
原 著

秋田県、泥湯および川原毛地区の温泉や噴気の 地球化学的特徴とその成因

¹秋田大学工学資源学部, ²秋田地熱エネルギー株式会社
松葉谷治^{1*}, 川原谷浩¹, 石山大三¹, 高橋芳信², 鈴木 勝², 五十嵐和夫²

(平成 19 年 5 月 21 日受付, 平成 19 年 7 月 9 日受理)

Geochemical character and origin of hot springs and fumaroles in Doroyu and Kawarage areas, Akita Prefecture

Osamu MATSUBAYA^{1*}, Hiroshi KAWARAYA¹, Daizo ISHIYAMA¹,
Yoshinobu TAKAHASHI², Masaru SUZUKI² and Kazuo IGARASHI²

¹ Faculty of Engineering and Resource Science, Akita University

² Akita Geothermal Energy, CO., LTD.

Abstract

Doroyu hot spring area and Kawarage-jigoku geothermal area are located at a distance of about 1km to each other, and also both are adjacent to the Uenotai geothermal power plant. In order to inspect interference of the geothermal power plant operation to these natural geothermal activities, geochemical character and origin of geothermal water in these two areas are examined on the basis of hydrogen and oxygen isotopic ratios as well as chemical composition of hot spring water and fumarolic steam, which have been observed since 1985, intermittently. In the Kawarage area, strong acid Cl-SO₄ type hot springs show a relationship of hydrogen and oxygen isotopic ratios (δD vs. $\delta^{18}O$) that is characteristic of mixing of island arc volcanic steam and local meteoric water. Also δD and $\delta^{18}O$ of fumarolic steam show a relationship of steam boiling away from the strong acid Cl-SO₄ type hot spring water at about 150°C, in the underground. These characteristic features have been constantly kept through the observation period, and no significant change is observed between before and after the start of the geothermal power plant operation in 1994. In the Doroyu area, boiling hot spring water and fumarolic steam show a linear relationship of δD and $\delta^{18}O$ caused by steam-hot water separation in boiling at about 110°C, near the surface. The isotopic ratios of original geothermal water before the boiling is difficult to estimate, because the amount ratio of steam and hot water is not exactly determined. This linear relationship, however, fits the average relationship of local meteoric water, suggesting a meteoric water origin of the original geothermal water

* 2005 年 3 月退職, 現在は名誉教授

before the boiling. On the contrary, the geothermal water used in the Uenotai geothermal power plant has a δD vs. $\delta^{18}O$ relationship clearly different from the original geothermal water in the Doroyu area, or the average relationship of local meteoric water, though the geothermal water used in the Uenotai geothermal power plant is also of meteoric water origin. The observation results mentioned above reveal clearly that three kinds of geothermal activities different in their origins exist within 1 or 2 km distance. This fact suggests rationally that these geothermal waters come up through isolated individual paths at depth shallower, at least, than the depth of bore holes in the Uenotai geothermal power plant, about 2 km, and no interaction happens during ascending of these geothermal waters.

Key words : Doroyu hot spring, Kawarage-jigoku, Uenotai geothermal power plant, Hydrogen isotopic ratio, Oxygen isotopic ratio, Origin of geothermal water

要 旨

泥湯温泉および川原毛地獄はお互いに約 1 km の距離に位置し、それぞれ上の岱地熱発電所に隣接する。これらの天然の地熱活動に上の岱地熱発電所の操業が干渉するか否かを明らかにする目的で、1985 年以来温泉水や噴気の水素、酸素同位体比と化学組成を断続的に調査した。その結果、川原毛地区では、水素、酸素同位体比の関係から、強酸性の $Cl-SO_4$ 型温泉水は島弧火山ガスと天水の混合したものであり、また噴気はそれから約 150°C で沸騰分離した水蒸気であると推定された。この特徴は観測期間中はほぼ変わらず、地熱発電所の運転が開始された 1994 年の前後で特に変化は見られない。泥湯地区の噴気や沸騰泉は、 δD と $\delta^{18}O$ が地表近くの約 110°C で沸騰する水蒸気と熱水の関係を示し、それがこの地域の天水の平均値を通ることから、天水起源と推定される。ところが上の岱地熱発電所の地熱水は、天水起源であるが、その δD と $\delta^{18}O$ の関係は泥湯地区のものとは明らかに異なる。以上のことから、成因の異なる 3 種類の地熱水が、少なくとも上の岱地熱発電所の坑井が到達する深度、約 2 km 以浅では、それぞれ独立した通路を上昇してくると考えるのが妥当であり、またその上昇過程では相互の干渉はない。

キーワード：泥湯温泉、川原毛地獄、上の岱地熱発電所、水素同位体比、酸素同位体比、地熱水の起源

1. はじめに

秋田県南部の内陸（湯沢市）に位置する泥湯温泉と川原毛地獄はお互いに 1 km ほどの距離にあり、それぞれ上の岱地熱発電所に隣接する。地熱発電所において地下から大量の地熱水を噴出させることが周辺の温泉に影響を与えるか否かは、日本においては地熱発電所が本格的に計画されだした 1960 年代から常に問題とされ、さまざまな議論が繰り返されてきた（例えば、野田, 1994）。そのような影響を問題とする場合、重要なことの 1 つは、発電所で使用する地熱水と周辺の温泉水の性質を明らかにし、その成因、さらに地下から地表まで供給される経路を推定し、両者の関連を理解することである。例えば、秋田県北部の八幡平地域では大沼地熱発電所と澄川地熱発電所が焼山火山や玉川温泉から 3~5 km 離れたところに位置する。そのような近距離にあるにもかかわらず、両発電所の地熱水は天水起源であり、ところが焼山火山や玉川温泉の地熱水は火山ガス起源である。しかも、地熱発電所の坑井が到達している地下 2 km 位よりも浅いところでは、これら起源の異なる 2 種類の地熱水が各々全く独立した通路を通して地表に噴出することが明らかにされている（松葉谷, 1996, 1997; 武藤・松葉谷, 2002）。

そこで、本論文では、泥湯地区および川原毛地区の温泉水や噴気と上の岱地熱発電所で使用される地熱水の関連を明らかにする目的で、1985 年から断続的に行ってきた温泉水や噴気の水素、酸素

同位体比および化学組成の調査結果から、その起源、成因、地表への供給経路などの解明を試みる。なお、そのために1985年以前の情報として、阿部ら(1979)およびTakano and Watanuki(1974)を参考にする。

2. 泥湯温泉, 川原毛地獄ならびに上の岱地熱発電所の概略

2.1 泥湯温泉

泥湯温泉は泥湯沢の東岸に位置する(図1)。地区の南側には、川の湯(奥山旅館)と目洗いの湯と呼ばれる2つの自然湧出泉がある。それらのさらに南には弱い噴気活動が点在し、低温のため水蒸気は凝縮し、残りの二酸化炭素と硫化水素を主成分とする気体がわずかに流出している。

地区の北側では、山地の西斜面が幅100mほどで崩落し、崩積土が地すべりを起こしている。その崩落地区は熱水変質を受けており、過去に噴気活動が続いていたと推定される。崩落地区の南側では崩積土から噴気が出ており、地すべり防止用に掘削された水抜井から噴出する蒸気が旅館の温泉として利用されてきた。一方、以前は、北側では噴気活動は見られず、地表は笹やかん木などの植生で覆われていた。ところが、2000年頃より弱い噴気が見られるようになり、2004年には噴気が爆発的に活発になり現在まで続いている。また、南側の噴気は以前から徐々に弱まってきたが、北側の噴気が活発になった後はさらに弱まった。

2.2 川原毛地獄

川原毛地獄は泥湯温泉のある泥湯沢の西隣りの湯尻沢の最上流部にあり、泥湯温泉とは約1km

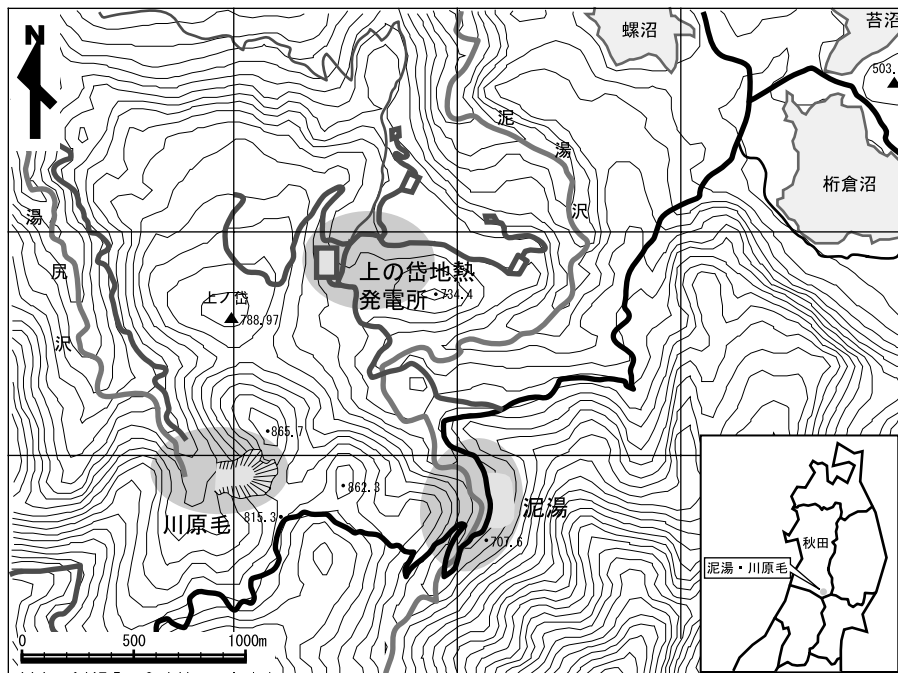


Fig. 1 Localities of Doroyu hot spring and Kawarage areas and Uenotai geothermal power plant.

図1 泥湯温泉, 川原毛地獄および上の岱地熱発電所の位置図。

離れている。そこは、以前硫黄を採掘していた露天掘りの鉱山跡地であり、中腹から上部にかけて数ヶ所で噴気が見られる。露天掘り跡地下部の湯尻川の河岸には、強酸性の Cl-SO_4 型の温泉が湧出する。その泉質は秋田県北部の玉川温泉大噴と類似する。玉川温泉大噴では、温泉水から北投石と呼ばれる硫酸鉛を含む硫酸バリウムが晶出するが、この川原毛の強酸性泉からも硫酸鉛を含む硫酸バリウムが晶出し (Takano and Watanuki, 1974)、両者の成因が関連していることが示唆される。日本国内の強酸性の温泉については、最近では佐藤 (2006) の解説がある。

2.3 上の岱地熱発電所

上の岱地区の地熱開発調査は同和鉱業株式会社により 1971 年以来周辺の広い範囲で行われた。その結果、上の岱地区が有望と判断され、1980 年より発電所の建設を目的とした大口径の調査井の掘削が開始された。1988 年に発電に必要な十分な量の水蒸気を得られることが確認され、1994 年から発電が開始された。現在では、約 1 km^2 の範囲で地下 1~2 km の深度から毎時 260 トンの地熱水が採取され、28,800 kW の発電が行われている。地熱水は 10 本の生産井から採取されるが、そのうちの半数の生産井からは熱水を伴わない水蒸気のみが得られ、残りの半数の生産井からも水蒸気の割合の多いものが得られる。全体としては水蒸気の割合が 85% である。熱水の化学組成は中性の Na-Cl 型であり、その Cl 濃度は $100\sim 300\text{ mg/l}$ である。しかし、この濃度は熱水と水蒸気が混合するものから地上で水蒸気を分離した残りの熱水についてのものであり、地下の高温のところでは熱水の割合が増えるので、実際はこの濃度よりも低濃度である。地下から採取された地熱水は、発電に使用された後はほぼ全量が地下に戻される。発電所建設のための調査結果は中ら (1987) 及び中・岡田 (1992) に詳しく報告されている。

3. 川原毛地獄の温泉や噴気の成因と泉質の経時変化

3.1 温泉および噴気の成因

湯尻川の河岸に湧出する強酸性の Cl-SO_4 型温泉については、著者らは、1985 年以来松葉谷・内田 (1990) で公表したのもも含めて温泉水の水素、酸素同位体比および一部について化学組成の測定を断続的に行ってきた。また、それ以前については、阿部ら (1979) により 1976 年の測定結果が、さらに以前のものとしては Takano and Watanuki (1974) による化学組成が報告されている。それらの測定結果は表 1 に示すとおりである。また、露天掘り跡地の噴気については、1987 年に 2ヶ所で、2001 年に 1ヶ所で水蒸気の水素、酸素同位体比を測定した (表 2)。これらの噴気は噴気口の温度がほぼ 100°C の弱いもので、水蒸気の他に二酸化炭素と硫化水素を含むが、塩化水素や二酸化硫黄は含まれない。例えば、試料 No. 1 と No. 3 には、二酸化炭素は $1.4\sim 1.6\%$ 含まれるが、塩化水素濃度は 0.001% 以下である。

図 2 は、川原毛地区の温泉水と噴気水蒸気の水素同位体比 (δD , SMOW) と酸素同位体比 ($\delta^{18}\text{O}$, SMOW) の関係をこの地域の天水 (河川水, 地下水) の関係 (松葉谷・内田, 1990) と合わせて示したものである。強酸性の Cl-SO_4 型温泉水の δD と $\delta^{18}\text{O}$ の関係は δD と $\delta^{18}\text{O}$ の両方が天水の値よりも高く、玉川温泉大噴の関係と類似する。玉川温泉大噴の成因は武藤・松葉谷 (2002) により詳細に議論されており、島弧火山の火山ガスと天水が混合したものと判断された。日本のような島弧火山地帯では火山ガス中の水蒸気は $\delta\text{D} = -15\sim -40\%$ 、 $\delta^{18}\text{O} = +6\sim +8\%$ の固有な同位体比を有し (例えば, Giggerbach, 1992; 松葉谷, 1996)、火山ガスと天水の混合で生じた地熱水の δD と $\delta^{18}\text{O}$ の関係は島弧火山ガスの関係と天水の関係を結ぶ直線上に並ぶ。また、火山ガスは一般に水蒸気の他に二酸化炭素、二酸化硫黄、硫化水素、塩化水素を含み、それが凝縮したり天水と混合して

Table 1 Hydrogen and oxygen isotopic ratios and chemical composition of strong acid Cl-SO₄ type hot spring water in the Kawarage area.

表 1 川原毛地獄の強酸性 Cl-SO₄型温泉水の水素、酸素同位体比ならびに化学組成.

NO.	採水日* ⁴	温度°C	pH	Cl, mg/l	SO ₄ , mg/l	δD, ‰	δ ¹⁸ O, ‰
1* ¹	1969. 9. 25	98	1.6	1869	1489		
2* ¹	"	94	1.6	1921	1599		
3* ¹	1970. 10. 5	94	1.6	1990	1585		
4* ¹	"	96	1.6	2077	1686		
5* ²	1976. 10. 4	89	1.4	2012	1411	-54.5	-7.03
6* ³	1985. 10. 31	98	1.4	2100		-56	-7.2
7* ³	"	87	1.2	2100		-58	-7.7
8* ³	"	87	1.2	2100		-57	-7.5
9	1987. 7. 17			2100		-56	-7.3
10	"			2100		-56	-7.4
11	1987. 10. 14	87	1.2	1800		-58	-7.6
12	1997. 6. 25	97				-57	-7.4
13	"	97				-55	-7.0
14	2000. 6. 16					-56	-6.9
15	"					-56	-7.7
16	2000. 8. 2	97	1.4	2300		-55	-7.2
17	"	97	1.4	2200		-56	-6.9
18	"	96	1.3	2300		-54	-7.0
19	2000. 11. 6					-53	-7.3
20	"					-53	-7.2
21	"					-54	-7.2
22	2001. 9. 21					-55	-6.9
23	2002. 8. 29					-55	-7.2
24	2003. 8. 28					-56	-7.4
25	2004. 8. 25					-55	-7.0
26	2005. 8. 11		1.3	2140	1090	-54	-7.2
27	2006. 8. 22		1.2	2310	1110	-53	-6.9

*1: Takano and Watanuki (1974)

*2: 阿部ら (1979)

*3: 松葉谷, 内田 (1990)

*4: 採水日が同じものは湧出口が異なる

Table 2 Hydrogen and oxygen isotopic ratios of fumarolic steam in the Kawarage area.

表 2 川原毛地獄の露天掘り跡地の噴気の水素、酸素同位体比.

NO.	採水日	温度°C	δD, ‰	δ ¹⁸ O, ‰
1	1987. 10. 14	101	-67	-10.6
2	"	97	-65	-10.6
3	2001. 10. 29		-68	-10.8

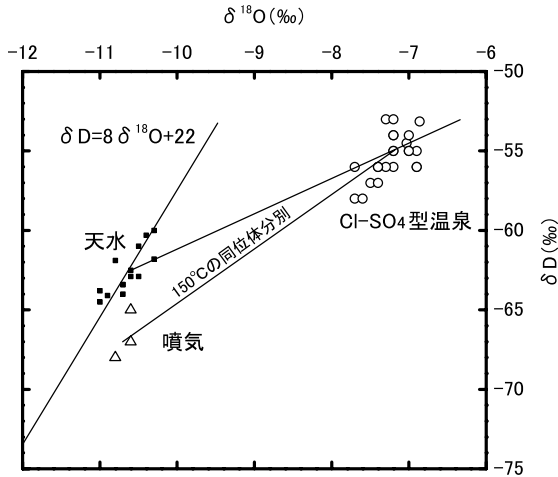


Fig. 2 δD vs. $\delta^{18}O$ plot of strong acid $Cl-SO_4$ type hot spring and fumarolic steam in the Kawarage area for a period from 1976 to 2006, and of meteoric water in the vicinity.

図 2 川原毛地獄の強酸性 $Cl-SO_4$ 型温泉水と噴気の 1976 年から 2006 年までの期間について、ならびに周辺の水天についての δD と $\delta^{18}O$ の関係。

(液相) と水蒸気 (気相) の間で $150^\circ C$ で生じる同位体分別 (14% , 3.5%) (Horita and Wesolowski, 1994) とほぼ一致する。また、火山ガスと天水の混合で生じた熱水が沸騰し、水蒸気が分離すると塩化水素と二酸化硫黄は熱水中に残留し、二酸化炭素と硫化水素の大部分は水蒸気相に移行する。これらのことから、この露天掘り跡地の噴気は、玉川温泉と同様に、上記の火山ガスと天水の混合で生じた地熱水が地下で $150^\circ C$ 位の温度で沸騰し、分離した水蒸気と判断される。 $150^\circ C$ の飽和水蒸気圧は 4.7 気圧であり、これは静水圧で約 $50 m$ に相当する。したがって、この沸騰は地表近くで起こっていると推定される。

3.2 泉質の経時変化

強酸性の $Cl-SO_4$ 型温泉水の水素、酸素同位体比は表 1 に示すように著者が観測を始めた 1985 年から今日まではほぼ一定であり、また阿部ら (1979) に示された 1976 年の測定値も 1985 年以降の測定結果の変動の範囲内である。また、 Cl 濃度についても全く同様であり、1985 年以降はほぼ一定で、1976 年 (阿部ら, 1979) および 1969 年, 1970 年 (Takano and Watanuki, 1974) もその変動の範囲内である。露天掘り跡地の噴気同位体比についても 1987 年と 2001 年の間で差は認められない (表 2)。

このように同位体比と化学組成が一定であるということは、これらの温泉や噴気の生成過程、すなわち島弧火山ガスと地下水の混合、およびそれにより生じた熱水の地下浅所での沸騰という過程が少なくとも過去 40 年間あるいはさらに古くから定常的に継続していたことを示すと考えられる。また、上の岱地熱発電所が運転を開始した 1994 年の前後でこれらの同位体比や化学組成に差が見られないことから、発電所において地下から地熱水を採取することが上記の定常的な過程に影響を与えていないと推定される。

液相 (熱水) が生じると、二酸化硫黄と塩化水素は液相に濃集し、硫酸と塩酸になり、強酸性の $Cl-SO_4$ 型地熱水となる。図 2 において強酸性 $Cl-SO_4$ 型温泉水の関係と天水の関係を結ぶ直線を同位体比の高いほうに延長すると、 $\delta^{18}O$ が $+6\%$ のところで δD は -25% 、あるいは $\delta^{18}O$ が $+8\%$ のところで δD は -21% となり、島弧火山ガスの範囲に到達する。したがって、この強酸性の $Cl-SO_4$ 型温泉水は島弧火山ガスと天水が混合したものと判断される。また、その混合の割合は、火山ガス成分が約 20% である。

露天掘り跡地の噴気については、測定例が少ないが、その水素、酸素同位体比は強酸性 $Cl-SO_4$ 型温泉水よりも平均して δD が約 12% 、 $\delta^{18}O$ が約 3.5% 低い。この関係は玉川温泉における大噴と周辺の噴気の関係 (武藤・松葉谷, 2002) とほぼ同じである。 δD が 12% 、 $\delta^{18}O$ が 3.5% という差は熱水

4. 泥湯地区の噴気や温泉水の成因

4.1 地すべり地区の噴気と噴湯

地すべり地区の噴気や噴湯については、地区の南側で以前から噴出していたものについては1987年と2000年に、また噴出場所が北側に移動した後のものについては2001年と2004年に調査を行った。それらの結果は表3に示すとおりである。それらの噴気や噴湯の水素、酸素同位体比の関係は、No.7の湯溜まりを除くと、図3に示すとおり1つの直線関係を示す。その直線は図3に示したこの地域の天水の平均値を通るが、川原毛の強酸性Cl-SO₄型温泉水の平均値からは明らかに外

Table 3 Hydrogen and oxygen isotopic ratios of steam and boiling water in the northern part of Doroyu area.

表3 泥湯温泉地すべり地区の噴気と噴湯の水素、酸素同位体比。

NO.	採水日	試料形状	温度℃	pH	$\delta D, \text{‰}$	$\delta^{18}O, \text{‰}$
1* ¹	1976.10.4	噴気, 凝縮水	98	5.2	-92.2	-17.05
2* ²	1987.10.28	噴気, 分離熱水		5.0	-55	-9.1
	"	噴気, 分離水蒸気			-81	-14.3
3	2000.8.2	噴湯	98	7.6	-46	-7.7
4	2001.10.29	噴気, 凝縮水			-74	-12.3
5	2004.5.26	噴湯	86	2.4	-58	-9.5
6	"	"	98	2.0	-47	-7.2
7	"	湯溜り	97	2.0	-37	-1.6

*¹: 阿部ら (1979)

*²: 松葉谷, 内田 (1990)

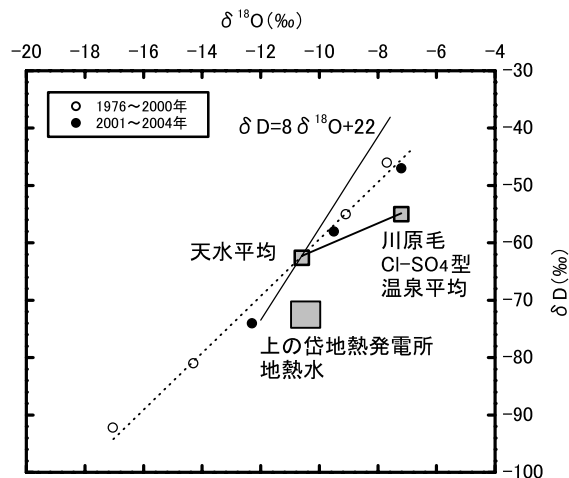


Fig. 3 δD vs. $\delta^{18}O$ of boiling water and steam in the northern part of Doroyu area for a period from 1976 to 2004. The extent of geothermal water used in the Uenotai geothermal power plant is also shown.

図3 泥湯温泉地区北側の地すべり地区内の噴気や噴湯の1976年から2004年までの δD と $\delta^{18}O$ の関係、および上の岱地熱発電所で使用される地熱水についての δD と $\delta^{18}O$ の範囲。

れ, また露天掘り跡地の噴気とも一致しない. 図 3 の δD と $\delta^{18}O$ の直線関係は傾きが約 5 であり, 熱水と水蒸気間の 110°C における水素同位体の分別 (24%) と酸素同位体の分別 (4.7%) (Horita and Wesolowski, 1994) の比 (5.1) とほぼ一致する. したがって, この直線関係は噴気が地表に噴出する直前に部分的に凝縮し, 熱水と水蒸気に分離する際の同位体分別によるものと推定される. その場合, 同位体比の高いものは熱水の割合が高く, 逆に低いものは水蒸気の割合の高いものである. また, 地下から上昇し噴気となる起源の地熱水の δD と $\delta^{18}O$ の関係はこの直線上のどこか 1 点に位置する. しかし, これらの噴気は水蒸気と熱水が混合して噴出したり, あるいは沸騰泉となっており, 水蒸気と熱水を完全に分離して採取することは困難である. したがって, 採取した試料について熱水と水蒸気の量比が明らかでなく, 起源地熱水の値を確定することは難しい.

この起源地熱水の成因については, その水素, 酸素同位体比が不明であり, したがって水の起源が明らかでないので, 確かなことは分からない. しかし, これらの噴気や噴湯の δD と $\delta^{18}O$ が示す直線がこの地域の天水の平均値を通ることから, この起源地熱水が天水を起源とするものであり, その水素, 酸素同位体比はこの地域の天水と類似したものである可能性が高い. また, これらの噴気は二酸化炭素と硫化水素を含むが, 塩化水素や二酸化硫黄を含まない. 例えば, これらの噴湯の Cl^- 濃度は 2 mg/l 程度であり, また噴気 (1987 年) の二酸化炭素濃度は 1.2% であるが, 塩化水素濃度は 0.001% 以下である. このような化学組成は上の岱地熱発電所で使用される天水起源の地熱水と類似する. このことから, この地すべり地区の地熱水が天水起源であることが示唆される. ところが, 上の岱地熱発電所で使用されている地熱水の δD と $\delta^{18}O$ の関係はこの地域の天水の関係と異なる. 上の岱地熱発電所の生産井から得られる地熱水は坑井に流入する時点で水蒸気であったり, 水蒸気と熱水の混合したものであり, それらの測定値から起源の地熱水の δD と $\delta^{18}O$ の関係は図 3 に示す範囲であると推定される (中・岡田, 1992; 秋田地熱エネルギー(株), 未発表). この起源地熱水の δD 値がこの地域の天水の平均値よりも 5~10% 低い理由はまだ明らかでないが, 泥湯地区と上の岱地区で地熱水の δD 値が異なることは, 少なくとも両者が同一の地熱水ではない可能性が高い. 両者とも地表から浸透する天水を起源とするとしても, 地下での循環経路, 岩石との反応, 地表まで上昇する間に起こる沸騰, 地下水との混合などの過程が各々異なるのではないかと推定される.

この地すべり地区内で噴気や噴湯の位置が 2000 年頃より南側から北側に 100 m ほど移動したことについては, その前後で地熱水の δD と $\delta^{18}O$ の関係には全く差がないことから, 単に噴気の出口が移動したにすぎないと判断される. 南側で数十年以上にわたり噴気活動が続いた結果, 地熱水の上昇通路の目詰まりが進み, 地熱水が上昇し難くなった結果, 上昇し易いところを求めて北側に移動したものと推定される. この地すべり地区全域が熱水変質を受けているということは, 今回のような噴気の出口の移動は過去の長期間にわたって繰り返し起こっていたことを示唆する. 北側の新たに噴気活動が始まった場所は笹やかん木の植生に覆われていたところであり, 今回噴気活動が始まる前は植生が回復する時間, 恐らく数十年以上の間噴気活動が停止していたものと考えられる. したがって, 今回のような噴気の移動は 100 年というような時間の単位で過去にいく度となく繰り返されてきたのではないかと推定される. なお, 2004 年の噴湯の pH が低いことは, そのような出口の移動により噴気に含まれる硫化水素が酸化されたことによると推定される.

No. 7 の湯溜りが高い同位体比を示すことは蒸発の際の動的同位体効果による. すなわち, 湯溜りでは流入 (湧出) する地熱水の量と流出と蒸発の量を合せたものが均り合っている. その場合, 蒸発量が流出量と比べて相当量であると, 蒸発の際の動的同位体効果 (例えば Matsubaya and Sakai, 1978) により $\delta^{18}O$ が蒸発の際の平衡同位体分別よりもさらに高くなる.

この噴気活動に対する上の岱地熱発電所の影響の有無については, 確かな判断を下すのに十分な

経時変化の観測がなされていないが、操業開始前の1987年と操業開始後の2000～2004年間で特に差が見られないので、恐らく地熱発電所の影響はないと判断される。

4.2 川の湯および目洗いの湯

川の湯および目洗いの湯の同位体比等についての調査結果は表4に示すとおりであり、 δD と $\delta^{18}O$ の関係は図4に示すとおりである。それらは、全体としては、川原毛の強酸性Cl-SO₄型温泉と天水の混合関係（線A）と泥湯の地すべり地区の噴気・噴湯が示す熱水と水蒸気同位体分別の関係（線B）の間に位置する。しかし、川の湯について細かく見ると1976年と1987年の2点は川原毛のCl-SO₄型温泉と天水の混合関係にほぼ合致する。また、この2試料のCl濃度は2000年以後のものよりも高い。しかし、この1976年と1987年の温泉が川原毛のCl-SO₄型と同類の地熱水がさらに天水で希釈されたと考えると、その混合率が同位体比からは約30%であるのにCl濃度からは80%と大きく異なり、矛盾する。同位体比の関係からは、むしろ、川の湯が川原毛と同様な火山ガスを含む地熱水と泥湯の地すべり地区の地熱水で熱水の割合の高いもの（ $\delta D = -55 \sim -57\text{‰}$, $\delta^{18}O = -9.0 \sim -9.5\text{‰}$ ）が混合したと考えると、 δD と $\delta^{18}O$ の関係が2000年以後、線Bに近づくことを火山ガスを含む地熱水の混入率が小さくなったことで説明できる。しかし、その場合でも、川の湯の1976年と1987年のCl濃度が川原毛のCl-SO₄型温泉の15～20%であるので、川の湯へ混

Table 4 Hydrogen and oxygen isotopic ratios and chemical composition of Kawanoyu and Mearainoyu in the Doroyu area.

表4 泥湯温泉、川の湯および目洗いの湯の水素、酸素同位体比ならびに化学組成。

NO.	採水日	温度℃	pH	Cl, mg/l	SO ₄ , mg/l	δD , ‰	$\delta^{18}O$, ‰
川の湯							
1*1	1976.10.3	83	5.5	307	144	-58.0	-8.04
2*2	1987.10.14	77	5.6	370		-59	-8.4
3	2000.8.2	77	4.5	273		-56	-8.8
4	2000.11.6					-56	-8.6
5	2000.12.4					-57	-8.7
6	2000.12.22					-55	-8.7
7	2001.8.30					-57	-8.6
8	2006.8.22		3.7	261		-55	-8.4
目洗いの湯							
9	1985.10.31	63	1.8	340		-58	-9.5
10	1987.10.14	62	1.8	230		-60	-9.5
11	2000.8.2	62	2.0	93		-61	-9.8
12	2000.11.6					-59	-9.7
13	2001.8.30					-58	-9.5
14	2002.8.26					-60	-9.2
15	2003.8.28					-59	-9.7
16	2004.8.25					-58	-9.3
17	2005.8.11		1.7	120	1380	-60	-10.0
18	2006.8.22		1.8	160	1160	-60	-9.5

*1: 阿部ら (1979)

*2: 松葉谷, 内田 (1990)

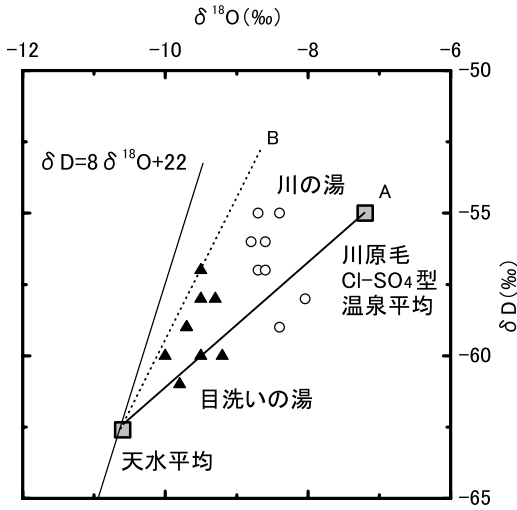


Fig. 4 δD vs. $\delta^{18}O$ of the Kawanoyu and Mearainoyu, two natural hot springs in the southern part of Doroyu area. The lines A and B are the mixing line of Cl-SO₄ type hot spring in the Kawarage area and the local meteoric water (Fig. 2), and the line of steam-hot water separation in boiling in the Doroyu area (Fig. 3), respectively.

図 4 泥湯温泉地区の川の湯および目洗いの湯の δD と $\delta^{18}O$ の関係。線 A は図 2 に示した川原毛の Cl-SO₄ 型温泉水と天水の混合関係を示す。線 B は図 3 に示した泥湯温泉地すべり地区の噴気や噴湯の関係を示す。

のように思われる。これらの噴気活動では、現在は水蒸気はほとんど見られず、二酸化炭素と硫化水素が空气中に拡散するように出ている。その周辺には硫黄が堆積しており、見たところは火山ガスの活動のように思われる。この地区にも川原毛側と同様にかかなり以前から火山ガス起源の Cl-SO₄ 型の温泉と地下でそれから沸騰、分離した水蒸気の噴気活動があり、その噴気から硫黄が堆積していたとすると、現在はその活動がほぼ終末期に近づいていることで川の湯や目洗いの湯の変化を説明することができる。

5. ま と め

泥湯および川原毛地区の温泉や噴気について水の水素、酸素同位体比ならびに化学組成から以下のことが推定される。川原毛の強酸性 Cl-SO₄ 型温泉水は火山ガスと天水が 1 対 4 の割合で混合した熱水であり、露天掘り跡地の噴気はその熱水から地下で 150°C 位の温度で沸騰、分離した水蒸気である。泥湯地区北側の地すべり地区の噴気や噴湯は天水起源であり、その水素、酸素同位体比はこの地域の天水の平均値と類似するが、隣接する上の岱地熱発電所の天水起源の地熱水とは明らかに異なる。川の湯および目洗いの湯は地すべり地区と同様な天水起源の地熱水と、川原毛地区と同様な火山ガス起源の地熱水が混合したものの可能性が高い。

以上のように、この地域では水の起源あるいは成因の異なる 3 種類の地熱水が 1~2 km の距離の範囲内に存在する。このことから、これらの地熱水が各々局在する縦型の通路を通して、地表に到

入する火山ガスを含む地熱水の Cl 濃度が初めから低かったと考えざるを得ない。

目洗いの湯は、 δD と $\delta^{18}O$ および Cl 濃度が川の湯よりも低いことから川の湯がこの地域の天水の平均値と類似した同位体比の水で希釈されたものと考えられる。天水の平均値と類似した同位体比の水としては、天水そのものか、あるいは上記の地すべり地区の起源地熱水の 2 つの可能性が考えられる。なお、川の湯が弱酸性であるのに対して、目洗いの湯が強酸性であることは、地すべり地区の 2004 年の噴湯と同様に噴気に含まれる硫化水素が地下浅所で酸化されたことによると考えられる。目洗いの湯でも、Cl 濃度が 1985 年と 1987 年に比べて最近では著しく低くなっており、川の湯について火山ガス起源の地熱水の寄与が減少したと矛盾しない。

このような火山ガス起源の地熱水の寄与が低下したことが、上の岱地熱発電所の操業 (1994 年以後) と関係するか否かについては、現在得られている調査結果から判断することは難しい。ただ、川の湯や目洗いの湯の南側 (川原毛寄り) に点在する弱い噴気活動が何に起因するかを知ることはこの問題を理解することに有益

達すると考えるのが妥当である。上の岱地熱発電所の坑井が地下2 kmまで達しているの、そのような縦型の通路は少なくとも2 km以浅では相互に独立したものと考えられる。火山ガスについては地下のマグマからの供給通路として縦型の割れ目が考えられる。しかし、天水起源の地熱水については、縦型の通路が地下2 kmあるいはそれ以深まで達しているとすると、地表から浸透する天水が恐らく数 kmあるいはさらに深いところを循環し、局在する縦型の通路を通して上昇するという循環過程がなければならない。そのような循環過程が存在するか否か今後解明しなければならない問題である。

なお、地熱発電所が周辺の地熱活動に与える影響については、泥湯地区および川原毛地区については明らかなものは認められない。起源や成因の異なる地熱水が各々独立した縦型の通路を上昇してくる場合、相互の影響はほとんどないと考えられる。

引用文献

- 阿部喜久男, 茂野 博, 池田喜代治, 安藤直行, 後藤隼次 (1979): 秋田県小安・泥湯・秋の宮地熱地域の熱水・蒸気凝縮水の溶存化学組成, 水素・酸素同位体組成およびトリチウム濃度, 地質調査所月報, **30**, 177-197.
- Horita, J. and Wesolowski, D.J. (1994): Liquid-vapor fractionation of oxygen and hydrogen isotopes of water from the freezing to the critical temperature, *Geochim. Cosmochim. Acta*, **58**, 3425-3437.
- Giggenbach, W.F. (1992): Isotopic shifts in waters from geothermal and volcanic systems along convergent plate boundaries and their origin, *Earth Planet. Sci. Lett.*, **113**, 495-510.
- 松葉谷治 (1996): 熱水の水素・酸素同位体比から見た日本の地熱系, *月刊地球*, **16**, 154-158.
- 松葉谷治 (1997): 秋田県の温泉の同位体組成および化学組成の特徴, *温泉科学*, **47**, 104-110.
- Matsubaya, O. and Sakai, H. (1978): D/H and $^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$ fractionation factors in evaporation of water at 60 and 80°C. *Geochem. Jour.*, **12**, 121-126.
- 松葉谷治, 内田秀明 (1990): 小安・泥湯・秋の宮地域の地熱水の水素と酸素の同位体比, 秋田大学鉱山学部資源地学研究施設報告, **55**, 1-8.
- 武藤倫子, 松葉谷治 (2002): 秋田県玉川温泉における地熱水の成因及び地球化学的経年変動, *地球化学*, **36**, 81-88.
- 中 東策, 竹内律夫, 岩田 峻, 福永 明 (1987): 上の岱地区における地熱探査と開発調査, *地熱*, **24**, 113-135.
- 中 東策, 岡田 博 (1992): 上の岱地熱地帯の探査と開発, *資源地質*, **42**, 223-240.
- 野田徹郎 (1994): 冷戦から土俵上の熱戦へー地熱発電と温泉の共存のためにー, *地熱エネルギー*, **19**, 13-29.
- 佐藤幸二 (2006): 台湾および日本における高温酸性泉, *温泉科学*, **55**, 188-194.
- Takano, B. and Watanuki, K. (1974): Lead-bearing barite from Kawarage mine, Akita Prefecture, *Scientific Papers of College of General Education, University of Tokyo*, **24**, 25-31.
- (2006年9月7日 日本温泉科学会第59回大会で一部発表)