

## 大分県八丁原地熱帯小松地獄の温泉水の地球化学的特徴

清崎 淳子\*・及川 和彦\*\*・田口 幸洋\*\*・千葉 仁\*\*\*

(平成17年11月30日受理)

## Geochemistry of Hot Spring Water from Komatsu Jigoku Steaming Ground in Hatchobaru Geothermal Field, Oita Prefecture, Japan

Junko KIYOSAKI\*, Kazuhiko OIKAWA\*\*, Sachihito TAGUCHI\*\*  
and Hitoshi CHIBA\*\*\*

(Received November 30, 2005)

## Abstract

Hot spring waters were collected from the Komatsu Jigoku steaming ground where is adjacent to the Hatchobaru geothermal power plant. Chemistry of the waters show a typical characteristics of steam-heated water showing low chloride contents (less than 2mg/l), high  $\text{SO}_4^{2-}$  contents up to 1710mg/l, and also light  $\delta^{34}\text{S}$  of  $\text{SO}_4^{2-}$  in water. Moreover,  $\delta\text{D}$  and  $\delta^{18}\text{O}$  of the waters show a meteoric water origin. These lead to the results that the acid hot spring water from the Komatsu Jigoku steaming ground is not originated from deep acid water in the Hatchobaru geothermal field, but it is a steam-heated water indicating surface water origin.

Key words: steam-heated water, chemistry,  $\delta\text{D}$ ,  $\delta^{18}\text{O}$ ,  $\delta^{34}\text{S}(\text{SO}_4^{2-})$ , Komatsu Jigoku, Hatchobaru, geothermal, Japan

## はじめに

大分県八丁原地熱帯は九重火山の北斜面に位置し(第1図),そこでは11万kWと日本で最大の地熱発電所が稼働している。その発電所の北側に隣接して,小松地獄が位置している。小松地獄は八丁原地熱帯で最も大きな地熱兆候地で,噴気,泥地獄,温泉などが分布している。

この小松地獄では明礬石を主体にした酸性変質帯が北西—南東系の断層に沿って発達し,さらにこの地獄付近では明礬石帯やカオリン—パイロフィライト帯が地下約1000mまで厚く分布している(Hayashi, 1973)。このような地獄における酸性熱水変質鉱物の生成に関与する水は,通常硫酸酸性の蒸気加熱水であると言われている。小松地獄でも噴気に伴い,温泉が随所

\* エネコム(株)

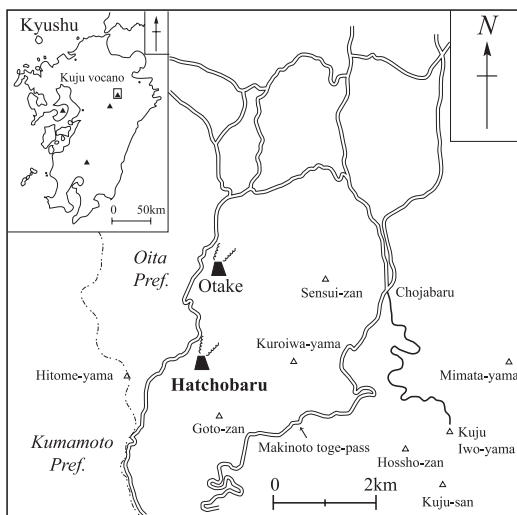
Enecom Co., Ltd. 1-1-1 Watanabe-dori, Cyuou-ku, Fukuoka-shi 810-0004, Japan

\*\* 福岡大学理学部地球圏科学科

Department of Earth System Science, Faculty of Science, Fukuoka University 8-19-1 Nanakuma, Jonan-ku, Fukuoka-shi 814-0180, Japan

\*\*\* 岡山大学大学院自然科学研究科

The Graduate School of Natural Science and Technology, Okayama University 3-1-1 Tsushima-naka, Okayama-shi 700-8530, Japan



第1図. 八丁原地熱帯の位置図

に湧出しているが、現在までこれらの温泉水について検討されていない。また、小松地獄付近の深部の酸性変質鉱物の生成については、変質鉱物や明礬石の硫黄同位体比の観点からマグマ性流体の関与が指摘されはじめている（清崎ほか、投稿中）。そのため、小松地獄における温泉水の特徴を明らかにすることは、小松地獄および地下の酸性変質鉱物の成因を考える上でも重要である。本報告では小松地獄に湧出する温泉の特徴を明らかにすることを目的とする。

## 小松地獄

### 1. 概説

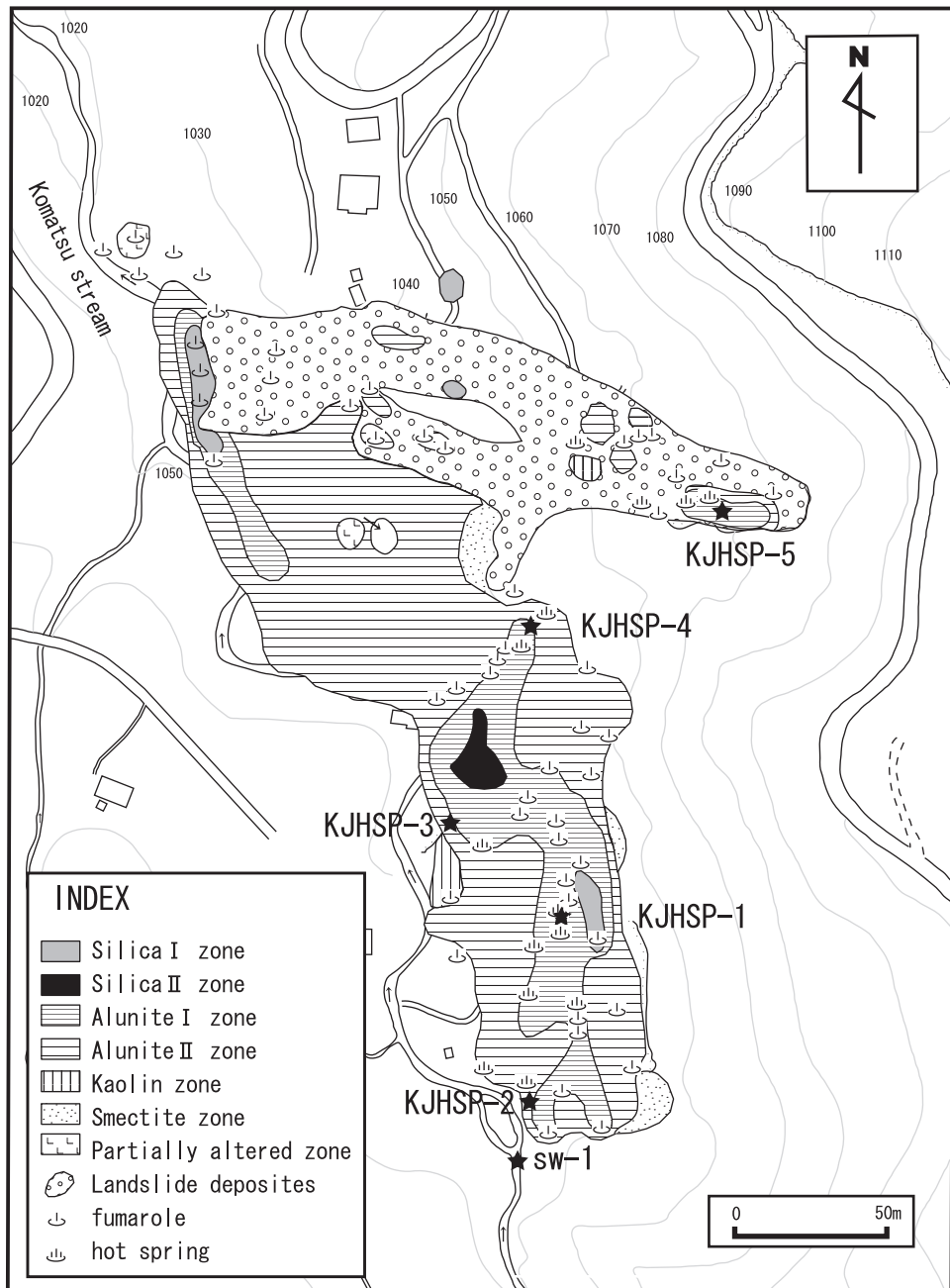
小松地獄は八丁原地熱発電所の北東約300m、標高約1050m付近に位置しており、大岳—八丁原地熱地域で最も噴気の分布範囲が広く、かつ噴気活動が活発である。小松地獄は、小松川に沿って幅約70mで北北西—南南東に約350m広がっている。ただし、小松地獄の北側では、地すべり堆積物の分布方向（西北西—東南東；第2図）に約200m伸びている。この地域は八丁原地熱帯の北部にあたり、小松地獄の西側に沿って多くの還元井が掘削され、八丁原地熱発電所の熱水の還元地域のひとつとして用いられている。

小松地獄における噴気帯は北部と南部に分けられる。南部には多くの噴気や小さなマッドプール、温泉が遊歩道沿いに分布しており、マッドプールは南部でもより北側に、噴気活動は南部でもより南側で活発である。北部は大部分が1997年7月9日～10日の集中豪雨時に発生した地すべり堆積物で覆われている（第2図）。この地すべりの頭部の南縁付近には数m径の泥火山（第3図f）や赤色沈殿物による小さなテラス（第3図e）が認められる。

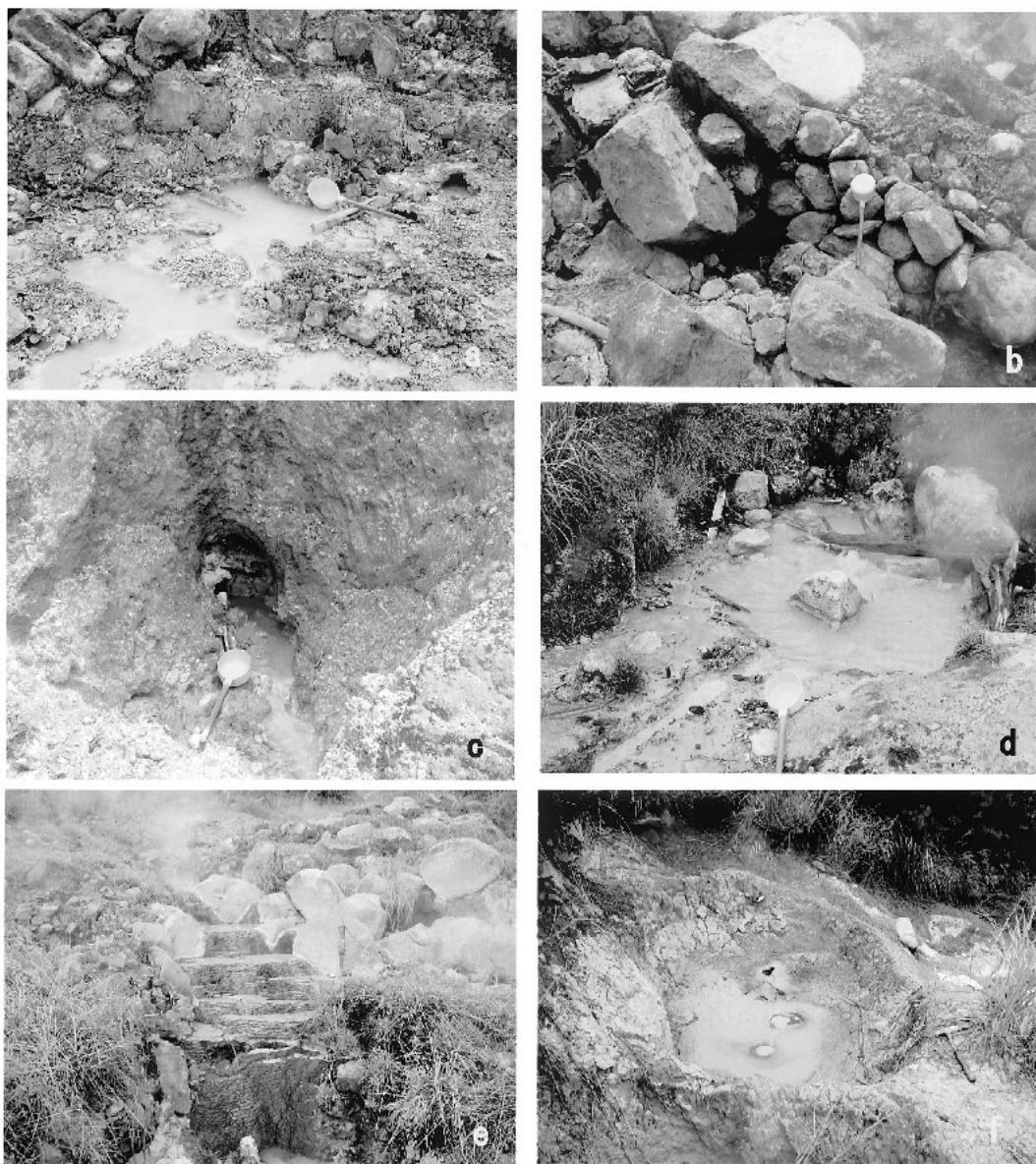
この地獄の西側に位置する瀬ノ本への道路の切り割りに沿っては輝石安山岩からなる豊肥火山岩類及びそのカオリン変質岩が、地獄の東に接して角閃石安山岩を主とする九重火山岩類が露出している。地獄ではほぼ完全に岩石は変質しており、源岩の特定は困難であるが、地獄付近に掘削されたボーリングでは、地下50mまでは九重火山岩類からなると考えられている（Hayashi, 1973）。小松地獄を構成する変質岩のほとんどは明礬石帯（明礬石+クリストバル石）で、これを取り囲んでカオリン帯（カオリン+ナイト+クリストバル石）がレンズ状に地獄周辺に発達している（Hayashi, 1973）。

### 2. 地下温度分布

今回小松地獄の地下50cmの温度を約170点で測定し、地下温度分布を求めた（第4図）。80℃以上の高温部は、現在の噴気の分布にほぼ対応している。この温度分布は湯原ほか（1988）による1986年時の地下温度分布（1m深）とほぼ同様な分布を示す。しかしながら、北部の地すべり頭部付近では今回最高98.4℃が認められ、また80℃以上の高温部は東西約50mにもおよんでいるが、1980年には認められていない（湯原ほか、1988）。なお、1986年では最高70℃の温度領域が10～20mの範囲に認められが（湯原ほか、1988）、今回のように広くは分布していない。これらのことは、南部では地下温度はほとんど変化がなく、北部は地すべり頭部付近でより温度の上昇が起きていることを示唆している。しかしながら、これは地すべりでより深部が露出したことによるのか、実際に地下温度の上昇が起きているのかはいずれかは定かではない。

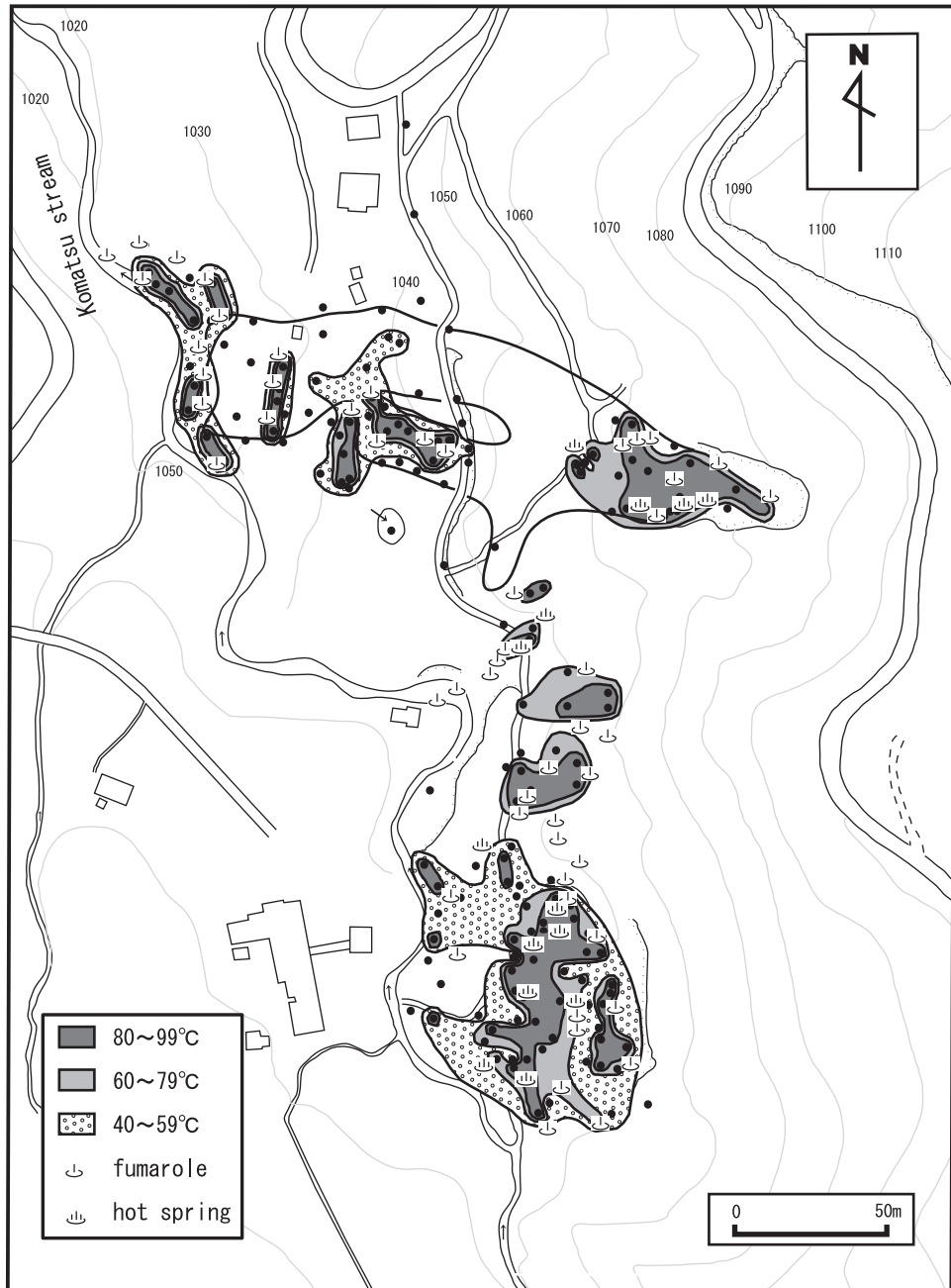


第2図. 小松地獄の変質帯と温泉および地表水の採取位置図  
 KJHSP-1~5: 温泉水, SW-1: 小松川の河水



第3図. 小松地獄の温泉の産状

a : KJHSP-1, b : KJHSP-2, c : KJHSP-3, d : KJHSP-4, e : KJHSP-5, f : 泥火山



第4図. 小松地獄の地下温度分布図 (2002年8月測定, 0.5m 深)

### 3. 変質鉱物

小松地獄より約100個の地熱変質岩試料を採取し、X線回折法により変質鉱物を同定した。同定された鉱物組み合わせにより、Hayashi (1973) に従い珪化帯、明礬石帯、カオリナイト帯、スメクタイト帯が区分された(第2図)。

珪化帯は今回新たに見出され、それらをさらに珪化帯ⅠとⅡに細分した。珪化帯Ⅰは主にクリストバル石よりなり少量の鋭錘石を伴い、しばしば少量のトリデイマイト、石英、黄鉄鉱が認められる。この珪化帯Ⅰは、通常活動的な噴気帯の近くに極めて小さい範囲に認められる。珪化帯Ⅱの主要鉱物は石英で、少量の鋭錘石、黄鉄鉱、クリストバル石を伴う。また、珪化帯Ⅱのほとんどは塊状であるが、多孔質部には重晶石がまれに認められた。この珪化帯Ⅱは珪化帯Ⅰとは対照的に現在の地下温度は比較的低温の部分に露出している(第2、4図)。この珪化帯Ⅱの主要鉱物の石英は、地熱帯では一般的に100℃以上で生成されるので、現在の噴気活動とは異なる時期に地下で生成され、風化作用により削剥され地表に露出していると考えられる。

明礬石帯はHayashi (1973) が述べたように小松地獄全域に広く分布している。明礬石帯も鉱物組み合わせにより明礬石帯ⅠとⅡに細分される。明礬石帯Ⅰは明礬石とクリストバル石よりなり、カオリナイトを欠く。時に、少量の石英、トリデイマイト、鋭錘石、黄鉄鉱、自然硫黄を含む。明礬石帯Ⅱは明礬石、クリストバル石、カオリナイトからなり、明礬石帯Ⅰに比べるとトリデイマイトが認められる頻度がより低く、黄鉄鉱の産出頻度はより高い。また、まれにジャロサイトが認められる。明礬石帯Ⅰの分布は、一般的に80℃以上の高温の噴気帯の分布と一致し、明礬石帯Ⅱは明礬石帯Ⅰを取り囲んで小松地獄の広範囲にわたって分布している(第2、4図)。

カオリナイト帯およびスメクタイト帯は明礬石帯Ⅱの縁辺部に少量認められた。カオリナイト帯はカオリナイト、クリストバル石、黄鉄鉱が、スメクタイト帯はスメクタイト、クリストバル石が主な構成鉱物である。

### 温泉水の特徴

#### 1. 温泉水試料

今回、小松地獄の明礬石帯から湧出する温泉水を5試料採取した(第2図)。温泉水KJHSP-1は、小松地獄南部の80℃以上の高温部で明礬石帯Ⅰから湧出し、数cm~10cm程度の深さの小さなホットプールの温泉水で、pHは2.24と酸性を示す(第2、4図、第1表、第3図a)。KJHSP-2は南部の噴気帯の端付近の温泉水で、九重火山岩類の転石が多く、それらの隙間から湧出している。この地獄で最も湧出量が多く(約120l/分)、pHは他の温泉水と異なり中性を示す(第3図b)。KJHSP-3は南部の中央部で明礬石帯の西端付近に位置し、高さ約2mの明礬石帯Ⅱからなる崖の径数10cmの横穴から湧出しており、pHは2.32を示す(第3図c)。KJHSP-4は南部の最北端に位置する直径約1.5mのホットプールのもので、pHは3.25である(第3図d)。KJHSP-5は北部の地すべりの頭部付近で、赤色沈殿物が鍾乳洞の千枚皿状のテラスをなしており、その最上位の湧出口から採取したもので、pHは3.24である(第3図e)。

このほかに、小松地獄の温泉水の起源を考察するために、地獄の脇をながれる小松川の河川水(SW-1)を採取した。

現地では温度とpHを測定し、水試料は0.45μmのフィルターでろ過し採取した。採水日の夜に室内で滴定法によりH<sub>2</sub>SとHCO<sub>3</sub><sup>-</sup>を求め、また他の化学成分はイオンクロマトグラフ法で分析を行った。また、水の水素および酸素同位体比はガス交換法で福岡大学の質量分析計(Delta Plus)を用いて得られた。なお、温泉水中のSO<sub>4</sub><sup>2-</sup>イオンの硫黄の同位体比分析は、岡山大学固体地球センターで行った。

#### 2. 結果および考察

温泉水および河川水の化学組成および同位体比の測定結果を第1表に示す。また、同表には大岳および八丁原地熱帯における酸性の熱水(地獄や坑井からの噴出熱水)や中性の深部熱水、またマグマ性成分の寄与が大きい九重硫黄山の温泉水の値も示されている。

小松地獄の酸性を示す温泉水(pH=2.2~

第1表. 小松地獄および大岳・八丁原地熱帯の水の化学組成

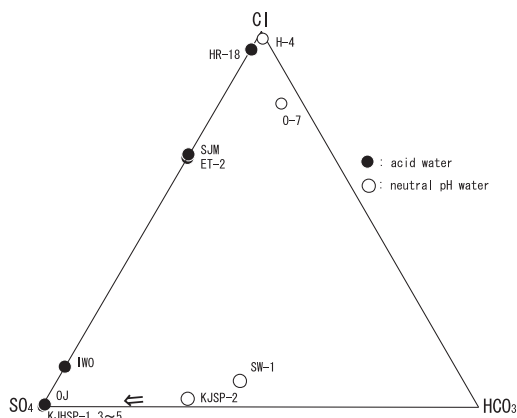
KJHSP-1~5:小松地獄の温泉水, SW-1:小松川河川水, OJ:大岳地獄水  
 SJM:筋湯元湯, O-7:大岳7号井, H-4:八丁原4号井, ET-2:八丁原ET-2号井,  
 HR-18:八丁原還元18号井, IWO:九重硫黄山の火山ガス凝縮水

| Sample                                | KJHSP-1 | KJHSP-2 | KJHSP-3 | KJHSP-4 | KJHSP-5 | SW-1    | OJ'  | SJM' | O-7** | H-4***  | ET-2**** | HR-18**** | IWO**** |
|---------------------------------------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|------|------|-------|---------|----------|-----------|---------|
| Sp. Date                              | 7/18/02 | 7/18/02 | 7/18/02 | 7/18/02 | 7/18/02 | 8/28/02 |      |      |       | 03/1987 | 05/1976  | 01/1981   |         |
| Temp(°C)                              | 87.7    | 89.1    | 95.0    | 94.2    | 77.1    | 18.9    | 84.6 | 54.5 |       |         |          |           | 89      |
| pH                                    | 2.24    | 6.58    | 2.32    | 3.25    | 3.24    | 7.09    | 4.3  | 3.5  | 8.4   | 5.3     | 4.0      | 3.7       | 1.51    |
| Flow rate(L/min)                      | 0.1-0.2 | 120     | 30      | 0.1-0.2 | 0.1-0.2 |         |      |      |       |         |          |           |         |
| Li                                    | 0.00    | 0.00    | 0.01    | 0.01    | 0.02    | 0.00    |      |      | 4.5   |         |          |           |         |
| Na                                    | 4.87    | 6.01    | 11.90   | 7.86    | 17.12   | 4.39    | 7.6  | 109  | 846   | 2350    | 187      | 792       | 82.5    |
| NH <sub>4</sub>                       | 0.00    | 0.00    | 0.78    | 0.00    | 0.00    | 0.00    |      |      |       |         |          |           |         |
| K                                     | 6.23    | 2.77    | 9.90    | 4.47    | 10.32   | 2.21    | 3.0  | 26   | 105   | 350     | 43       | 147       | 11.6    |
| Mg                                    | 2.71    | 3.92    | 9.83    | 5.01    | 6.52    | 1.80    | 7.6  | 1.6  | 0.025 | 0.0     | 2.5      | 2.0       | 44.7    |
| Ca                                    | 5.68    | 12.23   | 20.51   | 11.75   | 27.81   | 5.94    | 15.4 | 10.5 | 9.9   | 1.9     | 11.6     | 26.8      | 90.2    |
| F                                     | 0.11    | 0.07    | 0.42    | 0.11    | 0.14    | 0.05    |      |      | 3.80  |         |          |           |         |
| Cl                                    | 0.56    | 1.78    | 0.88    | 1.36    | 1.51    | 3.10    | 1.0  | 214  | 1219  | 3478    | 279      | 1788      | 423     |
| HCO <sub>3</sub>                      | -       | 23.4    | -       | -       | -       | 21.4    | 0.8  | 0    | 76    | 24      |          |           | 0       |
| SO <sub>4</sub>                       | 1712    | 47.9    | 1292    | 279     | 265     | 17.3    | 120  | 105  | 214   | 56      | 141      | 86        | 3540    |
| H <sub>2</sub> S                      | 1.12    | 1.90    | 0.90    | 0.87    | 0.85    |         |      |      |       |         |          |           |         |
| δD(‰)                                 | -28.9   | -56.1   | -37.7   | -41.4   | -45.7   | -56.8   |      |      |       |         |          | -54       | -57     |
| δ <sup>18</sup> O(‰)                  | -0.3    | -8.5    | -5.0    | -3.6    | -4.8    | -8.9    |      |      |       |         |          | -7.8      | -6.4    |
| <sup>34</sup> S(SO <sub>4</sub> ) (‰) | -4.19   | -3.61   | -4.09   | -3.65   | -3.03   |         |      |      |       |         |          | 16.2      | 21.7    |

\*Shigeno et al.(1985), \*\*Koga(1970), Shimada et al.(1985), \*\*\*Kiyota et al.(1996), \*\*\*\*Ehara et al.(1981)

3.3) のCl<sup>-</sup>濃度は0.6~1.5mg/lと極端に少ないのに比し, SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>は265~1712mg/lと多く含まれている。なかでも南部の中央部付近から湧出するKJHSP-1およびKJHSP-2は1300-1700mg/lと多くのSO<sub>4</sub><sup>2-</sup>を含み, pHも2.2-2.3と酸性泉の中でも最も低い温泉である。これに比べ他の酸性泉SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>は270mg/l前後で, 南部中央のものに比べると含有量は1/5~1/6と少なく, pHも約3.2とやや高い。このように地獄から湧出する酸性水には若干の組成差はあるものの, これらはCl-SO<sub>4</sub>-HCO<sub>3</sub>の三成分比図上ではSO<sub>4</sub><sup>2-</sup>のコーナーにプロットされ(第5図), これらが典型的な蒸気加熱水の特徴を示していることが明らかである。また, 酸性および中性の温泉も温泉中のSO<sub>4</sub><sup>2-</sup>イオンの硫黄同位体比δ<sup>34</sup>S(SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>)は-3.0~-4.2‰と軽い値を示している(第1表)。

以上のことは, 小松地獄に湧出する酸性の温泉水は, 地獄の下位で沸騰により分離された硫黄同位体比の軽いH<sub>2</sub>Sが, 地下浅所で酸素に富む地下水に遭遇し酸化され, 酸性で硫黄同位体比の軽い水, 蒸気加熱水が形成されたものであることを示している。また, 八丁原の北2kmに位置する大岳地熱発電所近くにある大岳地獄



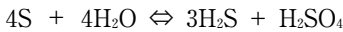
第5図. 小松地獄および周辺の温泉・地熱水のCl-SO<sub>4</sub>-HCO<sub>3</sub>組成比

黒丸は酸性, 白丸は中性を示す, 図中の試料の略号は第1表に同じ. 矢印は小松地獄の温泉水の進化方向を示す。

の水もpHが4.3とやや高いものの, Cl<sup>-</sup>に乏しく(1.0mg/l)SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>に富み(120mg/l), 同様にしてできたものであることが明らかである(第1表, 第5図)。

一方, 八丁原地熱帯の小松地獄付近には, HR-18号井(掘削深度1082m, 噴出熱水のpH=

3.7) や ET-2号井 (掘削深度約200m, 噴出熱水の pH=4.0) などの酸性熱水が地下に存在することが知られている (第1表, Kiyota et al., 1996). これらは,  $\text{Cl}^-$  は280–2900mg/l,  $\text{SO}_4^{2-}$  は30–140mg/l と, 高  $\text{Cl}^-$ , 低  $\text{SO}_4^{2-}$  で特徴付けられ, 硫酸イオンの硫黄同位体比は+16~+22‰と重いのが特徴である (Kiyota et al., 1996). これらの酸性水は, 硫黄が高温の  $\text{Cl}^-$  型の水と反応し以下のようにしてできたと考えられている (Kiyota et al., 1996; Matsuda et al., 2000).

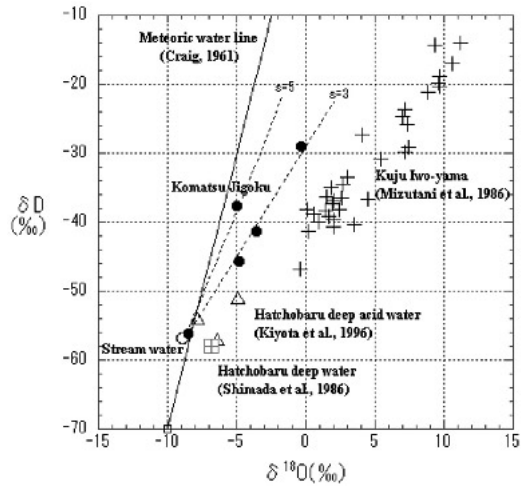


今回採取した小松地獄で湧出する酸性水は,  $\text{Cl-SO}_4\text{-HCO}_3$  三成分比 (第5図) や  $\text{SO}_4^{2-}$  の硫黄同位体比 (第1表) から明らかのように, このような八丁原の深部に存在する酸性熱水が地表まで到達して, 小松地獄の酸性水を形成しているものでないことが明らかである.

しかしながら, 過去には深部起源の酸性熱水の活動があったことが考えられる. 今回の地表の変質分帯により石英からなる珪化岩の存在 (珪化帯Ⅱ, 第2図) が明らかになった. これは石英の生成温度条件から考えて, 現在の噴気活動による酸性の蒸気加熱水からできたものでなく, 過去にはより高温の酸性の熱水活動があったことを示唆している. 珪化帯Ⅱの形成には深部からの酸性の熱水, 特に現在九重硫黄山において認められるようなマグマ性成分に富む  $\text{pH} < 2$  のような  $\text{Cl-SO}_4$  型の熱水 (第1表, 江原ほか, 1981) の関与があった可能性が考えられる.

一方, 今回の調査で明らかとなった小松地獄の南部の南端から湧出する89.1℃の中性の温泉水 KJHSP-3は, その  $\text{Cl}^-$  濃度は酸性の温泉水とほとんど変わらないが,  $\text{SO}_4^{2-}$  が約50mg/l と少ない. この中性の温泉は小松地獄で約120l/分と最も湧出量が多いのが特徴である.

中性の温泉水は上昇する  $\text{H}_2\text{S}$  量に対し地下水の量が圧倒的に多かったために,  $\text{H}_2\text{S}$  の酸化が起き  $\text{SO}_4^{2-}$  の硫黄同位体比の軽いものでも, 温泉水を酸性にするまでにはいたらなかったものと考えられる.



第6図. 小松地獄および周辺の温泉・地熱水の同位体比

さらに小松地獄に産する酸性や中性の温泉水の起源および生成メカニズムを知るために, 水の同位体比 ( $\delta\text{D}$ ,  $\delta^{18}\text{O}$ ) を測定し, その結果を第1表, および第6図に示した. 第6図で小松地獄の中性の温泉水 (KJHSP-2) は, Craig (1961) の天水ライン ( $\delta\text{D} = 8\delta^{18}\text{O} + 10$ ) 上に位置し, しかも小松川の河川水のそれにほぼ等しく, 付近の地表水を起源とする温泉水であることがわかる. また, KJHSP-3を除く酸性温泉水は中性の温泉水からほぼ傾き3の直線上に分布している. 一方, 横穴から湧出した30l/分と比較的湧出量の大きい酸性の温泉 (KJHSP-3) は, 中性の温泉から傾き5の直線上にある. この傾き5の関係は, 100℃で沸騰した蒸気と水間での同位体分別効果による傾き ( $\Delta\text{D}/\Delta^{18}\text{O} \approx 5$ ) を反映していると考えられる. 一方, 傾き3の直線にのる酸性温泉水は湧出量が小さいホットプールのものであり, 蒸発効果の影響をより強く受けたためとが考えられる. なお, 一般的に蒸発による傾きは湿度の影響を強く受け約3~5の間にある (Clark and Fritz, 1997). これらの関係の差は両者の産状の違いが原因と考えられる.

また第5図は, 小松地獄の酸性温泉水は化学組成や溶液中の  $\text{SO}_4^{2-}$  の硫黄の同位体比からも推定されたように, 八丁原の深部の酸性水や,



九重硫黄山の高温の火山ガスの凝縮水 (Mizutani *et al.*, 1986) と異なるものであることを示している。

### まとめ

八丁原地熱帯で最も活発な地表兆候地の小松地獄の温泉水の化学分析, および同位体分析を行った結果以下のことが明らかとなった。

1. 小松地獄に産する温泉はほとんどが酸性で, pH は約 2~3,  $\text{Cl}^-$  は 2 mg/l 以下で,  $\text{SO}_4^{2-}$  を 1700 mg/l まで含み,  $\text{SO}_4^{2-}$  イオンの  $\delta^{34}\text{S}$  も -3~-4 ‰ と軽く, 典型的な蒸気加熱水であり, 八丁原地熱帯の深部酸性熱水が湧出したものでないことが明らかとなった。
2. 地獄内には中性の温泉もあり, これは小松川の河川水とほぼ同じ  $\delta\text{D}$ ,  $\delta^{18}\text{O}$  を示し, 周囲の天水起源の地下水が水の起源である。
3. また, 中性の地下水を起源としてできた酸性の温泉 (蒸気加熱水) は, 産状によって水の同位体比 ( $\delta\text{D}$ ,  $\delta^{18}\text{O}$ ) が異なるトレンドにある。これは蒸発効果の差を反映していると考えられる。

### 謝 辞

本報告をまとめるに当たり, 福岡大学奥野充博士には有益なご助言をいただき, また福岡大学大学院研究生の有角友希さんには, 図表を作成していただいた。さらに, 硫黄同位体比分析は岡山大学固体地球センターの装置を使用させていただいた。ここに併せて深く御礼申し上げます。

### 引用文献

- Clark, I. and Fritz, P., 1997, *Environmental Isotopes in Hydrogeology*. Lewis Publishers, Boca Raton, New York, 328p.
- Craig, H. 1961, Isotopic variations in meteoric waters. *Science*, **133**, 1701-1703.

江原幸雄・湯原浩三・野田徹郎, 1981, 九重硫黄山からの放熱量・噴出水量・火山ガス放出量とそれらから推定される熱水系と火山ガスの起源. *火山*, **26**, 35-56.

Hayashi, M., 1973, Hydrothermal alteration in the Otake geothermal area, Kyushu. *Jour. Japan Geothermal Energy Assoc.*, **38**, 9-46.

清崎淳子・田中佳奈・田口幸洋・千葉 仁・武内浩一・本村慶信, 2006, 八丁原地熱帯のハイポジーン酸性変質帯-特に明礬石について. *日本地熱学会誌*, (投稿中)

Kiyota, Y., Matsuda, K. and Shimada, K., 1996, Characterization of acid water in the Otake-Hatchobaru geothermal field. *Proceedings 17<sup>th</sup> Annual PNOG-EDC Geothermal Conference*, 13 1-135.

Koga, A., 1970, Geochemistry of the waters discharged from drillholes in the Otake and Hatchobaru Areas. *Geothermics, Special Issue 2*, 1422-1425.

Matsuda, K., Shimada, K. and Kiyota, Y., 2000, Development of study methods for clarifying formation mechanism and distribution of acid geothermal-fluid -Case studies of geothermal areas in Kyushu, Japan-. *Proceedings World Geothermal Congress 2000, Kyushu-Tohoku, Japan*, 1425-1430.

Mizutani, Y., Hayahi, S. and Sugiura, T., 1986, Chemical and isotopic composition of fumarolic gases from Kujū-Iwoyama, Kyushu, Japan. *Geochemical Journal*, **20**, 273-285.

茂野 博・阿部喜久男・野田徹郎, 1985, 地熱流体の化学に基づく豊肥地熱地域熱水系の概念的モデル. *地質調査所報告*, **264**, 283-302.

島田寛一・藤野敏雄・古賀昭人・広渡和緒, 1985, 八丁原地熱帯の酸性熱水の成因と対策. *地熱*, **22**, 276-292.

湯原浩三, 江原幸雄, 久保口正俊, 1988, 八丁原地熱発電所に隣接した小松地獄の地熱活動. *地熱*, **24**, 606-613.