
原 著

三宅島の温泉水および その他の天然水の水と溶存物質の起源

東京大学教養学部化学教室

大 沢 信 二, 綿 抜 邦 彦

(平成3年9月23日受理)

Origin of Water and Dissolved Materials in Hot Spring and Other Natural Waters in Miyakejima-Island, Izu-Islands, Japan

Shinji OHSAWA and Kunihiko WATANUKI

Department of Chemistry, College of Arts and Sciences, The University of Tokyo

Abstract

There are two hot springs (Yunohama, Ainoama) and two ponds (Tairo-ike, Shinmyo-ike) near the seashore of Miyakejima-Island. After the 1983 eruption, two hot springs (Nippana, Kaigan) newly appeared in the craters caused near the south seashore. Shinmyo-ike changed completely its form through the phreatomagmatic eruption in 1983. These natural waters were chemically and isotopically analyzed.

The natural waters in Miyakejima-Island are shown to be formed by the mixing between sea water and meteoric water as first approximation. And more detail analyses give some conclusions as follows. The chemical components of the pond waters and low temperature spring waters in the island are interpreted as the results of leaching from basaltic rocks. Isotopic compositions of hydrogen and oxygen of Tairo-ike and Shimyo-ike pond waters before 1983 eruption are elucidated as the kinetic isotope effect with evaporation. The chemical composition of Yunohama hot spring water is under the control of a water-rock interaction, but the reaction temperature in the interaction zones may not be so high, probably below ca. 100°C. Increase of calcium and bicarbonate ions in Yunohama hot spring water may be derived from a biogenetic carbonate like coral. Kaigan hot spring water has the same chemical composition as the sea water. Volcanic gases furnished from new fumaroles in the craters would influence the chemical compositions of Nippana hot spring and Shinmyo-ike pond waters collected after the eruption. Ainoama hot spring water may contain partly calcium and sulfate ions formed by dissolution of calcium sulfate (e.g., anhydrite).

1. はじめに

三宅島は東京の南南西180kmほどにあり、ほぼ円錐形の外観を示す。最高点は海拔815m(雄山)の玄武岩性の火山島である(図1)。その直径は約8km程度で、面積は同じく太平洋に浮ぶ火山島であるハワイの100分の1にも満たない小さな島である。しかし、これは海面を基準にして見た場合のことであり、海底を基準とすると伊豆七島—硫黄島海嶺上にそびえる1800m位の高さの火山体となり、陸上の火山と対比すると箱根火山の広がり相当する¹⁾。

三宅島に関する固体地球科学的研究は非常に多くなされており、例えば最近の噴火(1983年10月3日)に関連したものだけでも1冊の本になるほどである^{2,3)}。一方、水に関する研究は固体に関するものに比べてたいへん少ない⁴⁻¹¹⁾。この中で温泉科学的研究は、伊豆七島全域の温泉の一部として取り扱われている程度であったり、三宅島のみを扱ったものでも若干の考察を行うにとどまっている。また、陸水学的研究においては地球化学的に論じられたものは極めてまれである。

本研究では、(1) 同位体地球化学的な手法を取り入れた化学的な立場から、三宅島に産する温泉水を含む天然水の水および溶存化学成分の起源を全般的に論じ、(2) 噴火前後の水質の化学的变化を明らかにし、噴火の影響を議論する。

2. 試料および分析

三宅島の天然水には温泉水の他に、湖沼水、低温湧水、雨水、海水がある。また雄山山頂には噴気地帯(雄山サウナ)があり、ここでは低温のガスの噴出が常時見られるが、この水蒸気は本研究の対象には含めなかった。

温泉水：海岸沿いに二ヶ所温泉が存在する。湯の浜温泉は島の西側、阿古地区の北、大鼻付近にあり、この温泉は古くは波打ち際に39℃程で自然湧出していたが、ここから約20~30m陸側に入った所でボーリングして得られたものである⁴⁾。湧出温度はおよそ50℃である。逢の浜温泉は島の東側、三七山の山麓、逢の浜海岸にある長径約20mの細長い小さな池である。この温泉は1962年の火山噴火の際に生成し1983年の噴火で利用を中止している。水温は1987年4月現在で23℃(海水温度19℃で、1973年には温泉水温46.7℃であったと報告されている⁴⁾)。また、定常的には存在しない温泉として、1983年の噴火の際に新しく生成したものがある。島の南側、新瀨池の南の海岸(新鼻)付近の波打際から約30m陸側に生成した温泉(海岸温泉⁷⁾)と、同じく新鼻海岸に新しく生じたスコリア丘の基部にある小火口内に生じた温泉(新鼻温泉：相川ら⁷⁾)は新火口温泉と仮の名称を与えている)がある。後者は噴火3ヶ月後も50℃以上の水温を示しており付近には単体硫黄の晶出がみられた¹¹⁾。これらはともに1985年7月には完全に消失していた。

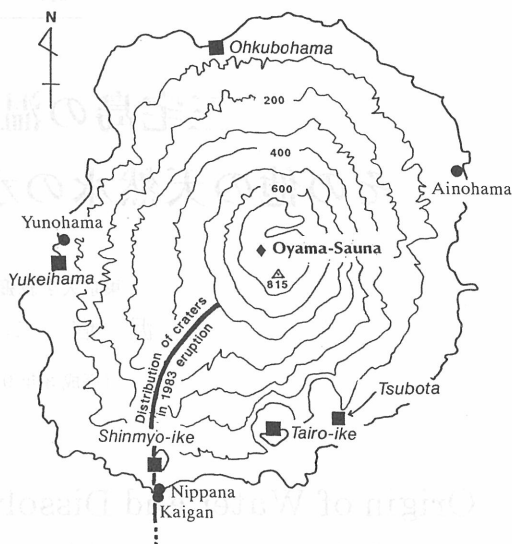


Fig. 1 Map showing location of the water samples in Miyake-Jima island.

湖沼水：大路池と新霽池という二つの池がある。これらはいずれも水蒸気爆発で作られた爆裂火口の跡に水が溜ったものである。大路池は海岸から500m程離れた所にあり、水面の海拔高度は約3m、水深は約9mで最深部は海面下にあるが海水の侵入はなく淡水湖である⁶⁾。一方、新霽池も海岸から約500mの所にあり、水面の海拔高度およそ0m、最深部は約35mであった⁶⁾。この池では温度成層と塩分による密度成層が知られており、化学成分的には $Mg^{2+} > Ca^{2+}$ であって海水の特性を反映していて湖面が潮汐により上下することから海水の影響が及んでいると考えられている¹¹⁾。なお、この池は1983年の噴火により完全にその様相を変え、現在昔のような湖沼水はまったく存在しない。

低温湧水：島の全域に存在するが、大規模な湧水は大久保、阿古地区など2,3の地点にすぎず、湧水のはほとんどは水量が非常に少ない⁶⁾。湧水の分布図を見ると海拔100m以下の所に湧出するものが圧倒的に多いようである。

雨水：東京都内の年降水量が1500mm程度であるのに対し、三宅島ではその2倍の約3000mmに達する。水収支の計算から、降水の約3分の2が地下を伏流し(島の斜面には地形的な谷が存在するが恒常水流はなく、川は大雨の後わずかに流れるにすぎない)、海岸湧水、海底湧水などの湧水として流出すると考えられている⁶⁾。以上のうち、筆者らが調査し採水したものは、湯の浜温泉(YH)、逢の浜温泉(AH)、新鼻温泉(NP)、大路池(TR)、新霽池(SM)、雨水(MW)である(採水日については表1を参照)。

Table 1 Chemical composition, pH and water temperature of the natural water in Miyake-jima island (mg/l)

SAMPLE	DATE	WT/°C	pH	Na	K	Ca	Mg	SO ₄	Cl	SiO ₂	Ref.
Hot Spring	Yuno-hama*	73/4/20	51.0	6.5	9266	469	671	950	1771	16430	120
	ditto	73/5/1	51.9	6.9	9750	430	816	995	1524	17720	98 4)
	ditto	73/5/11	54.0	6.3	9292	415	713	931	1557	16250	54
	ditto	74/5/3	52.8	5.7	8250	300	756	910	1728	15750	nd
	ditto	83/4/15	49.0	6.7	8850	386	650	858	1620	15900	114
	ditto	85/4/17	56.0	5.9	8750	358	815	920	1970	17700	135
	Aino-hama	73/5/1	46.7	7.1	1530	580	347	260	720	3280	85 4)
	ditto	87/4/7	16.8	7.7	1570	820	260	240	820	2810	nd
	Nippana	83/10/15	64.0	7.2	10472	485	609	1124	2771	19000	102 7)
	ditto	85/3/29	40.5	7.2	4860	230	380	550	1420	8130	nd
Kaigan	83/10/15	56.0	7.2	10992	478	609	1247	2583	19750	60 7)	
Pond	Tairo	73/5/1	21.6	8.5	54	3	43	32	86	84	10 4)
	ditto	83/4/15	17.7	7.6	45	4	24	23	18	64	nd 11)
	ditto	83/10/13	23.9	7.1	93	6	36	28	76	159	26 7)
	ditto	83/12/27	9.7	7.6	90	7	38	32	24	147	nd 11)
	ditto	84/4/14	16.8	7.2	89	5	39	36	89	136	nd
	ditto	85/4/16	17.1	8.4	69	5	31	31	72	105	nd
	ditto	85/7/22	30.2	8.6	66	3	29	29	68	99	nd
	ditto	86/4/8	21.3	8.3	65	5	35	31	70	97	nd
	Shinmyo	83/4/15	17.0	6.9	520	33	67	100	119	865	nd 11)
ditto	83/10/13	33.5	3.7	878	54	134	108	531	1575	25 7)	
Spring Water	Ohkubohama	83/10/14	18.0	7.4	31	2	14	6	13	54	48 7)
	ditto	83/10/14	17.5	7.3	32	2	13	6	12	48	53 7)
	Tsubota	83/10/14	18.6	6.1	28	3	35	12	23	30	81 7)
	Yukeihama	73/5/1	17.4	8.0	70	2	25	22	29	177	43 4)
Sea Water			8.2	10560	380	400	1270	2650	18980	1	

* Calculated temperature in the hot water reservoir of Yunohama hot spring are 76-130°C by chalcedony (SiO₂) geothermometer and about 100°C by anhydrite (CaSO₄) geothermometer.

Chalcedony geothermometer: $t(^{\circ}C) = 1032 / (4.69 - \log SiO_2^{\#}) - 273.15$, # ppm

Anhydrite geothermometer: taken by plotting on $[Ca^{2+}][SO_4^{2-}] - \sqrt{I} / (1 + 1.5\sqrt{I})$ diagram

化学成分については(1)陽イオンは原子吸光法, (2)陰イオンはイオンクロマトグラフ法, (3) pHはガラス電極法により分析を行った. 同位体比測定では水の水素, 酸素同位体比をそれぞれウラン還元法, 二酸化炭素平衡法によって測定した(東大海洋研の酒井均教授, 堤眞博士による). 測定結果は標準海水(SMOW)の同位体比からの偏差(δ 値)として千分率(‰)で示した.

$$\delta = (R_x/R_s - 1) \times 10^3$$

ここでRは同位体比(D/H, $^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$), xおよびsはそれぞれ試料, 標準物質を示す. 分析結果を表1および表2に示す. なお海岸温泉(KG), 低温湧水(SPW)および筆者らが調査した場所で試料採取日の異なったものがある場合は文献名を挙げて再録した(表1). サンプリングの位置などは図1に示す. なお, 本論文中にてでくる「海岸温泉」は固有名詞であり, 海岸地帯に湧出する温泉という総括的な意味では「海岸型温泉」という言葉を用いる.

Table 2 Hydrogen and oxygen isotope ratios of the natural waters in Miyake-jima island.

SAMPLE		DATE	δD	$\delta^{18}\text{O}$
Hot spring	Yunohama	83/4/15	-7.8	-1.5
	ditto	85/4/15	-4.7	-0.9
	Nippana	85/3/29	-17.7	-3.8
pond	Shinmyo	83/4/16	-28.4	-4.4
	Tairo	83/4/16	-24.9	-3.8
	ditto	83/12/27	-23.6	-4.4
Rain		84/6/13	-37.9	-6.7

3. 考 察

(1) 同位体地球化学的考察

水の水素, 酸素同位体比の測定結果について考察する. δD -Cl図および δD - $\delta^{18}\text{O}$ 図をそれぞれ図2, 図3に示す, 湯の浜温泉は明らかに海水($\delta\text{D} = 0\text{‰}$, Cl=19g/l)と天水(雨水: $\delta\text{D} = -37.9\text{‰}$, Cl=0 g/l)を結ぶ線に沿ってほぼ並び, 海水と天水の混合によってこの温泉水が成り立っている

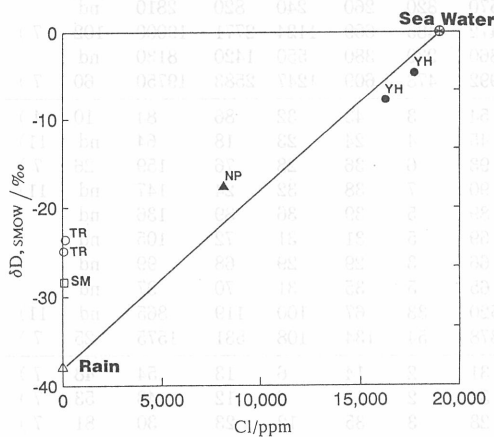


Fig. 2 Relation between δD and chloride content of the natural waters in Miyake-Jima island.

YH: Yunohama hot spring, NP: Nippana hot spring, TR: Tairo-ike pond, SM: Shinmyo-ike pond.

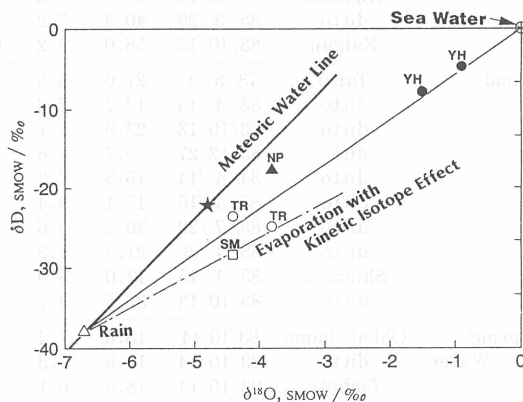


Fig. 3 δD vs $\delta^{18}\text{O}$ plot of the natural waters in Miyake-Jima island.

Meaning of the abbreviations in the figure are shown in Fig. 2.

ことを示している。なお、天水のCl濃度は実測値がなく0と仮定したが、この島の湧水の値(Cl \equiv 0.08g/l)が雨水の値に近いと考えて、これを代用しても以上の関係は全く変わらない。この関係から海水と天水の混合比を同位体に関する物質収支から求めることができる。即ち温泉水、海水、天水の水の水素同位体比をそれぞれ δs , δsea , δmw とし、海水、天水の温泉水に占める割合それぞれ X_{sea} , X_{mw} とすると次式が成立する。

$$\delta s = X_{sea} \cdot \delta sea + X_{mw} \cdot \delta mw, \quad X_{sea} + X_{mw} = 1$$

この式に $\delta s = -7.8$, -4.7% , $\delta sea = 0\%$, $\delta mw = -37.9\%$ を代入して解くと $X_{sea} \equiv 0.8$ となり、湯の浜温泉の水は海水4に対し天水1が混合して生成したものであるという結果が得られる。ここで δD と $\delta^{18}O$ との関係を見ると湯の浜温泉のデータは海水そのものの値と天水の値とを結ぶ直線上にはほぼ乗り、海岸型温泉によくみられるOxygen Shiftがない¹²⁾。海岸型温泉にみられる $\delta^{18}O$ シフトはケイ酸塩鉱物や炭酸塩鉱物との酸素同位体交換反応によるとされており¹³⁾、湯の浜温泉ではこの反応があまり進行しなかったとみることができる。温泉水の水の酸素同位体比の変化の要因には、主に温度と岩石/水比があげられている¹³⁾。具体的に酸素同位体交換反応が起こらなかった理由としては次の3点があげられる。即ち、(1)極端に高温であり、鉱物と水との間の酸素同位体の分配比が1に極めて近かった、(2)温度がかなり低く、反応速度がおそくて酸素同位体交換反応が起こらなかった、(3)岩石/水比が極めて小さかったため、水の酸素同位体比に変化が現われなかった。地球化学的温度計による温泉貯留層温度の推定結果から考えて上述の(1)の過程は全く考えられず、(2)の可能性が大きい。しかし(3)については湯の浜温泉のボーリング・コアの調査の結果¹⁴⁾により温泉水の流動通路が多孔性のスコリア、火山砕屑物、末固結凝灰角礫岩という地質であることから十分にあり得ると思われる。

大路池と新瀨池の水の δD , $\delta^{18}O$ 値はこの地域の天水($\delta D = -37.9\%$, $\delta^{18}O = -6.7\%$)を起点とする傾き5の直線($\delta D = 5\delta^{18}O - 4.4$)上にはほぼのっており、日本列島の湖沼にみられる関係に酷似し¹⁵⁾、蒸発に伴う非平衡同位体効果として説明できる。一方、1985年3月29日の新鼻温泉の水の δD , $\delta^{18}O$ 値は、海水—天水混合線($\delta D = 5.7\delta^{18}O$)、蒸発線のいずれからも大きくはずれており、これらのモデルでは説明できない。この温泉は前にも述べたように1983年の噴火以後に新しく生成した噴火口内にできた温泉であるから、なんらかのかたちで噴火の影響が反映されているのかもしれない、特に火山ガスの混入は考えられるであろうが、三宅島では火山ガス凝縮水の観測例がないので詳しい検討はできない。しかし同様なタイプの火山である伊豆大島の火山ガス凝縮水の値($(\delta D, \delta^{18}O) = (-24.8, +0.4)$, $(-19.5, +1.6)$: 単位%)¹⁶⁾と類似の値をとると仮定して検討しても、海水—天水—火山ガス凝縮水の三者混合という単純なモデルでも説明できない。海水とこの地域の天水よりもD, ^{18}O に富んだ天水との混合によって説明可能のようであるが(図3中の★)、D, ^{18}O を濃縮した雨水の例を必要とする(台風のように低緯度地域で発生する巨大な低気圧による可能性を検討すべきであろう)。

(2) 化学成分による解析

Na^+ と Cl^- との相関関係を温泉水、湖沼水、低温湧水、海水について検討した。図4に示されるように、これら二成分の間には良好な正の相関があり、三宅島の天然水が海水の混入あるいは影響を強く受けていることがわかる。もちろん、この結論は第一近似的なものであり実際は天然水が生成し現在に至るまでの物理化学的な条件などの違いを反映して化学組成にわずかな違いが生じていると思われる。化学成分の変動を明らかにするために、塩化物で規格化した溶存成分濃度について次のような Δ 値を定義する。

$$\Delta = (X_s/Cl_s - X_r/Cl_r) \times 10^2$$

ここでXは溶存成分の種類、Clは塩化物、sは試料、rは基準物質を示す。なお溶存成分の濃

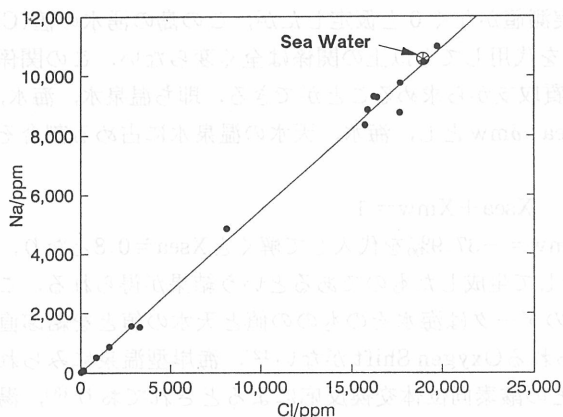


Fig. 4 Relationship between chloride and sodium contents.

ただし、海洋島であるため Na^+ の濃度と易動度が若干高い)、これらの水の溶存成分の起源が海塩と岩石の風化溶出物にあることを示している(三宅島における岩石-水間の化学成分の相対的易動度を、ホランドによって与えられている例とともに表4に示した)。湯の浜温泉は海水に比べ

度単位は $\text{mol}\cdot\text{l}^{-1}$ に換算して式に代入した。結果を表3に示す。基準物質を海水にすると(表3の左側 Δ 値)、湖沼水、低温湧水はどの成分も増加の傾向にある。ホランド²⁰⁾によれば玄武岩地域に湧出する低温の地下水には、数ppmから100ppm程度の陽イオン、陰イオン等が含まれており、これらは炭酸水素イオンを含む水による風化作用の結果として説明されている。また、4つの主要成分(Na^+ , K^+ , Ca^{2+} , Mg^{2+})の玄武岩から水への相対的易動度にはほとんど差がないことも示されている。三宅島の湖沼水、低温湧水も、全島が玄武岩から構成されているためほぼ前述の特徴を有しており(た

Table 3 Deviation of chemical composition of the nature waters from reference sample: sea water, low temperature water (pond water and low temperature spring water).

Δ and Δ' show the deviations on the basis of the sea water and the low temperature water, respectively. The low temperature water's value is the average of pond waters and low temperature spring waters(A).

SAMPLE	DATE	ΔNa	ΔK	ΔCa	ΔMg	ΔSO_4	$\Delta\text{Na}'$	$\Delta\text{K}'$	$\Delta\text{Ca}'$	$\Delta\text{Mg}'$	$\Delta\text{SO}_4'$	
Hot Spring	Yuno-hama	73/4/20	1.17	0.77	1.75	-1.33	-1.17	-4.32	-0.72	-22.66	-23.89	-12.09
	ditto	73/5/1	-0.95	0.39	2.21	-1.57	-1.98	-6.44	-1.11	-22.20	-24.14	-12.90
	ditto	73/5/11	2.38	0.50	2.02	-1.41	-1.62	-3.11	-0.99	-22.39	-23.97	-12.53
	ditto	74/5/3	-4.04	-0.09	2.38	-1.34	-1.10	-9.53	-1.58	-22.03	-23.90	-12.02
	ditto	83/4/15	0.03	0.39	1.75	-1.89	-1.39	-5.46	-1.10	-22.66	-24.46	-12.31
	ditto	85/4/17	-9.56	0.02	2.21	-2.18	-1.05	-15.05	-1.47	-22.20	-24.75	-11.96
	Aino-hama	73/5/1	-13.86	14.22	7.49	1.80	2.95	-19.35	12.73	-16.92	-20.77	-7.97
	ditto	87/4/7	0.36	24.64	6.32	2.70	5.62	-5.13	23.15	-18.09	-19.87	-5.30
	Nippana	83/10/15	-0.80	0.50	0.97	-1.13	0.23	-6.29	-0.99	-23.44	-23.70	-10.69
	ditto	85/3/29	6.39	0.75	2.27	0.11	1.29	0.90	-0.74	-22.14	-22.46	-9.62
Kaigan	83/10/15	0.03	0.38	0.86	-0.55	-0.33	-5.46	-1.11	-23.55	-23.12	-11.24	
Pond	Tairo	73/5/1	13.33	0.99	42.89	45.10	32.63	7.84	-0.50	18.48	22.53	21.71
	ditto	83/4/15	23.48	3.47	31.57	43.06	5.13	17.99	1.98	7.16	20.49	-5.78
	ditto	83/10/13	4.40	1.66	18.16	15.92	12.49	-1.09	0.17	-6.25	-6.65	1.57
	ditto	83/12/27	8.61	2.38	21.00	21.99	0.92	3.12	0.89	-3.41	-0.58	-9.99
	ditto	84/4/14	15.12	1.38	23.50	28.84	19.00	9.63	-0.11	-0.91	6.27	8.08
	ditto	85/4/16	15.54	2.50	24.25	33.30	20.15	10.05	1.01	-0.16	10.73	9.23
	ditto	85/7/22	17.01	1.02	24.05	32.96	20.19	11.52	-0.47	-0.36	10.39	9.28
	ditto	86/4/8	17.54	2.58	30.05	36.85	21.48	12.05	1.09	5.64	14.28	10.56
	Shinmyo	83/4/15	6.90	1.64	4.99	7.10	-0.08	1.41	0.15	-19.42	-15.47	-10.99
	ditto	83/10/13	0.17	1.29	5.66	0.24	7.29	-5.32	-0.20	-18.75	-22.33	-3.63
Spring	Ohkubohama	83/10/14	2.73	1.04	21.07	6.44	3.73	-2.76	-0.45	-3.34	-16.12	-7.19
	Water ditto	83/10/14	17.01	2.15	22.09	8.47	4.07	11.52	0.66	-2.32	-14.10	-6.84
	Tsubota	83/10/14	58.13	8.16	101.33	48.57	23.14	52.64	6.67	76.92	26.00	12.22
	Yukeihama	73/5/1	-24.81	-0.79	10.53	8.70	0.89	-30.30	-2.28	-13.88	-13.87	-10.02
	A		5.49	1.49	24.41	22.57	10.92	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Sea Water		0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	-5.49	-1.49	-24.41	-22.57	-10.92	

Table 4 Relative mobility of chemical elements from rocks to low temperature waters on chemical rock weathering.

	The Miyakejima island (MJI)					Relative mobility [‡] of chemical elements		
	Rock (basalt)			low temp. water		MJI	Basalt*	Granite*
	wt% [§]	molality	percent.	mmol/l	percent.			
SiO ₂	53.50	0.891	58.4	0.68	9.99	0.17	0.37	0.17
TiO ₂	1.15	0.014	1.02					
Al ₂ O ₃	15.32	0.150	9.84					
Fe ₂ O ₃	3.39	0.021	1.38					
FeO	9.82	0.137	8.98					
Na ₂ O	2.54	0.041	2.69	3.67	53.9	20.0	5.2	2.2
K ₂ O	0.51	0.0054	0.35	0.13	1.9	5.4	2.4	0.4
CaO	9.13	0.163	10.7	1.07	15.7	1.5	3.8	28.8
MgO	3.98	0.099	6.47	1.26	18.5	2.9	2.0	12.7
MnO	0.23	0.0032	0.21					
P ₂ O ₅	0.12	0.0008	0.05					
total	99.69		100.0		100.0			

[§] Average of 19 data, Data cited from O. Ohsima (1984)²⁸⁾

* Data cited from H. D. Holland (1979)²⁰⁾

[‡] Relative mobility is given as the ratio of fifth column and the third column.

て一般にMg²⁺, Na⁺とSO₄²⁻が減少し, Ca²⁺が増加しているのがわかる. これは先の同位体に関する考察の所で示したように, 海岸型温泉の特徴であり, 海水と岩石との間の物質の移動によるものと考えられる. このことについては高松⁵⁾, 相川ら⁴⁾も同様な考察をしている. 水谷と浜砂¹⁷⁾によれば海岸型の温泉水のNa⁺の減少はCa²⁺との置換, 具体的には灰長石の曹長石化, Mg²⁺の減少は緑泥石化作用, SO₄²⁻の減少は硬石膏の沈殿として説明されている. しかし, 三宅島の場合は温泉水の経験した温度が50℃以上で高々100℃程度と思われる(高松の推定結果⁵⁾や玉髓温度計¹⁸⁾, 硬石膏温度計²⁹⁾を用いた推定による: 後二者の結果は表1の中に示した)のでMg²⁺の減少は緑泥石化ではなくスメクタイト化¹⁸⁾がより現実に近いであろう. また, K⁺はわずかに増加の傾向を示すにすぎない. これは一般に熱水中のK⁺の挙動は曹長石, カリ長石, カリ雲母等の鉱物を含む平衡により支配されており(三宅島の場合は, 曹長石の寄与が考えられる), 高温になるほど熱水のK/Na比は増加する傾向にあるからである¹⁹⁾. ところが湯の浜温泉の場合は上記の様々な化学反応を考慮の上, 各溶存成分が海水に比べどの程度増減したか, すなわち溶存成分の過不足量を検討すると, Ca²⁺が過剰であることがわかる. この過剰分は前述の岩石からの風化溶出分と考えられるが, 海水を基準にするかわりに湖沼水, 低温湧水の平均値(表3の右側Δ'値)を基準として見直してみると, 湯の浜温泉のCa²⁺はむしろ減少しているので, Ca²⁺過剰の原因を岩石からの風化溶出に帰することはできない. 今回の噴火において, 新鼻付近の投出岩片にはサンゴや貝類を多量に含んだ砂岩—礫岩の岩片がみられ, このサンゴの一部は現世のものではないとされている²¹⁾. したがって, 三宅島の海岸付近の地下には生物起源の一種の“CaCO₃鉱床”が潜在することが十分に考えられ, 一般に岩石—海水相互作用の初期に水が酸性化すること²⁵⁾と考えあわせれば, 例えばCaCO₃+H⁺→Ca²⁺+HCO₃⁻といった反応によりCa²⁺が温泉水に供給される可能性がある. 事実, 湯の浜温泉の水はHCO₃⁻/Cl⁻値が海水, 低温湧水より明らかに大きい(湯の浜: 9.3×10⁻³, 海水: 4.3×10⁻³, 低温湧水: 1.1×10⁻³, 伊豆下賀茂深部熱水: 4.5×10⁻⁴: データは文献14, 17, 4, 7より引用). 一方, 伊豆下賀茂温泉ではCaCO₃の沈殿が起こっていると考えられており¹⁷⁾, これが温泉水のHCO₃⁻の減少の原因である可能性が高く, 三

宅島の場合と対称的であることは大変興味深い。海岸温泉では化学元素の出入りが認められず、塩化物イオン濃度が海水とほとんど同じであることから、海水自身が50~60℃に温められたものとみることができる。

これまでの議論から海水と岩石の相互作用の程度を示す指標元素としてはMgイオンが有力であることが示された。そこで次の式で表されるパラメータを導入すると相互作用の進行度を見積もることが可能である。

$$\delta Mg = [(Mg/Cl)_s - (Mg/Cl)_{sea}] / (Mg/Cl)_{sea} \times 10^2$$

ただし、ここで用いるイオンの濃度単位はppmで、sは試料水、seaは海水をあらわす。湯の浜温泉、新鼻温泉ならびに参考のための八丈島の温泉のデータを代入して δMg を求めると表5のようになる。湯の浜・八丈島の温泉が新生の温泉ではなく、安定に熱水を供給しており、 δMg が負、即ち海水-岩石相互作用が十分に進行しているのに対し、新鼻温泉が1983年の噴火直後にできた温泉であり、海水-岩石相互作用がまだ十分に進行していないことをそれらの δMg 値は示している。ただし、この δMg 値が定量的な議論に利用できるかどうかは、今後検討すべき課題である。

Tbale 5 Degree of sea water-rock interaction speculated by Mg/Cl deviation of water samples from Mg/Cl value of sea water.

SAMPLE	DATE	Temp. (°C)	Mg/Cl	δMg (%)
Yunohama	74/5/3	52.8	0.0480	-13.1
ditto	83/4/15	49.0	0.0469	-19.4
ditto	85/4/17	56.0	0.0519	-22.4
Nippana	85/3/29	40.5	0.0688	+3.0
Hachijo	73/2/26	83	0.0285	-57.1
Sea water			0.0665	± 0

次に Mg^{2+} 、 SO_4^{2-} の減少のみられなかった温泉(逢の浜温泉、新鼻温泉)について考察する。

図5は温泉水、湖沼水、低温湧水、海水の SO_4^{2-}/Cl^- と Mg^{2+}/Cl^- との関係を示したグラフである。先にも述べたように湯の浜温泉は海岸型温泉の特徴を反映して SO_4^{2-}/Cl^- 、 Mg^{2+}/Cl^- ともに海水のそれに比べ値の小さい領域にプロットされる。湖沼水および低温湧水は SO_4^{2-}/Cl^- 、 Mg^{2+}/Cl^- ともに増加しており、ある一定の領域に限って分布するように見え、しかも SO_4^{2-} に対して Mg^{2+} の増加が顕著である。先の議論から、湖沼水および低温湧水の Mg^{2+} は岩石から溶脱してきたものであり、 SO_4^{2-} も基本的には岩石溶脱物質と推察される。一方、逢の浜温泉、新鼻温泉と1983年の噴火直後の新霽池の値

は SO_4^{2-} が Mg^{2+} に比べ増加の程度が大きく、特に後二者は SO_4^{2-} のみの増加がみられる。新鼻温泉は付近の岩石に単体硫黄の晶出がみられること¹¹⁾や新鼻一帯の噴気口から得られた火山ガスに二酸化硫黄や硫化水素が含まれること²²⁾から、この温泉がこれらの硫黄ガスの混入を受けているとすれば、増加分の SO_4^{2-} は二酸化硫黄や硫化水素の酸化生成物であると思われる。例えば、

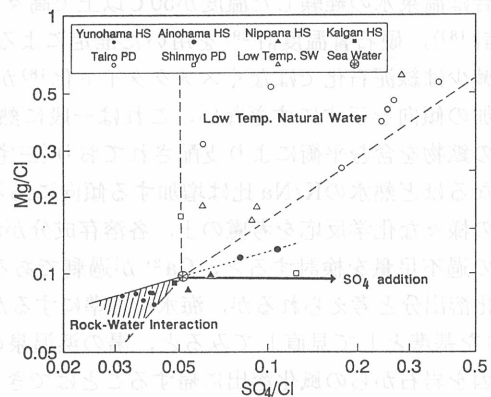


Fig. 5 Mg/Cl- SO_4/Cl diagram of the hot spring waters, the pond waters and low temperature spring waters in Miyake-Jima island. The mark, \otimes indicates the sea water.

水に溶けた二酸化硫黄のpH 6以上での酸素による酸化反応は速く²³⁾(速度定数: $10^{-4} \sim 10^{-2} \text{ s}^{-1} (\text{SO}_3^{2-}$ についての擬一次反応), 半減期は1分~2時間程度), 温泉水のpHが6以上の場合は十分に考えられる機構である。また, 硫化水素も熱力学的には大気と接触している中性の水の中では不安定で最終的には硫酸イオンに変化してしまうから²⁶⁾, この硫黄化合物もまた硫酸イオンの起源となりうるものである。なお1983年10月15日に採取された新鼻温泉の水は SO_4^{2-} の増加はわずかであること, また, 1983年10月6日の火山ガスにはすでに著量の二酸化硫黄と硫化水素が含まれていた²²⁾ことから, この温泉は10月15日には生成して間もなかったことが予想される。噴火後の10月11日には台風が三宅島を襲っており, この時の降水量は6時から18時の12時間に98mmであった(三宅島測候所データ)。新鼻温泉は前にも述べたように新しい火口の一つに水が溜ってできたものである。一般に二酸化硫黄を含む火山ガスは高温であり²⁷⁾, しかもガス噴出力も強いようである。今回の噴火でもこの火山ガスに関する一般則があてはまり²²⁾, この火口から噴出する火山ガスの勢いは強かったと考えてよいであろう。ガス噴出力の強い火口に水が溜るには多量の水をしかも短時間に供給してやらなければならないことは想像に難くない。したがって, 新鼻温泉の水はこの台風によって直接・間接的にもたらされた可能性が高い。噴火後の新霽池はその水のpHが3.7と著しく低く⁷⁾, 明らかに火山ガスの酸性成分の混入があったと思われる。図5から新霽池における硫酸イオンの顕著な増加もやはり, 新鼻温泉同様火山ガスの二酸化硫黄や硫化水素に起因すると考えられる。

一方, 逢の浜温泉はこのダイヤグラム(図5)上では, 湖沼・低温湧水型とも火山ガスの影響を受けた水とも違った領域にプロットされており, 岩石からの化学成分の溶出, 火山ガスの混入では説明がつかないように思われる。陸水学的な研究^{6, 10)}から三宅島の海岸付近の地下には海水がかなり浸透していると考えられており, この部分になんらかの原因で熱が加われば, CaSO_4 の沈殿が起こることは明らかである(湯の浜温泉がその例)。逢の浜一帯は1962年の噴火の際に開口した割目火口列の方角に位置し²⁴⁾, その活動の影響を受けていると考えられる。現に逢の浜温泉はこの火山活動にともなって生成した温泉である⁴⁾。したがって, 生成当初は湯の浜温泉や海岸温泉のように $\text{SO}_4^{2-}/\text{Cl}^-$ 比は海水のそれより小さく, その原因が CaSO_4 の沈殿によるものとするのは妥当である。1975年の水は1962年の噴火から7年後, また1987年の水は1962年の噴火から25年後に採取されたものであり, 逢の浜は火山活動による定常的な熱の供給が得られないとすれば(水温が46.7°C(1987)と年を経るにしたがって低下している), 温泉貯留層の温度は年々低下していく可能性がある。 CaSO_4 は温度の低下とともに溶解度が増加するので, 温泉貯留層に一度沈積した CaSO_4 (鉱物種としてはおそらく硬石膏)が徐々に溶け出してきているものと推測される。一方, Mg/Cl の増加は, スメクタイト族粘土鉱物の代表的鉱物であるモンモリロナイトの溶解度積が25~120°Cの間では温度低下とともに増加することから³⁰⁾考えて, 温泉(逢の浜)の形成にともなって一度生成したスメクタイトが温度低下にともない溶液中に溶け出したとすれば十分に説明が可能である。

ま と め

同位体化学的な観点から, 湯の浜温泉は海水と天水の混合によってできたものであり酸素同位体シフトがみられないことから, 温泉水と岩石の相互作用は酸素同位体交換反応が進行しないほど低温で起こっている可能性のあることが示された。このことは化学温度計によって求められた温泉貯留層温度の推定結果と調和的である。湖沼水の同位体(δD , $\delta^{18}\text{O}$)の関係は蒸発による非平衡同位体効果をうけているものとして説明できる。新鼻温泉水の δD , $\delta^{18}\text{O}$ 値は海水-天水混合,

天水の蒸発による非平衡同位体効果だけでは説明が困難である。この温泉は新しい噴火口内に生成した温泉であることから、火山活動の影響をなんらかの形で受けている可能性がある。

溶存化学成分に関しては、従来から存在する湯の浜温泉については海水と比較してMgとSO₄が減少することが示され、この関係は海水と岩石の相互作用によるスメクタイトの生成、硬石膏の沈殿として説明される。温泉水中のCaとHCO₃⁻の増加は温泉水中へのCaCO₃の溶解混入によるものと考えられ、CaCO₃として海岸付近の地下に潜在することが示唆されているサンゴ類、貝類の寄与の可能性もある。噴火の直撃を受けた新漣池の噴火後の水および新生の噴火口内に生成した新鼻温泉水は火山ガス起源の硫酸イオンの混入が考えられる。大路池、噴火前の新漣池、低温湧水はどの陽イオンも海水にくらべ増加の傾向にある。このことは炭酸水素イオンを含んだ天水による岩石の化学的風化の結果であると思われる。なお、硫酸イオンの増加はまだ不明な点が多いがおそらく岩石中に微量に含まれる硫黄化合物の溶出の可能性が一因であると考えられる。

噴火地点の一つになった新漣池では噴火後の水質変化により火山ガス起源物質の供給が示された。一方、噴火直前に肉眼的に観察された湖水表面の白濁現象¹⁾が火山ガスあるいはこれに由来する強酸性水の混入に起因する可能性のあることが示唆され、興味ある点であるが、情報不足であるため、詳しい検討には至らなかった。しかし海岸付近に存在する天然水の噴火直前における水質変化の検討という具体的な課題を今後のために提示できたものとする。

最後に、同位体測定をしていただいた東大海洋研の酒井均教授(現在山形大)、同研究所堤眞博士に感謝致します。長年にわたり、三宅島の地質・地形など自然科学全般についていろいろと教えて下さった東大教養学部宇宙地球科学教室浜田隆士教授に深謝致します。また、三宅島の気象データを提供された三宅島測候所長にお礼申し上げます。さらに温泉についての情報を提供された(財)中央温泉研究所の皆様に感謝いたします。

文 献

- 1) 浜田隆士：三宅島概説，“火山島の自然環境変遷とその人為との相互作用に関するシステム科学的研究—昭和58年三宅島噴火活動を中心として—”，III-A, 5-10, 昭和57, 58年度文部省特定研究報告書，浜田隆士編(1984)
- 2) 三宅島の噴火—1983年—，火山 第29巻特別号，日本火山学会(1984)
- 3) 三宅島の噴火—地震との連動—，月刊地球 66号，海洋出版，東京(1984)
- 4) 相川嘉正，野口喜三雄，今橋正行：伊豆七島の温泉の化学成分，温泉科学，29, 204-212(1979)
- 5) 高松信樹：主成分分析による海岸型温泉の分類，温泉科学，36, 158-166(1986)
- 6) 新井正：伊豆諸島の水，“日本の水—その風土の科学—”，III-2, pp105-117(1987)
- 7) 相川嘉正，野口喜三雄，加藤尚之，塚本邦子：1983年の三宅島噴火に伴う温泉の化学組成の変化，火山，29, S319-S323(1984)
- 8) 新井正，森和紀，高山茂美：三宅島の陸水について，陸水学雑誌，38, 1-8(1977)
- 9) 新井正：三宅島・大路池の水収支，地理学評論，51, 709-720(1978)
- 10) 青木滋，新藤静夫，茅原一也：三宅島火山島の地下水，火山，29, S324-S334(1984)
- 11) 綿抜邦彦：三宅島の地球化学的調査，“火山島の自然環境変遷とその人為との相互作用に関するシステム科学的研究—昭和58年三宅島噴火活動を中心として—”，III-G, 58-62, 昭和57, 58年度文部省特定研究報告書，浜田隆士編(1984)
- 12) 松葉谷治：水素および酸素同位体比からみた温泉水の起源，温泉科学，31, 47-56(1981)
- 13) 松葉谷治：地熱水の水同位体地球化学，地熱エネルギー，10, 112-126, 151-160(1985)

- 14) (財)中央温泉研究所：東京都三宅島三宅村 新規温泉開発調査報告(1974)
- 15) 酒井均：水および水溶液の同位体化学，“現代鉱床学の基礎”（立見辰雄編），第七章，pp96-118 (1983)
- 16) 日下部実，蔦木泰広，吉田稔：本邦火山ガス凝縮水の水素および酸素同位体比，地球化学，11，14-23(1977)
- 17) 水谷義彦，浜砂武聖：伊豆下賀茂温泉水の起源，火山，17，123-134(1972)
- 18) 酒井均：アイスランド地熱地帯における海水—玄武岩相互作用の比較研究，昭和58年度科学研究費補助金(海外学術調査)研究成果報告書，240p(1979)
- 19) Ellis, A. J. and Mahon, W. A. J.: Natural hydrothermal systems and experimental hot water/rock interaction (Part 2). *Geochim. Cosmochim. Acta*, **31**, 519-538 (1967)
- 20) ホランド，H.D.：風化作用など地表近傍における反応，“大気・河川・海洋の化学—環境科学特論一”，第二章，15-50，山県登訳，産業図書，東京(1979)
- 21) 浜田隆士：三宅島—火山島システム総合研究のケース・スタディー，地学雑誌，**94**，21-33(1985)
- 22) 平林順一，小坂丈子，小沢竹二郎，吉田稔：1983年三宅島噴火後の火山ガスの組成変化と火山昇華物，火山，**29**，S308-S318(1984)
- 23) 指宿堯嗣：酸性雨の生成機構，ぶんせき，1986年第1号，78-86(1986)
- 24) 中村一明：三宅島の側火口分布と地殻応力場の性質，火山，**29**，S16-S23(1984)
- 25) 掘部純男：熱水の地球化学，“熱水鉱床”，月刊海洋科学，**159**，512-518(1983)
- 26) Garrels, R. M. and Christ, C. L.: “Solutions, Minerals, and Equilibria”, 450p, Freeman, Cooper & Company, San Francisco (1965)
- 27) Iwasaki, I., Ozawa, T., Yoshida, M., Katsura, T., Iwasaki, B., Kamada, M. and Hirayama, M.: Volcanic gas in Japan, *Bull. of Tokyo Inst. Technol.*, **47**, 1-54 (1962)
- 28) 大島治：昭和58年噴火記録，“火山島の自然環境変遷とその人為との相互作用に関するシステム科学的研究—昭和58年三宅島噴火活動を中心として—”，III-E，23-44，昭和57,58年度文部省特定研究報告書，浜田隆士編(1984)
- 29) 甘露寺泰雄，佐藤幸二，田中昭：熱川温泉および周辺地域の地温と化学成分—Geothermometer (K-Na, K-Na-Ca, Ca-SO₄)法による地温の計算値と実測値の比較—，地熱，**15**，217-230(1978)
- 30) 都築芳郎：熱水系における鉱物の溶解度積と化学量論的溶解度，鉱物学雑誌，**17**，171-179(1986)