箱根外輪山斜面に分布する湧水の水質および同位体組成

鈴木秀和*·宮下雄次*·高橋 浩*2·安原正也*2

Chemical and isotopic compositions of spring waters on the Hakone Caldera's outer slope

by

Hidekazu SUZUKI*, Yuji MIYASHITA*, Hiroshi TAKAHASHI*2 and Masaya YASUHARA*2

Abstract

Water temperature, major dissolved ions and oxygen, hydrogen and carbon isotopic ratios (δD , $\delta^{18}O$ and $\delta^{13}C$) of spring waters distributed on the Hakone Caldera's outer slope were measured. The results were summarized as follows:

1) Gradual decrease of spring water temperature is 0.37°C/m. This trend is almost the same as that of water temperature of springs not affected by volcanic activity in the caldera (0.40°C/m).

2) Unlike the spring waters in the caldera showing various type of water chemistry, the chemical composition of those on the caldera's outer slope is a Ca-HCO₃ type with low total dissolved solids (TDS). Na/Cl and SO₄/Cl ratios of water samples on the southeastern slope (windward side of prevailing wind during summer season) are different from those on the northeastern slope (leeward side), because the rate of sea salts from the Pacific Ocean which contributes to the precipitation falling on the windward side slope is large compared with that on leeward side slope.

3) The δD and $\delta^{18}O$ values east side slope are lower than those of west side slope at the same altitude, because the precipitation falling on leeward northeastern slope is more isotopically depleted than that on windward southwestern slope. The isotopic altitude effect of spring water on the west side slope (0.2‰/100m for δD and 0.06‰/100m for $\delta^{18}O$) is especially small compared with that of the other Japanese mountain slopes.

4) The calculated δ^{13} Cco₂ values of gaseous CO₂ in equilibrium with dissolved inorganic carbon (DIC) in the spring water have below -20‰, that is, the DIC in spring water is originated from organic (soil) CO₂ dissolved through the recharge process of groundwater, being not affected by volcanic CO₂, unlike the hot spring water in the caldera.

1. はじめに

一般的に日本のような湿潤地域に位置する火山山麓に は数多くの湧水が存在しており(Yamamoto, 1995)、周 辺地域の重要な水資源として農業・工業・生活用水など に広く活用されている。また、湧水は地下水流動系の末 端部に位置することから、水循環や地下水流動を反映し た特性を示すことが予想され、その性状の把握は水利用 に関する評価に加え、地下水の地域的な流動状態を把握 するうえで大変重要なことである。

箱根火山の温泉水、地下水、湧水については、これま で数多くの水文および地球化学的調査・研究が行われて きた(大木・平野(1972)、大山ほか(1990)など)。し かし、その大部分が温泉施設の集中するカルデラ内部を 対象としており、外輪山を含め箱根火山全体を包括的に 捉えた地下水の涵養・流出機構に関する研究はほとんど 無かった。

外輪山周辺、特に北東麓の南足柄市と南西麓の静岡県 の三島市地域には、以前より多数の湧水の存在が知られ ており、工業あるいは生活用水として利用されている。 南足柄市に位置する「清左衛門地獄池」は、工業用水の 水源として利用されるとともに、地域住民により湧水池 周辺の環境整備が行われており、神奈川県で唯一『平成 の名水百選』に指定された湧水として知られている。こ のように箱根外輪山山麓には、水資源的価値に加え、観 光資源としても地域に重要な役割を果たす湧水が存在し ている。したがって、今後の保全に役立てるためにも、 周辺に分布する湧水も含めその性状を把握し、湧出機構 などを明らかにすることが重要である。

* 神奈川県温泉地学研究所 〒 250-0031 神奈川県小田原市入生田 586 *2 産業技術総合研究所 地質情報研究部門 深部流体研究グループ 〒 305-8567 茨城県つくば市東 1-1-1 論文,神奈川県温泉地学研究所報告,第 43 巻,29-38,2011 これまで外輪山の一部斜面を対象に、湧水の分布 や水質などに関する調査が幾つか実施されている。 Yamamoto (1995) には、外輪山斜面(北東および南東) に分布する湧水のおおよその位置が地図上に記載されて いる。また、南西斜面に位置する静岡県の三島市では、 地下水保全を目的とした調査の一環として、市域のみで あるが箱根外輪山の南西斜面を対象とした地下水・湧水 に関する総合的な学術調査が実施されている(三島市地 下水涵養方策研究会編、1995、1996、1997、1998)。し かし、いずれの調査も一部斜面のみを対象としたもので あった。

地質構造が複雑であり、熱やガスなどの影響が考えら れる火山地域では、水温、水質、同位体などの環境トレ ーサーを用いて地下水流動系を把握する手法が有効とな る。そこで箱根火山全体の地下水流動モデルを構築する 手始めとして、外輪山斜面全域を対象に湧水の分布およ び採水調査を実施した。今回は、その結果明らかとなっ た外輪山斜面に分布する湧水の主要溶存化学成分と、酸 素・水素および炭素同位体組成の空間分布特性をもたら す要因などについて検討を試みた。

2. 方法

採水調査は西および南斜面の一部を除き、2010年8 中旬~9月上旬にかけて、35ヶ所の湧水と3ヶ所の自 噴地下水を対象に実施した(図1、表1)。現地では、湧水・ 地下水試料を採水すると同時に、水温(Hanna Inst.、 CHECKTEMP2 ペン型温度計)、pH(Mettler Toledo、 MP125ポータブルpHメーター)、電気伝導度(横河電機、 Model SC 82 パーソナル EC メーター)の測定を行った。 また湧出量は、一定容積法または浮子法により測定した。

採水した試料は実験室へ持ち帰り、温泉地学研究所所 有の分析機器を用いて、主要溶存成分と水素・酸素同 位体比の分析を行った。主要陽イオン(Na^+ 、 K^+ 、 Ca^{2+} 、 Mg^{2+})および陰イオン($C\Gamma$ 、 NO_3^- 、 SO_4^{-2})については、 イオンクロマトグラフィー(Dionex、DX-300、DX-AQ) により分析を行った。また HCO₃については、自動滴 定装置(東亜電波工業、UT-501)を用いた電位差滴定 法により分析を行った。

酸素同位体組成については、自動平衡装置を用いた CO₂平衡法、そして水素同位体比については、白金触媒 を用いた水素ガス平衡法による前処理後、軽元素質量分 析装置(Micromass、PRISM)で分析した。炭素同位体 組成については、産業技術総合研究所所有のGas Bench IIを用いた前処理システムと、それに接続した連続フ ロー型の質量分析計(Thermo Fisher Scientific、Delta-



図1 湧水の分布。図中の太線により東西南北4斜面に 区分した。

Fig. 1 Distribution of spring waters. The outer slope of caldera is divided into east, west, south and north slopes by the thick lines.

Plus)を用いた高橋・廣田(2004)の方法に従って行った。測定された同位体組成は、標準物質(酸素・水素は V-SMOW、炭素は V-PDB)からの千分率偏差である δ 値(‰)として表し、分析精度は δ D 値が ±1.5‰ で、 δ ¹⁸O と δ ¹³C 値が ±0.1‰ である。

なお、気象庁の箱根観測点で8月19日と20日にそれ ぞれ0.5と2.5mm/dayの降水が観測されたが,調査期間 中に地下水涵養に寄与するような目立った降水イベント はなく、今回の調査結果は基底流出時の水質および同位 体組成を反映しているものと考えられる。また、斜面方 向による性質の違いをみるため、便宜的に東西南北4方 位に斜面を区分した(図1)。

3. 湧水の分布

対象範囲が広いこともあり、今回の調査では比較的ア クセスしやすい場所にある湧水のみを対象としているた め、図1に示したものが全ての湧水分布を反映している とは言い難いが、おおよその分布特性を示していると考 えられる。悉皆調査ではないため、数の多少について議 論することは難しいが、湧水の利用や保全活動が盛んに 行われている南西麓の三島市域と北東麓の南足柄市域で は、他の地域より多くそして規模が大きな湧水が認めら れる(表1)。この両地域には火砕流(東京軽石流)堆

湧出量 名称	n³/day	n.m.	20	825 竹倉湧水群	2420 "	130 山田川自然の里湧水	70 小沢湧水	945	260	5000	130 二子湧水(沼田不動池)	35	12390	80	15	20	25	40 命之泉	4040 山久荘宝泉	400	50 通水の滝	2000	17 金太郎自然園湧水	11	515	190	45	45 神明水	500 明神水	140	895	13 笹子地蔵湧水	3500 御嶽神社お神水	1500 富士フィルム第一水源	350 清左衛門地獄池	40	475	300 八乙女治	3000 森と水の公園湧水	
¹³ C _{CO2}	%o r	I	I	I	-25.8	-28.0	I	I	-23.5	-22.5	I	-24.7	-20.6	I	I	I	I	-26.6	-26.1	I	I	-26.3	I	I	I	-23.4	I	-20.8	-24.6	I	I	-23.7	I	I	-25.6	I	-25.8	I	-25.4	
5 ¹³ C _{DIC} 0	%00	n.n	n.n	n.m	-18.0	-20.0	n.m	n.n	-16.4	-13.8	n.n	-16.5	-11.8	n.n	n.n	n.n	n.n	-19.1	-18.4	n.n	n.n	-18.9	n.m	n.n	n.n	-15.8	n.n	-13.2	-15.8	n.n	n.n	-16.9	n.n	n.n	-17.6	n.n	-17.8	n.n	-17.5	
d値 3		-13.3	-11.3	-12.3	-12.1	-12.6	-12.5	-13.2	-15.1	-13.6	-11.7	-13.6	-13.9	-13.4	-13.7	-13.0	-12.8	-15.0	-15.1	-13.7	-15.6	-12.4	-14.6	-12.5	-15.8	-13.8	-13.0	-13.2	-14.2	-12.3	-14.3	-13.0	-14.5	-15.4	-14.9	-15.4	-13.6	-15.1	-13.4	
δ ¹⁸ Ο	%00	-7.2	-7.6	-7.7	7.7-	-7.7	-7.8	- 8.1	-8.3	-8.6	-7.6	-8.0	-9.5	-7.9	-7.9	-7.9	-7.8	- 8.3	-8.2	-8.6	-8.2	-8.3	-8.2	-8.2	-8.7	-8.7	-8.1	0.6-	-9.3	-8.4	-8.2	-8.3	-8.1	-8.1	-8.0	-8.2	-7.9	-8.1	-7.5	
δD	%00	-44.6	-49.6	-49.0	-49.8	-48.8	-49.8	-51.5	-51.0	-55.0	-49.1	-50.2	-62.2	-50.1	-49.6	-50.1	-49.8	-51.7	-50.1	-54.8	-49.6	-54.3	-51.4	-53.4	-54.1	-56.1	-51.5	-58.4	-60.1	-54.9	-51.5	-53.5	-50.0	-49.6	-49.2	-50.4	-49.2	-49.3	-46.7	
NO3	mg/L	56.3	5.6	10.3	14.8	11.6	5.7	1.8	1.4	1.9	7.2	2.5	1.1	4.7	0.9	1.4	2.7	1.8	2.2	0.0	2.3	1.3	2.5	2.7	0.9	1.4	3.9	1.9	0.8	2.1	3.3	4.9	1.4	2.9	4.4	3.1	4.4	3.4	16.1	
HCO ₃	mg/L	47.2	21.8	53.9	57.0	65.8	45.8	45.2	28.2	22.1	60.0	28.2	77.1	94.7	22.7	23.9	52.7	21.8	67.6	55.9	76.6	46.4	67.5	58.1	31.8	28.2	61.3	33.6	14.9	55.0	71.6	92.7	53.5	55.5	64.6	28.2	60.9	56.2	82.0	
SO_4^2	mg/L	8.8	2.1	4.7	5.5	4.8	2.5	2.6	1.4	1.4	3.2	0.0	12.4	0.9	1.5	1.3	0.0	1.0	3.6	0.7	15.8	1.8	14.4	2.6	1.6	1.9	5.1	0.5	1.0	2.0	2.7	12.0	4.3	3.0	4.6	2.1	3.7	4.0	18.8	
CI-	mg/L	11.1	2.9	7.0	8.5	6.5	4.2	2.7	2.9	5.1	5.6	2.8	2.5	4.2	3.3	2.6	3.1	2.3	2.2	1.5	2.4	1.8	2.8	1.9	2.0	1.7	2.5	1.7	1.2	1.7	2.4	5.4	3.8	2.7	4.0	2.2	3.9	3.3	5.3	
Ca ²⁺	mg/L	21.9	3.5	12.3	15.6	15.5	8.8	11.2	5.3	4.8	12.8	4.3	13.1	16.3	3.4	3.9	8.5	3.6	13.4	5.9	21.5	12.6	19.6	10.2	6.3	4.9	12.0	6.3	2.3	10.2	13.3	20.4	9.9	10.7	13.2	5.0	12.4	11.4	22.3	
${\rm Mg}^{2+}$	mg/L	8.2	2.0	4.3	4.9	4.9	3.2	1.2	1.2	1.4	4.3	1.5	4.8	6.8	1.9	1.3	3.6	1.4	3.8	1.9	3.8	3.8	2.9	3.3	1.3	1.1	4.4	1.8	0.8	3.2	4.8	7.2	3.6	3.4	4.3	1.7	3.7	3.4	9.1	
, ₹	mg/L	1.0	0.0	1.0	1.2	1.8	0.9	0.5	0.8	0.5	0.6	0.3	1.6	0.3	0.3	0.3	0.3	0.2	1.0	0.9	0.1	0.9	0.1	1.0	0.7	0.7	1.1	0.4	0.2	0.5	0.7	0.7	0.3	1.1	1.2	0.4	1.1	1.6	1.1	
Na⁺	mg/L	9.1	3.6	6.3	6.8	7.0	5.7	4.4	3.7	3.4	6.5	3.5	8.7	6.7	3.1	3.2	5.1	3.0	4.7	4.3	7.1	4.4	6.0	5.1	3.2	3.2	5.3	2.9	1.9	4.2	5.4	8.8	6.1	4.8	5.9	3.5	6.0	5.3	8.0	
ЦС	μ S/cm	249	99	142	163	159	108	67	65	63	141	61	164	169	57	57	102	52	123	75	172	118	160	112	70	60	128	60	27	105	137	208	114	108	139	99	131	120	221	
Hq		7.8	7.1	7.3	7.3	7.3	7.0	7.4	7.0	7.4	7.4	7.4	7.7	7.4	7.2	7.1	7.2	7.4	7.1	7.8	7.6	7.1	7.6	7.8	7.1	7.1	7.2	7.1	7.5	7.3	7.0	7.0	7.4	7.2	7.3	7.3	7.4	7.7	7.4	
水道	ပ္ရ	22.5	18.8	16.1	16.3	15.6	17.3	14.5	13.8	14.1	22.1	14.2	14.0	18.5	15.0	12.9	14.0	12.4	13.9	13.9	15.9	15.4	16.5	17.3	13.9	14.0	15.0	13.9	11.0	14.3	14.9	18.9	18.4	15.0	15.6	13.8	16.8	18.8	17.0	
橫画	E	77	88	24	20	95	149	290	556	757	172	522	386	343	488	468	584	1010	383	333	168	332	325	425	799	600	122	776	1023	360	260	159	168	36	46	545	165	24	45	
経度	闽	138.9663	138.9670	138.9442	138.9436	138.9479	138.9483	139.0549	139.0712	139.0599	138.9408	138.9807	138.9273	138.9376	138.9503	138.9607	138.9493	138.9832	138.9748	138.9829	139.0626	139.0677	139.0513	139.0352	139.0652	139.0634	139.0913	139.0654	139.0560	139.0845	139.0928	139.1044	139.1101	139.1080	139.1088	139.1011	139.1270	139.1300	139.1222	
緯度	度	35.1111	35.1164	35.1144	35.1172	35.1368	35.1459	35.1611	35.1707	35.1802	35.1710	35.1730	35.2671	35.2319	35.2040	35.1990	35.2517	35.2131	35.3134	35.3348	35.3518	35.3124	35.3318	35.3085	35.2705	35.2927	35.3189	35.2863	35.2807	35.2906	35.2947	35.2942	35.2990	35.2729	35.3088	35.1974	35.2258	35.2919	35.2906	
採水日		2010/08/16	2010/08/16	2010/08/16	2010/08/16	2010/08/16	2010/08/16	2010/08/31	2010/08/31	2010/08/05	2010/08/16	2010/08/17	2010/08/17	2010/08/17	2010/06/03	2010/06/03	2010/08/05	2010/08/05	2010/08/18	2010/08/18	2010/08/18	2010/08/20	2010/08/20	2010/08/20	2010/08/20	2010/08/20	2010/08/30	2010/08/30	2010/08/30	2010/08/30	2010/08/30	2010/08/30	2010/08/30	2010/08/30	2010/08/30	2010/09/07	2010/09/07	2010/09/07	2010/09/07	
水源		自噴地下水	湧水	湧水	湧水	湧水	湧水	湧水	湧水	湧水	湧水	湧水	湧水	湧水	湧水	湧水	湧水	湧水	湧水	自噴地下水	湧水	湧水	湧水	湧水	湧水	湧水	自噴地下水	湧水	湧水	湧水	湧水	湧水	湧水	湧水	湧水	湧水	湧水	湧水	湧水	
No.		S5	S7	S8	S9	S12	S14	S27	S30	S34	W3	W4	W13	W15	W26	W28	W29	W32	N3	N6	N17	N21	N24	N28	E7	E10	E13	E14	E15	E16	E17	E18	E21	E22	E23	E30	E33	E35	E36	

表1 分析結果一覧 Table 1 Analysis results of water samples. 積物が広く分布しており、埋没谷などの存在が湧水の分 布に関連している可能性も考えられる。また、北西麓に も比較的規模が大きい湧水(Nos.W13、N3)が存在して おり、W13は箱根山麓で最大規模の湧水であることが わかる(表1)。一方、相模湾に面した南東麓には湧水 がほとんど分布していないことから、相当量の地下水が 海底湧出地下水として海面下に湧出している可能性も考 えられる。

4. 湧水温

本調査で対象とした湧水の分布高度は 20 ~ 1023m と約 1000m の高度幅を有していることから、湧水温も 11.0 ~ 22.5℃と大きな温度差を示した。図2には、湧水 温と湧出地点の標高の関係を示した。一般的に両者の関 係は、標高の低下にともない水温が上昇するという逆相 関関係を示すが、本地域の湧水温にも同様の傾向が認め られる。しかし、今回は夏季に一回だけ測定した結果で あり、季節変動の有無を考慮していないため、気温の影 響を受けて湧出前の本来の地下水温よりかなり高温を示 す湧水も多数存在するものと考えられる。図2には、箱 根周辺地域における年平均気温(気象庁および箱根町に より観測された、2000 年~ 2009 年の 10 年間の平年値) と標高の関係(Ta)、月別の平均気温と降水量による加 重平均値と標高の関係(Tm)も示した。

Ta = -0.0058H + 15.6	$(R^2 = 0.9707)$	(1)
Tm = -0.0049H + 18.0	$(R^2 = 0.9083)$	(2)

鈴木(1994)によれば、Tm は涵養水温線と仮定するこ とができ、涵養あるいは流動過程において火山活動に伴 う地熱の影響を受けた湧水は、その線より右側に位置す ることになる。箱根火山でも、噴気活動が認められるカ ルデラ内の中央火口丘である神山周辺には、地熱の影響 により Tm の右側にプロットされる湧水の存在が明らか にされている(大山ほか、1990)。今回対象とした外輪 山の湧水についても Tm の右側にプロットされる湧水が 認められるが、後述するように水質特性やδ¹³C 値から みると、その溶存成分には明らかに火山ガスの影響が認 められないことから、これは高い気温の影響を強く受け た結果であると推定される。

火山地域において地熱や気温の影響がない湧水の多く は、TaとTmの間にプロットされる。また、大きな流 動系をなす地下水が、涵養地点における水温を維持した まま流下し湧出している場合は、Taよりも左側にプロ ットされることもある(佐藤・鈴木、1996)。そこで、



- 図2 湧水温と標高の関係。箱根周辺地域の年平均気温 と標高の関係(Ta)、その降水量による加重平 均値と標高の関係(Tm)、そしてTmより左側に プロットされる、湧水温と標高の関係(Tw)を 表す回帰直線も示した。
- Fig. 2 Relationship between spring water temperature and elevation. Regression lines of annual mean air temperature around Hakone caldera (Ta) and its weighted mean value by precipitation (Tm), and spring water temperature plotted on left-hand side of Tm (Tw) are also shown.

今回測定した湧水温についても、気温の影響を強く受けたTmより右側に位置する湧水については議論の対象から外し、標高との関係について検討を行った。対象となる湧水温と標高の関係を示す回帰式は、Twを湧水温、Hを標高とすると、

$$Tw = -0.0037H + 16.0 \quad (R^2 = 0.6914) \tag{3}$$

となり、逓減率は0.37℃/100mであった。これは大山 ほか(1990)により明らかにされた、カルデラ内におい て噴気活動に伴う大きな地熱の影響がない、古期カルデ ラ壁などに湧出する湧水温の逓減率(0.40℃/100m)に 近い値であった。

5. 水質特性

溶存成分量と明瞭な相関関係をもつ電気伝導度(EC) についてみると、27~249µS/cmの範囲を示した。湧出 標高が低下がるほど、ECが高くなる傾向を示しており、 滞留時間の差や、山麓地域における人間活動の影響を反





映していることが考えられる。pHは7.0~8.2と中性から弱アルカリ性を示しており、カルデラ内の湧水(大山 ほか、1990)とは異なり、火山ガスの影響により弱酸性 ~酸性を示す湧水は認められなかった。

図3には、湧水の水質組成およびその空間分布特性を 把握するために、ヘキサダイアグラムの分布図を示した。 多様な水質型がみられるカルデラ内の湧水(大山ほか、 1990)とは異なり、全ての湧水が低濃度で Ca-HCO₃型 を示していた。主成分である HCO₃や Ca²⁺は、以下の 式で示されるような火山岩を構成する斜長石の化学的風 化プロセスに伴い地下水中に溶出したものと考えられ る。

$$\begin{split} &Na_4 CaAl_6 Si_{14}O_{40} + 3H_2O + 2CO_2 \\ &= Al_2 Si_2 O_5 (OH)_4 + 4NaAlSi_3 O_8 + Ca^{2+} + 2HCO_3^{-} \end{split} \tag{4}$$

井上ほか(2003)は大山火山中腹に湧出する地下水の ⁸⁷Sr/⁸⁶Sr 比から、その化学組成は流動過程で接する主要 構成岩石であるデイサイト中の斜長石、特に Ca を多く 含むアノーサイト成分からの溶出により説明が可能であ ることを述べている。また後述するように、δ¹³C 値の値 からそのプロセスにとって重要な役割を果たす CO₂は、 地下水の涵養過程で付加された土壌 CO₂である。活動 を休止している火山地域の地下水・湧水は、南八ヶ岳 山麓(檜山ほか、1996)、富士山(佐藤ほか、1997)な どでみられるように、基本的には溶存成分量が少ない



図4 ナトリウムイオン濃度と塩化物イオン濃度の関係。白抜きの凡例は、標高400m以上に位置する湧水、 そして黒塗りの凡例は、硝酸イオン濃度が10mg/L以上の湧水を示す。

Fig. 4 Relationship between sodium and chloride concentrations. Open circles show the spring waters located above 400ma.s.l., and solid circles show the spring waters having the nitrate concentrations of 10 mg/L or more.

Ca-HCO₃型を示すことが多く、カルデラ内とは異なり 外輪山斜面の湧水では、水温と同様に溶存化学成分にも 火山活動の影響はないものと考えられる。

また Mg^{2+} についても、基本的には岩石(輝石などの 有色鉱物)に由来する成分である。 Na^+ については、調 査地域が沿岸部に位置することから、海塩に由来する 成分も若干影響していることが予想されるものの、図4 に示したように Na^+ と CF の比が海水のそれに比べ高い (Na^+ に富む)ことから、大部分は岩石由来の成分であ ることがわかる。また図4において、白抜きの凡例で示 した溶存成分量が少ない標高400m以上に位置する湧水 は、海水比のラインにより近い場所にプロットされてお り、滞留時間が短いことを反映して相対的に海塩の組成 に近い(つまり降水成分の寄与が高い)傾向を示してい る(Gamati et al.、2011)。なお、南斜面に位置する溶存 成分量が多い湧水も海水比に近いところにプロットされ るが、 NO_3^- 濃度が高いことなどから、生活排水などの 人為的な CF の負荷が原因と考えられる。

次に、 SO_4^2 と CI 濃度の関係を示した図 5 をみると、 やはり湧出高度が高い白抜きの凡例で示した湧水につい ては、 SO_4 /CI 比が海水に近い値を示しており、Na/CI 比 同様降水成分の寄与が高いことを示唆している。またこ の図では、斜面方向による違いがみられ、西 \rightarrow 南 \rightarrow 北・



図 5 硫酸イオン濃度と塩化物イオン濃度の関係。凡例 の色の違いは図 4 に同じ。

Fig. 5 Relationship between nitrate and chloride concentrations. The color of symbols in this figure correspond to those in Fig. 4.

東斜面の順に SO₄/Cl が高くなる傾向がみられる。これ は海岸からの距離とともに、後述する主涵養期である夏 季の南西からの卓越風の影響である可能性が考えられ る。風下側の北東側の斜面では、カルデラ内に位置する 噴気地帯から放出される火山ガス起源の硫酸エアロゾル の影響を受けるため、SO₄/Cl が高くなるのではないか と推定される。また、図中に地点番号を示した特に高い SO₄/Cl 比を示す湧水は、火山岩中に含まれる硫化物など、 地質由来の成分の寄与が想定される。

δ D およびδ¹⁸0 値

図6には、δD値とδ¹⁸O値の関係(δ-ダイアグラム) を示した。図中には、早稲田・中井(1983)による日本 列島における太平洋側の天水線(δD=8・δ¹⁸O+10)と、 Matsuo et al. (1985)による箱根カルデラ内におけるロ ーカルな天水線(δD=8・δ¹⁸O+17)を示したが、外輪山 斜面の湧水は、両天水線の間にプロットされていること がわかる。外輪山斜面の湧水には、カルデラ内の温泉水 にみられるような火山性熱水と天水の混合線に沿い大き くシフトするような試料はみられず、基本的に降水を起 源としていることが示唆される。また、蒸発の影響を受 け高い同位体比をもつ芦ノ湖水(板寺、2006)に向かい シフトしている(つまりその影響を受けた)湧水も認め られなかった。図6において、最も左下に位置する(つ まり最も同位体比が低い)湧水は、W13(二子(ふたご)湧水)であり、標高1023mと最も高所に位置する E15



図6 酸素・水素同位体比の関係を示すδ-ダイアグラ ム。

Fig. 6 Relationship between oxygen and hydrogen isotopic ratios of spring water.

(明神水(みょうじんすい))よりも低い値を示していた。 また、西斜面に位置する他の湧水は、それとは逆で全体 的に高い値を示しており、標高 1010m に位置する W32 (命之泉(みことのいずみ))は、E15 よりかなり高い値 を示していた。

そこで、同位体比の地域特性を明らかにするために、 δ¹⁸O 値の分布図を図 7 に示した。なお、δD 値について は、δ¹⁸O値とほぼ同様の傾向を示すことから、ここで はあえて取り上げないことにした。この図から、同一高 度でも斜面方向によりδ¹⁸O値が異なることが判明した。 全体的な傾向をみると、西~南西斜面で高い値を、そし て北から北東斜面で低い値をもつ傾向が認められる。外 輪山の山頂付近にある湧水についてその値を比較してみ ると、西斜面の命之泉(1010m)で-8.3‰、東斜面の明 神水(1023m) で-9.3%と同一標高において1.0%の違 いが認められた。このような斜面方向による同位体比の 違いは、富士山などの孤立峰において確認されており (安原ほか、2007)、大抵の場合は卓越風向に関係し、風 上側で同位体的に重い、そして風下側で軽い雨が降るい わゆる「雨陰(あまかげ)効果」がその要因として考え られている。断定はできないが、図8に示したように、 箱根火山の場合も周辺気象観測点(気象庁および箱根町 により計測)における多雨(主涵養)期である夏季(7 月)の風向データからみて、雨陰効果による影響と推定 される。図9にはCI濃度と標高の関係を示した。なお、 人為的な影響を取り除くため、主に南斜面の位置する



図7 酸素同位体比の分布。図中の点線は、箱根火山の 南北方向に伸びる尾根線を示す。この線を境に、西側と 東側斜面に区分できる。

Fig. 7 Distribution of oxygen isotopic ratio of spring waters. Dotted line shows a ridge line running in the north-south direction on the Hakone volcano. On the basis of this line, caldera's outer slope can be divided into west and east side ones.

NO₃ 濃度が 10mg/L 以上の湧水については、プロットさ れていない。この図をみてわかるように、風上側の西斜 面の方が風下側の北・東斜面に比べ同一高度においてよ り高い CI 濃度を示す傾向にある。これは、卓越風の風 上である西斜面の方が、より風送塩の影響を強く受けた 結果であることを示唆しており、同位体比の斜面による 違いが雨陰効果に起因することを支持している。

また、西斜面の標高400m 弱に位置する二子湧水の δ¹⁸O 値が最も低い値を示す原因は、次のようなことが考 えられる。この湧水は黄瀬川の東側、つまり地形的には 箱根火山の流域に位置しているものの、地下には富士山 の噴出物が分布し、水文地質的にはより平均涵養高度が 高い富士山東斜面で涵養された地下水の流出域となって いる。そのためδ¹⁸O 値が低い富士山系の地下水が湧出 しているものと考えられる。三島市周辺の地下水の起源 について検討を行った中井(1996) によると、箱根外輪 山系と富士山系地下水には同位体比以外に、SO4/CI比(当 量比) について、前者が低く、後者が高くなるという明 瞭な違いが確認されている。図5をみてわかるように、 二子湧水(W13) は他の西斜面に位置する湧水とは異な



図8 箱根周辺における2000~2009年7月の卓越風向 分布 (気象庁および箱根町によるデータを使用)。 Fig. 8 Prevailing wind directions in July, from 2000 to 2009. Date from Japan Meteorological Agency and Hakone Town.

り、SO₄⁻² 濃度が高く、SO₄/Cl 比も高いことからみても、 この湧水は富士山を起源とする地下水が湧出しているも のと判断される。

次に、同位体比の高度効果をみるため、図10を作成 した。上述したように、箱根外輪山斜面における湧水の 同位体比には、明らかな斜面方向(特に東西方向)によ る違いが認められる。その傾向はこの図でもみられ、同 一標高における同位体比は、東斜面に比べ西斜面で高い ことがわかる。また、北斜面では湧水の分布高度幅が小 さく、高度効果について検討するには適当でないことか ら、今回は図7および図8に点線で示した外輪山および 中央火口丘を南北に連なる尾根線を境に、大きく東側と 西側斜面に二分して高度効果に関する議論を行うことに した。

二子湧水(W13)と井戸深度が不明な自噴井地下水(S5、N6、E13)を除く全湧水の同位体比(δD_{all} 、 $\delta^{18}Oa$)、西 側および東側斜面の同位体比(δD_{west} 、 $\delta^{18}O_{west}$ および δD_{east} 、 $\delta^{18}O_{east}$)と標高の関係を示した回帰式は、標高を Hとすると、

- $\delta D_{west} = -0.00207 \cdot H 49.1285 \quad (R^2 = 0.6757)$ (6)
- $\delta D_{east} = -0.00958 \cdot H 48.7564 \quad (R^2 = 0.6965) \tag{7}$

$$\delta^{18}O_{all} = -0.00100 \cdot H - 7.7803 \quad (R^2 = 0.5296)$$
 (8)



図9 塩化物イオン濃度と標高の関係。人為的な影響を 除くため、NO₃ 濃度が 10mg/L 以上の湧水を省いた。黒 塗りの凡例は西側斜面、そして白抜きの凡例は、東側斜 面の湧水を示す。

Fig. 9 Relationship between chloride concentration and elevation. In order to remove the anthropogenic effect, the water samples, having the nitrate concentrations of 10 mg/L or more, were omitted. Open and solid circles show the spring waters distributed on west and east slopes, respectively.

$$\delta^{18}O_{west} = -0.00063 \cdot H - 7.6426 \quad (R^2 = 0.7175)$$
 (9)

$$\delta^{18}O_{east} = -0.00115 \cdot H - 7.8793 \quad (R^2 = 0.7653)$$
(10)

となり、全斜面平均では 100m につき δD 値および $\delta^{18}O$ 値 が それ ぞれ 0.71‰、0.10‰、 西側斜面では 0.2‰、 0.06‰、そして東側斜面では 0.96、0.12‰ 変化すること が明らかとなった。これは中村ほか(2002)により示さ れた、日本の他の山体で観測された天水の高度効果(δD 値で 0.4 ~ 2.3‰/100m、 $\delta^{18}O$ 値で 0.4 ~ 0.1‰/100m)と 比較するとかなり小さく、特に西側斜面の高度効果は、 非常に小さいことがわかる。このように箱根外輪山斜面、 特に西側斜面で高度効果が小さくなる原因は、現在のと ころ不明であるが、以下のような要因が想定される。

1) 西斜面の特に高所で同位体的に重い降水が降る。

2) 高所で涵養された地下水が山麓で湧出している。

ただし、1)については多くの火山体で普遍的に認め られる現象であり、地下水流動系に関連して形成された



図 10 水素同位体比(a) および酸素同位体比(b) と 標高の関係。図中には、全ての湧水を用いて両者の関係 を示した回帰直線(δD_{a11} 、 $\delta^{18}O_{a11}$:実線)に加え、西 側斜面および東側斜面それぞれの回帰直線(δD_{west} 、 $\delta^{18}O_{west}$:破線と δD_{east} 、 $\delta^{18}O_{east}$:点線)も示した。なお、 回帰直線を求める際には、富士山起源の地下水が湧出す る二子湧水(W13)と採水深度が不明な自噴地下水(S5、 N6、E13)は除外した。

Fig. 10 Relationships between oxygen and hydrogen isotopes of spring water and elevation. Regression lines of all slope (δD_{all} , $\delta^{18}O_{all}$: solid line), west slope (δD_{west} , $\delta^{18}O_{west}$: broken line) and east slope (δD_{east} , $\delta^{18}O_{east}$: dotted line) are shown. When these regression lines were calculated, the data of Futago-spring (W13) discharging groundwater derived from Mt. Fuji and groundwaters from flowing well whose depth is unknown (S5, N6, and E13) were not used. 見かけの傾向であるとは考えにくい。西側と東側斜面の 回帰直線の間隔が、低標高側で収束し、高度が増すにつ れ大きくなることから考えても、2)が要因である可能 性が高い。箱根外輪山において、斜面方位別に降水の同 位体比を測定した宮下(2009)により、西側中腹斜面の δ¹⁸O値が、他の斜面のそれに比べ0.6‰程度高いことが 報告されている。したがって、今後は湧水の涵養源とな る降水の高度効果について、詳細に検討していく必要性 が求められる。

また、西側斜面には芦ノ湖からの漏水や、その湖水を 導水している深良用水などの影響により同位体比が高く なっていることも考えられる。しかし、図 10 に示した ように、標高 725m の芦ノ湖よりも高所の山頂部(標高 1010m)に位置する湧水(W32)の同位体比についても、 東側斜面の山頂部(標高 1023m)に位置する湧水(E15) の値より約 1.0‰ 高くなっていることから、湖水の影響 というよりは、涵養源となる降水のδ¹⁸O 値自体が高い ことを反映した結果であると考えられる。

7. δ¹³C值

ー般的な地下水において、主要な陰イオン成分である 炭酸水素イオンを主体とする溶存炭酸(DIC)の炭素同 位体比($\delta^{13}C_{DIC}$ 値)は、有機物(-20%の以下)、深部起源(火 山性)CO₂(-8~-3‰)、海成炭酸塩鉱物(約0‰)など、 各起源物質によって異なる値を持つことから、その起源 を検討する際に大変有効な指標となることが知られてい る。(鈴木・田瀬、2010)。特に活動的な火山地域では、 溶存炭酸の起源物質の一つとして火山性 CO₂が含まれ ることから、 $\delta^{13}C_{DIC}$ 値を指標とすることで、湧水の水質 形成に対する火山ガスの影響の有無を把握することが可 能となる。なお、本地域のように火山岩を帯水層とする 地域では、海成層中に含まれる海成炭酸塩鉱物の寄与は 無視することができる。

表1には、今回の調査で行った湧水(16地点)の $\delta^{13}C_{DIC}$ 値の分析結果を示すとともに、鈴木・田瀬(2010) の手法に基づき計算した、湧水中のDICと同位体平衡 にあると仮定される気相CO₂の炭素同位体比($\delta^{13}C_{co2}$ 値) も示した。外輪山斜面に分布する湧水の多くは、 $\delta^{13}C_{DIC}$ 値が-20‰ に近い低い値を示しているが、湧出高度の高 い湧水では相対的に高い値を示し、火山ガスの影響が あるようにも見受けられる(図11)。しかし $\delta^{13}C_{co2}$ 値 をみると、すべて-20‰ 以下の値を示しており、外輪山 湧水中のDICには火山性CO₂の寄与はなく、有機物の 分解により生じた土壌CO₂を起源としていることが明 らかとなった。5章では、溶存成分量が少なくCa-HCO₃



図 11 溶存炭酸 (DIC) の炭素同位体比と標高の関係。 Fig. 11 Relationship between carbon isotopic ratio of dissolved inorganic carbon (DIC) and elevation.

型を示すという水質特性から、外輪山湧水の水質形成に 火山ガスは関与していないことが推定されたが、今回 $\delta^{13}C_{DIC}$ 値の分析を行った結果、その妥当性を確認するこ とができた。

高所に位置する湧水の δ¹³C 値が高くなる要因として は、平均 -27‰ 程度の値を持つ C3 植物(温帯地域の大 部分の植生(木本類))に比べ、平均で -12‰ と同位体 的に重い C4 植物(ススキなどのイネ科の植生)の影響 が、高所ほど大きくなることが考えられる。また、標高 1000m 付近の湧水は 800m 付近のものに比べ高い値を示 しているが、これはその流域が C3 植物である木本類で 占められていることが要因と考えられる。

8. まとめ

これまでカルデラ内を対象に数多くの研究が行われて きた箱根火山において、今回初めて外輪山斜面全域を対 象に湧水の採水調査を実施した。その結果、明らかとな った湧水の水温・水質および同位体組成に関する特徴は、 以下のようにまとめられる。

1)気温の影響を受けていない湧水温の逓減率は、
 0.37℃/100mであった。これは大山ほか(1990)により
 明らかにされた、カルデラ内において噴気活動に伴う大きな地熱の影響がない、古期カルデラ壁などに湧出する
 湧水温の逓減率(0.40℃/100m)に近い値であった。

2) 火山ガスや熱水などの影響により、多様な水質型 がみられるカルデラ内の湧水とは異なり、全ての湧水が 一般的な浅層地下水と同じく低濃度で Ca-HCO₃型を示 していた。また、斜面方向により水質組成に違いがみら れ、Na/Cl 比、SO₄/Cl 比や Cl 濃度などから、卓越風向 の風上側に位置する南西斜面では、風下側の北東斜面に 比べ海塩の影響をより強く受けていることが判明した。

3) δD 値と δ¹⁸O 値の関係 (δ - ダイアグラム) から、 外輪山斜面の湧水には、火山性熱水や芦ノ湖からの漏水 の影響は認められなかった。また、同位体比には水質組 成と同じく卓越風向の影響を受け、風下側の東側斜面に 比ベ風上側の西側斜面で相対的に高い値を示していた。 さらに、同位体比の高度効果は、他の山体で得られた値 に比べ、特に西側斜面で小さい値を示しており、西斜面 の高所では同位体的に重い雨が卓越して降ることが推察 された。

4) 湧水の $\delta^{13}C_{DIC}$ 値の測定結果から、外輪山斜面に分 布する湧水中の DIC には、火山性 CO₂ の寄与はなく、 有機物の分解により生じる土壌 CO₂ を起源としている ことが判明した。

以上のように、湧水の水質や同位体組成が斜面により 大きく異なることなどが明らかにされた。外輪山斜面に おける水循環機構を解明するためには、今後そのような 地域性がもたらされる要因を明らかにすることが重要に なるであろう。また、外輪山斜面の湧水には、火山ガス や熱水の影響は認められず、芦ノ湖に面する西斜面では、 その漏水の影響なども認められないことから、カルデラ 壁部分では若干あるとは想定されるが、基本的に箱根火 山ではカルデラ内外における地下水の交流は無いものと 考えられる。

謝辞

水素・酸素同位体の分析に際し、温泉地学研究所の板 寺一洋主任研究員には様々なご配慮をいただきました。 また、昭和女子大学非常勤講師の大山正雄博士には、貴 重な資料をご提供いただいた。以上の方々に、ここに記 して感謝の意を表します。

参考文献

- Gmati, S., Tase, T., Tsujimura, M. and Tosaki, Y. (2011) Aquifers interaction in the southwestern foot of Mt. Fuji, Japan, Examined through hydrochemistry and statistical analyses. Hydrological Research Letters, 5, 58-63.
- 檜山哲哉・安原正也・丸井敦尚・風早康平・鈴木裕一(1996) 南八ヶ岳における湧水と地下水の水質.ハイドロロ ジー, 26, 253-266.
- 井上陸夫・小林俊則・中村昇・大谷恵子・中島剛・小村 和久(2003)鳥取県大山火山中腹に湧出する地下水 の流動系-同位体地球化学的情報からみた地下水の 履歴-,日本水文科学会誌,33,255-267.

- 板寺一洋(2006): 芦ノ湖の水温および酸素・水素同位 体比の測定結果, 温地研報告, 38, 35-42.
- Matsuo, S., Kusakabe, M., Niwano, M., Hirano, T. and Oki,Y. (1985) Origin of thermal waters from the Hakone geothermal system ,Japan, Geochem. J., 19, 27-44.
- 三島市地下水涵養方策研究会編(1995,1996,1997,1998)
 三島市地下水涵養方策研究報告書(その1,2,3,4),三島市,34p,40p,59p,74p.
- 宮下雄次(2009)箱根火山における降水と湧水、河川 水の安定同位体比について,日本地球惑星科学連合 2010年大会予稿集(CD-ROM),H128-020.
- 中井信之(1996)三島市および周辺地下水の化学成分・ 同位体組成の特徴とその涵養源,三島市地下水涵養 方策研究会編『三島市地下水涵養方策研究報告書(そ の2)』,三島市,13-36.
- 中村太郎・佐藤 努・安原正也(2002)御嶽山南東斜面 における天水の高度効果.日本水文科学会誌、32、 135-147.
- 大木靖衛・平野富雄(1972)箱根温泉の湧出機構と成因. 地熱, 32, 15-29.
- 大山正雄・平野富雄・粟屋 徹(1990)箱根火山の湧泉, 温地研報, 21(3), 103-126.
- 佐藤芳徳・安池慎治・河野 忠・北川光雄・鈴木裕一・ 高山茂美(1997) 富士山周辺の湧水および地下水の 水質について.日本水文科学会誌,27,17-25.
- 佐藤 新・鈴木裕一 (1996) 富士山の湧水および地下水 の水温について,ハイドロロジー(日本水文科学会 誌),26,23-34.
- 鈴木裕一(1994) 八ヶ岳の湧水および地下水の水温に ついて,ハイドロロジー(日本水文科学会誌),24, 83-92.
- 鈴木秀和・田瀬則雄 (2010) 浅間山における湧水の溶存 炭酸の炭素同位体比 — 火山性 CO₂の寄与率の推定 一,日本地下水学会誌,52,247-260.
- 高橋 浩・廣田明成 (2004) Gas Bench II を用いた地下 水中の溶存炭酸の炭素同位体測定について.日本地 球化学会年会講演要旨集.51, p96.
- 安原正也・風早康平・丸井敦尚(2007) 富士山の地下水 とその涵養プロセスについて,荒牧重雄・藤井敏嗣・ 中田節也・宮地直道編『富士火山』,山梨県環境科 学研究所,389-405.
- 早稲田 周・中井信之(1983)中部日本・東北日本にお ける天然水の同位体組成.地球化学, 17, 93-91.
- Yamamoto, S. (1995) Volcano Body Springs Japan. Kokon Shoin, 264p.