水が地表面を流動しているものであるから、蒸発の効果によって同位体比が変化したものと考えることができよう。そうとすれば、化学成分濃度は温泉水のそれより大きくなっているはずである。確かに、多くの成分濃度は大きく、この推察と矛盾しない。しかし、代表的な保存物質であるClの濃度はむしろ低めであり、これが疑問点として残る。今後の課題である。

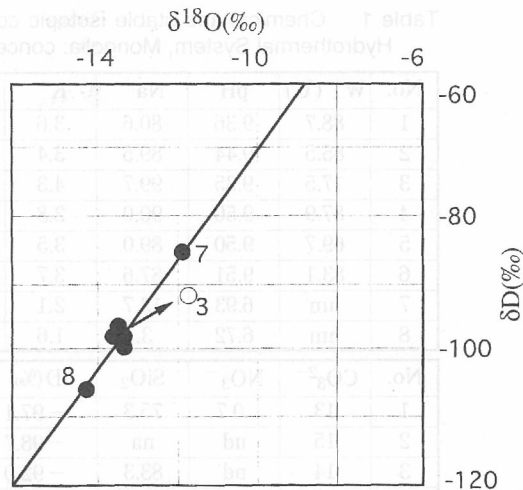


Fig. 6 Relationship between stable isotopic compositions of hydrogen ( $\delta\text{D}$ ) and oxygen ( $\delta^{18}\text{O}$ ) in water samples. Numerals correspond to numbers in Table 1. The straight line ( $\delta^{18}\text{O} = 8.16 \cdot \delta\text{D} + 10.9$ ) is regressed by data excepting No.3.

### 【化学組成の成因と地下熱水の温度】

シャルガルジュートの温泉水の化学的な特徴は、アルカリ性であること、および成分濃度が低いことである。わが国においても、花崗岩質の地層から成る丹沢山地(大木ら, 1964; Oki et al., 1977), 阿武隈山地(鈴木, 1979; 一國ら, 1982), 富士川上流域(高松ら, 1981)などで、同様の化学的性質を示す温泉・鉱泉水の存在が報告されている。

高松ら(1981)は、花崗岩と水とを異なる $\text{CO}_2$ 分圧下で反応させる実験を行い、 $\text{CO}_2$ の供給がほとんどない条件下において、化学成分濃度の低いアルカリ性の水が生成することを確かめた。また、Oki et al.(1977)や一國ら(1982)は、ケイ酸塩・アルミノケイ酸塩鉱物と水とが限られた $\text{CO}_2$ 供給の下で反応すると、アルカリ性鉱泉水が生成されることを理論的に示している。シャルガルジュート温泉水も、付随ガスが大気起源であるらしいことからみて、同様の機構によって、その化学的特性が与えられたものと推定される。

地表に湧出した温泉水は、その化学組成からみて、明らかに方解石に対して過飽和の状態にあり、湧出口にわずかに認められる方解石は温泉水から沈殿したことは明らかである。地下ではおそらく方解石の飽和溶液となっており、また岩石と化学的平衡にあるものと思われる(一國ら, 1982)。そうした化学平衡を仮定し、Na-K化学温度計(高橋, 1991)を適用すれば、熱水の地下における平衡温度は、最高で約 $170^\circ\text{C}$ と求められる。

### 【温泉水系】

シャルガルジュート温泉水は、その水素・酸素安定同位体組成および化学組成などから判断して、浸透した雨水が主に地殻熱流によって加熱されたものと考えられる。この温泉が位置するハンガイ



山脈一帯の地殻熱流量は70~90mW/m<sup>2</sup>とされているので(蟹澤, 1999), その中間値80mW/m<sup>2</sup>を用い, 岩石の熱伝導率を2 W/m/Kとすれば, 地温勾配は40℃/km程度となる. 地表面温度を年平均気温(0℃)とすれば, 先に見積もった平衡温度(170℃)となる深度は, およそ4kmである. この深さが, 熱水の存在するおおよその深さと見なされる.

先に述べたように, 流出温泉水量はおよそ0.05m<sup>3</sup>/s, この温泉水に伴って流出する熱量は18.5 MWである. 地殻熱流はざっと80W/m<sup>2</sup>であるから, この流出熱量を定常的にまかなうには, 少なくとも300km<sup>2</sup>の面積を必要とする. 他方, 水収支的には, 年降水量は120mm程度であるから, 前記の流出水量はおよそ13km<sup>2</sup>の降水量に当たる. 降水が温泉水に転換する割合は, たとえば優勢な地熱地域である別府温泉においてさえ, 流出温泉水量は流域降水量の16%程度であることからみて(由佐, 1999), シャルガルジュート温泉ではもっと小さいであろう. 仮に集熱面積の最小値(300 km<sup>2</sup>)を採用すれば, 転換の割合は4%程度であり, 他方, この温泉がシャルガルジュート川の右岸にあることから, これに関わる集水面積を流域面積(1200km<sup>2</sup>)の半分とすれば, 転換の割合は2%程度である. 以上の所論をまとめると, 300~600km<sup>2</sup>程度の面積から浸透した雨水の一部が深くまで循環し, 地殻熱流で加熱されて, 面積約0.06km<sup>2</sup>の狭い範囲(シャルガルジュート温泉域)に上昇・湧出しているということになる.

#### 【湧出通路のサイズ】

地下約4000mの深さまで達した浸透水が, 地下に十分に長く滞留して, 170℃まで昇温しても, それが地表まで上昇する道程で伝導による冷却を受ける. 現在の湧出温度はこの冷却の結果とみなされるが, 90℃に達する高温で湧出するには, 冷却の限度, 言い換えれば上昇通路のサイズの大きさに束縛条件があるはずである. なぜなら, 上昇流量が一定の場合, サイズが大きいほど(すなわち, 冷却面が大きい)流速が小さく, 途中での冷却が大きいため, 湧出温度は低くなるからである. その束縛条件の目安を, 瀬野(1941)の近似法によって求めてみる.

取扱いを簡単にするため, 温泉水が上昇する通路は断面が円形(半径R)の垂直管とし, 上昇する温泉水は管壁を通してのみニュートン冷却的に冷却されるとすれば, 湧出温度(T<sub>S</sub>)は次の(1)式で表される. ただし, 各深度における冷却は, 温泉水の温度とその影響が無い十分離れた場所の地温との差に比例するものと仮定する.

$$\begin{aligned} (T_S - \theta_a) / (T_D - \theta_a) &= (1/\gamma D) \cdot (1 - \exp[-\gamma D]) \\ \gamma &= (2\pi R/Q) \cdot (\eta/\rho c) \end{aligned} \quad (1)$$

ここに,  $\theta_a$ は地表面温度(ここでは年平均気温とする),  $T_D$ は深さDにある熱水の温度, Qは湧出量,  $\eta$ は冷却の係数,  $\rho$ と $c$ はそれぞれ温泉水の密度および比熱である. なお(1)式は, 湯原・瀬野(1969)の著書の式を整理し, 書き換えたものである.

上の式に現れる定数のほとんどは, これまでに述べた実測値や推定値あるいは文献から与えられ

Table 2 Data used for calculations by the equation (1)

$\theta_a$ (°C)	0	temperature at ground surface (mean air temperature)	Dorjsuren et.al (1990)
$T_D$ (°C)	170	temperature of deep thermal water at depth D	this study
D (m)	4000	depth where exists deep thermal water	this study
Q (m <sup>3</sup> /s)	0.05	total thermal water outflow	Dorjsuren et.al (1990)
$\eta$ (cal/m <sup>2</sup> /s/K)	1.7~17	coefficient of cooling	Kitaoka et.al (2000)
$\rho c$ (Mcal/m <sup>3</sup> /K)	1.0	heat capacity of water	text book

るので(Table 2), 束縛条件である上昇管の径(サイズ)を検討することができる. Table 3には, Dorjsuren et al. (1990)による最高温度・平均温度・最低温度をもたらし束縛条件を, パラメータ $\gamma D$ に対応させて示した. 平均温度(81.2℃)となるのは,  $\gamma D \sim 1.7$ のときであり,  $D \sim 4000$  mの場合は $R\eta/Q \sim 68$ である. これまでに推定されている冷却の係数 $\eta$  (0.1 ~ 1.0 kcal/m<sup>2</sup>/min/K : 1.7 ~ 17 cal/m<sup>2</sup>/s/K ; 北岡ら, 2000)を用いると,  $R/Q$ は4 ~ 40 s/m<sup>2</sup>となる. もし, この温泉の全湧出量 ( $Q \sim 0.05$  m<sup>3</sup>/s)が単一の管から湧出するならば,  $R$ は0.2 ~ 2 mとなる. もちろん, このように太い管が現実存在するわけではないが, この $R$ は多くの細孔の半径の合計とみなしてもよい.

Dorjsuren et al. (1990)によれば湧出孔はおよそ200箇所あるので, 1孔当たりの平均湧出量( $q$ )は250 cm<sup>3</sup>/sである. この近似法での束縛条件は各細孔にも適用でき, 上の $R/Q$ 値は各細孔での $r/q$ 値 ( $r$ は半径)でもあるから,  $r$ は0.1 ~ 1 cmとなる. これが細孔のサイズの目安である. 半径 $r = 0.5$  cmの場合( $r/q = 20$  s/m<sup>2</sup>,  $\eta = 3.4$  cal/m<sup>2</sup>/s/Kの場合に当たる),  $q \sim 295$  cm<sup>3</sup>/sのとき湧出温度は90℃,  $q \sim 115$  cm<sup>3</sup>/sのとき45℃となる(Table 4). また, 湧出口での流速 $v$  ( $= q/\pi r^2$ )と静止水頭 $h$  ( $= v^2/2g$ ;  $g$ は重力加速度)も算出される. Table 4には, それらも掲げた. 湧出の勢いの観察から, 推定された静止水頭(数10 cm)は, それほど不合理ではないと思われる.

Table 4 Examples of outflow ( $q$ ), temperature ( $T_s$ ), velocity ( $v$ ) and static head ( $h$ ) for a small hole of radius ( $r=0.5$  cm), when  $h=3.4$  cal/m<sup>2</sup>/s/K. Values are rounded.

$q$ (cm <sup>3</sup> /s)	$T_s$ (°C)	$v=q/\pi r^2$ (cm/s)	$h=v^2/2g$ (cm)
295	90	370	70
250	80	300	45
115	45	145	10

## 8. おわりに

モンゴル地域には温泉・鉱泉が点在し, 保養や療養に利用されている. 中にはシャルガルジュート温泉のように90℃にも達する湧出温度を示すものもあり, また, この地域が異常マンツルのダイアピルの上昇もしくはホットスポットの活動に起因する活発な造構運動の場であることから, 島弧の火山地域ほどではないにしても, 同地域の地熱エネルギーポテンシャルはかなり高いものと推察される. しかし, その実態はほとんど明らかにされておらず, 地球科学的観点はもとより温泉や地熱エネルギー利用の観点からも, 今後, 本格的な調査研究が展開されることを期待したい.

本論では, 数少ないデータをもとに, シャルガルジュート温泉の生成機構を推定したが, あくまで予察的なものである. 当温泉は, モンゴル地域の温泉を理解する上でモデルとなり得るのではないかとと思われる. その意味でも, 地下構造調査を含む多岐にわたる詳細な調査が望まれる.

## 謝 辞

今回のモンゴル訪問は, 大分モンゴル親善協会の事業の一環として行われた. 筆者らの参加を認めていただき, 旅行に関わる全てを調べていただいたことに対し, 同協会並びにバヤンホンゴル州当局に深く感謝の意を表します. 大沢信二博士(京都大学地球熱学研究施設)には, アルカリ性温泉

Table 3 Examples of relationship between  $\gamma D$  and  $(T_s - \theta_a) / (T_D - \theta_a)$ , and resulting  $T_s$  when  $\theta_a = 0^\circ\text{C}$  and  $T_D = 170^\circ\text{C}$

$\gamma D$	$(T_s - \theta_a) / (T_D - \theta_a)$	$T_s$ (°C)
1.45	0.5279	89.7
1.70	0.4808	81.7
3.70	0.2636	44.8

水の成因についてご示唆をいただいた。大上和敏博士(大分大学工学部)・山田誠氏(京都大学理学研究科大学院生)・B. Vaglarov氏(京都大学地球熱学研究施設)には、試水の化学分析を行っていただいた。Tsegmed Baartarkhuu氏には、モンゴル語の文献を英訳していただいた。記して、以上の方々に深謝いたします。

### 参考文献

- Dorjsuren, P., Oyuun, T., Purevsuren, P. and Hisarskii, B. I. (1990) : Shargaljuut Hot Spring Area, The Holiday and Health Resort Sector of the Scientific Research and Training Center of the Central Committee of Mongolian Trade Union, 30p. (in Mongolian ; translated in English by Baatarkhuu, T.)
- 半谷高久(1960) : 水質調査法, 丸善, 399p.
- 一國雅巳, 鈴木勸子, 鶴見 実(1982) : 水—岩石相互作用の生成物としてのアルカリ性鉱泉水, 地球化学, **16**, 25-29.
- Institute of Geology and Mineral Resources, Ministry of Energy, Geology and Mining (1996) : Hydrogeological Map of Mongolia.
- 岩田昭夫(1999) : モンゴルの温泉, 物理探査, **52**, 174-177.
- 蟹澤聰史(1999) : モンゴルの火成活動, 地質ニュース, **534**, 31-40.
- 北岡豪一, 岸本和也, 金子博之(2000) : 岡山県における温泉の湧出温度と水質の特徴, 日本陸水学会第65回大会講演要旨集, 173.
- 大木靖衛, 田嶋綾子, 平野富雄, 荻野喜作, 広田茂, 高橋惣一, 小椋藤幸, 守矢正則, 杉本光夫(1964) : 丹沢山地の温泉鉱泉, 神奈川県温泉研究所報告, **2**, 19-38.
- Oki, Y., Suzuki, T. and Hirano, T. (1977) : High pH groundwaters of the Tanzawa mountains, Japan, Proc. Second Int. Symp. on Water-Rock Interaction at Strasbourg, Vol. 1, 1-14.
- 大沢信二, 由佐悠紀, 王 雲飛(1995) : 中国雲南省騰冲火山区における熱水系の地球化学モデル, 温泉科学, **45**, 13-25.
- 酒井 均, 松久幸敬(1996) : 安定同位体地球化学, 東京大学出版会, 403p.
- 鈴木勸子(1979) : アルカリ性鉱泉中のフッ素, 地球化学, **13**, 25-31.
- 瀬野錦蔵(1941) : 温泉湧出導管中に於ける温度垂直分布の近似解, 地球物理, **5**, 187-191.
- 高橋正明(1991) : 地化学温度計の現在, 地熱, **28**, 79-94.
- 高橋裕平(1999) : モンゴルの地質と調査研究活動, 地質調査所月報, **50**, 279-289.
- 高松信樹, 下平京子, 今橋正征, 吉岡龍馬(1981) : 花崗岩地帯湧水の化学組成に関する一考察, 地球化学, **15**, 69-76.
- 湯原浩三, 瀬野錦蔵(1969) : 温泉学, 地人書館, 293p.
- 由佐悠紀(1999) : 地熱開発の水文学的側面, 地熱エネルギー, **24**, 224-231.