

湯河原温泉の温泉沈積物

粟屋 徹, 平野富雄, 鈴木孝雄

神奈川県温泉研究所*

Calcium Carbonate Deposit of Yugawara Hot Spring

by

Tōru AWAYA, Tomio HIRANO and Takao SUZUKI

Hot Spring Research Institute of Kanagawa Prefecture

Hakone, Kanagawa

(Abstract)

Most thermal waters of Yugawara Hot Spring make precipitation of calcium carbonate.

P_{CO_2} and pH of thermal waters in deep are theoretically calculated and the results are as follows.

P_{CO_2} is 0.5—1.0 ($10^{-0.34}$ — $10^{0.01}$) atm and pH is 6.2—6.4 for the thermal waters with much precipitation of calcium carbonate, whereas P_{CO_2} is 0.003—0.01 ($10^{-2.46}$ — $10^{-1.99}$) atm and pH is 6.9—7.7 for the thermal waters with no precipitation of calcium carbonate.

As thermal waters are discharged by air lift pump, P_{CO_2} decrease down to 0.0003 ($10^{-3.5}$) atm (equilibrium to atmospheric air) and pH of the waters increase up to 7.7—8.4.

Precipitation of calcium carbonate is performed by decreasing of P_{CO_2} and increasing of pH.

*神奈川県箱根町湯本997 〒250-03

神奈川県温泉研究所報告 第5巻, 第2号, 67—80, 1974

はしがき

湯河原温泉の大部分の源泉はエアリフトポンプにより揚湯されているが、揚湯管やエア管に温泉沈積物（以下スケールという）が付着し、支障をきたしている。スケールの主成分は炭酸カルシウム（ CaCO_3 ）である。湯河原温泉ではスケールの付着は高温泉ほど著しく、全源泉の過半数がスケールの除去を必要としている。この報告は湯河原温泉の温泉成分と揚湯管やエア管のスケール状況を調査し、その成因について考察を加えたものである。

謝 辞

小田原保健所岩田義徳課長、浜野功係長、中原保彦氏、杉山茂夫氏、久保寺公正氏からは当地域の温泉の貴重な資料の

提供を受けた。湯河原町役場榎本訓夫課長、飛田集係長、菅沼盛義氏ならびに各源泉掃除請負業者の方々にはスケールの採取に便宜を計って頂いた。神奈川県温泉研究所大木靖衛所長、平賀士郎科長には終始有益な助言を頂いた。小鷹滋郎主任研究員、広田茂氏、大山正雄氏、伊東博氏、小梶藤幸氏には現地調査に御協力頂いた。以上の方々に厚く御礼申し上げる。なお、この調査は神奈川県衛生部の温泉等研究調査費によって行なわれた。

泉 質

湯河原温泉が自噴していた当時の温泉湧出状況を小林儀一郎（1914）は記載し、その頃でも温泉沈積物が析出していた事を記している。当地域の地質については久野（1952, 1972）の詳細な研究がある。湯河原温泉は湯ヶ島層群（主に暗緑色緻密な玄武岩乃至安山岩よりなる凝灰角礫岩）中の亀裂に沿って湧出している。亀裂には沸石、方解石や硬石膏などが白色細脈となって晶出している。大木ら（1963）はこの地域の温泉が Cl^- 型の温泉と SO_4^{2-} 型の温泉に分類でき、それらは亀裂帯に沿って湧出している事を示した（図2）。

図1は湯河原温泉の源泉位置を示す。この地域の総源泉数は144、休止源泉数は33、現在利用されている源泉数は111であり、半径1 kmの円周内に100以上の孔井が密集している。今回は99源泉を採取し

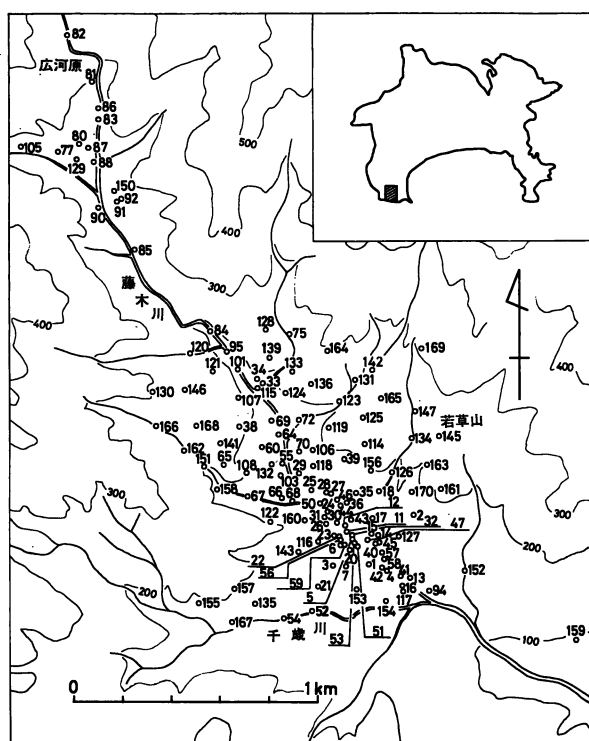


図1 源泉番号

分析した（表1）。

当温泉の泉質は弱食塩泉，石膏泉，含石膏弱食塩泉，単純温泉などに大別される。源泉の多くは電動機7.5～11kw，平山式横型の空気圧縮器を使用して揚湯を行なっている。泉温は30～90℃と幅広く，揚湯量は最低2ℓ/min，最高245ℓ/minで平均値は61ℓ/minである。深さは平均300～400mであるが，近年掘削技術の向上とともに深くなり1,000mを越す源泉も見られるようになった。これは温泉水位の低下を誘発し，温泉源枯渇を招く一因になっている。

成分分析はなるべく当日行ない，pHは現地において比色法により測定した。カルシウム（Ca²⁺），マグネシウム（Mg²⁺）はEDTA滴定，原子吸光分析を併用して求めた。総炭酸（ $\Sigma\text{HCO}_3^- = \text{HCO}_3^- + \text{CO}_3^{2-} + \text{H}_2\text{CO}_3$ ）は中和滴定によって求めた。

図3に泉温分布図を，図4に蒸発残留物の分布図を描いた。図2の亀裂帯分布概念図と比較すると温泉活動の中心地に相当する地区は高温で蒸発残留物の多い地区によく一致している。

表1 湯河原温泉の化学組成

温泉台帳番号	採水日	泉温 (℃)	揚湯量 (ℓ/min)	深さ (m)	pH	(20℃にて) 比電導度 (μS/cm)	蒸発 残留物 (ppm)	Ca ²⁺ (ppm)	Mg ²⁺ (ppm)	ΣHCO ₃ ⁻ (ppm)	スケール 付着状況
6	47. 5.17	49.0	59	268	8.2	657.2	430	31.9	0.149	89.3	—
7	47. 4.25	58.0	49	364	8.4	1712	1172	98.3	0.253	77.4	—
11	47. 5.17	68.0	29	276	8.1	1549	1062	75.9	0.226	71.2	++
15	47. 4.24	33.9	11	273	8.2	445.6	281	19.8	0.100	79.9	—
17	47. 5.16	78.0	85	500	8.2	2240	1603	130.	0.266	64.3	++
18	47. 5. 1	66.8	40	395	8.2	1487	964	57.4	0.187	65.5	++
21	47. 4.19	42.0	22	455	7.7	804.1	663	149.	0.175	45.6	—
22	47. 5.17	87.6	84	363	8.0	2774	1996	156.	0.400	53.1	+++
23	47. 5.17	48.2	25	258	8.2	1018	675	53.8	0.180	82.4	—
25	47. 5.10	85.3	53	278		2496	1687	124.	0.295	48.1	+++
26	47. 5.10	76.5	39	360	8.2	1978	1300	82.2	0.195	54.9	+
28	47. 5.10	82.0	75	290	8.2	2625	1840	138.	0.323	56.2	+++
31	47. 5.10	86.5	94	346	8.2	2772	1986	154.	0.348	48.7	+++
32	47. 4.25	64.0	72	300	8.5	1439	953	69.3	0.146	83.6	—
33	47. 5.19	83.0	135	273	8.2	3388	2400	175.	0.615	56.8	+++
34	47. 5.19	84.0	102	354	8.2	3570	2523	184.	0.639	53.1	+++
35	47. 5.17	53.0	14	273	8.4	1220	787	43.3	1.74	81.8	+
36	47. 5.17	68.3	48	304	8.1	1854	1265	83.4	0.215	71.2	+
38	47. 5.24	66.0	53	364	8.2	2842	2009	173.	0.832	48.1	++
39	47. 5. 1	83.0	70	341	8.0	3262	2213	146.	0.434	48.1	+

温泉台 帳番号	採 水 日	泉温 (℃)	揚湯量 (ℓ/min)	深さ (m)	pH	(20℃にて) 比電導度 ($\mu\text{S}/\text{cm}$)	蒸 発 残留物 (ppm)	Ca ²⁺ (ppm)	Mg ²⁺ (ppm)	ΣHCO_3^- (ppm)	スケール 付着状況
41	47. 4.25	65.5	58	554	8.2	2152	1495	174.	0.137	63.7	—
43	47. 5.17	79.5	39	360	8.2	2447	1695	118.	0.341	55.6	+++
44	47. 5.17	60.0	40	270	8.2	1429	957	61.4	0.170	89.3	—
45	47. 4.25	70.0	53	300	8.3	1849	1262	102.	0.191	74.9	+
46	47. 5.17	50.2	14	270	8.2	1228	855	47.8	0.203	73.0	—
47	47. 4.25	59.6	50	250	8.4	1532	1036	73.6	0.158	81.1	—
51	47. 4.25	31.5	13	153	8.1	530.5	335	21.0	0.083	87.4	—
52	47. 4.19	45.5	39	388	8.0	1096	960	209.	0.241	42.4	—
53	47. 4.25	84.3	55	363	8.1	2884	2038	160.	0.363	46.8	+++
54	47. 4.19	49.0	43	377	7.5	1672	1728	423.	0.171	21.8	—
55	47. 5.23	56.5	28	273	8.2	1213	810	66.9	0.434	78.0	+
59	47. 5.17	72.0	62	252	8.3	2255	1590	135.	0.315	78.0	+
60	47. 5.24	81.7	177	309	8.3	2398	1695	131.	0.465	68.0	++
64	47. 5.24	83.0	73	364	8.2	2760	1974	147.	0.402	54.9	++
65	47. 4.24	48.5	14	364	8.2	1279	1015	183.	0.855	56.8	—
66	47. 4.24	78.0	55	500	8.4	2306	1624	130.	0.354	58.7	++
68	47. 5.23	58.2	62	495	8.4	599.5	385	31.5	0.170	78.0	—
69	47. 5.23	77.0	39	411	8.2	2988	2093	156.	0.337	45.6	++
70	47. 5.24	88.0	245	300	8.2	2809	1991	147.	0.348	55.6	+++
72	47. 4.28	65.6	37	303	8.2	2293	1602	136.	0.472	62.4	+
75	47. 4.28	79.9	70	700	8.2	4576	3102	223.	0.604	51.2	++
85	47. 4.21	84.0	31	273	8.3	5294	3630	277.	1.03	40.6	+++
86	47. 4.21	46.0	30	107	7.8	1415	1373	332.	1.74	25.0	+
87	47. 4.21	44.0	58	286	7.9	1254	970	298.	1.94	41.8	—
91	47. 4.21	76.5	35	353	8.2	4456	3263	350.	2.65	43.1	+
92	47. 4.21	53.8	24	300	8.0	1896	1834	432.	3.04	46.8	—
94	47. 4.25	58.0	61	600	8.1	—	2165	279.	0.27	44.3	—
95	47. 5.23	35.4	2	400	8.3	213.6	144	25.7	0.195	47.4	—
103	47. 5.24	82.3	48	291	8.2	2296	1604	114.	0.301	49.9	+
107	47. 5.24	74.5	92	364	8.1	3302	2377	190.	0.406	38.7	+
108	47. 4.24	48.0	25	364	8.3	1056	850	162.	0.56	51.8	—
114	47. 5. 1	78.0	38	360	8.2	4364	2921	189.	0.615	51.8	+++
115	47. 5.19	72.3	69	387	8.2	2543	1793	132.	0.440	73.0	+++
116	47. 4.28	56.5	32	400	8.3	652.3	408	32.0	0.103	70.5	—
117	47. 5.16	51.8	73	400	8.3	662.7	440	34.6	0.128	76.8	—
118	47. 5.10	73.0	40	292	8.4	1409	943	41.9	0.45	64.9	+
119	47. 4.28	69.0	89	379	8.1	2641	1798	130.	1.37	51.2	++
120	47. 5.23	87.4	107	300	8.2	4766	3329	231.	0.856	47.4	+++
121	47. 5.16	69.0	180	364	8.2	2992	2004	161.	1.04	49.9	+
122	47. 5.23	59.9	44	503	8.1	1657	1402	260.	0.458	51.8	—

温泉台 帳番号	採 水 日	泉温 (℃)	揚湯量 (ℓ/min)	深さ (m)	pH	(20℃にて) 比電導度 (μS/cm)	蒸 発 残 留 物 (ppm)	Ca ²⁺ (ppm)	Mg ²⁺ (ppm)	ΣHCO ₃ ⁻ (ppm)	スケール 付着状況
123	47. 4.28	54.0	28	399	8.2	2060	1466	162.	0.440	68.0	+
124	47. 5.19	68.5	89	375	8.3	3125	2165	146.	0.516	94.3	+
125	47. 4.28	88.0	124	487	8.1	4967	3362	212.	0.651	54.3	+++
126	47. 5. 1	58.5	53	380	8.4	1318	876	46.5	0.303	112.	+
127	47. 5. 1	52.5	68	400	8.4	569.2	379	18.6	0.062	104.	—
128	47. 5.19	86.2	101	600	8.1	4806	3289	212.	0.627	49.3	++
129	47. 4.21	30.1	111	241	7.6	838.3	729	175.	1.74	66.2	++
131	47. 5.10	64.0	25	412		4527	3102	251.	0.598	66.8	+++
132	47. 5.23	70.2	102	331	8.3	2116	1490	127.	1.43	71.8	++
133	47. 5.19	61.2	144	610	8.2	2849	2028	180.	0.862	46.8	++
134	47. 5.16	46.2	33	514	8.4	468.1	317	23.6	0.060	79.3	
135	47. 4.19	50.4	44	495	7.6	1522	1548	379.	0.175	25.0	—
136	47. 5.19	79.4	72	454	8.1	3385	2380	167.	0.393	51.2	++
139	47. 5.19	86.0	92	550	8.2	3495	2496	209.	0.479	45.6	++
141	47. 5.24	82.5	40	550	8.3	2833	2015	158.	0.328	44.3	++
143	47. 4.24	40.2	73	528	8.0	835.0	717	181.	0.451	48.1	
145	47. 5. 1	54.0	34	562	7.7	786.7	665	117.	0.027	33.1	—
146	47. 5.23	81.5	70	450	8.2	3294	2333	192.	0.544	39.9	++
147	47. 5.16	42.0	9	700	8.0	1589	1174	155.	0.083	40.6	—
150	47. 4.21	39.5	34	315	8.4	1612	1607	425.	1.96	67.4	
151	47. 5.10	86.8	127	500	8.4	2695	1866	142.	0.845	64.3	+++
152	47. 4.25	44.0	43	495	8.1	567.2	371	25.0	0.060	66.2	—
153	47. 4.19	63.0	44	550	8.1	2063	1495	149.	0.195	73.0	—
154	47. 4.19	39.7	115	400	7.7	531.4	332	30.5	0.078	84.3	—
155	47. 4.19	54.2	127	651	7.8	1923	2025	501.	0.210	27.5	—
156	47. 5. 1	83.0	81	458	8.1	4753	3141	210.	0.498	50.6	+++
157	47. 4.19	60.0	98	570	7.7		1710	436.	0.082	21.8	—
158	47. 4.24	48.0	57	556	8.0	2164	1819	328.	3.67	76.2	
159	47. 4.24	55.8	50	1080	7.7	1939	1765	336.	0.039	24.3	
160	47. 4.28	71.0	57	363	8.4	626.9	427	18.6	0.312	76.8	—
161	47. 5.31	47.2	73	540	8.4	350.0	225	5.50	0.023	87.4	—
162	47. 5.10	69.8	18	600	8.2	2842	1978	223.	0.425	39.3	—
163	47. 5. 1	49.2	41	455	8.2	327.0	232	16.9	0.049	71.2	
164	47. 4.28	77.5	79	650	8.1	4099	2825	218.	0.527	54.3	++
165	47. 4.28	52.7	60	650	8.2	1564	1077	174.	0.53	46.8	—
166	47. 4.24	74.2	30	550	8.2	2601	1829	171.	0.266	44.3	+
168	47. 5.24	82.0	64	600	8.3	2565	1815	131.	0.367	65.5	++
169	47. 4.28	46.4	12	786	7.8	773.1	595	85.3	0.034	32.5	
170	47. 5.31	59.3	51	556		1631	1049	66.5	1.14	127.	—

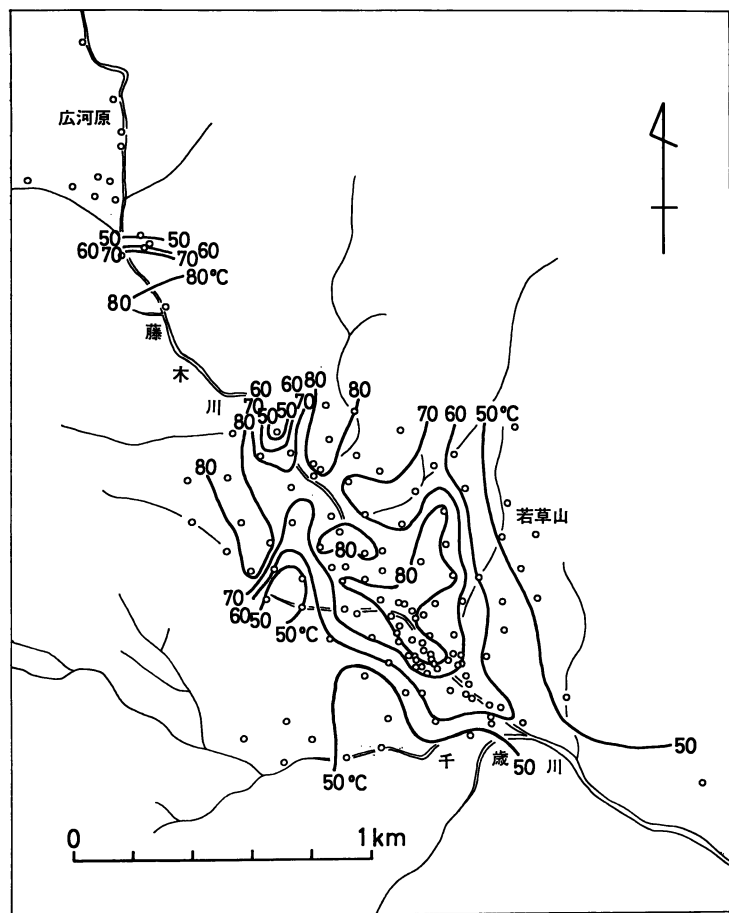


図3 泉温分布図

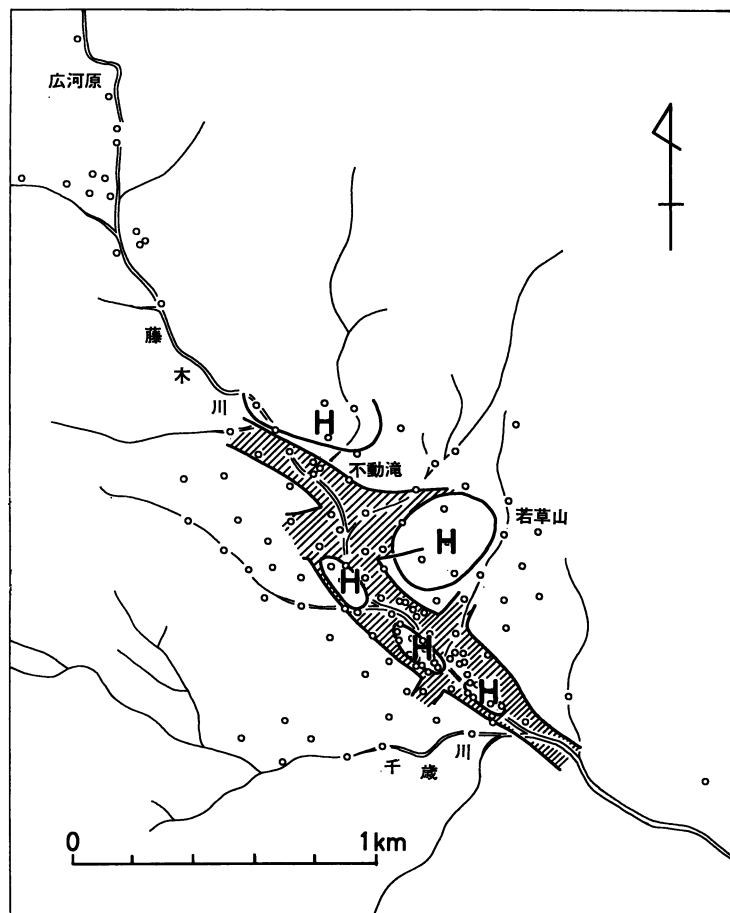


図2 亀裂帯分布概念図(大木ら1963)
斜線の部分が亀裂帯，H：温泉活動の中心地

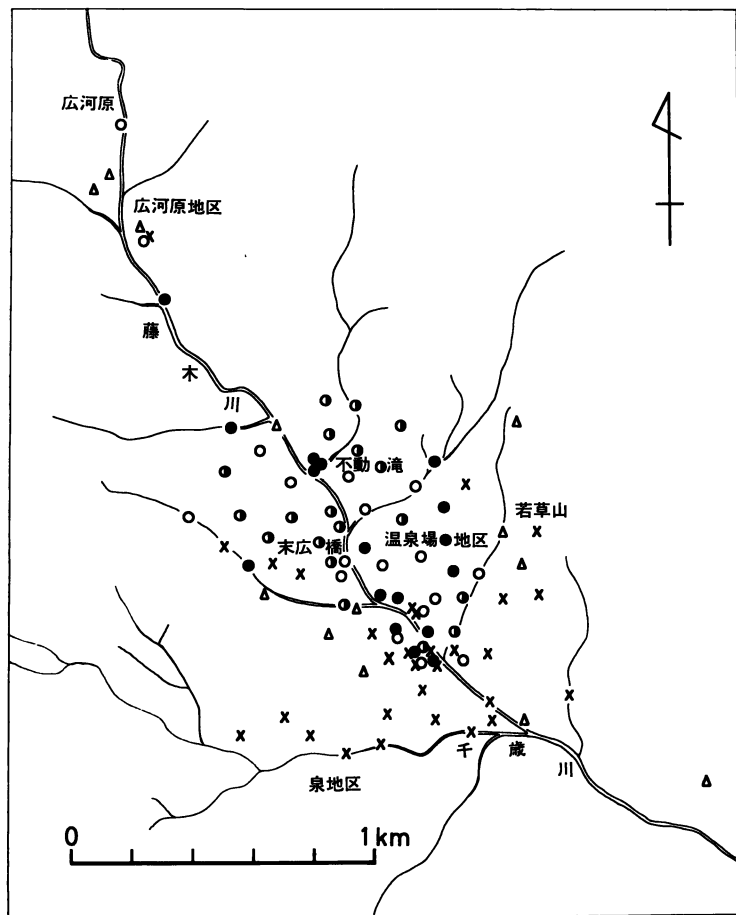


図5 スケール付着状況

● (++) スケール付着のかなり激しい源泉, ◐ (++) スケール付着の多い源泉, ○ (+) スケールがいくらか付着する源泉, × (-) スケールの付着しない源泉, △ 採水のみ

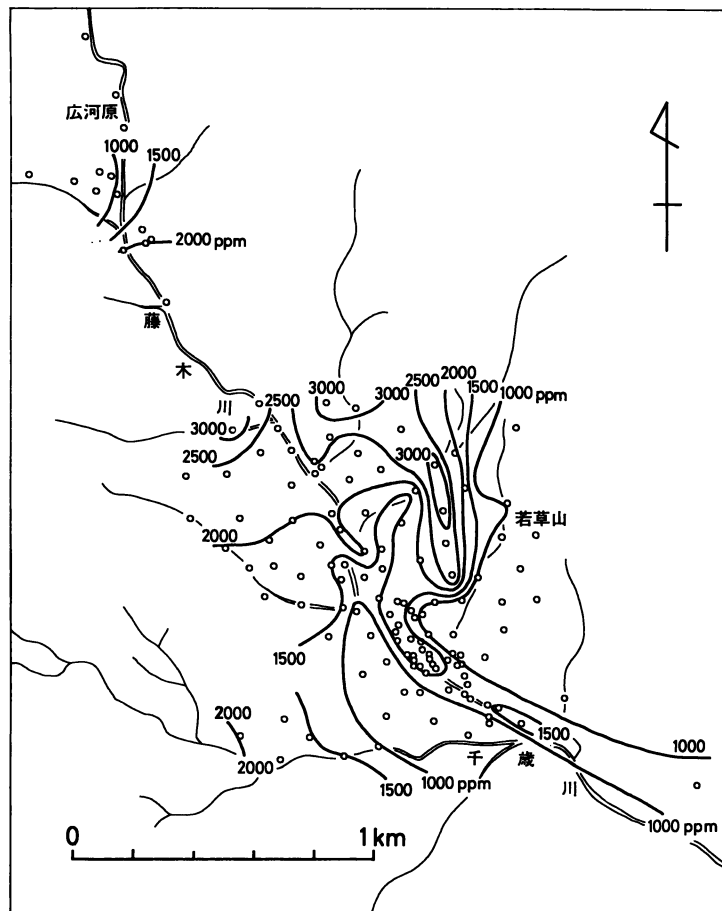


図4 蒸発残留物分布図

スケールの付着状況

図5は当地域の源泉の揚湯管やエアーストックにおけるスケールの付着状況を示す。スケールの付着の激しい源泉は温泉場地区に多く、付着のみられない源泉は泉地区と温泉場地区の一部に分布している。スケールの付着状況については井戸掃除の頻度をもとにして以下のように四段階に分類した。即ち、(－)はスケールが付着しないか、ほとんど認められない源泉(井戸掃除は数年に1回)、(＋)はスケールの付着のいくらか認められる源泉(井戸掃除は年に2～3回)、(++)はスケールの多い源泉(井戸掃除は年に5～6回)、(+++)はスケール付着のかかなり激しいもの(井戸掃除は月に2～3回)とした。スケールの付着条件は温泉水の温度、pH、 Ca^{2+} および ΣHCO_3^- 濃度、総溶存量(または蒸発残留物)に影響される。即ち、高温で蒸発残留物の多い源泉ほどスケールの付着が著しく、低温で蒸発残留物の少ない源泉はスケールが付着しない(図6)。

スケールの採取

当地域の温泉はエアリフトポンプによる揚湯が大部分を占める。これは揚湯装置が簡単でスケールを掃除しやすい長所がある。井戸掃除は泉温や揚湯量を維持、確保するために揚湯管やエアーストックに付着したスケールを鎌、のみ、ハンマー等のかき削り、腐蝕した鉄管を交換する作業である。一源泉あたりの作業は3～4人の作業員が半日～1日ばかりで行なわれる。スケールの付着の激しい源泉では10～20日ごとに作業しなければならない。その経済的負担は大きい。井戸掃除のさいに同行してエアーストック等に付着するスケールを採取し、静水位の測定、揚湯試験等を調査しているが、ほとんどのスケールはアラゴナイト(あられ石)であり、カルサイト(方解石)は少ない。鉄管に付着するスケール

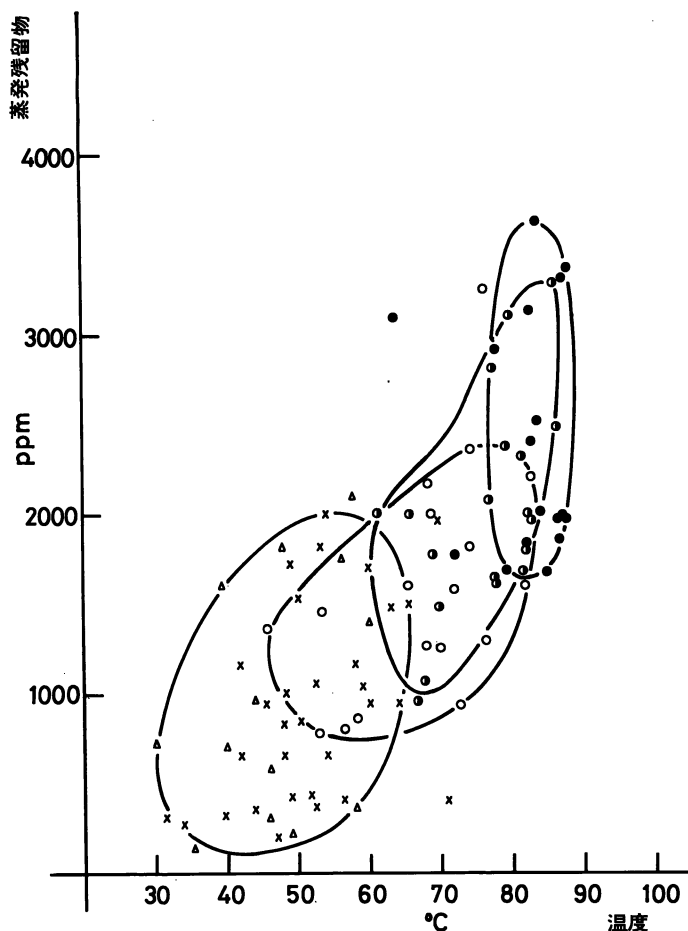


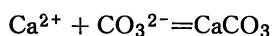
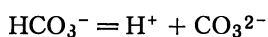
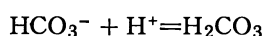
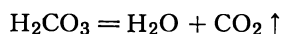
図6 泉温—蒸発残留物とスケール付着状況

●スケール付着のかかなり激しい源泉、◐付着の多い源泉、○いくらか付着する源泉、×付着しない源泉、△採水のみ

は源泉孔の下部では茶褐色緻密なスケールができやすく硬質で除去しにくい、地表付近では白色の水分を多く含む軟質のスケールができやすい。

スケールの成因

CaCO_3 を主成分とするスケールの生成機構は、地下熱水が周囲の炭酸カルシウムを含む岩石と平衡にあると仮定して、それが地上に揚湯されると CO_2 分圧が減少し、 pH が上昇する事により説明できる（鈴木ら, 1971., 北野, 1964）。反応式では次のようになる



即ち、地下熱水が揚湯されるとその中の CO_2 ガスが急激に逸散されるので H^+ は減少する（ pH は上昇する）。 HCO_3^- は H^+ に比較して充分多いので H^+ の減少を補なう方向に反応は進み HCO_3^- は H^+ と CO_3^{2-} に解離する。 CO_3^{2-} が多くなると CaCO_3 が沈澱しやすくなる。

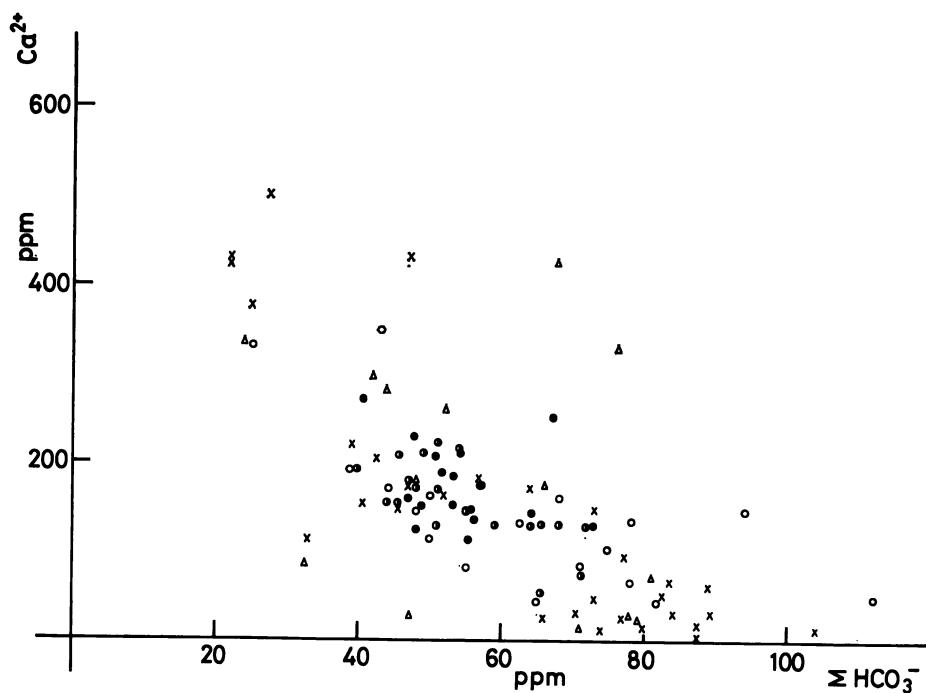


図7 $\Sigma\text{HCO}_3^- - \text{Ca}^{2+}$ とスケール付着状況

記号は図6と同じ

地下熱水中の pH は後述するように約 6 と推定され、源泉の湧出口では pH 8 付近である。pH が約 2 上昇する事によって CO_3^{2-} は約 100 倍多くなり CaCO_3 の沈澱がやすくなる。スケールの多く付着する源泉では Ca^{2+} は約 200 ppm (5 mmol/l), $K_c = a_{\text{Ca}^{2+}} \cdot a_{\text{CO}_3^{2-}} = 10^{-9}$ (85°C) であり, $\gamma_{\text{Ca}^{2+}} = 0.5$, $\gamma_{\text{CO}_3^{2-}} = 0.5$ (GARRELS, 1965) として CO_3^{2-} は 0.05 ppm (8×10^{-4} mmol/l) 以上あれば計算上沈澱しうる事になる。

スケール付着の激しい源泉と付着しない源泉の比較

表 2 はスケール付着のかなり激しい源泉とほとんど付着のみられない源泉について、それぞれ 5 源泉を選び、泉温、揚湯量、化学成分等を比較したものである。スケール付着の激しい源泉は泉温 80°C

表 2-1 スケールのかなり激しく付着する源泉の泉質

温 泉 台 帳 番 号	31	33	120	125	151
採 水 日	47. 5.10	47. 5.19	47. 5.23	47. 4.28	47. 5.10
泉 温 (°C)	86.5	83.0	87.4	88.0	86.8
揚 湯 量 (ℓ/min)	94.	135.	107.	124.	127.
深 さ (m)	346.	273.	363.	487.	500.
静 水 位 (m)	68.75		177.6	150.	144.5
静 水 位 測 定 日	47. 3. 3		48. 5.21	46. 5.19	47.12.25
動 力 (kw)	3.75	7.5	7.5	7.5	11.
エアー管長 (m)	148.5	242.	313.5	376.7	423.5
内 径 (cm)	(φ1.3)	(φ1.3)	(φ1.3)	(φ1.3)	(φ1.9)
pH	8.2	8.2	8.2	8.1	8.4
比 電 導 度 (μS/cm)	2772.	3388.	4766.	4967.	2695.
蒸発残留物 (ppm)	1964.	2393.	3329.	3343.	1823.
Li ⁺ (ppm)	0.287	0.372	0.630	0.628	0.282
K ⁺ (ppm)	23.8	12.2	74.6	63.4	27.0
Na ⁺ (ppm)	475.	593.	854.	866.	443.
Ca ²⁺ (ppm)	154.	175.	231.	212.	142.
Mg ²⁺ (ppm)	0.348	0.615	0.856	0.651	0.845
Cl ⁻ (ppm)	625.	829.	1361.	1446.	594.
SO ₄ ²⁻ (ppm)	483.	514.	484.	385.	443.
HCO ₃ ⁻ (ppm)	47.3	55.1	46.0	52.5	62.5
CO ₃ ²⁻ (ppm)	0.44	0.51	0.43	0.39	0.92
HSiO ₃ ⁻ (ppm)	3.94	4.73	5.36	3.72	6.84
H ₂ SiO ₃ (ppm)	126.	151.	172.	149.	138.
CO ₂ (ppm)	0.72	0.84	0.70	1.00	0.60
計 (ppm)	1940.	2336.	3231.	3180.	1859.
イ オ ン 強 度	0.038	0.045	0.061	0.059	0.035
地 下 の pH	6.37	6.33	6.24	6.19	6.25
地 下 の Pco ₂	10 ^{-0.27}	10 ^{-0.34}	10 ^{-0.13}	10 ^{0.01}	10 ^{-0.01}
(atm)	(0.54)	(0.46)	(0.74)	(1.02)	(0.98)

以上で総溶存量あるいは蒸発残留物は2,000ppm以上であり、pHは平均8.2である。付着しない源泉は泉温40~50°C、総溶存量あるいは蒸発残留物はほとんど1,000ppm以下でpHは前者よりいくぶん低い。スケールの主成分であるCaCO₃について図7は温泉水のCa²⁺とΣHCO₃⁻の関係を描いてあるが、スケールの付着状況の違いはCa²⁺、ΣHCO₃⁻の濃度の違いにそれほど差がみられず、Ca²⁺が多いとΣHCO₃⁻は少なくCa²⁺が少ないとΣHCO₃⁻は多くなっている。後述するように推定される地下熱水のpHや炭酸ガス分圧はスケール付着状況によって違いがみられる。

スケール除去の対策

スケール除去の対策としてはスケールをつくらないようにする方法と、できるスケールを一箇所に

表2-2 スケールの付着しない源泉の泉質

温 泉 台 帳 番 号	21	108	145	152	155
採 水 口	47. 4.19	47. 4.24	47. 5. 1	47. 4.25	47. 4.19
泉 温 (°C)	42.0	48.0	54.0	44.0	54.2
揚 湯 量 (ℓ/min)	22.	25.	34.	43.	127.
深 さ (m)	455.	364.	562.	495.	651.
静 水 位 (m)		151.		80.	146.
静 水 位 測 定 口		45. 7.31		43. 9.30	41. 2.25
動 力 (kw)	3.75	7.5	15.	7.5	11.
エアー管長 (m)	170.	239.	539.	407.	401.5
内 径 (cm)	(φ1.3)	(φ1.3)	(φ1.3)	(φ1.3)	(φ1.3)
pH	7.7	8.3	7.7	8.1	7.8
比 電 導 度 (μS/cm)	804.1	1056.	786.7	567.2	1923.
蒸発残留物 (ppm)	649.	850.	653.	371.	2025.
Li ⁺ (ppm)	0.013	0.037	0.012	0.025	0.009
K ⁺ (ppm)	1.56	0.64	0.88	1.78	1.20
Na ⁺ (ppm)	31.2	75.0	66.0	94.4	44.4
Ca ²⁺ (ppm)	149.	162.	117.	25.0	501.
Mg ²⁺ (ppm)	0.175	0.56	0.027	0.060	0.210
Cl ⁻ (ppm)	21.4	61.0	29.0	103.	8.80
SO ₄ ²⁻ (ppm)	384.	440.	357.	74.0	1301.
HCO ₃ ⁻ (ppm)	43.9	50.4	30.9	64.0	26.0
CO ₃ ²⁻ (ppm)	2.88	0.60	0.09	0.48	0.09
HSiO ₃ ⁻ (ppm)	0.29	1.73	0.45	1.01	0.57
H ₂ SiO ₃ (ppm)	29.1	43.9	45.5	40.6	45.6
CO ₂ (ppm)	0.09	0.61	1.49	1.22	1.00
計 (ppm)	638.	836.	648.	406.	1930.
イオン強度	0.017	0.020	0.016	0.007	0.053
地 下 の pH	7.31	7.10	7.30	7.69	6.88
地 下 の Pco ₂	10 ^{-2.32}	10 ^{-1.98}	10 ^{-2.31}	10 ^{-2.46}	10 ^{-1.99}
(atm)	(0.005)	(0.01)	(0.005)	(0.003)	(0.01)

集中的に強制的につくり処理する方法がある。その対策の基本としてスケールの生成機構を知りスケール付着の分布を知る事は重要である。CaCO₃ 主成分のスケールをつくらないようにするにはその生成機構からわかるように pH の上昇を抑制し、CO₂ ガスの逸散を押さえる事が効果があると思われる。しかし現在考えられている方法は一長一短があり、温泉利用上も問題が多い。スケールの付着と腐蝕の問題は紙一重であり、スケールの付着を防止しようとすれば腐蝕が起こりやすくなり、逆にスケールの付着によって腐蝕に対する保護皮膜になっている例もみられる。

地下熱水の条件

鈴木ら (1971) によれば箱根における CaCO₃ 主成分のスケールは地下熱水が地上に揚湯されると CO₂ 分圧が低下し、pH は上昇し、CO₃²⁻ が多くなり CaCO₃ が沈積するという。地下熱水の CO₂ 分圧は約 1 気圧、pH は約 6 と推定された。湯河原温泉についても地下熱水の条件を調べてみた。計算方法は鈴木ら (1971) に準じた。

(1) 地下熱水の pH

地下熱水が炭酸カルシウムを含む周囲の岩石と平衡にあるならば、

$$a_{H^+} = (K_2/K_c) \cdot \gamma_{Ca^{2+}} \cdot \gamma_{HCO_3^-} \cdot m_{Ca^{2+}} \cdot m_{HCO_3^-}$$

が成立つ。ここで $K_2 = a_{H^+} \cdot a_{CO_3^{2-}} / a_{HCO_3^-}$, $K_c = a_{Ca^{2+}} \cdot a_{CO_3^{2-}}$, γ_i は i の活量係数, m_i は i のモル濃度である。

(2) 地下熱水の炭酸ガス分圧

炭酸ガス分圧は $P_{CO_2} = a_{H^+} \cdot \gamma_{HCO_3^-} \cdot m_{HCO_3^-} / K_1 \cdot K_p$

として求められる。 $K_1 = a_{H^+} \cdot a_{HCO_3^-} / a_{H_2CO_3}$, $K_p = a_{H_2CO_3} / P_{CO_2}$ である。

K_1, K_2, K_c, K_p は鈴木ら (1971) によって求められているのでそれを用いた。活量係数についてはそれぞれの源泉のイオン強度を計算して Debye-Hückel の式から γ_i を求めた。 $m_{Ca^{2+}}$, $m_{HCO_3^-}$ については湧出口と地下における時とそれほど変化はないとして湧出口における実測値を用いた。その結果は表 2, 図 8, 図 9 のようになった。スケール付着の激しい源泉では地下において pH 6.2~6.4, P_{CO_2} は 0.5~1.0 ($10^{-0.34} \sim 10^{0.01}$) atm となり、ほとんど付着の見られない源泉では地下において pH 6.9~7.7, P_{CO_2} は 0.003~0.01 ($10^{-2.46} \sim 10^{-1.99}$) atm と求められた。但し、スケールの付着しない源泉は地下水が循環しやすかったり、周囲の岩石中の炭酸カルシウムと平衡に達していなかったり等の理由で飽和溶解度以下という事も考えられるが、ここではすべて平衡にあると仮定して計算した。地表における pH の実測値は 8 前後であり、 P_{CO_2} は大気圧と平衡にあるとして 0.0003 ($10^{-3.5}$) atm であろう。スケール付着の激しい源泉は地表に揚湯されると pH は約 2 上昇し、 P_{CO_2} も急激に低下している。スケール付着の見られない源泉の pH は約 1 の上昇にすぎず、 P_{CO_2} もそれほど変化しない。図 9 に pH—log P_{CO_2} を示す直線関係が得られた。

- 甘露寺泰雄 (1969), 温泉沈澱物による障害の対策について, 地熱, No. 22, 29—36.
- 吉川恭三, 由佐悠紀 (1968), 別府南部温泉地域における沈澱物の付着状態, 大分県温泉調査研究会報告, No. 19, 45—59.
- 吉川恭三, 由佐悠紀 (1972), 別府温泉南部地域の炭酸成分, 大分県温泉調査研究会報告, No. 23, 11—19.
- 北野康 (1964), 温泉に産出する炭酸カルシウム沈積物の化学(その1), 温泉工学会誌, Vol. 2, No. 1, 44—49.
- 北野康 (1966), 温泉に産出する盛酸カルシウム沈積物の化学(その5), 温泉工学会誌, Vol. 4, No. 1, 51—58.
- 北野康 (1969), 温泉沈澱物の成因, 地熱, No. 21, 16—29.
- 小林儀一郎 (1914), 神奈川県湯河原温泉調査報文, 地調報, No. 48, 69—84.
- KRAUSKOPF, K.B. (1967), Introduction to geochemistry, McGraw-Hill.
- 久野久 (1952), 七万五千分ノ一熱海図幅説明書, 地質調査所.
- 久野久 (1972), 箱根火山地質図説明書, 大久保書店.
- LAFON (1970), Calcium complexing with carbonate ion in aqueous solutions at 25°C and 1 atmosphere, Geochim. Cosmochim. Acta, Vol. 34, 935—940.
- 益子安, 甘露寺泰雄 (1965), ランゲリヤー計算法によるスケールの付着度合の検査(その1), 温泉工学会誌, Vol. 3, No. 2, 67—71.
- 益子安, 甘露寺泰雄 (1965), ランゲリヤー計算法によるスケールの付着度合の検査(その2), 温泉工学会誌, Vol. 3, No. 3, 164—172.
- 益子安, 甘露寺泰雄, 平野芳純, 本間啓司 (1968), 温泉水より析出する沈澱物(石灰華)の除去法に関する研究, 温泉工学会誌, Vol. 6, No. 1, 1—9.
- 二間瀬冽 (1972), 熊石町平田内温泉の引湯試験, 地下資源調査所報告, No. 45, 25—39.
- 大木靖衛, 荻野喜作, 長塚鍬子, 広田茂, 小梶藤幸, 高橋惣一, 杉本光夫 (1963), 湯河原温泉調査報告, 神奈川温研報告, Vol. 1, No. 1, 1—40.
- 大木靖衛, 平野富雄 (1967), 炭酸物質を含む溶液系でのCa-沸石と方解石の安定関係, 柴田秀賢教授退官記念論文集, 168—174.
- ROBERSON, C.E. (1964), Carbonate equilibria in selected natural waters, Am. J. Sci., Vol. 262, 56—65.
- 鈴木孝雄, 平野富雄, 田嶋鍬子, 大木靖衛 (1971), 箱根温泉沈澱物の生成条件について, 神奈川温研報告, Vol. 2, No. 3, 121—131.
- 由佐悠紀 (1969), 別府南部温泉地域における沈澱物について, 大分県温泉調査研究会報告, No. 20, 43—52.
- 由佐悠紀 (1970), 別府温泉の沈澱物(第Ⅲ報), 大分県温泉調査研究会報告, No. 21, 13—25.