

南九州地熱水中のヒ素、アンチモンおよび水銀濃度の化学的研究

坂元隼雄

〒 891-0132 鹿児島市七ツ島 1-1-10 (一財) 鹿児島県環境技術協会

■ はじめに

近年、地熱エネルギーの開発に伴い地熱水(熱水、温泉水など)中に含まれる各種成分が環境問題との関連において注目されている。ヒ素、アンチモンおよび水銀などもその中に入る。それらの濃度、存在形態、分布などに関する情報は十分ではない。

ヒ素は有害物質の一つであり地熱開発に伴う公共水域への温排水の排出基準 0.1 mg/l (100 μ g/l) を解決する手段として還元井を掘削し、地下還元が広く行われている。また、高濃度のヒ素を除去するための除去技術の研究も行われてきた(増子・渋田, 1976; 坂元ほか, 2000)。

ヒ素と挙動を共にすることが考えられるアンチモンは、その濃度はヒ素に比較して低く、分析の困難さもありその報告は少ない。

1969年 Holak (Holak, 1969) がヒ素の水素化物一原子吸光度法を開発し、山本らにより ppb-ppt (μ g/l-ng/l) レベルのヒ素、アンチモンの分析が可能となった (Yamamoto et al., 1981; Sakamoto et al., 1988; Ozaki et al., 2004)。

水銀はヒ素やアンチモンに比べてその濃度は低く分析は困難であった。しかし、水銀が気化し易いことや熱によって分解して水銀蒸気を発生する性質を利用した新しい分析法が開発された。水

銀を還元気化して冷原子吸光度や還元または加熱気化した水銀蒸気を金などとアマルガムをつくらせて濃縮し、その後で加熱気化—冷原子吸光度で測定する方法が広く用いられている(坂元・鎌田, 1981; Sakamoto et al., 1997)。

日本の酸性温泉水中のヒ素、鉛濃度については、南らの報告がある(南ほか, 1958)。また、水銀濃度については、中川(1974, 1982)や粟屋ほか(1967)の報告がある。地熱開発に伴って地熱地帯から流出する地熱水中のヒ素(興良, 1979)、アンチモンおよび水銀濃度は測定されているが、その結果が公表されることは少ない。

本研究は、南九州の地熱地帯(温泉を含む)から採取した地熱水(熱水、温泉)中のヒ素、アンチモンおよび水銀濃度を測定した。それらの成分の濃度、存在形態、相互の関係、分布などについて詳述する。

なお、具体的な調査地点の名称は個人情報保護法等の関係から地域名だけに留めることにする。また、本研究の調査期間は1981年11月から2006年1月までの地熱水(熱水、温泉)中のヒ素、アンチモンおよび水銀等の調査結果である。それらの結果を報告する。

■ 南九州(鹿児島県)地熱水(温泉)の概況

鹿児島県は、日本本土最南端に位置し、総面積は9,187 km²と九州第1位である。また県土の実質延長は南北600 kmに達し、多くの離島を有している。県内には、北は霧島から南は諏訪瀬島まで7つの活火山が連なっている。それらの火山の近傍には地熱水(熱水、温泉)が湧出している。

Sakamoto, H. 2017. Chemical study on arsenic, antimony and mercury concentration in southern Kyushu geothermal waters. *Nature of Kagoshima* 43: 465-478.

☑ Foundation of Kagoshima Environmental Research and Service, 1-1-10 Nanatsujima, Kagoshima 891-0132, Japan (e-mail: sakamfh@yahoo.co.jp).



図1. 南九州地熱水の採取地点.

試料の採取地点

南九州（鹿児島県）の地熱水（熱水，温泉）は平成27年3月末で、源泉数2,771本（大分に次いで2位）、湧出量157トン/分（大分、北海道に次いで3位）となっている。これらの地熱水（熱水，温泉）の開発地の中から霧島，栗野，鹿児島，桜島，垂水，湯之元，吹上，山川，指宿などを対象とする。それらの試料の採取地点は図1に示す。また，以後，熱水または温泉と表記すべき箇所は，一部を除き「地熱水」と略記する。

試料の採取と保存

ヒ素・アンチモン分析の試料は，ポリエチレンビン（前もって約3 mol/l 硝酸に2週間以上入れて溶出成分を溶出）を水洗して使用する。採取した試料は短時間の間に試料1ℓに対して塩酸（精密分析用）（35%）10 mlを加え保存し，分析する。

水銀分析の試料は，テフロンパッキング付きの硬質ガラスビン（ヒ素・アンチモン分析用の容器と同様に洗浄）に採取した試料は短時間内に試

料1ℓに対して硫酸（有害金属分析用）（97%）（1:1）10 mlを加え保存し，分析する。

ヒ素・アンチモン・水銀の分析方法

ヒ素（III+V）の分析

分析試料中のヒ素量が0.5 μ g以下になるように水で調整した試料40 mlを反応容器に入れる。この容器に35%塩酸（精密分析用）10 mlと40%ヨウ化カリウム溶液5 mlを加え，水素化物発生装置にセットする。その後，反応容器の中をスターラーで攪拌しながら3%水素化ホウ素ナトリウム溶液1 mlをシリンジを用いて20秒間かけて注入する。3%水素化ホウ素ナトリウム溶液を加えて70秒後に反応容器の中に窒素ガスを通気し，発生した水素化物（AsH₃）を原子吸光装置の水素—窒素フレームで原子化し，波長193.7 nmでヒ素（III + V）を測定する。

ヒ素（III）の分析

ヒ素（III）の分析は，試料溶液を上記の反応容器に入れ，水で調整した試料40 mlとする。これに40%クエン酸1 mlと1Mクエン酸三ナトリウム溶液5 mlを加えpH 5–6とした後，水素化物発生装置にセットし，ヒ素（III + V）と同様に操作してヒ素（III）を測定する。

アンチモン（III+V）の分析

分析試料中のヒ素量が0.5 μ g以下になるように水で調整した試料40 mlを反応容器に入れる。この容器に35%塩酸5 mlと40%ヨウ化カリウム溶液2.5 mlを加え，水素化物発生装置にセットする。その後はヒ素（III + V）と同様に操作し，波長217.6 nmでアンチモン（III + V）を測定する。

アンチモン（III）の分析

アンチモン（III）の分析は，試料溶液を上記の反応容器に入れ，水で調整した試料40 mlとする。これに40%クエン酸2.5 mlを加えpH 2とし，アンチモン（III + V）と同様に操作する。

溶解性の無機水銀と総水銀の分析

(a) 溶解性の無機水銀の分析 — 分析試料 200 ml を反応容器に入れ (1 : 1) 硫酸 2 ml, 10% 塩化スズ (II) 溶液 5 ml を加え, 硫酸酸性の過マンガン酸カリウム溶液で洗浄して水銀を除去した窒素ガスを 0.5 l/min の流速で 10 分間通気し, 還元気化した水銀蒸気を多孔質金捕集剤 (約 80 mg) に濃縮する. その後, 捕集剤をヒーターで加熱し, 発生した水銀蒸気を冷原子吸光度法 (水銀ランプの共鳴線吸収) で測定する.

(b) 溶解性の総水銀 (無機水銀 + 有機水銀等) の分析 — 分析試料 200 ml を反応容器に入れ, 10 M 水酸化ナトリウム溶液 10 ml, 1,000 mg/l 硫酸銅 (II) 溶液 2 ml, 10% 塩化スズ (II) 溶液 5 ml を加え, 上記 (a) と同様に操作する.

■ 結果と考察

地熱水中のヒ素およびアンチモンの存在形態

地熱水を採取し, 実験室に持ち帰り, ヒ素 (III), ヒ素 (III+V) 濃度の経日変化を追跡した結果を表 1 に示す. 表 1 から, ヒ素 (III) 濃度は採取後の放置日数に伴って急激な減少を示す試料がある. 一方, 塩酸を加えた試料はヒ素 (III+V) 濃度は放置してもほぼ一定の値が得られている. また, アンチモンについてもほぼ同様な結果を得ている (坂元ほか, 2000). ヒ素 (III), アンチモン (III) 濃度の分析には試料中の成分が影響 (溶存酸素など) する. また, 塩酸を加えることによ

て発生する硫化水素などが生成し成分の存在形態は複雑になるので, 塩酸を加えた後できるだけ速やかに分析する必要がある. 本研究では, ヒ素 (III + V) とアンチモン (III + V) を分析対象とする.

地熱水中の水銀の存在形態

地熱水中の溶解性の無機水銀 (以後は無機水銀と略記する) 濃度, 溶解性の無機水銀 + 有機水銀等 (以後は総水銀と略記する) の濃度は表 2 と 3 に示す. また, これらの算術平均値と幾何平均値からは一部の試料を除けば総水銀の濃度が高くなっている. この原因としては, 懸濁物や硫化物などとして吸着していた水銀が還元力の大きいアルカリ性で水銀が気化したことや, 硫化物イオンなどの妨害が小さくなることなどが関わっていると考えられる (坂元ほか, 1999).

地熱水中のヒ素, アンチモンおよび水銀濃度

南九州の地熱地帯から採取した地熱水中のヒ素, アンチモンおよび水銀濃度を測定した. その採取地点は図 1 に示す. また, それらの分析結果は表 2 に示す. 各地点の地熱水の採取回数は, 場所によって多寡があるので採取地点ごとの平均値を求める. これらの成分濃度等の平均値は算術平均値と幾何平均値がある. 自然界における物質 (もの) 分布は対数正規分布であると考えられている. そこで, 本研究では幾何平均値をもって以後の議論をする.

表 1. 地熱水採取後のヒ素 (III) とヒ素 (III+V) 濃度の推移.

試料	採取後の日数					
	1 日		10 日		30 日	
	As (III) 濃度 $\mu\text{g/l}$	As (III + V) 濃度 $\mu\text{g/l}$	As (III) 濃度 $\mu\text{g/l}$	As (III + V) 濃度 $\mu\text{g/l}$	As (III) 濃度 $\mu\text{g/l}$	As (III + V) 濃度 $\mu\text{g/l}$
A	80.4	225	7.0	224	5.0	218
B	31.4	60.8	2.4	60.4	2.0	59.4
C	0.9	1.8	1.0	2.0	0.9	1.7
D	70.3	116	70.0	116	74.0	92.0
E	70.0	116	42.0	72.0	29.0	35.0

A ~ D : 地熱水 1 リットルに 35% 塩酸 (精密分析用) 10 ml を加えた試料.

E : 塩酸 (精密分析用) を加えていない D と同じ試料.

($\mu\text{g/l}$: mg/l の千分の 1 小さい単位)

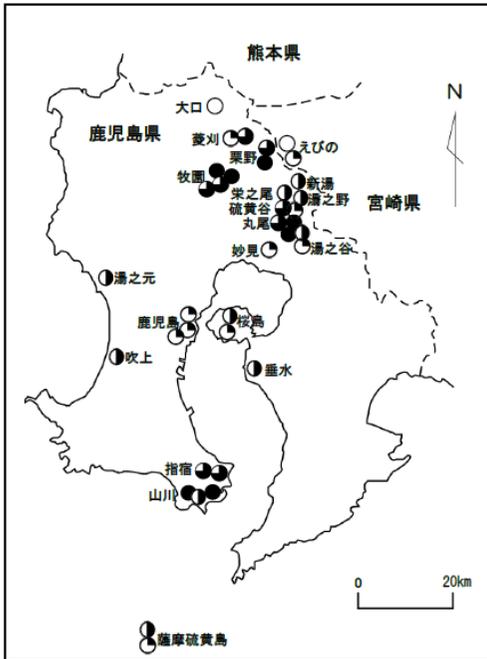


図2. 南九州地熱水の温度 (°C) の分布。
○ <40.0 ; ◐ 40.1-50.0 ; ◑ 50.1-60.0 ; ◒ 60.1-70.0 ; ● 70.1<

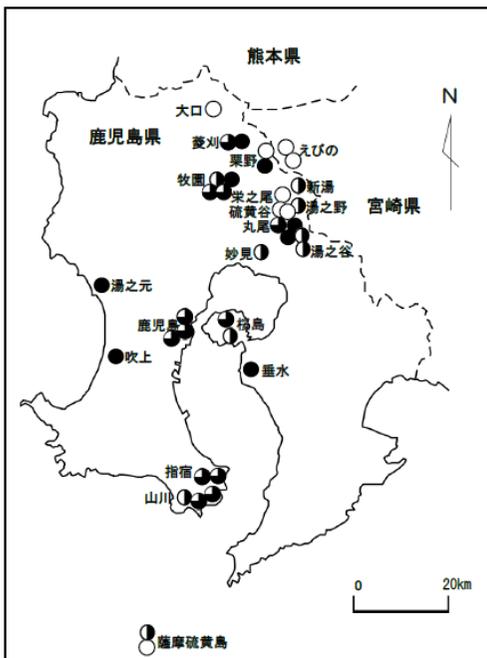


図3. 南九州地熱水のpHの分布。
○ <3.5 ; ◐ 3.6-5.0 ; ◑ 5.1-6.5 ; ◒ 6.6-8.0 ; ● 8.1<

表2に示す地熱水中の各種成分〔温度、pH、ヒ素 (III + V)、アンチモン (III + V)、無機水銀および総水銀〕は試料採取地点ごとの試料数が異なるので、採取地点ごとの各種成分等の濃度と幾何平均値を整理したものを表3に示す。表3のAは地熱水の採取地点の分析値、Bは地熱水採取地区ごとの幾何平均値を示す。図4-1から図4-4の各種成分等の分布図はBの値を用いたものである。

また、南九州地熱水中の温度、pH、ヒ素 (III + V)、アンチモン (III + V) および水銀 (無機、総水銀) 濃度の範囲、算術平均値、幾何平均値 (表2と3) を整理したものを表4に示す。

地熱水の温度と pH

表3のBに示す地熱水の温度の分布は図2に示す。丸尾、牧園、栗野や山川などに高温 (60°C を超える) のものが存在している。また、地熱水のpHの分布は図3に示す。表1に示すpHの濃度範囲は1.7-9.9と広い範囲に渡っている。本調査の地熱水は中性 (pH 5-7程度) のものが多数を占めている。特にpHが3以下の酸性泉は霧島火山地域や薩摩硫黄島などの限られた場所に存在していることを示している。

地熱水中の各種成分〔温度、pH、ヒ素 (III + V)、アンチモン (III + V)、無機水銀および総水銀〕はその地域の地質が影響を及ぼすことが知られている。火成岩中のヒ素、アンチモンおよび水銀の濃度と比較することにする。火成岩中のヒ素、アンチモンおよび水銀の平均濃度は、それぞれ1.5 mg/kg、0.2 mg/kg、0.08 mg/kgとされている。これらの成分比 (As/Sb、Sb/Hg、As/Hg) の重量比 As/Sbは7.5、Sb/Hgは2.5、As/Hgは19である。

表4から地熱水中のヒ素、アンチモンおよび総水銀濃度の平均値 (幾何平均値) はそれぞれ、19.8、2.4、5.3である。単純にこれらの成分の地熱水中のAs/Sb、Sb/Hg、As/Hgの重量比を計算すると、それぞれ8.3、453、3,740になる。

綿抜ほか (1975) は秋田県の玉川温泉、群馬県草津温泉のAs/Sbの重量比として100、50と報

表2. 南九州地熱水中のヒ素、アンチモンおよび水銀濃度等の分析結果.

整理 番号	採取地点	採取年月日	温度 ℃	pH	ヒ素 (III) μg/l	ヒ素 (III+V) μg/l	アンチモン (III) μg/l	アンチモン (III+V) μg/l	無機水銀 ng/l	総水銀 ng/l	硫化水素 mg/l
1	えびの-1	1981.11.11	40.5	2.2	-	15.4	-	0.2	5.0	11.5	-
2	えびの-1	1982.03.14	39.0	2.3	-	41.5	-	0.7	2.8	5.0	-
3	えびの-1	1982.09.12	40.5	2.3	0.1	10.4	-	0.2	11.7	24.5	-
4	えびの-1	1983.08.26	39.5	2.4	-	10.7	-	0.3	10.5	13.5	-
5	えびの-1	1983.11.25	37.5	2.4	-	7.3	-	0.2	5.5	7.1	-
6	えびの-1	1986.11.28	36.0	2.3	<0.1	13.3	-	0.2	13.8	25.3	-
7	えびの-1	1987.10.13	37.2	2.3	<0.1	4.0	-	<0.1	10.5	14.5	-
8	えびの-1	1989.09.08	38.6	2.5	-	8.2	-	<0.1	35.3	40.7	-
9	えびの-1	1989.11.08	39.6	2.3	<0.1	9.7	<0.1	<0.1	30.6	40.5	-
10	えびの-1	1990.02.05	35.4	2.5	<0.1	35.8	<0.1	<0.1	21.0	30.3	-
11	えびの-1	1990.01.14	39.9	2.3	-	9.8	-	-	10.1	12.6	-
12	えびの-1	1990.07.14	39.9	2.3	-	9.8	-	-	9.8	12.6	-
13	えびの-1	1990.11.13	51.2	2.2	-	51.0	-	-	4.8	9.5	-
14	えびの-1	1991.08.02	37.0	2.5	-	9.4	-	-	39.0	43.6	<0.8
15	えびの-1	1991.11.22	37.0	2.4	-	11.7	-	-	30.8	110	-
16	えびの-1	2005.07.27	33.6	3.2	-	10.0	-	<0.1	0.4	0.4	-
17	えびの-2	1981.11.11	56.0	1.9	-	60.5	-	1.0	1.3	5.3	-
18	えびの-2	1982.01.27	45.8	1.9	-	47.3	-	1.0	1.3	1.7	-
19	えびの-2	1982.03.14	49.0	1.7	-	45.7	-	1.4	2.5	9.2	-
20	えびの-2	1982.09.12	58.5	1.8	0.4	60.8	-	0.9	9.4	24.9	-
21	えびの-2	1983.08.26	57.8	1.9	-	73.4	-	1.0	5.0	9.7	-
22	えびの-2	1983.11.25	46.0	2.0	-	75.6	-	0.8	8.1	6.8	-
23	えびの-2	1986.11.28	38.5	2.3	0.8	15.0	-	0.4	3.9	4.5	-
24	えびの-2	1987.07.29	89.0	2.1	5.2	6.4	-	0.3	6.4	9.4	-
25	えびの-2	1987.10.13	58.5	2.0	0.3	36.8	-	0.5	6.6	7.1	-
26	えびの-2	1989.09.08	59.2	2.2	-	35.8	<0.1	0.2	9.6	9.0	-
27	えびの-2	1990.01.14	54.4	2.1	-	7.4	-	-	7.1	8.0	-
28	えびの-2	1990.07.14	39.9	2.1	-	7.4	-	-	7.1	7.7	-
29	えびの-2	1990.11.13	39.2	2.2	-	9.0	-	-	8.2	9.5	-
30	えびの-2	1991.08.02	58.5	2.3	-	24.8	-	-	4.1	5.2	<0.8
31	えびの-2	1991.11.22	37.0	2.1	-	68.5	-	-	1.0	4.0	-
32	えびの-2	2005.07.27	34.3	1.9	-	7.10	-	-	1.3	1.5	-
33	新湯-1	1989.09.08	60.1	4.7	-	1.2	-	<0.1	2.0	14.1	-
34	新湯-1	1989.11.08	66.1	5.6	-	1.3	-	<0.1	2.3	9.7	-
35	新湯-1	1990.11.13	48.2	4.4	-	1.3	-	<0.1	3.8	5.1	-
36	新湯-1	1999.04.29	64.4	5.6	-	1.3	-	<0.1	2.4	9.0	36.5
37	新湯-2	1989.09.08	54.0	5.8	-	1.4	-	<0.1	5.2	17.6	-
38	新湯-2	1989.11.08	59.1	6.5	-	1.4	-	<0.1	8.9	12.3	10.0
39	新湯-3	1989.09.08	41.3	3.3	-	1.2	-	<0.1	1.3	9.3	-
40	新湯-3	1989.11.08	36.6	3.4	<0.1	1.0	<0.1	<0.1	7.5	10.8	7.5
41	新湯-3	1990.01.14	50.8	5.3	-	0.8	-	<0.1	4.0	4.7	-
42	新湯-3	1990.07.14	50.8	5.3	-	0.5	-	<0.1	4.0	8.7	-
43	新湯-3	1990.11.13	46.5	5.1	-	0.8	-	<0.1	4.4	6.7	-
44	湯之野	1989.08.10	57.0	5.1	-	0.7	-	<0.1	0.2	17.0	1.0
45	湯之野	1989.08.10	58.5	5.9	-	0.5	-	<0.1	10.5	22.0	1.0
46	栄之尾-1	1989.08.10	46.0	3.3	0.34	172	-	1.1	0.8	11.7	0.3
47	栄之尾-2	1989.08.10	65.0	3.1	0.48	82.0	-	0.9	1.3	14.5	6.1
48	栄之尾-2	1991.08.02	63.7	3.2	-	94.1	-	-	0.4	1.8	3.0
49	栄之尾-2	1991.11.22	60.4	3.2	-	10.3	-	-	0.1	4.3	-
50	栄之尾-2	1994.01.19	61.2	2.8	-	23.2	-	-	0.3	0.3	-
51	栄之尾-2	2005.07.27	64.2	2.3	-	95.0	-	1.3	0.3	0.3	-
52	硫黄谷-1	1982.01.27	58.3	3.0	-	86.3	-	0.1	3.2	8.5	-
53	硫黄谷-1	1982.03.13	58.5	3.1	-	88.2	-	0.5	2.5	4.7	-
54	硫黄谷-1	1982.09.12	60.0	3.2	-	235	-	0.1	1.1	3.6	-
55	硫黄谷-1	1983.08.26	61.6	3.2	-	134	-	0.4	4.4	8.4	-
56	硫黄谷-1	1983.11.25	50.7	3.3	-	43.2	-	0.1	3.3	3.4	-
57	硫黄谷-1	1983.11.25	61.3	3.2	-	104	-	0.1	3.5	9.6	-
58	硫黄谷-1	1987.07.29	66.1	3.1	18.0	205	-	0.1	1.2	7.7	-
59	硫黄谷-1	1987.10.13	64.0	2.9	108	238	-	0.2	1.3	4.9	-
60	硫黄谷-1	1989.08.10	69.0	3.1	-	130	-	1.5	2.0	10.4	1.0

表2. 南九州地熱水中のヒ素, アンチモンおよび水銀濃度等の分析結果(続き).

整理 番号	採取地点	採取年月日	温度 ℃	pH	ヒ素(III) μg/l	ヒ素(III+V) μg/l	アンチモン(III) μg/l	アンチモン(III+V) μg/l	無機水銀 ng/l	総水銀 ng/l	硫化水素 mg/l
61	硫黄谷-1	1989.09.08	70.3	3.2	-	271	-	1.6	0.4	15.3	-
62	硫黄谷-1	1989.11.08	60.2	3.0	-	172	-	1.0	0.4	5.6	-
63	硫黄谷-1	1991.08.02	68.4	3.2	-	250	-	-	1.0	2.2	<0.8
64	硫黄谷-1	1991.11.22	64.0	3.2	-	168	-	-	3.8	5.0	-
65	硫黄谷-1	2005.07.27	65.3	2.3	-	280	-	0.6	0.3	0.4	-
66	硫黄谷-1	1986.11.28	54.6	3.1	92.8	130	-	0.5	3.3	5.3	-
67	硫黄谷-2	1989.08.10	37.0	3.3	-	9.9	-	0.4	2.7	14.4	0.3
68	硫黄谷-2	1990.11.13	63.0	3.1	-	11.5	-	0.4	0.9	6.4	-
69	丸尾-1	1981.12.06	76.0	6.5	-	3.8	-	<0.1	2.7	5.7	-
70	丸尾-1	1982.01.27	77.2	6.6	-	2.3	-	<0.1	0.4	2.5	-
71	丸尾-1	1982.03.13	73.8	6.9	-	2.3	-	<0.1	1.5	7.3	-
72	丸尾-1	1982.04.14	75.5	6.7	-	2.0	-	<0.1	1.8	5.2	-
73	丸尾-1	1982.09.12	76.8	7.7	-	2.1	-	<0.1	0.8	3.0	-
74	丸尾-1	1987.10.13	69.0	6.2	<0.1	1.3	-	<0.1	3.9	11.3	-
75	丸尾-1	1989.08.11	66.0	6.5	-	4.1	-	<0.1	2.0	6.8	0.3
76	丸尾-1	1989.08.11	66.0	6.4	-	4.4	-	0.1	1.0	16.8	9.5
77	丸尾-1	1990.11.13	68.0	6.4	-	3.7	-	<0.1	15.2	16.6	-
78	丸尾-1	1990.11.13	68.0	6.4	-	3.7	-	<0.1	15.2	16.6	-
79	丸尾-1	1991.08.02	67.4	6.5	-	2.0	-	<0.1	0.4	3.0	6.4
80	丸尾-1	1991.11.22	63.5	6.4	-	2.6	-	<0.1	1.7	2.1	-
81	丸尾-1	1994.01.19	68.8	6.6	-	3.7	-	<0.1	0.3	0.3	-
82	丸尾-1	1999.08.11	67.0	6.2	-	3.9	-	<0.1	1.6	3.0	-
83	丸尾-1	2004.04.09	68.5	6.1	-	3.8	-	<0.1	1.2	2.8	-
84	丸尾-1	2005.07.27	68.7	6.2	-	1.4	-	<0.1	0.8	1.1	-
85	丸尾-2	2005.07.27	79.0	8.4	-	2,200	-	71.0	1.5	3.0	-
86	丸尾-2	2001.11.11	79.5	8.2	-	1,650	-	83.7	1.4	1.0	-
87	丸尾-2	2004.04.09	79.8	8.3	-	1,700	-	81.8	1.8	2.0	-
88	丸尾-3	1991.11.22	85.0	7.7	-	8,240	-	356	0.1	2.4	-
89	丸尾-3	1999.04.29	97.8	8.3	-	8,340	-	361	2.8	8.8	-
90	丸尾-3	2001.11.11	85.9	8.1	-	5,770	-	250	0.3	3.6	-
91	丸尾-3	1989.08.11	98.0	7.8	-	8,390	-	365	2.0	17.2	1.7
92	丸尾-4	1989.08.11	61.0	5.9	-	51.7	-	3.8	1.6	18.6	1.0
93	湯之谷	1989.08.11	48.0	5.6	-	4.6	-	0.1	1.0	12.8	6.1
94	牧園-1	1982.02.17	92.5	8.7	-	4,410	-	193	-	37.4	-
95	牧園-2	1982.02.25	93.0	8.4	-	5,800	-	205	-	65.5	-
96	牧園-3	1982.03.10	94.0	8.2	-	7,150	-	231	-	10.5	-
97	牧園-4	1982.10.06	94.2	2.9	-	4,450	-	92.3	-	8.4	-
98	牧園-5	1982.10.23	96.5	2.7	-	5,350	-	81.0	-	12.9	-
99	牧園-6	1982.09.10	93.5	9.4	-	211	-	22.6	1.4	32.6	-
100	牧園-7	1990.11.13	69.1	7.1	-	1.2	-	<0.1	9.4	4.3	-
101	牧園-8	2004.04.09	-	6.9	-	0.7	-	<0.1	1.3	1.5	-
102	栗野-1	1982.01.27	93.5	8.5	-	2,650	-	145	-	21.7	-
103	栗野-2	1982.03.13	64.1	2.0	-	1.7	-	<0.1	-	17.0	-
104	栗野-2	1990.11.13	79.8	2.3	-	0.6	-	<0.1	2.3	6.0	-
105	栗野-2	1990.11.13	79.8	2.3	-	0.6	-	<0.1	2.3	6.0	-
106	栗野-2	1991.08.02	80.0	2.9	-	0.8	-	<0.1	14.9	108	<0.8
107	栗野-2	1991.11.22	87.0	2.8	-	1.5	-	<0.1	17.2	36.1	-
108	栗野-2	1994.01.19	86.7	2.8	-	0.3	-	<0.1	0.3	0.3	-
109	栗野-2	2004.04.09	90.8	3.0	-	2.1	-	<0.1	1.2	3.5	-
110	栗野-3	1989.09.08	62.8	2.9	-	0.1	-	<0.1	9.5	15.2	-
111	栗野-4	1989.09.08	45.4	3.4	-	0.1	-	<0.1	6.2	24.6	-
112	栗野-4	1990.11.13	63.5	3.8	-	3.6	-	<0.1	5.3	8.0	-
113	栗野-4	1990.11.13	63.5	3.8	-	3.6	-	<0.1	5.3	8.0	-
114	栗野-4	1991.08.02	57.6	3.2	-	0.2	-	<0.1	8.1	12.3	<0.8
115	栗野-4	1991.11.22	51.5	3.1	-	0.3	-	<0.1	7.8	8.8	-
116	栗野-4	1994.01.19	69.0	2.8	-	1.0	-	<0.1	9.1	11.2	-
117	栗野-4	2004.04.09	54.5	3.1	-	0.1	-	<0.1	2.3	2.7	-
118	栗野-5	1991.08.02	34.0	3.7	-	0.9	-	<0.1	3.2	9.5	12.8
119	栗野-5	1991.11.22	58.0	3.4	-	5.1	-	<0.1	29.1	31.6	-
120	栗野-5	2004.04.09	65.7	3.4	-	0.4	-	<0.1	8.5	9.2	-

表2. 南九州地熱水中のヒ素、アンチモンおよび水銀濃度等の分析結果(続き).

整理番号	採取地点	採取年月日	温度 ℃	pH	ヒ素(III) μg/l	ヒ素(III+V) μg/l	アンチモン(III) μg/l	アンチモン(III+V) μg/l	無機水銀 ng/l	総水銀 ng/l	硫化水素 mg/l
121	菱刈-1	1999.12.07	58.4	6.7	-	279	-	1.4	2.7	5.2	-
122	菱刈-1	2000.01.18	65.3	7.0	-	349	-	3.8	2.9	2.7	-
123	菱刈-1	2004.10.07	62.3	6.8	-	235	-	2.4	1.8	3.2	-
124	菱刈-2	1999.12.07	41.2	8.5	-	72.1	-	0.3	14.6	23.3	-
125	菱刈-3	1999.12.07	48.9	8.6	-	464	-	5.7	4.9	7.6	-
126	大口	1999.12.07	31.2	4.1	-	6,500	-	15.5	1.3	4.1	-
127	大口	2004.10.02	31.5	3.2	-	5,100	-	3.5	0.8	2.3	-
128	大口	2005.03.12	30.7	4.0	-	6,200	-	4.7	0.8	1.5	-
129	大口	2005.10.22	32.2	4.0	-	6,500	-	5.8	0.4	1.8	-
130	妙見	1985.12.13	52.5	6.3	14.9	36.3	-	0.2	1.2	1.4	-
131	妙見	1986.01.17	51.8	6.2	-	25.4	-	0.2	1.2	4.4	-
132	妙見	1986.11.28	51.3	6.3	47.3	50.8	-	0.2	8.5	12.5	-
133	妙見	2005.07.27	42.8	6.3	-	20.0	-	0.1	0.5	1.4	-
134	鹿児島-1	1991.01.16	47.5	7.7	2.5	2.5	-	-	1.3	2.5	-
135	鹿児島-1	1991.02.11	45.3	7.7	1.4	2.5	-	-	3.1	3.2	-
136	鹿児島-2	1991.01.16	48.4	7.5	1.8	1.8	-	-	1.0	3.1	-
137	鹿児島-2	1991.02.11	47.0	7.4	1.4	2.5	-	-	1.0	2.8	-
138	鹿児島-3	1991.01.16	47.8	8.4	0.7	8.1	-	-	0.7	2.0	-
139	鹿児島-3	1991.02.11	45.0	8.4	0.7	8.7	-	-	0.3	1.6	-
140	鹿児島-4	1991.01.16	46.0	8.0	0.7	1.5	-	-	1.5	1.5	-
141	鹿児島-4	1991.02.11	45.3	8.1	0.4	1.1	-	-	1.3	2.2	-
142	鹿児島-5	1991.01.16	43.0	7.7	1.3	3.0	-	-	0.3	0.3	-
143	鹿児島-5	1991.02.11	45.0	7.9	1.9	3.2	-	-	0.5	1.6	-
144	鹿児島-6	1991.01.16	36.9	6.7	1.3	2.1	-	-	0.3	0.6	-
145	鹿児島-6	1991.02.11	35.8	6.9	1.2	1.7	-	-	0.3	0.4	-
146	鹿児島-7	1991.01.16	48.0	7.9	0.4	7.7	-	-	0.7	4.5	-
147	鹿児島-8	1991.01.16	43.1	7.5	0.6	7.5	-	-	1.2	2.5	-
148	鹿児島-8	1991.02.11	43.0	7.9	0.5	8.8	-	-	7.9	10.5	-
149	鹿児島-9	1991.01.16	46.0	7.7	2.8	23.2	-	-	12.0	12.6	-
150	鹿児島-9	1991.02.11	44.0	7.8	2.6	26.8	-	-	0.3	2.6	-
151	鹿児島-10	1991.01.16	27.5	7.5	2.1	2.8	-	-	2.4	3.9	-
152	鹿児島-10	1991.02.11	27.8	7.4	2.6	2.9	-	-	5.1	6.0	-
153	桜島-1	1999.09.07	43.0	6.1	-	10.7	-	0.2	3.0	3.0	-
154	桜島-1	2005.04.13	43.5	6.1	-	5.5	-	0.1	0.6	0.8	-
155	桜島-2	1999.09.07	43.9	6.3	-	10.7	-	0.2	2.1	2.1	-
156	桜島-2	2005.04.13	44.1	6.1	-	10.6	-	0.2	0.8	1.0	-
157	桜島-3	1985.12.14	46.5	6.5	-	17.2	-	0.3	1.2	2.3	-
158	桜島-4	1999.09.07	42.9	6.0	-	10.2	-	0.2	1.5	4.3	-
159	桜島-4	2005.04.13	46.9	6.1	-	5.5	-	0.1	0.4	0.4	-
160	桜島-5	1999.09.07	45.3	5.9	-	11.8	-	0.1	1.0	2.1	-
161	桜島-5	2005.04.13	41.6	6.1	-	13.1	-	0.2	0.7	0.8	-
162	桜島-6	1981.12.11	43.0	6.1	-	8.8	-	0.1	4.5	4.5	-
163	桜島-6	1985.12.14	45.2	6.4	0.08	17.6	-	0.3	1.2	1.4	-
164	桜島-7	1999.09.07	50.9	6.7	-	0.5	-	<0.1	4.4	4.5	-
165	桜島-7	2005.04.13	52.1	6.6	-	1.2	-	<0.1	0.8	1.5	-
166	垂水-1	2002.12.10	47.2	9.7	2.0	2.4	-	<0.1	3.1	3.5	-
167	垂水-1	2004.10.07	47.5	9.5	-	2.3	-	<0.1	1.8	2.6	-
168	垂水-2	2002.12.10	47.5	9.9	0.9	0.9	-	<0.1	2.4	2.7	-
169	垂水-3	2002.12.10	50.1	9.8	0.7	0.6	-	<0.1	1.8	2.3	-
170	垂水-4	2002.12.10	53.6	8.5	4.2	4.6	-	<0.1	1.6	5.4	-
171	垂水-5	2004.10.07	47.8	8.4	-	0.1	-	<0.1	2.3	2.3	-
172	垂水-5	2002.12.10	48.4	8.6	<0.1	0.3	-	<0.1	2.2	2.4	-
173	垂水-6	2004.10.07	57.0	8.4	-	0.3	-	<0.1	1.6	4.2	-
174	垂水-6	2002.12.10	56.4	8.5	<0.1	0.4	-	<0.1	9.0	10.3	-
175	湯之元-1	2006.01.06	61.1	8.0	-	0.8	-	<0.1	11.1	35.0	2.0
176	湯之元-2	2006.01.06	55.8	8.5	-	0.3	-	<0.1	0.3	0.6	3.4
177	湯之元-3	2006.01.06	52.1	8.2	-	0.2	-	<0.1	0.3	0.4	2.1
178	吹上-1	2006.01.06	59.3	9.0	-	6.0	-	<0.1	0.3	6.3	19.9
179	吹上-2	2006.01.06	53.4	9.0	-	3.2	-	<0.1	1.3	1.4	18.9
180	山川-1	1988.02.08	47.5	7.5	-	0.1	-	<0.1	4.6	17.0	-

表2. 南九州地熱水中のヒ素、アンチモンおよび水銀濃度等の分析結果(続き).

整理番号	採取地点	採取年月日	温度 ℃	pH	ヒ素(III) μg/l	ヒ素(III+V) μg/l	アンチモン(III) μg/l	アンチモン(III+V) μg/l	無機水銀 ng/l	総水銀 ng/l	硫化水素 mg/l
181	山川-1	1989.09.29	73.9	2.7	-	0.1	-	<0.1	4.4	15.5	-
182	山川-1	1989.11.25	66.6	5.5	-	0.1	-	<0.1	2.7	4.1	-
183	山川-1	1991.11.30	95.2	5.9	-	0.3	-	<0.1	20.0	34.7	-
184	山川-1	1992.01.23	91.8	5.7	-	0.4	-	<0.1	11.9	12.1	-
185	山川-1	1999.09.17	92.9	6.6	-	0.5	-	<0.1	10.7	30.5	-
186	山川-1	2001.11.06	93.3	6.8	-	0.3	-	<0.1	2.2	7.2	-
187	山川-1	2004.12.07	62.3	6.4	-	0.8	-	<0.1	7.6	18.0	-
188	山川-1	2005.10.11	97.7	6.9	-	0.6	-	<0.1	5.8	9.3	-
189	山川-2	1982.07.09	76.0	8.1	-	109	-	7.6	1.6	3.8	-
190	山川-3	1991.10.15	72.7	7.9	-	141	-	2.3	2.8	4.1	-
191	山川-4	1982.07.09	39.2	7.7	-	30.6	-	1.1	2.1	4.0	-
192	山川-5	1982.07.09	52.5	7.1	-	74.0	-	1.8	2.0	4.4	-
193	山川-6	1991.10.15	43.7	8.0	-	204	-	4.2	2.4	3.0	-
194	山川-7	1982.07.09	89.5	6.6	-	1,540	-	73.6	15.3	32.5	-
195	山川-8	2004.12.07	57.1	7.1	-	875	-	47.0	7.0	9.9	-
196	山川-8	2005.10.11	62.7	7.1	-	1,620	-	76.0	1.4	1.9	-
197	指宿-1	1982.07.09	78.0	7.8	-	62.4	-	3.6	12.0	11.7	-
198	指宿-2	1982.07.09	51.8	6.8	-	77.4	-	4.2	7.8	11.6	-
199	指宿-2	1988.02.08	76.1	7.0	1.8	83.0	-	5.2	21.5	24.4	-
200	指宿-2	1989.09.29	79.0	6.8	-	88.0	-	3.3	8.3	9.2	-
201	指宿-2	1989.11.25	82.2	6.9	-	83.6	-	4.1	12.4	14.9	-
202	指宿-2	1991.11.30	81.8	7.1	-	88.1	-	3.2	10.2	17.0	-
203	指宿-2	1992.01.23	74.5	6.5	-	87.8	-	4.3	7.5	8.7	-
204	指宿-2	1999.09.17	81.8	7.1	-	43.5	-	0.8	6.7	6.8	-
205	指宿-3	1989.09.29	55.6	6.7	-	98.4	-	2.6	2.3	8.2	-
206	指宿-3	1989.11.25	56.0	6.6	-	89.6	-	2.9	1.6	2.9	-
207	指宿-3	1991.11.30	53.9	7.5	-	91.5	-	3.5	3.8	5.6	-
208	指宿-3	1992.01.23	56.0	6.8	-	90.8	-	3.4	4.1	6.5	-
209	指宿-3	1999.09.17	56.8	6.4	-	105	-	2.4	1.9	4.3	-
210	指宿-3	2001.11.06	58.8	6.5	-	117	-	3.4	1.0	3.7	-
211	指宿-3	2004.12.07	51.2	6.5	-	72.5	-	3.2	1.8	3.8	-
212	指宿-3	2005.10.11	57.1	6.5	-	121	-	3.9	1.0	2.4	-
213	指宿-4	1982.07.09	52.0	6.6	-	32.6	-	0.3	6.2	16.4	-
214	指宿-4	1989.09.29	63.5	6.5	0.5	154	0.5	3.8	1.1	10.8	-
215	指宿-5	1982.07.09	69.0	6.9	-	155	-	4.5	3.7	8.6	-
216	指宿-6	1989.09.29	59.4	6.6	0.3	137	-	2.8	1.0	7.9	-
217	指宿-6	1989.11.25	61.1	6.6	0.2	120	-	2.3	0.9	2.8	-
218	指宿-6	1991.11.30	60.2	7.3	-	118	-	2.2	1.0	3.6	-
219	指宿-6	1992.01.23	58.5	6.9	-	120	-	3.0	1.8	3.4	-
220	指宿-6	1999.09.17	54.2	6.5	-	109	-	1.9	0.7	2.9	-
221	指宿-6	2001.11.06	51.4	6.6	-	89.8	-	1.9	0.1	0.9	-
222	指宿-6	2004.12.07	47.8	6.6	-	57.5	-	1.0	4.6	11.5	-
223	指宿-6	2005.10.11	48.3	6.5	-	271	-	1.7	0.5	0.9	-
224	指宿-7	1982.07.09	59.6	7.1	-	46.4	-	0.3	4.8	6.4	-
225	指宿-7	1991.11.30	54.5	6.7	-	36.5	-	0.2	1.8	3.4	-
226	指宿-7	1992.01.23	53.0	6.5	-	35.2	-	0.2	1.0	4.3	-
227	指宿-7	1999.09.17	51.1	6.4	-	24.4	-	0.2	0.9	2.9	-
228	指宿-7	2001.11.06	49.3	6.6	-	27.5	-	0.3	1.1	1.4	-
229	指宿-7	2004.12.07	45.6	6.4	-	26.0	-	0.2	1.7	3.5	-
230	指宿-7	2005.10.11	53.6	6.3	-	8.5	-	0.1	0.8	0.9	-
231	指宿-8	1992.01.23	61.3	7.3	-	88.4	-	3.3	3.1	7.5	-
232	硫黄島-1	1990.10.18	55.1	1.7	-	425	-	1.8	2.9	13	-
233	硫黄島-1	1990.10.21	54.5	1.7	-	435	-	1.8	2.7	12	-
234	硫黄島-1	1999.11.19	54.7	1.8	-	452	-	1.9	3.7	4.0	-
235	硫黄島-2	1999.11.19	51.7	1.8	-	224	-	1.1	3.9	12.0	-
236	硫黄島-2	2000.10.20	53.6	1.7	-	326	-	2.0	4.1	14.0	-
237	硫黄島-3	1990.10.20	28.5	4.2	-	4.5	-	0.1	3.3	10.0	-
238	硫黄島-4	1990.10.21	70.5	2.5	-	335	-	1.8	3.8	13.0	-
239	硫黄島-5	1999.11.19	54.7	6.0	-	17.3	-	0.1	4.1	3.0	-
240	硫黄島-5	2000.10.22	55.7	6.2	-	19.4	-	0.2	4.8	8.0	-

(μg/l : mg/lの千分の1, ng/l : μg/lの千分の1小さい単位)

表3. 南九州地熱水の採取地点・地区におけるヒ素、アンチモンおよび水銀濃度等とそれらの幾何平均値。

試料	採取地点	温度 (°C)		pH		ヒ素 (III+V) (µg/l)		アンチモン (III+V) (µg/l)		無機水銀 (ng/l)		総水銀 (ng/l)	
		A	B	A	B	A	B	A	B	A	B	A	B
1	えびの一1	38.7	38.7	2.4	2.4	12.6	12.6	0.3	0.3	9.8	9.8	15.1	15.1
2	えびの一2	49.9	49.9	2.0	2.0	25.6	25.6	0.6	0.6	4.1	4.1	6.3	6.3
3	新潟一1	59.3		5.0		1.3		<0.1		2.5		8.9	
4	新潟一2	56.5	53.1	6.1	5.1	1.4	1.1	<0.1	<0.1	6.8	4.0	14.7	10.0
5	新潟一3	44.8		4.4		0.8		<0.1		3.7		7.7	
6	湯之野	57.7	57.7	5.5	5.5	0.6	0.6	<0.1	<0.1	1.5	1.5	19.3	19.3
7	栄之尾一1	46.0		3.3		172		1.1		0.8		11.7	
8	栄之尾一2	62.9	53.8	2.9	3.1	44.5	87.5	1.1	1.1	0.3	0.5	1.6	4.3
9	硫黄谷一1	61.9	61.9	3.1	3.1	151	151	0.3	0.3	1.6	1.6	5.0	5.0
10	硫黄谷一2	48.3	48.3	3.2	3.2	10.7	10.7	0.4	0.4	1.6	1.6	9.6	9.6
11	丸尾一1	69.9	69.9	6.5	6.5	2.8	2.8	0.1	0.1	1.6	1.6	4.2	4.2
12	丸尾一2	79.4	79.4	8.3	8.3	1,830	1,830	78.6	78.6	1.6	1.6	1.8	1.8
13	丸尾一3	91.5	91.5	8.0	8.0	7,600	7,600	329	329	0.6	0.6	6.0	6.0
14	丸尾一4	51.7	51.7	5.9	5.9	51.7	51.7	3.8	3.8	1.6	1.6	18.6	18.6
15	湯之谷	48.0	48.0	5.6	5.6	4.6	4.6	0.1	0.1	1.0	1.0	12.8	12.8
16	牧園-1	92.5		8.7		4,410		193				37.4	
17	牧園-2	93.0		8.4		5,800		205				65.5	
18	牧園-3	94.0	94.9	8.2	5.4	7,150	5,340	231	147	-	-	10.5	19.5
19	牧園-4	94.2		2.9		4,450		92.3				8.4	
20	牧園-5	96.5		2.7		5,350		81.0				12.9	
21	牧園-6	93.5	93.5	9.4	9.4	211	211	22.6	22.6	1.4	1.4	32.6	32.6
22	牧園-7	69.1	69.1	7.1	7.1	1.2	1.2	<0.1	<0.1	9.4	9.4	4.3	4.3
23	牧園-8	-	-	6.9	6.9	0.7	0.7	<0.1	<0.1	1.3	1.3	1.5	1.5
24	栗野一1	93.5	93.5	8.5	8.5	2,650	2,650	145	145			21.7	21.7
25	栗野一2	80.7		2.5		0.9		<0.1		2.8		8.2	
26	栗野一3	62.8		2.9		0.1		<0.1				9.5	
27	栗野一4	57.4	61.9	3.3	3.0	0.7	0.5	<0.1	<0.1	5.8	5.3	9.1	10.0
28	栗野一5	50.6		3.5		1.2		<0.1		9.3		14.0	
29	菱刈一1	61.9	61.9	6.8	6.8	284	284	2.3	2.3	2.4	2.4	3.6	3.6
30	菱刈一2	41.2		8.5		72.1		0.3		14.6		23.3	
31	菱刈一3	48.9	44.9	8.6	8.5	46.4	57.8	5.7	1.3	4.9	8.5	7.6	13.3
32	大口	31.4	31.4	3.8	3.8	6,050	6,050	6.2	6.2	0.8	0.8	2.2	2.2
33	妙見	49.4	49.4	6.3	6.3	31.1	31.1	0.2	0.2	1.6	1.6	3.2	3.2
34	鹿児島一1	46.4		7.7		4.0				1.1		2.3	
35	鹿児島一2	47.7		7.4		2.1				1.0		2.9	
36	鹿児島一4	45.6	40.6	8.0	7.5	1.3	2.4	-	-	1.4	0.9	1.8	1.6
37	鹿児島一5	44.0		7.8		3.1				0.4		0.7	
38	鹿児島一6	36.3		6.8		1.9				0.3		0.5	
39	鹿児島一10	27.6		7.5		2.8				3.5		4.8	
40	鹿児島一3	46.4		8.4		8.4				0.5		1.8	
41	鹿児島一7	48.0	45.8	7.9	8.0	7.7	8.1	-	-	0.7	1.0	4.5	3.5
42	鹿児島一8	43.0		7.7		8.1				3.1		5.1	
43	鹿児島一9	44.9	44.9	7.7	7.7	24.9	24.9	-	-	1.9	1.9	5.7	5.7
44	桜島一1	43.2		6.1		7.7		0.1		1.3		1.5	
45	桜島一2	44.0		6.5		10.6		0.2		1.3		1.4	
46	桜島一3	46.5		6.5		17.2		0.3		1.2		2.3	
47	桜島一4	44.9	44.3	6.1	6.2	7.5	10.8	0.1	0.2	0.8	1.2	1.3	1.7
48	桜島一5	43.4		6.0		12.4		0.1		0.8		1.3	
49	桜島一6	44.1		6.3		12.4		0.2		2.3		2.5	
50	桜島一7	51.5	51.5	6.6	6.6	0.8	0.8	<0.1	<0.1	1.9	1.9	2.6	2.6
51	垂水一1	47.3		9.6		2.3		<0.1		2.4		3.0	
52	垂水一2	47.5		9.9		0.9		<0.1		2.4		2.7	
53	垂水一3	50.1		9.8		0.6		<0.1		1.8		2.3	
54	垂水一4	53.6	50.4	8.5	9.1	4.6	0.8	<0.1	<0.1	1.6	2.3	5.4	3.4
55	垂水一5	48.1		8.5		0.2		<0.1		2.2		2.3	
56	垂水一6	56.7		8.4		0.3		<0.1		3.8		6.6	
57	湯之元一1	61.1		8.0		0.8		<0.1		11.1		35.0	
58	湯之元一2	55.8	56.2	8.5	8.2	0.3	0.4	<0.1	<0.1	0.3	1.0	0.6	2.0
59	湯之元一3	52.1		8.2		0.2		<0.1		0.3		0.4	

告している。

南九州地熱水中のAs/Sbの重量比は綿抜らの値に比較して小さい値である。玉川温泉や草津温泉は火山性の強い酸性泉であることや、地下の地質特異性などが関係していることが考えられる。

また、地熱水中のアンチモンと水銀濃度はヒ素濃度と比較して小さい。この理由として地熱流

体（地熱水など）が接触する岩体（火成岩など）中のアンチモンや水銀濃度が低いこと、硫化物としての沈殿のしやすさ、特に水銀は熱や還元的状況下で金属水銀蒸気として大気中に揮散しやすいことなどが関与していると考えられる（鎌田・坂元, 1988；坂元, 2008）。

表 3. 南九州地熱水の採取地点・地区におけるヒ素，アンチモンおよび水銀濃度等とそれらの幾何平均値（続き）。

試料 採取地点	温度 (°C)		pH		ヒ素 (III+V) (µg/l)		アンチモン (III+V) (µg/l)		無機水銀 (ng/l)		総水銀 (ng/l)	
	A	B	A	B	A	B	A	B	A	B	A	B
60 吹上-1	59.3		9.0		6.0		<0.1		0.3		6.3	
61 吹上-2	53.4	56.3	9.0	9.0	3.2	4.4	<0.1	< 0.1	1.3	0.6	1.4	3.0
62 山川-1	78.1	78.1	5.8	5.8	0.5	0.5	<0.1	<0.1	6.2	6.2	13.7	13.7
63 山川-2	76.0		8.1		109		7.6		1.6		3.8	
64 山川-3	72.7		7.9		141		2.3		2.8		4.1	
65 山川-4	39.2	54.9	7.7	7.8	30.6	93.4	1.1	2.7	2.1	2.1	4.0	3.8
66 山川-5	52.5		7.1		74.0		1.8		2.0		4.4	
67 山川-6	43.7		8.0		204		4.2		2.4		3.0	
68 山川-7	89.5		6.6		1,540		73.6		15.3		32.5	
69 山川-8	59.8	73.2	7.1	6.8	1,190	1,350	59.8	66.3	3.1	6.9	4.3	11.8
70 指宿-1	78.0		7.8		62.4		3.6		12.0		11.7	
71 指宿-2	74.5		6.9		76.9		3.2		9.8		12.1	
72 指宿-3	55.6		6.7		97.1		3.1		1.9		4.3	
73 指宿-4	57.5	61.3	6.6	6.9	70.9	70.9	1.1	1.8	2.6	3.0	13.3	6.5
74 指宿-6	54.9		6.7		117		2.0		0.9		3.0	
75 指宿-7	52.2		6.6		26.4		0.2		1.4		2.8	
76 指宿-8	61.3		7.3		88.4		3.3		3.1		7.5	
77 指宿-5	69.0	69.0	6.9	6.9	155	155	4.5	4.5	3.7	3.7	8.6	8.6
78 硫黄島-1	54.8		1.7		437		1.8		3.1		8.5	
79 硫黄島-2	52.6		1.7		270		1.5		4.0		13.0	
80 硫黄島-4	28.5	49.1	4.2	2.3	335	341	1.8	1.7	3.8	3.6	13.0	11.3
81 硫黄島-3	70.5		2.5		4.5		0.1		3.3		10.0	
82 硫黄島-5	55.2	55.2	6.1	6.1	18.3	18.3	0.1	0.1	4.4	4.4	4.9	4.9

A:72-82 採取地点の地熱水試料の分析値，B:35-37 採取地区ごとの地熱水試料の幾何平均値。
(µg/l : mg/l の千分の 1, ng/l : µg/l の千分の 1 小さい単位)

表 4. 南九州地熱水中のヒ素，アンチモンおよび水銀濃度等の範囲，算術平均値ならびに幾何平均値。

濃度範囲						
温度 (°C)	pH	ヒ素 (III+V) (µg/l)	アンチモン (III+V) (µg/l)	無機水銀 (ng/l)	総水銀 (ng/l)	試料数 (個)
27.8-97.8	1.7-9.9	<0.1-8,390	<0.1-365	0.1-39.0	0.3-43.6	205-240
算術平均値						
温度 (°C)	pH	ヒ素 (III+V) (µg/l)	アンチモン (III+V) (µg/l)	無機水銀 (ng/l)	総水銀 (ng/l)	試料数 (個)
57.8	6.5	630	32.2	3.1	8.7	72-82
幾何平均値						
温度 (°C)	pH	ヒ素 (III+V) (µg/l)	アンチモン (III+V) (µg/l)	無機水銀 (ng/l)	総水銀 (ng/l)	試料数 (個)
55.6	6.0	19.8	2.4	2.0	5.3	72-82

(µg/l : mg/l の千分の 1, ng/l : µg/l の千分の 1 小さい単位)

地熱水中のヒ素 (III+V), アンチモン (III+V) および水銀濃度等の相互関係

地熱水中のヒ素 (III+V), アンチモン (III+V) および水銀濃度等の相互関係は表 5 に示す。

地熱水中のヒ素 (III+V), アンチモン (III+V) 濃度の間には高い正の相関 (相関係数 0.866) がある。しかし, ヒ素 (III+V) と総水銀の相関係数 (0.353), アンチモンと総水銀濃度の相関係数 (0.451) 間にはさほど高い相関が認められない。また, 無機水銀と総水銀の間には正の相関係数 (0.644), 総水銀と温度の相関係数 (0.485) である。水銀は地熱水中ではヒ素, アンチモンとは異なった挙動をしていることを示唆している。

地熱水中のヒ素, アンチモンおよび水銀濃度の分布

南九州地熱水中のヒ素 (III+V) 濃度の分布は図 4-1 に示す。図 4-1 からは霧島火山地域の丸尾, 牧園, 菱刈から大口と指宿・山川, 薩摩硫黄島にかけてヒ素 (III+V) 濃度の高いものがある。特に, 丸尾地区の中にはヒ素 (III+V) 濃度が低いものと高いものがある。この理由は地表水 (降水) が地下からの熱源 (噴気) で温められて得られた地熱水 [ヒ素 (III+V) 濃度が低い] と地下深部に貯留された地熱水 [ヒ素 (III+V) 濃度が高い] の寄与があると考えられる (露木ほか, 1990)。

南九州地熱水中のアンチモン (III+V) 濃度は図 4-2 に示す。図 4-2 からは霧島火山地域の丸尾, 牧園, 菱刈から大口と指宿・山川にアンチモン (III+V) 濃度の高いものがある。ヒ素とアンチモンの相関で前述したが, ヒ素 (III+V) 濃度の分

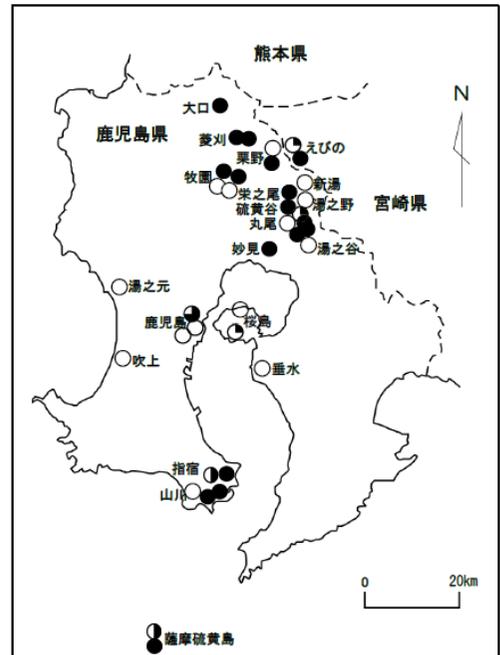


図 4-1. 南九州地熱水中のヒ素 (III+V) 濃度 ($\mu\text{g/l}$) の分布。
○ < 10.0 ; ◐ 10.1–15.0 ; ◑ 15.1–20.0 ; ◒ 20.1–25.0 ; ◓ 25.1–

布と対応関係が認められる。しかし, 薩摩硫黄島においてはアンチモン (III+V) 濃度はヒ素 (III+V) 濃度に差異が認められる。その理由として地域的な要因が大きいと考えられる。

南九州地熱水中の無機水銀濃度の分布は図 4-3 に示す。図 4-3 からは霧島火山地域の菱刈と山川地域に無機水銀濃度が高い傾向が認められる。その他の地区の無機水銀濃度は一般の環境水 (河川水, 海水など) と同レベルで極めて低い。

南九州地熱水中の総水銀濃度の分布は図 4-4 に

表 5. 南九州地熱水中のヒ素, アンチモンおよび水銀濃度等間の相関係数。

	温度	pH	ヒ素 (III + V)	アンチモン (III + V)	無機水銀	総水銀
温度						
pH	0.044					
ヒ素 (III + V)	0.556	-0.001				
アンチモン (III + V)	0.684	0.315	0.866			
無機水銀	0.243	-0.086	-0.062	-0.023		
総水銀	0.485	0.015	0.353	0.451	0.644	

表 3. に示す採取地点 72 ~ 82 地熱水試料による計算値。

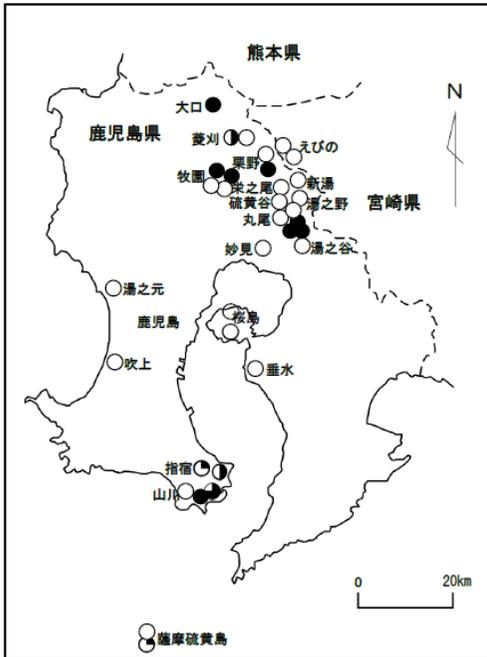


図 4-2. 南九州地熱水中のアンチモン (III+V) 濃度 (µg/l) の分布.
○ < 1.5 ; ● 1.6-2.0 ; ● 2.1-2.5 ; ● 2.6-3.0 ; ● 3.1<

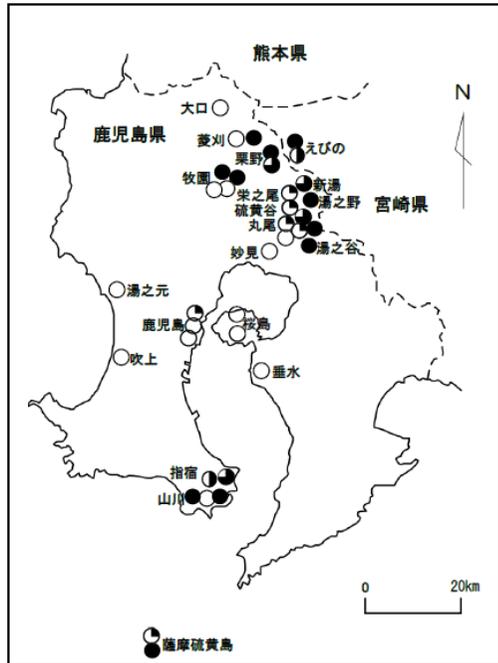


図 4-4. 南九州地熱水中の総水銀濃度 (ng/l) の分布.
○ < 4.0 ; ● 4.1-6.0 ; ● 6.1-8.0 ; ● 8.1-10.0 ; ● 10.1<

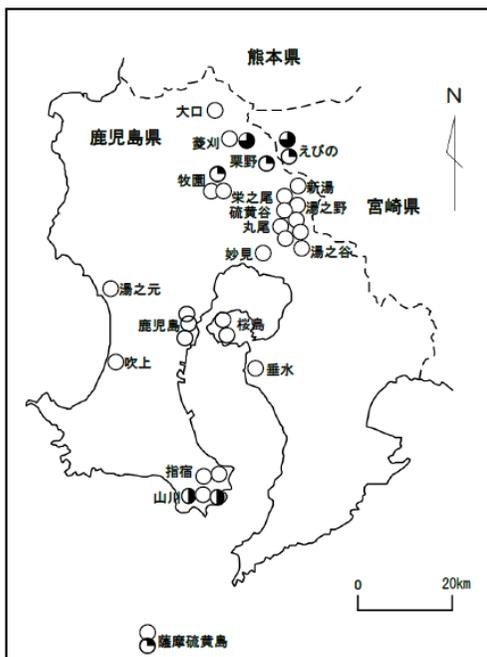


図 4-3. 南九州地熱水中の無機水銀濃度 (ng/l) の分布.
○ < 4.0 ; ● 4.1-6.0 ; ● 6.1-8.0 ; ● 8.1-10.0 ; ● 10.1<

示す。図 4-4 からは霧島火山地域(えびのを含む)の丸尾, 牧園, 菱刈から指宿・山川, 薩摩硫黄島にかけて総水銀濃度が高い傾向が認められる。

水質汚濁防止法の水銀の排水基準は 0.005 mg/l (5,000 ng/l) である。南九地熱水中の総水銀濃度の幾何平均値 5.3 ng/l である。その他の地域の総水銀濃度は極めて低い。ちなみに地熱水中の水銀は火山ガス凝縮水を除くとその濃度は極めて低く、特殊な環境下(鹿児島湾北部の水深 200 m の海底噴気孔周辺の底質)で異常な濃縮(ヒ素, アンチモンおよび水銀)が認められている (Sakamoto, 1985; Sakamoto et al., 1988, 2003 ; 鎌田ほか, 1988)。

■ 今後のために

我が国の温泉の源泉数は年代とともに増加しているが、湧出量は伸びていない。温泉は、国民共有の資源である。資源枯渇のおそれのある地域の温泉開発には制限が必要との意見がある。しかし、新規の温泉掘削を過度に制限してはいけない

という意見もある。著者は、温泉源の共同利用(泉質の差異があると難しい)や温泉の利用の仕方(汲み上げたお湯を貯湯して、必要時に多量を放出するなど)を試み、有限な資源の有効活用に繋げて欲しいと考えている。温泉資源の開発と保護をどのように調和させていくかは今後の課題である(坂元, 2015)。

温泉を利用する立場からは自然湧出または地下深部にボーリング(掘削)をし得られる地熱水(温泉水)の温度はいうまでもないが、化学成分に注目する必要がある。特に、地域によっては有害物質のヒ素(As)が地熱水中に多量に含まれているものがあることを知って欲しい。

今回調査した霧島、指宿・山川や薩摩硫黄島などの地熱水(温泉水)の中にはヒ素やアンチモン濃度の高いものが存在することが分かった。

水銀に関しては一部地域の地熱水を除いて極めて低い濃度であることが分かった。

また、今回は取り上げなかったが、ホウ素(B)、フッ素(F)は平成13年(2013)7月1日から水質汚濁防止法の有害物質としての法規制が開始されている。地熱水(温泉水)を温泉施設などで利用すると排出(捨てる)段階で法規制がかかるという問題がある。これらの成分を多量に含む温泉排水は環境水(河川、海など)への負荷を引き起こしている(坂元, 2012)。

その他に、健康志向から地熱水(温泉水)がミネラルウォーターとして市販されている。これらの中にはヒ素(As)、ホウ素(B)やフッ素(F)などの成分の多いものもあり、過剰摂取には注意が必要である。今後、表示されているボトルの化学成分量(濃度)の多寡にも目を向けて欲しい。

■ 謝辞

本研究を行うにあたり、えびの、牧園、栗野、大口、妙見、鹿児島、桜島、垂水、湯之元、吹上、指宿、山川、薩摩硫黄島などの温泉源所有者並びに管理者等には現地調査等では多大なお世話になった。心より深謝する。また、温泉の採取、分析等では鹿児島大学理学部化学科の池田勝子・川久保慶子・内山伸明・中村賢司・西 信一・満岡

慎一・大北陽子・小牧 剛・黒木俊幸・満窪文彦・吉田陽一・篠崎成吾・谷元真奈美・堀田榮治・吉田 誠・市来聖一・立山友子学士、同理学研究科の鎮守雅一・谷山純一郎・流合克朗修士、同理工学研究科の下西牧子・石山裕美・小堀晃作修士には、多大なご協力を得た。ここに記して、お礼を申し上げる。

■ 引用文献

- 栗屋 徹・平野富雄・大木靖衛. 1967. 箱根火山の温泉の水銀含有量, 43-52.
- Holak, W. 1969. Gas sampling technique for arsenic determination by atomic absorption spectrophotometry. *Anal. Chem.*, 41, 1712.
- 鎌田政明・坂元隼雄. 1988. 鹿児島湾北部海域海底における噴気孔活動による水銀, ヒ素, アンチモンなどの噴出と湾内底質中のそれらの分布, 鹿児島大学南科研資料センター報告特別号, 第2号「鹿児島湾」, 16-18.
- 興良三男. 1979. 地熱開発の環境問題, 熱水中のヒ素, 地熱エネルギー, No. 13, 93-96.
- 増子 昇・渋田大介. 1976. 沈殿法によるヒ(砒)素除去の限界, 生産研究, 28(3), 22-26.
- 南 英一・佐藤 弦・綿坂邦彦. 1958. 秋田県玉川温泉の水のヒ素および鉛の含有量について(第2報), 860-865.
- 中川良三. 1974. 温泉水中の水銀含有量, 日化, 71-74.
- 中川良三. 1982. 温泉水中の水銀含有量と塩化物イオンとの関連, 日本化学会誌, 1909-1913.
- Ozaki, H., Watanabe, I. and Kuno, K. 2004. As, Sb and Hg distribution and pollution sources in the roadside soil and dust around Kamikouchi, Chubu Sangaku National Park, Japan, *Geochem. J.*, 38, 473-484.
- 坂元隼雄・鎌田政明. 1981. 環境試料中の超微量水銀の定量, 日本化学会誌, 32-39.
- Sakamoto, H. 1985. The distribution of mercury, arsenic and antimony in sediments of Kagoshima Bay, *Bull. Chem. Soc. Jpn.*, 58, 580-587.
- Sakamoto, H., Kamada, M. and Yonehara, N. 1988. The contents and distributions of arsenic, antimony and mercury in geothermal waters. *Bull. Chem. Soc. Jpn.*, 61, 3471-3477.
- Sakamoto, H., Taniyama, J. and Yonehara, N. 1997. Determination of ultra-trace amounts of total mercury by gold amalgamation-cold vapor AAS in geothermal water samples by using ozone as pretreatment agent. *Anal. Sci.*, 13, 771-775.
- 坂元隼雄・藤田俊一・富安卓滋. 1999. 地熱水中のヒ素, アンチモンおよび水銀含有量とそれらの分布, 日本地球化学会講演要旨集, 60.
- 坂元隼雄・須佐康代・富安卓滋・穴澤活郎. 2000. 地熱水中のヒ素, アンチモンおよび水銀含有量と前濃縮法, 日本地球化学会講演要旨集, 32.

- 坂元隼雄・須佐康代・富安卓滋. 2000. 地熱水中のヒ素含有量と化学形並びにヒ素の除去, 鹿児島大学全学合同研究プロジェクト, 大地・食・人間の健康を保全する環境革命への試行, 平成 11 年度研究成果報告書, No.3, 315-321.
- Sakamoto, H., Fujita, S., Tomiyasu, T. and Anazawa, K. 2003. Mercury concentrations in fumarolic gas condensates and mercury chemical forms in fumarolic gases. Bull. Volcanol. Soc. Japan, 48, 27-33.
- 坂元隼雄. 2008. 水銀汚染と地球環境—火山起源の水銀, 地球環境, 13 No.2, 237-244.
- 坂元隼雄. 2012. 温泉に関わる諸問題, 温泉科学, 62, 1.
- 坂元隼雄. 2015. 地熱資源の有効活用と保護, 温泉科学, 65, 1.
- 露木利貞・黒川達爾雄・坂元隼雄. 1990. 温泉の地球化学的考察, 鹿児島県の温泉, 霧島火山地域の温泉 (その 1), 45-67.
- Yamamoto, M., Urata, K., Murashige, K. and Yamamoto, Y. 1981. Differential determination of arsenic(III) and arsenic(V), and antimony(III) and antimony(V) by hydride generation-atomic absorption spectrophotometry, and its application to the determination of these species in sea water, Spectrochim. Acta, 36B, 671-677.
- 綿抜邦彦・桐山哲也・高野穆一郎・吉野論吉. 1975. 熱水中のヒ素・アンチモンの含有量とその挙動 (演旨), 地熱研究発表会予稿集, 29-30.