

伊豆半島の地熱温泉水理の研究(その1) 下賀茂温泉地域の地熱構造の地球化学的解釈

工業技術院地質調査所

野田徹郎・阿部喜久男

(昭和60年3月2日受付, 昭和60年4月30日受理)

Hydrogeochemical Study on Geothermal Structure in Izu Peninsula (1) Geothermal Structure of the Shimogamo Hot Spring Area

Tetsuro Noda and Kikuo Abe

Geological Survey of Japan, Agency of Industrial Science & Technology

Abstract

The Shimogamo area is known for its having many boiling springs of high salinity (Cl; max. 11,200 mg/l). Fukutomi's (1942) method for mixing ratio calculation and Truesdell et al's (1975) Cl-enthalpy diagram were applied to analytical data of hot spring waters of Shimogamo in order to clarify the geothermal structure and mechanism of the very area. Estimated original thermal water in the Cl-enthalpy diagram is of 9,000 mg/l in Cl concentration and of 212 °C in temperature. Thus each hot spring water may be produced by mixing of the original thermal water with the surface water. There is no great difference between the mixing ratios obtained by the above diagram and those by the Fukutomi's method, which shows that mixing process occurring in the underground is so simple.

Further the deviating plots from the dilution line around the high enthalpy zone in the Cl-enthalpy diagram were fit to following cooling line i.e. each mixed thermal water in the Shimogamo area has undergone the cooling process represented as $\Delta T = (T_0 - 110)(1 - e^{-1.45})$. This suggests the existence of semi-stable water reservoir at 50 m depth around corresponding to the boiling point as 110 °C.

1. はじめに

伊豆半島は半島内の温泉地58ヶ所、源泉数2000有余を数え、わが国でも、最も地熱温泉活動の激しい地域の一つである。半島内の温泉は、首都圏に近いという地の利を得、古くから開発に着手され利用されてきた。一方、学術的にも、温泉や地熱現象に関する研究の恰好のフィールドとして、多くの優れた研究が積み重ねられてきている。さらに昨今は、伊豆半島はフィリピン海プレートに乗って北上したとするプレートテクニクス理論引例の場として、また、プレートの運動とも無縁でない地震多発機構解明の場として注目を浴びるに至っている。この論文は、これまでに著者らが集積した、伊豆半島諸温泉の化学分析データを基に、伊豆半島の温泉地熱構造の解明という命題に取り組んだものである。著者らは今回の地熱構造の地球化学的解釈の実践例としての(その1)下賀茂温泉地域の地熱構造の地球化学的解釈に引続き、伊豆半島の地熱・温泉の特徴と分布、伊豆半島の地熱・温泉の特性の長期変動、伊豆半島の地熱貯留層の構造と形成史について、

今後筆を進めたいと考えている。これら一連の研究が、伊豆半島の地球科学的解明に対し、一つの見方を提示できればと願っている。

下賀茂温泉は高塩分の沸騰泉が分布することで知られている。福富¹⁾は、温泉水中の二成分間の直線関係から、下賀茂温泉は一熱水—地表水の混合の典型的な例だとした。しかし、沸騰泉の生成機構では、混合以外に蒸発や伝導などの過程も重要である。これらの効果を見積もり、温泉水の混合系を明らかにするため、Truesdell²⁾らのCl—エンタルピーダイアグラムが用いられる。本論文は、福富の方法による混合モデルとTruesdellの方法による混合モデルの両者を適用し、その結果から下賀茂温泉の地下地熱構造と生成機構を論じようとするものである。下賀茂温泉の温泉水の分析を豊富に行ったものとしては、中央温研の報告書³⁾の他、阿部らの報文⁴⁾(投稿中)がある。後者では下賀茂温泉水の化学成分の経年変化についても触れられている。

2. 地質および温泉の概要と従来の研究

下賀茂温泉周辺の地質に関して記載した文献としては、5万分の1地質図「神子元島」⁵⁾や鮫島、岩橋⁶⁾があり、これらに新知見を加えまとめたものとして、中央温泉研究所の報告書³⁾がある。これらによると、下賀茂温泉地域には凝灰質砂岩層が一般的であり、細かい区分はあるものの全体として白浜層群に包括される。白浜層群は大局的には北西—南東の走向を示し、同じ方向の軸をもつ数本の背斜向斜構造と、これに平行した断層が観察される。断層のうち東大樹芸研究所付近のものは、青野川沿いにほぼ東西に伸びる温泉分布域を西側で区切る境界となっている。

温泉の分布は、ほとんどが青野川流域、一部がその南側の支流でやはりほぼ西から東に向かって流れる南野川の流域に限られている。利用源泉総数は50余りで、地域的に大きく下賀茂(第1表の温泉台帳No.中S)と加納(第1表同じくK)の両地域に分けられる。温泉開発初期には、自然湧出泉や湯柱を呈するような噴騰泉が見られたが、現在では自然湧出泉は皆無で、一部の噴騰泉を残し動力場場泉の割合が増加している。温泉活動の衰退の歴史的推移については、角の論文⁷⁾に詳しく記述されている。

下賀茂温泉ではじめて本格的な科学的考察を行ったのは、福富である¹⁾。福富は温泉水の化学成分相互の濃度の関係を手掛りに、温泉水形成はいくつかの異なった起源水の混合によるものとして捉え、下賀茂混泉は一熱水—地表水の混合の典型的な例だとしている。その後、角の地質図や鮫島、岩橋の地質学的見地からの研究⁶⁾が続いた。化学的研究としては、下賀茂温泉についての同位体および化学分析の結果から、温泉水の起源、溶存化学成分の挙動、深部熱水の温度について論じた水谷、浜砂の論文⁸⁾がある。

3. 温泉水の採取

昭和42年3月に下賀茂温泉における地質構造と温泉分布との関連を研究する目的で、筆者の一人(阿部)は前田憲二郎とともに、下賀茂温泉の利用源泉の温泉水45試料(第1表)を採取した。これらの採取地は第1図に示す通り、書野川に沿って、東西約2km、南北約1kmにわたって分布する下賀茂温泉の大部分を占めている。続いて昭和48年3月に、下賀茂温泉における深部由来の温泉水と、浅所地下水との混合の様相を知るために同地域の、未利用源泉の坑内水、湧水、地下水および青野川の河川水をそれぞれ10個(No.46—55)、7個(No.56—62)、6個(No.63—68)計23試料(第2表)採取した。このうち温泉水混合の立体的分布をみる目的で、未利用源泉のうち3本の井戸では深度別採水を実施した(No.46—52)。

第1表 下賀茂温泉地域で採取した温泉水(利用源泉)の分析一覧表

No.	温泉台帳No.	温泉名	所有者	掘削深度 m	泉温 ℃	pH	Na ⁺ mg/l	K ⁺ mg/l	Ca ²⁺ mg/l	Mg ²⁺ mg/l
1	K-1	豊里湯	松浦 艶子	79	95.2	8.2	3380	250	1840	6.3
2	K-2	権現湯	松浦 艶子	179	99	8.4	4210	293	2310	3.2
3	K-3	加納共同湯	山本吉雄外	76	100	8.3	3930	278	2270	6.8
4	K-4	権現第2湯	伊豆急行KK	170	100	8.3	4370	310	2370	9.5
5	K-5	矢崎湯	南伊豆観光KK	175	84	7.7	2900	170	1580	0.1
6	K-6	八重ヶ瀬湯	吉田 錦太郎	58	98	8.2	3980	303	2290	0.1
7	K-7	入山温泉	大川 義太郎	50	100	8.4	4110	288	2340	6.6
8	K-8	栄湯	松浦 艶子	100	100	8.3	3680	270	2120	19.0
9	K-9	日ノ出湯	松浦 艶子	55	99	8.3	4110	318	2320	6.3
10	K-10	五常ノ湯	鈴木幸子外1名	83	99.3	8.3	3760	280	2140	3.2
11	K-13	大学湯	東大農学部	149	100	8.3	4110	320	2400	9.5
12	K-15	埼玉1号	内藤 昇平	198	100	8.4	4310	303	2350	3.2
13	K-16	埼玉2号	松浦 博外1名	175	99	8.3	4160	315	2450	6.3
14	K-20	其中温泉	北浦 静子	250	99.3	8.2	4210	315	2400	0.1
15	S-1	海軍湯	厚生省	2.4	56.5	7.5	2500	169	1370	1.9
16	S-17	正湯	高橋 泉	100	50	7.7	1570	77	538	79.2
17	S-5	紀ノ国屋湯	漆田きくの外1名	56	59.5	8.0	1020	63	304	13.5
18	S-6	坂ノ湯	平山 道太郎	3.8	19.5	7.5	1880	118	997	1.5
19	S-30	第1宝湯	地熱産業(株)	84	92.8	7.7	2580	183	1370	9.5
20	S-27	新湯	片倉 長治	39	85	7.7	2680	190	1470	3.2
21	S-29	遠見第3号	渡辺 栄	49	86	7.8	2550	180	1360	6.3
22	S-32	高島鉱泉1号	吉田農園KK	72	98.1	8.2	3350	239	1830	9.5
23	S-36	遠見第4号	下河辺 保	61	77.5	7.8	2010	135	1190	15.8
24	S-37	玉ノ湯	山田 良作	35	83.2	7.5	2750	173	1480	6.3
25	S-38	白坂湯	鈴木 快一外	75	96	8.3	3680	248	1940	9.5
26	S-39	鈴ノ湯	厚生省	114	99	8.4	3380	250	1800	6.3
27	S-41	高島鉱泉2号	吉田農園KK	52	100	8.2	3340	253	1880	7.6
28	S-45	瑞豊園6号	日本地開発振興KK	91	81	7.7	2480	175	1300	9.5
29	S-48	厚生湯	伊豆薬用植物試験場	27	95	8.0	3170	215	1720	3.2
30	S-49	第3宝湯	伊豆急行KK	33	86.2	7.7	2870	178	1460	8.3
31	S-51	ドンパネ湯	青木力ノ助外1名	79	90	7.7	2780	199	1500	0.1
32	S-53	河内屋湯	朝倉 守正	22	94.5	7.7	3000	209	1630	3.2
33	S-54	富貴ノ湯	白金不動産保全KK	27	83.5	7.7	3030	203	1590	3.2
34	S-55	庄和湯	渡辺 辰也	30	91	7.7	2970	191	1550	6.3
35	S-56	銀ノ湯	西山 伊織	55	100	8.4	4260	295	2290	3.2
36	S-59	松ノ湯	鈴木 清	75	67.5	7.5	2030	124	1180	4.8
37	S-60	南恵ノ湯	安藤 広	100	98	8.0	3140	230	1700	6.3
38	S-62	クラブ湯	鈴木 文蔵	140	56.5	7.7	1120	66	580	7.9
39	S-63	都ノ湯	吉田 錦太郎	50	96	8.3	3380	285	1450	6.3
40	S-66	指月ノ湯	渡辺 祖禪	82	89.5	8.0	3050	219	1670	6.3
41	S-68	朝倉湯	伊豆急行KK	47	81.5	7.7	2940	195	1550	3.2
42	S-69	かめや湯	斉木留四郎外2名	85	71	7.4	2500	168	1230	9.5
43	S-71	大福湯	渡辺 弁次	47	77	7.7	2210	153	1130	6.3
44	S-72	いず湯	森田 光男	200	81.2	7.7	2210	162	1260	0.1
45	S-73	休石湯	鈴木楽司外1名	130	89	7.6	2380	150	1170	6.3

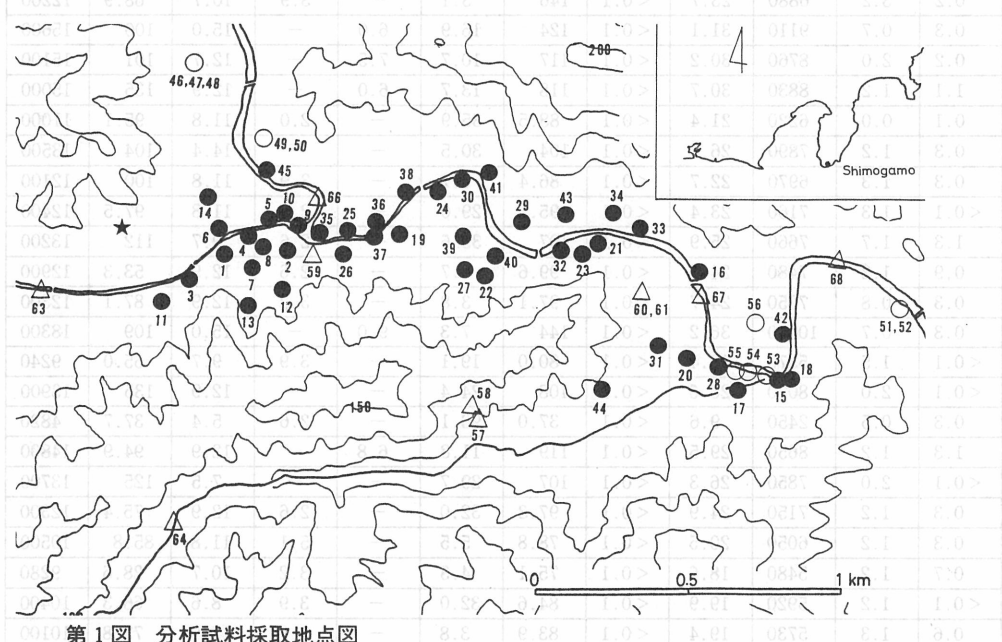
表一 伊豆半島の各地点の水質分析結果 (昭和42年3月採水)

Fe ²⁺ mg/l	Al ³⁺ mg/l	Cl ⁻ mg/l	Br ⁻ mg/l	I ⁻ mg/l	SO ₄ ²⁻ mg/l	HCO ₃ ⁻ mg/l	CO ₃ ²⁻ mg/l	CO ₂ mg/l	HBO ₂ mg/l	H ₂ SiO ₃ mg/l	TSM mg/l	地点
4.3	1.5	8860	30.5	<0.1	119	11.1	6.8	—	11.8	122	15200	01
<0.1	1.7	10700	36.4	<0.1	136	6.1	8.3	—	16.1	135	18400	02
<0.1	2.0	10400	35.6	<0.1	132	5.8	9.8	—	11.8	122	17700	03
2.4	3.3	11000	38.6	<0.1	137	14.5	6.0	—	18.2	139	18700	04
0.3	0.8	7190	24.5	<0.1	111	5.3	—	6.4	11.8	84.5	12400	05
<0.1	1.5	10700	36.7	<0.1	144	7.7	6.0	—	12.9	85.8	17700	06
4.5	1.3	10900	37.5	<0.1	142	5.0	10.5	—	15.0	153	18600	07
0.7	1.2	9800	33.8	<0.1	144	8.0	9.0	—	12.2	130	16900	08
0.2	0.8	10800	37.3	<0.1	130	5.4	9.0	—	12.9	155	17300	09
0.2	0.3	10000	34.6	<0.1	133	3.4	9.0	—	16.1	144	16800	10
1.8	1.5	11200	38.6	<0.1	147	4.6	8.3	—	12.2	108	18900	11
0.3	1.2	10900	35.1	<0.1	135	3.1	10.5	—	18.2	93.6	18600	12
1.4	1.2	11200	38.8	<0.1	144	3.8	9.0	—	15.0	153	19100	13
1.3	1.3	11200	38.6	<0.1	144	9.3	6.0	—	10.7	147	19100	14
<0.1	2.0	4680	15.0	<0.1	88.7	48.8	—	4.5	9.7	76.7	9380	15
<0.1	1.2	3650	12.3	<0.1	57.4	8.1	—	2.6	5.4	24.7	6130	16
<0.1	2.8	2150	5.5	<0.1	48.6	78.6	—	—	5.4	23.4	3860	17
<0.1	1.2	4700	15.1	<0.1	68.9	58.0	—	3.2	7.5	45.5	7940	18
<0.1	1.7	6560	22.5	<0.1	97.1	33.6	—	3.9	10.7	104	11300	19
3.2	1.2	6950	23.7	<0.1	93.4	35.8	—	2.6	9.7	48.1	12100	20
1.1	0.0	6440	21.8	<0.1	93.8	33.6	—	2.6	9.7	49.4	11300	21
0.1	1.2	8630	29.3	<0.1	117	15.7	4.5	—	14.0	142	14800	22
0.7	1.2	5390	17.9	<0.1	70.8	30.5	—	2.6	7.5	85.8	9350	23
0.2	3.2	6880	23.7	<0.1	146	3.1	—	3.9	10.7	68.9	12200	24
0.3	0.7	9110	31.1	<0.1	124	16.9	6.0	—	15.0	100	15600	25
0.2	2.0	8760	30.2	<0.1	117	10.7	7.5	—	12.7	101	15100	26
1.1	1.2	8830	30.7	<0.1	118	13.7	6.0	—	12.9	135	15000	27
0.1	0.0	6220	21.4	<0.1	88.5	35.9	—	2.0	11.8	95.1	11000	28
0.3	1.2	7890	26.7	<0.1	104	30.5	—	—	14.4	104	13500	29
0.3	1.3	6970	22.7	<0.1	86.4	3.7	—	3.9	11.8	100	12100	30
<0.1	1.3	7160	23.4	<0.1	95.7	29.0	—	2.6	11.8	97.5	12400	31
1.3	1.7	7660	25.9	<0.1	107	33.6	—	2.6	9.7	112	13200	32
0.9	1.2	7480	24.7	<0.1	99.6	3.7	—	2.6	12.9	53.3	12900	33
0.3	0.8	7250	24.7	<0.1	97.1	3.8	—	3.2	12.9	87.1	12300	34
0.3	0.7	10600	36.2	<0.1	144	7.3	9.0	—	15.0	109	18300	35
<0.1	1.5	5370	18.4	<0.1	80.0	19.1	—	3.9	9.7	65.0	9240	36
<0.1	2.0	8070	26.6	<0.1	108	24.4	—	—	12.9	135	13900	37
0.3	0.5	2450	9.6	<0.1	37.0	93.1	—	2.6	5.4	37.7	4820	38
1.3	1.2	8650	29.5	<0.1	119	11.8	6.8	—	12.9	94.9	14800	39
<0.1	2.0	7850	26.3	<0.1	107	29.7	—	—	7.5	125	13700	40
0.3	1.2	7150	24.9	<0.1	97.3	32.0	—	2.6	12.9	75.4	12300	41
0.3	1.2	6050	20.5	<0.1	78.8	5.5	—	5.1	11.8	85.8	10500	42
0.7	1.2	5480	18.6	<0.1	75.1	4.3	—	3.2	10.7	28.6	9280	43
<0.1	1.2	5920	19.9	<0.1	84.6	32.0	—	3.9	8.6	66.3	10400	44
0.6	1.3	5730	19.4	<0.1	83.9	3.8	—	3.9	12.9	72.8	10100	45

伊豆半島の各地点の水質分析結果 (昭和42年3月採水) 表一

第2表 下賀茂温泉地域で採取した未利用源泉の坑内水、湧水、地下水および河川水の分析一覧表

No.	名 称	採水深度 m	水温 ℃	pH	Na ⁺ mg/l	K ⁺ mg/l	Ca ²⁺ mg/l	Mg ²⁺ mg/l	Fe ²⁺ mg/l	Mn ²⁺ mg/l
46	K-21号井	外側	24.0	8.40	34.7	1.45	10.1	2.19	0.47	0.01
47	K-21号井	40	—	8.70	37.1	1.74	9.08	1.97	1.30	0.10
48	K-21号井	65	—	8.90	36.7	1.98	10.6	2.32	1.60	0.19
49	S-84号井	30	25.0	7.20	596	38.6	126	32.9	0.36	0.56
50	S-84号井	150	70.2	7.50	484	15.3	128	6.56	0.57	0.16
51	日野橋	20	20.1	9.85	170	1.83	1.01	0.87	0.04	0.01
52	日野橋	65	21.1	7.90	1400	127	491	81.3	1.00	0.90
53	海軍湯よこ河原		52.0	7.10	1750	14.5	904	7.87	2.30	0.50
54	瑞豊園5号		22.5	7.40	1280	99.6	613	16.0	1.60	0.10
55	瑞豊園新4号		27.0	7.50	2610	170	1370	8.52	1.60	0.20
56	宮前橋下湧水		15.5	8.00	493	18.6	247	42.7	0.60	0.04
57	寿楽苑湧水		17.0	7.70	10.4	0.20	15.0	3.46	0.36	0.01
58	寿楽苑よこ穴		10.0	7.40	10.0	0.30	14.1	4.37	0.83	0.01
59	馬頭観音		15.0	7.20	8.0	0.30	8.58	2.00	0.39	0.01
60	佃の井戸1		14.0	6.70	42.0	1.70	24.7	9.83	0.37	0.01
61	佃の井戸2		10.0	6.40	9.3	0.40	9.58	2.72	0.47	0.01
62	月間神社(池)		6.0	6.75	11.5	0.80	7.00	1.20	0.84	0.01
63	二條川上流		10.0	7.60	13.4	1.90	11.0	3.50	0.47	0.02
64	水道水源池よこ沢水		11.0	7.40	8.9	1.30	8.00	3.28	0.47	0.01
65	青野川上流		9.0	7.60	7.8	0.87	13.3	4.90	0.16	0.02
66	役場うら		10.0	7.40	59.2	3.50	44.4	6.39	0.30	0.08
67	加畑橋下		10.0	7.40	167	13.60	147	6.12	0.31	0.08
68	日野橋上流		9.0	7.30	202	14.10	153	7.98	0.32	0.08



第1図 分析試料採取地点図

黒丸は利用源泉，白丸は未利用泉，△は湧水および河川水である。番号は第1，2表と同じである。星印は東大樹芸研究所の位置を示す。図中央の太い川が青野川，下の細い川が南野川である。

(昭和48年3月採水)

Al ³⁺ mg/l	Cl ⁻ mg/l	Br ⁻ mg/l	I ⁻ mg/l	SO ₄ ²⁻ mg/l	HCO ₃ ⁻ mg/l	CO ₃ ²⁻ mg/l	CO ₂ mg/l	HBO ₂ mg/l	H ₂ SiO ₃ mg/l	TSM mg/l
0.81	16.0	0.00	0.02	tr	107	4.50	—	0.00	15.6	155
0.86	16.0	0.00	0.02	3.29	101	9.00	—	0.43	81.9	223
0.94	16.8	0.00	0.02	2.88	101	10.5	—	0.43	141	300
0.21	1190	3.33	0.08	19.1	122	—	4.45	0.43	48.8	2250
0.60	950	2.27	0.03	41.8	45.8	—	2.22	0.43	164	1920
0.06	195	0.67	0.02	tr	53.4	36.0	—	1.09	16.3	450
0.11	2550	9.33	0.05	986	189	—	3.33	6.52	92.3	5870
1.43	4400	13.3	0.09	67.5	45.8	—	4.45	3.26	71.5	7280
2.40	2980	10.0	0.08	204	131	—	8.89	2.17	104	5400
0.21	6550	27.3	0.06	99.6	47.3	—	6.00	4.35	103	11100
0.74	1280	3.33	0.04	34.0	70.2	—	0.67	0.65	33.8	2260
0.57	15.1	0.00	0.02	7.61	61.0	—	1.11	0.00	19.5	123
0.09	23.1	0.00	0.08	13.6	38.1	—	1.33	0.00	27.3	123
1.65	18.6	0.00	0.04	7.00	27.5	—	2.22	0.00	24.1	86.4
0.86	111	0.40	0.02	11.1	41.2	—	4.45	0.65	16.9	259
0.81	17.7	0.00	0.06	11.5	29.0	—	2.22	0.00	26.0	113
0.49	19.5	0.00	0.00	0.62	27.5	—	2.22	0.00	24.1	797
1.07	19.5	0.00	0.01	1.32	61.0	—	1.33	0.43	40.3	134
0.42	13.3	0.00	0.02	2.06	44.2	—	2.22	0.00	35.8	106
0.71	11.5	0.00	0.06	20.6	47.3	—	1.33	0.43	22.1	116
2.87	163	0.67	0.04	18.5	45.8	—	2.22	0.00	22.1	354
0.89	506	1.33	0.08	24.7	53.4	—	2.22	0.43	32.5	951
0.36	571	2.67	0.02	27.6	48.8	—	1.56	1.09	31.2	1060

4. 分析方法

温度、pH および溶存化学組成の分析方法は次の方法による。

温度：棒状水銀温度計を使用した。

水素イオン濃度 (pH)：pH メーターを使用した。

- ナトリウム (Na⁺)
 - カリウム (K⁺)
 - カルシウム (Ca²⁺)
 - マグネシウム (Mg²⁺)
 - 第一鉄イオン (Fe²⁺)
 - マンガン (Mn²⁺)
 - アルミニウム (Al³⁺)
- } 原子吸光法

塩化物イオン (Cl⁻)：硝酸銀滴定法。

臭化物イオン (Br⁻)：チオ硫酸ナトリウム滴定法。

よう化物イオン (I⁻)：チオ硫酸ナトリウム滴定法。

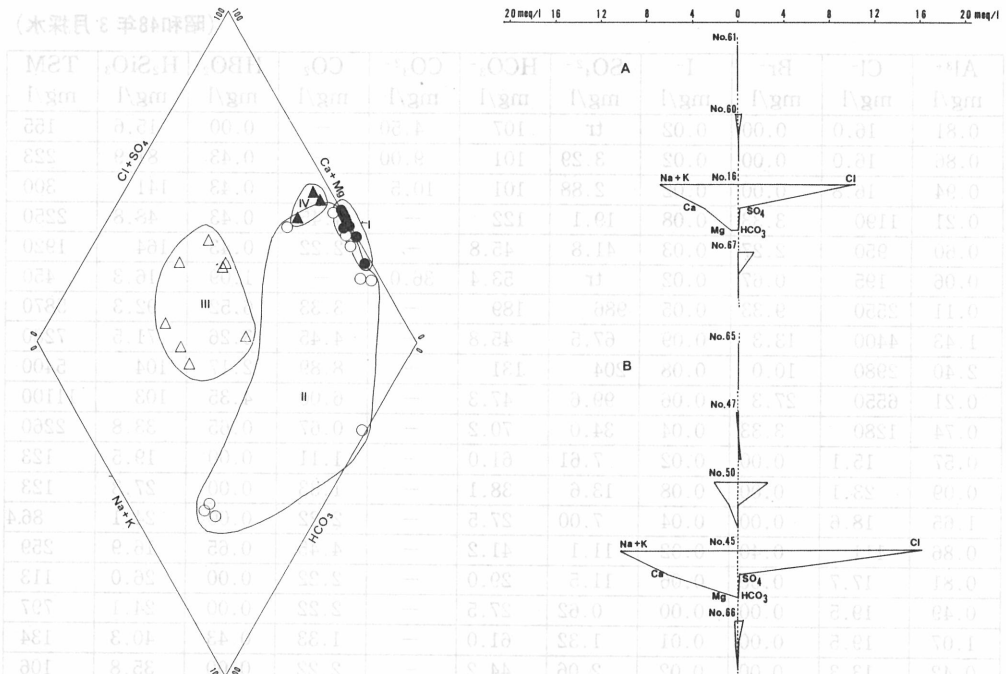
硫酸イオン (SO₄²⁻)：硫酸バリウムによる重量法。

ヒドロ炭酸イオン (HCO₃⁻)：メチルオレンジ・アルカリ度より計算。

炭酸イオン (CO₃²⁻)：フェノールフタレイン・アルカリ度より計算。

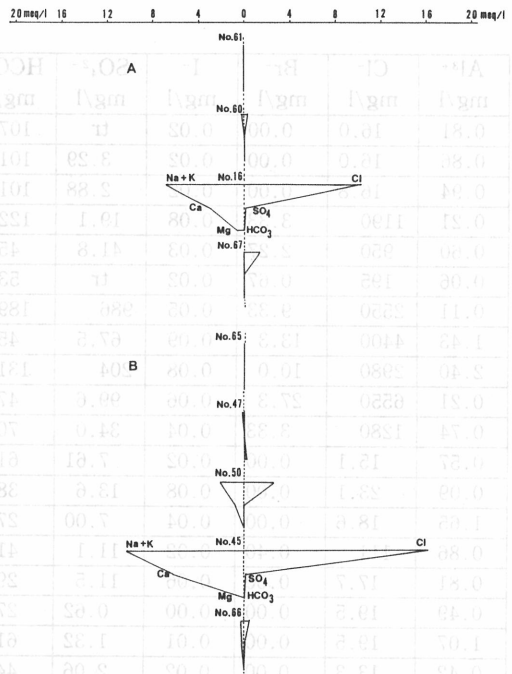
遊離炭酸 (CO₂)：フェノールフタレイン・酸度より計算。

メタほう酸 (HBO₂)：マンニット法による容量法。



第2図 全分析試料についてのキーダイアグラム

記号は第1図と同じく、黒丸は利用泉、白丸は未利用泉、△は湧水および河川水である。グループIは温泉、IIは温泉型坑内水、湧水、IIIは非温泉型湧水、非温泉流入域河川水、IVは温泉流入域河川水を示す。



第3図 連続した水系の水質変化を表わすヘキサダイアグラム

Aは温泉水が単純に薄い水で希釈されている系であり、Bは水蒸気の供給により生成した浅層型温泉を含む系である。図中の番号は、第1、2表および第1図の番号と同一である。

メタけい酸 (H_2SiO_3) : 重量法,
蒸発残留物 (T.S.M.) : 重量法.

5. 分析結果とその解釈

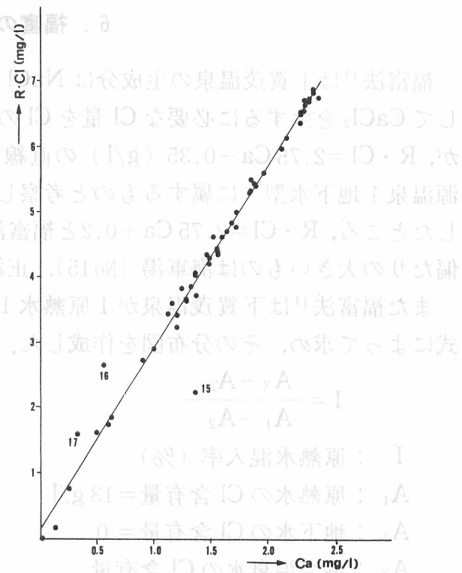
分析結果を一覧表として第1、2表に示した。この結果を基に、主要溶存陽イオン ($Na^+ + K^+$)・($Ca^{2+} + Mg^{2+}$)、陰イオン ($Cl^- + SO_4^{2-}$)・($HCO_3^- + CO_3^{2-}$)の4成分系のキーダイアグラム(第2図)を作成した。含有成分の特徴とキーダイアグラム上の分布から、試料は4つのグループに分類される。

- I 温泉 No.1~45
- II 温泉型坑内水・湧水 No.46~53, 55, 56, 60
- III 非温泉型湧水、非温泉流入域河川水 No.57~59, 62~65
- IV 温泉流入域河川水 No.66~68

Iは下賀茂地域の温泉を集約したもので、これらは濃淡様々であるが、成分の組成比はほぼ一定で、キーダイアグラム上でもまとまった分布を示す。IIはいくらか温泉徴候のある水で、Iの温泉水とIIIの地下水や地表水の間のもので、地下水が地下の地熱流体からガスを含む水蒸気

の供給を受け、地層と反応して生成した浅層型温泉水を含む。この間の成分組成の変動は非常に多様であるため、キーマイアグラム上で広がった分布を示すが、おおむねⅠとⅢの中間を占める。Ⅲは温泉の影響を受けていない低濃度の地下水および河川水である。温泉地帯を通過した河川水は、温泉廃水から成分を得て、Ⅳとなる。このとき、温度低下のため炭酸カルシウム質のスケールを溶かすことなどによりCaが付与され、キーマイアグラム上の位置は温泉の位置より少しずれる。

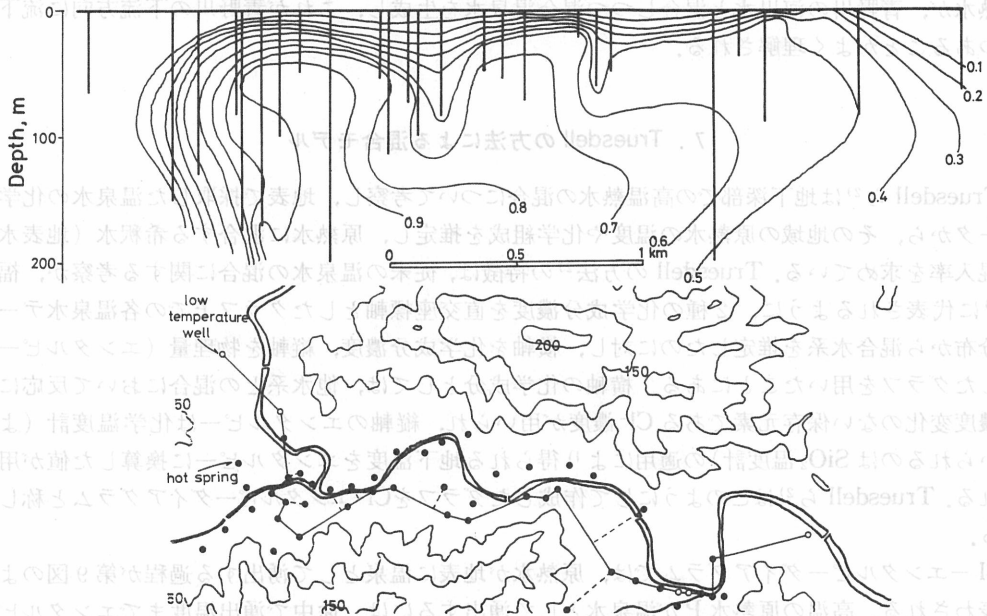
以上の水系のつながりの関係Ⅲ-Ⅱ-Ⅰ-Ⅳをへキサダイアグラム(第3図)でたどることにする。第3図では例として、青野川南野川合流域のA)61-60-16-67と青野川上流域のB)65-47-50-45-66の変化の模様を示す。A)は温泉水が単に希釈されている系、B)は水蒸気の供給により生成した浅層型温泉を含む系である。



第4図 下賀茂温泉水のCaとR・Clとの関係図

R・Clとは全Cl量からCa量に見合うだけのCl量を引きさったものである。

Cross section of thermal water mixing ratio along a line of hot springs, Shimogamo



第5図 下賀茂温泉水の原熱水混入率の垂直断面図

断面は下の地図中の源泉を結ぶ実線を垂直に切るものである。実線からはずれる源泉の一部についても、点線との交点にデータを投影し断面図作成に役立っている。

6. 福富の方法による混合モデル

福富法¹⁾は下賀茂温泉の主成分はNaClとCaCl₂であることに着目し、Ca含有量と、Caと結合してCaCl₂を生ずるに必要なCl量をClの全含有量から引去った残りのCl量(R・Cl)との関係が、 $R \cdot Cl = 2.75 Ca - 0.35$ (g/l)の直線関係で示されるところから、下賀茂温泉の生成は“1源温泉1地下水型”に属するものと考察した。今回得られたデータを上記と全く同じ方法で処理したところ、 $R \cdot Cl = 2.75 Ca + 0.2$ と福富法¹⁾とほとんど同様の結果を得た。この関係式からやや偏りたりの大きいものは海軍湯(No.15)、正湯(No.16)および紀ノ国屋湯(No.17)である(第4図)。

また福富法¹⁾は下賀茂温泉が1原熱水1地下水型の温泉であるとした上で、原熱水混入率を次式によって求め、その分布図を作成した。

$$I = \frac{A_x - A_2}{A_1 - A_2}$$

I : 原熱水混入率 (%)

A₁ : 原熱水のCl含有量 = 13 g/l

A₂ : 地下水のCl含有量 = 0

A_x : 混合温泉水のCl含有量

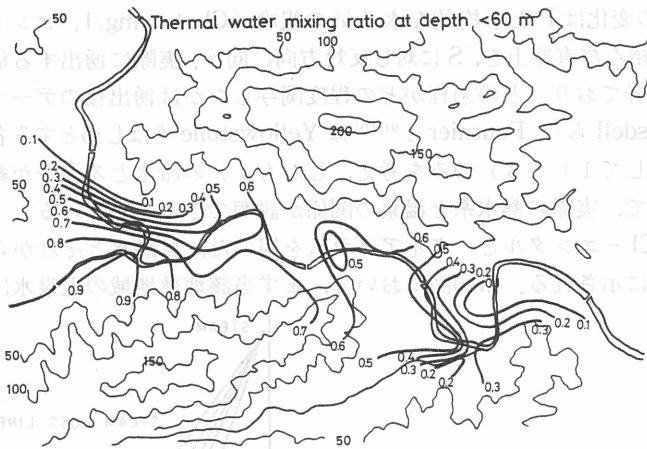
今回はA₁ = 11.2 g/lとして、同様の方法でIを求め、その分布を検討した。井戸の深度がまちまちであるので、まず垂直断面図を作り、これをもとにして深度別水平分布図を作成した。温泉井の深度別分布(第12図)から、深度(m)は<60、≥60~<120、および≥120の3群に区別される。作成した分布図は、それぞれ第5、6、7および8図である。

これらの混合比の垂直および水平的分布図をみると、西部の加納地区で地下から上昇してきた原熱水が、青野川の河川水と混合しつつ混合温泉水を生成し、これが青野川の下流方向に流下しつつあることがよく理解される。

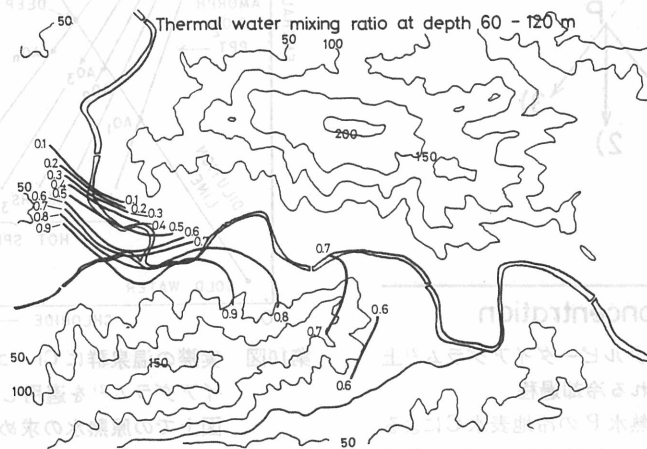
7. Truesdellの方法による混合モデル

Truesdellら²⁾は地下深部での高温熱水の混合について考察し、地表で採取した温泉水の化学的データから、その地域の原熱水の温度や化学組成を推定し、原熱水に混合する希釈水(地表水)の混入率を求めている。Truesdellの方法²⁾の特徴は、従来の温泉水の混合に関する考察が、福富法¹⁾に代表されるように、2種の化学成分濃度を直交座標軸としたグラフ上での各温泉水データの分布から混合水系を推定したのに対し、横軸を化学成分濃度、縦軸を物理量(エンタルピー)としたグラフを用いたことにある。横軸の化学成分としては、他水系との混合において反応による濃度変化のない保存元素であるCl⁻濃度が用いられ、縦軸のエンタルピーは化学温度計(よく用いられるのはSiO₂温度計)の適用により得られる地下温度をエンタルピーに換算した値が用いられる。Truesdellら²⁾はこのようにして作成したグラフをCl-エンタルピーダイアグラムと称している。

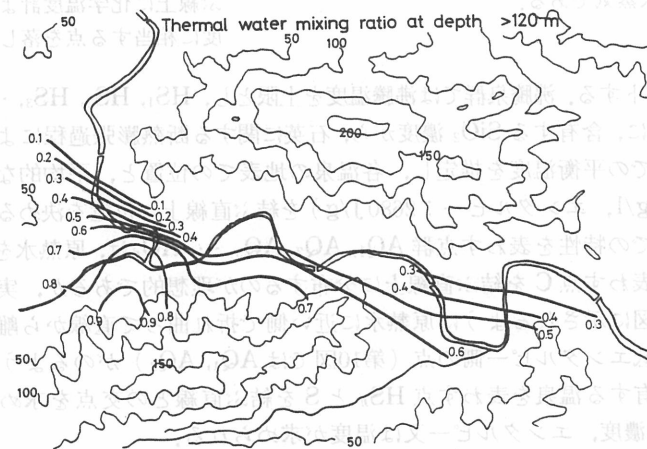
Cl-エンタルピーダイアグラムでは、原熱水が地表に温泉として湧出する過程が第9図のように表わされる。高温の原熱水Pが温泉水として湧出するには、途中で湧出温度までエンタルピーを低下させる冷却過程が存在する。実際に起り得る冷却過程としては、1)低エンタルピーの水(地表水)による希釈、2)熱伝導による冷却、3)断熱膨張(蒸発)による冷却がある。1)では、Pと地表水Cを結ぶ直線上を希釈の割合に応じて変化する。2)ではCl⁻濃度は変化せず、PからCl軸に向かって垂直に変化する。3)では蒸気損失によってエンタルピーが低下する一方、



第6図 下賀茂温泉水の原熱水混入率の水平分布図, その1, 0~60m深
混入率の求め方は福富の方法¹⁾による。



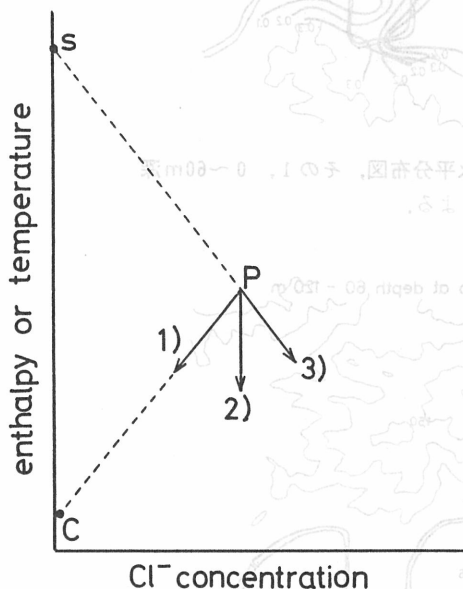
第7図 下賀茂温泉水の原熱水混入率の水平分布図, その2, 60~120m深



第8図 下賀茂温泉水の原熱水混入率の水平分布図, その3, 120m以深

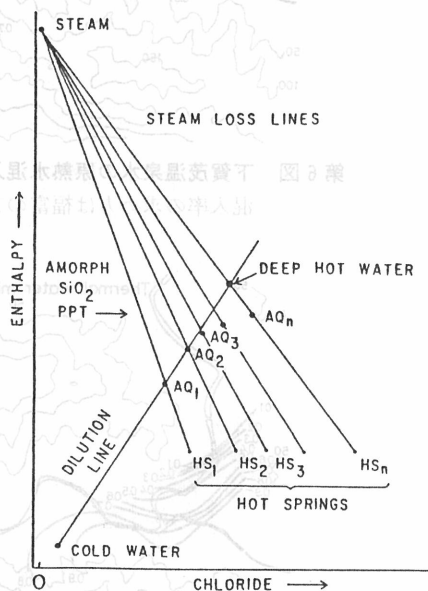
Cl⁻は濃縮され、その変化はPと平均的な水蒸気の組成 (Cl⁻: 0 mg/l, エンタルピー: 2680 J/g) を表わす点Sを結んだ直線上を、Sに対し反対方向に向う。実際に湧出する温泉は以上3つの複合した冷却過程を経ており、どの過程がどの程度関与したかは湧出後のデータからは決められない。しかし、Truesdellら²⁾、Fournierら^{9),10)}はYellowstoneをはじめとする各地の地熱地帯において、冷却過程として1)と3)のみを考え、しかも1)の冷水との混合が終了した後に3)の蒸発が起る組合せで、実際の熱水系と温泉の関係が説明できるとしている。

Truesdellら²⁾のCl-エンタルピーダイアグラムを用いた、原熱水とそれから派生した温泉の係の解釈法は第10図に示される。第10図において、まず当該地熱地域の温泉水についてCl⁻濃度



第9図 Cl-エンタルピーダイアグラム²⁾上に表示される冷却過程

1)は原熱水Pの冷地地表水Cによる希釈、2)は伝導冷却、3)は蒸発による濃縮を伴う冷却を示している。Sは水蒸気である。



第10図 実際の温泉群にCl-エンタルピーダイアグラム²⁾を適用した仮想例と、図上での原熱水の求め方³⁾

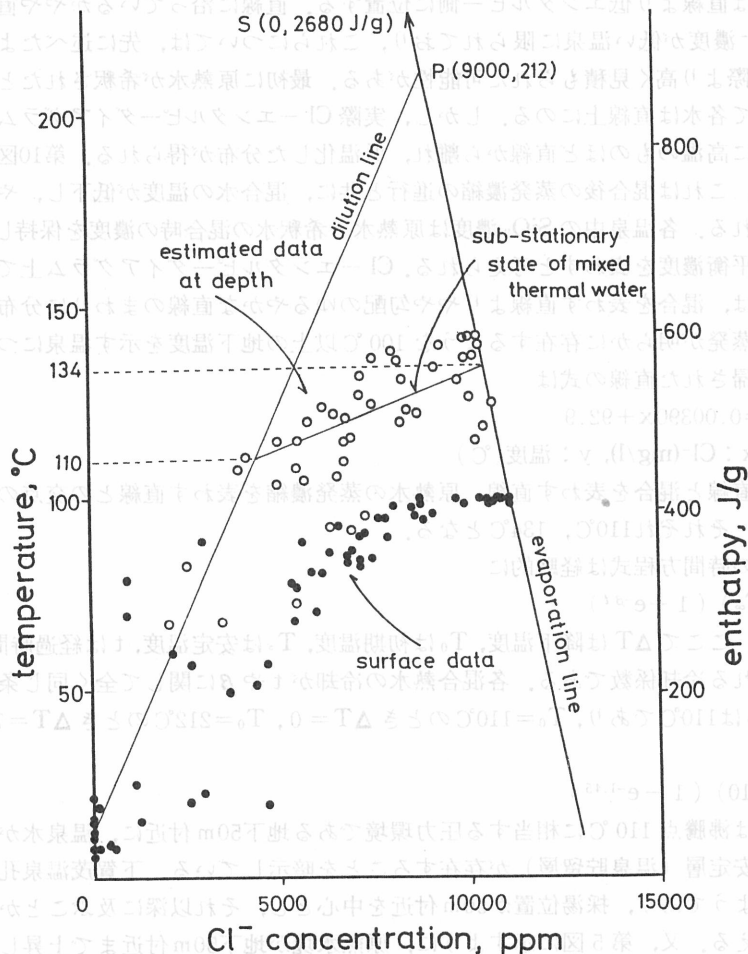
AQ₁~AQ_nは地表での温泉の座標 HS₁~HS_nと水蒸気を表わす点を結ぶ線に化学温度計より得られる温度に相当する点を落したものである。

と泉温に関してプロットする。沸騰泉群では沸騰温度を上限とし、HS₁, HS₂, HS₃, …… HS_nのようにプロットされる。次に、含有するSiO₂濃度から、石英に関する断熱膨張過程による溶解平衡温度計を用いて地下深部での平衡温度を推定し、各温泉の地表での位置と、平均的な水蒸気の特徴を示す点S (Cl⁻: 0 mg/l, エンタルピー: 2680 J/g)を結ぶ直線上に位置を決める。新たに得られた各温泉の地下深部での特性を表わす点群AQ₁, AQ₂, AQ₃, ……AQ_nは、原熱水を表わす点Pと、当該地域の地表水を表わす点Cを結ぶ直線上に分布するのが理想的であるが、実際は後に述べるような理由で、第10図に示されるように原熱水に近い側で折れ曲って直線から離れる。そのような場合には低濃度、低エンタルピー側の点(第10図ではAQ₁, AQ₂)が通るようなCを通る直線を引き、最高濃度を有する温泉を表わす点HS_nとSを結ぶ直線との交点を求めると、その点が原熱水Pであり、Cl⁻濃度、エンタルピー又は温度が求められる。

以上の作業を下賀茂温泉のデータについて行うと第11図が得られる。下賀茂温泉水の特徴は既

に述べたように最高11200 mg/l もの Cl⁻濃度を有する高塩分の沸騰泉で、高塩分のものほど湧出温度が高い点にある。このような沸騰泉群については、冷却過程として沸騰蒸発が大きいウエイトを占めていると考えることは妥当である。各温泉の SiO₂ 含量から断熱膨脹過程による化学温度を計算し、地下での状態を推定すると、各温泉の地表での値を示す点はそれぞれ SiO₂ 温度に応じて上方、やや左寄りに移され、0 で示される分布を与える。このとき、湧出温度が50℃未満の温泉は、温泉水と共存する SiO₂ 鉱物が石英以外の高溶解度の鉱物(例えば非晶質 SiO₂)である可能性を否定できない。又、Cl⁻濃度が他に比べ非常に薄い(2000 mg/l 以下)温泉は、希釈水の混合率が非常に大きく、希釈水中の SiO₂ 濃度(低温型の SiO₂ 鉱物と溶解平衡にあったと考えられる)が効いてくる。以上のような場合には、石英の溶解度による温度計は、実際より高い平衡温度を与えるため、地下温度の計算を行わなかった。

次は地下の状態を表わす点群(○)の分布と調和するような、地表水の点(Cl⁻: 0 mg/l, 10℃)



第11図 下賀茂温泉水に適用した Cl⁻エンタルピーダイアグラム

黒丸は地表での観測値、白丸はその内、温泉のみに化学温度計を適用した結果である。集中した白丸のグループには、最小自乗法による直線回帰を行い、準安定状態の存在を導いた。

を通る直線を決定せねばならない。この直線の引き方は作成者次第であり、論理的には決定されない。そこで、今回はもっとも確からしい方法として、下賀茂温泉で行われた安定同位体の研究結果を利用し作業を行った。水谷ら⁸⁾は下賀茂温泉の $\delta^{18}\text{O}$ 値と Cl^- の関係が非常によい直線性を示すことを見出した。この関係を Mizutani, Rafter¹¹⁾ による、硫酸イオンと水の間に交換平衡が成り立っている場合の、温度と $\delta^{18}\text{O}$ 値の関係式に適用すると、 Cl^- 濃度から地下温度が推定できる。下賀茂温泉の Cl^- 濃度の最高値 11200 mg/l を用いると、地下温度として 212°C が得られる。一般に同位体平衡は平衡化速度が遅く、地下深部の値が凍結されていると考えられるので、この温度推定法は原熱水の温度を推定する最も適切な方法の一つと云える。

以上の作業により地下の深部熱水の組成が、 Cl^- 濃度 9000 ppm 、温度 212°C だと決定された。従って原熱水の地表水による希釈を示す直線は第11図のように引ける。この直線は下賀茂の各温泉について推定された地下深部での組成を示す点群(○)に、ほぼ漸近するような妥当な直線であり、ほとんどの点は直線より低エンタルピー側に位置する。直線に沿っているがやや直線より上に位置するのは Cl^- 濃度が低い温泉に限られており、これらについては、先に述べたような理由で、 SiO_2 温度が実際より高く見積もられた可能性がある。最初に原熱水が希釈されたときには、希釈の程度に応じて各水は直線上にのる。しかし、実際 Cl^- エンタルピーダイアグラムを作成すると第11図のように高温のものほど直線から離れ、低温化した分布が得られる。第10図でも同様の傾向が見られる。これは混合後の蒸発濃縮の進行と共に、混合水の温度が低下し、やや濃縮されるためだと思われる。各温泉中の SiO_2 濃度は原熱水と希釈水の混合時の濃度を保持しておらず、蒸発低温化時の平衡濃度を表わすと考えられる。 Cl^- エンタルピーダイアグラム上での深部における下賀茂温泉は、混合を表わす直線よりやや勾配のゆるやかな直線のまわりに分布している。冷却過程として蒸発が明らかに存在するような 100°C 以上の地下温度を示す温泉について、最小自乗法により回帰された直線の式は

$$y = 0.00390x + 92.9$$

$$x : \text{Cl}^- (\text{mg/l}), y : \text{温度} (^\circ\text{C})$$

である。この直線と混合を表わす直線、原熱水の蒸発濃縮を表わす直線との交点の y 座標を温度に変換すると、それぞれ 110°C 、 134°C となる。

一般に冷却の時間方程式は経験的に

$$\Delta T = (T_0 - T_\infty) (1 - e^{-\beta t})$$

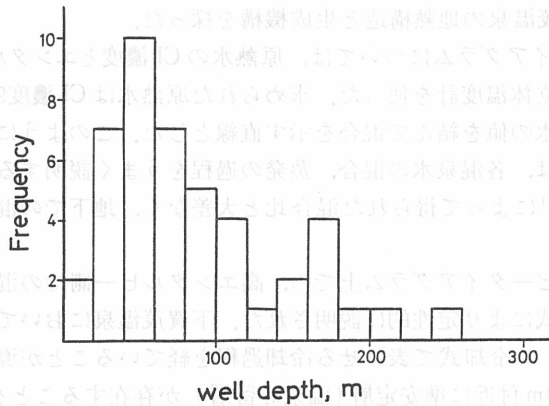
と表わされる。ここで ΔT は降下温度、 T_0 は初期温度、 T_∞ は安定温度、 t は経過時間、 β は冷却の条件に支配される冷却係数である。各混合熱水の冷却が t や β に関して全く同じ条件で起ったと仮定すると T_∞ は 110°C であり、 $T_0 = 110^\circ\text{C}$ のとき $\Delta T = 0$ 、 $T_0 = 212^\circ\text{C}$ のとき $\Delta T = 78^\circ\text{C}$ であるから、冷却式は

$$\Delta T = (T_0 - 110) (1 - e^{-1.45})$$

となる。これは沸騰点 110°C に相当する圧力環境である地下 50m 付近に、温泉水が比較的長期留まるような準安定層(温泉貯留層)が存在することを暗示している。下賀茂温泉孔の掘削深度分布は第12図のようであり、採湯位置が 50m 付近を中心とし、それ以深に及ぶことから上の見方は正しいと言える。又、第5図に示すように、原熱水塊が地下 50m 付近まで上昇してきていることもこのことを裏付けている。しかし、 $T_\infty = 110^\circ\text{C}$ 、 $\beta t = 1.45$ という値は、下賀茂固有のものであり、異なる貯留条件の熱水系では大きく変わってこよう。

下賀茂温泉においては深部での値が直線の周辺に分布していることから、原熱水と地表水混合後の冷却様式は上式で表わせるほど類似したものであることが推定される。このことは前に福富¹⁾ にならって表わした2成分の関係が非常に明瞭な直線であることから、地下での蒸発過程も類似

していることが想像されることと符合する。一方、100℃以下の地下温度を示す温泉は、蒸発以外の冷却過程として伝導が大きく効いていると思われる。



第12図 下賀茂温泉の掘削深度分布

原熱水に地表水がどれ位混合したかは、各温泉の深部組成を表わす点と蒸気を表わす点を結ぶ直線が、希釈直線を切る点を内分点とし、内分比を求めることによって知られる。各温泉について求められた熱水混合率は第3表に示されるが、福富の方法によって求めた混合率と非常によく一致している。従って下賀茂温泉の場合は、Cl-エンタルピーダイアグラムの特徴である地下深部の高状態での混合を考慮しても、その後の過程が単純又は類似した様式であるため、単純な混合モデルがうまく使えたと言える。

第3表 各温泉水について求められた熱水混合率

No.	熱水混合率, %		No.	熱水混合率, %		No.	熱水混合率, %	
	今回	福富		今回	福富		今回	福富
1	83	79	16	38	33	32	75	68
2	96	96	17	24	19	33	72	67
3	95	93	19	66	59	34	71	65
4	98	98	20	68	62	35	96	95
5	70	64	21	64	58	36	54	48
6	96	95	22	82	77	37	78	72
7	98	97	23	55	48	38	29	25
8	90	88	24	67	61	39	82	77
9	97	97	25	85	81	40	75	70
10	92	89	26	83	78	41	69	64
11	100	100	27	84	79	42	60	54
12	98	97	28	62	56	43	55	49
13	100	100	29	76	70	44	60	53
14	100	100	30	68	62	45	59	51
15	47	42	31	70	64	53	44	39

8. 結 論

下賀茂温泉水の分析値に、福富の混合率推定法¹⁾と、TruesdellらのCl-エンタルピーダイアグラム²⁾を適用し、下賀茂温泉の地熱構造と生成機構を探った。

Cl-エンタルピーダイアグラムについては、原熱水のCl濃度とエンタルピーを求める補助手段として、水谷⁸⁾らの同位体温度計を使った。求められた原熱水はCl濃度9000 mg/l、温度212℃であり、この点と地表水の値を結んで混合を示す直線とした。このようにして得られたCl-エンタルピーダイアグラムは、各混泉水の混合、蒸発の過程をうまく説明するものであった。得られた混合比は福富の方法¹⁾によって得られた混合比と大差なく、地下での混合過程は単純なものであることがうかがえる。

また、Cl-エンタルピーダイアグラム上での、高エンタルピー側での混合を示す直線からの冷却によるずれが、冷却式により定性的に説明された。下賀茂温泉においては各混合熱水が $\Delta T = (T_0 - 110)(1 - e^{-1.45})$ の冷却式で表わせる冷却過程を経ていることが導びかれ、これは沸騰点110℃に相当する地下50m付近に準安定層(温泉貯留層)が存在することを暗示している。

9. 謝 辞

本稿は、現工業技術院東北工業試験所角清愛所長から地質調査所在任中に、指導を受けた研究の成果である。元地質調査所員故山田隆基氏、元地質調査所員小川銀三氏、現地地質調査所員竹内三郎氏には、現地における坑井内採水作業において献身的に助力いただいた。また、下賀茂温泉組合渡辺権氏には、現地での採水に格段の御協力をいただいた。以上の各氏に対し、著者らの深甚なる謝意を捧げる。

文 献

- 1) 福富孝治：小地域的な温泉系統とそれより推定せられる地下構造について，地震，Vol. 14, No. 6, p. 1-17. (1942)
- 2) Truesdell, A.H., Fournier, R.O.
Calculations of deep temperatures in geothermal systems from the chemistry of boiling spring waters of mixed origin, Proceedings of the 2nd UN Symposium on the Development and Use of Geothermal Resources, San Francisco, Vol. 1, p. 837-844 (1975)
- 3) 中央温泉研究所：温泉地科学調査報告書—静岡県賀茂郡南伊豆町下賀茂温泉—(1977)
- 4) 阿部喜久男・前田憲二郎・野田徹郎：下賀茂温泉の温泉水化学組成，地調月報（投稿中）
- 5) 角 清愛：5万分の1地質図幅「神子元島」並に説明書 地質調査所（1958）
- 6) 鮫島輝彦・岩橋 徹：下賀茂温泉の地熱構造—静大地球研報，Vol. 2, No. 1, p. 31-36 (1970)
- 7) 角 清愛：伊豆下賀茂温泉のケースヒストリー（過去の事例の歴史的検討）地質ニュース，No. 227, p. 1-13. (1973)
- 8) 水谷義彦・浜橋武聖：伊豆，下賀茂温泉水の起源，火山，Ser. 2, Vol. 17, No. 3, p. 123-134 (1972)
- 9) Fournier, R.O.
Geochemical and hydrologic considerations and the use of enthalpy-chloride diagrams in the prediction of underground conditions in hot-spring systems, J. Volcanology and Geothermal Research, Vol. 5, p. 1-16 (1979)

