
原 著

箱根強羅潜在カルデラ内に湧出する温泉の新しい分類

菊川城司¹⁾, 板寺一洋¹⁾, 吉田明夫¹⁾

(平成 22 年 12 月 28 日受付, 平成 22 年 3 月 3 日受理)

A New Classification of Hot Spring Waters Welling Out in the Gora Buried Caldera Structure, Hakone, Japan

George KIKUGAWA¹⁾, Kazuhiro ITADERA¹⁾ and Akio YOSHIDA¹⁾

Abstract

Based on the concentrations of Cl^- , SO_4^{2-} and HCO_3^- as well as their concentration ratios and temperatures, we propose a new classification of hot springs welling out in the region of Gora buried caldera structure, Hakone, Japan. Hot springs of Type 1 are featured by high concentration of Cl^- and high temperature, and those of Type 2, which are distributed around Jyakotsu River, are distinguished from others by the characteristic that the concentration of Cl^- is proportional to the concentration of SO_4^{2-} and temperature. On the other hand, hot springs of Types 3 and 4 are characterized by such facts that concentration of Cl^- is very low and neither of the concentration of SO_4^{2-} and HCO_3^- is proportional to temperature. Concentration of SO_4^{2-} is higher relative to that of HCO_3^- in hot springs of Type 3 and vice versa in those of Type 4. Concentration of Cl^- in Type 5 is relatively high compared to that in Types 3 and 4, and in the ternary diagram representing concentration ratios between the anions Cl^- , SO_4^{2-} and HCO_3^- , the points for Type 5 are plotted in the extended zone of the points for Type 2. Hot springs belonging to Type 6 are not clearly discriminated from those of Type 1 and Type 2 in the ternary diagram, but the difference is obvious in the relationship between concentrations of Li^+ and Na^+ . Type 1 and Type 2 almost correspond to Group III and Group IV a in the existing model of Hakone hydrothermal system, respectively. Types 3, 4, 5, 6 have been categorized as Group II in that model. We consider that origin of SO_4^{2-} and a part of HCO_3^- in hot springs of Types 3, 4, 5 are attributed to volcanic gases and the inclusion of Cl^- in Type 5 is caused by inflow of Type 1 hot springs. Hot springs classified into Type 6 are similar to thermal waters observed in Hakone-Yumoto and Ohiradai which well out from basement rocks.

Key words : Hot springs in Hakone, Gora buried caldera structure, A new classification, Origin of hot springs, Anion

¹⁾ 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. ¹⁾ Hot Springs Research Institute of Kanagawa Prefecture. 586 Iriuda, Odawara, Kanagawa 250-0031, Japan.

要 旨

箱根温泉の強羅潜在カルデラ内に湧出する温泉について, 主要な陰イオンの特徴および塩化物イオン濃度と温度との関係に基づき, 新しく6つのタイプに分類した. 各タイプで, 陰イオンと陽イオンの関係や陽イオン間にも違いが見られること, 温泉分布地域の特徴などから, タイプの違いは, 温泉の成因の違いを反映していると考えられる.

タイプ1の温泉は西北西-東南東走向のゾーンに分布し, 従来の箱根温泉成因モデルの第Ⅲ帯にほぼ対応するが, 塩化物イオン濃度や温度に関して, ゾーンの走向に沿った一定傾向は認められず, その分布は地下水の流動を示すものではないと考えられる. タイプ2の温泉は, タイプ1の温泉の分布ゾーンの南東端に湧出する高温塩化物泉と地下水との間の連続的な希釈関係を表していると推定される. タイプ1, 2の間ではイオン濃度の相関関係に違いが見られることなどから, 温泉を形成する希釈系は両タイプで異なっていると考えられる.

タイプ3, 4, 5は, 従来の箱根温泉成因モデルにおいて第Ⅱ帯と第Ⅳa帯に分類された温泉に相当する. 第Ⅱ帯の温泉水中の炭酸水素イオンは有機物起源とされてきたが, タイプ3や5では硫酸イオン濃度と炭酸水素イオン濃度との間に弱い相関関係が見られることなどから, 炭酸水素イオンは火山ガスに由来する可能性が考えられる. 本論では, 陰イオン濃度の相対比から, タイプ3, 4, 5に区分したが, 成因論的には, タイプ3, 4, 5は, 火山性熱水に由来しない地下水が主体となっているという意味で共通している. タイプ6は, 箱根火山直下のマグマからの熱水や火山性ガスとは直接関係しない基盤岩中の温泉を表しているとして推定される.

キーワード: 箱根温泉, 強羅潜在カルデラ, 新しい分類, 温泉の成因, 陰イオン

1. はじめに

箱根火山中央火口丘の北東側に推定されている強羅潜在カルデラ(萬年, 2008)内には, 強羅, 二ノ平, 木賀, 小涌谷, 底倉, 宮ノ下などの多くの温泉場が存在し, そこには Oki and Hirano(1970)ならびに Oki and Hirano (1974) の箱根温泉成因モデル(以下, 大木・平野モデルとする)において, 第Ⅱ帯, 第Ⅲ帯, 第Ⅳa帯にそれぞれ分類された温泉が湧出する.

大木・平野モデルでは, 箱根温泉を第Ⅰ~Ⅳ帯の4つのグループに分類し, 第Ⅳ帯をさらに第Ⅳa帯と第Ⅳb帯とに分けている. その中で, 第Ⅰ帯の硫酸塩泉は, 高温の中央火口丘下の比較的浅いところで, 火山性蒸気が蒸発と凝縮の過程を繰り返すことにより二次的に生成した硫酸に富む酸性の火山性水蒸気が起源であるとしている. 第Ⅱ帯の炭酸水素塩硫酸塩泉については, 第Ⅰ帯の温泉と浅層地下水との混合によってつくられているとし, その中に含まれる炭酸化合物は火山を構成する岩石中に取り込まれた化石植物の分解によって供給されているとみなされた. そして, 第Ⅲ帯の高温塩化物泉は, 中央火口丘の深部から上昇してきた塩化ナトリウムに富むマグマ起源の高温高圧の蒸気が, カルデラの西側で浸透し中央火口丘の基部を通過して東に向かって流れる第Ⅱ帯の温泉水に混合して生成しているとした. さらに, 第Ⅳ帯の塩化物炭酸水素塩硫酸塩泉については, 第Ⅲ帯の温泉水が中央火口丘の東斜面を流下する中で更に地下水によって希釈されたもの(Ⅳa帯)と, 中央火口丘から比較的離れたところに位置し箱根火山の基盤をなす中新世堆積層(湯ヶ島層群や早川凝灰角礫岩など)の割れ目から湧出するもの(Ⅳb帯)とに分けて定義された.

大木・平野モデル発表後も, 箱根火山では新たな温泉井の掘削が行われ, 強羅潜在カルデラ内でも源泉数が増加するとともに, 異なった泉質をもつ温泉も開発されている. また, 新たな研究成果として, 強羅地区温泉の涵養源のほとんどは同地域内の降水であること(町田ら, 2006), 大木・平野モデルで第Ⅲ帯とされた高温の食塩泉の分布域は流動の方向ではなく, 温泉の火山性成分や熱の供給源地を現していると考えられること(町田ら, 2007), 強羅潜在カルデラ構造が存在すること(萬年, 2008), 箱根温泉では比較的狭い地域毎にそれぞれ特徴的な経年変化が見られること(例えば, 菊川, 2002)などが報告されている.

このような状況を踏まえて、本論文では、強羅潜在カルデラに湧出する温泉の最新 (2006~2008 年) の調査データを用い、温泉水に溶存する塩化物イオン (以下 Cl^- と標記)、硫酸イオン (以下 SO_4^{2-} と標記)、炭酸水素イオン (以下 HCO_3^- と標記) の濃度と各イオンの濃度比、 Cl^- 濃度と温度との関係、更に陰イオンと陽イオンおよび陽イオン間との関係を基に、この地域の温泉について、新しくタイプ 1、タイプ 2、タイプ 3、タイプ 4、タイプ 5、タイプ 6 の種類分けを提案する。

2. 試料および方法

本報告に用いたデータは、2007 年から 2009 年にかけて 116 源泉について実施した調査に基づいている。調査対象とした源泉を Fig. 1 に示す。対象地域内の源泉のほとんどは掘削井から汲み上げられる温泉であるが、底倉地区、木賀地区、宮ノ下地区ならびに小涌谷地区の一部では自然湧泉がみられる。本報告では、解析にあたって温泉の湧出状況については特に考慮しなかった。

現地では、分析用としてポリビンに温泉水を採水したほか、温度、揚湯量、pH の測定を行った。採水した温泉水は各種イオン濃度など溶存成分について、鉱泉分析法指針 (環境省自然環境局、2002) に準じて分析を行った。

3. 温泉の新しいタイプ分け

調査結果は、Fig. 1 に表示した温泉場毎に区分して Table 1 に載せてある。Figure 2 は、各源泉の Cl^- 、 SO_4^{2-} 、 HCO_3^- の相対的な組成比を基に描いた三角ダイアグラムである。本論文で提案する 6 種のタイプが、それぞれ色分けして示されている。この三角ダイアグラムだけでは、タイプ 1 とタイプ 2 それにタイプ 6 の分類境界は必ずしも明確ではない。しかし、それぞれの源泉に含まれる陰イオン濃度間の相関を見た Fig. 3 の、特に HCO_3^- 濃度と SO_4^{2-} 濃度の関係 ($\text{SO}_4^{2-}/\text{HCO}_3^-$) からタイプ 2 と 6 の違いが見てとれ、また、 Cl^- 濃度を温度に対してプロットした Fig. 4 によりタイプ 1 の源泉がタイプ 2 および 6 から識別される。

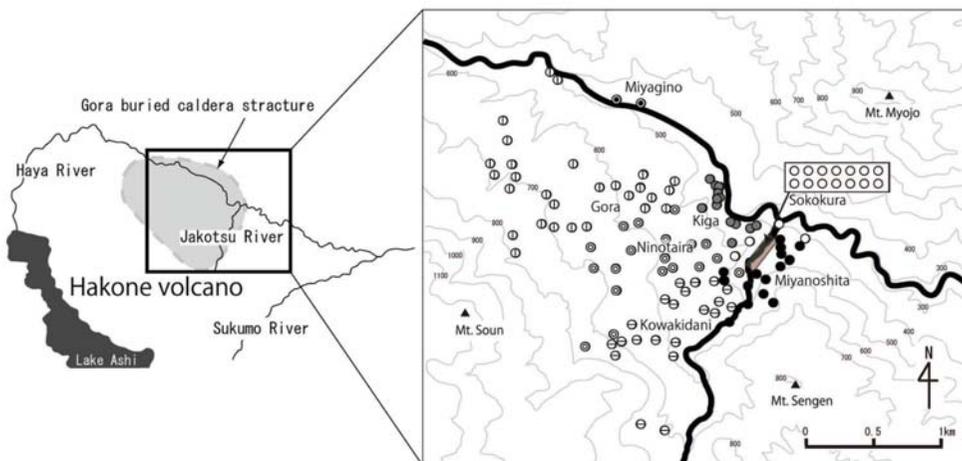


Fig. 1 Distribution of hot springs in the Gora buried caldera structure of Hakone investigated in this study. Hot springs in different areas are shown by different symbols. (c.f. Table 1)

図 1 箱根強羅潜在カルデラにおける調査対象源泉の分布。温泉場毎に記号のタイプを変えて表示した。

Table 1 Temperature, pH, concentration of solutes and the type proposed in this paper in the Gora buried caldera structure of Hakone. Wells in different areas are shown by different symbols in Fig. 1.

表 1 箱根強羅潜在カルデラにおける調査対象源泉の温度, pH, 成分濃度ならびに本論におけるタイプ.

Area	No	Temp. (°C)	pH	Li ⁺ (mg/L)	Na ⁺ (mg/L)	Cl ⁻ (mg/L)	SO ₄ ²⁻ (mg/L)	HCO ₃ ⁻ (mg/L)	As (mg/L)	Type of this study
Miyanosita	1	59.3	6.9	0.34	255	374	54.8	92.0	0.40	2
Miyanosita	2	62.3	8.4	0.44	330	500	52.7	75.6	0.52	2
Miyanosita	3	31.9	7.3	0.12	114	143	37.9	74.9	0.17	2
Miyanosita	4	59.1	8.3	0.46	311	469	55.2	106	0.69	2
Miyanosita	5	71.8	8.3	0.54	381	600	65.6	101	0.86	2
Miyanosita	6	63.6	8.1	0.49	332	485	57.2	92.3	0.69	2
Miyanosita	7	60.5	8.0	0.43	314	471	52.2	76.0	0.51	2
Miyanosita	8	82.1	8.4	0.68	473	746	71.1	82.2	0.87	2
Miyanosita	9	69.0	8.2	0.48	347	524	61.8	93.2	0.59	2
Miyanosita	10	86.4	8.3	0.79	551	972	86.8	88.7	0.58	2
Miyanosita	11	51.6	8.2	0.28	210	329	46.0	82.6	0.27	2
Miyanosita	12	64.8	8.5	0.54	331	522	64.7	112	0.60	2
Miyanosita	13	66.0	8.4	0.50	326	609	67.4	109	0.50	2
Miyanosita	14	65.2	8.5	0.52	347	517	67.2	111	0.47	2
Miyanosita	15	19.7	7.3	0.00	30.3	54.9	33.5	79.9	0.00	5
Sokokura	1	63.8	7.7	0.43	322	486	63.0	102	0.49	2
Sokokura	2	54.0	7.5	0.38	297	465	62.0	103	0.42	2
Sokokura	3	68.6	7.8	0.44	330	543	64.5	98.4	0.51	2
Sokokura	4	48.0	8.4	0.46	328	547	69.9	114	0.29	2
Sokokura	5	66.4	8.2	0.44	318	512	63.3	113	0.50	2
Sokokura	6	41.5	8.3	0.44	296	539	65.2	102	0.35	2
Sokokura	7	72.0	8.1	0.40	292	432	65.2	98.1	0.32	2
Sokokura	8	71.9	8.4	0.52	375	535	74.8	103	0.58	2
Sokokura	9	76.4	7.4	0.56	400	620	70.7	101	0.45	2
Sokokura	10	69.0	8.0	0.57	400	604	70.7	105	0.42	2
Sokokura	11	58.0	8.2	0.50	361	574	67.6	99.1	0.45	2
Sokokura	12	63.2	8.0	0.45	327	492	68.2	110	0.36	2
Sokokura	13	44.1	7.7	0.34	248	416	61.6	107	0.39	2
Sokokura	14	36.3	7.4	0.26	207	321	50.3	90.3	0.29	2
Sokokura	15	64.3	8.4	0.42	295	452	55.7	96.9	0.67	2
Sokokura	16	60.1	7.4	0.54	395	663	72.7	108	0.44	2
Sokokura	17	63.2	7.6	0.52	383	620	72.2	109	0.44	2
Sokokura	18	25.8	8.3	0.05	90.6	119	38.3	104	0.10	5
Kiga	1	63.6	8.7	0.35	377	527	67.6	144	0.51	2
Kiga	2	68.5	8.7	0.42	292	458	65.3	119	0.39	2
Kiga	3	57.5	8.2	0.27	211	303	59.8	102	0.25	2
Kiga	4	64.3	8.5	0.31	267	360	59.4	149	0.51	2
Kiga	5	34.3	7.6	0.05	63.6	69.4	96.5	94.4	0.11	5
Kiga	6	35.1	7.2	0.04	91.3	82.6	122	150	0.04	5
Kiga	7	36.1	7.5	0.06	156	140	117	191	0.03	5
Kiga	8	36.7	7.2	0.05	113	100	123	164	0.05	5
Kiga	9	35.2	7.4	0.06	180	150	155	205	0.06	5
Kiga	10	34.9	7.6	0.02	119	87.3	108	147	0.04	5
Kiga	11	41.6	8.6	0.05	108	78.4	109	137	0.07	5
Kiga	12	47.0	7.6	0.17	123	142	76.3	103	0.22	5
Kiga	13	85.9	8.9	0.17	617	989	139	84.6	0.72	6
Ninotaira	1	86.1	8.2	0.34	836	1340	122	31.8	0.93	1
Ninotaira	2	92.6	7.8	1.03	1110	1770	180	24.5	1.27	1
Ninotaira	3	88.9	8.0	2.11	2030	3660	45.0	30.0	2.11	1
Ninotaira	4	90.9	7.8	1.54	1190	2050	102	41.6	1.33	1
Ninotaira	5	56.9	7.9	0.21	179	263	44.5	118	0.21	2
Ninotaira	6	66.7	8.4	0.36	280	414	65.9	91.3	0.34	2
Ninotaira	7	40.9	8.2	0.15	116	185	44.5	112	0.18	2
Ninotaira	8	62.8	8.6	0.31	241	333	71.3	120	0.43	2
Ninotaira	9	86.1	8.3	0.78	617	917	126	123	0.80	2
Ninotaira	10	35.0	7.8	0.01	42.1	24.3	151	97.3	0.01	3
Ninotaira	11	51.6	8.2	0.03	74.9	23.2	182	164	0.03	3
Ninotaira	12	47.9	7.4	0.04	98.9	61.5	164	177	0.05	3

Table 1 (Continued).

表 1 (続き)

Area	No	Temp. (°C)	pH	Li ⁺ (mg/L)	Na ⁺ (mg/L)	Cl ⁻ (mg/L)	SO ₄ ²⁻ (mg/L)	HCO ₃ ⁻ (mg/L)	As (mg/L)	Type of this study
Ninotaira	13	61.0	8.2	0.10	169	83.2	179	231	0.14	3
Ninotaira	14	50.8	8.8	0.04	90.0	29.0	155	182	0.06	3
Ninotaira	15	48.3	8.2	0.06	113	40.5	157	186	0.05	3
Ninotaira	16	85.7	9.1	0.01	71.5	5.48	38.0	161	0.02	4
Ninotaira	17	66.4	8.5	0.18	211	169	149	230	0.23	5
Ninotaira	18	51.6	8.8	0.01	87.1	54.1	50.6	113	0.05	5
Ninotaira	19	54.0	8.5	0.07	148	119	173	200	0.09	5
Kowakidani	1	91.4	8.4	0.94	695	1130	104	49.1	0.95	1
Kowakidani	2	98.2	8.7	1.10	787	1200	100	51.5	1.10	1
Kowakidani	3	92.6	8.4	0.98	735	1190	100	89.4	0.95	1
Kowakidani	4	93.1	8.1	1.31	988	1660	104	45.3	1.23	1
Kowakidani	5	48.5	8.0	0.38	295	485	47.9	152	0.39	2
Kowakidani	6	76.5	8.2	0.61	483	679	74.2	106	0.64	2
Kowakidani	7	89.3	8.2	0.73	524	901	79.8	83.2	0.69	2
Kowakidani	8	24.7	7.0	0.00	13.7	3.94	106	54.0	0.00	3
Kowakidani	9	45.8	7.9	0.00	30.8	5.50	46.0	259	0.01	4
Kowakidani	10	60.3	8.7	0.07	182	109	139	272	0.05	4
Kowakidani	11	39.8	8.2	0.04	115	66.3	78.5	200	0.06	4
Kowakidani	12	21.1	7.8	0.00	12.4	3.67	20.2	105	0.00	4
Kowakidani	13	39.8	8.6	0.02	84.9	37.7	50.0	177	0.04	4
Kowakidani	14	64.3	8.8	0.03	83.9	49.0	49.7	158	0.21	4
Kowakidani	15	55.5	8.0	0.03	138	44.8	56.0	252	0.03	4
Kowakidani	16	64.0	8.8	0.14	301	255	168	268	0.21	5
Kowakidani	17	49.5	8.4	0.06	182	134	136	237	0.08	5
Kowakidani	18	24.6	7.3	0.00	41.7	83.1	52.9	72.2	0.00	5
Kowakidani	19	72.1	8.7	0.13	483	593	174	112	0.21	6
Kowakidani	20	78.4	8.9	0.15	515	612	186	124	0.27	6
Kowakidani	21	89.4	9.0	0.46	408	578	99.1	75.9	0.46	6
Miyagino	1	33.1	8.5	0.00	73.7	2.01	3.24	195	0.03	4
Miyagino	2	83.7	8.2	0.11	406	566	226	27.0	0.63	6
Gora	1	95.2	8.0	1.46	1290	2340	113	35.5	2.07	1
Gora	2	91.4	8.1	1.33	1330	2260	142	36.7	2.06	1
Gora	3	90.1	8.1	1.38	1380	2140	297	69.8	1.68	1
Gora	4	90.6	8.0	1.29	1080	1760	112	39.2	1.94	1
Gora	5	92.1	8.7	1.03	1230	1880	399	125	1.14	1
Gora	6	92.6	8.6	0.81	1050	1490	312	61.3	1.40	1
Gora	7	68.7	8.7	0.12	203	43.4	251	264	0.07	3
Gora	8	51.7	8.0	0.02	83.5	32.9	555	187	0.00	3
Gora	9	36.1	8.1	0.02	85.0	58.1	118	132	0.04	3
Gora	10	58.0	7.8	0.02	94.3	12.1	519	262	0.00	3
Gora	11	34.2	8.1	0.00	50.0	4.62	169	133	0.01	3
Gora	12	55.2	8.6	0.07	120	39.4	81.0	161	0.13	4
Gora	13	48.7	8.8	0.01	116	39.4	45.8	194	0.18	4
Gora	14	33.1	8.2	0.01	17.3	4.39	4.37	61.2	0.04	4
Gora	15	38.1	8.2	0.01	14.3	3.24	3.14	61.2	0.02	4
Gora	16	69.8	8.6	0.15	386	317	350	245	0.25	5
Gora	17	35.4	7.8	0.08	212	254	304	281	0.36	5
Gora	18	67.1	7.7	0.16	308	215	395	277	0.23	5
Gora	19	57.7	8.3	0.15	321	391	156	291	0.29	5
Gora	20	49.1	8.3	0.09	206	253	203	208	0.12	5
Gora	21	61.7	7.2	0.15	332	366	158	243	0.27	5
Gora	22	65.0	7.5	0.19	425	454	218	331	0.31	5
Gora	23	64.9	8.7	0.16	282	353	183	198	0.19	5
Gora	24	61.5	8.1	0.35	581	907	73.7	57.6	1.00	6
Gora	25	73.5	8.3	0.67	676	1050	309	104	0.59	6
Gora	26	82.1	8.2	0.44	616	904	398	104	0.47	6
Gora	27	77.7	8.1	0.20	566	827	228	97.9	0.32	6
Gora	28	61.2	8.9	0.06	321	402	249	60.0	0.01	6

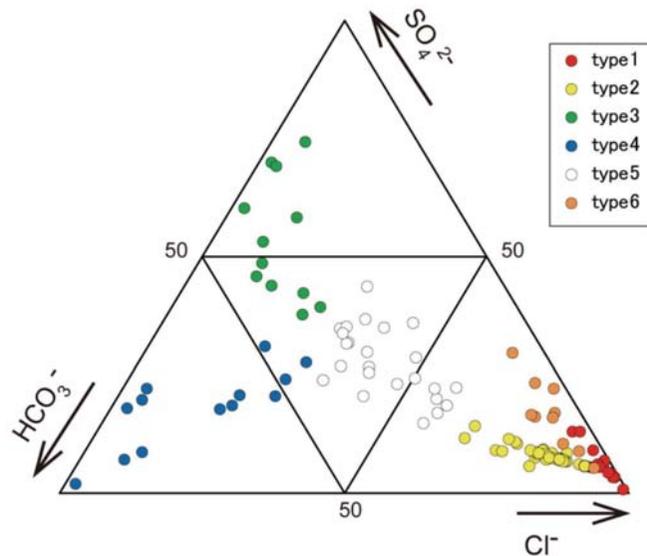


Fig. 2 Ternary diagram for main anions in hot spring waters welling out in the Gora buried caldera structure.

図 2 強羅潜在カルデラ内に湧出する温泉の陰イオン三角ダイアグラム。

以下にタイプ分けにあたって採用した分類基準を示す。

タイプ 1: Cl^- 濃度 1,000 mg/L 以上かつ泉温 85°C 以上

タイプ 2: Cl^- の比率が 60% 以上かつ $\text{SO}_4^{2-}/\text{HCO}_3^-$ が 1.5 未満

タイプ 3: Cl^- の比率が 30% 未満かつ SO_4^{2-} の比率が 35% 以上

タイプ 4: Cl^- の比率が 30% 未満かつ SO_4^{2-} の比率が 35% 未満

タイプ 5: Cl^- の比率が 30% 以上 60% 未満

タイプ 6: Cl^- の比率が 60% 以上かつ $\text{SO}_4^{2-}/\text{HCO}_3^-$ が 1.5 以上

タイプ 1 はその定義から、高濃度の Cl^- を含有する高温の温泉で、大木・平野モデルにおける第Ⅲ帯の温泉がほぼこれに対応する。 Cl^- 濃度が 1,000 mg/L 以上と高いのに対して、他のタイプに比べ HCO_3^- 濃度が低く、多くが 50 mg/L 以下となっている。タイプ 2 の温泉の特徴は、Fig. 3 に見るように、 Cl^- 濃度と SO_4^{2-} 濃度間に正の相関が見られることと、 HCO_3^- 濃度の幅が他のタイプと比較して狭く、 Cl^- 濃度や SO_4^{2-} 濃度によらずほぼ 100 mg/L の値を持つことである。また、 Cl^- 濃度と温度の間に正の相関関係も見られる (Fig. 4)。タイプ 1 については、そうした温度と Cl^- 濃度との間の相関関係は見られない。

タイプ 3 と 4 は、他のタイプよりも Cl^- 濃度が非常に低いことで特徴づけられる (Fig. 4)。これら 2 つのタイプを分ける違いは、前者では相対的に SO_4^{2-} が多く含まれ、後者では HCO_3^- が多く含まれることである (Fig. 2)。タイプ 5 は三角ダイアグラムにおいて、タイプ 1 および 2 とタイプ 3 および 4 の中間部にあり、特にタイプ 2 の延長上にくる。Fig. 4 に見るように、タイプ 2 ほどではないがタイプ 3 および 4 と比べると Cl^- 濃度が高く、そして Cl^- 濃度と温度との間に弱い比例関係が認められる。なお、タイプ 3, 4, 5 のうち、特にタイプ 3 と 5 で、相関係数はそれほど大きくないものの、 SO_4^{2-} 濃度が高くなると HCO_3^- 濃度も高くなるという傾向が見られる。

タイプ 6 は Fig. 2 でタイプ 1 の温泉の分布の延長もしくはタイプ 1 と 2 の中間にプロットされ

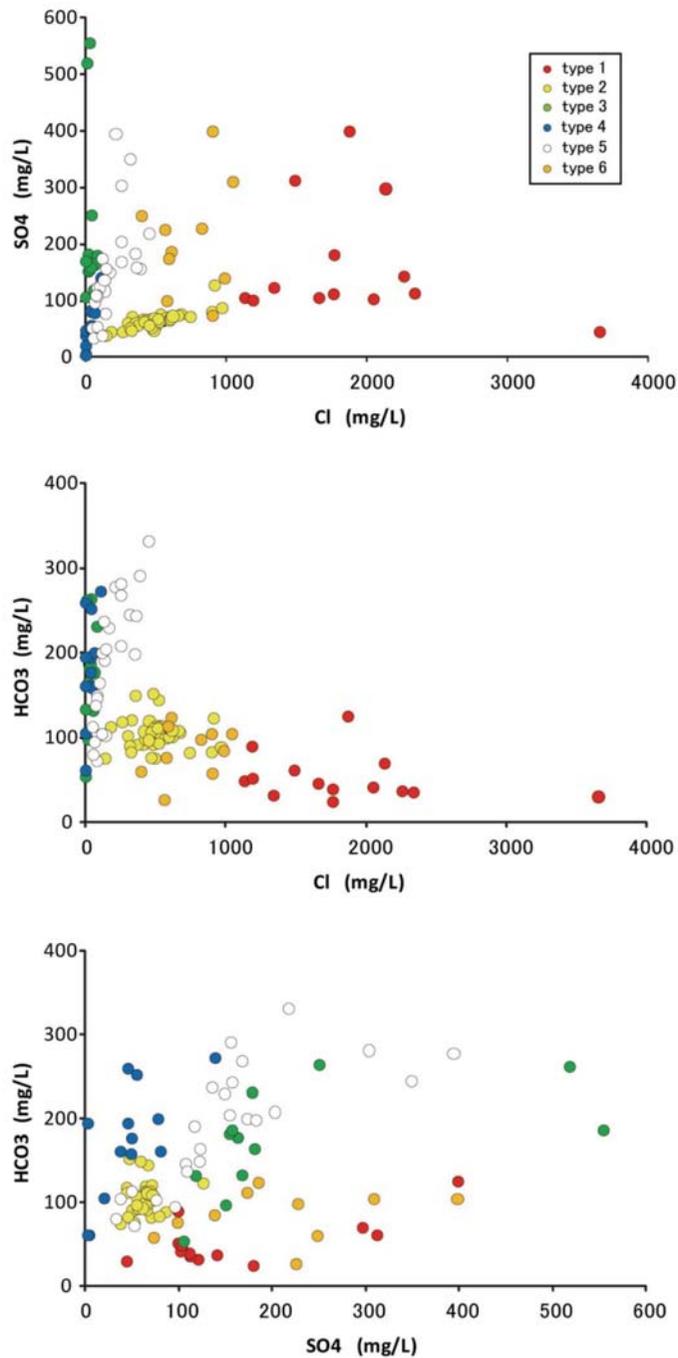
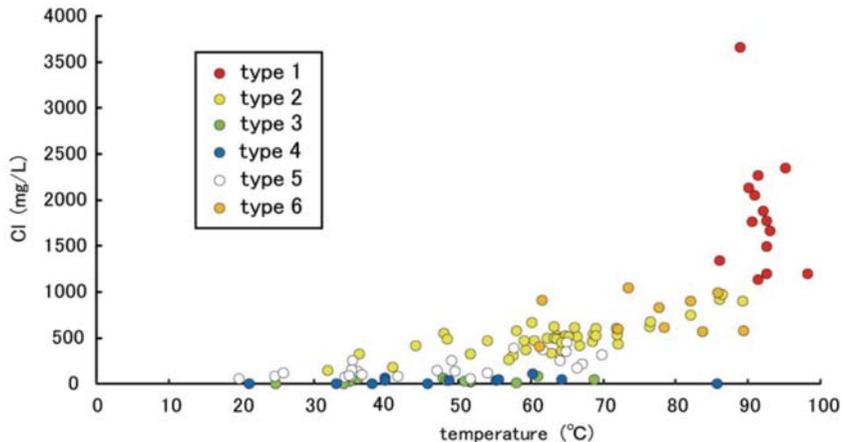


Fig. 3 Top panel : Relationship between concentrations of SO_4^{2-} and Cl^- .
 Middle panel : Relationship between concentrations of HCO_3^- and Cl^- .
 Bottom panel : Relationship between concentrations of HCO_3^- and SO_4^{2-} .

図 3 (上) SO_4^{2-} 濃度と Cl^- 濃度の関係, (中) HCO_3^- 濃度と Cl^- 濃度の関係,
 (下) HCO_3^- 濃度と SO_4^{2-} 濃度の関係.

Fig. 4 Relationship between concentration of Cl^- and temperature.図 4 Cl^- 濃度と温度の関係.

ている。上述のように、三角ダイアグラムではタイプ6と、タイプ1および2との境目の判別は明瞭ではないが、タイプ2と比べると Cl^- や HCO_3^- に対する SO_4^{2-} の比率が高いという特徴を持つことで区別される (Fig. 3)。また、タイプ1とは、 Cl^- 濃度並びに泉温の相違によって区別される。後述するように、陽イオン間の関係を見ると、タイプ1および2との区別は更に明瞭となる。

4. 陰イオンと陽イオンおよび陽イオン間の関係

本節では、陰イオン濃度と陽イオン濃度間、あるいは陽イオン濃度間の関係のいくつかについて述べる。ここでは、陰イオンの相対比で必ずしも判別が明瞭でなかったタイプ間に違いが存在することが見てとれるが、恐らく、そうした違いは、それらのタイプの間で成因が異なっていることを示していると考えられる。

Figure 5は、 Cl^- の化学当量に対してナトリウムイオン（以下 Na^+ と標記）の化学当量をプロットしたものである。各タイプとも両者は良く相関しているように見えるが、拡大図を見ると、タイプ3, 4, 5を表す点が1:1の関係を表す直線よりも上側にプロットされている。これは Cl^- に対して Na^+ の当量が過剰であることを示している。タイプ3, 4, 5については、横軸に Cl^- の化学当量でなく Cl^- と HCO_3^- の化学当量の和をとったときに、縦軸の Na^+ の化学当量と1:1の関係を示すことから (Fig. 6), Na^+ に対する Cl^- の不足分は HCO_3^- が補っていると推定される。一方、Fig. 6において、タイプ1, 2については、予想されるように、 Na^+ の化学当量は Cl^- と HCO_3^- の化学当量の和に足りない。こうした事実は、タイプ1, 2とタイプ3, 4, 5では、温泉の起源が異なることを示していると考えられる。

タイプ2とタイプ6の違いは、Fig. 7に示すように、リチウムイオン（以下 Li^+ と標記）濃度と Na^+ 濃度の関係を見ると明瞭である。 Li^+ は火山性の高温食塩泉で高濃度であることが知られており、イオンポテンシャルはアルカリ金属の中で最も高く、岩石からの溶解も温度依存性が高い。タイプ2では Li^+ 濃度と Na^+ 濃度の間に明らかに正の相関関係が認められるのに対し、タイプ6でははっきりせず、同じ Na^+ 濃度に対して Li^+ 濃度は低い。タイプ3, 4, 5もタイプ2に比べると Li^+ 濃度は低いが、 Na^+ 濃度との間に弱い正の相関関係が存在するように見える。ただし、その回帰係

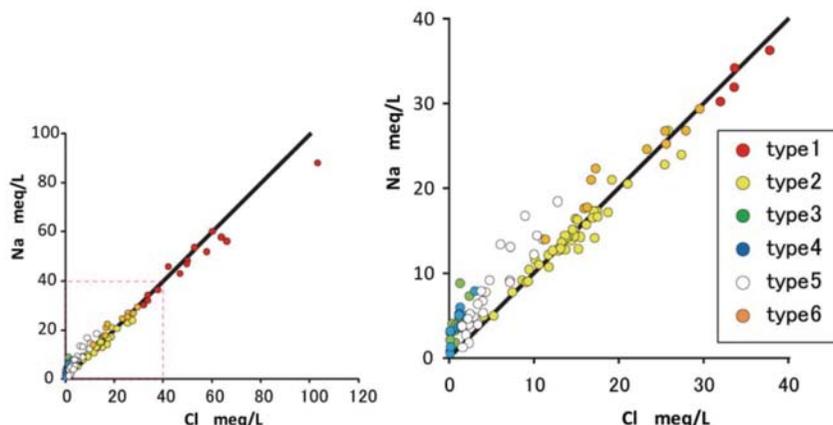


Fig. 5 Plots of chemical equivalent of Na^+ against that of Cl^- . Right panel is a magnification of the part of the left panel enclosed by dotted lines.

図 5 Cl^- の化学当量に対する Na^+ の化学当量. 右図は、左図の点線で囲った部分の拡大図.

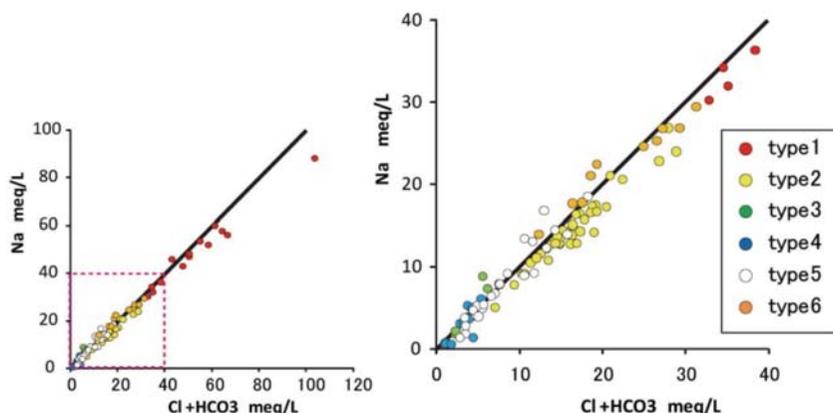


Fig. 6 Plots of chemical equivalent of Na^+ against summation of those of Cl^- and HCO_3^- . Right panel is a magnification of the part of the left panel enclosed by dotted lines.

図 6 Cl^- と HCO_3^- の化学当量の和に対する Na^+ の化学当量. 右図は、左図の点線で囲った部分の拡大図.

数はタイプ 2 に比べると小さく、 Li^+ 濃度は相対的に低い。

火山活動と関係の深いヒ素（以下 As と標記）について、陰イオンとの関係を見ると、As 濃度と HCO_3^- 濃度との関係では、タイプ 1, 2, 6 とタイプ 3, 4, 5 の違いがはっきり見られる (Fig. 8)。後者のタイプでは As 濃度が全体的に低く、かつ As 濃度が HCO_3^- 濃度とともに増える傾向が認められるのに対し、前者のタイプではそうした特徴が認められない一方、タイプ 1 と 2 を合わせると、As 濃度と HCO_3^- 濃度の間に逆比例の関係があるように見える。As 濃度と SO_4^{2-} 濃度の関係では、タイプ 1, 2 とタイプ 3, 4, 5 とともに、明瞭ではないものの正の相関が認められるが、回帰係数が両者で異なる (Fig. 9)。また、タイプ 1 と比較して、タイプ 6 の As 濃度は低い。

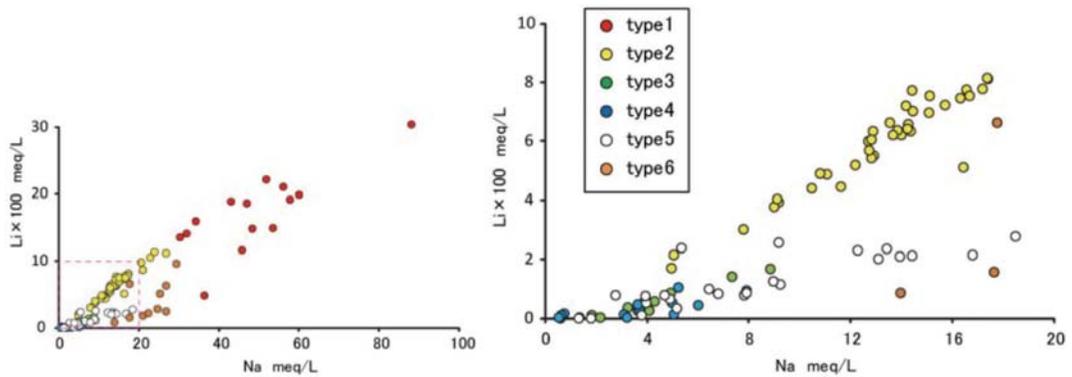


Fig. 7 Relationship between concentrations of Li^+ and Na^+ . Right panel is a magnification of the part of the left panel enclosed by dotted lines.

図 7 Na^+ 濃度と Li^+ 濃度の関係. 右図は, 左図の点線で囲った部分の拡大図.

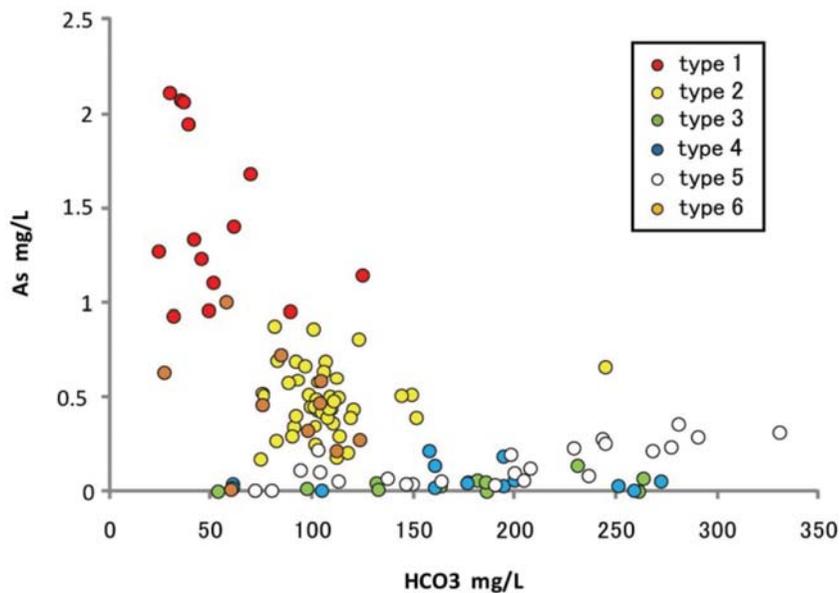


Fig. 8 Relationship between concentrations of As and HCO_3^- .

図 8 As 濃度と HCO_3^- 濃度の関係.

5. 地域分布

各タイプの温泉の地域分布を Fig. 10 に示す. タイプ 1 は西北西-東南東のゾーンに分布していて, これは大木・平野モデルにおける第Ⅲ帯の温泉の分布とよく対応する. しかし, 最も高温で Cl^- 濃度の高い源泉はゾーンの中央部にあり, このゾーンの走向に沿って, 例えば西から東にマグマからの熱水が地下水の希釈を受けながら流下しているという解釈とは合わない. 本論の結果は, 同ゾーンの高温塩化物泉の分布が地下水の流動とは関係ないとした町田ら (2007) の考えと整合的と言える.

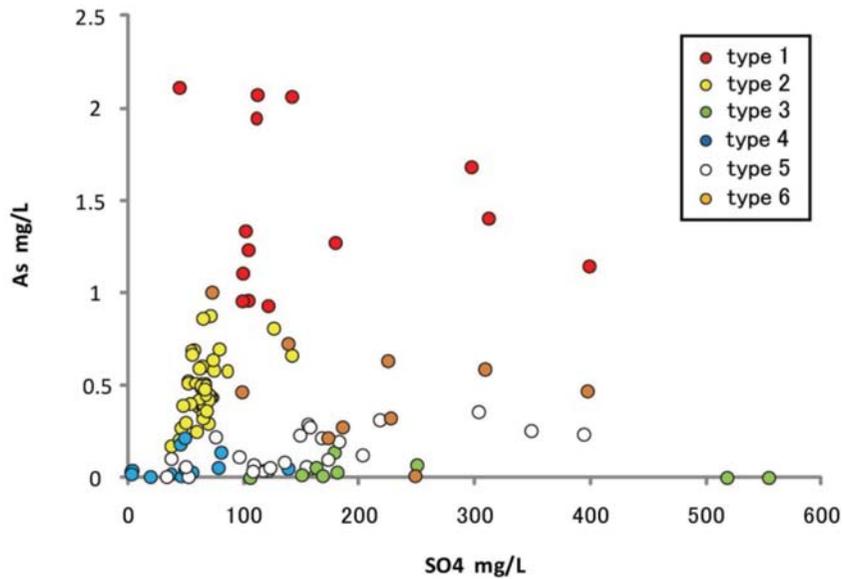


Fig. 9 Relationship between concentrations of As and SO_4^{2-} .

図 9 As 濃度と SO_4^{2-} 濃度の関係.

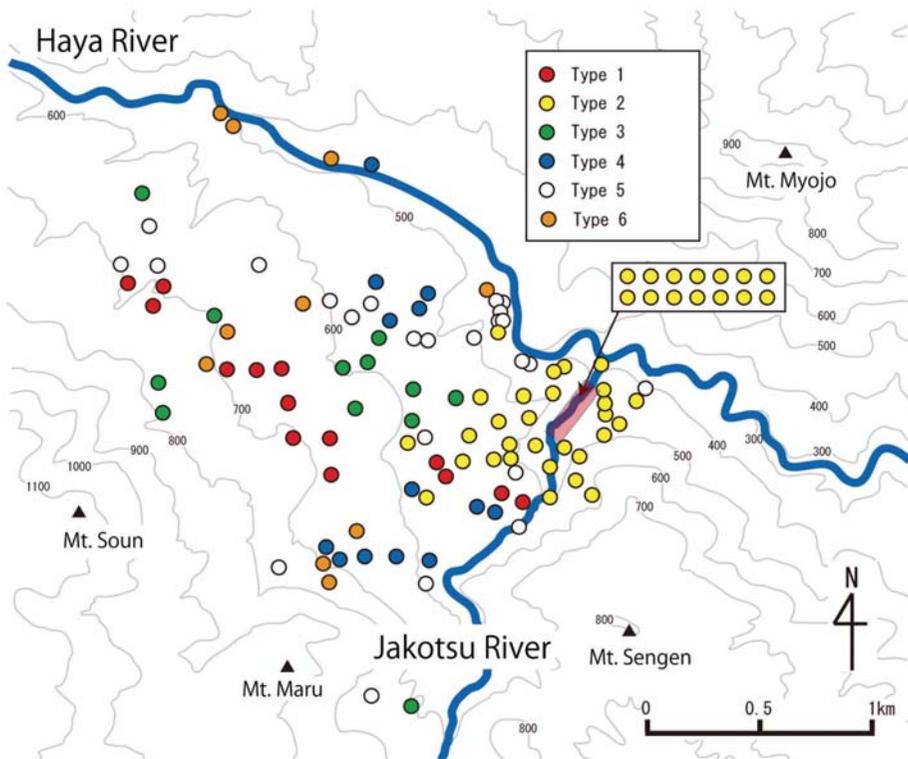


Fig. 10 Spatial distribution of each Type of hot springs in the Gora buried caldera structure.

図 10 強羅潜在カルデラ内における各タイプの温泉の地域分布.

タイプ2は蛇骨川流域に分布し、南西側に位置する上流域の温泉ほど高温でCl⁻濃度も高い傾向が見られる。いろいろなイオン濃度間の比例関係や $\delta^{18}\text{O}$ とイオン濃度の相関等(板寺ら, 2011)から見て、タイプ1のゾーンの南東端に湧出する塩化物泉が地下水によって希釈を受けてタイプ2の温泉群をつくっていると推定される。

タイプ3, 4, 5, 6は、それらの空間的分布に関して相互に明確な違いは見られないが、タイプ3は調査範囲の中央部のほかに西部でも見られるのに対し、タイプ4は中央部の北と南にタイプ3と5を挟むように分布し、タイプ5はほぼタイプ1のゾーンと平行にその北側に西北西-東南東方向に並ぶとともに、タイプ2の南西側にも分布する。タイプ6は強羅潜在カルデラ域の比較的外縁部に分布するが、蛇骨川流域にはない。

6. 考 察

箱根温泉の成因に関する良く知られた大木・平野モデルにおいては、泉質のみでなく、基盤の構造や地温、中央火口丘直下の群発地震を含めた様々な地学的知見が総合的に考察され、カルデラ内全域の温泉がゾーン分けされた。本論文は、強羅潜在カルデラを対象として、そこに湧出する温泉について、大木・平野モデル提唱後に掘削された源泉のデータや、最近、新たに解明された事実を考慮して、新しい分類の提案を行ったものである。分類にあたって基準としたのは、陰イオンの濃度比とCl⁻濃度それに泉温のみであるが、陰イオン濃度と陽イオン濃度、陽イオン濃度間の種々の関係がタイプ間で異なっていることや、各タイプの温泉の地域分布にそれぞれ特徴が見られること等から、タイプの違いは、温泉の成因の違いを反映していると考えられる。調査対象地域は限られるとは言え、そこには大木・平野モデルにおいて第I帯とされた中央火口丘近辺でのみ見られる温泉を除いたすべての種類の温泉が湧出しており、本論文による新しい分類は、箱根火山の温泉生成システムを明らかにする上で新たな視点を提供するものとする。

大木・平野モデルでは、第IVa帯の温泉は第III帯の高温塩化物泉が神山の傾斜面を西から東へ流動しながら雨水等の混合希釈により生成したものと考えられた。これらの第IVa帯に分類された温泉については、温度の高い源泉ほどCl⁻濃度が高いという傾向が見られたこと、また、1960年代後半に観測された異常昇温現象で、高温域が次第に東に拡大していったように見えたことも、そうした考え方を支持する根拠とされた。しかし、町田ら(2007)は、地下水頭位データの詳細な検討の結果、西北西-東南東のゾーンに沿う地下水の流れはありそうにないことを示し、板寺ら(2010)は、1960年代後半に見られた異常昇温現象では、第III帯の高温塩化物泉が分布する西北西-東南東のゾーンの東端部の蛇骨川沿いの温泉で最も早い時期に温度の上昇が生じたことを明らかにした。前節で述べたように、最も高温でCl⁻濃度の高い温泉がタイプ1の分布域の中央に湧出することも、マグマ起源の塩化物泉が西から東へ希釈を受けながら流れているという見方とは合わない。

タイプ2は大木・平野モデルで第IVa帯に分類された温泉にあたるが、様々なイオン濃度間や、Cl⁻濃度と温度との間の相関関係から見て、蛇骨川上流域に湧出するタイプ1の源泉に地下水が混入して生成している希釈系であると考えられる。この見方は、大木・平野モデルと似ているが、陰イオン間の相関関係や酸素同位体比とCl⁻濃度との相関関係(板寺ら, 2011)に、タイプ1と2とで違いが見られることから、タイプ1の希釈系とタイプ2の希釈系とは異なっていると推定される。我々は、タイプ3あるいはタイプ4の温泉水に熱水が混入することによってタイプ1の温泉水が生成し、タイプ1の希釈系とは異なる蛇骨川流域に存在する地下水がタイプ1と混合することによってタイプ2が生成していると考えている。1960年代後半の泉温の異常上昇とその後の変化傾向にタイプ1と2で違いが見られたことも(板寺ら, 2010)、そうした見方を支持する。大木・平

野モデルでは、第Ⅲ帯の高温塩化物泉の成因はマグマからの熱水の地下帯水層への混入によるとされ、更にそれが西から東へ向かって流動する浅層地下水で薄められて第Ⅳa帯の温泉がつけられていると想定されており、両者の希釈系の違いが明確に認識されていない。なお、蛇骨川付近は強羅潜在カルデラ（萬年，2008）の東端にあたっており、そのことが、蛇骨湧泉群をはじめとする豊富な地下水の湧水がそこで見られることと関係している可能性も考えられる。

タイプ3, 4, 5は大木・平野モデルにおいて第Ⅱ帯と第Ⅳa帯に分類された温泉に相当する。Oki and Hirano (1970)では、第Ⅱ帯の温泉水中の HCO_3^- は有機物起源とされたが、タイプ3や5では SO_4^{2-} 濃度と HCO_3^- 濃度との間に弱い相関関係が見られることなどから、それらに含まれる HCO_3^- が火山ガス中の二酸化炭素に由来する可能性も否定できない。タイプ3中に高い割合で含有される SO_4^{2-} は、大木・平野モデルにおける第Ⅰ帯の温泉と同じように、火山ガスにその起源を持つと見てよいだろう。酸素同位対比と SO_4^{2-} 濃度との間に有意な相関関係が認められることも（板寺ら，2011）そうした推定を支持する。また、タイプ5は Cl^- を含むとともに、その Cl^- 濃度と温度との間に相関関係が見られることから（Fig. 4）、タイプ1の温泉水がタイプ3あるいは4の温泉水に混入してつけられていることが示唆される。三角ダイアグラムでタイプ2の延長域にプロットされることもそう考えるとよく理解できる。なお、本論文では、陰イオン濃度の相対比から、タイプ3, 4, 5に分けたが、 Na^+ 濃度と（ Cl^- 濃度+ HCO_3^- 濃度）との関係等から、成因論的には、タイプ3, 4, 5は、火山性熱水に由来しない地下水が主体となっているという意味で、本質的には変わらないと考えられる。

タイプ6は、本論文では触れなかったが、箱根火山の基盤岩中から湧出している大平台温泉や箱根湯本温泉などの温泉とよく似ている。恐らく、箱根火山直下のマグマからの熱水や火山性ガスとは直接関係しない基盤岩中の温泉を表していると思われる。ただし、本論ではタイプ6に組み入れた温泉の中にタイプ1とすべきものが入っている可能性はある。

7. ま と め

1. 強羅潜在カルデラの温泉について、アニオンの特徴などから6つのタイプに分類した。
2. タイプ1, 2では Na^+ と Cl^- 並びに Na^+ と Li^+ に明確な正の相関が認められるのに対して、タイプ3, 4, 5, 6では相関がやや弱いことに加えて、 Na^+ と Li^+ の回帰係数も有意に小さく、両グループは成因を異にすると考えられる。
3. タイプ3, 4, 5では Na^+ の当量に対して Cl^- の当量が不足するが、その分は HCO_3^- が補っている。一方、タイプ1, 2では、 Na^+ の化学当量は Cl^- の化学当量に等しい。この事実も、タイプ1, 2とタイプ3, 4, 5で、温泉の起源が異なることを示していると考えられる。
4. タイプ3, 4, 5ではAs濃度が高く、またAs濃度と HCO_3^- 濃度の間に正の相関が認められる。一方、タイプ1と2を合わせると、As濃度と HCO_3^- 濃度の間に負の相関が認められる。タイプ1, 2とタイプ3, 4, 5は、As濃度と SO_4^{2-} 濃度の間の関係でも、ともに正の相関が認められるものの、それらの回帰係数に顕著な相違がある。
5. タイプ1は西北西-東南東のゾーンに分布し、これは大木・平野モデルにおける第Ⅲ帯の温泉の分布に対応するが、 Cl^- 濃度や温度に関して、ゾーンの走向に沿っての特定の傾向は認められない。
6. タイプ2の分布は蛇骨川に沿っており、タイプ1のゾーン南東端に湧出する高温塩化物泉と地下水との間の連続的な希釈関係を示していると推定される。
7. 1960年代後半に生じた異常昇温現象ではタイプ1と2に属する温泉で温度変化の経過が異

なっていたことや, 両タイプでイオン濃度間の相関関係に違いが見られることから, タイプ1と2ではそれらの温泉を形成する希釈系が異なっていると考えられる.

8. タイプ3, 4は相対的に Cl^- 濃度が低いことで特徴づけられる. タイプ5には, タイプ2ほどではないが, Cl^- が存在する.
9. タイプ6は, 箱根の火山活動とは直接関係しない, 基盤岩中の温泉を表している可能性が高いと考えられる.

謝 辞

源泉所有者の方には, 源泉における採水, 調査について, 快く許可いただいた. 小田原保健福祉事務所温泉課の方には, 実態調査に同行させていただき, 採水等にご協力をいただいた. また, 2名の匿名査読者の方には大変丁寧なご指摘をいただいた. ここに記して感謝いたします.

引用文献

- 板寺一洋, 菊川城司, 吉田明夫 (2010): 1960年代に箱根の温泉で観測された温度上昇. 日本地球惑星科学連合2010年大会要旨, SVC061-10.
- 板寺一洋, 菊川城司, 吉田明夫 (2011): 酸素同位体比から見た強羅温泉の成因. 温泉科学 (投稿中).
- 環境省自然環境局 (2002): 鉱泉分析法指針 (改訂)
- 菊川城司 (2002): 箱根火山における温泉の温度・湧出量・水位の観測結果 1990 (平成2)~2002 (平成14)年. 神奈川県温泉地学研究所報告, 35, 79-90.
- 菊川城司, 板寺一洋, 吉田明夫 (2011): 箱根及び湯河原火山の基盤岩中に湧出する温泉, 日本地球惑星科学連合2011年大会.
- 町田 功, 板寺一洋, 萬年一剛 (2006): 箱根カルデラ内流域の地下水流動系—温泉資源量の解明を目指して—. 地質ニュース, 627, 42-47.
- 町田 功, 板寺一洋, 萬年一剛 (2007): 箱根強羅地区における高温 NaCl 泉の供給源地. 地下水学会誌, 49 (4), 327-339.
- 萬年一剛 (2008): 箱根カルデラ—地質構造・成因・現在の火山活動における役割—. 神奈川県立博物館調査研究報告, 13, 61-76.
- Oki, Y. and Hirano, T. (1970): The geothermal system of Hakone Volcano, Geothermics-Special Issue 2, U.N. Symposium on the Development and Utilization of Geothermal Resources, Pisa, Vol. 2, Part 2, 1157-1166.
- Oki, Y. and Hirano, T. (1974): Hydrothermal system and seismic activity of Hakone Volcano, The Utilization of Volcanic Energy, Proceedings of a United States-Japan Cooperative Science Seminar at Hilo, Hawaii, 1974, 13-40.

(2010年9月14日, 日本温泉科学会第63回大会で発表)