

草津温泉西の河原の浅部伏流水の水質形成

木川田喜一^{1)*}, 小林晃久¹⁾, 斉藤 巧¹⁾, 深井 恵²⁾

(平成 26 年 7 月 17 日受付, 平成 26 年 8 月 27 日受理)

Water Chemistry of Shallow Groundwater Flow Beneath the Sainokawara Park in the Kusatsu Hot Spring Area

Yoshikazu KIKAWADA^{1)*}, Akihisa KOBAYASHI¹⁾, Takumi SAITO¹⁾
and Megumi FUKAI²⁾

Abstract

The chemistries of spring and hot spring waters in the Sainokawara Park located on western end of the Kusatsu Spa resort, Gunma, Japan were investigated. The springs and hot springs in the Sainokawara Park (the Sainokawara springs) are probably made by mixing of the water originated from newly issued Bandaiko hot spring into the main underflow of the hot springs in Kusatsu area at shallow underground in the Sainokawara Park, since the water chemistries of the Sainokawara springs are intermediate between those of Bandaiko hot spring and Kusatsu-Yubatake hot spring, the historic main hot spring of the Kusatsu Spa resort. The mixture ratio of the main underflow water beneath the Sainokawara Park and the Bandaiko water was roughly estimated as 9 : 1 to 6 : 4 based on those water chemistries. This can be interpreted that the shallow underflow made from meteoric water and surplus Bandaiko water discharging into ground surface on the upper reaches of the Sainokawara Park infiltrate into the main underflow of the Kusatsu hot springs passing under the Sainokawara Park.

Key words : Kusatsu-Shirane volcano, Kusatsu hot springs, underflow, water chemistry formation

要 旨

群馬県草津温泉の温泉街西側に位置する西の河原公園に湧出する源泉および湧水の化学組成を、草津温泉の二つの主要源泉、草津湯畑源泉と万代鉱源泉と比較した。その結果、西の河原地区に湧出する源泉・湧水は、草津湯畑源泉と万代鉱源泉との中間的組成を有し、西の河原地区において旧来の温泉街の源泉を代表する草津湯畑系統の源泉水に新しく湧出を見た万代

¹⁾上智大学理工学部 〒102-8554 東京都千代田区紀尾井町 7-1. ¹⁾Faculty of Science and Technology, Sophia University, 7-1 Kioicho, Chiyoda-ku, Tokyo 102-8554, Japan. *Corresponding author : E-mail y-kikawa@sophia.ac.jp, TEL : 03-3238-3448, FAX : 03-3238-3361.

²⁾上智大学大学院理工学研究科 〒102-8554 東京都千代田区紀尾井町 7-1. ²⁾Graduate School of Science and Technology, Sophia University, 7-1 Kioicho, Chiyoda-ku, Tokyo 102-8554, Japan.

鈹源泉の源泉水が混入していると考えられた。両者の混合割合は9:1から6:4の間と見積られる。この混入は、西の河原の底部に発達した旧来の温泉伏流に、地表へ放出された余剰の万代鈹源泉水が天水と合わさって地表近傍に形成された浅部伏流水が混入することで生じていると解釈された。

キーワード：草津白根山, 草津温泉, 伏流水, 水質形成

1. はじめに

群馬県北西部の草津白根山東麓に位置する草津温泉は、古くから知られた日本を代表する温泉地のひとつである。その発見の歴史には諸説あり、実際の開湯がいつであったかは定かではないが、遅くとも室町時代末期にはすでに広く知られていたものと思われる(中沢, 1997)。群馬県草津町の中心部に位置する草津温泉の温泉街は、豊富な湧出量を誇り、観光名所としても知られる草津湯畑源泉を中心に広がっている。また、温泉街には湯畑源泉のほか、白旗の湯や地蔵の湯などの比較的湧出量の豊富な源泉に加え、さらに小規模の源泉をいくつか見ることができる。このような温泉街とその周辺に湧出する源泉の多くは、温泉街を西から東へと流れる湯川沿いに湧出している。温泉街を西方に外れた湯川の上流域には、酸性変質を受けた河原に源泉が点在する「西の河原公園」があり、湯畑源泉と同様に多くの観光客で賑わっている。一方、温泉街中心から西方約1.5kmの山中には、草津温泉内で最大の湧出量を有する万代鈹源泉がある。万代鈹源泉は、硫黄鈹山掘削中の1970年に坑道内から突如湧出を始めた、草津温泉の中では新しい源泉である(太田・松野, 1970)。小坂ら(1998)は、新たに湧出を始めた万代鈹源泉が地下を浸透することで、草津温泉の温泉街に位置する旧来の源泉の水質に影響を与えていることを指摘している。そこで本研究では、温泉街の西方に位置し、温泉街中心部よりも距離的に万代鈹に近い西の河原公園の源泉・湧水の水質分布を基に、万代鈹源泉の地下浸透の様子を捉えることを目指した。

2. 草津温泉の源泉群

2.1 草津温泉の地質的背景

草津白根山東麓の源泉は、青葉溶岩、殺生溶岩に覆い隠された下部の太子火砕流中を流下する伏流水が、火山噴気地帯を通過する際に地下において火山ガスの温度と酸性成分を与えられて温泉伏流水を成し、これが低温低濃度の伏流水と種々の割合で混合して湧出するとされる(宇都ら, 1983)。従来、これら東麓の源泉は、山頂に比較的近い位置に湧出する高濃度の香草源泉から、山頂から約6kmほど離れた草津温泉の温泉街に湧出する源泉に至るまで、それぞれ濃度は異なるものの、その組成割合は相互に近い値を示すことが知られていた。特に、殺生河原地熱噴気地帯近くから草津温泉街まで伸びる草津断層沿いに位置する(太田・松野, 1970; 長谷, 1971)、草津湯畑源泉に代表される温泉街の源泉と、西の河原などの周辺に湧出する源泉は濃度的にもきわめて近いものであった(宇都ら, 1983)。しかし近年では、それら源泉の成分組成比に違いが見られるようになっており、小坂ら(1998)は、それが既存の源泉と水質的に異なる万代鈹源泉の混入によるものだと指摘した。

2.2 万代鈹源泉

万代鈹源泉は草津町温泉街の西方、標高1,350mの小殺生地区にある旧硫黄鈹山の坑口から湧出する高温強酸性の源泉である。湧出開始当初はそのまま坑口近くの窪地へ投棄されていたが、現在、

源泉は草津町により管理され、熱交換を介して家庭や事業所等で利用する温水システムや融雪用ロードヒーティングシステムの熱源とするとともに、熱交換後の源泉水は温泉旅館やその他入浴施設に引湯されて利用されている。また、湧出量が豊富なため、余剰の源泉水はそのまま湯川上流へ直接放流されている(小坂ら, 1998)。

2.3 西の河原

西の河原は標高約 1,200 m に開けた草津温泉の温泉街西方に連なる湯川沿いの谷地であり、西ノ河原凝灰角礫岩(宇都ら, 1983)に源泉の湧出を伴った酸性変質地帯である。温泉街の外れから約 500 m ほどが「西の河原公園」として整備されており、観光客が遊歩道を歩きながらその景観を楽しむことができる。西の河原は湯川の上流域に当たり、西の河原のさらに上流のへび沢が源流となっている。へび沢は冷温で pH 中性の小さな沢であるが、西の河原公園の上流側の外れで引湯された万代鈹源泉水が放出されている。また湯川には、西の河原公園内で右岸から支流が合流している。この支流はその先 400 m ほど上流に源流があり、かつては雪解けにより地下水位の上昇したときのみ湧出する源泉がその起点となっていたが(倉沢・角田, 1985)、現在はその湧出は見られず、同地点まで引湯された万代鈹源泉水が放出され、源流をなしている。

3. 試料の採取と分析

2012 年 7 月から 8 月にかけて、本研究のための源泉水、湧水、河川水の採水を行った。試料採取位置を Fig. 1 の地図上に示す。水温および pH は採水時に現地にて測定した。主要溶存成分組成の分析は、炎光光度法(SOLAAR M6, サーモエレクトロン)、ICP 発光分析法(SPS3520UV-DD, エスアイアイ・ナノテクノロジー)、イオンクロマトグラフ法(IonPac AS12A/AG12A カラムおよび DX-120 イオンクロマトグラフ装置, 日本ダイオネクス)により行った。ヒ素の定量は水素化物発生原子吸光法(VP100 水素化物発生装置および SOLAAR M6 原子吸光分析装置, サーモエレクトロン)および ICP 発光分析法(SPS3520UV-DD, エスアイアイ・ナノテクノロジー)を用いた。また、採水時に 2,2'ピピリジンにより Fe^{2+} イオンを発色固定した試料溶液を持ち帰り、分光光度計(V650, 日本分光)による波長 523 nm の吸光度から Fe^{2+} イオンの濃度を求めた後にメルカプト酢酸ナトリウムを添加して Fe^{3+} を Fe^{2+} に還元し、再び吸光度を測定して Fe^{2+} と Fe^{3+} との濃度比を求めた。

4. 分析結果と考察

4.1 採水試料の化学組成

Table 1 に採水試料の分析結果を示す。表中では便宜上、採水試料を 4 つのグループに分類した。分類 I は万代鈹源泉系統であり、「万代鈹」は万代鈹の坑口で採取した万代鈹源泉水、「ゆるぎ石」は西の河原の上流側において湯川に放流されている余剰の万代鈹源泉水である。このため、両者は全く同じ化学組成を有する。分類 II は西の河原公園内の源泉・湧水であり、試料番号が若いほど上流側に位置している。分類 III は西の河原から湯川を下流側に下った温泉街中心に位置する草津湯畑源泉である。分類 IV は草津穴守稲荷神社の入口に飲用に導水されている「稲荷清水」と、湯川の源流にあたる沢水の「へび沢」であり、この地域の天水・表層水を反映したものと考えられる。Table 1 を見ると、分類 II の西の河原の源泉・湧水の化学組成は概ね万代鈹源泉(分類 I)と草津湯畑源泉(分類 III)との中間と見なすことができる。1970 年代以前の西の河原源泉群の水質が草

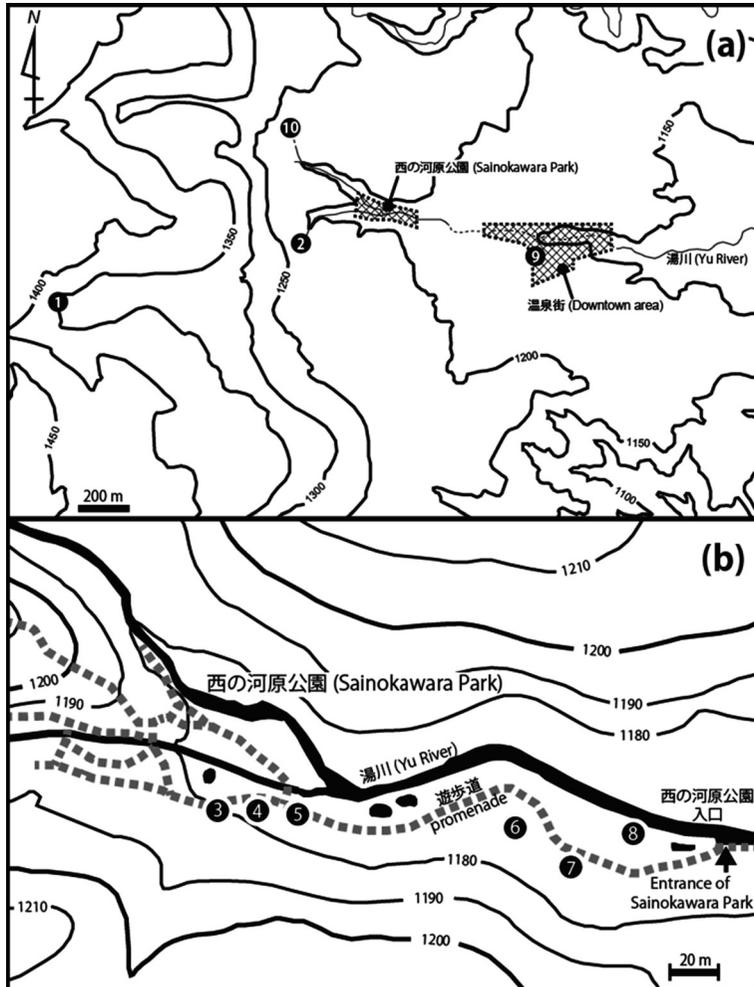


Fig. 1 Map of the Kusatsu Spa resort area (a) and enlarged map of the Sainokawara Park (b) with sampling locations. The contours are given in meters above sea level. Sampling points are marked with the circled numbers.

津湯畑とほぼ同等だったことを考えると（宇都ほか，1983；小坂ほか，1998），標高の高い山地にある万代鉍源泉が標高の低い温泉街の源泉に西方から混入しているとの考えが支持されよう。

4.2 西の河原地区への万代鉍源泉の地下浸透状況の評価

1) 主要溶存成分濃度比から見た源泉・湧水の水質相関性

万代鉍源泉は，草津湯畑源泉などの古くから知られる温泉街の源泉群と比べた場合，アルカリ金属イオン濃度が高い一方で鉄イオン濃度が低い。万代鉍源泉は1982年頃から溶存成分組成に大きな変化が見られるようになり，特に Na^+ は1980年代から1990年代にかけてその濃度が急上昇した結果（小坂ほか，1998），現在の万代鉍源泉の Na^+ 濃度は草津湯畑源泉のその2倍近くとなっている。一方， Na^+ 濃度の上昇と前後して鉄イオン濃度の上昇も万代鉍源泉では観測されたが（木川田ら，2006），それでも現在の万代鉍源泉の総鉄イオン（ $T\text{-Fe} : \text{Fe}^{2+} + \text{Fe}^{3+}$ ）濃度は，長期的に溶

Table 1 Chemistry of river, spring and hot spring waters collected around the Sainokawara Park.

Group No.	Sample name	Sampling date	Water temp. /°C	pH	Content / mg dm ⁻³										log([Fe ²⁺]/[Fe ³⁺])		
					Na ⁺	K ⁺	Mg ²⁺	Ca ²⁺	Al ³⁺	Fe ²⁺	Fe ³⁺	Mn ²⁺	Si	Z-As		Cl	SO ₄ ²⁻
I	1 万代鉱 Bandaiko	1-Aug-2013	95.6	1.77	103	590	55.5	122	54.0	4.7	0.04	2.9	192	4.5	679	1630	2.1
	2 ゆるぎ石 Yurugishi	30-Jul-2012	90.2	1.80	102	58.7	54.7	120	53.2	5.1	0.02	2.9	191	4.5	680	1608	2.4
	3 湧水 A Spring water A	1-Aug-2012	37.0	2.04	58.2	31.1	33.7	146	53.7	6.0	8.8	1.7	77.0	1.1	356	880	-0.2
II	4 湧水 B Spring water B	1-Aug-2012	38.7	2.04	60.4	32.1	34.3	94.8	56.3	7.6	6.5	1.7	73.9	1.1	351	881	0.1
	5 湧水 C Spring water C	1-Aug-2012	39.3	2.10	58.3	30.6	33.0	126	60.4	2.4	9.2	1.6	71.1	0.97	344	838	-0.6
	7 鬼の茶釜 Oni-no-chagama	1-Aug-2012	45.8	2.11	67.8	33.2	39.9	123	73.9	13.2	5.3	2.0	76.9	0.48	377	957	0.4
III	8 瑠璃の池 Ruri-no-ike	1-Aug-2012	45.8	2.10	66.7	33.1	38.5	112	74.8	18.0	0.30	1.9	77.7	0.53	374	944	1.8
	9 草津湯畑 Kusatsu Yubatake	28-Jul-2012	51.2	2.06	58.5	29.9	34.2	93.2	56.4	17.9	1.0	1.8	83.3	0.34	342	959	1.3
	6 稲荷清水 Inari-shimizu	1-Aug-2012	12.7	6.42	3.7	1.3	1.8	26.8	0.3	0.0	0.0	0.0	14.2	0.02	1.7	10.3	-
IV	10 へび沢 Hebi-sawa	30-Jul-2012	10.7	6.26	3.9	1.1	1.2	12.0	0.2	0.0	0.0	0.0	14.8	0.02	2.8	17.8	-

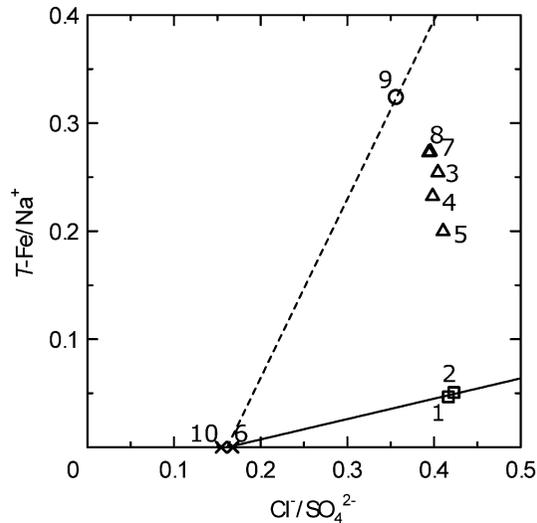


Fig. 2 The plots of $\text{Cl}^-/\text{SO}_4^{2-}$ ratios to $T\text{-Fe}/\text{Na}^+$ ratios in the analytical samples. The numbers beside the markers represent the sample numbers in Table 1.

存成分濃度の低下が見られる草津湯畑源泉の数分の1である。そこで、西の河原地域における万代鈇系統の源泉の浸透の様子を明らかにするため、採水試料の $T\text{-Fe}/\text{Na}^+$ 濃度比に着目し、 $\text{Cl}^-/\text{SO}_4^{2-}$ 濃度比に対してプロットしたのが Fig. 2 である。

Fig. 2を見ると、西の河原の源泉・湧水は、図中に実線で示される万代鈇源泉と表層水との混合線および、点線で示される草津湯畑源泉と表層水との混合線との間にプロットされる。これは西の河原地区では草津湯畑系統の旧来の源泉水に対して万代鈇系統の源泉水が混入した結果と見ることも可能である。この場合、その混入割合は20~40%程度と見積もられる。同様の関係はこのほか Ca^{2+} と Si を除く他の成分の組み合わせにおいても得ることができ、例えば、草津湯畑と万代鈇源泉との間で大きな違いがある $T\text{-Fe}/\text{Mn}^{2+}$ 濃度比を $\text{Mg}^{2+}/\text{Na}^+$ 濃度比に対してプロットしてみれば (Fig. 3), 源泉・湧水のプロットは万代鈇源泉と草津湯畑源泉との間に並び、西の河原の源泉・湧水は草津湯畑の源泉水に万代鈇源泉が10~30%程度混入したものと見なせる。ただし、表層水の $T\text{-Fe}$, Mn^{2+} 濃度が定量下限値未満であったために、ここでは表層水との関係は見ることができない。

2) 溶存ヒ素濃度から見た源泉・湧水の水質相関性

一般にヒ素は温泉水では微量成分と見なされることが多いが、万代鈇源泉ではヒ素は鉄と同程度に含まれる主要な溶存成分と見ることも可能である。万代鈇源泉では1980年代から溶存ヒ素濃度が急激に上昇し、当初1~2mg/Lであった全ヒ素 ($T\text{-As}$) 濃度は1990年代末には10mg/L前後にまで達した (木川田ら, 2006; Kikawada et al. 2008)。その後、2000年代末からヒ素濃度は低下傾向に転じたが、万代鈇源泉は現在においても草津温泉の他の源泉に比べてきわめて高い $T\text{-As}$ 濃度を保持している。そこで、万代鈇源泉と草津湯畑源泉との間で大きな差異が認められる $T\text{-As}$ 濃度と $T\text{-Fe}$ 濃度とに着目し、 $T\text{-As}/\text{Na}^+$ 濃度比に対する $T\text{-Fe}/\text{Mg}^{2+}$ 濃度比のプロットを Fig. 4 に示す。

Fig. 4では、西の河原の源泉・湧水のプロットはやはり万代鈇源泉と草津湯畑源泉との間に位置しており、両系統の源泉水の混合を見ることができる。またその一方で、試料番号3, 4, 5と試料番号7, 8とでは異なる濃度比相関を有することも明らかである。前者は湧出温度が40℃を下回る

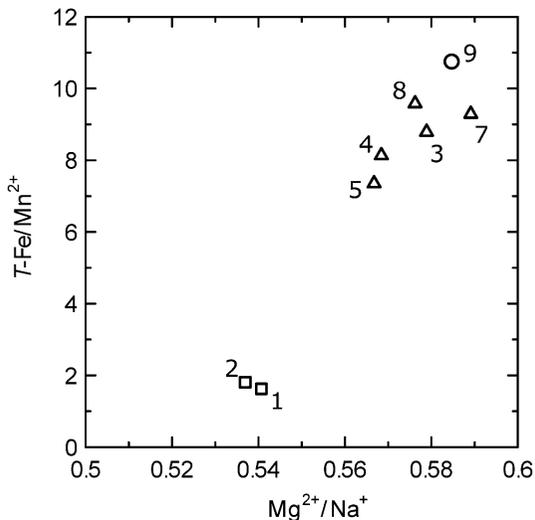


Fig. 3 The plots of Mg²⁺/Na⁺ ratios to T-Fe/Mn²⁺ ratios in the analytical samples. The numbers beside the markers represent the sample numbers in Table 1.

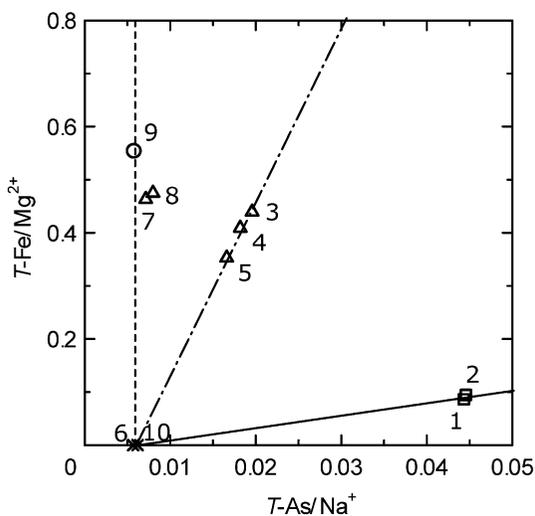


Fig. 4 The plots of T-As/Na⁺ ratios to T-Fe/Mg²⁺ ratios in the analytical samples. The numbers beside the markers represent the sample numbers in Table 1.

西の河原公園上流側の湯川右岸斜面から浸出する湧水，後者は湧出温度が 45℃を超える西の河原公園下流側に位置する旧来より知られた源泉である。試料番号 3, 4, 5 の湧水はそのプロットが一系列に並び，その延長線上には表層水と考えられる試料 6 および 10 が位置する。これはあるひとつの組成の湧水と表層水（天水）との混合関係と見られ，湧出地点が下流側にある湧水ほど表層水による希釈割合が高いことを意味する。これに対し，さらに西の河原の下流側に位置する源泉（試料

番号7, 8) はこのような希釈関係からは独立しており, 同じ西の河原地区内の源泉・湧水であっても, 上流側の湧水群と下流側の源泉群とは区別すべきと思われる。

4.3 西の河原地区における浅層伏流水の混合モデル

これまで見てきたように, 西の河原に湧出する源泉・湧水の化学組成は, 万代鉍源泉と草津湯畑源泉および表層水との混合で説明することが可能である。すでに述べたように, かつての西の河原の源泉群は草津湯畑源泉をはじめとする温泉街の源泉群と組成的に等しく, 本質的に起源を同一にすると理解されてきた。したがって, 水理的に西の河原から草津湯畑へと流動する温泉伏流水に対して, 西の河原地区で直接的に万代鉍源泉水が混入しているのであれば, 西の河原の源泉とその下流域にあたる草津湯畑源泉とでは, 現在においても互いに等しい化学組成を有するはずである。しかしながら, 現在の西の河原の源泉の化学組成は, 明らかに草津湯畑源泉と万代鉍源泉とが混合したもののように見える。つまり, 西の河原地区では主たる温泉伏流水が地表へと湧出する際に, 湧出口近傍において万代鉍源泉が混入していると考えるのが妥当と思われる。これは万代鉍源泉本体の深部熱水に由来するものではなく, 万代鉍源泉の湧出口近く, あるいは西の河原の上流側で人工的に放出されている余剰の万代鉍源泉水が地表から浸透したものと見るのが妥当であろう。

西の河原公園の最下流部に位置する二つの源泉(試料番号7, 8)は, 本研究で採取した西の河原公園内の源泉・湧水の中では溶存成分組成比が最も草津湯畑源泉に近いものである。そのうちの瑠璃の池(試料番号8)は位置的には西の河原の中で標高が最も低く, 谷地形の中央底部の西ノ河原凝灰角礫岩層から直接的に湧出している。位置的にも地形的にも万代鉍源泉からの寄与が最も小さいことはもっともらしく思える。一方, 瑠璃の池からわずかに上流側に位置する鬼の茶釜(試料番号7)は, 瑠璃の池と組成的にはほぼ等しいが Fe^{2+}/Fe^{3+} 比(Table 1)に違いがあり, 明らかに瑠璃の池よりも酸化性的である。鬼の茶釜は河床よりも一段高い右岸の斜面近くから湧出しているため, 表層近くの浸透水からの寄与があることが考えられる。

西の河原公園上流側, 草津穴守稲荷神社より上流側の右岸斜面から浸透湧出する湧水(試料番号3, 4, 5)の化学組成は, 下流側の二つの源泉よりも明らかに万代鉍源泉に近く, より高い割合で万代鉍由来の浸透水の混入を受けていると見なせる。また Fe^{2+}/Fe^{3+} 比について見ると, Fe^{3+} 濃度と Fe^{2+} 濃度とが同等もしくは Fe^{3+} 濃度が上回り, 下流側の源泉水よりもかなり酸化性的である。これは混入する万代鉍由来の浸透水が酸化性的であると同時に, 表層水からの寄与もより大きいものと推察される。

以上のことを踏まえれば, 西の河原の谷地形底部に発達した旧来の温泉伏流水層と地表面との間に, 万代鉍源泉放出水が地表から浸透することで形成されたやや酸化性的な浅部伏流水層が生じ, さらに西の河原に沿って広がる河床堆積物層に天水が滲入し, これらが地表近傍において種々の割合で混合しながら西の河原の源泉・湧水群を構成しているものと思われる。

5. ま と め

草津温泉の西の河原公園周辺の源泉・湧水の水質分布から, 西の河原地区における旧来の源泉に対する万代鉍源泉の混入が認められた。西の河原の源泉群の本来の化学組成が現在の草津湯畑源泉の化学組成と等しいと仮定した場合, 旧来の源泉と万代鉍源泉との混合比率は9:1から6:4と見積もられ, 上流側ほど万代鉍源泉の混入割合が大きい。この万代鉍源泉の混入は, 西の河原の上流において地表へと放出されている万代鉍源泉水の地下浸透により形成された浅部伏流水層によって生じている可能性が高い。万代鉍源泉に由来する浅部伏流水層は, 西の河原の谷地形下部を流動す

る旧来からの温泉伏流水層の上部に広く発達しているものと思われる。

謝 辞

本研究では、現地調査を行うに当たり群馬県草津町役場には便宜を図っていただき、様々な協力を賜った。御礼申し上げる。

本研究の一部は 2013 年 9 月 5 日、日本温泉科学会第 66 回大会において発表した。

引用文献

- 長谷紘和 (1971) : 群馬県殺生河原南側斜面における放熱量と地質との関連. 地調月報, **22**, 461-471.
- 木川田喜一, 川井 智, 大井隆夫 (2006) : 草津温泉主要源泉における溶存ヒ素濃度経年変化とヒ素負荷量の見積. 地球化学, **40**, 125-136.
- Kikawada Y., Kawai S., Shimada K., Oi T. (2008) : Arsenic originating in Kusatsu hot springs, Gunma, Japan, and arsenic pollution status of Kusatsu Rivers. J. Disas. Res., **3**, 261-269.
- 倉沢辰巳, 角田安則 (1985) : 群馬県草津温泉の湧出量と降水量との関係について. 地熱, **22**, 1-8.
- 中沢晁三 (1997) : 近世草津温泉史. 白倉卓夫編 草津町温泉研究会発行「草津温泉」. 95-111. 上毛新聞社. 前橋.
- 小坂丈予, 小坂知子, 平林順一, 大井隆夫, 大場 武, 野上健治, 木川田喜一, 飛田典子 (1998) : 万代鉍温泉の湧出に伴う草津温泉源泉群の水質変化について. 温泉科学, **47**, 166-178.
- 太田良平, 松野久也 (1970) : 草津白根火山の再調査. 地調月報, **21**, 609-618.
- 宇都浩三, 早川由紀夫, 荒牧重雄, 小坂丈予 (1983) : 草津白根火山地質図. 通商産業省 工業技術院 地質調査所.