

薩摩硫黄島温泉の化学成分の研究

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

硫黄島(薩摩硫黄島)は鹿児島県大島郡三島村に所属し、薩南諸島北部に位置する島である。鬼界カルデラの一部でその大きさは東西 5.5 km × 南北 2.0 km の火山島である。同島は俊寛僧侶流刑の伝説地として知られている。また、安徳天皇の末えいと称される長浜豊彦氏(33代)が生存されていた島である。

鬼界カルデラの火山活動としては同カルデラの北縁(硫黄島の東方海上約 2 km)で昭和 9 年(1934)に海中噴火が起こり、高度約 25 m の新島(昭和硫黄島、海底から約 320 m)が誕生した。また、同島の硫黄岳(御岳)山頂火口には火山の噴火時に近い高温(800℃を超える)の噴気活動が長年に渡って継続している特異な火山である。現在、硫黄岳の火口・山腹には噴気活動がみられ、硫黄岳・稲村岳(噴気活動は見られない)の海岸線の一部には大量の温泉が湧出している。その温泉が海水中に流れ込む場所では海水中の成分と化学反応を起こし、白・赤などの温泉沈殿物を生成する。その沈殿物が海の潮流によって広がり、素晴らしい景観をみせる火山島である。

図 1 は鬼界カルデラ縁から、眼下に長浜港、中央に稲村岳、その向こうには現在も火山活動を継続している硫黄岳の姿である。同写真(カラー写真)の海岸線には温泉沈殿物の広がり確認できる。また、昭和硫黄島の浪打際から数メートル上がった場所には温泉が湧出している。

Sakamoto, H. 2015. Study on the chemical components of hot spring in Satsuma-Iwo-jima. *Nature of Kagoshima* 41: 295-306.

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

地球化学的にみた硫黄島火山の特異性は、①最近、噴火活動があったこと、②高温(800℃を超える)の噴気活動が現存し、その活動が長期間続いていること、③いろいろの温度の噴気孔が分布していること、④噴気活動と温泉活動が共存していること、⑤各種の火山性温泉が分布していること、⑥人が火口内に近づける数少ない研究のフィールドであることである。これらのことから硫黄島火山は多くの火山や温泉に興味を持つ国内外の研究者が訪れ、多くの報告がある(鎌田, 1964, 1988; 岩崎ほか, 1968; 鎌田ほか, 1974; 坂元・鎌田, 1975; 吉田・小沢, 1981; Nogami et al., 1993)。

著者らは前報で硫黄岳の噴気孔から放出される水銀などの揮発性元素について報告した(Sakamoto et al., 2003)。本報は 1961 年 7 月から 2000 年 10 月までに硫黄島周辺に湧出する温泉の化学成分を分析し、その経年変化を調べた。その結果を報告する。

■ 試料の採取と採取地点

硫黄島の海岸線に湧出する温泉は、海の干満の影響を受けるものが多い。このような温泉は、



図 1. 火山活動を続けている薩摩硫黄島火山の硫黄岳。眼下が長浜港、中央縁の山が稲村岳、中央奥が硫黄岳。

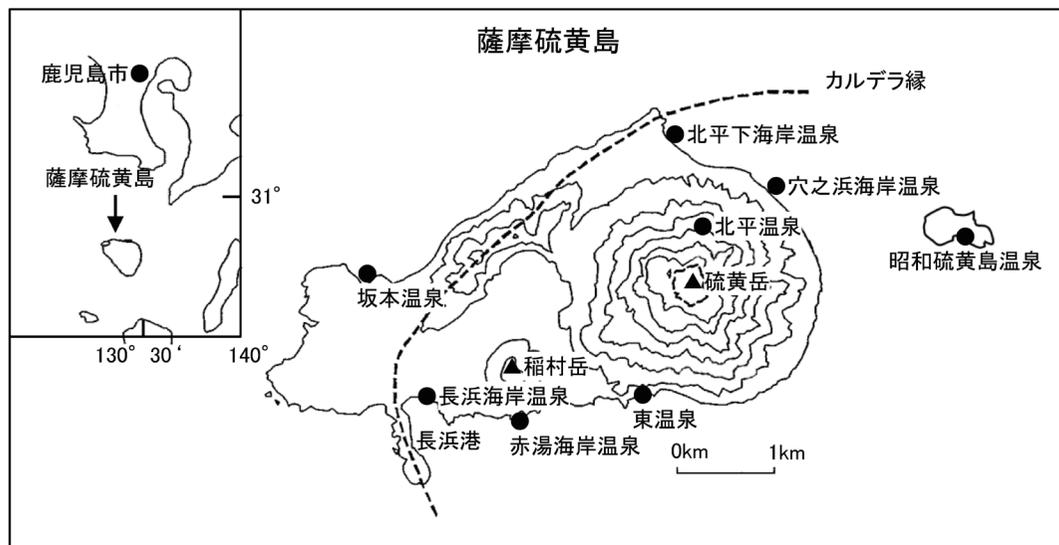


図2. 薩摩硫黄島の地形と温泉の湧出地点.

採水は干潮時とした。また、微量の重金属元素などを分析する試料の保存容器は、前もって硝酸(1:1)を入れて密封し、2週間以上保管したものを水洗して使用した。試料の採取時には試料水で3回以上洗浄してから採水を行った。pH 2以下の酸性泉には保存剤としての酸は加えていない。硫黄島の地形と温泉の湧出地点は図2に示す。

■ 分析法

試料の分析は、採水後できるだけ速やかに表1に示す分析方法を用いて行った (Kamada et al., 1979; Sakamoto et al., 1988)。

■ 分析結果並びに考察

温度 (泉温) 表2-1の東温泉31試料による温度は47.0–55.8 (幾何平均値53.1) °Cである。本報告では、平均値でなく幾何平均値で示す。その理由は自然界で起こる現象は対数正規分布であると言われている。したがって、平均値ではなく幾何平均値の値を使用することにする。

北平下海岸温泉の温度は67.0–72.0 (幾何平均値69.3) °Cである。北平温泉は北平下海岸温泉から硫黄岳を臨む山腹 (硫黄岳の噴気孔に近い) か

ら湧出している温泉で、温度は74.0°Cと北平下海岸温泉よりも高い。また、坂本温泉は鬼界カルデラ縁の外の海岸に湧出する温泉で温度は38.5–55.7 (幾何平均値48.8) °Cである。

北平下海岸温泉、坂本温泉、穴之浜海岸温泉、長浜海岸温泉、赤湯海岸温泉や昭和硫黄島温泉は海の潮汐の影響を受け、温度は干満によって変化することが分かっている。表2-1に記した温度は干潮時のものである。

pH 表2-1のpHは東温泉1.6–1.8 (幾何平均値1.7)、北平下海岸温泉1.3–1.6 (幾何平均値1.4)、坂本温泉6.1–7.2 (幾何平均値6.5)、長浜海岸温泉4.4–4.6 (幾何平均値4.5)、昭和硫黄島温泉5.8–5.9 (幾何平均値5.9) とそれらの値は極めて狭い範囲にある。

総フッ素 (F) 濃度 表2-1の総フッ素濃度は東温泉6.5–46.8 (幾何平均値19.5) mg/l、北平下海岸温泉11.0–28.8 (幾何平均値19.7) mg/lである。北平温泉は硫黄岳の噴気孔に近い山腹から湧出している温泉であるが、12.0 mg/lである。また、坂本温泉はカルデラ縁の外の海岸に湧出する温泉で、総フッ素濃度は0.40–1.2 (幾何平均値0.67) mg/lである。長浜海岸温泉、赤湯海岸温泉の総フッ

素濃度の幾何平均値はいずれも 1.0 mg/l, 東温泉近くの海水の幾何平均値は 1.8 mg/l である. ちなみに海水中のフッ素濃度は 1.3 mg/l である.

塩化物イオン (Cl⁻) 濃度 表 2-1 の塩化物イオン濃度は東温泉 662–1,820 (幾何平均値 1,090) mg/l, 北平下海岸温泉 1,730–5,620 (幾何平均値 3,820) mg/l である. 北平温泉は硫黄岳の噴気孔に近い山腹から湧出している温泉で, 塩化物イオン濃度は 720 mg/l で硫酸イオン濃度に比べて少ない. また, 坂本温泉の塩化物イオン濃度は 4,470–13,600 (幾何平均値 6,350) mg/l である. 長浜海岸温泉, 赤湯海岸温泉, 昭和硫黄島温泉の塩化物イオン濃度の幾何平均値はそれぞれ 8,070, 8,860, 18,850 mg/l である. また, 東温泉近くの海水の塩化物イオン濃度の幾何平均値は 18,600 mg/l であり, 昭和硫黄島温泉の塩化物イオン濃度にほぼ等しい. ちなみに海水中の塩化物イオン濃度は 19,350 mg/l である.

臭化物イオン (Br⁻) 濃度 表 2-1 の臭化物イオン濃度は東温泉 2.1–4.5 (幾何平均値 2.9) mg/l である. 坂本温泉は 1 検体しか分析していないが, 臭化物イオン濃度は 20.3 mg/l である. 海水中の臭化物イオン濃度は 65 mg/l 程度であり, 海水中の臭化物イオン濃度の影響が大きいと考えられる.

硫酸イオン (SO₄²⁻) 濃度 表 2-1 の硫酸イオン濃度は東温泉 2,420–6,950 (幾何平均値 4,920) mg/l, 北平下海岸温泉 5,740–13,510 (幾何平均値 10,600) mg/l である. 北平温泉は硫黄岳の噴気孔に近い山腹から湧出している温泉で, 硫酸イオン濃度は 14,300 mg/l であり, 噴気孔ガス中の二酸化硫黄 (SO₂) の寄与があると考えられる. また, 坂本温泉の硫酸イオン濃度は 785–1,940 (幾何平均値 999) mg/l である. 長浜海岸温泉, 赤湯海岸温泉, 昭和硫黄島温泉の硫酸イオン濃度の幾何平均値はそれぞれ 2,080, 2,520, 2,530 mg/l である.

表 1. 分析方法.

物質名	分析法
水素イオン濃度指数 (pH)	ガラス電極法
総フッ素 (T-F) フッ化物イオン (F ⁻)	ケイフッ化水素 (酸) 蒸留 吸光度法 (Azo-dye 法), イオンクロマトグラフ法
塩化物イオン (Cl ⁻)	硝酸銀滴定法 (Volhard 法, Mohr 法) 吸光度法 (チオシアン酸水銀法)
臭化物イオン (Br ⁻)	吸光度法, イオンクロマトグラフ法
硫酸イオン (SO ₄ ²⁻)	重量法 (硫酸バリウム) 吸光度法 (クロム酸バリウム酸懸濁法)
炭酸水素イオン (HCO ₃ ⁻)	硫酸による滴定法
ナトリウムイオン (Na ⁺)	炎光度法
カリウムイオン (K ⁺)	炎光度法
マグネシウムイオン (Mg ²⁺)	EDTA 滴定法, 原子吸光度法
カルシウムイオン (Ca ²⁺)	EDTA 滴定法, 原子吸光度法
アルミニウムイオン (Al ³⁺)	重量, ICP-MS 法
総マンガン (T-Mn)	吸光度法, 原子吸光度法
総鉄 (T-Fe)	吸光度法 (α , α' ジピリジル法)
総ホウ素 (T-B)	吸光度法 (メチレンブルー法)
比色ケイ酸 (SiO ₂)	吸光度法 (ケイモリブデン酸法)
銅 (Cu), 亜鉛 (Zn), カドミウム (Cd), 鉛 (Pb)	原子吸光度法 (Dithizone-CHCl ₃ -HCl 抽出)
総水銀 (T-Hg)	硫硝酸分解-還元気化-原子吸光度法
ヒ素 (As), アンチモン (Sb)	水素化物-原子吸光度法

表 2-1. 薩摩硫黄島温泉等の主要な陰イオン濃度と原子比 (モル比).

整理 番号	試料	採水年月日	温度 ℃	pH	T-F mg/l	Cl ⁻ mg/l	Br ⁻ mg/l	SO ₄ ²⁻ mg/l	HCO ₃ ⁻ mg/l	F/Cl 原子比 x100	Cl/S モル比 x10
A-1	東温泉 No.5	1961.07.19	52.8	1.7	19.0	1,390	2.5	5,890	0.0	2.56	6.40
A-2	東温泉 No.5	1961.07.28	54.7	1.7	26.5	1,200	2.1	6,160	0.0	4.13	5.28
A-3	東温泉 No.5	1962.07.23	51.5	1.7	13.5	804	2.2	5,230	0.0	3.14	4.17
A-4	東温泉 No.5	1962.07.28	51.3	1.8	17.0	800	2.2	5,280	0.0	3.97	4.11
A-5	東温泉 No.5	1966.08.06	47.0	1.8	7.5	744	-	4,770	0.0	1.9	4.23
A-6	東温泉 No.5	1966.08.08	52.0	1.8	7.0	727	-	4,840	0.0	1.8	4.07
A-7	東温泉 No.5	1967.07.22	57.7	1.6	16.0	1,360	-	6,530	0.0	2.20	5.64
A-8	東温泉 No.5	1971.07.24	54.5	1.8	18.7	937	-	4,240	0.0	3.73	5.99
A-9	東温泉 No.5	1971.07.28	54.3	1.8	20.0	937	-	4,150	0.0	3.99	6.12
A-10	東温泉 No.5	1972.08.26	52.5	1.6	23.0	950	-	4,290	0.0	4.53	6.00
A-11	東温泉 No.5	1973.08.21	51.5	1.7	23.5	957	-	4,210	0.0	4.59	6.16
A-12	東温泉 No.5	1974.07.26	55.6	1.6	37.4	1,820	-	6,630	0.0	3.84	7.44
A-13	東温泉 No.5	1974.08.03	55.8	1.6	37.2	1,800	-	6,950	0.0	3.86	7.02
A-14	東温泉 No.5	1974.08.08	55.8	1.6	38.0	1,790	-	6,930	0.0	3.97	7.00
A-15	東温泉 No.5	1974.10.24	55.7	1.6	29.8	1,690	-	6,560	0.0	3.30	6.98
A-16	東温泉 No.5	1975.01.25	55.2	1.6	28.5	1,560	-	6,220	0.0	3.42	6.80
A-17	東温泉 No.5	1975.05.30	55.2	1.7	19.6	1,160	-	5,080	0.0	3.16	6.19
A-18	東温泉 No.5	1975.07.25	55.5	1.7	19.4	1,160	-	5,000	0.0	3.13	6.29
A-19	東温泉 No.5	1976.08.25	50.4	1.8	15.3	723	-	2,420	0.0	3.96	8.10
A-20	東温泉 No.5	1976.08.28	50.5	1.8	11.8	730	-	2,430	0.0	3.02	8.14
A-21	東温泉 No.5	2000.10.22	53.6	1.7	46.8	1,530	4.3	4,500	0.0	5.72	9.21
A-22	東温泉 No.5	2000.10.20	53.6	1.7	46.3	1,540	4.5	4,480	0.0	5.62	9.32
A-23	東温泉 No.9	1961.07.21	52.0	1.7	18.0	1,120	2.6	5,910	0.0	3.01	5.14
A-24	東温泉 No.9	1961.07.28	52.4	1.7	18.5	1,150	2.7	5,980	0.0	3.01	5.21
A-25	東温泉 No.9	1966.08.06	50.5	1.8	8.5	662	-	4,990	0.0	2.4	3.60
A-26	東温泉 No.9	1966.08.08	49.9	1.8	6.5	673	-	4,830	0.0	1.8	3.78
A-27	東温泉 No.9	1967.07.22	55.5	1.6	14.0	1,270	-	6,540	0.0	2.06	5.26
A-28	東温泉 No.9	1971.07.25	53.0	1.8	17.8	866	-	3,880	0.0	3.84	6.05
A-29	東温泉 No.9	1971.07.28	53.0	1.8	17.8	866	-	3,880	0.0	3.84	6.05
A-30	東温泉 No.9	1972.08.26	50.5	1.6	21.0	917	-	4,090	0.0	4.28	6.08
A-31	東温泉 No.9	2000.10.20	53.2	1.7	46.1	1,540	4.3	4,320	0.0	5.60	9.66
A-32	北平温泉	1966.08.05	74.0	1.5	12.0	720	-	14,300	0.0	3.12	1.36
A-33	北平下海岸温泉 No.1	1966.08.05	68.0	1.5	19.5	3,250	-	12,100	0.0	1.12	7.28
A-34	北平下海岸温泉 No.2	1966.08.05	70.1	1.6	11.0	1,730	-	8,840	0.0	1.19	5.30
A-35	北平下海岸温泉	1971.07.25	68.8	1.4	-	4,630	-	10,090	0.0	-	12.4
A-36	北平下海岸温泉	1972.08.29	67.0	1.5	17	2,870	-	5,740	0.0	1.11	13.6
A-37	北平下海岸温泉 No.1	1974.08.04	70.5	1.3	28.5	4,910	-	13,100	0.0	1.09	10.2
A-38	北平下海岸温泉 No.2	1974.10.26	72.0	1.3	-	4,980	-	13,510	0.0	-	10.0
A-39	北平下海岸温泉 No.1	1975.01.24	70.4	1.4	-	5,620	-	12,800	0.0	-	11.9
A-40	北平下海岸温泉 No.2	1976.08.26	67.5	1.3	28.8	5,350	-	11,330	0.0	1.01	12.8
A-41	穴之浜海岸温泉	1974.08.04	61.0	2.7	-	13,700	-	2,760	0.0	-	135
A-42	坂本温泉	1962.07.25	50.0	6.3	0.40	5,330	-	863	-	0.014	167
A-43	坂本温泉	1967.07.20	55.4	6.9	1.2	6,080	-	955	52.8	0.037	173
A-44	坂本温泉	1967.07.21	54.5	7.2	1.0	4,770	-	785	54.3	0.039	165
A-45	坂本温泉	1972.08.27	45.0	6.5	-	6,010	-	932	-	-	175
A-46	坂本温泉	1973.08.26	49.5	6.2	0.58	5,780	-	937	-	0.019	167
A-47	坂本温泉	1974.08.06	38.5	6.5	-	13,600	-	1,940	-	-	190
A-48	坂本温泉	1974.10.25	49.9	6.4	-	6,010	-	932	152	-	175
A-49	坂本温泉	1975.01.24	43.5	6.1	-	6,000	-	922	-	-	176
A-50	坂本温泉	2000.10.22	55.7	6.2	0.48	6,400	20.3	1,050	60.3	0.014	165
A-51	長浜海岸温泉 No.1	1966.08.06	46.3	4.4	1.0	8,860	-	2,150	3.5	0.021	112
A-52	長浜海岸温泉 No.2	1966.08.06	48.0	4.6	1.0	7,350	-	2,010	3.8	0.025	99.1
A-53	赤湯海岸温泉	1966.08.06	46.3	4.8	1.0	8,860	-	1,070	98.0	0.021	224
A-54	昭和硫黄島温泉 No.1	1974.08.10	55.0	5.8	-	18,600	-	2,520	135	-	200
A-55	昭和硫黄島温泉 No.2	1974.08.10	49.0	5.9	-	19,100	-	2,540	146	-	204
A-56	東温泉近くの海水	1966.08.08	29.0	6.2	2.3	18,400	-	2,580	12.2	0.023	193
A-57	東温泉西の砂浜	1966.08.08	28.0	7.1	1.4	18,800	-	2,630	12.4	0.014	194

pH: 水素イオン濃度指数, T-F: 総フッ素, Cl⁻: 塩化物イオン, Br⁻: 臭化物イオン, SO₄²⁻: 硫酸イオン, HCO₃⁻: 炭酸水素イオン.

表 2-2. 薩摩硫黄島温泉等の陽イオン成分などの濃度と原子比.

整理 番号	試料	Na ⁺ mg/l	K ⁺ mg/l	Mg ²⁺ mg/l	Ca ²⁺ mg/l	Al ³⁺ mg/l	T-Mn mg/l	T-Fe mg/l	T-B mg/l	SiO ₂ mg/l	Na/K 原子比	Mg/Ca 原子比
A-1	東温泉 No.5	455	148	68.4	241	806	-	47.6	-	98.6	5.23	0.47
A-2	東温泉 No.5	487	156	64.7	185	777	-	58.6	-	119	5.31	0.58
A-3	東温泉 No.5	320	97.0	58.9	168	788	-	33.0	-	109	5.61	0.58
A-4	東温泉 No.5	330	99.0	70.8	178	856	-	26.7	-	112	5.67	0.66
A-5	東温泉 No.5	296	117	70.5	136	618	8.3	89.9	2.7	228	4.30	0.86
A-6	東温泉 No.5	294	100	55.9	128	663	7.0	91.0	2.8	230	5.00	0.72
A-7	東温泉 No.5	360	192	56.9	147	963	7.6	170	-	-	3.19	0.64
A-8	東温泉 No.5	295	130	26.2	149	613	-	99.5	1.9	225	3.86	0.29
A-9	東温泉 No.5	287	125	25.5	132	586	-	100	2.0	227	3.90	0.32
A-10	東温泉 No.5	271	127	26.0	140	640	-	100	-	235	3.63	0.31
A-11	東温泉 No.5	268	127	27.5	140	600	-	99.0	-	227	3.59	0.32
A-12	東温泉 No.5	393	217	34.0	186	937	-	217	-	221	3.08	0.30
A-13	東温泉 No.5	401	218	32.0	186	934	-	212	-	221	3.13	0.28
A-14	東温泉 No.5	395	217	34.8	184	892	-	213	-	222	3.09	0.31
A-15	東温泉 No.5	390	205	33.4	176	920	6.3	218	-	222	3.23	0.31
A-16	東温泉 No.5	358	193	31.2	170	922	5.9	187	-	-	3.15	0.30
A-17	東温泉 No.5	300	155	28.3	156	744	5.2	143	-	-	3.29	0.30
A-18	東温泉 No.5	295	153	28.1	155	735	5.1	143	-	-	3.28	0.30
A-19	東温泉 No.5	286	150	27.5	152	715	5.0	140	-	-	3.24	0.30
A-20	東温泉 No.5	287	152	27.1	150	705	4.9	138	-	-	3.21	0.30
A-21	東温泉 No.5	321	126	50.1	201	410 [*]	6.0	125	2.2	220	4.33	0.41
A-22	東温泉 No.5	314	125	49.5	196	406 [*]	5.9	126	2.0	216	4.27	0.42
A-23	東温泉 No.9	450	152	66.0	229	872	-	23.7	-	90.5	5.03	0.48
A-24	東温泉 No.9	448	149	74.5	217	846	-	42.4	-	111	5.11	0.57
A-25	東温泉 No.9	305	104	65.2	141	615	8.3	92.0	2.6	-	4.99	0.76
A-26	東温泉 No.9	305	105	58.4	141	671	9.1	87.8	2.7	225	4.94	0.68
A-27	東温泉 No.9	345	198	56.0	157	931	7.4	160	-	-	2.96	0.59
A-28	東温泉 No.9	275	121	25.3	130	548	-	87.5	1.7	217	3.86	0.32
A-29	東温泉 No.9	275	121	25.8	132	548	-	87.5	1.7	217	3.86	0.32
A-30	東温泉 No.9	256	119	31.8	157	604	-	93.0	-	218	3.66	0.33
A-31	東温泉 No.9	345	122	53.1	198	392 [*]	5.7	119	2.0	211	4.81	0.44
A-32	北平温泉	674	216	602	229	1,160	8.5	525	4.8	-	5.30	4.34
A-33	北平下海岸温泉 No.1	800	296	161	249	1,550	12.6	435	3.4	255	4.59	1.07
A-34	北平下海岸温泉 No.2	406	215	123	208	1,190	14.0	320	3.6	262	3.21	0.98
A-35	北平下海岸温泉	-	-	-	-	1,470	-	323	3.1	268	-	-
A-36	北平下海岸温泉	730	300	120	280	1,460	-	322	-	265	4.14	0.71
A-37	北平下海岸温泉 No.1	1,520	470	227	380	1,630	-	412	-	253	5.50	0.99
A-38	北平下海岸温泉 No.2	-	-	-	-	-	-	433	-	-	-	-
A-39	北平下海岸温泉 No.1	1,700	520	233	340	1,740	15.8	388	-	-	5.56	1.13
A-40	北平下海岸温泉 No.2	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
A-41	穴之浜海岸温泉	6,500	427	916	195	-	-	46.5	-	178	25.9	7.75
A-42	坂本温泉	2,920	129	401	232	-	-	0.06	1.9	-	38.5	2.85
A-43	坂本温泉	3,360	198	404	217	-	-	0.02	2.0	74.0	28.8	3.07
A-44	坂本温泉	2,580	198	299	197	-	-	0.03	2.2	101	22.2	2.50
A-45	坂本温泉	4,690	300	227	227	-	-	0.02	-	-	26.6	1.65
A-46	坂本温泉	2,850	218	370	148	-	-	0.02	-	144	22.2	4.13
A-47	坂本温泉	6,500	398	880	298	-	-	0.03	-	93.0	27.8	4.87
A-48	坂本温泉	2,800	218	389	200	-	0.02	0.02	-	152	21.8	3.21
A-49	坂本温泉	2,790	223	201	99.0	-	0.18	0.02	-	-	21.3	3.35
A-50	坂本温泉	3,290	165	351	202	0.97	0.05	0.02	1.7	77.7	33.9	2.87
A-51	長浜海岸温泉 No.1	4,790	600	257	355	-	1.2	62.0	2.9	113	13.6	1.2
A-52	長浜海岸温泉 No.2	3,850	499	233	312	-	-	76.0	-	133	13.1	1.2
A-53	赤湯海岸温泉	-	-	-	-	-	-	62.0	-	-	-	-
A-54	昭和硫黄島 No.1	4,790	670	568	400	-	-	25.1	-	-	12.2	2.34
A-55	昭和硫黄島 No.2	5,350	730	588	420	-	-	25.2	-	-	12.5	2.31
A-56	東温泉近くの海水	9,750	1,200	710	218	-	0.2	0.30	4.6	1.2	13.8	5.37
A-57	東温泉西の砂浜	10,100	1,290	715	220	-	0.1	0.14	-	-	13.3	5.36

Na⁺: ナトリウムイオン, K⁺: カリウムイオン, Mg²⁺: マグネシウムイオン, Ca²⁺: カルシウムイオン,Al³⁺: アルミニウムイオン, T-Mn: 総マンガン, T-Fe: 総鉄, T-B: 総ホウ素, SiO₂: 比色ケイ酸, *: ICP-MS による.

東温泉近くの海水の硫酸イオン濃度の幾何平均値は2,610 mg/lで、海水中の硫酸イオン濃度に近似している。

炭酸水素イオン (HCO_3^-) 濃度 表2-1の炭酸水素イオン (HCO_3^-) 濃度は東温泉, 北平温泉, 北平下海岸温泉のpHがすべて1.8以下であり, 炭酸水素イオンの形では存在することができない。一方, 坂本温泉, 長浜海岸温泉, 赤湯海岸温泉や昭和硫黄島温泉はpHが4.3以上であり炭酸水素イオンの形で存在している。

F/Cl \times 100 (原子比) 温泉中の各種成分濃度の動き(挙動)を調べるのに原子比(原子間の割合)またはモル比(分子間の割合)を求めると濃度だけでは分からない現象を捉えることができる。本報告ではF/Cl(原子比), Cl/S(モル比)について記す。

表2-1のF/Cl \times 100(原子比)の値は東温泉1.8–5.72(幾何平均値3.37), 北平下海岸温泉1.01–1.19(幾何平均値1.10), 坂本温泉0.014–0.039(幾何平均値0.022), 長浜海岸温泉0.021–0.025(幾何平均値0.023), 赤湯海岸温泉0.021, 東温泉そば海水0.014–0.023(幾何平均値0.018)である。坂本温泉, 長浜海岸温泉, 赤湯海岸温泉のF/Cl \times 100(原子比)の値(幾何平均値)は東温泉近くの海水の値に近いことから海水の影響を強く受けた温泉であると考えられる。一方, 東温泉, 北平温泉や北平下海岸温泉は硫黄岳の噴気孔ガス並びに岩体の影響を強く受けた温泉と考えられる。硫黄岳火口から火山灰の放出があった2000年10月20–22日の東温泉のF/Cl \times 100の値(幾何平均値5.6)は約40年間の幾何平均値3.37よりも大きいことを示している。

硫黄岳火口から火山灰の放出があった2000年10月20–22日の東温泉のF/Cl \times 100の値(幾何平均値5.6)は約40年間の幾何平均値3.37よりも大きいことから硫黄岳の火山活動との関連性が示唆される。

Cl/S \times 10 (モル比) 表2-1のCl/S \times 10(モル比)の幾何平均値は東温泉3.60–9.66(幾何平均値5.98), 北平温泉1.36, 北平下海岸温泉5.30–13.6(幾何平均値10.0), 穴之浜海岸温泉135, 坂本温泉

165–190(幾何平均値172), 長浜海岸温泉99.1–112(幾何平均値105), 赤湯海岸温泉224, 昭和硫黄島温泉200–204(幾何平均値202), 東温泉近くの海水193–194(幾何平均値193)である。坂本温泉と昭和硫黄島温泉のCl/S \times 10(モル比)の値(幾何平均値)は東温泉近くの海水の値に近いことから海水の影響を受けた温泉である。一方, 東温泉, 北平温泉や北平下海岸温泉は硫黄岳の噴気ガスや岩体の影響を強く受けた温泉と考えられる。硫黄岳火口から火山灰の放出があった2000年10月20–22日の東温泉のCl/S \times 10の値(幾何平均値9.4)は約40年間の幾何平均値6.0よりも大きいことを示している。

硫黄岳火口から火山灰の放出があった2000年10月20–22日の東温泉のCl/S \times 10の値(幾何平均値9.4)は約40年間の幾何平均値6.0よりも大きいことから硫黄岳の火山活動との関連性が示唆される。

ナトリウムイオン (Na^+) 濃度 表2-2のナトリウムイオン濃度は東温泉256–487(幾何平均値330) mg/lである。北平下海岸温泉406–1,700(幾何平均値907) mg/lである。北平温泉は硫黄岳の噴気孔に近い山腹から湧出している温泉でありナトリウムイオン濃度は674 mg/lである。坂本温泉は海岸に湧出する温泉でナトリウムイオン濃度は2,580–6,500(幾何平均値3,370) mg/lである。また, 穴之浜海岸温泉, 長浜海岸温泉, 昭和硫黄島温泉, 東温泉近くの海水のナトリウムイオン濃度の幾何平均値はそれぞれ6,500, 4,290, 5,060, 9,920 mg/lである。

カリウムイオン (K^+) 濃度 表2-2のカリウムイオン濃度は東温泉97.0–218(幾何平均値141) mg/lである。北平下海岸温泉215–520(幾何平均値342) mg/lである。北平温泉は硫黄岳の噴気孔に近い山腹から湧出している温泉でありカリウムイオン濃度は216 mg/lである。坂本温泉は海岸に湧出する温泉でカリウムイオン濃度は129–398(幾何平均値217) mg/lである。また, 穴之浜海岸温泉, 長浜海岸温泉, 昭和硫黄島温泉, 東温泉近くの海水のカリウムイオン濃度の幾何平均値はそれぞれ427, 547, 699, 1,240 mg/lである。

マグネシウムイオン (Mg^{2+}) 濃度 表 2-2 のマグネシウムイオン濃度は東温泉 25.3–70.8 (幾何平均値 41.4) mg/l である。北平下海岸温泉のマグネシウムイオン濃度は 120–233 (幾何平均値 166) mg/l である。北平温泉は硫黄岳の噴気孔に近い山腹から湧出している温泉でありマグネシウムイオン濃度は 602 mg/l である。また、坂本温泉は海岸に湧出する温泉でマグネシウムイオン濃度は 201–880 (幾何平均値 359) mg/l である。また、穴之浜海岸温泉, 長浜海岸温泉, 昭和硫黄島温泉, 東温泉近くの海水のマグネシウムイオン濃度の幾何平均値はそれぞれ 916, 245, 578, 712 mg/l である。

カルシウムイオン (Ca^{2+}) 濃度 表 2-2 のカルシウムイオン濃度は東温泉 128–241 (幾何平均値 164) mg/l である。北平下海岸温泉のカルシウムイオン濃度は 208–380 (幾何平均値 285) mg/l である。北平温泉は硫黄岳の噴気孔に近い山腹から湧出している温泉でありカルシウムイオン濃度は 229 mg/l である。また、坂本温泉は海岸に湧出する温泉でカルシウムイオン濃度は 99.0–298 (幾何平均値 194) mg/l である。また、穴之浜海岸温泉, 長浜海岸温泉, 昭和硫黄島温泉, 東温泉近くの海水のカルシウムイオン濃度の幾何平均値はそれぞれ 195, 333, 410, 219 mg/l である。

アルミニウムイオン (Al^{3+}), 総マンガン (T-Mn), 総鉄 (T-Fe), 総ホウ素 (T-B) 並びにケイ酸 (Si を SiO_2 の形に換算した値で示す) 濃度 表 2-2 のアルミニウムイオン (Al^{3+}), 総マンガン (T-Mn), 総鉄 (T-Fe) 濃度は東温泉, 北平温泉や北平下海岸温泉のような酸性泉 (pH1.8 以下) に多く含まれていることを示している。特に, 温泉水中に溶存したマンガン・鉄は温泉水が地上に湧出する前は還元的な雰囲気にある。温泉水を採取後, 空気中の酸素に触れ酸化的な雰囲気に曝される。したがって, 酸化状態を調べる時以外はそれらの総量を求めた。

総ホウ素 (T-B) 濃度は東温泉 1.7–2.8 (幾何平均値 2.0) mg/l である。北平温泉の総ホウ素濃度は 4.8 mg/l, 北平下海岸温泉は 3.1–3.6 (幾何平均値 3.4) mg/l である。硫黄岳の噴気孔に近い山腹

から湧出している北平温泉の総ホウ素濃度が最も高い。この理由として噴気孔ガス中のホウ素の寄与があると考えられる (岩崎ほか, 1968)。一方, 坂本温泉の総ホウ素濃度は 1.7–2.2 (幾何平均値 1.9) mg/l と高く, 海水中に含まれるホウ素 (4.55 mg/l) 濃度の影響による考えられる。

ケイ酸 (SiO_2) 濃度は東温泉 90.5–235 (幾何平均値 183) mg/l である。北平下海岸温泉のケイ酸濃度は 253–268 (幾何平均値 261) mg/l である。また, 坂本温泉のケイ酸濃度は 74.0–152 (幾何平均値 103) mg/l であり, 海水中にケイ酸濃度が低い (SiO_2 として 0.33 mg/l) ことから岩体からの溶出が考えられる。

Na/K (原子比) 表 2-2 の Na/K (原子比) の値は東温泉 2.96–5.67 (幾何平均値 3.97), 北平温泉 5.30, 北平下海岸温泉 3.21–5.56 (幾何平均値 4.51), 坂本温泉 21.3–38.5 (幾何平均値 26.5), 長浜海岸温泉 13.1–13.6 (幾何平均値 13.3), 昭和硫黄島温泉 12.2–12.5 (幾何平均値 12.3), 東温泉近くの海水 13.3–13.8 (幾何平均値 13.6) である。長浜温泉と昭和硫黄島温泉の Na/K (原子比) の値 (幾何平均値) は東温泉近くの値に近いことから海水の影響を直接受けた温泉である。一方, 東温泉, 北平温泉や北平下海岸温泉は硫黄岳の噴気孔ガス並びに岩体との相互作用を強く受けた温泉と考えられる。

Mg/Ca (原子比) 表 2-2 の Mg/Ca (原子比) の値は東温泉 0.28–0.86 (幾何平均値 0.42), 北平温泉 4.34, 北平下海岸温泉 0.71–1.13 (幾何平均値 0.96), 坂本温泉 1.65–4.87 (幾何平均値 3.04), 長浜海岸温泉 1.2 (幾何平均値 1.2), 昭和硫黄島 2.31–2.34 (幾何平均値 2.33), 東温泉近くの海水 5.36–5.37 (幾何平均値 5.37) である。坂本温泉, 長浜海岸温泉, 昭和硫黄島温泉の Mg/Ca (原子比) は東温泉や北平下海岸温泉とは異なっている。

陰イオン (Cl , SO_4^{2-} , HCO_3^-) の重量組成 (%) の三角座標グラフ 表 2-1 の主要な陰イオン (Cl , SO_4^{2-} , HCO_3^-) 濃度の温泉湧出地ごとの成分濃度の幾何平均の合計で 3 成分濃度の重量組成 (%) で表し, それらの値を三角座標グラフにプロットした。その図は図 3-1 に示す。この図には pH 1.8

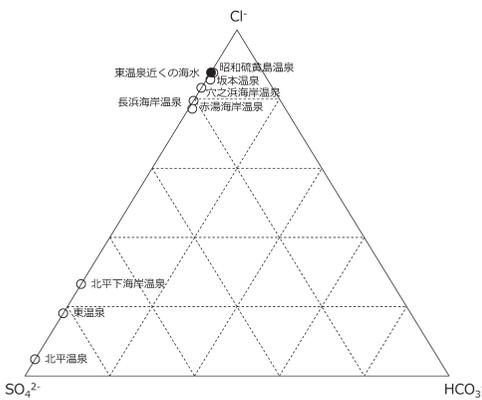


図 3-1. 主要な陰イオン重量組成 (%) の三角座標グラフ。

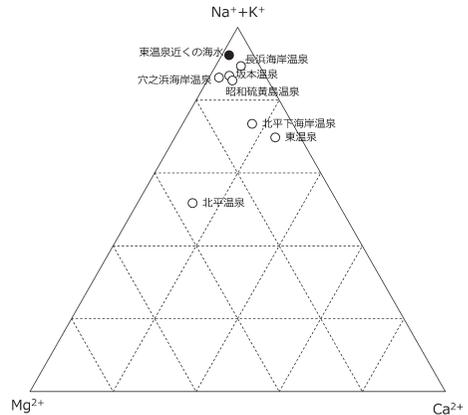


図 3-2. 主要な陽イオン重量組成 (%) の三角座標グラフ。

以下の東温泉，北平温泉，北平下海岸温泉は炭酸水素イオン (HCO_3^-) の形では存在しない。したがって，東温泉，北平温泉，北平下海岸温泉は三角座標グラフの一边上に硫酸イオンを減らし，塩化物イオンが増加している。一方，長浜海岸温泉，穴之浜海岸温泉，坂本温泉，赤湯海岸温泉，昭和硫黄島温泉は東温泉近くの海水（図 3-1 の●印）の陰イオン (Cl^- , SO_4^{2-} , HCO_3^-) の組成に近いことを示している。

陽イオン ($\text{Na}^+ + \text{K}^+$, Mg^{2+} , Ca^{2+}) の組成 (%) の三角座標グラフ 表 2-2 の主要な陽イオン ($\text{Na}^+ + \text{K}^+$, Mg^{2+} , Ca^{2+}) 濃度の温泉湧出地ごとの成分濃度の幾何平均の合計で各成分濃度の重量組成 (%) で表し，それらの値を三角座標グラフにプロットした。その図は図 3-2 に示す。この図は東温泉，北平温泉と北平下海岸温泉はカルシウムイオン (Ca^{2+}) 濃度はほぼ一定値を示している。一方，ナトリウムイオン (Na^+) + カリウムイオン (K^+) 濃度の割合は変動している。また，長浜海岸温泉，穴之浜海岸温泉，坂本温泉，昭和硫黄島温泉の Na/K 比は東温泉近くの海水（図 3-2 の●印）の陽イオン ($\text{Na}^+ + \text{K}^+$, Mg^{2+} , Ca^{2+}) の組成に近いことを示している。

Cu (銅), Zn (亜鉛), Cd (カドミウム), Pb (鉛) 等の濃度 表 3 は Cu (銅), Zn (亜鉛), Cd (カドミウム), Pb (鉛), As (ヒ素), Sb (アンチモン)

などの微量成分元素濃度とそれらの原子比 $\times 100$ (Cu/Zn , Cd/Zn , Pb/Zn) の値を示す。銅濃度は東温泉 0.45–3.9 (幾何平均値 1.9) $\mu\text{g}/\text{l}$ である ($\mu\text{g}/\text{l}$ は mg/l の千分の 1 小さい単位である)。北平下海岸温泉の銅濃度は 2.6–3.6 (幾何平均値 3.2) $\mu\text{g}/\text{l}$ である。穴之浜温泉の銅濃度は 1.5–29.7 $\mu\text{g}/\text{l}$ と広いが，試料数が 2 検体であり，その原因は特定できていない。

一方，坂本温泉の銅濃度は 0.19–1.00 (幾何平均値 0.34) $\mu\text{g}/\text{l}$ である。東温泉・北平下海岸温泉・穴之浜温泉の pH が 1.8 以下であり，坂本温泉はカルデラ縁の外の海岸に湧出する中性の温泉であることが銅濃度の大小に関係していると考えられる。

亜鉛濃度は東温泉 395–690 (幾何平均値 500) $\mu\text{g}/\text{l}$ である。北平下海岸温泉の亜鉛濃度は 920–1,230 (幾何平均値 1,080) $\mu\text{g}/\text{l}$ である。穴之浜海岸温泉の亜鉛濃度は 130–1,270 $\mu\text{g}/\text{l}$ と広いが，試料数が 2 検体であり，銅と同様にその原因は特定できていない。

一方，坂本温泉の亜鉛濃度は 4.2–50.0 (幾何平均値 15.3) $\mu\text{g}/\text{l}$ である。東温泉・北平下海岸温泉・穴之浜温泉の pH が 1.8 以下であり，坂本温泉はカルデラ縁の外の海岸に湧出する中性の温泉であることが関係していると考えられる。一般の岩石の銅・亜鉛は銅に比べて亜鉛が溶出しやすいこと

が知られている。

カドミウム濃度は東温泉 2.1–7.2 (幾何平均値 4.3) $\mu\text{g/l}$ である。北平下海岸温泉のカドミウム濃度は 2.1–2.6 (幾何平均値 2.4) $\mu\text{g/l}$ である。穴之浜海岸温泉のカドミウム濃度は 0.2–1.9 (幾何平均値 0.62) $\mu\text{g/l}$ と広いが、試料数が 2 検体であり、その原因は特定できていない。

一方、坂本温泉のカドミウム濃度は 0.01–0.10 (幾何平均値 0.04) $\mu\text{g/l}$ である。東温泉・北平下海岸温泉・穴之浜海岸温泉の pH が 1.8 以下であり、坂本温泉はカルデラ縁の外の海岸に湧出する中性の温泉であることが関係していると考えられる。その他の温泉のカドミウム濃度は東温泉などの酸性泉に比べて低い。

鉛濃度は東温泉 13.0–90.0 (幾何平均値 32.5) $\mu\text{g/l}$ である。北平下海岸温泉の鉛濃度は 61.0–110 (幾何平均値 95.6) $\mu\text{g/l}$ とその濃度範囲は広い。穴之浜海岸温泉の鉛濃度は 2.0–3.8 (幾何平均値 2.8) $\mu\text{g/l}$ である。

一方、坂本温泉の鉛濃度は 0.01–0.26 (幾何平均値 0.11) $\mu\text{g/l}$ である。東温泉・北平下海岸温泉・穴之浜海岸温泉の pH が 1.8 以下であり、坂本温泉はカルデラ縁の外の海岸に湧出する中性の温泉であることが関係していると考えられる。その他の温泉の鉛濃度は東温泉などの酸性泉に比べて低い。

総水銀濃度は東温泉 0.010–0.100 (幾何平均値 0.023) $\mu\text{g/l}$ である。北平下海岸温泉の総水銀濃度は 0.015–0.050 (幾何平均値 0.027) $\mu\text{g/l}$ である。坂本温泉の総水銀濃度は 0.008–0.020 (幾何平均値 0.016) $\mu\text{g/l}$ である。その他の温泉の総水銀濃度は低く、硫黄島の酸性泉・中性泉による総水銀濃度の泉質による差異はない。

ヒ素とアンチモン濃度は限られた試料にしか分析を行っていない。東温泉のヒ素濃度は 310–435 (幾何平均値 361) $\mu\text{g/l}$ で、アンチモン濃度は 1.2–1.9 (幾何平均値 1.6) $\mu\text{g/l}$ である。赤湯海岸温泉や坂本温泉のヒ素、アンチモン濃度は分析した試料が 1 検体で決定的なことは言えないが、東温泉のような酸性泉に比べてその濃度は低い。しかし、ヒ素は鉄質沈殿物に濃縮されることが知ら

れているので沈殿物について調べる必要がある。

東温泉の湧出量とヒ素の放出量 東温泉は温泉の湧出孔が多数あり、最も湧出量の多い No. 5 源泉 (海岸の上部にある) と干潮時に採取可能な湧出孔 (No. 9) の温泉の分析を行った。その周辺にも温泉の湧出孔があり、それらを合わせた東温泉の総湧出量は 500–2,000 l/min (リットル/分) の間を推移している (鎌田ほか, 1974)。仮に、東温泉の湧出量を 1,000 l/min とすればヒ素濃度 (幾何平均値 361) $\mu\text{g/l}$ からヒ素が 361 mg/min 放出されることになる。同様な計算を他の化学成分について行えば東温泉から海水へ放出される負荷量を算定できる。

■ まとめ

硫黄島温泉の分布と化学成分について以下に要約する。

温泉の型 A : 硫黄岳の周辺に湧出する温泉 pH が 2 以下でアルミニウム (Al^{3+})、マンガン (Mn^{2+} , 他)、鉄 (Fe^{2+} , Fe^{3+}) が多い。硫酸イオン (SO_4^{2-})、塩化物イオン (Cl^-)、フッ素 (F) を多量に含む温泉 (東温泉, 北平温泉, 北平下海岸温泉, 穴之浜海岸温泉) である。温泉に多量に含まれるアルミニウム、鉄などは海水中の成分と化学反応を起こし、無定形含水ケイ酸アルミニウム等の沈殿を生成する (Nogami et al., 1993)。これらの温泉の化学成分 (組成) には硫黄岳の火山噴気活動、岩体と降水量が影響する。

温泉の型 B : 稲村岳の周辺に湧出する温泉 稲村岳には噴気活動が見られない。pH が ~4 程度で鉄 (Fe^{2+} , Fe^{3+}) が多い。また、塩化物イオン (Cl^-)、硫酸イオン (SO_4^{2-}) を多量に含み、炭酸水素イオン (HCO_3^-) を含んでいる。温泉は海岸線に湧出するが、湧出する場所 (泉源) の特定は難しい。これらの温泉は鉄を多く含む海水中の化学成分と反応し、赤色の鉄質沈殿物を生成する。

温泉の型 C : カルデラの外側に湧出する温泉 pH が 6–7 でアルミニウム (Al^{3+})、鉄 (Fe^{2+} , Fe^{3+}) が少ない。一方、海の干満の影響を受けるのでナトリウムイオン (Na^+)、塩化物イオン (Cl^-)、硫

表3. 薩摩硫黄島温泉等の微量重金属元素などの濃度と原子比.

整理番号	試料	採水年月日	温度 °C	pH	Cu µg/l	Zn µg/l	Cd µg/l	Pb µg/l	T-Hg µg/l	As µg/l	Sb µg/l	Cu/Zn 原子比 x100	Cd/Zn 原子比 x100	Pb/Zn 原子比 x100
B-1	東温泉 No.5	1972.08.26	52.5	1.6	3.9	493	2.3	23.0	0.040	-	-	0.81	0.27	1.47
B-2	東温泉 No.5	1973.08.21	51.5	1.7	2.8	410	3.2	29.0	0.050	-	-	0.70	0.45	2.24
B-3	東温泉 No.5	1974.07.26	55.6	1.6	2.4	690	7.2	130	0.100	-	-	0.36	0.61	5.95
B-4	東温泉 No.5	1974.08.03	55.8	1.6	2.5	660	7.1	110	0.060	-	-	0.39	0.63	5.27
B-5	東温泉 No.5	1974.08.08	55.8	1.6	2.2	690	6.8	120	0.070	-	-	0.33	0.57	5.50
B-6	東温泉 No.5	1974.10.24	55.7	1.6	1.8	680	6.8	100	0.060	-	-	0.27	0.58	4.65
B-7	東温泉 No.5	1975.01.25	55.2	1.6	1.7	640	6.6	90.0	0.040	-	-	0.27	0.60	4.44
B-8	東温泉 No.5	1975.05.30	55.2	1.7	2.4	550	5.5	35.0	0.012	-	-	0.45	0.58	2.01
B-9	東温泉 No.5	1975.07.25	55.5	1.7	2.0	523	4.9	33.0	0.016	-	-	0.39	0.55	1.99
B-10	東温泉 No.5	1977.10.27	55.8	1.6	1.3	420	3.9	20.3	0.011	-	-	0.32	0.54	1.53
B-11	東温泉 No.5	1977.10.29	55.5	1.6	1.4	431	4.2	25.5	0.014	-	-	0.33	0.57	1.87
B-12	東温泉 No.5	1977.12.09	53.5	1.6	1.2	431	4.4	27.9	0.018	-	-	0.29	0.59	2.05
B-13	東温泉 No.5	1979.10.09	54.8	1.6	1.3	455	3.8	22.5	0.010	-	-	0.29	0.49	1.56
B-14	東温泉 No.5	1980.10.31	49.5	1.6	2.4	610	5.2	29.5	0.011	-	-	0.41	0.50	1.53
B-15	東温泉 No.5	1990.10.18	55.1	1.7	0.45	395	2.7	21.8	0.013	425	1.8	0.12	0.40	1.74
B-16	東温泉 No.5	1990.10.24	54.5	1.7	0.83	407	2.9	26.8	0.012	435	1.8	0.21	0.41	2.08
B-17	東温泉 No.5	2000.10.20	53.6	1.7	3.2	465	3.8	16.9	0.012	320	1.3	0.71	0.48	1.15
B-18	東温泉 No.5	2000.10.22	54.8	1.6	2.5	437	3.6	15.6	0.015	332	1.9	0.59	0.48	1.13
B-19	東温泉 No.9	1972.08.26	50.5	1.6	3.8	415	2.1	26.0	0.040	-	-	0.94	0.29	1.98
B-20	東温泉 No.9	1974.08.03	54.2	1.6	2.6	660	6.9	13.0	0.040	-	-	0.41	0.61	0.62
B-21	東温泉 No.9	1977.10.29	54.3	1.6	1.5	423	4.1	25.1	0.012	-	-	0.37	0.56	1.88
B-22	東温泉 No.9	1977.12.09	53.1	1.6	1.3	428	4.3	26.3	0.018	-	-	0.31	0.58	1.94
B-23	東温泉 No.9	2000.10.20	53.2	1.7	2.5	435	3.5	15.2	0.014	310	1.2	0.59	0.47	1.10
B-24	北平下海岸温泉	1972.08.29	67.0	1.4	2.6	920	2.1	61.0	0.030	-	-	0.29	0.13	2.10
B-25	北平下海岸温泉	1974.08.04	70.5	1.3	3.3	1,230	2.6	110	0.050	-	-	0.28	0.12	2.83
B-26	北平下海岸温泉	1974.10.26	72.0	1.3	3.1	1,150	2.6	106	0.030	-	-	0.28	0.13	2.91
B-27	北平下海岸温泉	1974.01.24	70.4	1.4	3.6	1,070	2.4	106	0.015	-	-	0.35	0.13	3.13
B-28	北平下海岸温泉	1975.07.24	70.4	1.4	3.6	1,070	2.4	106	0.020	-	-	0.35	0.13	3.13
B-29	穴之浜海岸温泉	1974.08.04	61.0	2.7	1.5	130	0.20	2.00	0.030	-	-	1.19	0.09	0.49
B-30	穴之浜海岸温泉	1990.10.21	70.5	2.5	29.7	1,270	1.9	3.80	0.013	335	1.8	2.41	0.09	0.09
B-31	赤湯海岸温泉	1977.12.09	28.6	4.1	0.45	59.3	0.02	0.16	0.013	-	-	0.78	0.02	0.09
B-32	赤湯海岸温泉	1990.10.21	28.5	4.2	0.70	91.0	0.20	0.30	0.010	4.5	0.1	0.79	0.13	0.01
B-33	坂本温泉	1972.05.27	45.0	6.3	0.19	4.2	0.01	0.10	-	-	-	4.66	0.14	0.75
B-34	坂本温泉	1974.08.06	38.5	6.5	0.20	50.0	0.10	0.20	0.020	-	-	0.41	0.12	0.13
B-35	坂本温泉	1974.10.25	49.9	6.4	1.00	23.0	0.09	0.26	0.020	-	-	4.48	0.23	0.36
B-36	坂本温泉	1975.01.24	43.5	6.1	0.39	15.0	0.05	0.20	0.020	-	-	2.68	0.19	0.42
B-37	坂本温泉	1977.12.09	42.8	6.3	0.33	14.5	0.03	0.13	0.016	-	-	2.34	0.12	0.28
B-38	坂本温泉	2000.10.22	55.7	6.2	0.29	12.0	0.03	0.01	0.008	19.4	0.3	2.49	0.15	0.03
B-39	長浜海岸温泉	1977.10.29	45.8	3.6	0.68	31.7	0.03	0.27	0.009	-	-	2.21	0.06	0.27
B-40	長浜海岸温泉	1977.12.10	43.6	3.9	0.60	23.0	0.02	0.17	0.007	-	-	2.69	0.05	0.23
B-41	東温泉海岸	1977.10.29	28.5	7.6	0.60	13.3	0.03	0.73	0.012	-	-	4.65	0.13	1.73
B-42	長浜港内	1977.10.29	29.8	6.8	0.65	10.7	0.02	0.13	0.019	-	-	6.26	0.11	0.38

pH: 水素イオン濃度指数, Cu: 銅, Zn: 亜鉛, Cd: カドミウム, Pb: 鉛, T-Hg: 総水銀, As: ヒ素 (Ⅲ+Ⅴ), Sb: アンチモン (Ⅲ+Ⅴ).

酸イオン (SO_4^{2-}) が多い。湧出する温泉は海水中の化学成分と合っても沈殿は生成することはない。

温泉の型 D：昭和硫黄島温泉 pH が 6-7 で海水が岩体と化学反応し、海水の影響を強く受けて生成される温泉である。

硫黄島長浜地区の井戸水（水道水）の化学組成について 海上に出現した活火山島の硫黄島岳は現在も活発な火山活動を継続している。硫黄島岳の噴気孔ガス中のハロゲン化水素 (HF , HCl 等) や二酸化硫黄 (SO_2) 等の影響を受けて山麓を除くと緑の森林（草木）が乏しい。したがって、島

表 4-1. 薩摩硫黄島の井戸水（水道水）の主要な陰イオン等の濃度と原子比（モル比）。

整理番号	試料	採年年月日	水温 ℃	pH	F ⁻ mg/l	Cl ⁻ mg/l	SO_4^{2-} mg/l	HCO_3^- mg/l	F/Cl 原子比 x100	Cl/S モル比 x10
C-1	井戸水（徳田）	1961.07.30	28.3	5.2	-	156	-	-	-	-
C-2	井戸水（安永）	1961.07.30	27.3	4.8	-	179	-	-	-	-
C-3	井戸水（森）	1961.07.30	24.9	4.5	-	193	-	-	-	-
C-4	井戸水（三幸丸船長）	1961.07.30	22.5	4.6	-	165	-	-	-	-
C-5	井戸水（長浜静男）	1961.07.30	22.9	5.4	-	139	-	-	-	-
C-6	井戸水（日高）	1961.07.30	30.4	5.5	-	142	-	-	-	-
C-7	井戸水（佐藤）	1961.07.30	29.0	4.8	-	161	-	-	-	-
C-8	井戸水（田中）	1961.07.30	24.5	4.6	-	155	-	-	-	-
C-9	井戸水（上村）	1962.07.23	24.1	6.8	-	-	-	29.0	-	-
C-10	井戸水（共同）	1962.07.23	24.0	6.5	-	-	-	36.0	-	-
C-11	水道水	1966.08.06	29.4	6.5	0.43	91	33.7	41.1	0.88	73.2
C-12	水道水（鉱業所）	1967.07.27	27.0	6.6	0.42	94	22.0	43.5	0.84	116
C-13	鉱業所水道水	1970.07.27	30.0	6.5	0.41	230	42.4	-	0.33	147
C-14	水道水（リクリエーションセンター）	1971.07.28	29.0	6.6	0.45	128	32.5	40.8	0.66	107
C-15	水道水（リクリエーションセンター）	1974.07.27	29.0	6.3	0.48	346	131	-	0.26	71.6
C-16	鉱業所水道水	1974.08.07	30.5	6.7	0.58	330	129	43.8	0.33	69.3
C-17	水道水	1975.05.30	35.0	6.0	0.60	629	251	-	0.18	67.9
C-18	水道水（水源）	1975.09.27	28.5	6.5	0.63	499	132	41.5	0.24	102
C-19	水道水（水源）	1983.02.24	28.0	7.4	0.65	534	145	45.8	0.23	99.8

pH：水素イオン濃度指数，F⁻：フッ化物イオン，Cl⁻：塩化物イオン， SO_4^{2-} ：硫酸イオン， HCO_3^- ：炭酸水素イオン。

表 4-2. 薩摩硫黄島の井戸水（水道水）の主要な陽イオン等の濃度と原子比。

整理番号	試料	Na ⁺ mg/l	K ⁺ mg/l	Mg ²⁺ mg/l	Ca ²⁺ mg/l	T-Fe mg/l	T-B mg/l	SiO ₂ mg/l	As μg/l	Sb μg/l	Na/K 原子比	Mg/Ca 原子比
C-1	井戸水（徳田）	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
C-2	井戸水（安永）	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
C-3	井戸水（森）	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
C-4	井戸水（三幸丸船長）	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
C-5	井戸水（長浜静男）	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
C-6	井戸水（日高）	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
C-7	井戸水（佐藤）	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
C-8	井戸水（田中）	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
C-9	井戸水（上村）	70.0	12.1	-	-	-	-	-	-	-	9.83	-
C-10	井戸水（共同）	-	44.2	-	-	-	-	-	-	-	-	-
C-11	水道水	56.5	12.0	9.0	21.6	-	0.04	78.5	-	-	8.00	0.69
C-12	水道水（鉱業所）	56.5	12.0	9.2	21.7	0.02	0.06	82.5	-	-	8.00	0.70
C-13	鉱業所水道水	-	-	-	-	0.02	0.08	-	-	-	-	-
C-14	水道水（リクリエーションセンター）	66.0	17.4	9.1	20.5	0.03	0.08	86.0	-	-	6.45	0.73
C-15	水道水（リクリエーションセンター）	148	28.4	26.0	32.6	0.02	-	-	1.2	-	8.86	1.32
C-16	鉱業所水道水	147	27.0	26.5	32.8	0.03	-	-	1.5	-	9.26	1.33
C-17	水道水	278	41.4	53.0	65.2	0.02	-	-	1.1	-	11.4	1.34
C-18	水道水（水源）	315	43.5	56.2	68.7	0.03	-	-	1.0	<0.10	12.3	1.35
C-19	水道水（水源）	324	47.6	57.8	69.2	0.02	-	-	1.0	<0.10	11.6	1.38

Na⁺：ナトリウムイオン，K⁺：カリウムイオン，Mg²⁺：マグネシウムイオン，Ca²⁺：カルシウムイオン，T-Fe：総鉄，T-B：総ホウ素，SiO₂：比色ケイ酸，As：ヒ素（Ⅲ + V），Sb：アンチモン（Ⅲ + V）。

の宿命として大きな河川がなく、良質の地下水にも恵まれていない。硫黄岳噴気孔ガス(火山ガス)や海岸線などに湧出する温泉調査の際に採取した長浜地区の井戸水(水道水)の分析結果は表 4-1, 表 4-2 に示す。

表 4-1 の調査期間(約 20 年)における塩化物イオン濃度の経年変化からは井戸水(水道水)の塩水化が進行している。また、表 4-2 のナトリウムイオン濃度などの経年変化についてもほぼ同様の傾向が認められる。このことは電気を使う電化製品の普及に伴う水の使用量の増加や水を使う事業等の進出の影響が考えられる。ちなみに日本の水道水質基準は塩化物イオン 200 mg/l 以下、ナトリウム及びその化合物 200 mg/l 以下となっている。したがって、1983 年には現在の水道水の基準値を超えていたことになる。

今後、硫黄島で新しい事業展開する場合はどの程度の井戸水(水道水)が使用できるかを検討する必要がある。

■ あとがき

硫黄島火山硫黄岳は活発な火山活動を継続している。同火山の噴気孔ガスの多様性、温泉活動との共存などから硫黄島火山は火山性温泉の典型的な例である。本報告は硫黄島周辺に湧出する温泉を採取し、化学成分(組成)の経年変化に注目した研究データの整理を行った。約 40 年間に渡る温泉の化学成分(組成)について知見を得ることができた。硫黄島の温泉の生成機構には噴気孔ガス、岩体、降水(地下水)、海水の寄与の他に地下深部からの“食塩泉”，との混合を考える必要がある。また、水素、酸素や硫黄など同位体地球化学的なデータと合わせた考察が求められる。

今後、硫黄島の火山活動が長期化すれば、火山ガスや温泉から放出される化学成分元素などが大気や水環境に入り、局所的な生態系に何らかの影響を及ぼすことも考えられる。火山活動は消長があり、継続した調査研究が望まれる。

■ 謝辞

本研究を行うに当たり、鹿児島大学の(故)鎌田政明博士・大西富雄博士、東京工業大学の(故)小坂丈予博士・(故)小沢竹二郎博士・吉田 稔博士には終始ご教示をいただいた。現地調査にあたっては小野田セメント株式会社、南東硫黄株式会社、末野研究所のご支援に感謝の意を表す。宿泊等では長浜豊彦氏、山下秀夫氏、大山英雄氏をはじめ、長浜集落の方々に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伊藤桃恵・緒方真生・吉村(新入)恵子・財津(富田)久美子学士、同大学理工学研究科の満窪文彦・江口(石山)裕美・梶原祐介修士には、多大なご協力を得た。ここに記して、お礼を申し上げる。

■ 参考文献

- 岩崎岩次・鎌田政明・大西富雄・坂元隼雄. 1968. 天然水中におけるテトラフルオロホウ酸イオンの存在. 日本化学雑誌, 89 (3), 324-325.
- 鎌田政明. 1964. 鹿児島県硫黄島の火山と地熱. 地熱, 3, 1-23.
- 鎌田政明. 1988. 薩摩硫黄島の火山と温泉. 化学と工業, 41 (10), 927-929.
- 鎌田政明・大西富雄・坂元隼雄. 1974. 硫黄島火山(鹿児島県)の地球化学的研究. 温泉工学会誌, 9 (3), 117-124.
- Kamada, M. and Sakamoto, H. 1979. Determination of cadmium, copper, lead, zinc and mercury in fresh water, sea water, sediment and vegetable. Spec. Pro. Res. Det. Con. Environ. Poll., 1, 156-160.
- Nogami, K., Yoshida, M. and Osaka, J. 1993. Chemical composition of discolored seawater around Satsuma-Iwojima, Kagoshima, Japan, Bull. Volcanol. Soc. Japan, 38, 71-77.
- 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・鎌田政明. 1975. 火山発散物中の重金属の分布. 日本火山学会 1975 年度秋季大会講演要旨, 火山, 第 2 集, 20 (3), 188-189.
- 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.
- 吉田 稔・小沢竹二郎. 1981. 薩摩硫黄島火山から放出される化学成分の量とその供給源に関する量的考察. 火山, 第 2 集, 26 (1), 25-34.