

大分県温泉調査研究会

報 告 第 48 号

平成 9 年 7 月

目 次

大分市街地の温泉開発の経過と現況	川 野 田 実 夫	(1)
	清 水 真 紀	
別府地域の地震(2)	由 佐 悠 紀	(7)
	北 岡 豪 一	
	福 田 洋 一	
	大 馬 沢 信 秀	
	夫	
伽藍岳の地熱調査(3)	大 羽 成 征	(13)
	田 中 良 和	
	由 佐 悠 紀	
トリチウムから推定される九重硫黄山における深部水循環 ..	北 岡 豪 一	(21)
	大 沢 信 一	
	大 上 和 二	
	由 佐 悠 敏 紀	
別府地域の地下水変動と重力調査	福 田 洋 一	(31)
	馬 渡 秀 夫	
	由 佐 悠 紀	
温泉の色について	大 沢 信 二	(41)
	由 佐 悠 紀	
温泉治療における循環器疾患のQOL(生活の質)の改善 ..	牧 野 直 樹	(51)
	平 山 祐 義	
	松 井 寛 輔	
	矢 永 尚 士	
温泉利用のできるリハビリテーション施設における問題点と 将来の方向性に関する検討	安 田 正 之	(53)
環境行政と温泉法・温泉権	大 野 保 治	(59)

序

大分県温泉調査研究会は来年で50周年を迎えることになりました。

本会は大分県における温泉行政を円滑に進めるために、また温泉の科学的な調査機関として昭和24年7月に設立されました。設立にさいしましての行政の方々、山下幸三郎先生、吉川恭三先生はじめ歴代の会長、関係各位、関係市町村の方々の御努力に、改めて敬意を表したいと思います。その蓄積された資料は温泉の保護、掘削、温泉の化学的性質、地球物理学的問題、地熱発電、医学的応用、衛生・公害、法的諸問題など多岐にわたっております。

本文を書くにあたり30周年記念誌も読ませて頂きましたが、御関係方々の温泉にかける情熱がひしひしと伝わって参ります。私も昭和61年頃から参加させて頂き、自由にテーマを選ばせて頂き、温泉・環境と健康の問題について、行政や研究者の方々、いろんな分野の方々と意見を交換し、温泉と地球について随分と学ばせて頂きました。

ふりかえりますとこの50年間にいろいろなことがありました。昭和6年に創立された九州大学温泉治療学研究所は昭和57年に癌・遺伝、免疫の分子生物学的研究を行う九州大学生体防御医学研究所に組織替えとなりました。一方、京都大学地球物理学研究施設は、平成9年4月より京都大学地球熱学研究施設(施設長 由佐悠紀教授)となり地震・火山・熱水についての研究に、さらなる飛躍の時を迎えています。

京都大学名誉教授の吉川恭三先生は、温かいお人柄、優れた御識見で本会を導かれ、学問的水準をたかめてこられました。私は延永正副会長に引き継ぐ形でお仕事をさせて頂いておりました。しかし吉川恭三先生は平成9年4月頃より体調をこわされ今回、大分県温泉調査研究会報告 第48号の序を書くように私に依頼されました。もとより多くの先輩がおられますし、私はその任に値する仕事をしていないと思ったのですが、吉川先生の御言葉を胸に、書かせて頂きました。

最近、地球環境問題が益々重要性をまし、環境保全なくしては健康保全はないとの考え方が強くなっております。美しい自然を持ち日本一の温泉県である大分県にとって、この大分県温泉調査研究会が継続され、さらに発展されるよう願ってやみません。

吉川恭三会長の一日も早い御快癒をお祈りし、御関係各位の御貢献に敬意を表し、さらに県ならびに関係市町村の御支援に感謝して、大分県温泉調査研究会報告 第48号の序とさせて頂きます。

大分県温泉調査研究会

副会長 矢 永 尚 士

大分市街地の温泉開発の経過と現況

大分大学教育学部

川野 田実夫・清水 真紀

1 はじめに

大分市内の温泉の開発は、1964年に生石で掘削に成功したことから始まり、約30年が経過した1995年時点では159の掘削源泉が温泉台帳に記載されている。これらの温泉についての地球物理学や地球化学の立場からの研究は大分県温泉調査研究会の会員によってなされ¹⁾²⁾、多くの知見が得られたと同時に測定データは温泉データベースに保存されてきた。

本報告では、温泉台帳をもとに大分市の温泉開発の経過を振り返ると共に、温泉データベースと今回調査した源泉の化学成分濃度を比較しながら、化学成分濃度の経年変化、そしてアンケート調査によって明らかになった、源泉所有者が感じている「経年変化」について報告する。

2 調査方法

各項目別に調査方法を列記する。

(1) 源泉所在地と掘削年月日：温泉台帳

(2) 化学成分濃度：データベース(大分県環境衛生研究センター)と現地調査。現地調査は1996年10月から12月にかけて50の源泉について採水し、化学成分の分析を行った。分析項目はNa,K,Ca,Mg,Cl,HCO₃の6成分である。調査源泉を図1に示す。

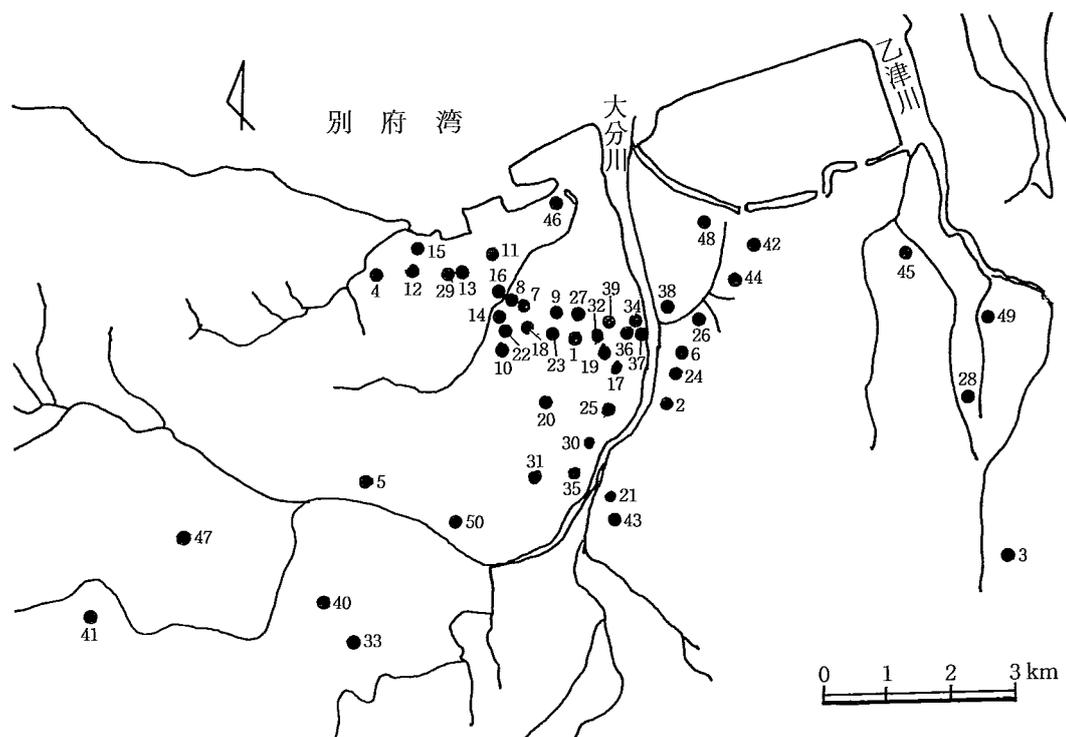


図1 調査源泉の位置

源泉の番号は表1の分析表と一致している。

表 1 分布表

源泉 No	採水年月日	気温 (℃)	泉温 (℃)	pH	Na (mg/ℓ)	K (mg/ℓ)	Ca (mg/ℓ)	Mg (mg/ℓ)	Cl (mg/ℓ)	HCO ₃ (mg/ℓ)	電気電導度 (at25℃) mS/cm
1	1996.11.18	25.6	27.2	7.13	19.2	2.9	15.2	6.1	18.1	104	0.27
2	1996.12. 3	13.8	39.5	8.38	77.1	10.7	1.5	0.3	22.7	198	0.37
3	1996.11. 6		33.8	8.04	68.1	10.1	11.2	9.2	7.2	282	0.47
4	1996.12. 3	14.9	43	8.36	136	15.1	1.3	0.0	6.6	397	0.66
5	1996.11.18	11.2	18	7.42	94.5	18.3	16.1	12.2	68.6	298	0.73
6	1996.11. 7		41.5	8.44	151	15.9	1.5	0.0	50.5	357	0.79
7	1996.12. 6	16.3	35.5	8.35	193	19.8	2.9	0.1	8.6	559	0.90
8	1996.11.18	13.5	37.4	8.19	236	41.5	4.9	0.1	15.6	733	0.99
9	1996.11.11	23.6	36.9	8.57	203	28.8	3.6	0.3	14.7	578	1.01
10	1996.11.18	12	39.6	8.38	227	41.2	4.7	0.1	13.6	708	1.17
11	1996.12. 3	13.7	49.1	8.35	252	33.9	3.3	0.1	39.6	714	1.19
12	1996.11. 8	18.2	40.9	8.3	246	53.7	4.1	0.2	14.6	714	1.22
13	1996.12. 6	15.7	37.2	8.18	242	42.8	4.9	0.3	56.3	686	1.36
14	1996.11.18	12.7	45	8.04	259	61.2	6.2	0.4	54.1	753	1.36
15	1996.12. 3	19.2	48.7	8.21	270	51.8	4.2	0.3	36.5	796	1.38
16	1996.11. 8	23.1	52.7	8.41	259	57.6	5.8	0.3	31.5	780	1.40
17	1996.11.13		37.1	8.23	297	45.8	4.7	0.2	78.4	774	1.52
18	1996.11.11		45.4	8.29	315	73.1	6.6	0.3	69.9	882	1.60
19	1996.11.11	19.2	43.4	8.25	327	50.3	5.2	0.2	92.6	862	1.69
20	1996.11.11	19.7	47.8	8.43	320	41.4	4.9	0.4	197	643	1.71
21	1996.11.11		32.4	8.31	388	24.5	5.4	1.1	78.1	999	1.78
22	1996.12. 6	16.5	40	8.25	355	77.5	6.9	0.3	127	969	1.87
23	1996.11.11	21.5	45	8.2	388	79.2	7.7	0.4	145	994	2.00
24	1996.11. 7	19.2	44.6	7.92	320	40.3	30.4	4.1	563	136	2.18
25	1996.11.11	19.2	33.8	6.73	339	86.4	57.7	30.8	271	993	2.38
26	1996.11.13		51.7	8.48	411	38.7	8.2	0.1	549	273	2.39
27	1996.12. 6		55	8.42	537	68.2	9.0	0.3	476	831	2.41
28	1996.11. 6		45.5	8.51	483	25.3	5.0	0.2	578	381	2.60
29	1996.12. 6	12.1	51.5	8.16	471	104.5	10.9	1.0	232	1140	2.63
30	1996.11.13		47.3	8.12	585	31.1	13.4	0.8	556	764	3.01
31	1996.11. 9	25.7	39.9	8.13	597	66.8	17.7	1.4	659	762	3.35
32	1996.11.11		47	8.28	597	71.5	12.8	0.1	669	732	3.37
33	1996.11. 8	18.8	37.4	6.79	1085	42.6	85.4	118.6	1220	1910	3.87
34	1996.11.11	23.3	50.8	8.35	696	79.8	13.8	0.1	958	494	3.93
35	1996.11. 6		46.5	8.37	708	29.3	21.3	2.8	873	679	3.95
36	1996.11.11	19.2	49	8.28	685	85.8	15.5	0.3	921	585	4.02
37	1996.11.11	15.7	52.8	8.27	705	82.7	16.0	0.4	963	535	4.10
38	1996.11. 7	18.3	41.2	8.43	762	93.3	16.1	0.1	1060	586	4.39
39	1996.11.13		50.2	8.31	779	79.6	17.4	0.4	1120	504	4.47
40	1996.12. 6		41.2	7.61	1480	116.1	86.3	30.3	1910	1580	7.94
41	1996.11. 8	18	40.3	6.81	1360	94.6	140.7	176.0	2080	1790	8.70
42	1996.11. 7	17.5	44.6	8.02	1440	129.3	112.7	4.0	2500	231	8.78
43	1996.11.18	13.9	44.1	8.15	1760	136.5	32.2	6.1	2610	889	9.14
44	1996.11. 7		51	7.74	1960	131.4	123.9	1.3	3290	143	10.58
45	1996.11. 6		45.1	7.73	1970	288.5	451.2	115.7	4360	210	13.53
46	1996.11.11	19.8	32.8	7.76	4050	381.9	624.1	70.9	7940	250	
47	1996.11. 8	18.2	41.1	6.71	4560	313.4	442.0	606.4	8200	3740	
48	1996.11. 6	17.7	46.6	7.76	849	79.4	17.7	1.5	1380	298	
49	1996.11. 6	17.6	45.7	7.6	2010	179.3	568.8	290.0	5110	301	
50	1996.10.31		43.3	7.03	2260	317.2	221.0	444.0	4470	2550	

(3) アンケート調査：表1に示したアンケートハガキを源泉所有者に送付して回答を求めた。アンケートハガキの送付数143通、宛先不明で返送されたもの21通、回答があったもの75通であった。

表2 アンケート用紙

アンケート

該当するものを○で囲んで下さい。

1) 利用状況について (A. 利用している B. 利用していない)

2) 泉温は以前より (A. 上がった B. 変わらない C. 下がった) ような気がする。

3) 湧出量は以前より (A. 増えた B. 変わらない C. 減った) ような気がする。

4) 成分は以前より (A. 濃くなった B. 変わらない C. 薄くなった) ような気がする。

5) 現地調査に (A. 来てもよい B. 来ては困る)

以下は5)でAと答えた方のみお答え下さい。

6) 現地調査に伺うのはいつがよいですか？ (A. いつでもよい B. 悪い日時がある)

Bの回答を頂いた方には、訪問前にあらかじめ電話で相談致します。

なお、現地調査では気温、泉温、湧出量(汲み上げ量)の測定と1ℓの採水を行います。

ご協力有り難うございました。

3 開発の経過

大分市の温泉開発は、1964年の生石地区での掘削に始まり、当初は西大分地区を中心に年間1～2口のペースで開発された。開発のピークは1980年代で、その10年間に現在ある源泉の70%以上が開発された。図2は源泉掘削数の変遷を、図3は1979年現在の源泉分布を、また図4は1995年現在の源泉分布を示したものである。これらの図から、大分市街地の温泉開発は西から東、大分川流域から大野川流域に延びていったことが分かる。

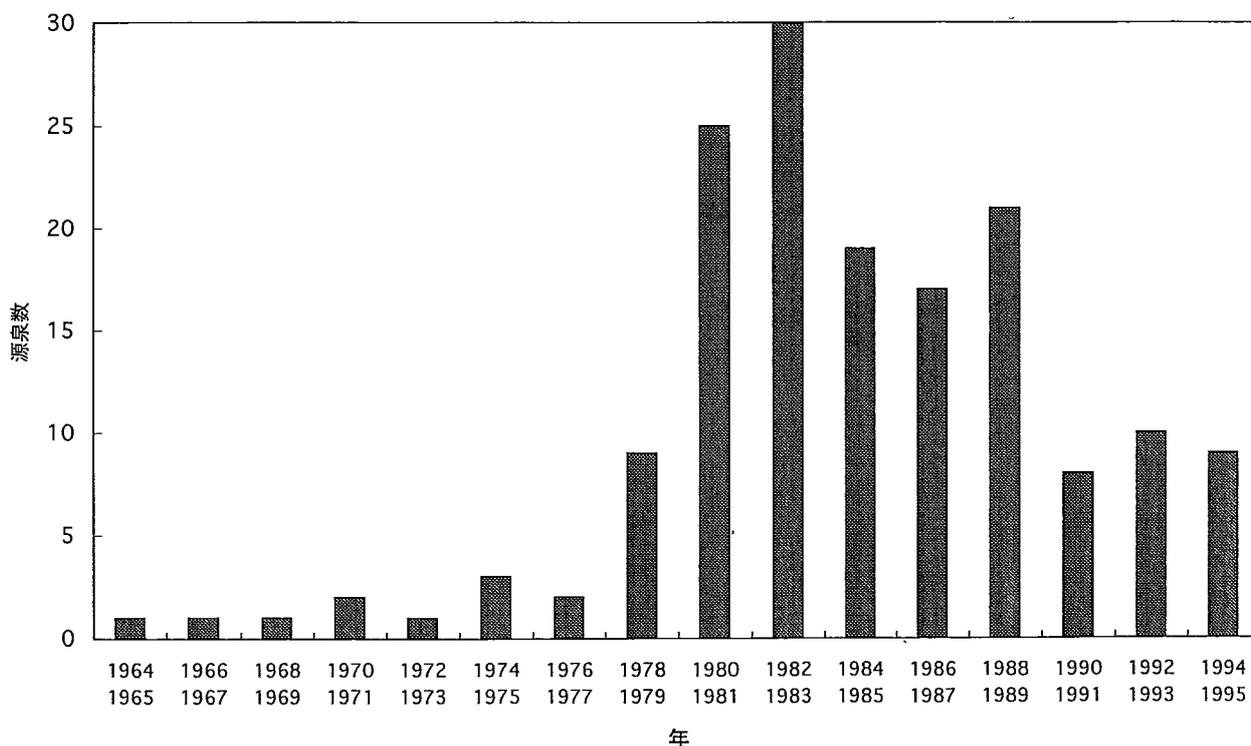


図2 源泉掘削数の変遷

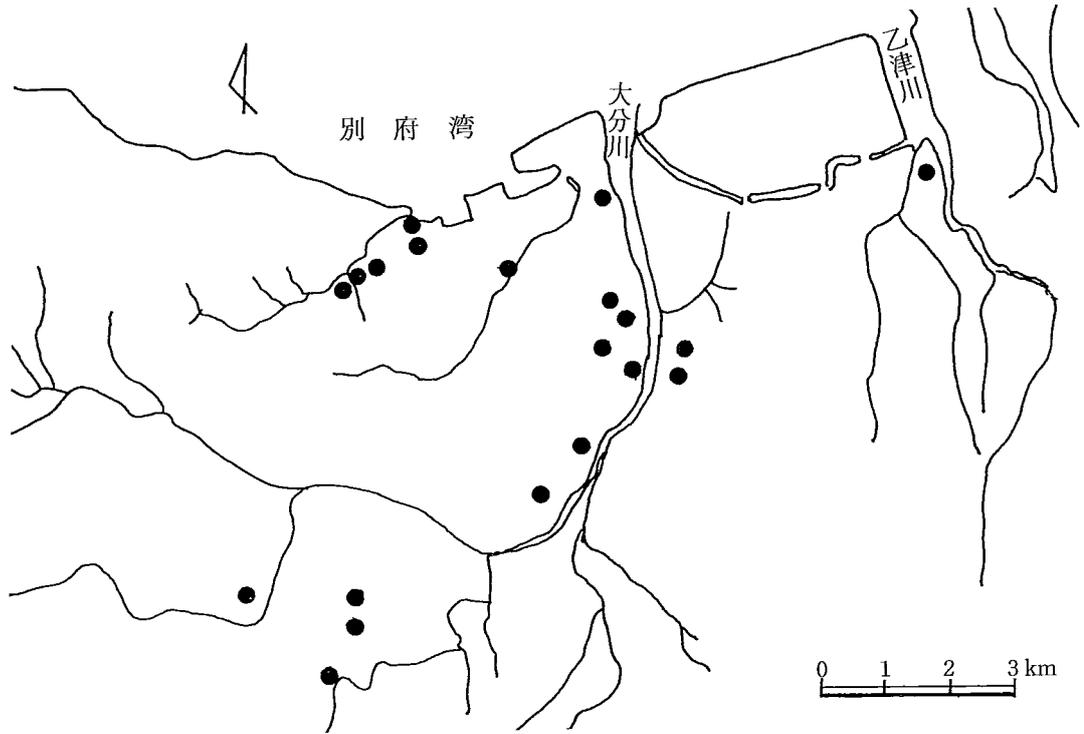


図3 1979年現在の源泉分布

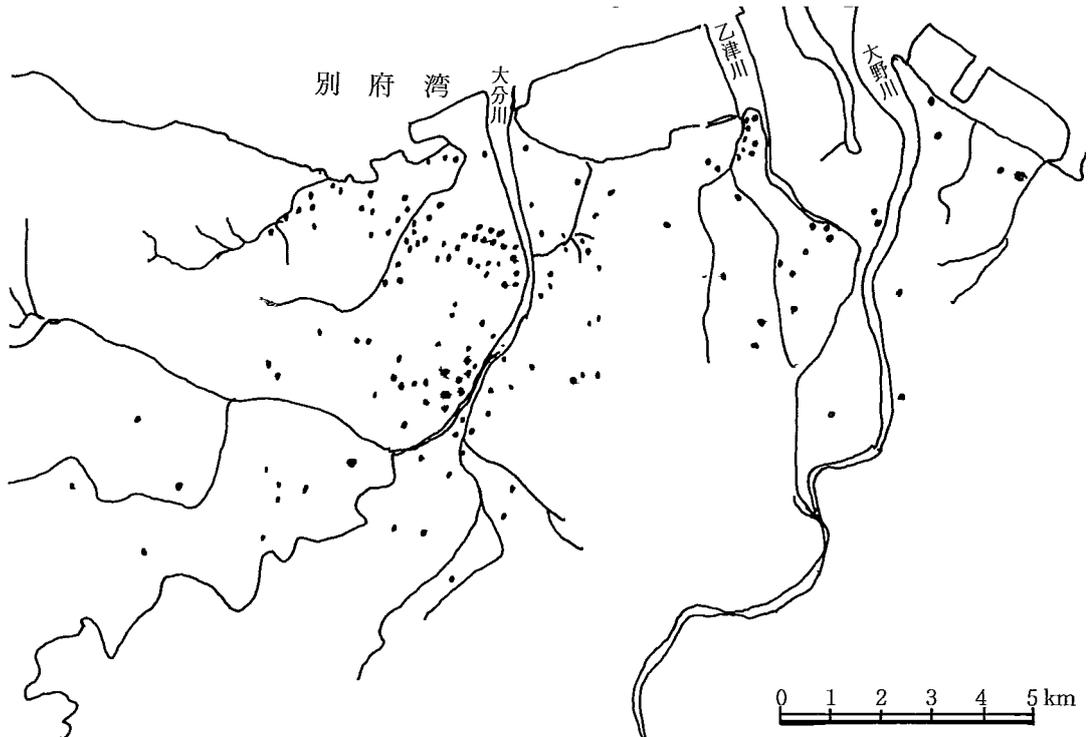


図4 1995年現在の源泉分布

4 化学成分濃度の現況と変化

今回化学分析を行った50口の源泉についての分析結果を表1に示している。この50口の源泉のうち36口の源泉の測定結果がデータベースに記載されていたので、化学成分の経年変化を確認することができた。その結果36口の源泉中17の源泉に有意な変化が見られた。

変化のパターンは次の4つに分類された。

Aタイプ：組成比は同じであるが成分濃度が上昇した。

Bタイプ：Na-HCO₃型の温泉であったものがClが増加してNa-Cl・HCO₃型に変化した。

Cタイプ：組成比は同じであるが成分濃度が減少した。

Dタイプ：Cl濃度が減少しNa-Cl・HCO₃型からNa-HCO₃型に変化した。

図5は上に示した変化のパターン別の源泉分布を示したものである。

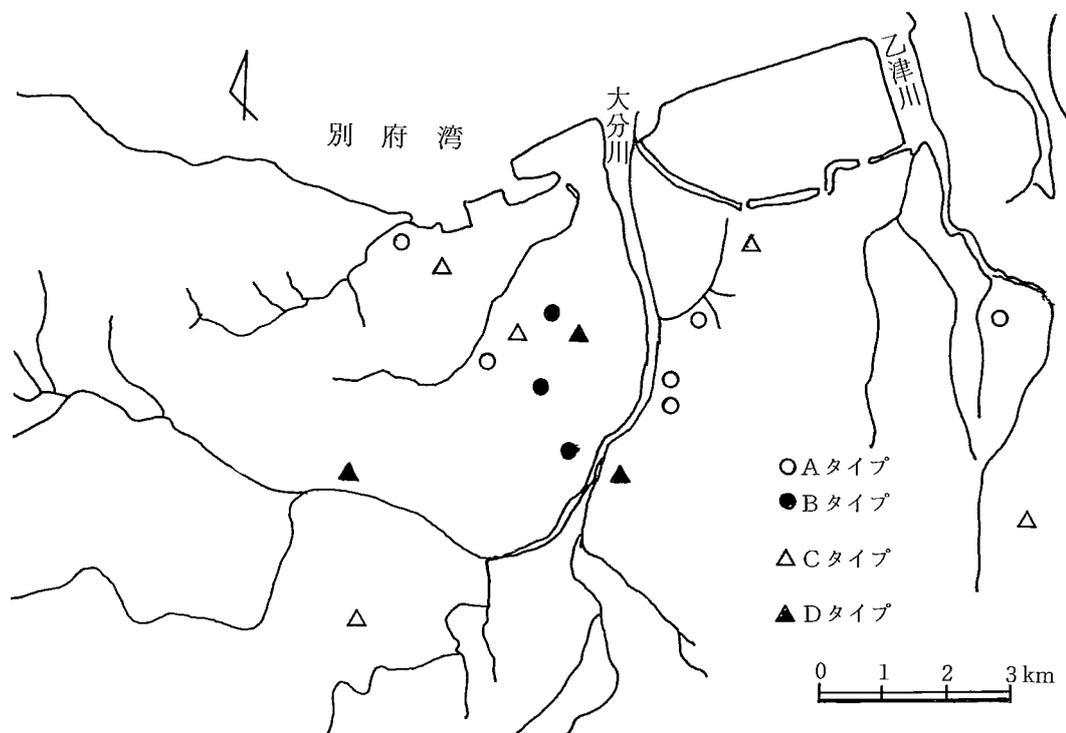


図5 変化のパターン別の源泉分布

5 アンケート調査結果

以下にアンケート結果を項目別に列挙する。()内の数字は回答数である。

1. 利用状況：利用している(60)、利用していない(15)
2. 湧出量：増えた(3)、変わらない(49)、減った(8)
3. 泉温：上がった(4)、変わらない(50)、下がった(6)
4. 成分：濃くなった(2)、変わらない(55)、薄くなった(3)

利用状況の問いに対して「利用していない」との回答が15人の所有者から寄せられているが、湧出量、泉温、成分濃度など、温泉の盛衰に関する問いに対しては、70%以上の所有者が変化はないと答えている。この中で温泉が「下がった」と回答した源泉について、掘削時と今回の現地調査の泉温を比較したところ、すべての泉温が下がっていた。

6. おわりに

以上、大分市の温泉の開発経過と現況について述べた。源泉の開発は今なお増加しつつあるが、その一方で利用されていない源泉が存在することが今回の調査で明らかになった。

化学成分の経年変化については36の源泉についてしか調査ができなかったが、そのうちの約半数の源泉に有為な経年変化を観測した。本報告は、温泉の成分濃度が変化する要因等の考察を割愛し、現況報告にとどめた。考察については、今後さらにデータを蓄積した段階で行いたいと考えている。

参考文献

- 1) 川野田実夫、志賀史光：大分市街地の源泉：リン・窒素および有機体炭素の分布、大分県温泉調査研究会報告、34、(1983)
- 2) 吉川恭三、北岡豪一：大分市における温泉源の分布、大分県温泉調査研究会報告、35、(1984)

別府地域の地震(2)

— 資 料 —

京都大学理学部附属地球熱学研究施設

由 佐 悠 紀・北 岡 豪 一
福 田 洋 一・大 沢 信 二
馬 場 秀 夫

別府地域を対象とした、京都大学理学部地球熱学研究施設(BGRL)の微小地震観測システムは、1993年3月26日に一応の完成をみた。その概要、および同システムによって観測された1995年12月までの地震データについては、昨年度の本報告第47号に述べられている。(由佐ほか、1996)。

その後も、このシステムは順調に稼動しており、地震データが蓄積されつつあるが、前回の報告に引続き、1996年1月から12月までの記録をここに報告する。

【地震活動の概要】

1996年1月から12月までの1年間に、このシステムで観測された近地地震の数は173個であった(末尾の震源リスト参照)。なお、ここでの近地地震とは、BGRLにおける初期微動継続時間(S-P時間)が約3秒以内のものである。これに先立つおよそ2年9ヵ月間の地震は268個であったから、1996年は地震活動が活発であったと言える。観測開始以来の日別地震発生頻度を図1に示すが、前年までと比べて、活発化したことが読み取れる。しかも、その発生は従来と同様に群発的なものが多く、別府地域の特徴が現れている。

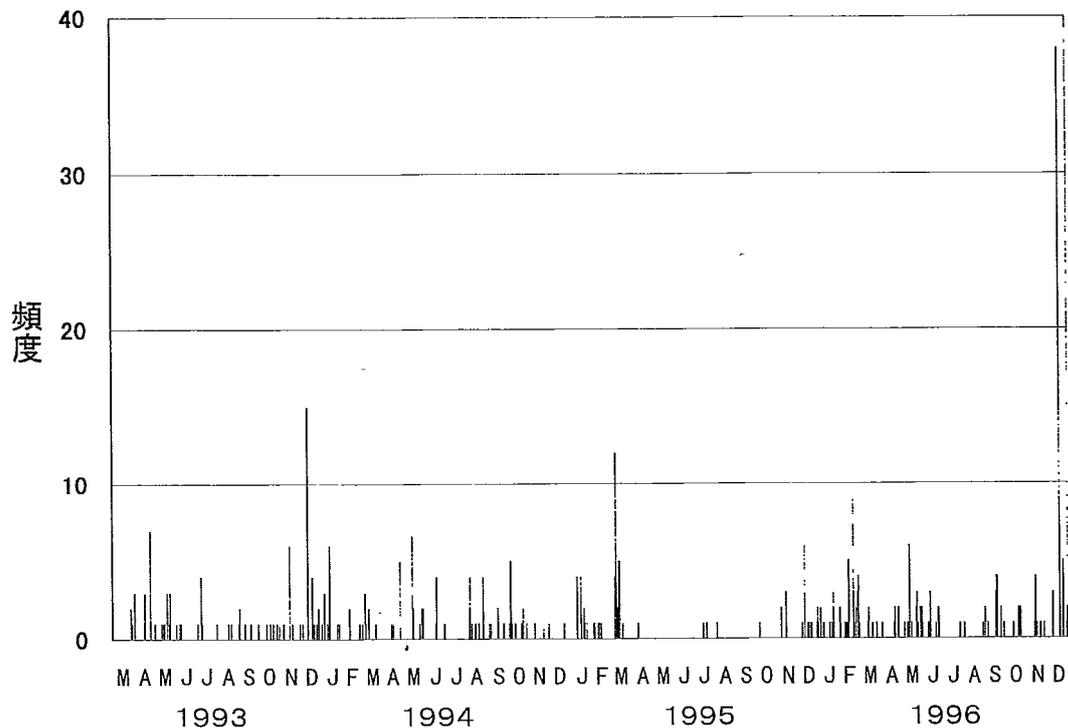


図1 日別の地震発生頻度：1993年3月28日－1996年12月31日

代表的な群発地震は、1996年12月19日の12時3分頃から17時43分頃までのもので、5時間40分の間に38回発生した。それらの震源位置(図2)は、鶴見岳から西側の、ほぼ由布院断層に沿って分布しており、最大のマグニチュードは3.05、深さは10kmより浅い。

前記の群発地震も含め、1996年の震源分布を図3に示す。前年までと同様に、ほとんど全ての地震が、別府北断層と朝見川-由布院断層に挟まれた地構内の、海面下16kmより浅い範囲で発生している。なかでも、大平山近辺での発生頻度が比較的高いのも、これまでと同様である。1996年の特徴としては、亀川および日出沖で発生したことが挙げられる。

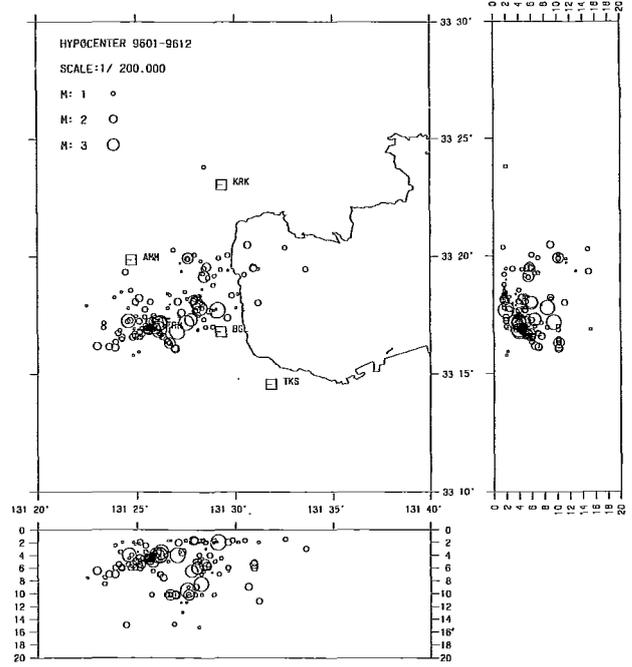
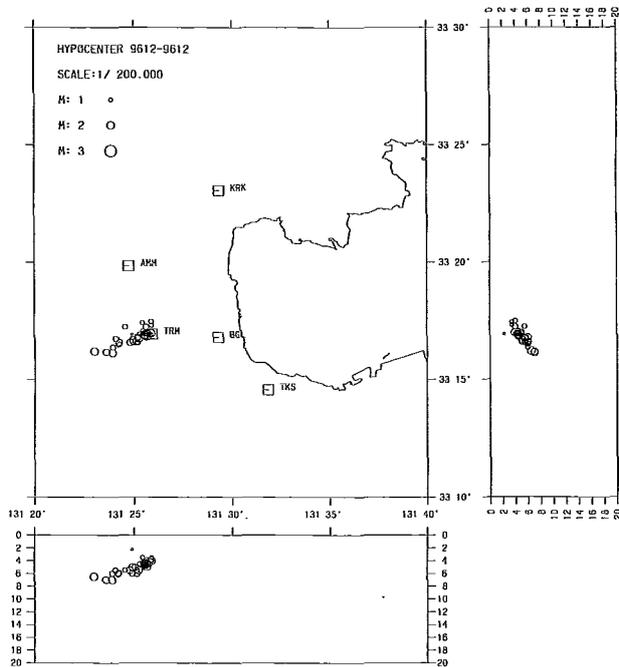


図2 1996年12月19日に発生した群発地震の震源分布

図3 別府地域の震源分布：1996年1月-12月

図4は、1996年におけるマグニチュードの頻度分布である。分布パターンには、前年までのものと大きな違いは認められない。参考のため、1993年から1996年までのすべての地震の頻度分布を図5に示した。

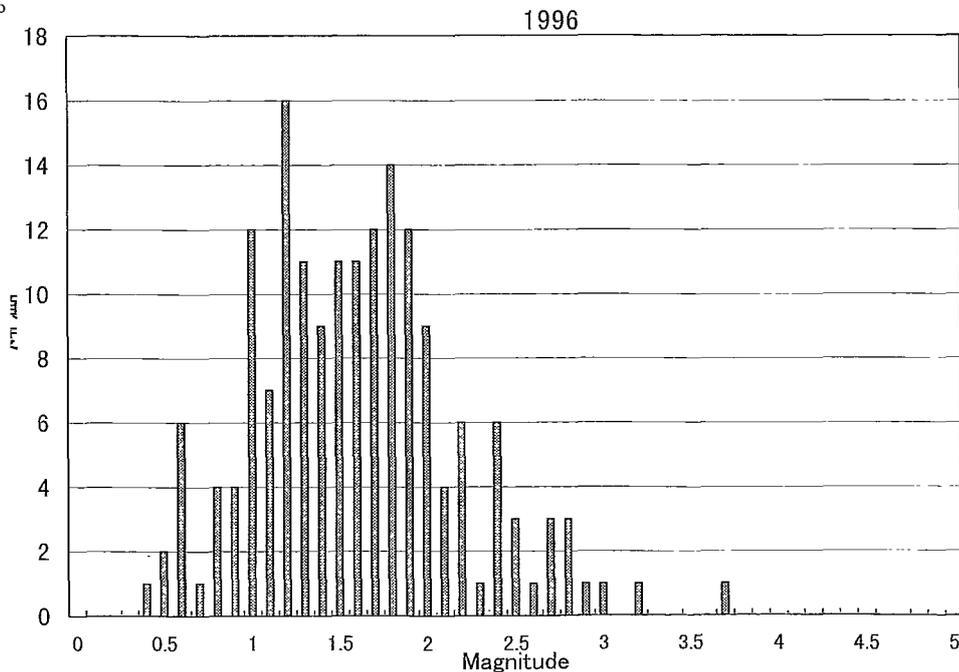


図4 マグニチュードの頻度分布：1996年1月-12月

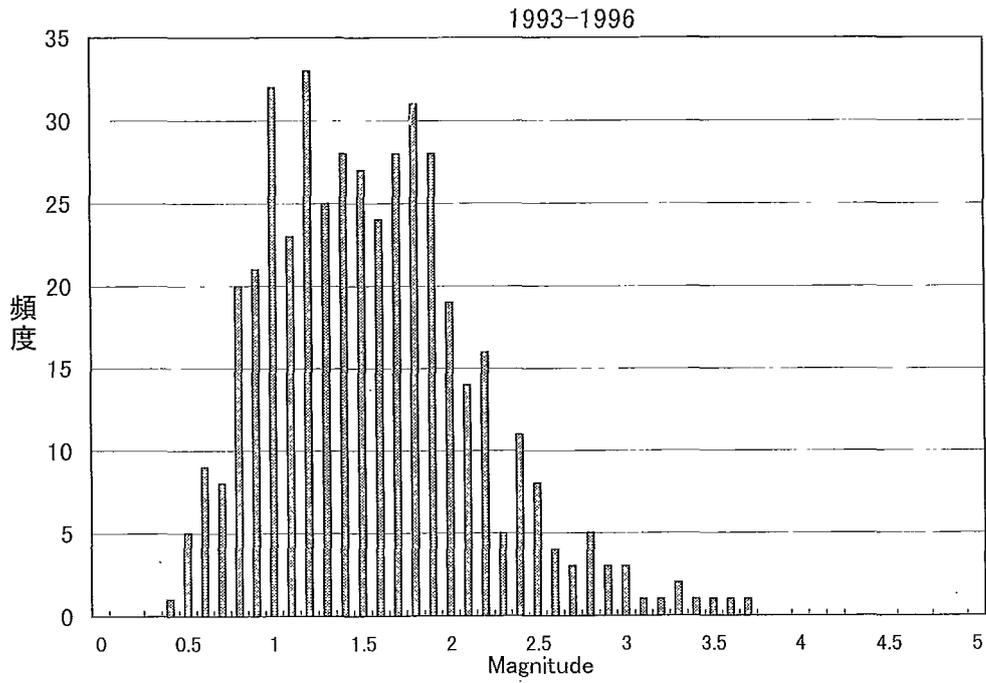


図5 マグニチュードの頻度分布：1993年3月28日－1996年12月31日

参考文献

由佐悠紀・北岡豪一・竹村恵二・福田洋一・大沢信二・馬場秀夫(1996)：別府地域の地震，大分県温泉調査研究会報告，47，13-20.

震源リスト

1996

○：九州管区気象台で観測されたもの

発震時 (JST) 年/月/日 時:分:秒	北緯 度 分	東経 度 分	深さ km	MAG	備考	発震時 (JST) 年/月/日 時:分:秒	北緯 度 分	東経 度 分	深さ km	MAG	備考
1996/01/01 13:42:09.41	33 17.34'	131 26.15'	4.00	1.18		1996/04/03 01:43:05.12	33 20.48'	131 30.64'	8.96	2.05	○
1996/01/04 04:04:08.99	33 17.10'	131 25.76'	4.50	1.72		1996/04/20 05:28:21.39	33 19.41'	131 29.65'	6.50	0.63	
1996/01/04 06:13:59.48	33 17.42'	131 26.35'	4.00	1.01		1996/04/21 21:50:44.43	33 19.18'	131 28.95'	5.00	1.22	○
1996/01/08 17:30:25.89	33 16.93'	131 28.13'	2.00	1.28		1996/04/21 21:51:05.56	33 19.15'	131 28.43'	5.50	3.24	○
1996/01/09 05:11:10.62	33 17.48'	131 26.33'	3.00	1.05		1996/04/22 02:21:29.81	33 19.10'	131 28.63'	5.50	1.33	○
1996/01/17 04:10:36.70	33 17.38'	131 26.65'	3.50	1.22	○	1996/04/26 20:42:01.42	33 17.76'	131 28.07'	5.00	1.80	○
1996/01/20 03:48:38.43	33 18.40'	131 26.54'	3.50	1.34	○	1996/04/26 21:23:38.58	33 17.71'	131 27.96'	5.00	1.59	○
1996/01/21 23:42:45.83	33 17.93'	131 25.02'	3.50	1.21		1996/04/27 04:27:24.55	33 18.09'	131 24.94'	5.00	1.82	○
1996/01/23 07:44:28.21	33 16.89'	131 28.10'	15.28	1.83	○	1996/04/27 12:37:54.43	33 19.29'	131 28.26'	7.00	1.14	
1996/01/23 08:10:24.98	33 17.59'	131 28.81'	6.70	1.66	○	1996/05/06 22:44:29.27	33 17.62'	131 27.27'	3.50	2.18	○
1996/01/23 21:36:24.14	33 17.73'	131 29.11'	2.00	1.02	○	1996/05/09 03:11:57.72	33 17.48'	131 27.17'	3.50	1.20	
1996/01/24 02:31:53.15	33 17.21'	131 27.53'	9.50	1.42		1996/05/11 03:06:21.26	33 19.27'	131 28.36'	6.50	1.30	
1996/02/01 01:51:47.08	33 17.28'	131 24.59'	4.00	1.09	○	1996/05/13 00:46:07.96	33 18.34'	131 28.23'	5.00	0.95	○
1996/02/01 21:57:03.72	33 18.03'	131 28.06'	6.00	1.84	○	1996/05/13 00:50:21.56	33 18.21'	131 27.57'	9.00	1.06	
1996/02/02 06:28:02.77	33 18.06'	131 28.05'	6.00	1.88		1996/05/13 01:06:38.73	33 18.29'	131 28.17'	5.00	1.54	○
1996/02/08 06:42:58.68	33 17.83'	131 28.21'	8.50	1.42		1996/05/13 01:59:35.12	33 18.28'	131 28.23'	5.50	0.90	
1996/02/09 10:41:13.41	33 17.33'	131 27.75'	6.50	1.63	○	1996/05/13 02:02:44.42	33 18.25'	131 27.94'	9.00	1.80	○
1996/02/11 14:52:37.13	33 17.19'	131 25.99'	4.00	0.85		1996/05/13 02:13:12.54	33 18.28'	131 28.05'	5.00	0.62	
1996/02/12 17:18:48.77	33 17.21'	131 26.21'	3.50	1.02		1996/05/16 09:37:16.40	33 18.04'	131 31.19'	11.20	1.89	○
1996/02/14 02:28:43.21	33 17.21'	131 26.16'	4.00	1.02		1996/05/23 16:44:36.79	33 19.23'	131 30.48'	1.70	1.66	○
1996/02/14 03:13:40.37	33 16.92'	131 26.12'	4.00	0.68		1996/05/23 17:14:40.50	33 19.47'	131 31.19'	2.00	1.32	
1996/02/14 04:06:57.88	33 17.16'	131 26.16'	4.00	1.16		1996/05/24 16:29:06.11	33 19.52'	131 30.94'	5.50	2.48	○
1996/02/14 07:50:35.21	33 17.19'	131 25.80'	5.00	0.97		1996/05/24 17:27:59.08	33 19.52'	131 30.96'	6.00	2.27	○
1996/02/14 08:06:18.14	33 16.82'	131 27.04'	4.00	0.57		1996/05/24 19:46:39.96	33 19.49'	131 30.96'	5.20	1.73	○
1996/02/21 01:21:45.42	33 19.93'	131 27.59'	10.20	3.75	○	1996/05/26 06:49:04.69	33 19.47'	131 33.61'	3.00	1.54	
1996/02/21 01:26:24.88	33 20.00'	131 27.58'	10.20	1.20		1996/05/29 04:21:21.71	33 17.77'	131 25.42'	2.50	2.02	
1996/02/21 01:32:20.94	33 20.08'	131 27.84'	10.20	1.42		1996/05/29 12:59:21.40	33 18.37'	131 26.68'	1.70	1.20	
1996/02/21 02:30:37.73	33 20.06'	131 27.91'	10.20	1.99	○	1996/05/31 02:37:19.84	33 17.83'	131 26.58'	5.00	1.24	○
1996/02/21 02:33:01.08	33 19.88'	131 27.47'	11.39	1.33	○	1996/05/31 02:39:13.36	33 16.72'	131 26.14'	4.50	1.27	○
1996/02/21 02:33:58.16	33 20.27'	131 26.85'	14.79	1.72		1996/06/01 21:34:38.60	33 17.81'	131 28.33'	1.70	1.46	
1996/02/21 02:35:51.50	33 19.88'	131 27.59'	10.20	2.07	○	1996/06/10 22:36:47.88	33 19.34'	131 24.43'	14.95	1.86	○
1996/02/21 02:36:12.57	33 19.90'	131 27.56'	10.20	2.24	○	1996/06/13 04:12:38.69	33 18.03'	131 28.45'	3.00	0.53	
1996/02/21 02:43:02.47	33 19.72'	131 27.19'	11.43	1.13		1996/06/13 04:19:42.56	33 18.02'	131 28.29'	4.50	1.02	
1996/02/22 16:44:53.96	33 18.27'	131 23.89'	2.50	1.63		1996/06/13 04:23:59.24	33 17.99'	131 28.47'	3.00	0.69	
1996/02/24 15:18:01.51	33 18.49'	131 24.24'	2.00	1.47	○	1996/06/21 23:03:00.11	33 20.36'	131 32.54'	1.50	1.21	
1996/02/25 13:01:22.98	33 17.37'	131 26.54'	4.00	1.06		1996/06/24 05:59:42.00	33 17.01'	131 28.51'	2.00	1.09	
1996/02/25 13:10:49.63	33 17.42'	131 25.77'	5.00	1.21		1996/06/24 22:16:15.98	33 17.73'	131 28.91'	2.00	0.89	
1996/02/27 11:09:59.69	33 19.37'	131 27.27'	12.94	1.69		1996/06/26 08:59:56.18	33 17.76'	131 28.86'	2.00	0.84	
1996/02/27 17:01:58.24	33 15.95'	131 25.09'	2.20	1.98	○	1996/06/26 16:37:43.12	33 17.75'	131 29.04'	2.00	0.86	
1996/02/27 19:12:23.11	33 15.80'	131 24.80'	2.00	1.93	○	1996/07/27 21:35:14.87	33 16.99'	131 23.34'	8.50	1.50	○
1996/02/28 04:37:37.87	33 17.98'	131 26.68'	1.70	0.92		1996/08/02 04:12:52.76	33 17.26'	131 25.14'	2.00	1.89	○
1996/02/28 09:01:30.95	33 17.94'	131 22.48'	7.50	1.68		1996/08/03 13:58:17.09	33 16.87'	131 24.15'	3.50	1.59	○
1996/02/28 09:02:50.86	33 17.86'	131 24.14'	5.00	1.22		1996/08/30 03:09:37.94	33 18.09'	131 25.70'	4.00	2.03	○
1996/02/28 09:18:02.20	33 17.82'	131 24.58'	4.50	2.01	○	1996/09/02 03:11:59.28	33 18.50'	131 27.45'	1.70	1.47	
1996/03/01 04:39:05.53	33 19.00'	131 28.58'	2.00	0.45		1996/09/02 17:47:45.53	33 18.57'	131 24.71'	4.00	1.65	○
1996/03/13 16:08:53.48	33 19.80'	131 28.25'	10.20	2.07	○	1996/09/06 09:15:55.16	33 19.49'	131 28.41'	6.00	1.75	
1996/03/14 18:28:11.90	33 16.12'	131 26.91'	10.20	1.83	○	1996/09/17 08:44:56.40	33 16.36'	131 26.63'	10.20	1.19	
1996/03/14 18:58:25.84	33 17.03'	131 28.88'	10.20	1.19		1996/09/17 14:46:11.79	33 16.33'	131 26.65'	10.20	1.42	
1996/03/20 03:07:12.05	33 16.10'	131 26.93'	10.20	2.27	○	1996/09/17 14:47:22.27	33 16.34'	131 26.65'	10.20	2.82	○
1996/03/26 05:09:39.77	33 16.49'	131 26.47'	10.20	1.37		1996/09/18 06:21:17.85	33 16.29'	131 26.70'	10.20	1.03	

震源リスト

1996

○：九州管区気象台で観測されたもの

発震時 (JST) 年/月/日 時:分:秒	北緯 度 分	東経 度 分	深さ km	MAG	備考	発震時 (JST) 年/月/日 時:分:秒	北緯 度 分	東経 度 分	深さ km	MAG	備考
1996/09/18 15:05:43.30	33 16.40'	131 26.57'	10.20	1.62		1996/12/19 15:36:13.79	33 16.83'	131 25.68'	4.50	2.43	
1996/09/18 20:53:02.10	33 17.05'	131 26.47'	4.00	1.33		1996/12/19 15:40:19.20	33 16.58'	131 25.17'	5.00	1.79	
1996/09/18 21:44:21.14	33 17.83'	131 30.07'	2.00	0.72		1996/12/19 15:41:32.04	33 16.93'	131 25.85'	4.00	1.57	
1996/09/19 22:39:41.40	33 18.10'	131 28.17'	1.70	1.24		1996/12/19 15:42:56.08	33 16.50'	131 24.23'	6.00	1.82	
1996/09/20 08:13:13.88	33 18.16'	131 27.85'	1.70	1.53		1996/12/19 15:43:58.35	33 16.92'	131 25.71'	4.50	1.98	
1996/09/20 08:23:45.19	33 18.10'	131 27.87'	1.70	1.76		1996/12/19 15:46:00.86	33 16.92'	131 25.78'	4.50	1.99	
1996/09/20 08:27:09.31	33 18.13'	131 27.91'	1.70	2.09	○	1996/12/19 15:47:41.71	33 17.01'	131 25.62'	4.50	2.45	○
1996/09/20 14:17:41.75	33 17.98'	131 28.33'	1.70	1.77		1996/12/19 15:48:48.90	33 16.89'	131 25.52'	4.50	2.57	○
1996/09/25 04:01:17.29	33 17.70'	131 28.68'	4.00	1.96	○	1996/12/19 15:49:38.52	33 16.98'	131 25.54'	5.00	2.25	
1996/09/25 16:45:19.53	33 19.56'	131 28.56'	5.70	2.91	○	1996/12/19 15:52:17.99	33 16.99'	131 25.86'	4.00	2.77	○
1996/09/29 06:09:03.28	33 18.80'	131 28.89'	1.70	1.70		1996/12/19 15:54:19.96	33 17.26'	131 25.61'	4.00	2.26	○
1996/10/12 16:39:43.20	33 18.40'	131 30.14'	2.00	1.02		1996/12/19 15:54:43.16	33 17.07'	131 25.46'	4.50	1.97	
1996/10/20 01:41:09.99	33 18.44'	131 26.58'	1.70	1.21		1996/12/19 16:17:09.42	33 17.49'	131 25.86'	4.00	1.90	○
1996/10/20 21:22:23.07	33 18.62'	131 28.31'	1.70	0.67		1996/12/19 16:59:44.59	33 16.60'	131 25.04'	5.00	2.15	○
1996/10/23 07:23:22.80	33 20.05'	131 29.63'	6.00	1.76		1996/12/19 17:42:47.04	33 16.75'	131 24.07'	5.50	1.58	
1996/10/23 09:10:01.18	33 19.44'	131 29.26'	4.50	1.34		1996/12/24 04:09:19.40	33 16.72'	131 26.19'	7.00	1.50	
1996/11/12 08:50:22.28	33 16.89'	131 25.71'	10.20	1.64		1996/12/24 05:08:58.11	33 16.62'	131 26.31'	7.50	1.93	
1996/11/14 01:02:03.73	33 23.81'	131 28.44'	2.00	1.20		1996/12/24 05:12:02.43	33 16.61'	131 26.33'	7.50	1.73	
1996/11/14 11:54:11.57	33 17.34'	131 28.43'	2.00	1.53		1996/12/24 05:55:24.01	33 17.05'	131 25.80'	6.50	1.13	
1996/11/14 12:56:49.46	33 18.35'	131 29.84'	1.70	1.81		1996/12/24 05:59:59.14	33 16.75'	131 26.16'	7.00	1.65	
1996/11/14 14:57:58.85	33 17.40'	131 29.62'	2.00	2.05		1996/12/29 21:57:03.57	33 18.24'	131 25.14'	4.50	2.48	○
1996/11/16 17:06:31.47	33 18.10'	131 27.08'	2.00	2.19		1996/12/30 08:42:13.02	33 17.78'	131 29.05'	2.00	0.64	
1996/11/21 21:20:32.63	33 17.01'	131 26.09'	3.50	1.38		1996/12/30 21:20:59.43	33 17.54'	131 28.14'	4.00	1.70	○
1996/11/26 02:48:32.53	33 19.93'	131 29.16'	7.00	1.49							
1996/12/09 01:00:49.52	33 17.48'	131 24.98'	5.50	1.20							
1996/12/09 03:53:20.86	33 17.20'	131 23.36'	7.50	1.34							
1996/12/09 05:05:25.81	33 17.30'	131 24.68'	6.00	1.95	○						
1996/12/19 12:02:58.01	33 16.97'	131 25.46'	5.00	1.59	○						
1996/12/19 12:04:23.40	33 16.94'	131 24.89'	2.27	1.30							
1996/12/19 12:15:14.83	33 16.95'	131 25.53'	4.50	1.83	○						
1996/12/19 12:16:01.01	33 16.62'	131 24.91'	6.00	2.17	○						
1996/12/19 12:17:13.04	33 16.59'	131 24.78'	5.50	2.56	○						
1996/12/19 12:18:12.66	33 16.18'	131 23.59'	7.00	2.49	○						
1996/12/19 12:19:17.43	33 16.81'	131 25.14'	6.00	2.39	○						
1996/12/19 12:22:20.90	33 16.76'	131 25.22'	5.50	2.76	○						
1996/12/19 12:28:26.48	33 17.26'	131 24.55'	5.50	1.91							
1996/12/19 12:28:54.09	33 17.00'	131 25.68'	5.00	2.21	○						
1996/12/19 12:53:04.33	33 16.14'	131 23.90'	7.00	2.74	○						
1996/12/19 13:12:37.41	33 17.32'	131 25.88'	3.50	1.47							
1996/12/19 13:23:29.49	33 16.95'	131 25.27'	4.50	1.65							
1996/12/19 13:25:11.79	33 16.21'	131 22.99'	6.50	2.81	○						
1996/12/19 15:21:00.39	33 16.38'	131 23.91'	6.00	2.09	○						
1996/12/19 15:22:01.20	33 16.70'	131 24.91'	5.00	2.56	○						
1996/12/19 15:22:34.41	33 16.92'	131 25.55'	4.50	2.64	○						
1996/12/19 15:25:33.82	33 16.91'	131 25.52'	4.50	3.05	○						
1996/12/19 15:27:47.53	33 16.58'	131 24.22'	6.00	2.46	○						
1996/12/19 15:32:28.10	33 16.87'	131 25.61'	4.50	2.86	○						
1996/12/19 15:33:04.73	33 16.61'	131 25.14'	5.50	1.99							
1996/12/19 15:34:50.96	33 16.83'	131 25.49'	4.50	1.89							
1996/12/19 15:35:54.05	33 17.45'	131 25.42'	3.50	1.70							

伽藍岳の地熱調査(3)

— 自然電位測定による熱水流動系解明の試み —

京都大学理学部附属地球熱学研施設

大羽 成 征・田 中 良 和
由 佐 悠 紀

1 はじめに

伽藍岳(標高1045m)は、鶴見連山の北端部に位置する比高350mの鐘状火山で、鶴見連山の中でもっとも強い地熱活動兆候を持っている。山体の南斜面には過熱蒸気をふくむいくつもの噴気孔がひらき、また硫酸酸性を呈する温泉水の流出があるために、岩石は強い変質を受け、オパール化の非常に進んだ領域も見られる。

Allis and Yusa(1989)は、こうした特徴および噴気地での掘削井から得られた水位と温度プロフィールなどの資料に基づき、この山体内部には液体の水と蒸気とが共存する二相流系が存在していると結論した。一方、由佐ら(1996)は、この山体からの主要な放熱形態は地面を通しての熱放散であること、および、その機構は二相流過程によって説明できる可能性のあることを示した。しかしながら、山体内部もしくはその地下のどこに、どのようにして、そうした二相流系が実現しているかは十分にわかっているとはいえない。

自然電位法は、地下における流体の流動を地上において検出することのできる唯一の手段である。

一般に、地表面の電位は場所によって異なる。地表面で観測される電位は、地表上の磁場変動に誘導され比較的早い周期で変動する成分と、地表下の原因による時間的に比較的一定なものに大別され、前者を誘導電位、後者を自然電位と呼ぶ。自然電位の生成には地下の流体の流動に伴う流動電位が深く関わっているため、自然電位を観測することによって地下の流体の流動を検出することができる。また、流動電位は地下の比抵抗構造からも、大きな影響を受けるため、比抵抗構造の把握も必要である。

本研究は、この自然電位測定の手段を伽藍岳を中心とした地域に適用し、併せて比抵抗調査も行っており、二相流を含む地熱流体の流動構造を明らかにすることを目的としている。その第一歩として、1996年の夏から秋にかけて、予察的な自然電位測定と比抵抗調査を行ったので、これらの結果と若干の考察を述べる。

2 自然電位について

地熱地帯における自然電位測定は、これまでにいくつもの前例がある。

Corwin and Hoover(1979)は、世界中に分布する地熱地域の自然電位について、それぞれが大きさや強さなどで様々な様相を呈していることを論じた。また、最近の研究として、Thanassoulas and Lazou(1993)は、ギリシャのNestos Delta地熱地帯において自然電位測定を行い、断層に沿って自然電位の双極的異常がみられることを示した。また、Zlotnicki et.al.(1994)は、フランス領 Lesser Antille, GuadeloupeのLa Soufrière火山において自然電位測定を行い、粘土変成の進んだ地域では、なめらかで弱い自然電位異常(250mV未満)が見られることを示した。また、その測定の5年前に行われた測定結果と比較して、その間の火山活動に伴う自然電位異常の変化を検出した。

自然電位異動は、しばしば地上で見られる地熱兆候の位置と関連を持ち、噴気や湧水の存在するところではおおむね正の異常が見られる。また、火山活動の変化にもなって自然電位が変化することも知られており (Zlotnicki et al., 1994; Hashimoto and Tnaka, 1995)、火山活動や地熱活動のモニター手法としても自然電位測定が有力視されている。

地熱地帯における自然電位の生成の原因として、熱電気効果、地化学電池、界面動電現象などが考えられる。熱電気効果は温度勾配にもなう電位差生成のことであり、数mV/°C程度の大きさの電位源となる。地化学電池は液体のイオン濃度勾配に伴うもの、酸化還元半電池反応によるものなどがあり、前者からは最大100mV後者からは最大500mV程度の電位差が生ずる。界面動電現象は、液体が固体と接触しながら流れるときに生じる電氣的現象であり、これによってつくられる電位は流動電位と呼ばれる。たとえば、多孔媒質中に水が流動する際には媒質によって異なるが、 $-10 \sim +200 \text{mV/atm}$ の大きさの電位差が生じることが知られている。

これらの内で、多くの場合界面動電現象のみが有力視されるのは、他の原理から生じうる電位差が小さいためである。後述するように、本研究では伽藍岳において最大2Vの電位差がみられたが、これを説明する際には界面動電現象がもっと有力な成因モデルである。以下に、流動電位発生メカニズムについて現在受け入れられている理論を概説する。

固体と液体とが接触すると、それらの二相界面で電気二重層がつくられる。多くの岩石について、電気二重層は、その液体側が正に帯電する極性である。

電気二重層の正に帯電した液体部分が、固体に対して相対的に運動することで、電荷が運ばれる。これを携帯電流という。

電流密度を I 、液体の体積フラックスを J 、地電位を ϕ 、液体の圧力を p とすると、これらの関係は、非平衡力学に基づいて次のように表現することができる。

ここで、(1)の右辺第1項はohm's lawに当り、係数 L_{ee} は、

$$\begin{cases} I = -L_{ee} \nabla \phi - L_{ev} \nabla p, & (1) \\ J = -L_{ev} \nabla \phi - L_{vv} \nabla p. & (2) \end{cases}$$

ただし、 ρ は考える領域の比抵抗である。

$$L_{ee} = \frac{1}{\rho}, \quad (3)$$

また流動媒体が多孔質のとき、(2)式の右辺第二項はDarcy's lawそのものであり、係数 L_{vv} は次のように表せる。

ただし、 k は地層の固有透水系数、 μ は流体の粘性係数である。

$$L_{vv} = \frac{k}{\mu}. \quad (4)$$

そして、 L_{ev} と L_{ve} は、カップリング係数と呼ばれ、capillary model (流体が毛細管の中でポワズ流をなして流れるものとする) にもとづけば、次のように表される。

ただし ϵ は水の誘電率、 ζ はゼータ電位 (電気二重層の液体側面の電位) であり、多くの岩石につ

$$L_{ev} = L_{ve} = \frac{\epsilon \zeta}{\mu}. \quad (5)$$

いて $\zeta < 0$ である。Ishido and Mizutani(1981)はこのゼータ電位が岩石の種類と液体の温度やpHに強く依存する量であることを実験によって明らかにし、地熱地帯の自然電位を決定する主要な要因であると考えた。

与えられた圧力勾配(流動場)のもとで定常状態が達成されれば、非平衡熱力学より、 $I = 0$ となる。したがって、(1)、(5)式より、電位勾配の発生に関する次の関係が導かれる。

なお、係数 $\rho \varepsilon \zeta / \mu$ は、流動電位係数と呼ばれる。

$$\nabla \phi = \frac{\rho \varepsilon \zeta}{\mu} \nabla p. \quad (6)$$

ここに述べた非平衡熱力学力的な扱いが可能であるためには、以上の係数がそれぞれ、局所的に一様である必要がある。現実の微視的地下構造は必ずしもこれを満たしているとはいえず、とりわけ、気液二相の存在する不飽和領域や二相対流セル領域における流動電位を定量的に扱えるようなモデルは、現段階において十分に確立されているとはいえない。しかし、定性的にはあるが、Antraygues and Aubert(1993)は室内実験によって、湿り蒸気の流れが乾き蒸気や水の流れに比べて非常に大きい流動電位を発生することを示している。

3 伽藍岳における自然電位測定結果

調査法：

調査対象域(図1)は、伽藍岳山頂を中心とした東西2km南北2kmの範囲である。実際に観測した測線を図1に細実線で示した。また、測点は、各測線について25m間隔で取った。

使用した電極は、銅—硫酸銅電極である。

電極の接地は、インピーダンスを下げるため表土の乾燥したところを避け、土の表面を掻き取るなどして現れた表土の湿潤面に電極底を接触させるように注意して行った。

調査結果：

サーベイの結果を等電位線図の形で、図1の太線に示す。破線部分は測点がないところをなめらかに補った。

(山頂部について)

伽藍岳山頂部は東西二つの山頂に分かれているが、そのうち西山頂部を中心とした狭い範囲に、鋭い負の異常が存在する。この異常の周りの電位は、最大で10mV/mの勾配をもち、また、500m離れた東山頂との間に1600mVの電位差があった。

(南斜面について)

南斜面の変質帯・噴気地を中心に、広い範囲で正の異常がある。この異常は今回の調査範囲の外まで広がっている。また、この正異常と、西山頂の負異常との間には、標高差150m、距離300mの近さにも関わらず、2000mVの電位差が存在する。これは、地熱地帯のこれまでに知られている自然電位異常のなかで、特に大きな部類に入る。

(北斜面について)

北斜面では、標高と自然電位とはおおむね比例関係にあった。これと同様な、標高と電位の比例関係は、多くの山地で見られ、これを地形効果と呼ぶ。

また北斜面の中腹部では、地形勾配のおおきなところであるにもかかわらず、電位勾配のほとんど見られないような範囲が、約200mの幅で見られた。

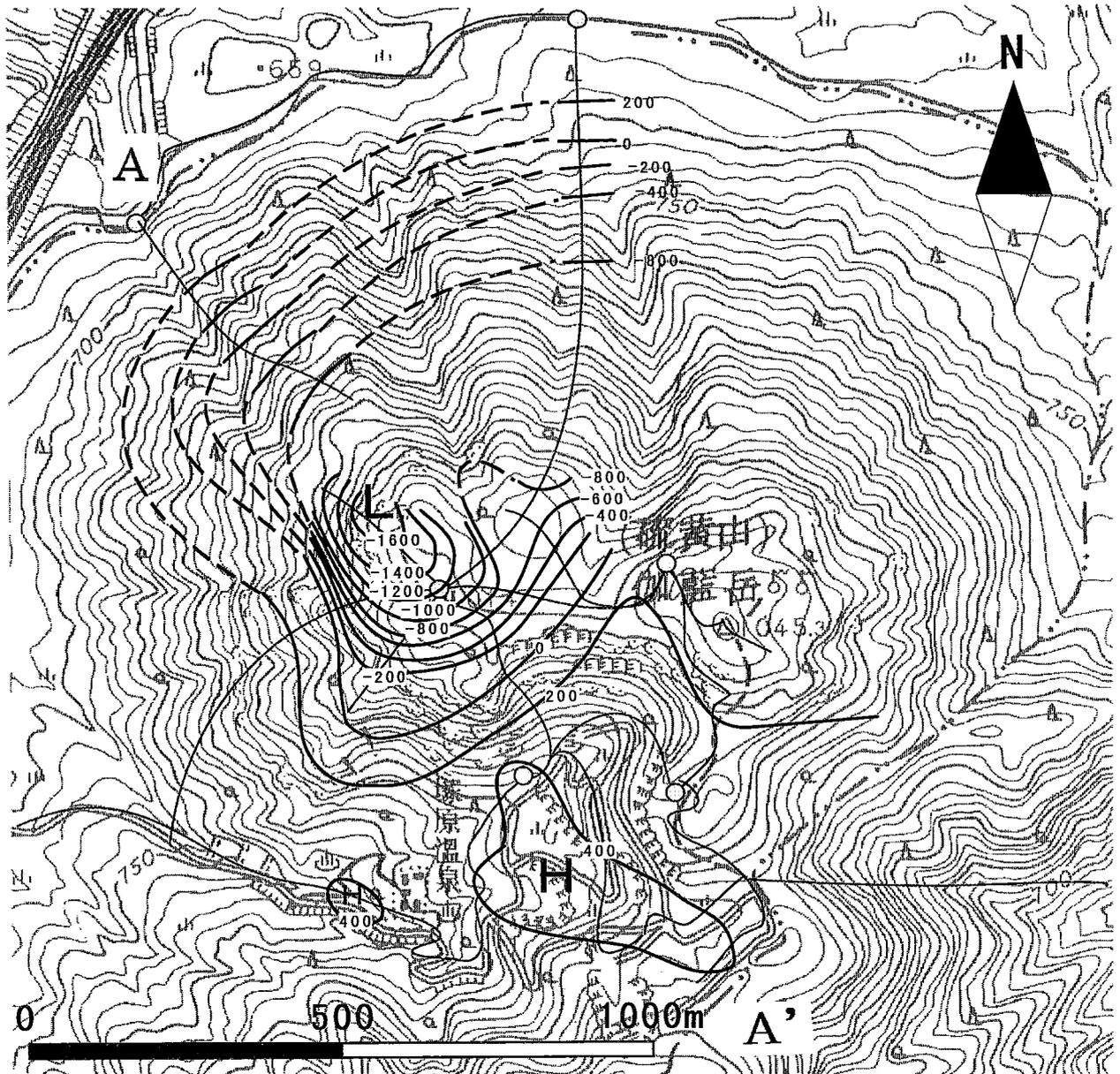


図1 伽藍岳周辺2 km四方の自然電位異常。細い実線は測線。太い実線は自然電位異常等電位線で、数字の単位はmVである。太い破線は測点の足りないところをなめらかに補った。地図上のA-A'の断面を図4に示した

4 比抵抗測定効果

伽藍岳周辺の比抵抗構造については、これまでにNEDO(新エネルギー・産業技術総合開発機構)が鶴見岳地域を対象にしてMTおよびCSAMTの調査を行っている。

図2は、伽藍岳周辺の深さ250mにおける比抵抗値を、NEDOによる解析結果に基づいてプロットしたものである。これによれば伽藍岳の山体から東側にかけて低比抵抗、特に噴気地を中心として $1 \Omega\text{m}$ 程度の比常に導電的な地層が広がっている。

これを補充するために、山体の南部、山頂部、山体北側の麓の三カ所でシュランベルジャー直流法電気深査を行った。その結果を図3に示す。地図上の太い実線が測線であり、グラフ上のポイントが見かけ比抵抗、グラフ上の実線が次元解析結果である。これを見ると、山体南斜面の広い自然電位正異常域の地下は、深さ5 m以深で $2 \Omega\text{m}$ となっており、異常に比抵抗が低い。周囲の地表

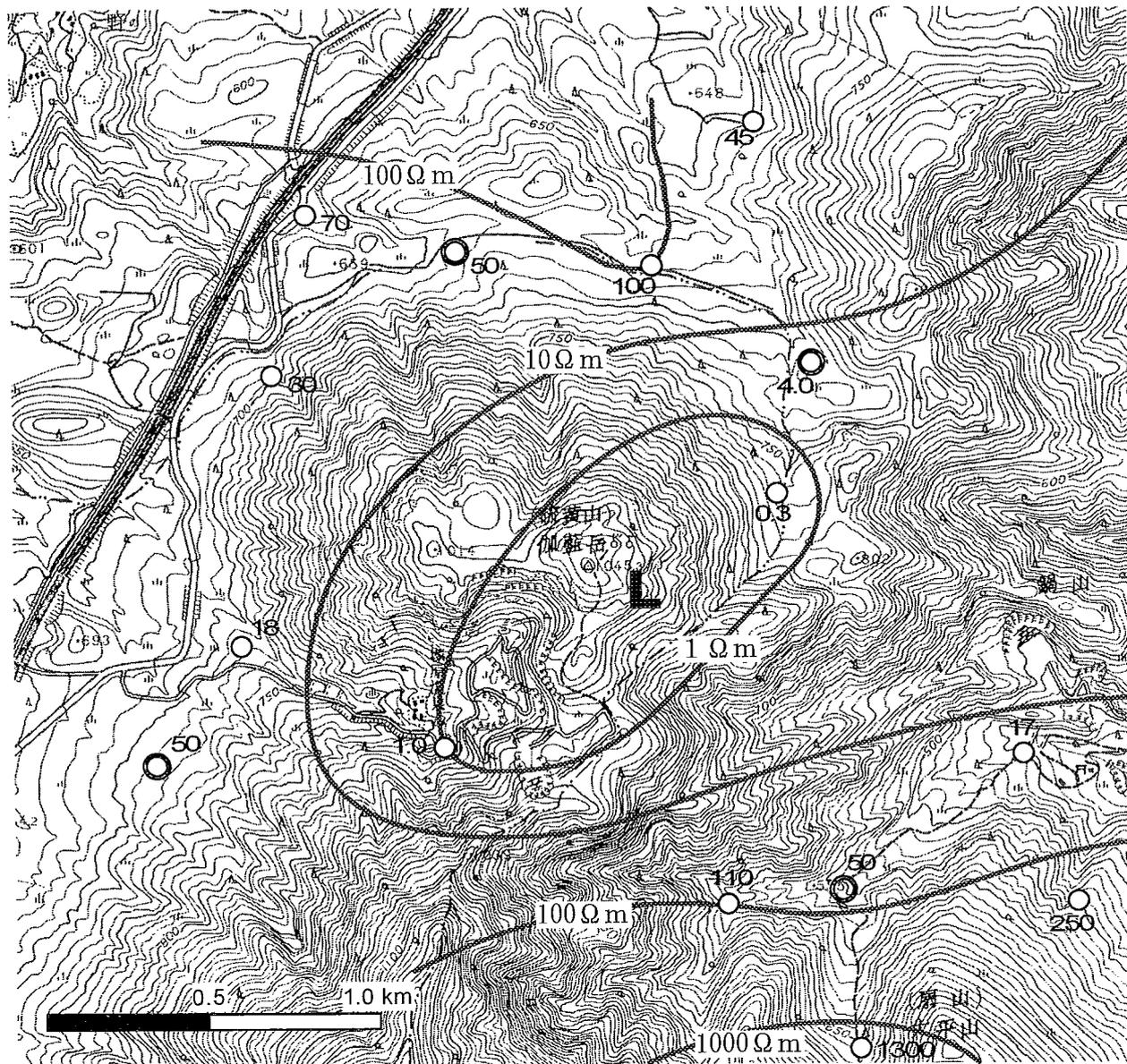


図2 NEDO(新エネルギー・産業技術総合開発機構)による、CSAMT測定一次元解析結果からみた、加藍岳周辺の地表下250mの比抵抗。○印は、測点の位置である。

兆候をあわせて見ると、この低比抵抗帯は酸性変質帯に対応するものである。この測点のデータから、酸性変質帯が、浅くとも数百メートルの深さまで広がっていることがわかる。

また、山頂部及び山体北部の比抵抗が500~5000 Ω mと高いことから、異常中心部の低比抵抗領域が山頂部やその直下までは達していないことがわかる。そして比抵抗値が山体南部と山頂部・山体北部との間で顕著に違うことから、顕著な地質構造境界がその間に存在するものと推定できる。

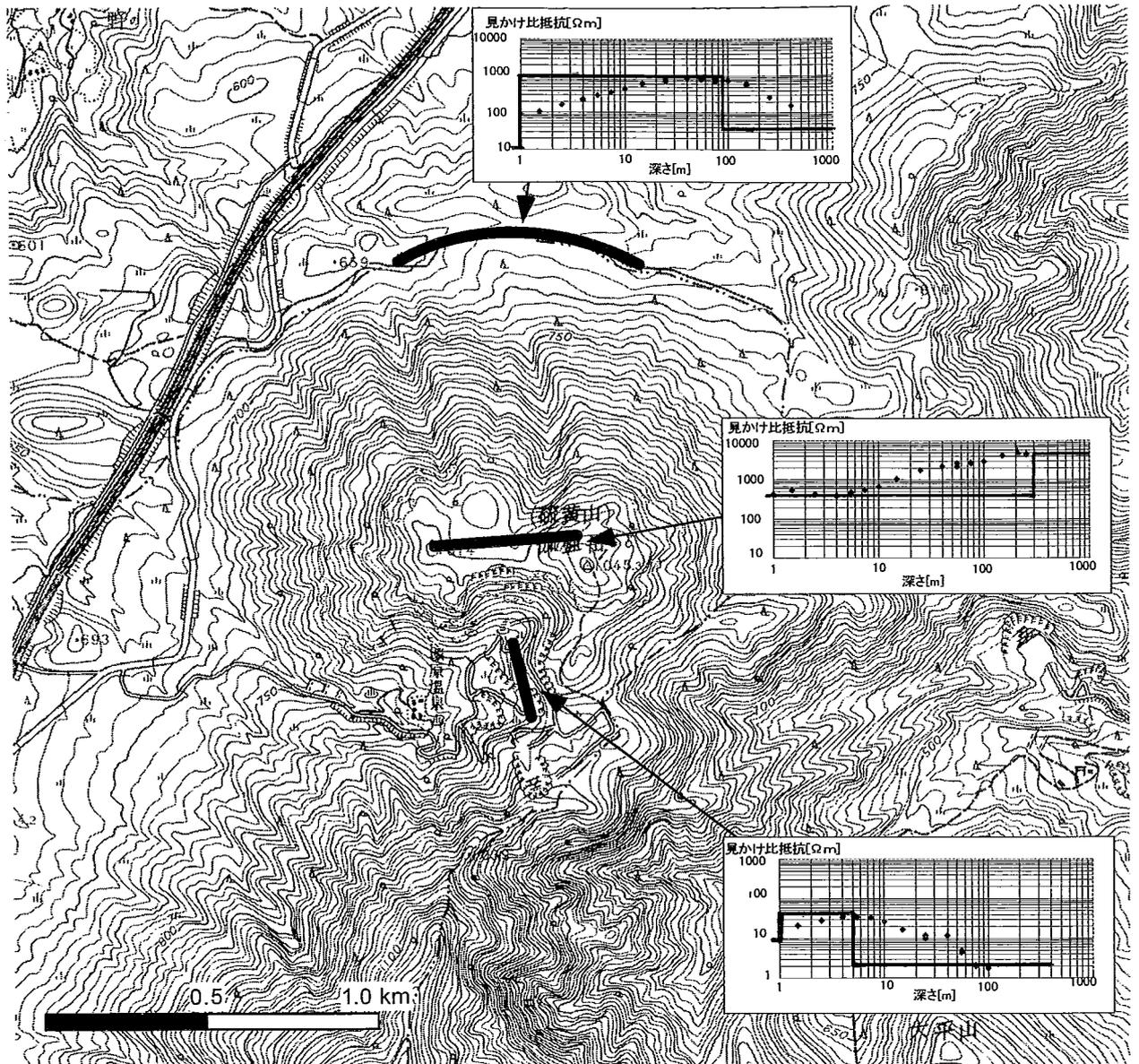


図3 シュランベルジャー直流法比抵抗電気探査の結果。太線は測線、グラフ上の点は見かけ比抵抗、実線は一次元解析結果である。

5 若干の考察

山体南斜面の正異常は、噴気や岩石の変質などの地表兆候から見て、その直下の地熱活動に直接対応していると考えられる。伽藍岳直下の地熱活動が主に二相対流系によっているという由佐ら(1996)の主張に基づけば、蒸気は上向きに流れ、凝縮水は全体として下向きに流れていることになる。二相対流セルが、蒸気の流れる方向に向かって正の電位勾配をつくるという、Antraygues and Aubert(1993)の実験結果を参照すれば、このモデルと、今回の推測された正異常とは調和的である。また、この正異常の広がり数が数百メートルを超える大きなものであることから、これに対応する地熱活動も、個々の噴気孔程度のものでなく、すくなくとも数百メートル程度広がりを持った対流セルであろうと考えられる。

西山頂部の大きな負異常は、山頂において一般的に見られる地形効果として考えられる。地形効

果は、標高が高くなるのに比例して自然電位が低くなる傾向のことで天水が地形に沿って下降するに伴う流動電位が成因であると考えられている。

図1のA-A'の断面における標高、自然電位推定値および、地形効果補正後の自然電位異常値を図4に示す。自然電位測定値はAから600mほどの範囲で、ほぼ標高に比例している。この比例関係を地形効果として解釈し、A-A'全体の自然電位推定値から標高に比例した成分を引き去る補正を行った。地形効果を補正すると、伽藍岳の南東側全体に比べて、約1300 mV高電位であることがわかる。また、東山頂部は南斜面と比べほぼ等電位ではあるが、標高が高い

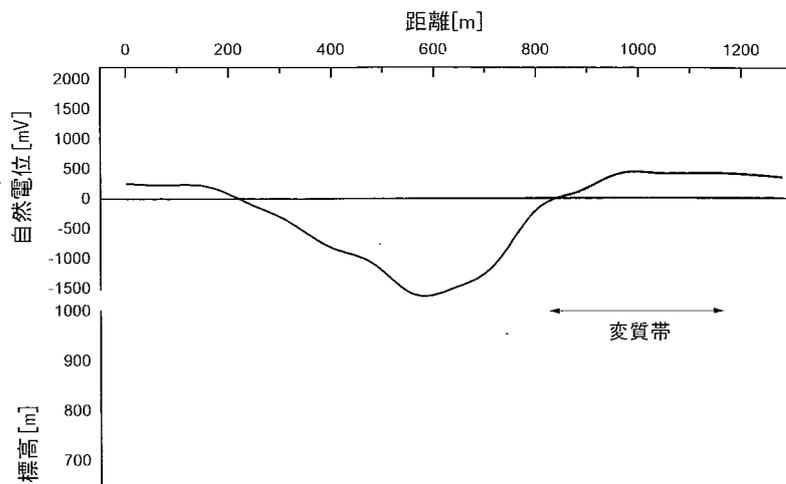


図4 図1のA-A'断面図。上の実線は自然電位、上の塗りつぶしは地形効果を補正したもの。下の塗りつぶしは標高である

ことを考慮すると、自然電位異常としては、正の方向に更に大きなものであることが分かる。

伽藍岳南東側の正異常領域の広がり今回の観測範囲の外まで広がっており、今後、より広範囲の測定が求められる。

6 まとめ

伽藍岳を中心とした地域で、自然電位調査および、直流法比抵抗電気調査を行った。

自然電位調査によって、最大2 Vに達する顕著な異常が発見された。

この異常は、地形効果を考慮すると、噴気地帯を中心とした半径300m以上の範囲にわたる、大きさ1300mV程度の正の異常である。これは直下の二相対流によってつくられたものと推定される。

直流法比抵抗電気深査によって、噴気地帯の低比抵抗層が数百mの深部に達することがわかり、山頂部および、その直下では高比抵抗がみられた。これは、酸性変質帯と非変質帯との違いを示すものと考えられた。

正の自然電位異常領域は、今回の観測範囲の外にまで伸びている。この広がり二相対流セルの広がりに対応しているものと考えられるから、これを知ることは伽藍岳周辺の水理系、地熱系を理解する上で大変重要である。自然電位測線のカバーする範囲に更に広げていく必要がある。

また、伽藍岳の比抵抗構造はかなり強いコントラストを持っており、これが自然電位分布に大きな影響を与えている可能性がある。より詳しい比抵抗構造探査と共に、比抵抗構造の自然電位に与える影響について与える影響について詳しい考慮が必要である。これも今後の課題である。

参考文献

Allis, R.G. and Yusa(1989):Fluid flow processes in the Beppu geothermal system, Japan, Geothermics, 18, 743-759.

Antraygues, P. and Aubert, M.(1993):Self-potential generated by two phase flow in a porous medium: Experimental study and volcanological applications, J. Geophys.Res.,98

22273-22281.

Corwin, R.F. and Hoover, D.B.(1979): The self-potential method in geothermal exploration, *Geophysics*, **44** 226-245.

Hashimoto, T. and Tanaka, Y.(1995): Large self-potential anomaly on Unzen volcano, Shimabara Peninsula, Kyushu island, Japan, *Geophysical Research Letters*, **22**, 191-194.

石戸経士(1981): 地熱水対流に伴う流動電位—地熱地域における自然電位異常の1つのメカニズムとして—, *Journal of the Geothermal Research Society of Japan*, **3**, 87-100.

Ishido, T. and Mizutani, H(1981): Experimental and theoretical basis of electrokinetic phenomena in rock-water systems and its applications to geophysics, *J. Geophys. Res.*, **86**, 1763-1775.

NEDO(1989): 昭和63年度全国地熱資源総合調査(第3次)広域熱水流動系調査 鶴見岳地域比抵抗(MT, CSAMT法)調査報告書 要旨

Thanassoulas, C., and Lazou, A.(1993): The Nestos Delta geothermal field and its relation to the associated self potential(SP) field, *Geothermics*, **22** 117-134

由佐悠紀、大沢信二、北岡豪一、福田洋一(1996): 伽藍岳の地熱調査(2), 大分県温泉調査研究会報告, **47**, 7-11

Zlotnicki, J., Feuillard, M., and Hammouya, G. (1994): Water circulations on La Soufrière Volcano inferred by self-potential surveys (Guadeloupe, Lesser Antilles). Renew of volcanic activity?, *J. Geoelectr.*, **46** 797-813

トリチウムから推定される九重硫黄山における深部水循環

京都大学理学部

北岡 豪一・大沢 信二
大上 和敏・由佐 悠紀

1 はじめに

九重硫黄山から放出される噴気蒸気には、マグマ水が含まれていることが水素と酸素の安定同位体の研究によって明らかにされている(松葉谷ほか、1975; 日下部ほか、1977; Mizutani et al., 1986; 日下部・松葉谷, 1990)。火山体の中で、深部からのマグマ蒸気が上からの天水とどのように出会い混合しているのか、その熱的物質的相互作用の過程を明らかにすることは、地球科学の観点からも、また火山活動の動向を推定する上にも基本の問題である。噴出蒸気と湧出温泉水の安定同位体比は、天水が火山体の中をかなり深部に達し、臨界温度付近あるいはそれ以上の温度まで高温化していることを示唆する(北岡ほか、1996b)。深部の超臨界領域に達した天水蒸気は下からのマグマ蒸気と混合し、噴気として地上に噴出する。温泉水は天水が臨界温度以下で循環した部分と考えられる。ただし、蒸気流出系にも液体流出系にもその途中で蒸気と液体の水が共存する二相の平衡系を経る部分がある。しかし、火山体の中でどの流れが主流であるのか安定同位体比だけでは分からない。循環速度の速い流動系がメインであり、遅い系はサブである。その手がかりを求めるため、噴気蒸気、温泉水、冷湧水につきトリチウム濃度を測定した。測定結果の一部は昨年度報告した(北岡ほか、1996a)。本報告では、その後測定されたデータを加えて、火山体内部における天水の深部循環につき若干の考察を試みる。

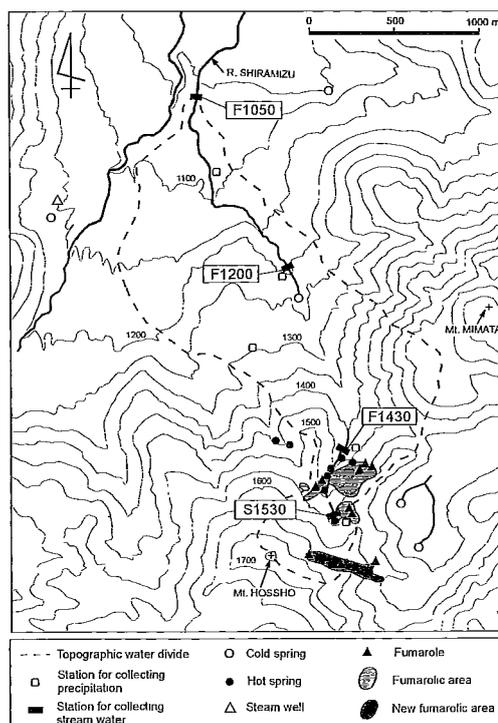


図1 九重硫黄山における噴気、温泉水、冷湧水、河川水の採取位置

2 トリチウム濃度の測定結果

この地域でこれまでに測定されたトリチウム濃度の測定結果を表1(噴気)と表2(温泉水、冷湧水、河川水)にまとめて示す。1984年の噴気2個と冷湧水1個のデータはMizutani et al. (1986)による。昨年度の報告(北岡ほか、1996a)に追加したデータは、1990年と1996年に採取した噴気、温泉水、湧水、及び河川水である。また、噴気地の北西約4 kmに位置する小松地獄から流出する温泉水と付近の沢水、及び噴気地の北西約2.3 kmの蒸気井(九重高原ホテル)から噴出する過熱蒸気の凝縮水と付近の湧水についてもトリチウム濃度を測定したのでそれらも参考のため掲げた。ただし、昨年度の報告で公表したトリチウム濃度の一部に若干の補正を施した。トリチウム濃度の値はすべて採水時における値で表示してある。

表1 噴気凝縮水のトリチウム濃度、安定同位体比、及びCl濃度

Sample Name	Temp. (°C)	Tritium (TU)	δD (‰)	$\delta^{18}O$ (‰)	Cl (mg/kg)	Sampling Date
KX-11 ^{*1}	165	5.7	-36.5	+2.6	3,580	1984/08/08
KH-1 ^{*1}	350	8.6	-38.1	+2.4	4,090	1984/11/17
Fum-A ^{*2}	112	4.2 ± 0.5		-2.45		1990/09/21
Fum-B ^{*3}	214	4.8 ± 0.5	-48.3	-0.68	1,398	1990/09/21
Fum-C ^{*4}	96.8	4.7 ± 0.5	-49.3	-1.84	369	1990/09/21
KJ-1 ^{*5}	94.9	3.9 ± 0.4	-77.6	-7.37	0.5	1995/08/08
KJ-2 ^{*5}	95.7	4.2 ± 0.4	-87.3	-9.72	0.7	1995/08/08
KJ-4 ^{*5}	174.4	3.3 ± 0.4	-49.3	-0.20	16.8	1995/08/08
KJ-5 ^{*5}	95.9	3.4 ± 0.4	-50.8	-0.19	0.6	1995/08/08
KJ-8 ^{*5}	188.5	4.0 ± 0.4	-49.3	-2.67	2,060	1995/08/31
KJ-9 ^{*5}	297	4.0 ± 0.4	-51.7	-1.22	694	1995/08/31
a1 ^{*6}	91.6	4.4 ± 0.4	-92.4	-11.71	2.8	1995/10/20
a3 ^{*7}	198.9	3.7 ± 0.4	-18.6	+0.95	58.7	1995/10/20
b ^{*8}	113.6	4.6 ± 0.4	-54.8	-3.86	1.0	1995/10/20
KKH-S ^{*9}	132	0.9 ± 0.3				1996/07/24

^{*1} : Mizutani et al.(1986), ^{*2} : A-region, ^{*3} : B-region, ^{*4} : C-region, ^{*5} : 従来噴気孔, ^{*6} : 新火口a1の尾根側の弱い噴気, ^{*7} : 新火口a3の孔口で凝縮して流出した水, ^{*8} : 新火口bの星生山寄りの噴気, ^{*9} : 九重高原ホテル蒸気井の凝縮水 (深度 : 300 m, 噴出量 : 14.3 ton/h, 10.9 MW)

表2 温泉水、冷湧水、河川水のトリチウム濃度、安定同位体比、及び化学成分

Sample Name ^{*0}	Temp. (°C)	Tritium (TU)	δD (‰)	$\delta^{18}O$ (‰)	Cl (mg/kg)	SO ₄ (mg/kg)	pH	Flow (kg/min)	Sampling Date
MT-C ^{*1}	16.0	16	-56.4	-9.5	7.0		5.9		1984/08/18
F1100	16.3	6.9 ± 0.5	-60.6	-8.63	30.4	165	4.0	7,528	1990/07/12
F1480	57.5	5.1 ± 0.5	-54.5	-5.97	404	3,013	1.7	278	1990/07/23
F1430	42.4	4.6 ± 0.5	-48.9	-3.95	1,251	3,595	1.4	278	1990/07/23
F1430	42.0	5.8 ± 0.5	-49.2	-2.91	1,638	3,810	1.4	158	1990/08/08
F1200	28.7	6.3 ± 0.4	-56.5	-8.50	131	805	3.3	114	1990/08/08
F1050	19.0	8.1 ± 0.4	-56.8	-9.12	36.4	161	4.1	11,460	1990/08/09
F1430	39.8	4.9 ± 0.5	-53.9	-5.46	776	4,270	1.3	943	1990/09/20
S1455	60.1	4.3 ± 0.4	-57.5	-6.57	115	8,870			1990/09/21
F1430	30.7	5.2 ± 0.4	-39.2	-1.72	1,884	4,194	1.2	147	1990/12/13
S1530 ^{*2}	72.3	3.3 ± 0.5	-53.4	-5.37	48.7	2,687	2.49	12.3	1995/08/07
KJW-2	95.4	3.8 ± 0.6	-28.3	+2.64	1,275	2,695	1.68	1.1	1995/08/07
KJW-3	60.0	3.4 ± 0.5	-56.1	-5.16	584	2,957	1.84	11.5	1995/08/07
KJW-5	83.4	3.2 ± 0.5	-64.4	-7.79	161	3,003	1.69	80	1995/08/07
KJW-6	89.9	4.4 ± 0.6	-60.1	-6.70	368	2,926	1.67		1995/08/07
KJW-8	94.0	3.6 ± 0.5	-56.8	-6.61	75.9	4,645	1.42		1995/08/07
F1430 ^{*3}	38.7	5.2 ± 0.5	-53.0	-4.39	639	3,600	1.57	153	1995/08/07
F1200 ^{*4}	24.7	3.9 ± 0.6	-58.4	-8.74	119	672	3.59	139	1995/08/07
F1050 ^{*5}	20.0	5.9 ± 0.5	-60.5	-8.96	36.7	181	3.65		1995/08/07
S1530	94.9	4.0 ± 0.5	-52.5	-4.56	23.2	2,527	2.05	3.7	1995/10/19
F1430	25.3	3.7 ± 0.5	-45.9	-3.03	951	3,978	1.49	27	1995/10/19
F1200	18.2	4.1 ± 0.6	-59.7	-8.74	130	677	3.61		1995/10/19
KKH-C ^{*6}	16.0	4.3 ± 0.3			4.3	10.2			1996/07/24
F1475	37.5	3.1 ± 0.5			123	3,354			1996/08/06
F1450	29.8	4.6 ± 0.5			2,490	6,336			1996/08/06
F1200	24.7	3.7 ± 0.4			110	561			1996/08/06
F1050	20.1	4.3 ± 0.5			32.4	168			1996/08/06
KMJ-H ^{*7}	86.2	3.1 ± 0.3	-54.8	-7.91	1.9	92.3	3.89		1996/08/06
KMJ-R ^{*8}	18.7	5.3 ± 0.3	-58.2	-8.67	6.4	9.9	7.19		1996/08/06
F1430	13.9	3.6 ± 0.5			1,210	5,493	1.17		1996/10/09
F1200	12.3	4.3 ± 0.4			127	666	3.69		1996/10/09
F1050	15.1	5.2 ± 0.5			32.3	163	3.79		1996/10/09

^{*0} : S及びFに続く番号は湧出の標高を表す ; KJW-2~KJW-8の湧出標高は1480m~1430m, ^{*1} : Makinoto cold spring (Mizutani et al., 1986), ^{*2} : KJW-1, ^{*3} : KJW-10, ^{*4} : KJW-11, ^{*5} : KJW-12, ^{*6} : 九重高原ホテルの冷湧水 (標高1150 m), ^{*7} : 小松地獄温泉水 (標高950 m), ^{*8} : 小松地獄脇の沢水

3 トリチウム濃度を解釈するためのモデルについて

測定されたトリチウム濃度を解釈するにあたり、まず、指数関数モデルについて触れておく。トリチウムなど降水を起源とする天然レーサの流出水中における濃度には、浸透から流出するまでの諸過程における情報が含まれているはずである。しかし、流動途中に水同士で各種の混合が起こるため、流出水のトリチウム濃度を解釈することは困難である。これはトリチウムに限らず、多くの天然トレーサの宿命とも言える。もし、入力としての降水と出力としての流出水についてトリチウム濃度の連続測定ができ、それらの相互相関を解析することができれば、地下の流動過程における情報が得られるかも知れない。しかし、1試料の測定に数日から1週間を要するトリチウムに対しては、その方法論は現実的ではない。限られたトリチウム濃度に関する情報を解釈するためには何らかのモデル化が必要である。

降水中のトリチウム濃度は変動が大きい、多くの流出水の濃度はそれに比べてかなり緩やかに変動する。ただし、流出水は降雨直後の直接流出(洪水流出)を除く。安定同位対比においても降水中の値は大きく変動するが流出水中の値はほとんど変化しない。流出水の濃度が安定していることは、流出するまでの間に何らかの平均化、あるいは、新しい水と古い水とが混合する過程があると見なければならぬ。しかし、地下における複雑な混合の過程を正確にモデル化することは本質的に不可能である。室内実験で求められている分散係数をフィールドスケールにそのまま当てはめると、流動系の規模が数100mにもなると分散による広がりほとんど無視されるようになる。これは、通過媒体が均質等方な多孔質の場合であり、従って、均一な地層中では水同士の間での混合はほとんど起こらないとみなすことができよう。しかし、実際の地層は不均質、非等方である。そういう不均一性が分散や混合にどのような影響を与えるのかについては、まだ一般化された方法論はない。

少ない情報(濃度)を適用するためのモデルはパラメータの少ない単純化されたものでなければならない。流出水の濃度の安定性を表現するひとつのやり方として、地下では混合を起こさないが流出の過程で混合を起こすという考えはありうる。定常的な流動の場合には、流出や湧出の現象は流線の集中を伴う。河川や湧水への流出では、流出点に種々の経路を経た水が集まり、それらが混合して流出する。このように考えると、流出水には流動系全体の過程が平均化されていることになる。

図2(下)は、地面から一様な天水の供給を受け、地層中ではポテンシャル流で流れる最も単純化された流動系のモデルである(北岡、1983)。このモデルによれば、ある鉛直断面を通過する水分子が地下水面を発してからその断面に到達するまでの通過時間(τ)は、指数関数型の分布をとる。しかも、その関数形は断面の位置に関係しない。パラメータは平均通過時間(T)だけである。平均通過時間(T)は単位面積当たりの地下水量(nH ;ここに、 H は地下水層の厚み、 n は有効間隙率)と浸透による供給量(ϵ)の比で表される。系からの流出(あるいは帯水層からの揚水)は、ある断面の水が(上下方向に)混合する過程であるとみなせば、このモデルを流出した水のトレーサ濃度に適用することができる。実際、降水を直接の供給源とする浅層の地下水流動系

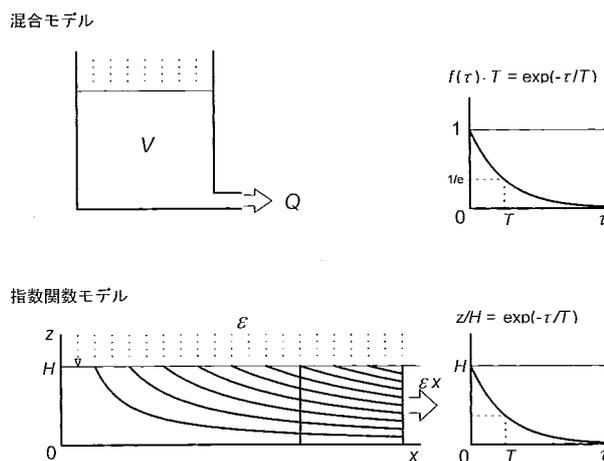


図2 指数関数モデル(下)と混合モデル(上)

では、水平方向の規模に比べ厚さ方向のスケールは十分小さいので、このような単純化されたモデルでもある程度は実状を近似しうる可能性がある。平均通過時間は平均滞留時間、あるいは単に滞留時間と呼ばれる。

こうして、入力としての降水のトリチウム濃度と出力としての流出水のトリチウム濃度とが対応付けられる。流出水のトリチウム濃度は、降水の入力濃度と滞留時間(T)を時定数とする指数関数型の分布関数のたたみこみ積分で表現される。これまでに我が国のいろいろな地域で測定された河川水のトリチウム濃度はほとんど例外なく、このモデルの出力範囲内に収まる。また、浅層地下水から定常的に湧出する(あるいは揚水される)水についても、測定されたトリチウム濃度は、同じ帯水層では水平の方向にほぼ一様な分布をとり、その値から推定される滞留時間は、地域の水文学的データ(単位面積当たりの地下水量と浸透量)とそれほど矛盾しない。第1近似的にモデルの有効性が認識される(北岡、1983)。不均一性などにより地層を流動中にある程度の混合が起こるものとして、各通過断面における平均濃度を用いた解析を行っても同じ滞留時間をパラメータとする指数関数型の結果が得られる(Kitaoka, 1988)。

もう一方の極端なモデルとして、流域の水全体が常に瞬時に完全に混合するという非現実的な混合モデルがある(図2、上)。これによる出力濃度も、入れ替え時間(T :流域全体の貯溜量 V と通過量 Q の比)をパラメータとする指数関数型の分布関数と入力濃度のたたみ込み積分で表現され、形式的には指数関数モデルと同じである。地層中では混合を起こさないが流出点だけで混合するという指数関数モデルと流域の水が完全に混合するという混合モデルとは、混合の面では両極端であるが、両者が同じ形式で表現されることは、指数関数型を分布関数とするモデルがかなり広く適用できる可能性を含んでいる。

さて、この指数関数モデルが火山体内部の深部循環系に適用できるかという問題である。火山体の内部では恐らく断層や割れ目系が発達していて、水や蒸気の通路として機能しているものと思われる。浅層循環系から流出する場合は、種々の経路を経た水が流出の断面で混合を起こすと近似したが、火山体内部の深部循環系の場合についても、これと同様に、流出の断面を断層と考え、それに沿って種々の経路の水(熱水)が上昇するという考えは可能であるのかも知れない(図3)。流動系が水と蒸気の共存する二相流系であっても、気液系の全体が平均的にポテンシャル流で流動し、断層を通して流出するものとするれば、第1近似として適用できる可能性はある。また、上記のように、途中の鉛直断面に沿って上下の混合が起こっても指数関数型のモデルは成立する。本報告では、とりあえず、このような考えで九重硫黄山で得た噴気蒸気と温泉水のトリチウム濃度について考察を試みることにする。

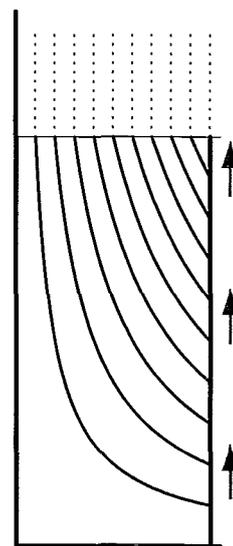


図3 深部循環系への指数関数モデルの適用(流出水は断層に沿って上昇)

4 九重硫黄山のトリチウム・データと指数関数モデル

図4は、この地域でこれまでに測定されたトリチウム濃度の値をプロットしたものである。三角印は噴気、丸印は温泉水、菱形印は冷湧水、四角印は河川水である。同図には、指数関数モデルによる種々の滞留時間(T :1, 2, 5, 10, 20, 50, 100, 200, 500年)の系からの出力も示した。ただ

し、降水のトリチウム濃度は、IAEA(International Atomic Energy Agency)と放射線医学総合研究所による東京と千葉における毎月の測定値を年ごとに平均したものである。

トリチウム濃度に見られる特徴は、前回の報告で述べたように、噴気、温泉水、河川水、いずれの試料においてもトリチウムが有意な値として検出されることである。

少なくとも、これまでに測定した試料には3 TU以下の低いトリチウム濃度をもつ水や蒸気は見出されない。1984年にMizutani et al.によって測定された噴気凝縮水の濃度は、1996年値に補正すると(放射性崩壊のみによるものとして)、今回の測定値と大きい違いがない。また、噴気凝縮水のトリチウム濃度は、全体として温泉水や冷湧水とほぼ同じ程度である。山体内では、天水が深部まで速く循環しているものと推定される。

ただ、噴気地から2.3kmに位置する深度300 mの掘削井(九重高原ホテル；深度200~300mは裸孔)から噴出する132℃の過熱蒸気はトリチウム濃度がかなり低い。硫黄山の噴気地は、従来からの噴気孔と1995年の水蒸気爆発によって形成された新噴気孔を含めると、標高1450~1700mの山岳域にあり、そこでは少なくとも地下数kmの深さまで速い水循環の場が形成されていると考えられるが、それから数km離れた平地部(標高1150m)には、地表から数100mの深さに、浅層の循環水とほとんど交流のない貯溜性の蒸気(あるいはその下に熱水)が存在している。

さて、硫黄山の噴気蒸気と温泉水についての安定同位体比の解析結果からすれば、噴気蒸気にはマグマ蒸気が混じっており、温泉水にはマグマ水の寄与は小さいと推定される(北岡ほか、1996)。ところが、トリチウム濃度では、噴気蒸気と温泉水とがほぼ同様の範囲にあり、両者間の区別は明瞭でない。そこで、地域の水循環系を、浅層循環系(冷湧水と河川水)と深部循環系に分け、深部循環系をさらに液体流出系(温泉水)と蒸気流出系(噴気)とに分けて別個に考察を行う。

(1) 冷湧水と河川水

図5は、冷湧水と河川水についてプロットしたものである。1984年以来的データは、滞留時間5年の出力曲線の付近に分布

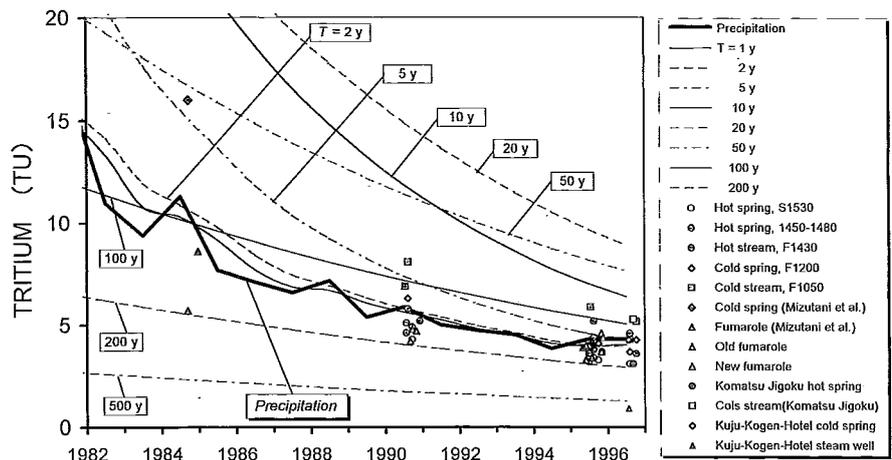


図4 九重硫黄山における噴気凝縮水(三角印)、温泉水(丸印)、冷湧水(菱形印)、河川水(四角印)のトリチウム濃度と指数関数モデルによる出力(1984年のデータ：Mizutani et al., 1986)

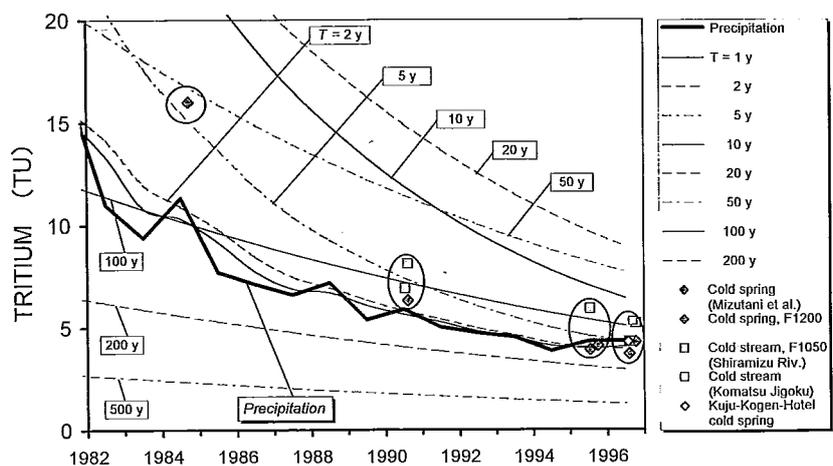


図5 冷湧水(菱形)と河川水(四角)

している。1984年のMizutani et al. (1986)によるデータは牧ノ戸の湧水である。今回測定した湧水(九重高原ホテル脇)も牧ノ戸地区にある。両者とも滞留時間が5年の出力線付近に位置し、よく一致している。この地域浅層には、滞留時間が5年前後(3~7年)で流出する速い循環系が広く分布しているものと思われる。指数関数モデルで滞留時間(T)が5年であることは、浸透による供給量(ϵ)を仮に1 m/yとすれば、浅層流動系の平均的な地下水の量が、水柱($nH = T \cdot \epsilon$)にして5 mの高さに対応されることである。

(2) 温泉水

図6は、温泉水についてプロットしたものである。安定同位体比から、噴気地で湧出する温泉水はかなり高温を経験している(すべての温泉水は天水からソフトしており、また、臨界温度付近まで高温化してから上昇した部分もある)ので、深部を經由した水と考えられる。天水は液体のまま深部を循環する部分と、気液二相系で常に蒸発しながら

移動する部分がある。標高1530mの源流点から湧出する温泉水S1530(白丸)は、熱水(高温化した天水)から分離した蒸気が再凝縮したのと考えられるが(北岡ほか、1996b)、そのトリチウム濃度も他の温泉水と同じ範囲にある。注目されることは、温泉水のトリチウム濃度が冷湧水や河川水よりもいくらか低く、しかも降水の濃度よりも低いものが多いことである。

指数関数モデルに立脚すると、流出水のトリチウム濃度が現在の降水濃度よりも低ければ100年以上の滞留時間に対応される。実際、図7に、1984、1990、及び1996年における流出水のトリチウム濃度と滞留時間(T)の関係を示したように、例えば、1996年では、トリチウム濃度は滞留時間25年の系で最高の値(9.1 TU)をとるが、それより低いと二つの滞留時間に対応され、さらに降水濃度よりも低いと一挙に100年以上の滞留時間だけに対応される。

このように、温泉水のトリチウム濃度は冷湧水よりもいくらか低めの程度であるが、その多くが降水よりも低いという点で冷湧水と基本的に異なる。山体内で上下方向に卓越した流動系から流出する温泉水についても指数関数モデルが近似的に成り立つとすれば、温泉水は100~200年の長い滞留時間の系に由来することになる。

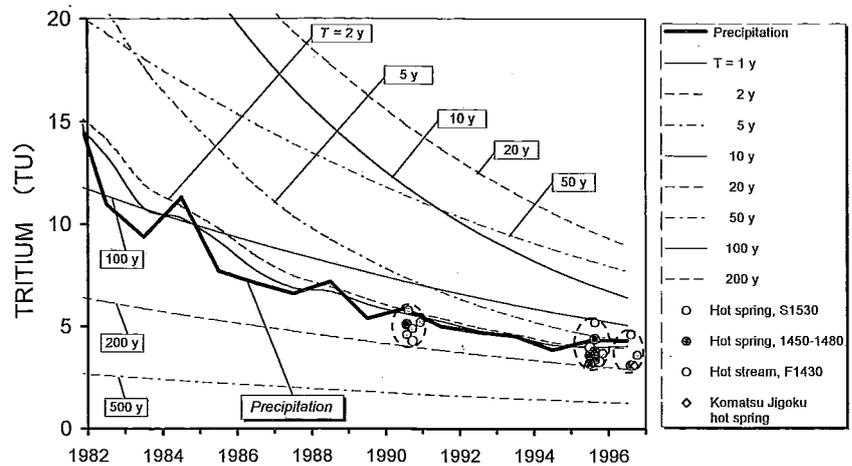


図6 温泉水(自然湧出)

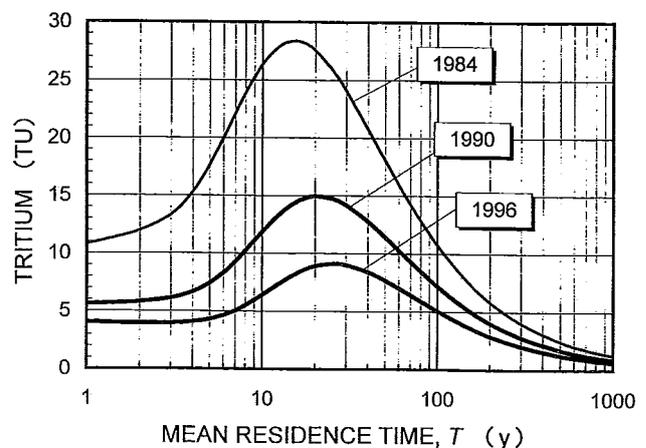


図7 指数関数モデルによる流出水のトリチウム濃度と滞留時間の関係

この長い滞留時間が妥当なものかどうか確認するため、温泉湧出系の媒体が水で飽和されているものと仮定してみる。循環系の範囲(H)を臨界圧力に対応する水柱の高さとみて2.4kmの厚さ(常温の水として)、降水の地下浸透量(ϵ)を1 m/y、そして滞留時間(T)を150年としてみると、循環系の媒体の有効間隙率($n = \epsilon T/H$)として0.06の値が見積もられる。この値は流動系全体にわたる平均的な指標であり、単なる目安に過ぎないものであるが、通常非地熱地域における岩盤亀裂系で測定されている間隙率の範囲にある。このことから、火山体内部には滞留時間が100年を越える深部流動系が存在していても大きい矛盾はないと思われる。

一方、このようなトリチウム濃度の比較的低い水に対しては、浅層の循環水とトリチウム濃度の低い貯溜性の(滞留時間の非常に長い)水との混合を考えてよい場合もある。掘削井戸から動力で揚湯される温泉水や地熱地域の沸騰泉井からの熱水にはこの場合が多い。しかし、図4で見られるように、この山岳地域にはトリチウム濃度の低い水はまだ見出されていない。そういう貯溜性の水は、たとえ存在するとしても流出には寄与していないと考えられる。従って、噴気地から自然湧出する温泉水は、上記のような滞留時間の長い流動系を経ている可能性は高いと思われる。

(3) 噴気蒸気

図8は、噴気蒸気の凝縮水についてプロットしたものである。噴気凝縮水のトリチウム濃度は、1984、1990及び1995年とも、見掛けの上で、滞留時間が100~200年の範囲にある。

Mizutani et al.(1986)によると、噴気蒸気にはClを著しく含むものがあり、マグマ水と考えられる安定同位体比の高い蒸気は例外なくCl濃度が高い。種々の噴気凝縮水の δD と $\delta^{18}O$ は、

Cl濃度との間に全体的にはほぼ線形の関係があり、天水蒸気とマグマ蒸気との混合を考えて矛盾しない(ただし、 δD と $\delta^{18}O$ の値が天水よりも低い蒸気は、臨界温度以下の比較的低温の天水(あるいは熱水)から発していると考えられるので除く)。天水蒸気とマグマ蒸気の混合は超臨界領域で起こっているものと考えられる(北岡ほか、1996b)。マグマ蒸気のCl濃度は、測定値の最大をとって8.1g Cl/kg H_2O 付近と考えられる。

地域天水中のCl濃度はマグマ蒸気のそれに比べて無視できるので、噴気蒸気(凝縮水)中のCl濃度から蒸気中に占める天水(あるいはマグマ水)の割合を推定することができる。マグマ蒸気は、恐らくトリチウムを含まないと思われる(ただ、噴気蒸気のトリチウム濃度にはCl濃度や δD との間にそれを示唆するような関係が見られないので、マグマ蒸気にトリチウムが含まれている可能性は完全には消えない)。Cl濃度8.1g/kgの想定マグマ蒸気はトリチウムを含まないと仮定すれば、噴気蒸気のCl濃度とトリチウム濃度からマグマ蒸気と混合する天水のトリチウム濃度を見積もることが可能となる。

こうして推定される噴気蒸気中の天水のトリチウム濃度は、図9に示すように、1984、1990と

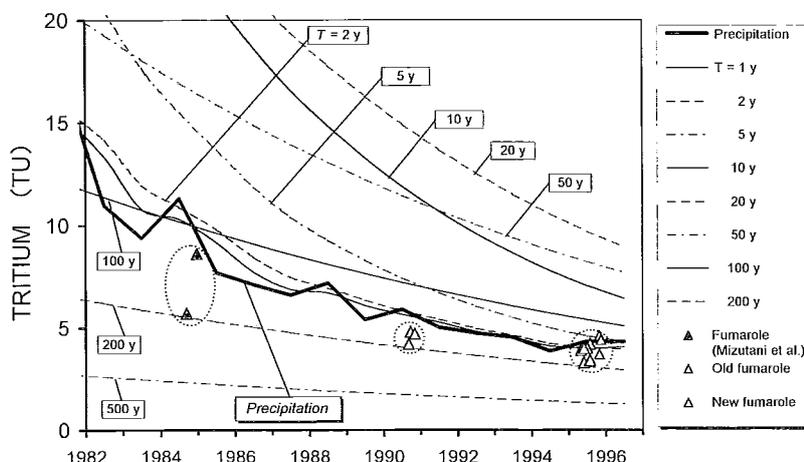


図8 噴気蒸気(凝縮水)

1995年の各時期で、降水付近の値から滞留時間が7年程度までの範囲にあり、また、従来からの噴気孔と水蒸気爆発によって形成された新噴気孔との間で違いはない。この範囲は、冷湧水など浅層の循環水とほぼ同じである。見積もりには多くの仮定が含まれる上にトリチウム濃度の測定精度付近の議論であるので議論の正確さはよくないが、噴気中に含まれる天水のトリチウム濃度の多くが約7年以下の短い滞留時間に対応されること

は、浅層の水がかなり速く深部の超臨界領域まで達し、下からのマグマ水と混合し、噴気として噴出している状況を推定させる。ただ、蒸気の一部には温泉水と同様の低いトリチウム濃度をもつものもある。このような蒸気は、温泉湧出に関係した遅い循環系を経て蒸気化したものかも知れない。実際、 δD と $\delta^{18}O$ が天水(冷湧水、河川水)に比べてかなり低い値をもつ蒸気(表1のKJ-1、KJ-2、及びa1)は、Cl濃度も低く、臨界温度よりもかなり低い温度(大気圧付近)で発した蒸気であり(北岡ほか、1996b)、マグマ蒸気の混入はないと考えられる。

5 蒸気・熱水の循環システム

山体内部には、全体として、マグマの熱で駆動された対流系が深部に至るまで形成されている。深部循環系には、安定同位体比から、天水蒸気が深部からのマグマ蒸気と混合して流出する蒸気放出系と、液体のまま循環する温泉流出系とがある。測定された噴気蒸気と温泉水のトリチウム濃度は、これら二つの経路で速度が著しく異なることを示唆し、蒸気放出系が速く(平均通過時間が約7年以内)、温泉湧出系が遅い(100年以上)可能性を示す。九重硫黄山では、天水が深部の超臨界領域(地下数km以深)まで達してマグマ蒸気と混合してから上昇する系(噴気流出系)がメインのシステムになっており、臨界温度以下(地下数km以浅)で液体のまま循環する系(温泉流出系)はサブシステムであると思われる。ただし、噴気にはサブシステムから発した蒸気を噴出するものもある。

なお、本報告で使用した降水のトリチウム濃度は、1961年から1979年までは、IAEA(International Atomic Energy Agency, Vienna)による東京における毎月の降水値を(それ以前の降水濃度は、年平均値につきIAEAによるOttawa値との相関から推定した)、また、1980年から1995年は、科学技術庁放射線医学総合研究所の井上義和氏と宮本霧子氏による千葉市における毎月の降水値を用い、年平均値に変換したものである。その出典は数が多いので列挙しないが、記して謝意を表す。本報告では、1996年の降水濃度の年平均値に1995年の値を仮定した。

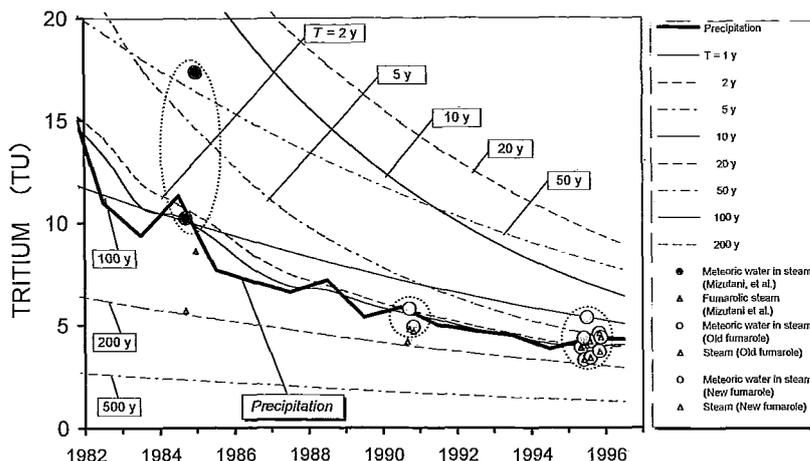


図9 マグマ蒸気(Cl: 8.1g/kg, トリチウム: ゼロ)と混合する天水蒸気のトリチウム濃度(丸印); 小さい三角印は元の噴気蒸気を表す

参考文献

- 1) 松葉谷 治・上田 昇・日下部 実・松久幸敬・酒井 均・佐々木 昭(1975), 地調月報, 26, 375-392.
- 2) 日下部 実・蔦木康宏・吉田 稔(1977), 地球化学, 11, 14-23.
- 3) 北岡豪一(1983), 水温の研究, 26, 25-34.
- 4) Mizutani, Y., S. Hayashi and T. Sugiura(1986), *Geochemical J.*, 20, 273-285.
- 5) Kitaoka, K.(1988), 地下水学会誌, 30, 77-93.
- 6) 日下部 実・松葉谷 治(1990), 火山第2集, 30, S267-S283.
- 7) 日下部 実(1990), 火山第2集, 34, S169-S182.
- 8) 北岡豪一・由佐悠紀・大沢信二・竹村恵二・福田洋一(1993), 大分県温泉調査研究会報告, 44, 25-38.
- 9) 北岡豪一・大沢信二・大上和敏(1996a), 同上, 47, 21-28.
- 10) 北岡豪一・大沢信二・由佐悠紀・日下部 実(1996b), 温泉科学, 46, 156-175.

別府地域の地下水変動と重力変化

京都大学理学部

福田 洋一・馬 渡 秀 夫
由 佐 悠 紀

1 はじめに

温泉に関連した種々の現象の理解に、地下水の挙動の把握が重要であることは自明である。このため、京都大学理学部附属地球熱学研究施設(旧地球物理学研究施設)では、別府地域において古くから地下水位の連続観測を実施している。これらの観測成果の一つとして、由佐(1979)は、別府地域では5~10mの振幅での年周的な地下水位変化が存在し、それは、位相遅れを考慮した降雨の浸透過程によって説明できることを示した。しかしながら、地下水位の直接的な観測は、空間的に十分な密度で実施されているわけではなく、地下水変動の空間的な広がりや地下の流水系の規模までは、必ずしも明らかにされていないのが現状である。

一方、地下水の変動により、地下での水の質量分布が変化すると、それは、地表での重力変化として検出できるはずである。さらに、検出された重力変化は、ある空間的な広がりにおける質量変化の積分値を反映するので、地下水系の規模や、変動の様式など、その物理的なメカニズムを推定する有力な手がかりを与えてくれるものと期待できる(Goodkind, 1986; Makinen and Tattari, 1991)。

別府地域の水位変化が、扇状地内で一様に生じていると仮定すると、同地域での年周的水位変化に対応する重力変化は、数 $10 \mu\text{gal}$ ($\mu\text{gal} = 10^{-8} \text{m/sec}^2$)から最大 $100 \mu\text{gal}$ 程度にもなるものと予想でき、現在の相対重力計による精密重力測定で十分に検出可能である。また、重力測定は、水位測定に比べ、はるかに簡便に実施でき、測定点の空間的な密度を増すことも容易である。そこで、本研究では、比較的大きな重力変化が期待できる別府扇状地内において、ラコスト重力計による繰り返し重力測定を実施し、重力の時間的な変化が、空間的にどのように生じるかを調べることにした。さらに地下水位および重力変化と関連した地盤の上下動が存在するかどうかを調べるため、新たに、水準測量も開始している。

ここでは、これらの測定の概要について述べると共に、主成分分析法による解析結果、およびその解釈について報告する。なお、重力測定および解析の詳細については、福田・ほか(1996)を参照されたい。

2 測定およびデータ

2-1 測定点

別府地域の温泉水あるいは地下水の流動過程については既に多くの研究がある(例えば、Allis and Yusa, 1989; 北岡ほか、1993; 矢原ほか、1994)。これらの研究成果から、別府地域における地下温度の高温域は、図1の朝見川(Asami R.)および境川(Sakai R.)で挟まれた南側の地域と、春木川(Haruki R.)および平田川(Hirata R.)流域の北側の地域との二つに分かれており、それぞれの地域では、山側高地部の深部から断層に沿って上昇してきた液相または気相の高温地熱流体が、浅層の地下水と混合して、別府温泉特有の多種の温泉水を形成しているものと考えられている。

このように、別府地域の温泉水あるいは地下水の流動過程は複雑であり、地下水変動と重力変化の関係を明らかにするためには、重力測定点を密に配置する必要がある。そこで、本研究では、図1のA1～C4に示すように、およそ2 x 2 kmに一点の密度で、新たに11点の重力測定点を設置した。これらの測定点の内、点名のA、B、Cは、それぞれ、先に述べた異なる河川に挟まれた領域に対応している。また、別府扇状地の斜度は比較的急峻であり、最も標高の低い測定点(C1)と最高点(A4)との標高差は、およそ300mにも達していることから、番号の1から4を標高の低から高に対応させ、標高による影響の評価も容易にできるように配慮した。なお、図1中のA1、A2およびC3の測定点では、水位の連続観測を実施しており、また、A2およびBM1～BM4では、水準測量によって、高さの変化をモニターしている。

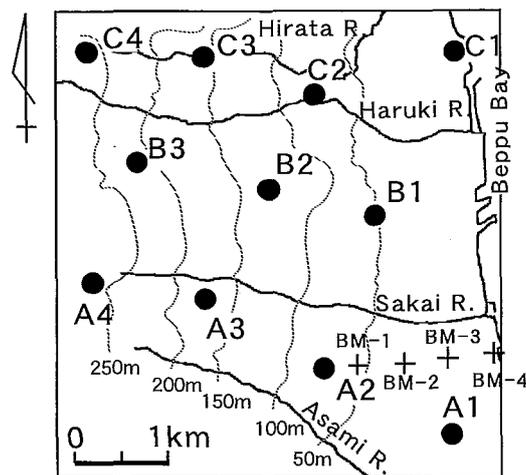


図1 重力測定点の設置

A1、A2、C3では水位の連続観測、A2およびBM-1～BM-4では水準測量を実施。

2-2 重力測定

重力測定は、ラコスト重力計(G-534)を用い、1993年2月から1997年1月までの期間に、おおむね1～2月に1回の間隔で、計36回実施した。なお、重力の基準点には、別府扇状地からは約15 kmほど南に位置する大分地方気象台内の一等重力点を用いた。大分地方気象台は、海岸近くの平野部にあり、地下水位の変化も小さく、同重力点における重力変化は、別府地域の地下水変動の影響とは全く無関係と考えられる。

重力測定には、可能な限り気象条件の良い日を選び、午前中に、A2(地球熱学研究施設)の測定点を出発し、全測定点を巡った後、A2に戻るループの測定を、午後、再びA2から出発し、大分の一等重力点間の往復測定を含め、全測定点を逆の順で巡るループの測定を行い、これら一連の作業が、すべて1日で終了するように配慮した。

表1は、大分の一等重力点における重力値を979541.670 mgal($10^{-5}m/s^2$)としたときの、各測定点での重力値を示したものである。また、図2には、表1をもとに、各測定点での重力変化を図示した。

ラコスト重力計では、重力基準点と各測定点と重力差が測定できるだけであり、先の期間を通じて、大分の重力基準点に重力変化があったかどうかについては、他の資料が無いために、必ずしも断定的なことは言えない。しかし、後述の主成分分析の結果などをみても、重力変化があったと思われる積極的な証拠は見つかっておらず、仮に重力変化が存在したとしても、測定誤差と同程度の $10 \mu gal$ 以内であろうと思われる。

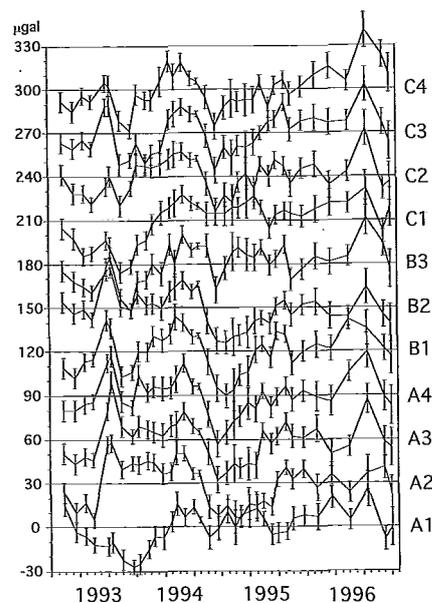


図2 各観測点における重力の時間変化

大分地方気象台内の一等重力点での重力値を不変と仮定

表 1 各観測点における重力測定値

DATE	A1		A2		A3		A4		B1		B2		B3		C1		C2		C3		C4	
	979	μgal																				
93 02 25	560004	±07	546574	±07	527215	±07	504736	±07	549858	±07	535082	±07	520916	±07	558551	±07	547597	±07	535484	±07	512948	±07
93 04 15	559986	±07	546560	±07	527208	±07	504736	±07	549851	±07	535054	±07	520909	±07	558544	±07	547584	±07	535480	±07	512941	±07
93 05 24	559983	±06	546567	±06	527213	±06	504740	±06	549862	±06	535057	±06	520905	±06	558532	±06	547584	±06	535486	±06	512952	±06
93 07 01	559977	±05	546555	±05	527211	±05	504742	±05	549864	±05	535050	±05	520901	±05	558534	±05	547577	±05	535480	±05	512948	±05
93 08 31	559976	±06	546607	±06	527244	±06	504768	±06	549891	±07	535086	±06	520916	±06	558543	±06	547589	±06	535509	±06	512961	±06
93 09 17	559979	±07	546608	±06	527264	±07	504773	±07	549885	±07	535093	±07	520919	±07	558538	±07	547596	±07	535510	±07	512959	±07
93 11 02	559967	±07	546590	±06	527234	±07	504742	±07	549852	±07	535084	±07	520892	±07	558521	±07	547576	±07	535469	±07	512935	±07
93 12 15	559962	±05	546594	±05	527227	±05	504738	±05	549855	±05	535056	±05	520889	±05	558525	±05	547588	±05	535472	±05	512928	±05
94 01 12	559964	±07	546593	±06	527234	±07	504760	±07	549869	±07	535088	±07	520909	±07	558540	±07	547604	±07	535484	±07	512953	±07
94 02 17	559974	±06	546596	±06	527232	±06	504748	±06	549869	±06	535060	±06	520910	±06	558543	±06	547603	±06	535470	±06	512949	±06
94 03 15	559983	±07	546595	±08	527230	±07	504752	±07	549880	±07	535061	±07	520921	±07	558554	±07	547602	±07	535476	±07	512949	±07
94 04 25	559982	±08	546587	±07	527228	±08	504751	±08	549877	±08	535058	±08	520914	±08	558582	±08	547604	±08	535478	±08	512962	±10
94 05 31	559993	±07	546588	±06	527234	±07	504761	±07	549881	±07	535069	±07	520934	±07	558565	±07	547608	±07	535500	±07	512976	±07
94 06 21	560005	±08	546601	±08	527235	±09	504757	±09	549893	±09	535072	±09	520921	±09	558568	±09	547611	±09	535504	±09	512965	±09
94 07 22	559996	±06	546601	±05	527244	±06	504768	±06	549889	±06	535077	±06	520941	±06	558574	±06	547613	±06	535509	±06	512975	±06
94 09 02	560003	±05	546587	±04	527234	±05	504752	±05	549879	±05	535069	±05	520909	±05	558568	±05	547607	±05	535504	±05	512964	±05
94 09 30	559994	±02	546587	±02	527230	±02	504752	±02	549880	±02	535074	±02	520933	±02	558566	±02	547609	±02	535504	±02	512962	±02
94 11 08	559982	±08	546584	±08	527216	±09	504733	±09	549862	±09	535049	±09	520933	±08	558561	±08	547591	±08	535489	±08	512951	±08
94 12 15	559988	±08	546558	±07	527197	±09	504713	±09	549844	±09	535035	±09	520903	±09	558561	±08	547572	±09	535465	±09	512931	±09
95 01 25	560000	±08	546565	±07	527202	±08	504721	±08	549839	±08	535034	±08	520918	±08	558561	±08	547583	±08	535481	±08	512944	±08
95 02 24	559989	±12	546557	±11	527208	±13	504729	±13	549843	±14	535038	±13	520929	±13	558565	±12	547578	±12	535474	±12	512950	±13
95 03 22	559997	±07	546566	±06	527205	±07	504732	±07	549853	±07	535039	±07	520932	±07	558565	±07	547592	±07	535482	±07	512948	±07
95 04 26	560000	±11	546566	±11	527208	±11	504741	±11	549855	±11	535041	±11	520927	±11	558569	±11	547598	±11	535481	±11	512949	±11
95 05 30	560002	±09	546565	±09	527207	±09	504737	±09	549870	±09	535049	±09	520925	±09	558573	±09	547587	±09	535484	±09	512949	±09
95 06 27	559995	±05	546568	±05	527231	±05	504749	±05	549874	±05	535051	±05	520932	±05	558565	±05	547604	±05	535491	±05	512961	±05
95 08 02	559984	±07	546564	±06	527222	±07	504738	±07	549865	±07	535047	±07	520920	±07	558551	±07	547596	±07	535499	±07	512944	±07
95 08 29	559985	±07	546583	±05	527227	±06	504745	±06	549883	±06	535059	±06	520924	±06	558560	±06	547607	±06	535500	±06	512959	±06
95 10 06	559986	±06	546591	±05	527237	±06	504752	±06	549881	±06	535063	±06	520934	±06	558563	±06	547603	±06	535512	±06	512963	±06
95 10 31	559995	±08	546583	±07	527227	±08	504743	±08	549861	±08	535053	±08	520910	±08	558561	±08	547591	±09	535493	±08	512953	±08
95 12 20	559997	±07	546590	±06	527228	±07	504749	±07	549869	±07	535060	±07	520917	±07	558559	±07	547601	±07	535499	±07	512958	±07
96 02 15	559996	±09	546577	±09	527232	±09	504745	±10	549874	±09	535082	±09	520926	±09	558564	±09	547604	±09	535501	±09	512966	±09
96 04 18	560010	±08	546586	±08	527215	±09	504742	±10	549871	±09	535052	±09	520922	±09	558568	±09	547590	±09	535498	±09	512972	±09
96 07 02	559994	±07	546574	±07	527220	±07	504762	±07	549891	±07	535052	±07	520926	±07	558568	±07	547599	±07	535499	±07	512962	±07
96 09 19	560015	±12	546587	±12	527252	±10	504776	±12	549885	±12	535072	±12	520952	±12	558578	±12	547629	±12	535624	±12	512997	±12
96 12 04	559981	±08	546591	±08	527223	±10	504745	±10	549871	±09	535053	±09	520935	±09	558549	±08	547588	±08	535498	±09	512980	±09
97 01 09	559989	±13	546574	±11	527219	±13	504739	±13	549866	±13	535047	±13	520917	±13	558565	±13	547592	±13	535485	±13	512967	±13

2-3 水位測定

図1のA1、A2、C3の重力測定点の近傍(おおむね50m以内)では、水位の連続観測を実施している。観測には圧力センサー式の自記水位計(KADEC-MIZ)を用い、10分毎の測定値をメモリーにデジタル記録し、測定値については、適宜、水位の実測値で校正を行っている。なお、A1の観測井の深度は約4mであり、A2およびC3の深度は、いずれも約300mである。

図3は、各測定点における水位の日平均値をプロットしたものである。また、表2には、表1の重力測定実施日における水位の日平均値を示すと共に、図4に、重力測定値との関係を図示する。

図3に示した期間中には、図5の降雨量に示すように、1993年の記録的な豪雨、1994年の干ばつと異常な気象が続いたため、年周的な変動はやや不鮮明になっている。

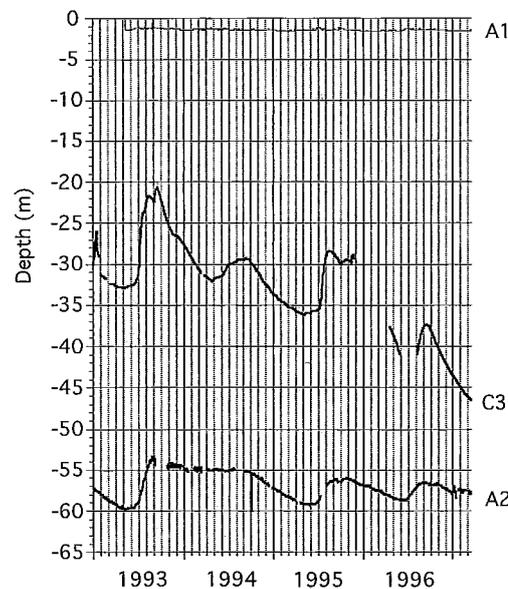


図3 観測井における水位変化

表2 重力測定実施日の観測点A2およびC3における日平均水位

空白は、水位推定の欠測期間

DATE	GWL (A2)		GWL (C3)	
	meter		meter	
93 02 25	-58.550		-31.810	
93 04 15	-59.550		-32.762	
93 05 24	-59.630		-32.719	
93 07 01	-58.910		-31.161	
93 08 31	-53.390		-22.159	
93 09 17	-54.380		-20.735	
93 11 02	-54.590		-25.297	
93 12 15	-54.510		-26.840	
94 01 12	-54.910		-28.112	
94 02 17	-54.910		-29.996	
94 03 15	-54.830		-31.056	
94 04 25	-55.037		-32.020	
94 05 31	-54.946		-31.469	
94 06 21	-55.048		-30.681	
94 07 22	-54.889		-29.844	
94 09 02	-55.168		-29.549	
94 09 30			-29.747	
94 11 08	-56.141		-31.509	
94 12 15	-57.000		-32.973	
95 01 25	-57.684		-33.441	
95 02 24	-58.431		-35.055	
95 03 22	-58.859		-35.421	
95 04 26	-59.305		-36.060	
95 05 30	-59.434		-35.962	
95 06 27	-59.146		-35.590	
95 08 02	-56.760		-29.042	
95 08 29	-56.376		-28.633	
95 10 06	-56.174		-29.717	
95 10 31	-55.989		-29.464	
95 12 20	-56.761			
96 02 15	-57.241			
96 04 18	-58.158		-37.688	
96 07 02	-58.360			
96 09 19	-56.555		-37.466	
96 12 04	-57.379		-42.213	
97 01 09	-57.688		-43.996	

しかしながら、図3の変化は、基本的には図5の降雨量に関連した変化が卓越していることが読みとれる。また、この傾向は、図2の重力変化についても同様である。

2-4 水準測量

地表での重力値を変化させる要因としては、地下での密度変化と共に、地表面の上下変化(高さ変化)が重要である。実際、精密重力測定は、簡便な水準測量の代用としての役割をも果たすと考えられている。別府扇状地内に於いて、重力を変化させるような上下動が生じるとすると、その地形等から判断して、東西方向の傾動が重要と思われる。また、後述のように、水位と重力変化の予備的な解析からも、水位変化ならびに重力変化に関連して、地表面の上下動が重要な役割を果たしている可能性が示唆された。

そこで、1996年9月より、重力、水位測定に加え、図1のA2およびBM1～BM4に示した水準路線を新たに設置し、水準測量を開始した。実際の測量には、ウィルド社製NA3000デジタル・レベルおよび同社の一等標尺を使用した。

表3は、地球熱学研究施設の水準点(A2)を不動と仮定した場合の各水準点の上下変動を示す。なお、表3には、1995年6月に同区間で実施されている水準測量の結果も合わせて示す。ただし、この結果については、取り付け測量により新しい点の値に化成してあるものの、1996年9月以降の測量とは水準点の位置が同じでないことや、測量の方式も若干異なることなど、データの質にやや違いのあることに注意しておく。何れにしろ、表3を見る限り、この期間に有意な水準変動があったようには見受けられない。

表3 水準測量結果

1996.09の列には、1996年9月測定時におけるA2からの各点の標高差が、また、その他の列には、A2を不変と仮定し、1996年9月の標高を基準とした各点の標高の時間変化(上下動)を示す。

	1995.06	1996.09	1996.11	1997.02
	mm	mm	mm	mm
A2(BGRL)	0	0	0	0
BM-1	-2.62	-20385.69	0.32	-0.20
BM-2	-2.93	-39637.82	0.67	0.73
BM-3	-4.51	-59463.34	-0.36	-0.03
BM-4	0.34	-70756.64	-2.46	-0.03

3 水位変化と重力変化の関係

3-1 一般的特徴

図4をみると、測定された重力の変化と水位変化とは基本的にはよく対応しており、特に、図4-aの測定点A2での重力と水位変化の相関係数は0.69とかなり高い値を示している。A2での直線回帰で求めた水位変化に対する重力の変化率は $7.0 \mu\text{gal}/\text{m}$ であり、この場合、半無限平板を仮定した地下の空隙率は16.7%に対応する。

一方、図4-bに示すC3での水位と重力の関係は、必ずしも単純ではない。C3における水位と重力の変動パターンには、明らかな関連が認められるものの、その様式が、降水量の多かった1993年と干ばつであった1994年、あるいは、その中間の1995年で、明らかに異なっている。すなわち、1993年では水位変化に対する重力変化の割合が小さいのに対して、1994年では大きくなり、また、1995年で中間的な値を持つようで、見かけの空隙率が、あたかも降雨の様式によって変化するかのような関係を示している。また、海岸線に近い測定点A1では、図3に示すように、全期間を通じての水位変化が1m以下と極めて小さいのにも関わらず、図2では、比較的大きな重力変化を示しており、しかも、そのパターンが、図5の降水量の変化や、山側の重力測定点での重力変化とは明らかに異なっている。

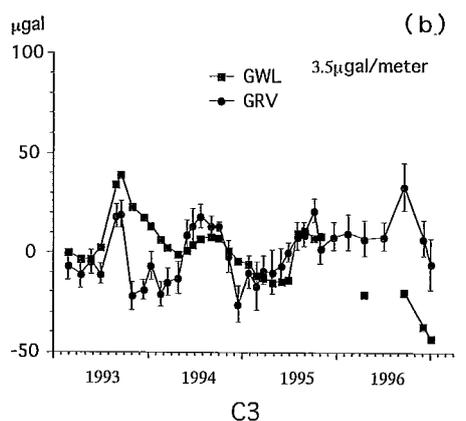
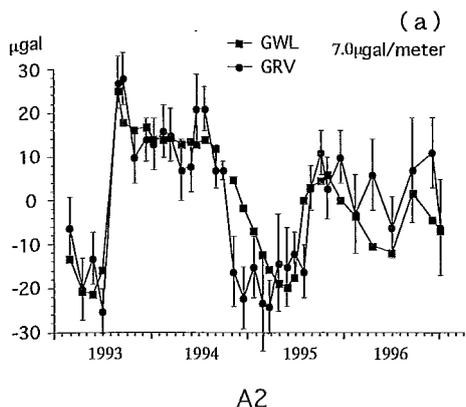


図4 水位変化と重力変化

水位変化は、便宜的に、図に示した係数で重力変化に換算してプロット。

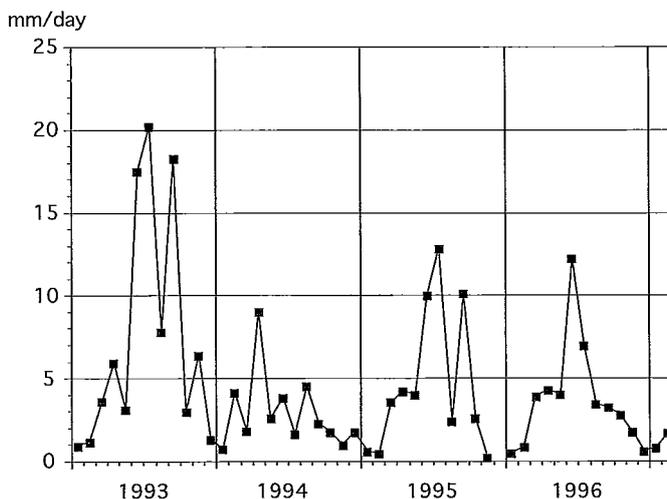


図5 A2における月別の日平均降水量

3-2 主成分分析

このように、水位と重力変化の関係は、別府扇状地内といった比較的狭い地域においても、測定点の位置によってかなり異なった様相を示しており、必ずしも単純ではない。一方、図2を見ると、各測定点における重力変化のパターンは、それぞれが独立ではなく、幾つかの測定点間では、互いに相関を持った共通の変動をしているように見受けられる。このような共通成分の空間的広がり、地下水変動と密接に関連しているはずであり、その客観的な評価のため、主成分分析法(経験的直交関数系展開)を用いた解析を試みた。

主成分分析法では、それぞれの観測点での重力変化を個別に見るのではなく、互いに相関の高い観測点の変化を一つの空間的なパターンとして、すべての測定点の変化を、幾つかの空間的なパターンと、そのパターンの時間的な変化として捕らえることができる。なお、詳細については福田・ほか(1996)を参照されたい。

図2の重力データについて、主成分分析法による解析を試みたところ、別府扇状地内の重力変化について、概ね、2つの空間的な変動パターンにより説明できることが判明した。これらのパターンの内、変動の振幅が大きいものから、それぞれ、第1主成分、第2主成分と呼ぶことにすると、第1主成分の寄与が57.4%、また、第2主成分が26.5%と、これら2つのパターンにより、全変動成分の約85%程度が説明可能であることが判明した。

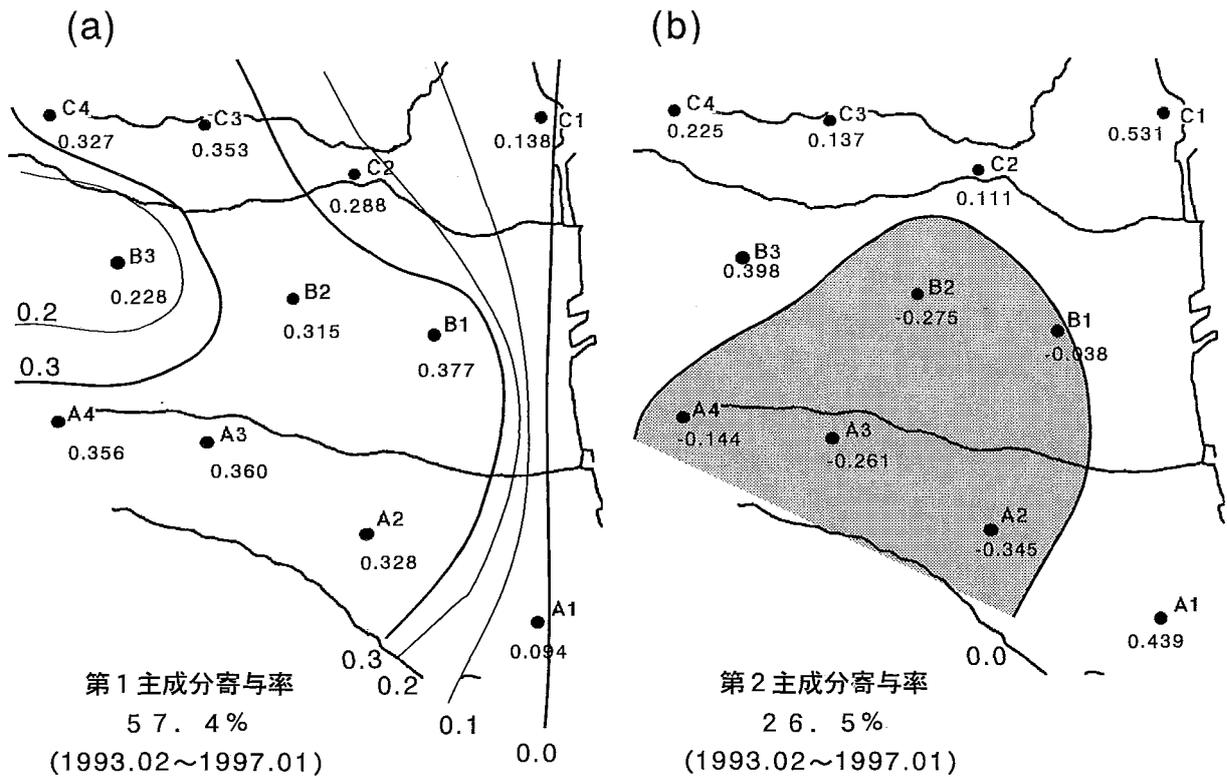


図6 主成分分析による空間変動パターン

図6-aおよびbに第1および第2主成分の空間変動パターンを、また、図7にそれぞれの時間変化を示す。各測定点におけるこれらの成分毎の変動は、図7に示した時間変動の大きさに、図6の各点での値を重み(値が負の場合は逆相)として掛け合わせたものに相当する。

図6-aに示す第1主成分の空間パターンは、海岸近くの測定点での寄与が小さく、山側で大きくなる傾向にあり、また、その時間変化は、年周期的な傾向を示している。すなわち、この成分は、山側で大きく海岸線に近づくに従い小さな年周期的変化を示すという、降雨による不圧地下水の水位変化の特徴をよく反映しており、地下水水位の変化に伴う水の質量変化を、直接、重力変化としてとらえたものと考えられる。しかしながら、細部については、寄与率の変化が必ずしも標高に比例しないことや、年周期的変動のパターンが、水位の上昇時と下降時とで異なるなど、複雑な水文状態を示唆していることに注意しておく。

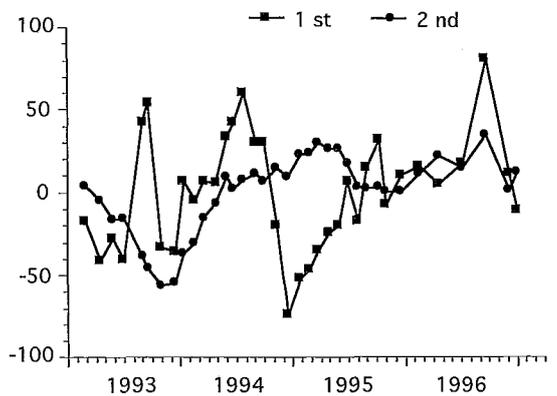


図7 主成分分析による第1主成分および第2主成分の時間変動パターン

なお、第1主成分は、すべての測定点で同相であり、仮に、大分の重力基準点での重力値が、なんらかの原因で変化したとすると、その変化はこの成分に現れるはずである。しかし、図6-aのA1あるいはC1からの寄与をみると、すべての測定点に共通な変動パターンは、全体のせいぜい数%以下であり、重力基準点の変動があったとしても、数 μgal 以下であると思われる。

図6-bに示した第2主成分の空間変動パターンは、南西側の5つの測定点と、その他の測定点

で逆相の変動パターンを示しており、別府扇状地の南西側の境界である朝見川断層系に起因する深部の流動パターンを暗示する結果となっている。第2主成分の時間変動パターンは、A1あるいはC1の重力変化に類似しており、これらの測定点の寄与が大きいことも特徴である。A1の測定点では、先にも述べたように、不圧層水位の変化は極めて小さく、第2主成分の原因については、何らかの形で被圧地下水の関与を考える必要があるだろう。

3-3 地下水位データを加えた主成分分析

重力変化と水位変化のより詳細な関係を探るため、重力データに水位のデータも加えた主成分分析を行った。主成分分析に異なる種類のデータを混在させる方法については、幾つかの方法が知られているが、ここでは、水位データに適当な係数を掛け、水位変化を重力変化の次元に統一するとともに、その変動の大きさも同程度になるように調整し、見かけ上、あたかも重力データが与えられたかのように取り扱うことにした。

水位データを含めた主成分分析の結果についても、それぞれの空間的・時間的変動パターンは、重力データだけを用いた場合の図6あるいは図7とほぼ同様であることが判明した。しかしながら、注目すべき点は、C3の測定点での第2主成分について、水位の寄与と重力の寄与が逆相になる、すなわち、水位が上昇した際に重力が減少し、水位が下降した際に重力が増加するような、常識的には考えられないような変動成分の存在が確認されたことである。

図4-bに示したC3における水位と重力の関係が必ずしも直接的でない理由は、このような第2主成分に対応した変動の存在と、しかも、その寄与が降雨の様式によって変化するためと考えられる。C3での水位の変化については、今のところ原因は必ずしも明らかでないが、重力変化の第2主成分に対応した水位変動のメカニズムが、本質的に重要な役割を担っているものと考えられる。

4 考察および結語

別府扇状地における重力変化の約60%を説明する第1主成分は、海岸線での寄与が小さく、水位と重力の変化が同相であることから、不圧地下水の変動に起因する直接的な引力変化によるものと考えられる。一方、第2主成分は、重力変化の空間的変動パターンとして南西側の測定点とそれ以外の測定点が逆相であり、水位変化とは南西側測定点が同相となる。また、不圧地下水位の変化がほとんど存在しない海岸近くの測定点で大きな寄与を持つことも一つの特徴である。

地下水の質量変化に伴う引力の変化だけを考えると、第2主成分のように、水位変化と重力変化が逆相となる成分の説明は極めて困難である。しかしながら、地下水位の変化、あるいは、被圧水層の圧力変化による被圧層の収縮・膨張と、それに伴う地表の上下変動を考えると、このような逆相成分も、定性的には説明できる可能性がある。

まず、3つの観測井の特徴をまとめると、次のとおりである。

- 1) A1の観測井は、深度が4mと極めて浅く、海岸線にも近いことから、被圧地下水の影響は全く受けていない。
- 2) A2の観測井(深度300m)は、掘削時のコア資料からも被圧層に達していることが判明しており(由佐ほか、1194)、上部の不圧水層の水位変化に伴う圧力変化と、被圧層の圧力伝搬の両方を感じている。
- 3) C3における水位観測井は、噴気活動の極めて活発な、いわゆる別府地獄地域に隣接し、「このような自然噴気のある地熱地帯では浅層水と深部熱水との間に密接な連絡がある。」(山下、

1979)と思われるので、不圧層の水位変化と被圧層の圧力伝搬の両方を感じているものと推測できる。

第2主成分の変動は、その空間的パターンから、朝見川断層系に関連した別府南部地域の温泉水流動(矢原ほか、1994)に関連していることが予想されるが、水位変化と重力変化が同相であるA2を中心とした地域は、これらの水系の源に近く、水位変化が質量変化を、ほぼ、そのまま表しているものと考えられる。一方、C3を中心とする水位変化と重力変化が逆相の地域では、朝見川断層系に関連した水位変化を被圧水層の圧力変化として感じるものの、圧力変化に伴う被圧層の質量変化は、被圧層の収縮・膨張相当分だけであり、ほとんど無視することができる。しかし、被圧層の収縮・膨張に相当する地表面の上下変動が存在すると、ほぼ、フリーエア勾配で、重力の逆相の変化を伴うはずであり、これが、水位変化と重力変化の逆相の原因になっている可能性がある。また、A1のように海岸線近くの堆積層の厚い測定点では、浅い観測井の水位変化に深部の圧力変化が影響することはなく、被圧層の収縮・膨張に伴う地表面の上下変化を逆相の重力変化として観測し、さらに、収縮・膨張の振幅は堆積層の厚さに比例することから、第2主成分への寄与が大きくなるものと考えられる。

しかしながら、先にも述べたように、現在までに実施した水準測量の結果では、これを裏付けるような有為な上下変動は検出されていない。ただ、水準測量については、まだ、十分なデータが得られておらず、結論を下すのは早計であり、今後も測定を継続する必要がある。

また、最近のC3の水位変化については、重力変化すなわち地下での質量変化がほとんどないのにも関わらず、10m以上にもおよぶ水位の低下を観測しており、これらを説明するためには、気液混合の地熱流体として取り扱いが必要とも思われる。

何れにしろ、地下水の変動そのものを研究する手段として、測定の簡便さ、測定値の持つ物理的な意味などから、精密重力測定が有効であることは、十分に示されたと思われる。特に、水の質量変化を検出できることの意味は大きく、従来の手法では困難であった新しい情報を得る手段として、今後、水理学、温泉学の研究に大いに役立つものと期待できる。

謝 辞

本研究の遂行に不可欠な基準点での重力測定に際して、大分地方気象台の方々には常に便宜をお計らい頂いた。ここに記して謝意を表する次第である。

参考文献

- 1) Allis, R.G and Y. Yusa (1989) : Fluid Flow Processes in the Beppu Geothermal System, Japan. *Geothermics*, 18, 743-759.
- 2) 福田洋一・馬渡秀夫・由佐悠紀・T. HUNT (1996) : 精密重力測定による別府地域の地下水変動の研究, *測地学会誌*, 42, 85-97.
- 3) Goodkind, J.M. (1986) : Continuous Measurement of Nontidal Variations of Gravity. *J. Geophys. Res.*, 91, 9125-9134.
- 4) 北岡豪一・由佐悠紀・神山孝吉・大沢信二・M. K. Stewart・日下部 実 (1993) : 水素と酸素の安定同位体比からみた別府温泉における地熱流体の移動過程, *地下水学会誌*, 35, 287-305.
- 5) Makinen, J. and S. Tattari (1991) : The Influence of Variation in Subsurface Water Storage on Observed Gravity. *Proc. 11 th Internat. Sympos. on Earth Tides* (Helsinki,

-
- 1989), 457—471.
- 6) 矢原哲也・島田寛一・由佐悠紀(1994): 別府南部地域の温泉水の流動について, 地熱, 31, 18—33.
- 7) 山下幸三郎(1979): 別府における温泉水頭の長期変化, 大分県温泉調査研究会報告, 30, 1—9.
- 8) 由佐悠紀(1979): 深い地下水面への浸透供給過程の解析, 陸水学雑誌, 40, 40—48.
- 9) 由佐悠紀・北岡豪一・神山孝吉・竹村恵二(1994): 掘削による地下温泉水の層構造の検出—別府温泉南部地域での試み—, 温泉科学, 44, 39—44.

温泉の色について

(青色温泉水の成因に関する一考察)

京都大学理学部

大沢 信二・由佐 悠紀

1 はじめに

これまでに理学的視点から「温泉の色」に取り組んだ研究は、ほとんどない。昭和31年6月に日本化学雑誌に掲載された、坪田博行と北野康による報文「温泉に産出する炭酸カルシウム沈殿物の色について」¹⁾が、著者らの知る希少な研究の一例である。この研究では、温泉沈殿物の色が客観的に測定(色彩測定)されている点で独創的であり、注目に値する。最近では、中嶋悟氏の研究グループが、分光学的手法(分光測色)により、自然界にみられる色、特に岩石や鉱物に焦点を当て、活発に研究を行っている²⁾。彼らは、温泉の沈殿物や懸濁物を主たる研究対象とはしていないが、鉱物というところに接点が見出せるため、今後、そこで培われた技術が応用されることによって、その方面の研究は大きく進展すると思われる。我々は、すでにこの線に沿って研究を行っており、血の池地獄(別府)の色について興味ある情報を入手しつつある。

ここで主タイトルに掲げた「温泉の色」を「温泉水の色」と置き換えた場合、読者はどのような印象をもつだろうか。通常の場合、例えば湯船につかったときとか、容器に汲んだときに見る温泉水は無色透明であることが多いので(硫黄臭のある乳白色の温泉は、微細な硫黄が懸濁したものであり、温泉水自身の色ではないので注意されたい)、この表現は奇異であると受け取られるかもしれない。しかし、別府の海地獄と聞けば、納得される人が多いのではなかろうか。本研究の目的は、海地獄に代表されるような青色を呈する温泉水について、それがどのような物質により、どのようなメカニズムで発色するのかを探ることにある。なお、本小論では、温泉水の青色以外について論じることを目的としていないが、研究の導入部として、まずそれらを概観することにしたい。

2 温泉の色に関する概要

温泉で見ることができる基本的な色には、赤、橙、黄、青の4色と、無彩色である白と黒がある。また、灰、茶、褐色といった中間色も頻繁に観察できる。緑や紫系統の色を目にすることもあるが、それは熱水環境に適応した藻類などの生物によることが多いようである(例えば、緑はイデユコゴメというシアノバクテリアによる)。そのような特殊な例を除けば、温泉の色は、そのほとんどが温泉水から析出した温泉沈殿物や懸濁物などの固体物質に由来するものである。温泉沈殿物や温泉水中の懸濁物による呈色が何によるかは、それらに含まれる目的の色に関係する物質を特定することで明らかにすることができる。例えば、白池地獄(別府)の白色は、熱水池の温泉水中に懸濁する非晶質シリカ($\text{SiO}_2 \cdot n\text{H}_2\text{O}$)³⁾によるもの、また、紺色屋地獄(別府)や多くの噴気地帯に存在するマッドプールの黒色は、泥に含まれる微細な黄鉄鉱(FeS_2)⁴⁾によるもの、血の池地獄(別府)の赤系統の色は、熱水池の浅瀬に堆積した鉄質温泉沈殿物(赤鉄鉱 $[\text{Fe}_2\text{O}_3]$ や鉄明ばん石 $[\text{KFe}_3(\text{SO}_4)_2(\text{OH})_6]$)⁵⁾によるもの、といった具合である。これ以外にも、橙、黄など、温泉沈殿物に含まれる砒素やアンチモンの硫化物、硫黄などに由来する色を国の内外で目にすることができる。

一方、温泉水自身が色を呈している例も少なからず存在する。大分市や大分県の庄内町・挾間町

に産出する腐植物質により茶褐色を帯びた温泉水⁶⁾や、鉄のクロロ錯体(FeCl_4^-)により黄色を呈した温泉水⁷⁾などである。これらは透明であり、懸濁物による呈色とは基本的に異なるものである。

着色物質の発色のメカニズムについては、物理学や基礎化学の研究テーマであり、研究成果を一般向けに解説した書物もいくつか出版されている^{#1}。ここでは、その中から赤鉄鉱 [Fe_2O_3] の発色機構について紹介しよう。赤鉄鉱の結晶中の鉄は、3価のイオンとなって8個の酸素によって囲まれている。酸素のp軌道を回っている電子は、2eVより高いエネルギーの光を吸収することにより、鉄のd軌道に移行することができる(電荷移動遷移)。2eV以上のエネルギーの光は、橙から紫の波長範囲の光に相当するので、白色光を赤鉄鉱に当てるとそれらの光が吸収され、その補色である赤色が反射されて赤く見えることになる。

#1 佐藤勝昭：金色の石に魅せられて—新素材研究の旅, 130p., 裳華房, 東京, 1990; 西本吉助・錦谷千穂：色はどうして出るの—ミクロの世界からの秘密, 212p., 裳華房, 東京, 1991; 本報告書参考文献の11

3 青色の温泉水

これまでに、海地獄、カマド地獄3丁目、神和苑といちのいで会館の露天風呂^{#2}(いずれも別府)、硫黄塘(中国雲南省騰冲県熱海)、インフェルノクレータ(ニュージーランドのワイマング)で、青色に着色した温泉水を確認した。さらに、名称は不明であるが、ニュージーランドのワイラケイにも青い温泉水が存在する。また、

未確認ながら、由布院に1カ所存在するとの情報もある。地熱発電用の生産井から噴出した熱水を一時的に溜めるプール(ピット)でも青色を呈することがある。実際に観察したものに限れば、いずれも例外なく、熱水池あるいはそれに近い形態の地形に溜った温泉水である。その様子を模式的に図示してみた(図1)。これらの呈色について、これまでに研究されたことはほとんどなく、唯一、別府の海地獄に関して、簡単な説明がなされている程度である。

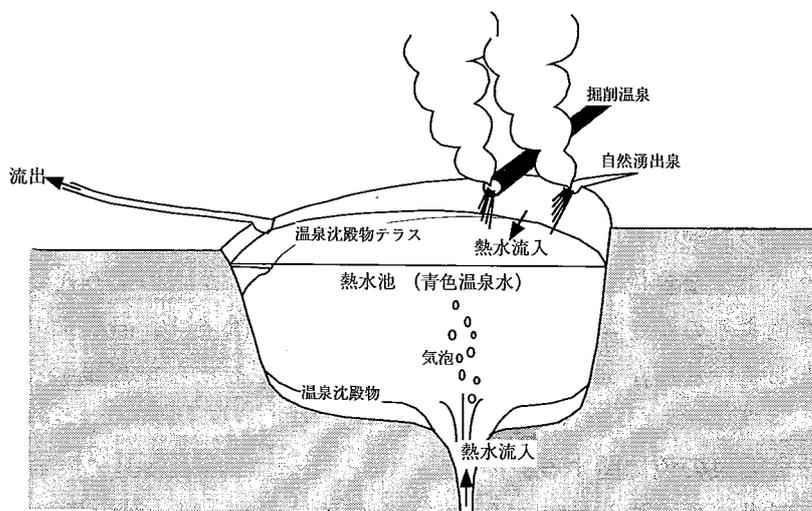


図1 青色温泉水の見られる熱水池の模型断面図

海地獄については、硫酸鉄(FeSO_4)が着色の原因であるとされている(現地の観光案内では、このように説明されているが、その出所は不明である)が、実際の硫酸鉄濃度は青色を呈するほど高くはなく、海の色が青いのと同じく長波長光散乱による呈色であると説明されている⁸⁾。海の青色は、空の光の正常反射(空の青さの反射)、あるいは水による短波長光(青色光)の選択的透過により生じると言われている(前述の説明で「長波長光散乱」とされているものはこれに相当すると思われる)⁹⁾。空の光の正常反射であると考えられる根拠は、空が曇れば水は灰色や鉛色に見えること、また晴れの日でも雲の下になった海は灰色であることとされている。ところが、海地獄は曇天のときでも青く見えるので、空の青さの反射が原因であるとは考えにくい。一方、青色光の選択的透過が呈色の原因となるためには、その選択性がさほど高くないので、水深が大きいという条件が不可欠である(コップの中

の水は見た目には無色透明であるのがなぜか、ということを考えてみればよい)。海地獄は、底が見えないほどの水深をもつので、これが青色の原因である可能性はあるが、これを盾に硫酸鉄による呈色を否定することはできない。なぜならば、硫酸鉄濃度が低くても、光の通過する温泉水に十分な厚み(ここでは水深にあたる)があれば、青色に見える可能性があるからである。

以上のように、海地獄の呈色については、いくつかの解説が行なわれているものの、いずれも推測の域を出るものではない。勿論、これらの考えを無造作に、他の場所の温泉水に当てはめることはできない。今後、水深を考慮に入れ、それらを実証的に検討して行く必要がある。しかし、現時点で著者らはそれらの考えには懐疑的であるので、本小論では、これまでに提出された諸説を検証することはせず、新しい解釈について述べることにする。なお、議論は、熱水池や露天風呂の温泉水などに見られる青色に対して、共通の原因を探るという立場で進めて行く。

#2 いちのいで会館の露天風呂には、景観の湯と金鉱の湯があり、両者とも青色を呈している。

4 青色の原因

自然界で青色を呈する代表例は、空である。太陽光(白色光)は大気中に入ってくると、風による大気密度のゆらぎや、大気中の水蒸気や塵によって散乱される。光は波動であるから、その波長がゆらぎの大きさや塵などの大きさと同じ程度かそれ以下になると、激しく散乱される。その際、青側の短い波長の光は、赤側の長い波長の光に比べて効率良く散乱される。空の青さはこのような機構によって散乱された太陽光の中の青色の成分が、私たちの目の届くことから生じる¹⁰⁾。このような物理現象は、レイリー散乱として知られている。レイリー散乱は、水で薄めた牛乳に白色光をあてて観察することもできる。すなわち、透過光は赤味がかって見えるのに対し、光の進路に対して直角方向から見ると青っぽく見え、短い光の散乱は μm 程度以下の油滴でできたコロイド粒子によるものである¹¹⁾。コロイド粒子とは、数 μm 以下の小さな粒、しかし、分子や原子よりは大きくて数 nm 以上の大きさの粒で、空気中、水中または他の液体や固体に浮遊しているものを呼ぶ¹²⁾。もし、このように何らかのコロイド粒子(無色)が温泉水中に存在することがあれば、同様な理由により、青色が観察されてよいはずである。以下では、コロイド粒子、特にコロイド状のシリカによる呈色の可能性について論じてみたい。

地熱井から噴出する熱水中のシリカは、地表に噴出した直後には、ほとんどすべてが単分子、いわゆるモノマーとして溶存している(H_4SiO_4)が、時間の経過とともに重合を行い(ポリマーの形成)、最終的にシリカスケールとして沈殿することが知られている¹³⁾。また、地表へ噴出した後の熱水中のモノマーシリカの粒径は、ミクロンサイズまで成長することが、熱水試料の放置実験により再現されている¹⁴⁾。この模擬実験により、熱水中のシリカ粒子は、その成長過程で一時的にコロイドになっていることが示されているのは、注目すべき点である。水中でコロイド状シリカの合成実験を行なったところ、白濁した青色溶液が得られたことから⁹⁾、コロイドシリカが温泉水の呈色(青色)に関与している可能性は十分にあると考える。ここではカマド地獄3丁目の熱水池と中国雲南省騰冲県熱海の硫黄塘で得た観測データに基づいて、その可能性をさらに検討してみる。

カマド地獄の青色温泉水を湛えた熱水池では、シリカシクター(非晶質シリカ)が、テラス状に沈殿している(図2のAおよび図3のA:1996年8月28日採取)。水温 62°C の熱水池には、沸騰した熱水が流入しており、沸騰熱水中には 633mg/L のシリカが溶けている(1996年3月7日採取)。 62°C における非晶質シリカの溶解度は 218mg/L であるから、流入熱水にもともと含まれていたシリカの 66% (415mg/L)が、重合反応をおこし、最終的に温泉水から沈殿することになる。非晶質シリ

カの沈殿物が熱水池内で観察されることから、シリカの重合反応は熱水池で進行しているはずである。そうであるならば、熱水池内の温泉水中のシリカの一部は、コロイド状態にあると考えられ、それが青色の原因となっているとするのは妥当であるように思える。

硫黄塘でも、カマド地獄3丁目と同様に、熱水池でテラス状のシリカシンターが認められる。熱水池への高温熱水の流入口は池の深い部分にあると思われるので、それを直接採取してその中のシリカ濃度を測定することは困難であるが、以下のようにして間接的に求めることができる。地下の熱水のNa/K比は、熱水と長石の間の化学平衡により決まり、その比は温度の関数として表わされる。熱水が地表へ湧出するまでの間に冷却や地下水による希釈を受けてもNa/K比は保持されるので、湧出温泉水のNa/K比から地下の熱水温度を推定することができる。硫黄塘の熱水池の温泉水のNaおよびK濃度は、それぞれ829mg/Lと123mg/Lである¹⁵⁾ので、これから熱水温度を算出すると235℃となる。約180℃以上の高温熱水は、地熱貯溜層中の石英と化学平衡にあり、熱水のシリカ濃度は石英の溶解度により支配されている¹⁶⁾ので、235℃で石英と平衡にある熱水中のシリカ濃度は、410mg/Lと算出される。一方、熱水池が示す水温88.7℃における非晶質シリカの溶解度は315mg/Lであり、流入熱水に含まれていたシリカの23%(95mg/L)が、重合反応により温泉水から除かれる計算となり、ここでも熱水池内にコロイドシリカが存在していることが示唆される。

青色温泉水が確認されたその他の熱水池、即ち、海地獄、インフェルノクレータや、神和苑といちのいで会館の露天風呂では上記のような実地検証は行っていないが、いずれも多量のモノマーシリカの供給源となりうる高温熱水の流入が見られ、モノマーシリカの縮合が起こりうる熱水池ないしそれに近い形状の温泉貯水槽が存在することから、そこでもコロイドシリカの生成が起こっていると考えることは不合理なことではないと思われる。より詳細な検討は今後の課題とし、ここではこれまでの議論により浮上した新たな問題を提起し、それに対して検討を加えたい。

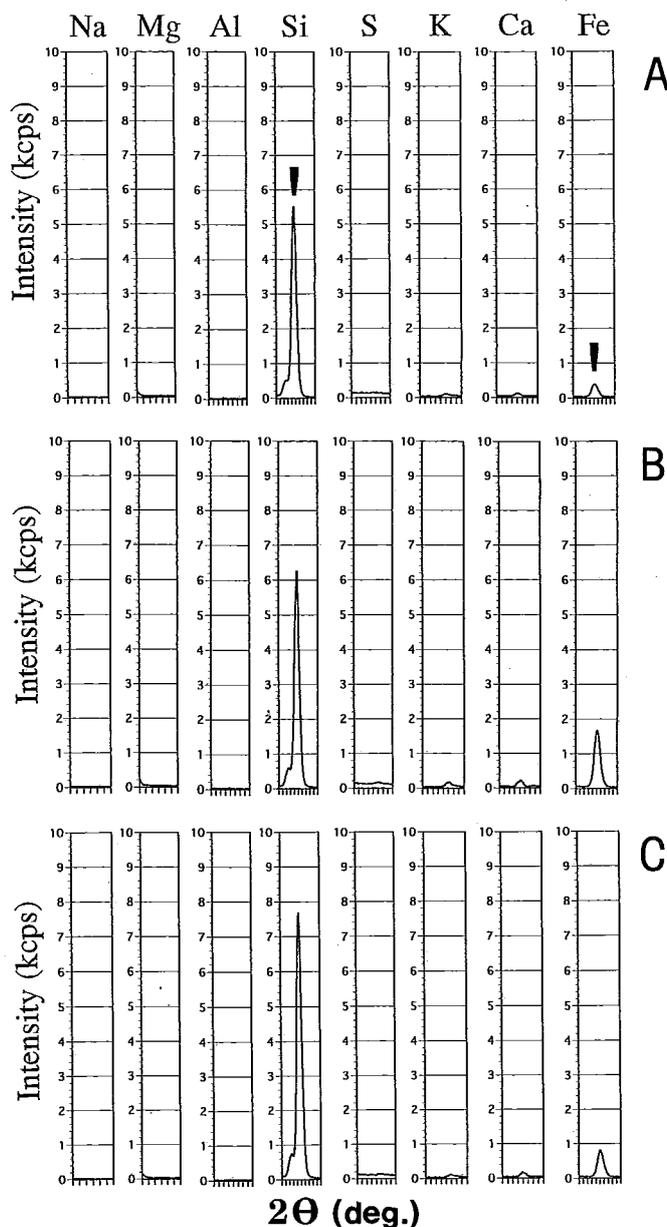


図2 温泉沈殿物のケイ光X線分析結果

A : カマド地獄3丁目熱水池のテラス状沈殿物
 B : カマド地獄5丁目熱水池のテラス状沈殿物
 C : カマド地獄5丁目熱水池の底の沈殿物
 分析条件 : Cr 50kV ; 20mV, Step angle : 0.02°, Counting time :
 0.5sec./step, Time Constant : 1 sec., Spectroscopic
 Crystal : EEDT(Na, Ca, Al, Si), TAP(Mg), Lif(Fe)

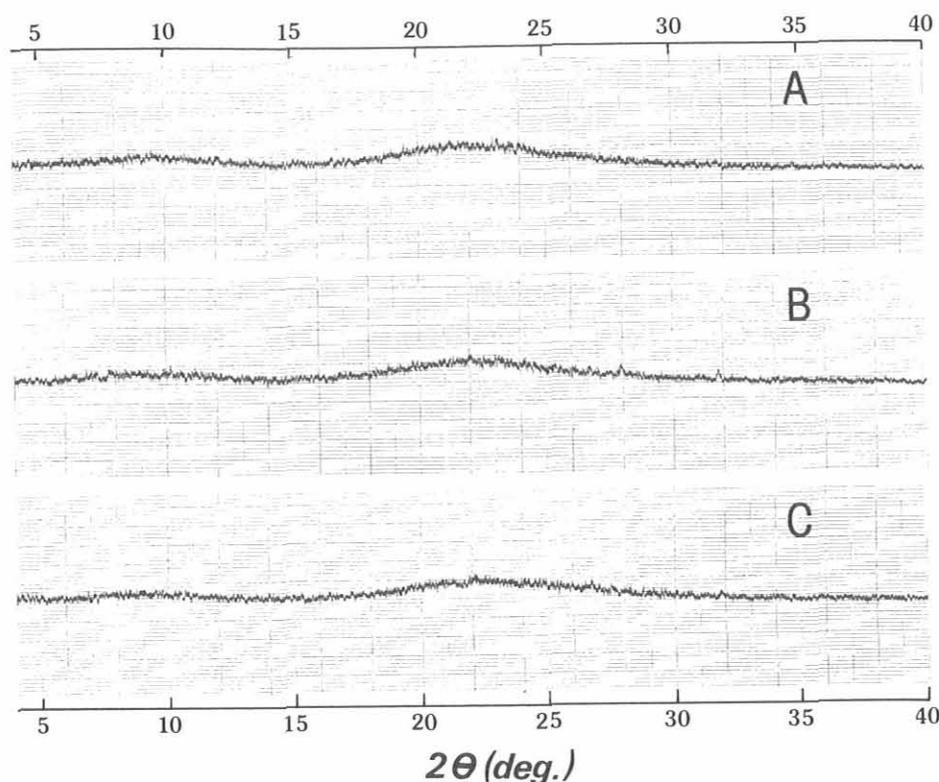


図3 温泉沈殿物の粉末X線回折分析結果

A：カマド地獄3丁目熱水池のテラス状沈殿物

B：カマド地獄5丁目熱水池のテラス状沈殿物

C：カマド地獄5丁目熱水池の底の沈殿物

分析条件：Cu(Ni-filter)30kV；15mA, slit：1°-0.15mm-1°, Scan：2θ1°/min.,

Time Constant：1sec., High voltage：1200V, Range：400cps, Chart

speed：100mm/min.

の温泉水は、シリカの懸濁粒子のために全体に白濁しており(やや青緑色を帯びてはいる)、カマド地獄3丁目や海地獄のような鮮やかな青色は示さない。コロイドのような小さな粒子による光の散乱現象には、前述のレイリー散乱の他に、ミー散乱が知られている。レイリー散乱は光の波長程度の粒子により起こる散乱であるが、粒子サイズがそれより大きくなったときにミー散乱は起こり、観察対象が白っぽくなるのが特徴である¹¹⁾。白池地獄やカマド地獄5丁目の熱水池は、モノマーシリカの重合が急速に進み、シリカ粒子が光の波長より大きな粒径に成長するような物理化学的な環境にあるのではないだろうか。次に、分析データをもとにして、この推察について検討を加える。

モノマーシリカが重合し、生成したコロイドシリカが凝集して沈殿するか、すでに存在するシリカ沈殿物の表面に付着することによってシリカセンターが生成する過程(homogeneous nucleation^{#3)}では、モノマーシリカの重合速度は、その過飽和度(溶液中のモノマーシリカの濃度/非晶質シリカの溶解度)に最も大きく依存するとされている¹⁷⁾。カマド地獄5丁目の熱水池では、そこから10m程しか離れていないカマド地獄3丁目の熱水池と同様に、非晶質シリカの沈殿物が観察できる(図2のB、Cおよび図3のB、C)。また熱水池に流入する熱水のシリカ含有量は614mg/L(1996年3月7日採取)であり、カマド地獄3丁目のそれ(633mg/L)と大差ない。ところが、熱水池の水温は、カマド地獄3丁目のそれが62℃であるの対し、52℃程度と10℃ほど低い(この違いは、主に熱水の流入量と池のサイズにより決まるものと思われる)。熱水池の水温(52℃)における非晶質シリカの

新たな問題とは、高温熱水の流入と、熱水池あるいはそれに近い形状の温泉貯水槽の存在という条件を満たしているにもかかわらず、熱水池に湛えられた温泉水は青色を呈さず、白濁しているという例が少なからず存在し、何故にそのような違いが生じるのかということである。以下で、その理由について考えてみたい。

流入熱水に多量に含まれるモノマーシリカが熱水池内で重合を起こしている例は、白池地獄やカマド地獄5丁目(いずれも別府)で観察できる。しかし、いずれも前述のような温泉水が青色を呈する必要条件を満足するにもかかわらず、熱水池

溶解度は187mg/Lであるから、流入熱水に含まれるモノマーシリカの70% (427mg/L) が過飽和であり、かまど地獄3丁目の66%より大きな値である。一方、やや古いデータではあるが、白池地獄の流入熱水には546mg/Lのシリカが含まれる¹⁸⁾。池の水温は38℃とかなり低く、この水温における非晶質シリカの溶解度は148mg/Lであるから、流入熱水に含まれるモノマーシリカの73% (398mg/L) が過飽和となる。

以上のデータから推理すると、温泉水が青く着色するか、それとも白濁するかは、シリカの過飽和度によって決まるのではないかと思われる。過飽和度が大きいほど、モノマーシリカの重合速度が大きく、急速に懸濁状シリカに成長してしまい、コロイド状態に置かれる時間が短く、結果として青く見ることがないであろう。シリカ粒子の成長と呈色の関係をまとめて模式的に示したのが、図4である。ここで考えていることが正しければ、これまで全く別ものと考えられてきた海地獄に代表される温泉水の青色と白池地獄でみられるような温泉の白色は、実は一連の物理化学過程(モノマーシリカの重合→コロイドシリカ生成→コロイドシリカの凝集・沈殿)の中で生じる、関係の深い色であるという新たな認識が生まれてくることになる。

ここまでの議論により、現状では、温泉水が青色を呈するための必要にして十分な条件は、高温熱水の流入による多量のモノマーシリカの供給、分子状のシリカが重合を行うための温泉水を貯水する地形の存在の他に、その貯水槽がコロイドシリカの滞留時間が十分となる物理化学的条件に置かれていることであると推察される。なお、2番目の条件は、太陽光を効果的に散乱させるための十分な光路を確保するといった意味でも重要なものであろう。

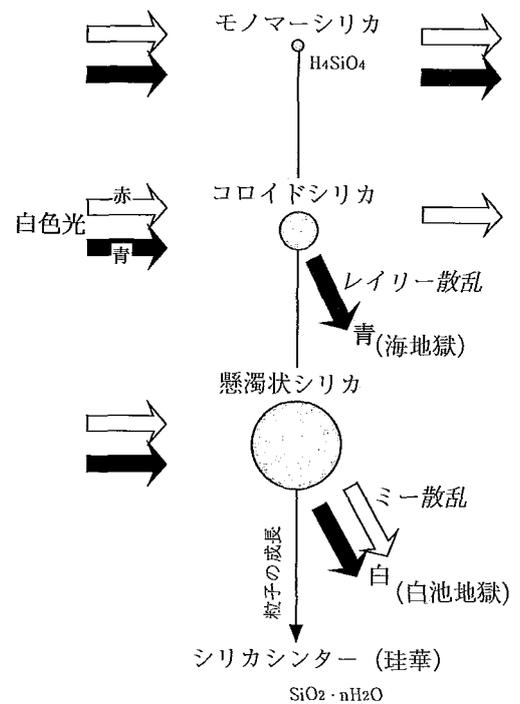


図4 シリカ粒子の成長と温泉水の呈色に関するモデル

#3 この他に、溶液中のモノマーシリカが重合過程を経ずシリカ沈殿物の表面に直接付着する、molecular depositionがあるとされている¹⁷⁾。molecular depositionはモノマーシリカの過飽和度が小さい熱水、または熱水の流速が大きい環境下でhomogeneous nucleationが抑制された場合、卓越するらしい。高温状態でシリカ濃度が高いような、地熱発電所の熱水配管内のシリカスケールの生成に関し重要な反応であると考えられている。しかし、本研究で取り扱っている系(モノマーシリカの過飽和度は比較的大きく、また熱水の流速は無視できるほどに小さい)では、molecular depositionが活発に進行しているとは考えにくく、homogeneous nucleationが支配的であると思われる。

5 もう一つの青色“温泉水”について

最後に、活火山で見られる“温泉水”の青色について簡単にふれておくことにしたい。活火山の山頂火口内に形成される火口湖(活動的火山湖と呼ばれている)は、白濁した青色を呈することが多い。そのような火口湖水は、25℃以上の温度を示すこともあり、また多量の溶存物質を含むことから、一種の温泉水と見なせる水であり、このような湖水は世界各地で確認されている¹⁹⁾。日本における代表例である草津白根山の「湯釜」と阿蘇中岳の「湯溜り」における観察と試料分析により、

白濁は湖水に懸濁した単体硫黄の微細な粒子によるものであることが明白であるが、青色の原因は未だに明らかにされていない。しかし、これらも以下に示すように、コロイド粒子による着色であるという推論が成り立つ。

湖水は、pH 2 以下の強い酸性を示し、多量の塩化物イオンや硫酸イオンを含むこと、また湖面のあちこちでバブリングが見られることから、湖底には火山ガスの吹き出し口が存在することが分かる。湖水の白濁の原因となる単体硫黄は、ガスに含まれていた二酸化硫黄と硫化水素が湖水中で反応して生じたものであり ($\text{SO}_2 + 2\text{H}_2\text{S} \rightarrow 3\text{S} + 2\text{H}_2\text{O}$)、生成当初は分子として存在しているはずである (S_8 : 8 個の硫黄原子が環状に連結したもの)。このようにして発生した分子状硫黄は、分子間力により他の硫黄分子と結合してゆき、最終的に白濁として目に見える程度の大きさまでに成長している。従って、硫黄粒子は、その成長過程でコロイド状態を一時的に経験していると思われる。水中における単体硫黄の合成実験で、この一連の過程を再現できることから、活動的火山湖の青色の原因を、コロイド硫黄に帰すことは妥当であると考えられる。4 章と 5 章で示したシリカとは物質的には異なったものであるが、コロイドという物理的な状態においては同じである点が、非常に興味深い。

ここで紹介した山頂火山内に形成された火山湖で見られる白濁した青色温泉水と同様のメカニズムで呈色していると思われる特殊な温泉水を、温泉地でも時々観察することができる。それは、噴気による造成泉であり、沢水などの冷水を溜めたプールへ噴気蒸気を吹き込ませているような場所で見ることができる。著者らは、別府市にある温泉保養ランドで数年前に目撃した。噴気に含まれる硫化水素が冷水に溶けている酸素により酸化され、その反応により生成したコロイド硫黄により青色を呈しているものと思われる ($2\text{H}_2\text{S} + \text{O}_2 \rightarrow 2\text{S} + 2\text{H}_2\text{O}$)。

6 おわりに

本研究では、まず温泉に付随する色について概観し、そこでは、赤、橙、黄、青、白、黒、灰、茶など様々な色が観察できることを手短かに紹介した。そのような豊富な色は、温泉沈殿物や温泉水の懸濁物に含まれる有色鉱物や、まれに温泉という特殊な環境に棲息する生物によるものであることも簡単に示した。一方で、温泉水自身の発する色、特に青色については、必ずしも原因が明らかにされていないという問題提起を行い、現在利用できるデータを用いて、温泉水に含まれるコロイドシリカによる発色のメカニズムを提案した。しかし、提示したメカニズムは、間接的な証拠から導いた一仮説にすぎない。今後、温泉水や合成水溶液中のコロイドシリカの粒度分析・電子顕微鏡観察、また散乱光スペクトルや見掛けのモル吸光係数の測定などの分光学的実験を行い、直接的な証拠の入手を行いたいと考えている。さらに、本小論では、温泉水の青色を「青い」と一言で表現してきたが、実際は観察対象によって微妙に色の違いが見られるので、温泉水に見られる青色の客観的な記載(色彩測定)も上記の研究と平行して行い、なぜそのような違いが生じるのかについても明らかにして行きたいと考えている。

今回は紹介程度に止まったが、コロイド硫黄が呈色の原因であると思われる特殊な青色温泉水について簡単にふれた。これについても、コロイドシリカと同様な検討を行い、その発色のメカニズムを明確にしたいと考えている。

さて、コロイドは、色の原因としてだけではなく、物質の移動の観点からも大変興味深いものである。コロイド粒子は、表面に偏った電荷をもっているので(コロイド粒子が沈降せず溶媒に分散するのはこのため)、その表面電荷と反対の符号をもったイオンを表面に吸着させる性質のあるこ

とはよく知られている。本小論で取り上げたシリカや硫黄のコロイドは表面が負に帯電しているの
で、金属イオンなどの陽イオンを表面に吸着させる能力をもっていると考えられ、それが温泉水中
のある種の金属元素の除去・濃集といった現象を本質的に司っている可能性がある。コロイドの化
学的・物理的挙動の理解は、シリカスケールへの金、銀のような貴金属や鉛、亜鉛など重金属の濃
縮²⁰⁾メカニズムの解明など、温泉学や金属鉱床学上の問題を解く重要な鍵となるかもしれない。

謝 辞

熱水池の調査と試料採取を快諾された、カマド地獄の関係者の方々に深謝いたします。また、試
料の採取と温泉沈殿物の分析では、京都大学大学院理学研究科博士課程の大上和敏氏および大分大
学教育学部化学科学生の高原達哉氏(現在、速見町立南畑中学校講師)の協力を得た。両氏に対して
謝意を表す。

参考文献

- 1) 坪田博行・北野康：温泉に産出する炭酸カルシウム沈殿物の色について，日本化学雑誌，77，
901-905，1956.
- 2) 中嶋悟：地球色変化—鉄とウランの地球化学—，292p.，近未来社，1994.
- 3) Ichikuni, M: Uptake of boron by siliceous sinters. *Geochemical Journal*, 2, 105-109,
1968.
- 4) 大沢信二：未発表データ.
- 5) 吉田哲雄・湯原浩三・中江保男・野田徹郎：別府「血の池地獄」の温泉水及び沈殿物について，
温泉科学，29，10-18，1978.；湯原浩三・江原幸雄・野田徹郎・中尾晴次：別府血の池地獄の
水深・水温・水質・沈殿物・放熱量及び放出水量の変化，温泉科学，32，153-163，1982.
- 6) 野田徹郎・北岡豪一：挟間町ならびにその周辺の温泉調査(その2)高塩分泉の化学組成，大分
県温泉調査研究会報告，28，31-41，1977.
- 7) 綿抜邦彦：箱根大涌谷強酸性噴泉の化学組成，温泉科学，17，22-27，1967.
- 8) 星住英夫・小野晃司・三村弘二・野田徹郎：IX. 1 温泉及び地熱，「別府地域の地質」，地域
地質研究報告5万分の1地質図幅 福岡(14)第75号，明文社，東京，1988.
- 9) Marcel, B. and Dourgnon, J.：色彩の秘密，稲村耕雄・中原勝儼訳，136p.，白水社，東京，
1955.
- 10) 桜井邦朋：自然の中の光と色—昼の月はなぜ白い，173p.，中公新書，東京，1991.
- 11) 中原勝儼：色の科学，147p.，培風館，東京，1985.
- 12) 北原文雄：コロイドの話，135p.，培風館，東京，1984.
- 13) 横山拓史・島田寛一・下野次男・樽谷俊和：地熱水中におけるケイ酸の重合，地熱，20，319
-324，1983
- 14) 吉永鐵太郎・松本龍彦・柳ヶ瀬健次郎：地熱水のシリカに関する基礎研究，地熱，317-382，
1987
- 15) 大沢信二・由佐悠記・王雲飛：中国雲南省騰冲火山区における熱水系の地球化学モデル，温泉
科学，45，13-25，1995.
- 16) Ellis, A. J. and Mahon, W. A. J.: *Chemistry and geothermal systems*, Academic press,
392p., Orlando, 1977.

-
- 17) 赤工浩平：熱水からの鉱物沈澱に関する地球化学—様々な地熱地域で見られる鉱物沈殿過程と鹿児島県伏見地域のケーススタディー—, 地熱, 25, 154—171, 1998.
 - 18) 大分県温泉調査研究会温泉分析書.
 - 19) 大沢信二：水溶液中における準安定硫黄化合物の挙動に関する地球化学的研究—火山学への応用—, 東京大学博士論文, 185p., 1992.
 - 20) 一國雅巳・鶴見実・角谷博樹：地熱熱水から生じたシリカスケールの化学, 地球化学, 17, 137—141, 1983.

温泉療法における循環器疾患のQOL(生活の質)の改善

九州大学生体防御医学研究所生気候学部門・高木病院*

牧野直樹・平山祐義

松井寛輔・矢永尚士*

1 はじめに

高血圧や心臓病の治療に温泉療法が有効であることを我々は既に報告してきた。一般に心臓病患者の入浴は頻脈や、代謝亢進、静水圧による胸部圧迫などにより禁忌とされてきた。しかし、薬物などにより病状の安定した循環器疾患患者では入浴により血圧の降下、心拍出量の増加、全末梢血管抵抗の低下など心臓の負荷を軽減する効果が報告されている。今回、このような慢性心臓疾患を有す患者を対象に温泉療法が生活の質(Quality of Life,略してQOL)の向上に役立っているかアンケート調査を行い検討した。

2 対象および方法

対象は外来通院患者のうち別府市内またはその近郊に在住の慢性心臓疾患101名について日常生活についてのアンケート調査を行った。調査期間は平成8年1月から平成9年1月までに温泉(主に単純泉)を利用している59名(温泉群:男性21人、女性27人、平均年齢=68.1才)と通常の風呂(さら湯)を利用している53名(男性29人、女性24人、平均年齢=64.0才)について日常生活や身体症状についての質問を行いその結果を解析した。疾患内訳は陳旧性心筋梗塞11名、狭心症19名、高血圧43名、不整脈35名、その他14名であった。その内、温泉群は陳旧性心筋梗塞6名、狭心症10名、高血圧症24名、不整脈14名であった。

3 結果

温泉群とさら湯群との間には入浴回数(各々 6.7 ± 10 回/週、 5.5 ± 2 回/週)および入浴時間(16.8 ± 10.3 分、 19.9 ± 10.0 分)には有意な差は認めなかった。入浴中の心血管系に関する症状では「めまい」の既往は両群ともに2名であったが、「胸部不快感」は温泉群(2名)、さら湯群(9名)であり、「動悸」を訴えた人は温泉群(3名)、さら湯群(8名)と温泉利用患者の方が明らかに少なかった。調査期間中に「むくみ」が有りあるいは時々有りと訴える人は温泉群85%、さら湯群75%、であり「肩こり」を訴える人は温泉群55%、さら湯群67%、便秘を訴える人は温泉群65%、さら湯群84%であった。

心臓疾患を有す患者の風邪罹患に関する調査では一年間に3回以上風邪に罹患する人は温泉群35%、さら湯群36%と差は認められなかった。一方、一年間に0もしくは1回しか風邪に罹患しない人は温泉群31%、さら湯群46%と温泉群がやや少ない傾向を認めた。その他疲れやすい、食欲などの身体所見や睡眠状態、情緒状態に関する調査では温泉群とさら湯群との間には明らかな差は認めなかった。

4 考察

今回、慢性心臓疾患患者に入浴に関するアンケート調査を行い温泉利用者のQOLについて検討

した。その中、入浴中の心血管系に関する症状ではさら湯に比べてめまい、胸部不快感、動悸などの症状を訴える人は少なかった。また、肩こり、便秘、風邪の罹患数は温泉群の方が少なかった。これは温泉入浴後の体温保護効果や温泉自体が有する成分の効果による可能性が考えられる。しかし、患者各々の病状すなわちNYHA分類の程度などにも大きく影響されていると思われる。一般には、入浴は頻脈や、代謝亢進、静水圧による胸部圧迫などにより禁忌とされてる。しかし、最近病状の安定した心臓病患者の入浴は血圧の降下、心拍出量の増加、全末梢血管抵抗の低下などが報告されむしろ心臓の負荷を軽減し心機能の改善効果が期待されている。我々は以前に高血圧症や不整脈を有する患者の入浴の効果の研究を行いその有用性を報告してきた。今回の調査では身体症状や情緒状態の変化は温泉利用もさら湯利用も明らかな差をみとめなかったが、温泉地という環境的要因も考慮すれば心臓病患者の温泉地での利用は有効性があると考えられる。

循環器疾患における温泉療法として悪性高血圧症、うっ血性心不全、重症不整脈、急性心筋梗塞症、不安定狭心症、脳卒中初期などは禁忌と考えられている。しかし、我々は狭心症発作のない狭心症患者は入浴時にも亜硝酸剤の舌下錠の携帯を勧めている。特に、循環器疾患を有する患者の入浴の注意点として(1)身体労作を避ける(2)静水圧による静脈環流の増加や胸郭の圧迫を避けるため浅い入浴から始める。(3)交感神経の緊張や代謝亢進を防止するため高温を避ける。(4)出浴後の保温に心掛けるなどが挙げられている。何れにしろ、循環器疾患患者はいつ病状が変化するか不明のため、主治医もしくは循環器疾患専門医と相談の上、入浴する事が望ましい。

5 結 語

日常生活で温泉を利用している循環器疾患患者のQOLについてアンケート調査を行った。入浴中の胸部症状の出現は温泉を利用している群が少なかった。一般症状、身体症状、情緒状況の分析では温泉利用群に肩こりと便秘症のない例が多く、風邪の罹患回数も少ない傾向が見られた。循環器疾患を有する患者の温泉療法は入浴の注意点を守ればQOLの改善に有効と思われる。

温泉利用のできるリハビリテーション施設における問題点と将来の方向性に関する検討 — 中間報告 —

国立別府病院リウマチ膠原病内科、リハビリテーション科
安田正之

はじめに

高齢化社会を迎えつつある今日、健康の維持、改善にとって、リハビリテーションは重要な方策の一つと認識されつつある。リハビリテーション施設において温泉利用が可能であることは、リハビリテーションへの意欲を高めるし、また、温熱費の節減にもつながるため、有利な条件であろう。今回、温泉を利用できるリハビリテーション施設を有する国立別府病院のスタッフに対しアンケートを依頼し、リハビリ施設の問題点を整理し、将来のあるべき姿を考えてみる事とした。

目的

国立別府病院では、慢性関節リウマチ、整形外科的疾患、脳血管障害がリハビリテーション施設を利用する主たる疾患である。平成8年4月より、従来の名称であった「理学診療科」より「リハビリテーション科」へと改称され、リハビリテーションを行うための科および施設としての位置づけがより明確にされた。これらの情勢に鑑み、今回、国立別府病院リハビリテーション施設における施設利用の現状を分析し、将来の方向性を検討する事を目的とした。

方法

1. 問題点の整理

リハビリテーション施設スタッフ全員(医師2名、PT3名、OT2名、物理療法士・マッサージ士2名、言語訓練士1名、助手6名)によるミーティングを毎火曜日午後4:30-5:00に行い、問題点の整理と意見の徴取方法を検討した。その結果を表1に示す。

表1 リハビリテーション施設スタッフによるリハビリテーション施設の問題点と将来像に対する意見の集め方

- # 1. 病院スタッフによるリハビリテーション部の評価
 - ①アンケートによる意見の収集
- # 2. 患者によるリハビリテーション部の評価
 - ①アンケートによる意見の収集
- # 3. リハビリテーションスタッフ自身による評価
 - ①カンファレンスを全員参加の下に行う
 - ②勤務時間、勤務内容を見直す
- # 4. リハビリテーション部の将来像に向けて
 - ①精神デイケアへのアプローチを行う
精神科医長・看護婦との話し合い
 - ②言語訓練セットアップ
 - ③水治療・マッサージの現状と有るべき姿とはなにか
 - ④ソーシャルワーキングの導入
 - ⑤現症の評価と治療の進展具合を客観的に表示すること
 - ⑥訓練担当士不在時の治療の補い方

2. アンケートの概略

表2のように、PTやOTなどの職種の内容を簡単に説明し、各々に対する訓練受付時間への希望とそれ以外の分野への要望を募った。

表2 リハビリテーション施設へのアンケート

- # 1. PTは主として下肢機能(歩行訓練や筋力強化、間接可動域の改善)に対するリハビリを行います。
- # 2. OTは主として上肢機能(手作業や関節運動域)に対するリハビリを行います。
- # 3. 水治療は運動浴、温泉浴、鉱泥浴、ハバード浴、交代浴、個人浴を行います。
- # 4. 物理療法はマッサージ、電気、ホットパックを行います。
- # 5. 言語訓練は失語、構音、嚥下へのリハビリを行います。
 - ①訓練時間に関して伺います。
現在の受付時間は 8時45分より4時00分までです。
 - ・変更するのであれば、いかがでしょうか。
答： 時 分より 時 分が望ましい。
 - ・その理由は、何でしょうか。
答：
 - ②その他に何か御意見が有りませんか。
答：
- # 6. 全般に関しての御意見がありましたら御願います。
答：

結 果

1. 問題点の整理

アンケート結果から得られたリハビリテーション施設の解決すべき問題点を表3のように整理した。

表3 リハビリテーション施設の問題点

- I. 共通事項
 - # 1. 受付時間
 - # 2. 患者さんの病棟までの送り迎え
 - # 3. トイレの問題
 - # 4. 訓練担当士が休暇をとる時の対応
 - # 5. 治療過程の開示
- II. 水治療に関して
 - [1] 運動浴
 - [2] リフト浴
 - [3] ハバード浴
 - [4] 入浴介助……訓練と保清の区別

2. リハビリテーション施設における受付時間に関する回答

アンケートでは、各分野の訓練の開始、終了に関する時間が不明確との指摘を受けていたので、先ず第一回回答として(I. #1に対して)検討結果を診療会議に提出した(表4)。

表4 受付時間に関するアンケートへの回答(第1回)

- I. 共通事項
 - # 1. 受付時間
 - ①玄関を開く 8 : 3 0
 - ②受付開始 8 : 4 5

③治療開始	8 : 4 5
④昼休み	1 2 : 0 0 - 1 : 0 0
⑤受付終了	3 : 4 0
⑥訓練終了	4 : 0 0

〔付帯説明〕

- ①従来より 8 : 3 0 以前から玄関は開けており、待合いのための椅子は使用可能としてありました。ただし、リハビリ各部門の部屋は責任上開けておりませんでした。この点は今後も同じです。
- ②ホットパックは蒸気熱で暖める時間がかかり、9 : 0 0 開始。
- ③昼休み時間でも玄関は開けてありますし、受付には交代で出ています。しかしながら、この時間内の訓練は責任上出来ません。
- ⑥訓練室での訓練は、4 : 0 0 までと致しますが、マッサージは 4 : 3 0 までとします。
- ⑥言語訓練や嚥下訓練は、指示の内容により 5 : 0 0 を超える事になりますので、主治医と相談の上決めさせていただきます。
- ⑥ 4 : 0 0 以後は、訓練室の掃除、事務処理のため訓練は困難です。
理由 4 : 0 0 時点で、6 人の助手のうち 2 人は水治療装置の水抜きと掃除、1 人は理学療法事務処理、1 人は作業療法器具の後片付け、1 人は事務処理(入退時間)に従事します。また、1 人は非常勤ですので 4 : 0 0 に帰宅します。
- ⑥掃除に時間を要するのは、MRSA 陽性患者さんを受け入れており、掃除や拭き取りによる清潔にはかなり気を使うことも一因です。
- ⑥ 4 : 3 0 を終了時間とすることは、4 : 0 0 より P T . O T が訓練室に居らず、有事の責任が持てませんので不可能です。

3. 水治療に関して

温泉を利用する機会が最も多い水治療に関しては、アンケートによる意見、要望もさることながら、従来より多くの問題が指摘されている。表 5 には、病院スタッフからのアンケート回答より、水治療に関する重要かつ代表的なものを列記した。リハビリテーション施設スタッフに対して、これら質問、要望への回答を依頼した。スタッフからの回答は表 6 に示した。

表 5 リハビリテーション施設スタッフへの質問

水治療に関して：いちばん多くの回答／要望が寄せられています。
リハビリ全体の問題として取り組まねばなりません。
(・)はアンケートに寄せられた病院職員からの意見・要望です。

〔1〕運動浴

- ・ P T などのスタッフが付いて欲しい
- ・ 運動浴については、専任の P T . O T がいれば患者に適した指導が行えると思う。
- ・ リハビリという観点から、開始時の説明など、指導を適宜行う必要があると考えます。
- ・ 介助を要する患者には、現状では看護婦付きとなっていますが、全面的にリハビリ施設で出来ないでしょうか。
- ・ 水着着用させてはいかがでしょうか。着用出来ない人には運動浴用のブルマのようなものと T シャツではいかがでしょうか。

〔2〕リフト浴・ハーバード浴

- ・ 現段階ではリハビリというより入浴するだけに終わっている。運動の仕方を具体的に指導して欲しい。

〔3〕入浴の介助…筋力増強、支持性強化のための水治療と保清目的のための入浴とをどのように明確に区別して行くか。時間や人員配置をどうするのかを各自考えてみて下さい。

- ・ リハビリ施設で入浴介助が出来ないか？

- ・午後からの入浴で要介助の人は、リハビリ施設の助手が入浴させて欲しい。

〔その他〕

- ・鉱泥浴は実際やっていないのでは？
- ・運動浴、温泉浴の浴槽の清掃はどうしているのでしょうか？毎日あるいは定期的に替えるのでしょうか。レジオネラ菌にはどのような対策がなされているのでしょうか。

表6 リハビリテーション施設スタッフよりの回答

- ・水治療を効果的に行うためには、水着が必要である。
- ・水着を着用して水治療を受ける前に、(市営プールにあるような)消毒槽を通るようにして温泉水の入った施設の清潔を図ってはどうか。
- ・温泉浴に入浴する日はホットパックはせず、入浴しない日に行うようにすれば、相互の負担も軽減できるのではないか。
- ・リハビリ職員は保清を行わないので、訓練目的の運動と保清目的の入浴を明確に区別し、後者であれば病棟職員が行って欲しい。
- ・医師は定期的にリハビリテーション訓練の効果を評価し、効果なしとの判断であれば速やかに中止・変更を指示して欲しい。
- ・運動浴の入り方、注意事項などパンフレットにして示してはどうか。
- ・早期患者では、午前・午後に分割してトレーニングしないと一度では無理がかかる。病棟から同一患者を午前、午後と施設に二度送り迎えする必要性を理解して欲しい。

考 察

国立別府病院リハビリテーション施設は、豊富な温泉を利用した施設として50年間の歴史を有するが、その歴史と温泉を利用できることが、一方では、施設がリハビリテーション以外の目的にも利用される歴史を生んでいる。すなわち、一部は入浴のためとの認識があり、施設としての特異性を十分に発揮できなくなっている。特に、運動浴槽が「コ」の字型に設計された運動浴訓練室内の中央部には、温泉槽とともに下肢機能が不十分な患者を運動浴槽に移動させるためのリフト装置が設置されているが、これらは訓練終了後に体や頭を洗う事にも使用されているのが現状である。

これらは、従来「理学診療科」の対象としてきた疾患の大半が脳血管障害後遺症であったため、中等以上の身体障害者全ての保清を病棟内の風呂のみではまかないきれず、訓練と保清とが同一場所で行われる結果を生んだと思われる。入浴目的で利用される時間帯にはPT(OT)は付かないため、施設まで送り迎えをして入浴介助をする看護婦とリハビリを目的として指示した医師の双方から、使用目的と利用の現状が一貫していないとのクレームが寄せられる結果となっていると思われる。

このような状況は、長い歴史に成り立った習慣によると思われるので、リハビリテーション施設スタッフと病院スタッフ(医師、看護婦)双方による意識の変革と患者達の理解を得るべく、問題点の洗い出しを目的としてアンケート調査を行った。なお、スタッフからの回答は既に回収したが、患者からのアンケートは回収中であり、未整理である。

訓練受付時間に対する意見は、最も具体的なコンセンサスを得やすい問題であるため、先ずそれを取りあげた。結果として、表4のようなコンセンサスを得た。本来の目的である水治療へのアプローチは最近開始しており、順次議論を深める予定である。その過程で、運動浴を訓練のみに使用することを決定されれば、PT(OT)による指導や監視といった管理・責任態勢の充実が必要とされるのであろう。場合によっては、治療対象となる患者のグループ分けや人数の制限なども視野に入れた検討が必要と思われる。また、その時間帯は他のリハビリ患者への対応が不十分との非難を

受ける事のないような配慮も同時に必要である。さらに、病棟で全ての保清を行う事は病棟の態勢や設備からも容易ではないため、リハビリテーション施設内に保清のための設備を新設したり、あるいは、現存の設備の使用目的の変更が必要となるであろう。これらの点も現在検討中である。

なお、院内感染に関するマスコミ報道もあって、レジオネラ菌などに関する温泉水の清潔への不安がアンケートにも、また、患者達からも寄せられており、対応が必要と思われる。

環境行政と温泉法・温泉権

— 21世紀へ向けての回顧と展望 —(上)

(大分大学)

大野 保 治

- | | |
|-------------------|------------------|
| はじめに | III 温泉の権利に関する諸問題 |
| I 温泉をめぐる環境行政の推移 | 1 温泉の権利の史的展開 |
| 1 環境行政と温泉法 | 2 温泉の掘削をめぐって |
| 2 国の環境行政とその施策 | (以上本号) |
| 3 本県での取り組み | 3 温泉の集中管理について |
| II 戦後の温泉法・温泉行政の展開 | 4 地熱開発をめぐって |
| 1 国・県(大分県)の源泉数 | IV 県下の温泉地の将来展望 |
| 2 温泉の掘削とその規制 | V 結 語 |
| 3 温泉の私用状況等の状況 | (以下次号予定) |
| 4 地熱開発・発電の現状 | |

はじめに

温泉をとりまく環境行政は、昭和46年(1971)に「環境庁」が設置された時から新たな展開を見せる。それは、公害の防止と自然環境の保全を含め、環境の保全に関する行政を総合的に推進することを主たる任務として置かれたのである。この時期は、また公害紛争が全国的に展開していた昭和40年代(1965～)のなかばのことであった。

それから20余年が経過し、私たちが直面している環境問題も大きな変化をみている。かつての激甚な公害の克服や優れた自然環境の保全については、それなりの成果が得られるのであるが、一方では、大都市における大気汚染や生活廃水による水質汚濁の都市・生活型公害の改善が遅れ、廃棄物——とくに産業廃棄物のそれ——の増加などは深刻の度を増しており、各種開発による身近な自然環境の破壊も進んできているのである。

また一面では、グローバルな宇宙次元での地球温暖化、オゾン層の破壊等の地球環境問題が生じ、人類の生存の基盤である「かけがえのない地球」が損なわれているという事実をも直視する必要がある。こうして今日の環境問題は、地球規模という「空間的広がり」と将来の世代にわたる影響という「時間的広がり」の二側面を持っており、成熟した経済(資本主義)社会の論理的帰結ともみろべき大量生産・大量消費・大量廃棄といった経済生活での在り方、また私たち1人ひとりの生活にも根ざす生存権・生活権の基盤にもかかわる「生きる権利」の問題とも密着しているのである。

これらの諸問題を解決し、自然や資源の恵み豊かな環境を来たるべき21世紀の次の世代に受け継いでいくためにも、これまでの社会経済システムや生活ライフスタイルを根本から見直し、環境への負担の少ない持続的発展が可能な社会を構築していく必要があると思われる。

こうした世情を受けて、国(環境庁)は、平成5年11月「環境基本法」を制定し、新たに環境施策

を展開する上での基本となる理念や施策の方向性を明らかに打ち出した。さらに翌6年12月、環境基本法に基づいて国全体の基本的方向を示し、すべての主体に期待される基本的な取り組みを盛り込んだ「環境基本計画」を策定している。

このような時期に、制定後50年を経た「温泉法」と、その中核ともみるべき権利概念「温泉権」にスポットを当て、温泉行政を旧来の狭い一行政部門(保健衛生行政)から高次元の環境行政の中に取りこみ位置づけるとともに、過去の温泉法の歩みの中で提起された法的諸問題を掘り起こし、再検討した上で再構築を試み、21世紀へ向けて新たな展望を開こうとするものである。本稿は、このような研究と調査の研究姿勢の下に諸課題に取り組み、何らかの貢献を期そうとするものである。

I 温泉をめぐる環境行政の推移

1 環境行政と温泉法

戦後、昭和23年に温泉法(法第125号)が制定されたが、昭和40年代に環境行政の軌道が敷かれるようになってから、温泉行政もまた、大きく転換期を迎えるようになった。

大分県では、自然環境保全法(昭和47年9月22日制定 法律第85号)および大分県自然環境保全審議会条例(同48年7月12日制定 県条例第38号)に基づき、自然環境の保全に関する重要事項を審議する機関として、昭和48年に設置された「大分県自然環境保全審議会」がある。

広域の環境行政の統合をめざす国(環境庁)では、平成3年に至って、温泉行政を再度根底から見直して温泉法の1部改正に踏み切った。すなわち、同年5月21日公布の「行政事務に関する国と地方の問題等の整理及び合理化に関する法律」(法律第79号)により、温泉法の1部が改正された(第19条削除、第20条変更)。この改正規定は、公布の日から1年を越えない範囲で政令が定める日から施行されることになっていた。その結果、同年9月13日付けで施行期日を定めた政令が公布されたことから、平成4年4月1日より施行される運びとなった。それによって、これまで各都道府県に設置されていた温泉審議会が各都道府県の「自然環境保全審議会」に統合されるに至ったのである。

この温泉法の1部改正をめぐっては、財団法人・日本温泉協会より所轄の環境庁に対して「要望書」が提出されていた。その要望事項のほとんどは受け容れられた結果、統合後の上掲審議会の中に温泉に関する部会として「温泉部会」を設置する旨が明記されている。なお、要望事項の中での④これまでの温泉審議会委員がそのまま温泉部会の構成メンバーとなること、⑤部会の決議をもって自然環境保全審議会の決議とすること、なども認められた。これらの点については、日本温泉協会発行の機関誌「温泉」(平成3年6月号・8月号・10-11月合併号)が詳しく報じている。

このような経緯で、大分県でも、旧来の温泉審議会が「大分県自然環境保全審議会温泉部会」の名称に改められ、構成委員も従来のままに再出発するに至ったのである。ちなみに、同審議会の委員は総勢50名(学識経験者、関係行政機関職員)、幹事3名(環境企画課長・観光振興課長・森林保全課長)、その任期は2年である。

参考までに、同審議会に置かれている部会は、次の5部会である。

- 自然環境保全部会
- 環境緑化部会
- 鳥獣部会
- 温泉部会
- 自然公園部会

2 最近の国の環境行政(概要)

平成になるまでの環境行政は暫く措くとして、最近10年間の動きを見よう。平成に入ってから

国の環境行政諸施策は、平成4年10月20日提出の「環境基本法制のあり方について(答申)」(中央公害対策審議会・自然環境保全審議会)の基本線に沿って進められている。

この答申に見られる将来の「展望」と「理念」は極めて啓示的で示唆に富み、注目すべき問題性を摘出しているように思われる。詳細を論ずる紙副はここにはないので、「基本理念の内容」(要旨)を次に述べることにする(ジュリスト第1015号「環境保護の新展開」)。

①健全で恵み豊かな環境の保全

人間を取り巻く環境は、人類の「生存の基盤」として将来の世代をも含めて共有しており、また環境から多くの恩恵を受けるとともに、環境に様々な影響を及ぼしている。したがって、将来の世代に健全で恵み豊かな環境を継承することができるように「適正な環境保全」が行わなければならないこと。

②持続可能で環境負荷の少ない経済社会の構築

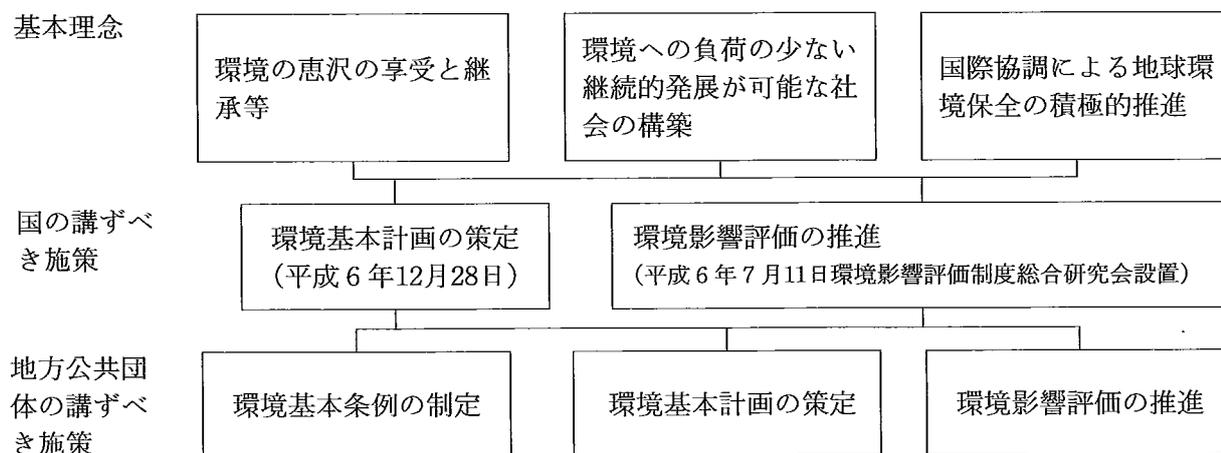
環境負荷を極力少なくするために「科学的知見」と「予見的アプローチ」の充実により、積極的に施策を構ることが重要となる。そのためには、環境に関するすべての主体(国、地方、事業者、国民)が挙げて公正な役割分担の下に自主的かつ積極的に「持続可能な環境の負荷の少ない経済社会」を構築して行かなければならないこと。

③国際的取り組みの積極的推進

地球規模での環境の保全は、一国のみではなく、国際社会が共同で取り組むべき人類の課題である。したがって我が国は、経験と技術、また経済力を生かしながら、国のあらゆる主体が国際的取り組みを率先して推進する必要があること。

以下に<環境基本法のしくみ>と<「環境基本計画」に掲げる長期的な目標>を図解して示すことにする(平成7年9月刊「県保健環境部環境企画課「資料」による)。

(1) 環境基本法のしくみ



(2) 「環境基本計画」に掲げる長期的な目標

- ① 循環 環境への負荷の少ない循環を基調とする社会経済システムの実現
- ② 共生 自然と人間との共生の確保
- ③ 参加 環境保全に関する行動への参加
- ④ 国際的取組 国際的取組みの推進

3 大分県の取組み(平成7年度～平成9年度)

(1) 環境基本計画の策定

地域の特性を考慮し自然環境の保全と快適な地域環境の創造を目標とする環境基本計画の策定を行う。

(2) 環境影響評価制度の確立

平成8年8月に予定されている国の環境影響評価制度総合研究会報告の推移を見守りながら、統一的、体系的な指導要綱の策定を行う。

II 戦後の温泉法・温泉行政の展開

1 国と県(大分県)の源泉数

大分県が全国の都道府県の中で、温泉資源に恵まれて源泉数が多く、したがって湧出量も多いことは、ここに指摘するまでもないところである。具体的に、その概要を記すと、全国の源泉総数は平成8年3月末現在で2万4,061口(孔)を数える。このうち、本県が4,621口で全国の18%を占める。また、その湧出量においても、全国237万5,503ℓ(毎分)のうち9%を占めて23万8,334ℓである。

このように源泉数においては全国第1位、以下、鹿児島県・静岡県・熊本県の順である。また、湧出量では北海道(29万2,760ℓ)に次いで全国で第2位、以下、鹿児島県・青森県・岩手県がこれに続いている。

ここで、大分県下の温泉地の分布状況を見としよう。県の調査データ(平成7年版「環境白書」)によれば、温泉湧出の市町村はほぼ全県にわたり、全国一の“温泉県・大分”の名にふさわしく、実に35市町村を数える。

つぎに源泉の湧出状況を見ると、県全域の湧出温泉のうち、自噴泉によるものは毎分8万5,696ℓで36%であるのに対して、動力装置による揚湯量は15万2,638ℓ、64%と約3分の2を占めている。ここでも自噴泉がなお活動しており、他県のそれに比べて注目を引く。将来の展望としては、自噴泉がさらに減退し、逆に揚湯量が増大すると見てよいであろう。

さて、ここで「大分県の源泉数と湧出量の概要」を所轄の各保健所・市町村別に示すことにする。

第1表 県下の温泉(源泉数・湧出量)の分布状況

(平成7年版「環境白書」より作成)

保健所	市町村	源泉数	湧出量(ℓ/分)	温泉地区別源泉数
別府保健所	別府市	2,849 ⁽ⁿ⁾	94,742	浜脇20 別府1,019 石垣542 亀川617 鉄輪119 鶴見384 掘田147 東山・内成4
小計		2,849	94,742	
大分保健所	大分市	158	14,169	大分147 八幡9 塚野2
	野津原町	3	9	廻栖野1 近原2
	挾間町	18	2,234	挾間17 海老毛1
	庄内町	70	8,338	庄内60 白水10
	湯布院町	846	41,898	湯布院797 湯平31 塚原3 奥江9
小計		1,095	66,648	

玖 珠 保 健 所	九重町	208	13,716	宝泉寺78 筋湯69 長者原53 川底31 その他86
	玖珠町	36	3,059	玖珠36
小 計		244	16,775	
日 田 保 健 所	天瀬町	97	5,447	天瀬83 湯ノ釣9 杖立5
	日田市	8	2,730	日田8
	中津江村	1	83	中津江1
小 計		106	8,260	
竹 田 保 健 所	久住町	14	890	赤川7 七里田5 前田1 法華院5
	直入町	61	3,427	長湯96
	竹田市	3	494	竹田 3
小 計		78	4,811	
中 津 保 健 所	耶馬溪町	19	1,745	深耶馬13 金吉3 その他3
	山国町	5	1,012	宇曾2 守実3
	本耶馬溪村	2	46	西谷2
	三光村	1	0	上深水
小 計		27	2,803	
宇 佐 保 健 所	宇佐市	5	481	出光他4地区 各1
	院内町	2	153	上宇1 平原1
	安心院町	7	415	下平2 六郎丸他各1
小 計		14	1,049	
高 田 保 健 所	豊後高田市	4	17	草地1 美和1 吉平2
	大田村	1	27	杓掛1
	真玉町	6	477	真玉2 浜西他4
	香々地町	1	0	香々地町
小 計		12	521	
国 東 保 健 所	国見町	4	168	赤根3 櫛来1
	姫島村	1	338	姫島1
小 計		5	506	
日 出 保 健 所	杵築市	39	2,093	杵築39
	日出町	11	828	日出6 真那井2 大神3
	山香町	2	51	山香1 内野1
小 計		52	2,972	

白 杵 保 健 所	白杵市	12	11	六ヶ迫12
小 計		12	11	
佐 伯 保 健 所	佐伯市	1	20	佐伯1
	宇目町	1	8	宇目1
	直川村	2	44	直川1
小 計		4	72	
総 計		4,498孔	19万9,170ℓ /分	

2 温泉の掘削の推移とその規制

(1) 温泉の掘削等の概況

温泉の掘削は周知のとおり、都道府県知事の許可を要する(温泉法第3条第1項)。

温泉法施行の昭和23年から、平成7年度までの県内の掘削・増掘・動力装置の申請件数と許可・不許可の処分を示すのが次の第2表である。

第2表 温泉の掘削・増掘・動力装置の申請状況(昭和45年まで)

年 度	掘 削 許 可 数	不許可	増 掘 許 可	不許可	動 力 装 置 許 可	不許可
昭和23	1	0	74	0	0	0
24	46	0	39	0	2	0
25	12	0	44	0	3	0
26~29	(年平均) 31	0	(同) 71	0	0	0
30	52	0	59	0	2	0
31~34	(同 上) 65	1.5	(同) 63	0.3	13	0.3
35	131	2	56	0	14	1
36~39	(同 上) 193	9	61	0.3	24	0.3
40	218	2	70	0	87	0
41~44	(同 上) 295	27	43	0.5	230	0
45	261	14	29	0	378	0

この表を見るとおり、昭和35年頃までは、掘削と増掘の申請件数はともに2ケタであったものが、この頃を境に急速に3ケタに増え始め、同40年代に入って飛躍的に増加し、そのピークを迎える。この10年間の急速な増加現象は、池田内閣の所得倍増計画とその経済政策を継承する佐藤内閣の時代であったこと、併せてこれを支持する日本経済(資本主義)の発展——それはまた温泉観光ブームとなった——があり、温泉利用者の増加と、今一つ掘削技術の向上もまた見逃してはならないところである。

こうした結果は、一面では温泉の濫掘と濫用の弊害を招き、工場進出等による公害の社会問題とも併行して、全国各地で温泉紛争を発生させた。だが、昭和50年代に入ると、こうした異常なまでに過熱した掘削ブームもようやく下火に向かった。その法的背景には、「掘削の自由」に基づく濫

掘傾向に規制が加えられ、一定の区画に限り「保護地域」が設定されて無秩序な掘削ブームが抑制されるといった事情が考えられる(次項)。

つづいて、動力装置の動向を見よう。昭和40年代に入ってから、掘削ブームに連動して、動力装置の申請件数が増加をみている。これは過剰なまでの掘削の結果、当然ながら温泉地の全域で地下水位が低下をみたこと、また一方では、掘削技術の向上によって従来温泉の湧出しないとされてきた未開発地域でも、掘削深度が深まって湧出を見るに至ったこと。その結果、動力装置の申請が増加したことに抛ると考えられる。本県の場合、温泉掘削が進んだ地域としては庄内地区、杵築地区、九重(久住)温泉群の周辺部を挙げることができよう。

(2) 温泉の掘削の規制(概要)

ここで、温泉源の保護対策等に触れてみよう。

上に述べたような深刻な温泉地での過剰掘削に対して、県当局の採った施策としては、まず別府温泉でのそれを挙げることができる。すなわち、昭和34年、温泉審議会運営規程として恣意的な裁量を認めない客観的基準に基づく「審査基準」が定められた。こうして合理的、かつ科学的な基準を確立することによって、温泉の法秩序(公正な温泉利用の実現)と法的安定性の確保(温泉の合理的利用)が得られるに至った。

つづいて同37年、第99回温泉審議会において別府市鶴水園北浜埋立地を「特定保護地域」に指定し、この地域での新規掘削を認めないことにした。同43年4月に至って、同審議会では、大分県温泉調査研究会の科学的調査データに準拠して、別府温泉全域にわたって「特別保護地域」(3地域)と「保護地域」(1地域)を設定した(第145審議会 薬第770号通達)。さらに同47年9月には、湯布院温泉(由布院・湯平)にも上掲のごとき保護地域を設けている。(第175回 薬第1323号)。さらに同48年2月、別府温泉の保護地域(別府市北部保護地域)の領域を拡張する改正がなされた(第177回 薬2456号)。こうして掘削規制が着々と整備された結果、温泉行政も次第にその成果が見られるようになったのである。

だが、その一面、その規制の内容は地域住民にとって、とりわけ温泉を持たない住民には、掘削規制は「温泉(利用)を享受する権利」の制限を意味する。しかし、県所轄課と実務担当保健所では、温泉利用の実態をよく把握した上での政策であったこと、また地域住民に施策の趣旨を周到に説明した上で改正に望んだことでさほどの混乱をみることなく、これが実現をみたのであった。

ここで規制の内容(重点のみ)を再録する。すなわち「特別保護地域」では、新規掘削は全く認められないこと。また、「保護地域」では、既存の温泉から100m(湯布院の一部では150m)、噴気沸騰泉からは150mの距離制限が定められている。これらの規制により、とかく掘削の可否をめぐる問題の多かった温泉トラブルも、最近では、ほとんどといってよいほど見られなくなった。

なお付記するなら、昭和34年2月に温泉審議会運営規程として定められて以来、掘削時に提出が求められていた附近の既設温泉所有者の「掘削同意書」が必要でなくなったことである(第200回温泉審議会 昭和51年12月)。もっとも、審議会が必要と認めた時にのみ提出するのであるが、その適用事例はほとんどなく、行政指導の範囲で紛争が未然に防止されているのが常態である。

3 用途別にみる温泉利用の概況

本県に所在する温泉地での温泉利用の実情を、その用途別から見てみよう。

温泉利用の主流は、古来、温泉をこよなく愛する国民性から「浴用・飲用」のそれであることは、ここに記すまでもあるまい。その記録は、王朝時代の現存の国土記にも見られ、「豊後国風土記」

(715～739年)にも温泉のことが取り上げられている。

この伝統的・支配的な温泉利用のそれは、実に97%にも達し、源泉数においても248口を数える。これ以外の他目的(多目的)利用の口数は228口に過ぎない。それも、このうち105口は浴用・飲用との共用であるから、その利用度はさらに減じる。将来の展望として、温泉の多面的利用はまだ緒に着いたばかりであり、さらに増大することが考えられる。たとえば源泉利用(第1次的利用)後の副次的利用(第2次的利用)の面で、余湯や廃湯を効率的に利用することを考えることは資源活用の上でも必要なことではあるまいか。もっとも、用途別利用のデータ収集には、「源泉」のみの利用に限られていると考えることから、第2次利用の分をも調査対象とすれば、上掲の数字はかなり多くなることも予測される。

さて、上述のような他目的利用の傾向が主に見られるようになったのは、石油ショック以降の、石油危機に直面した昭和50年代に入ってからである。石油資源の大方を輸入に依存せざるを得ない我が国で、未曾有の「石油危機」は、日本経済を根底から動揺させ、国を挙げて日常生活にまで混乱を招くことになった。これに代わる代替エネルギーとして脚光を浴びるに至ったのが、火山国日本に豊富に賦存するとされる地下マグマによる地熱噴気の利用であった。敗戦時の燃料不足の当時、注目を集めたのも温泉資源であり、具体的には地獄熱による煮むし、部屋の暖房用、海水からの製塩、味噌醤油アミノ酸製造、椎茸・製茶の乾燥、鶏卵のふ化、養魚用、野菜や花の温泉栽培などまで広く活用されたのであった。

昭和50年代に入って、とりわけ注目を浴びたのが地熱開発による発電事業である。これについては、次節に述べる。

県調査の用途別利用の実情は下記のとおりである。特異なものとして、別府温泉で戦前からの“地獄”観覧用の源泉・噴気を挙げることができよう。また、地獄と並んで“湯の花”製造用のそれも特異である。地名ともなっている「明礬」(徳川期には製紙・染剤・火薬などに使用されていた)は幕末には中国産の輸入品に押されて不振となったことから、明治中期から後期にかけて生産され始めたのであった。

① 園芸(農業)用	53口	④ 養魚用	24口
② 湯の花製造用	49口	⑤ 地獄観覧用	18口
③ 地熱発電用	39口	⑥ 医療・保健用その他	45口

(注)口数は源泉のみの数字である。

4 戦後の地熱開発・発電事業の概要

(1) 新エネルギー資源としての「地熱」

石油ショックが日本経済に多大の影響を与えたあと、主要な先進国諸国の首脳は、昭和53年(中曽根内閣)、東京サミットを開いてエネルギー対策を根本的に討議した。この合意を受けて翌54年、資源エネルギー庁は「長期エネルギー需要暫定見通し」を策定し、これを目標として国を挙げて取り組むことになった。

その要点は、エネルギー源を輸入石油から原子力、石炭などに多様化することにより、昭和52年度輸入石油依存度74.2%を同70年度には43.1%にまで縮小し、しかも適正な経済成長率を確保していくというものであった。そのためには、こうした国策に沿う一環として、総エネルギー供給量の中で、ごく小さな比重しか占めないにしても「地熱開発」を再評価して日本のエネルギー資源の中に位置づけ、それによる「発電」を主軸として、温泉の他目的利用をも含めてエネルギー対策の一助にしようとするのである。

こうして脚光を浴びて新たに登場した地熱エネルギーは、(社団法人)日本地熱開発調査会の資料(同54年11月)によれば、①非枯渇性の石油代替エネルギーになりうること、②火山国日本に豊富に賦存する数少ない国産エネルギーであること、③すでに技術的に実用化していること、④今後の技術開発によっては、一層比躍的な利用の拡大が期待されること、などが示された。

その後、昭和60年代に入って、石油需要は緩和基調に転じ、石油価格も大幅に下落し、代替エネルギー開発に切迫感が薄れて停滞の気運が見られた。平成に入るや、エネルギー情勢は再度大きな変動をみた。すなわち、国内外のエネルギー消費は大幅な伸びを示し、加えて開発途上国の消費が一樣に増加をみた結果、1990年代以降、国際エネルギー事情は再び緊迫化するに至ったのである。

このような石油情勢下で起きた湾岸戦争(平成3年9月)は、幸いにも短期間で終了し、世上心配された石油供給不足と価額の暴騰による経済混乱は辛うじて避けられたが、この戦争は、改めて我が国のエネルギー供給構造の脆弱性を浮き彫りにしたのであった。すなわち、我が国の一次エネルギーの約57%を石油に依存し、石油の実に99.6%を海外に依存する。しかも、このうち、中東諸国への依存度が71%にも達しているといった状況に眼をそむけてはならないのであろう。

(2) 地熱発電の現況

地熱エネルギーは、我が国に賦存する純国産エネルギーであり、環境負担も比較的少ないものとして全国的に開発され利用されてきた。1990年(平成2年)現在、年間27万KW(設備容量)であったのが、その後1990年半ばには、さらに全国で7地点約26万KWの新規発電が可能となった。さらに1995年(平成6年)には、3地点の発電所が運転を開始し、地熱発電総出力は51万7,300KW(但し設備容量、認可出力は50万3,705KW)と、50万KWの大台を突破したのである(日本地熱調査会「わが国の地熱発電」1996年版)。

ここで、大分県関係の地熱発電所の運転状況を見ることにしよう。

1995年(平成7年)度の年間出力量(平成7年4月1日～翌8年3月31日)は、大岳発電所が13万KW、八丁原1号井・2号井がともに5万5,000KWで、県下の3発電所(いずれも企業名は「九州電力㈱」)の合計量は24万KWに達し、全国発電総量の約50%を占める。また、これとは別に、個人企業のそれ(自家発電)があり、小規模ながら別府市の杉の井ホテルが3,000KWで異彩を放っている(この他では鹿児島県霧島温泉の国際ホテルの1,000KW)。上述の九州電力㈱の3発電所とも、その稼働率は93.8%、利用率も83.4%～91.0%(全国平均は70.3%)と高い数値で利用されている点は注目してよいであろう。

なお付記するなら、平成7年6月に着工した滝上発電所(九重町)が昨年(同8年)11月から2万5,000KWで稼働を開始した。その他、全国的には、八丈島地点で同9年を目指し、また熊本県小国地区で2万000KWを目標に(九州電力、電源開発)同11年を目指して目下発電事業を急いでいる(上掲書)。

以上、見てきたように、全国的に着実に開発が進んだ地熱発電事業も、将来の展望としてはそれほど楽観は許されない。長期エネルギー見通しとして樹立された2,000年(平成11年)度100万KW、2010年度350万KWの達成はいささか困難だとされている。障害の壁として考えられるのは、開発技術、とりわけその経済性(採算性)、土地利用の問題、既設温泉場との競合(地域紛争)、法制度の確立、助成金などの諸問題が山積しており、将来は政治力により重要国策問題として解決していく他途はないのではないかと考えられている。地熱開発をめぐる将来展望については後述のIII 4(次号予定)で再び取り上げる所存である。

III 温泉の権利に関する諸問題

1 温泉の権利の史的展開

(1) 明治以前の温泉権

自然湧出泉が支配的であった明治以前(前近代)にあつては、温泉は、原則として私的支配の対象とはなり得なかつた。「自然に湧き出る湯は皆のもの」といった意識に支えられて、温泉は、それを利用する住民集団(部落集団、村落共同体)の総有的支配の下におかれていた。明治以前の温泉権の古典的(伝統的)形態は、林野における入会権^{いりあい}や農業水利権、沿岸漁業権などに類似する共同体的権利で、個人が支配する権利ではなかつたのである。

また、その利用の形態も、共同利用のそれに類似するものであつた。すなわち、いわゆる「共同風呂」とか「部落湯」とか呼ばれるものがその典型(原型)であり、村落共同体のメンバー(構成員)は、その資格に基づいて共同で利用しあうとともに、その施設(湯口や入浴設備など)もまた共同で維持・管理するというものであつた。この場合、温泉の権利主体は、村落共同体そのものであることは言うをまたない。この種の温泉利用は、今日ではもはや姿を消し、よほど鄙びた温泉場^{ひな}にしか見られなくなっている。開けた(近代的な)温泉地には、田慣温泉権の解体により新しく出現した形の温泉権(近代的温泉権)が多い。

(2) 第二次大戦までの温泉権

温泉は、周知のように、自然湧出泉と人口掘削泉とに大別される。一般的にいて、全国の温泉地では、明治期の終り頃までは自然湧出泉が温泉の主流を占めていたが、大正期後半から昭和期に入って温泉掘削がさかんとなると、これに伴って、人口の掘削もまたさかんとなった。この傾向は、第2次大戦後になって旅行ブームや観光ブームを迎えるにおよび、さらに飛躍的に拡大する。温泉場は元来、湯治用のものであつたが、観光用のものから、さらに進んで他目的の利用へと向かうことは、第一章(I)で触れたところである。もちろん、こうした一般的趨勢は、全国の温泉地で画一的かつ同時に展開するものではなく、その温泉地の置かれた社会的・経済的・歴史的諸条件に制約されて千差万別の展開を見せるのである。

さて、このように明治期以降、新しい温泉の掘削が進むにつれて、徳川期以来続いてきた自然湧出泉は、その影響により湯量がしだいに減少し、また温度も低下して、その多くは涸渇するに至つた。一般的にいて、人工掘削泉の増大と自然湧出泉の減少という相関傾向が明治以降のほとんどの温泉に見られた趨勢であつた。当大分県でも、別府温泉(別府八湯)や湯布院(由布院・湯平)温泉、またくじゅう温泉群の中にも見られた自然湧出泉中心の温泉場は、最近では急速に人工掘削泉(近代的温泉権)が増えて、往古の湯治場の面影を薄くしてきている。

こうした温泉利用の展開過程は、温泉の権利関係の側面から見れば、依然湧出泉を中心に維持されてきた旧慣温泉権が解体ないしは変質して、人工掘削泉を中心とする近代的温泉権が成立していく過程でもある。したがって今日、温泉権をめぐる対立——社会現象の側面から捉えれば「温泉権紛争」(後述)——は旧慣温泉権と近代的温泉権との対抗関係、および近代的温泉権相互の対抗関係という、いわば二重の、そして異質の対抗関係の構図を見せる。

もっとも、旧慣温泉権と近代的温泉権との対抗関係という図式は、近代化の比較的進んだ開かれた温泉地ですで見られてきた現象であり、また敵びた温泉場が今後近代的温泉地へと展開する過程で多く見られることになる。また後者の近代的温泉権相互の対抗関係という図式は、今日多くの温泉地に見られているもので、将来もつづくことが予測される。温泉の権利をめぐる紛争も、このような視点で把握しておく必要があるであろう。

(3) 明治民法と温泉権

明治期に入って、温泉権の形成で決定的な影響を与えたのは、述べるまでもなく明治民法の制定(明治32年)である。これに先立って明治6年地租改正によって土地私有制度、そして土地所有権の法体系が確立をみた。

明治民法の規定によれば、土地所有権の効力が地上・地下におよぶことを明定した(第207条)。こうして国家法の平面では、土地所有権者がその土地の地下に存在する「泉源」、もしくは地下を流れる「泉脈」に対して私的な支配権をもつものとして法的構成されるに至ったのである。もっとも温泉は、地下(地中)にある状態のままでは、これを支配することができず、それが地表に湧き出て初めて支配の対象となる。地下の温泉を確保するための技術手段が、指摘するまでもなく人工技術による「掘削」なのである。それ故、温泉の権利は、湧出口(湯口)の土地支配権を前提としてのみ成立しうるものである。こうして温泉は、明治民法により私的支配権の対象(権利の客体)となるに至ったのである。

かつて明治以前(徳川期)、旧慣温泉権の主体であった村落集団が湧出口の土地(温泉地盤)所有権を独占し排他的に取得・利用していた——学説上「総有」の概念で説明されている——場合には、なんら矛盾は感じられなかった。ところが源泉地盤所有権が村落集団以外の者に帰属した場合には、国家法上の権利の主体者と旧慣温泉上の主体者とは分離し、対立するに至った。こうして生じた温泉利用をめぐる紛争は、上掲のごとく近代的温泉権(所有権者個人の温泉権)と旧慣温泉権(権利主体たる総有団体の共同利用権)との対抗関係という、新たな形で社会問題化したのであった。

——ここで、「温泉の権利」という命題に今一度触れてみよう。そもそも、温泉の権利——温泉に対する権利、もしくは温泉に関する権利——とは、どのような性格の権利なのであろうか。戦後、学界では「私法上の財産権」として位置づけられ、また判例もこれを認めるが、それは、どのような権利概念として構成されるのであろうか。

明治の近代法体制の下、私法の基本法たる民法は、私権を大別して「物権」と「債権」に分かっている。前者の物権は「物に対する包括的、かつ全面的な支配権」(対物権)と説くのに対して、後者の債権は「人の人に対する請求権」(対人権)と説く。また物権の中で典型的な権利は「所有権」であり、その物の所有(権)者は自由に使用し(使用権)、収益し(収益権)、また処分できる(処分権)、とその権能を定めている。地表に湧出した温泉もまた、この所有権のカテゴリーに入れうるとみなされることから、源泉(温泉)は「源泉(温泉)所有権」として構成される。地盤から分離された温泉もまた物権としての特質をもち、近代的温泉権として成立する。

(4) 戦後の温泉権の展開

第二次大戦後、個人主体の民主主義の普及——権利の側面から見れば「基本的人権」——は、個人(尊重)主義思想を広めた。その結果、かつての村落共同体の統制力は弱まり、しだいに村落秩序も弛緩していった。他方において、温泉行政が権力的な警察監督行政から戦後は民主的な保健所行政に移管されるに及んで、温泉の個人有化が一段と進んだ。

未曾有の敗戦で、戦後、温泉法の制定(昭和23年)が見られるまでの一時期、公的統制が空白になった時もあり、この時期に掘削が大々的に行われた温泉地もあった。しかし温泉法が成立したため、全く新しい視点の下に温泉行政は展開していった。

温泉法は、戦前の鉱泉取締規則(道府県令)とは異なり、温泉の利用一般を統制しているわけではない。温泉法によれば、温泉の掘削や増掘には知事の許可を受けなければならない(第3条・第8条)、とする。この知事の許可行為は、法第4条に定める理由がなければ「許可しなければならない

い」(第4条)という、行政法にいう羈束裁量行為の基準として「温泉のゆう出量、温度若しくは成分に影響を及ぼし、その他公益を害する處」の有無が条文の例示としてうたわれているのである。

温泉法の第4条は、その趣旨としては濫掘の規則をいちおうは意図しているのであるが、あまりにも抽象的・一般的に過ぎ、濫掘防止の具体的基準とはなり得ないというのが今日まで一貫して全国温泉地での大方の批判である。しかし、この条文に関する最高裁判決(昭和33年7月1日)は、知事は原則として許可を与えねばならず、例外として、とくに「公益を害する虞」がある場合に限って許可を拒みうるという内容のものであり、また新規掘削が既設泉に影響する場合でも、それが単に既設温泉権者の私的利益を害するというだけでは、不許可にすることはできないと判示したのである。既設温泉権者の立場からすれば、このような判断には承服できないものがある。また現行温泉法は濫掘防止に役立たないとの関係者の批判も、あながち否定できないものがある。

温泉地での現実の問題として、昭和40年代から同50年代にかけてバブル経済の好況からレジャーブーム・観光ブームが捲きおこり、全国の温泉地は急速に発展し、旅館・ホテル業者と関連の業界は賑わった。当然のことながら、新温泉の掘削や増掘に拍車がかけられた。その結果は言うをまたず、全国各地で湧出量の減退と温度低下を招き、“温泉危機”が大きな社会問題となって騒がれたのであった。

上述のような温泉地での危機に対して採られて濫掘防止等の一つが、周知のとおり温泉の掘削制限を設けての「保護地域の設定」である。本県において改めて触れるなら、別府温泉(特別保護地域が2地域、保護地域が1地域)、湯布院温泉(由布院温泉では特別保護地域、湯平温泉は全域)のそれである。

(5) 温泉利用権の諸形態

今日の私有財産制度の下において、温泉に対する権利が「一種の私有財産権」であると考えられていることは先にも触れた。所有権と同じような私的性質をもつという意味は、温泉は権利者の個別的な支配に専属する、ということである。したがって温泉は、権利者個人——会社も、法律的には「法人」として個人と同じ性格をもって現れる——の個別的な意思に服することになる。

温泉はまず、第1次的利用としては「源泉権」の利用が考えられる。さらに包括的支配者である源泉権の同意を得ることによって、それから派生する第2次的利用も存在する。前者の利用をめぐり、これを総称して「物権的利用」と呼ぶなら、第2次利用権にかかわるものは「債権的利用」と称してよいであろう。もちろん、両者の領域は截然と区別できない場合も少なくなく、その結果、その利用権をめぐり温泉権紛争となる事例も少なくない(後述)。

つぎに、第2次的利用は種々の形態が見られるが、典型的なものとして、源泉権者がその支配・管理する源泉を第三者に譲渡する場合のそれである。これが「分湯」と呼ばれるものである。紛らわしいものとして、一定量の温泉を動産として配湯管(引湯管ともいう)を通して継続的に給湯する「配湯」である。

前者の「分湯」は、法的形式としては、さらに2型に分けられる。1つは源泉権そのものの分割であり、源泉の持主と譲受人(買主)とは共同の源泉権者となり、その権利関係は、同一源泉につき民法が定める「共有」(第264条)が適用されることになり、その性格はさほど複雑でなく、利用面でも、さほどの問題は起きない。紛争となるのは、今1つの型態である。すなわち、源泉の譲受人(買主)と源泉権者とは同じ資格ではなく、譲受人はたかだか限られた範囲の権能しか持っていない型の「分湯」である。この形態は、次に述べる「配湯」の温泉利用に類似しているので、源泉の分譲には細心の留意を専門的知識で必要とする。

ここで、「配湯」の利用関係をみよう。この利用関係は日常的には「給湯契約」という法的形式を採る場合が少なくない。日常的な水道契約や電力会社の電力供給契約に類似するもので、配湯管を通して一定期間(通常は5年から10年程度)、一定量の温泉(入浴に価する量と温度)を継続して供給する債務を負う契約関係である。実際の契約において、物権的利用なる「分湯」には永久的ないしは長期間のものが多いのに対して、債権的利用には5年～10年が多い。配湯契約で問題となるのは、①供給される温泉の量、②同じく温度、③温泉利用権の譲渡・転貸、④契約満期のときの更新、⑤源泉が故障(湧出停止、泉温低下で入浴不能の場合など)、とりわけ源泉停止の際の工事分担金の問題である。債権的利用に際しては、給湯者と受湯者(引湯者)との間で充分に検討してから契約しないと、紛争の要因となるので注意が肝要である。

2 温泉の掘削に関する問題

(1) 源泉地盤が一般の土地の場合

温泉は、源泉地盤と不可分に結び付いている。しかし、その源泉権(温泉権)と源泉地盤所有権とは、近代法の枠組みの中では独立別個の権利であることも度々触れてきた。問題は、掘削者(源泉権者)が源泉地盤の所有権を有しないとき、土地所有権者との間にどのような法律関係が生じるか、である。

旧慣温泉権の場合、両者の間は通常、近代法上の「契約」なる文書は結ばれず、慣習に基づいて事実上支配している場合が多かった。だが、近代法時代に入ってから、しだいに土地所有権者の権利意識が高まり、また近代的な温泉の取引が進むにつれて、両者の間に結ばれる「契約」に基づいて、掘削者が何らかの土地利用権を取得するのが常態である。

掘削のためには、通常、①源泉予定地と②工事に必要な周辺の土地の使用権、それに③立入権とを取得すれば目的に達することができる。掘削して温泉が湧出しなければ、その土地を原状に回復して返却すれば問題はない。

温泉権者が源泉地盤所有権を取得する場合の「契約」は通常、温泉予定地と周辺の土地の若干坪(具体的には1坪=3.3平方m～10坪=33平方m)を取得する形式の契約である。これには、日常的な土地売買契約の型と無償譲渡契約の型とが見られる。後者の、温泉を目的とする当該契約は、土地所有権と温泉利用権との交換契約(民法第586条)であり、土地所有権者が取得する温泉の量は全湧出量の10%～20%の場合が多い。この際、具体的な条件内容を事前に協議しておかないと、湧出後に紛争にもなりかねない。

つぎに、土地所有権者が譲渡に応じないときで、両者の共有にする方式である。この場合、土地所有権者は源泉権を取得し、土地地盤(所有権)を分筆して共有するが、その持分比率は温泉の分配比率に照応する事例が多い。ここでの問題点は、掘削費を両者間でどのように分担するか、である。事前にしかと定めておかないと、紛争になりやすい。

その後で、さらに問題なのは、両者のいずれかが当該源泉権を第三者に譲渡した場合である。例えば掘削業者(ボーリング業者)が自己の源泉権(の全部またはその1部)を土地開発会社に分譲し、これを温泉権付き別荘地として購入した人たちとの間に①源泉権の帰属の問題、②その権利の性格、③対価の支払をめぐる紛争(契約の有効性をめぐるトラブル)でもめるといった事例も、土地ブーム時代には見られたところである。

以上の事例の場合、一般的に言って、まず源泉地盤所有権者(当該土地の名義人は誰か)につづき、第1次温泉権(源泉権)の利用状態はどうなっており、また、これに関連して、保健所の温泉台帳の

登載がどうなっているか——温泉権の対抗要件の問題(後述)——などをよく確かめた上で売買交渉に望む必要がある。

さらに、他人の土地(温泉湧出の可能性の高い)を借りて借地契約を結ぶ方式を採用のものも少なくない。これは、土地所有者が売買にも、共有にも同意しないときである。この方式は民法上の賃貸借契約として構成される(第601条)が、温泉の場合の特性から、賃料の代わりに温泉の供給を受ける——その権利は「受湯権」——場合が多く、その契約の存続期間も5～10年が多いようである。ここで留意すべきは、①期間満了時の取り決め(契約の更新)と②源泉涸渇時の取り扱い③受益権の第三者への転貸もしくは譲渡、などがある。

(2) 源泉地盤が特殊の土地(国有地と河川敷)の場合

特殊な場合として、掘削地が国有地と河川敷とが考えられる。本県の場合は、前者には国有地内(阿蘇くじゅう国立公園)にあるくじゅう温泉群の中の温泉が、後者には天瀬温泉や別府温泉の(河川沿岸)がこれに該当するが、これについても会報第45号の拙稿で報告済みであるが、再びここで、要点のみ触れることとする。

①国有地の場合 源泉が国有地内にある場合、温泉権者と土地所有者たる国(具体的には林野庁等)との契約は、国有財産法・国有林野法など諸法規の適用を受ける。定型の「国有地貸付契約」の内容は、次に述べる河川敷の場合と同様に、期間は原則として5年であり、また公益上必要があるとされるときは解除される(国財法第24条)など、温泉権者は不利な立場におかれる。

しかし、国有地内の旧慣法泉権にあっては、源泉地盤が官民有区分(明治初年)により国有地に編入される以前から、地盤所有権から独立した温泉権として永らく存在してまた事実があり、源泉地盤の国有地編入によって直ちに消滅するものでないことは、国有地入会権の場合と同様である(『国有地入会権の研究』など)。

とくに温泉の場合、1～5坪の小面積の源泉地のみが周辺の土地から分離されて国有とされ、その結果、民有地の中に国有地が存在し、そこから温泉権者が温泉を利用している場合(例えば国立公園内のくじゅう温泉群)も見られ、地盤の国有地編入により温泉権が直ちに消滅したと解するのは許されない(別府の扇山山麓のゴルフ場の建設の際、戦後入会集団は採草権を行使していなかったが、永年の慣習が認められ補償された事例もある)。

②河川敷の場合 源泉が河川敷にある場合、温泉の掘削と利用に際して、河川敷地の占用許可および工作物設置の許可をまず受けねばならない(同法第24・26・27条)。行政法の観点から見る限り、この河川敷占用権は、許可によって設定される権利であり、その性格は、私有財産権とは認めがたい。期間は前出の国有地の場合と同様に5年にすぎず、更新の保証もなく、行政庁(建設省)の必要により一方的に消滅させられる(補償の規定も見られない。また、譲渡の自由もない。)

しかし、法社会学の観点から権利の性格に着目する限り、河川敷占用権は、その実質において私有財産権と全く変わらないことから、憲法上(第29条)の財産権として、これを「侵してはならない」と解すべきであろう。この占有権なくして温泉権は成立しえないからである。よって、この占有権の消滅・否定は直ちに財産権の消滅・否定を意味するのである。

旧慣温泉権の場合には、明治国家が河川管理に着手する以前から、すでに源泉権者が河川敷を私的に支配していたのである。明治29年に制定された(旧)河川法によって、法形式の上では、やむなく占用許可を受けねばならなくなったが、旧慣による温泉支配の実態はそのまま維持されてきたのであり、国(行政庁)もまた、この慣行を尊重し承認してきたのであった。

したがって、現行温泉法における河川敷占用は旧慣温泉権の承継(形態変化)に他ならず、国家の

行政上の必要—公益上という名目—から安易に一方的に消滅させることはできない、と解すべきであろう。また事実、県内での温泉地(とくに天瀬温泉)でも、所轄の土木事務所(玖珠)によりそのように対処されているように思われる。別府温泉では、春木川敷にある旧慣温泉権(鉱泉地1坪)が河川工事のために民間の周辺地とともに買収された際、温泉地盤所有権者の残地に代替の鉱泉地を認めた事例が見られる。

(以下次号)

大分県温泉調査研究会会則

第1条 この会は大分県温泉調査研究会（以下「会」という。）という。

第2条 会の事務所は大分県生活環境部生活環境課内に置き、調査研究の必要に応じて出張所を設けることができる。

第3条 会は大分県内における温泉の科学的調査研究をして公共の福祉の増進に寄与することを目的とする。

第4条 会は前条の目的を達成するために下記の事業を行う。

- (1) 温泉脈及び温泉孔の分布状況調査
- (2) 噴気に関する研究調査
- (3) 温泉に対する影響圏の調査
- (4) 化学分析による温泉調査
- (5) 療養的価値よりみたる温泉の調査
- (6) 温泉に関する図書及び機関紙の発行
- (7) その他会の目的達成に必要な事業

第5条 会は下記の構成員をもって組織する。

学識経験者

県及び温泉所在地市町村の代表

関係行政庁の吏員

第6条 会の役員は下記のとおりとし、総会によって選任する。

会 長	1 名
副 会 長	2 名
常 務 理 事	1 名
理 事	若干名
監 事	2 名

2 役員任期は2年とする。ただし、役員に欠員を生じた場合の補欠役員任期は前任者の残任期間とする。

第7条 会長会務を総理し、会議の議長となる。

2 会長に事故のあるときは副会長が、会長及び副会長に事故があるときは常務理事がその職務を代理する。

3 常務理事は会長を補佐して会の常務に従事する。ただし、会の出納事務は常務理事が処理するものとする。

4 理事は会務に従事する。

5 監事は会計及び会務を監査する。

第8条 会に顧問を置くことができる。

- (1) 顧問は役員会の承認を得て会長が委嘱する。この場合、総会に報告しなければならない。
- (2) 顧問は会の事業について会長の諮問に応ずるものとする。

第9条 役員は名誉職とする。ただし、常時会務に従事しておる者及び職員はこの限りでない。

第10条 会に下記の職員を置く。

- (1) 書記 若干名
- (2) 書記は会長が任命又は委嘱する。
- (3) 書記は上司の指揮を受け庶務に従事する。

第11条 会議は総会及び役員会とする。

第12条 総会は会長が招集する。

- 2 総会は通常総会及び臨時総会とし、通常総会は毎年4月、臨時総会は会長が必要と認めるとき、又は会員の5分の1の請求があったときに招集する。
- 3 総会の招集は開会の5日前までに会員に届くように会議に付議する事項、日時及び場所を通知しなければならない。

第13条 総会において下記の事項を議決する。

- (1) 会則の変更
- (2) 役員を選出
- (3) 予算及び事業計画
- (4) 解散
- (5) その他重要事項

第14条 総会は会員の過半数が出席しなければ議事を開き議決することはできない。

- 2 議事は出席会員の過半数で決し、可否同数のときは議長の決するところによる。
- 3 議事に関しては議事録を調整し、会長の指名した2名以上の者がこれに署名しなければならない。

第15条 下記の事項について会長は専決することができる。

- (1) 総会の議決事項であっても軽易な事項
 - (2) 臨時急を要する事項
 - (3) 会員の入会・退会
- 2 下記の事項については総会に報告し、承認を得なければならない。
- (1) 前項の専決事項
 - (2) 前年度の事業及び決算

第16条 役員会は会長が招集する。

- 2 役員会は総会に付議する事項、顧問の推薦、その他会長が必要と認める事項を審議する。

第17条 第14条第1項及び第2項の規定は役員会に準用する。

第18条 会は議事遂行上必要がある場合は、専門委員会を設けることができる。

- 2 前項の委員会に関する事項は総会で定める。

第19条 会の経費は負担金及び補助金、委託料、寄附金等その他の収入をもってこれにあてる。

第20条 会の会計年度は毎年4月1日から始まり翌年3月31日に終わる。

2 年度における余剰金は翌年度に繰越することができる。

附 則

前条の規定にかかわらず、昭和24年度の会計年度は6月1日から始めるものとする。

附 則

この会則の改正は、昭和46年4月1日から適用する。

この会則の改正は、昭和48年4月1日から適用する。

この会則の改正は、平成2年4月1日から適用する。

この会則の改正は、平成7年5月1日から適用する。

この会則の改正は、平成9年4月1日から適用する。

大分県温泉調査研究会会員名簿 (順不同)

(平成9年7月1日現在)

顧 問

大分県議会福祉保健
生活環境委員長 荒 金 信 生
別府市議会議長 浜 野 弘

職 名	氏 名	備 考
京都大学名誉教授	吉 川 恭 三	会 長
九州大学名誉教授	矢 永 尚 士	副 会 長
大分県生活環境部次長	秋 吉 豊 利	〃
大分県生活環境部生活環境課長	中 野 裕 治	常 務 理 事
九州大学名誉教授	古 賀 昭 人	
九州大学名誉教授	延 永 正	
大分大学名誉教授	志 賀 史 光	
大分大学名誉教授	川 西 博	
大分総合検診センター会長	辻 秀 男	
日本文理大学工学部教授	森 山 善 蔵	
前大分大学教育学部教授	大 野 保 治	
京都大学理学部教授	由 佐 悠 紀	
大分大学教育学部教授	川 野 田 実 夫	
大分県立上野丘高等学校長	日 高 稔	
国立別府病院リウマチ科医長	安 田 正 之	
九州大学生体防御医学研究所助教授	牧 野 直 樹	
京都大学理学部助教授	北 岡 豪 一	
京都大学理学部助教授	福 田 洋 一	
京都大学理学部助教授	田 中 良 和	
京都大学理学部助手	大 沢 信 二	
京都大学大学院理学研究科	大 上 和 敏	
京都大学大学院理学研究科	大 羽 成 征	
大 分 市 長	木 下 敬 之 助	
別 府 市 長	井 上 信 幸	
臼 杵 市 長	後 藤 國 利	
杵 築 市 長	石 田 徳	
真 玉 町 長	安 永 信 義	
国 見 町 長	金 山 尚 學	

職 名	氏 名	備 考
挾間町長	佐藤成己	
庄内町長	佐藤三千生	
湯布院町長	佐藤雄也	
久住町長	衛藤龍天	
直入町長	岩屋万一	
九重町長	坂本和昭	
玖珠町長	小林公明	
天瀬町長	高倉柳太	
本耶馬溪町長	小野和彦	
耶馬溪町長	北山義晴	
山国町長	吉峯高幸	
院内町長	川野哲也	
安心院町長	高田文義	
別府市観光経済部長	澤崎寛	
別府市温泉課長	首藤廣行	
別府市温泉課課長補佐	梅木武	
中央保健所長	高橋敏人	
中央保健所次長兼総務温泉企画課長	山内晃	
大分県衛生環境研究センター所長	牧野芳大	
〃 化学部長	首藤武臣	
〃 主幹研究員	恵良雅彰	
〃 主幹研究員	宮崎正	
〃 主幹研究員	樋田俊英	
大分県生活環境部生活環境課課長補佐	木城敬二	

書 記

大分県生活環境部生活環境課主幹兼自然保護温泉係長	森 靖子	
〃 副主幹	田 中正史	
〃 主任	松 原弘之	

大分県温泉調査研究会報告 第48号

平成9年7月 印刷

平成9年7月 発行

発行者 大分県温泉調査研究会
大分市大手町3丁目1番1号
大分県生活環境部生活環境内

印刷者 大分市大手町2丁目3番4号
有限会社 舞鶴孔版
電話 32-4231