

大分県温泉調査研究会

報 告 第 1 2 号

昭 和 3 6 年 8 月

目 次

放射能障害の温泉療法 (第九報) ……………	八	田	秋…(1)
原爆被爆者の網内系と湯治……………	八	田	秋…(3)
	工	藤 寛	昭
別府温泉の化学的研究 (第27報) ……………	古	賀 昭	人…(6)
別府温泉中のニッケルの定量並びに分布について…	野	崎 秀	俊…(12)
地熱地帯の地下熱構造に関する研究(その2) ……	湯	原 浩	三…(15)
	古	賀 昭	人
別府市街地温泉の静止水頭調査……………	瀬	野 錦	蔵…(23)
	吉	川 恭	三
自噴井群における揚水の影響について……………	山	下 幸三郎	…(31)
大分県庄内町阿蘇野に於ける温泉探査報告……………	山	下 幸三郎	…(41)
別府市内温泉(内竈南北両石垣南立石)現況調査(3)	佐	藤 光	一…(44)
	矢	野 行	雄

放射能障害の温泉療法

第 9 報

原爆被爆者別府温泉利用研究所の実績 (II)

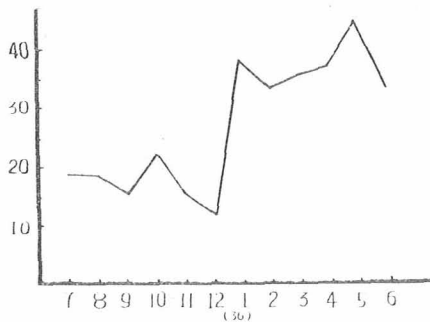
九州大学温泉治療学研究所

八 田 秋

前回到報告した、昭和35年2月1日から、昭和35年6月末までの湯治成績について、その後の1年間の湯治成績をまとめて見た。

開所以来の入所利用者数は、月とともに次第に増加し、昭和35年6月が最高で、定員40名に対し、1日平均36.3名を示したが、その後はやや足踏みの状態にあった。ところが昭和36年1月に入ると急増して、連日ほとんど満員の状態をつづけ、最高は5月の1日平均43.5名である(第1図)。

図1 月別入所利用者の1日平均
(昭和35年7月～昭和36年6月)



開所以来、1年間の利用者実数は902人。又昨年7月より本年6月までの1年間の利用者実数は1,088人である。

これ等の利用者の大部分は、なお滞在日数の少ないものが多く、2週間前後滞在して、湯治の前後に我々の検査を受けたものは、78名で、総数の7.17%に過ぎなかった。

いまこの78名の被爆距離と被爆状況とを示すと、表1の如くで、爆心から2 Km以内のものは41例(52.54%)である。そして約半数は遮蔽を持たなかったものである。

なお検査項目中の集中値限界は前回と同様であって表2に示した。

表1 被爆状況

KM	例	遮 蔽	
		+	-
0.5	1	0	1
0.6	1	1	0
0.8	1	1	0
1.0	3	2	1
1.2	2	1	1
1.3	1	1	0
1.5	10	3	7
1.7	2	0	2
1.8	2	1	1
2.0	18	12	6
3.0	4	1	3
4.0	2	0	2
4.0<	28		
不明	3		
計	78	23	24

表2

検査項目	集中値限界
赤血球数	300万～500万/ mm^3
ヘモグロビン値	75～90%
白血球数	5,000～8,000
肝機能(BSP)	2.5～5.0%
最高血圧	100～150mmHg
ソーンテスト	(-50%<)

検査成績の判定規準をかような集中値限界におき、湯治前後にこのわくをはみ出し、かつ好ましからぬ値を示した例数をしらべ、被検総数に対する割合を百分率で表はし、いわゆるバラつき頻度を見ると表3の如くである。

表3. 湯治前後のバラつき頻度 (78例)

検査項目	湯治前(%)	湯治後(%)	
		全例(%)	残留例(%)
赤血球数減少	3 (3.85)	1 (1.28)	1 (1.28)
ヘモグロビン減少	15 (19.23)	7 (8.97)	6 (7.69)
白血球数異常	20 (25.64)	6 (7.69)	5 (6.42)
肝機能低下	7 (9.86)	3 (4.69)	3 (4.69)
最高血圧異常	14 (17.95)	7 (8.97)	7 (8.97)
ソーンテスト異常	33 (48.53)	15 (25.00)	9 (15.00)
尿器白陽性	15 (19.23)	12 (15.38)	12 (15.38)
尿糖陽性	0 (0)	0 (0)	0 (0)
尿ウロビリノーゲン陽性	22 (28.20)	18 (23.08)	18 (23.08)
尿デビス反応陽性	0 (0)	0 (0)	0 (0)

BSP 前 71例, 後 64例
ソーンテスト 前 68例, 後 60例

この成績をこの研究所開所の単純泉による湯治群、⁽¹⁾⁽³⁾ならびに前回の成績⁽²⁾と比べると、先づ湯治前の成績では、赤血球数ならびにヘモグロビン減少例が少なく、白血球数異常もやや低く、肝機能低下も低率である。

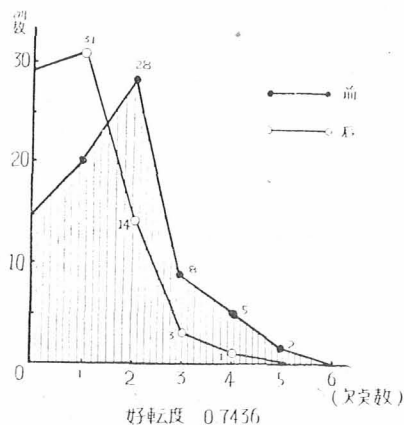
最高血圧異常は従来30%以上あったが、今回は約18%に過ぎない。たゞソーンテスト異常例が48.53%でこれまでと大差がないことは注目すべき所見であろう。

尿の所見ではウロビリノーゲン陽性例がこれまでより約10%多く、デビス反応陽性例は零であった。

湯治後の成績では、各項目ともによくバラつき頻度が減少しており、ことに白血球数、肝機能、ソーンテスト等が著しい。

尿蛋白とウロビリノーゲンの消失が少なく、ことにウロビリノーゲンの湯治前陽性例22例中、18例が湯治后にも陽性を示して残留したことは、尿の冷却を待たずして検査が行われたことに、原因の一部があるので

図2 欠点数と例数 Histogramm



はないかと考えられる。

この点を除けば、この一年間の被験者は一般に湯治前のバラつき頻度も少なく、湯治効果も良好であったといえる。

いま湯治前後に各人の有つている欠点数と例数とのHistogrammを作ると図2の如く、湯治後の著しい好転の様相がよく感得出来るし、その好転度を、湯治前の総欠点数から湯治後の総欠点数を差引き、被験者数で割つて算出すると、0.7436となり、かなり優秀であることが分る。

なお体重の湯治前後の増減は、78例中増加35例、減少19例、不変22例、不明2例となり減少例は24%程度であった。

湯中り症状は今度は少なく、1例頭重、1例に喀痰の一過性増加を示した2例にすぎなかった。

以上の諸点よりこの一年間の湯治は、比較的節度ある中に、定められた湯治法をよく守って行われたものと解されるのである。

共同研究者

太山森清、安藤太介、中村泰也、徳永恒尋、工藤寛昭、南定光、山田トミ子

文 献

- 八田 秋: 原爆被爆者の温泉療法, 臨床と研究 37:4, 昭35. 4
- 八田 秋: 放射能障害の温泉療法 第8報, 原爆被爆者別府温泉利用研究の実績 大分県温泉調査研究報告 No.11. 昭. 35. 3
- Osamu HATTA Balneotherapy for the Survivors of Atomic Bomb Injuries. 温泉科学 12:1 昭.36. 2

原爆被爆者の網内系と湯治

九州大学温泉治療学研究所 教授 八 田 秋
 助手 工 藤 寛 昭

(本論文の要旨は第26回日本温泉気候学会総会で発表した)

原爆被爆者の別府温泉に於ける温泉治療の成績については、昭和32年来機会あるごとに報告して来たところである。従来の諸検査成績については、温泉の有する正常化作用が或は自律神経系を通じ、各種内分泌系ひいては酵素系を通じて作用し、その結果原爆被爆者たちの各種臓器作用を正常のレベルに近づけるものであろうと解されたのである。

私たちはこれらの諸検査項目に加えて、原爆被爆者の網内皮系機能、ことにこれに対する泉浴の影響を調査中であるので、これまでの成績について報告する。

網内皮系機能の検査方法には、従来Adler ReimannのKongo-rot法が行われて来たのであるが、私たちはMakari(1946)によって提唱されたSerial Cephalin Flocculation Curveによる判定法を採用した。この方法はCephalin cholesterol flocculation testの原理によったものであって、血清を生食水で倍数稀釈し、1/25から1/12800までの10本の試験管を列べ、その各々についてそれぞれHanger氏法によるCephalin cholesterol flocculation testを行い、その判定の結果を図にスポットすると図1~4のような曲線を得ることができる。

Makariによれば、先ず正常の者ではほぼ200倍稀釈に於いて最高値を示すような一つの曲線を示すものとされている。(図1)。かようなものを便宜上N型

図1 正常型

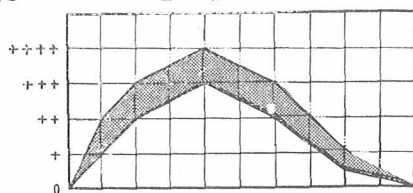
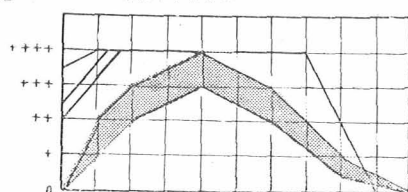
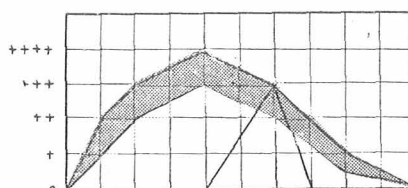


図2 網内系機自亢進型



と定める。次に網内皮系の賦活の場合には γ グロブリンの増加のため稀釈部に於て架状を示すため図2のような曲線を示す。これをR型と定める。網内系機能低下のある場合には全体の架状が弱いため低い曲線を示す。(図3)これをH型と定める。最後に肝臓に障害

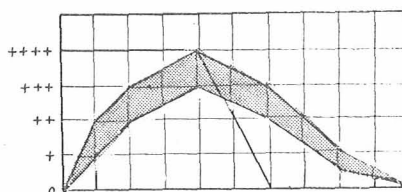
図3 網内系機能低下型



のある場合にはアルブミンの減少の結果、低稀釈部に架状が出現するためにこの部に高い曲線を示す。

(図4)これをL型とする。

図4 肝機能低下型



今約2週間の湯治を行った原爆被爆者の湯治前後について、Serial cephalin flocculation curve 即ちSCF-curveをつくらせてみると、先づ湯治前の41例のうちN型9例、R型22例、H型8例、L型2例であって、予想に反して網内皮系の機能亢進が半数以上に見られた。しかしその機能低下を示すH型が8例もあるので、約73%に網内皮系の機能亢進又は低下を示したことになる。(表1)

表1 被爆者湯治前

型	N	R	H	L	計
例	9	22	8	2	41
	22.0%	53.7%	19.5%	4.8%	

この41例のうち、31例については湯治後にも同様の検査を行い得たので、湯治前後のSCF-curveの型の

変化を検討してみると表2の如くであって、湯治前正常N型であった7例は湯治後不変2例、軽度網内皮系の賦活を示すNR型に変わったもの2例、何故か機能低下を示すH型になったものが1例、多少とも肝障害を示すL型に変わったものが2例であった。

湯治前に網内皮系賦活のR型であったもの17例中N型になったものが6例、N型に近づいたRN型になったもの4例、ほぼ不変4例、L型3例となった。

網内皮型機能低下を示したH型5例中N型になったもの1例、R型になったものが4例あったことは興味あることである。

最後に肝障害型L型の2例は湯治後もL型にとどまった。

各々の曲線変化の例を示すと図5~12の如くである点線は浴前、実線は浴後のSCF-curveである。

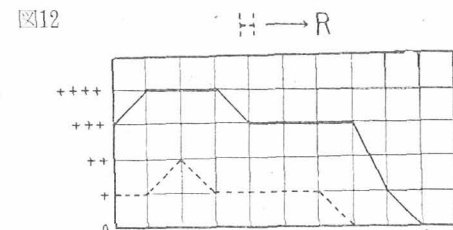
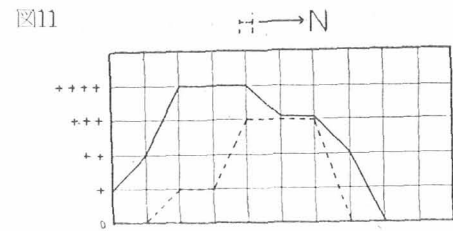
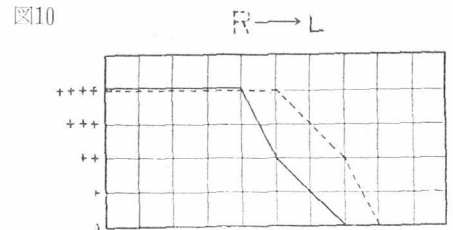
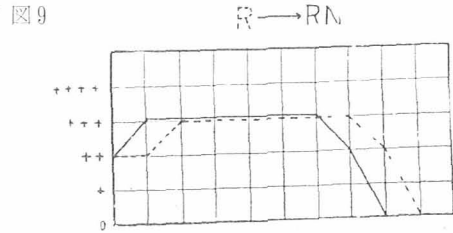
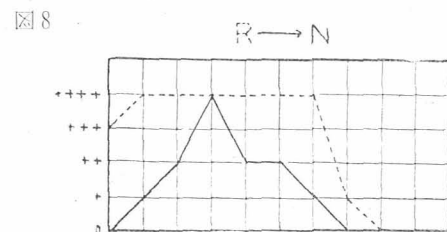
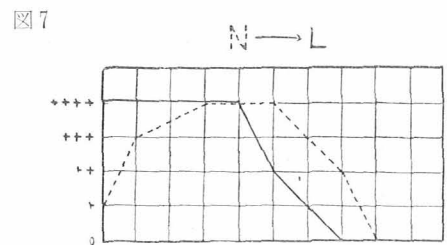
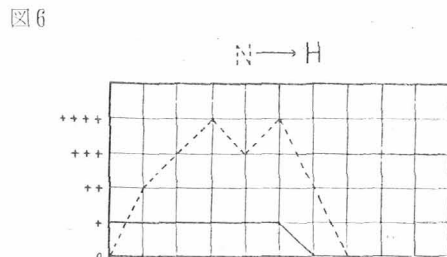
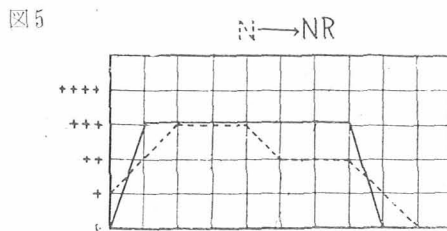


表2 湯治後型別変化

湯治前 \ 湯治後	N	RN	R	NR	H	L
N	7(例)	(2)		2	1	2
R	17(〃)	6	4	(4)		3
H	5(〃)	1		4		
L	2(〃)					(2)
計	31(〃)	9(2)	4	8(4)	2	7(2)

() は不変例

湯治後の集計を行うとN型9例、R型8例、多少とも賦活状態をともなるRNとNRが4例と2例で合計6例、H型は僅かに1例となり、これに対してL型が加えて7例に増加している。従って全体としては網内皮系機能の正常化の傾向即ちR型は大部分がN型又はこれに近づき、H型がN型又はR型に変わる傾向を示した。

問題はL型の増加であって、湯治前2例に対して湯

治後7例に増加しているが、これと同時に行われたBSP検査所見では殆んどすべての例が湯治前後とも5%に過ぎず、BSP値との関連性を確認することはできなかった。故にL型といっても軽度のものであり、BSP値の変化に先立って現れるものと解され、湯治者に共通にみられる過剰入浴の結果現れたものと見得るであろう。

要するに原爆被爆者にはこのMakai氏法によると網内皮系機能に異常を示すものが多く、半数以上にR型を示したことは予想しない所であった。これらが湯治後かなりよく正常化され或は正常型に近づいたことは湯治の効果の一面を示すとともに、湯治前のR型の

多かったことは異常な網内皮系の賦活を示していたものと考えられる。

なお今後も観察を試みる予定である。

引用文献

- 1) 八田秋: 原爆被爆者の温泉療法、臨床と研究、37: 4: 65: 昭35、4
- 2) Makari, J.G: J. Tropical med. & Hygiene, v. 51. Jan, 8, 1948
- 3) G. Bocconi: Zchr. angew. Bader-klimathk 6: 6-1959
- 4) 轟木: 日温気誌. 8.4 昭18

別府温泉の化学的研究 (第27報)

別府温泉の微量成分 (その11)

チッ素化合物の分布

九州大学温泉治療学研究所

古 賀 昭 人

1、緒 言

別府温泉の溶存 N_2 については、すでに瀬野、湯原¹⁾ および質量分析による川上²⁾の報告がある。今回、著者はチッ素の化合物、すなわち NH_4^+ 、 NO_2^- 、 NO_3^- につき、その分布を調べたので報告したい。温泉水の NH_4^+ については大多数の温泉について、 NO_3^- も幾らかの温泉については報告がなされているが(例、杉原氏³⁾、三朝温泉) NO_2^- については極めて少なく、木村、池田⁴⁾らの報告があるにすぎない。したがって、これら N_2 化合物の関係について論及したものはないようである。著者は、別府温泉について、これらの関係を追求せ

んと試みた。

2、分析方法

NH_4^+ : 通気法により蒸溜、ネスラー試薬で定量した。 NO_2^- 、 NO_3^- : プルシンによる定量法を用いた。⁵⁾

3、結 果

別府温泉39個所(内、噴気凝縮水1個)の NH_4^+ 、 NO_2^- 、 NO_3^- の分析結果は表1に示す。尚、 NO_2^- も NO_3^- もNとして示した。

4、考 察

表Iの結果は NH_4^+ 、 NO_3^- について図1、2 (A、B) に示す。

図1 別府温泉の NH_4^+ の分布 (A)

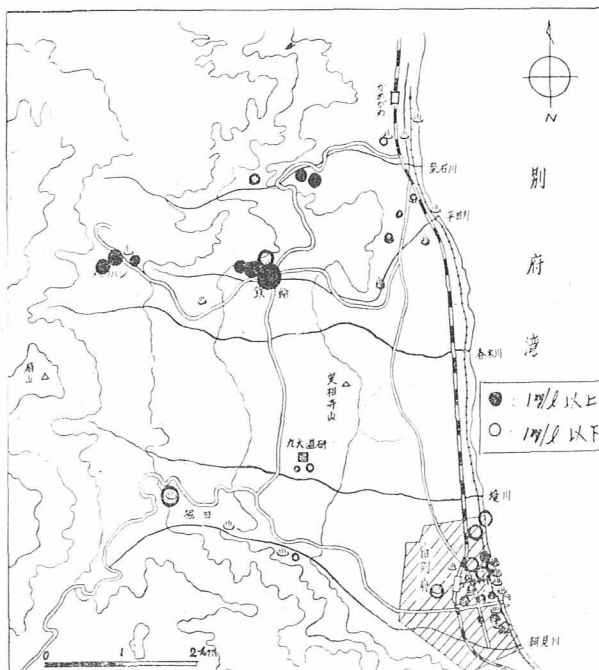


図1. 別府温泉のNH₄⁺の分布 (B)

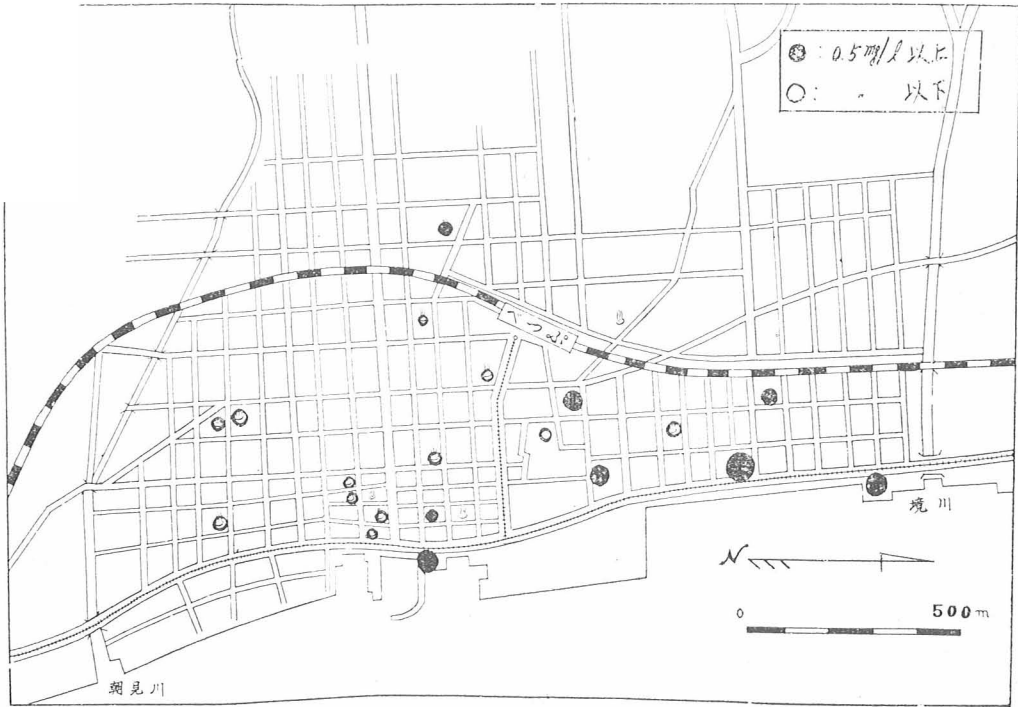


図2 別府温泉のNO₃⁻の分布 (A)

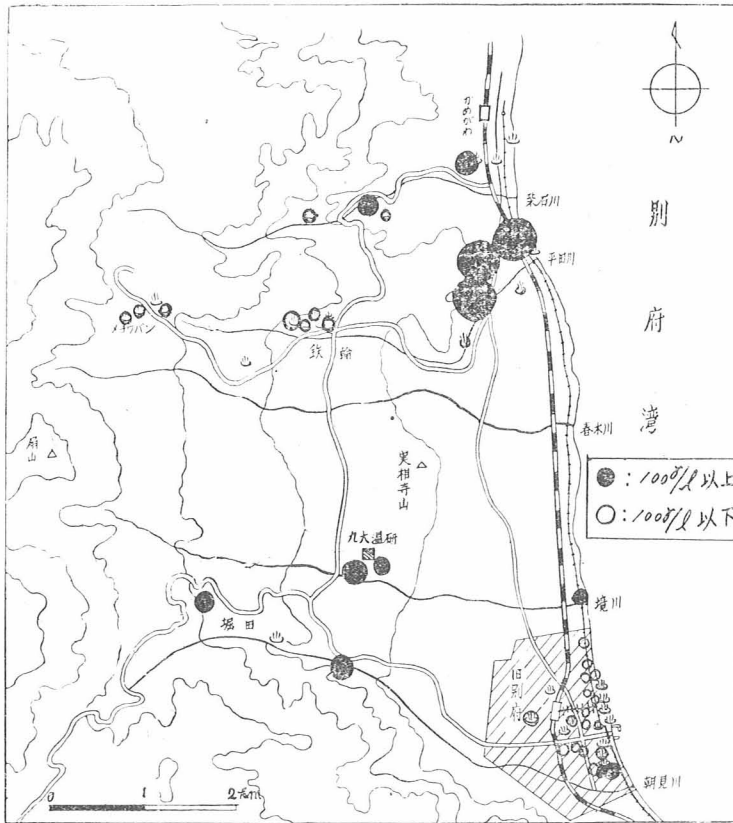
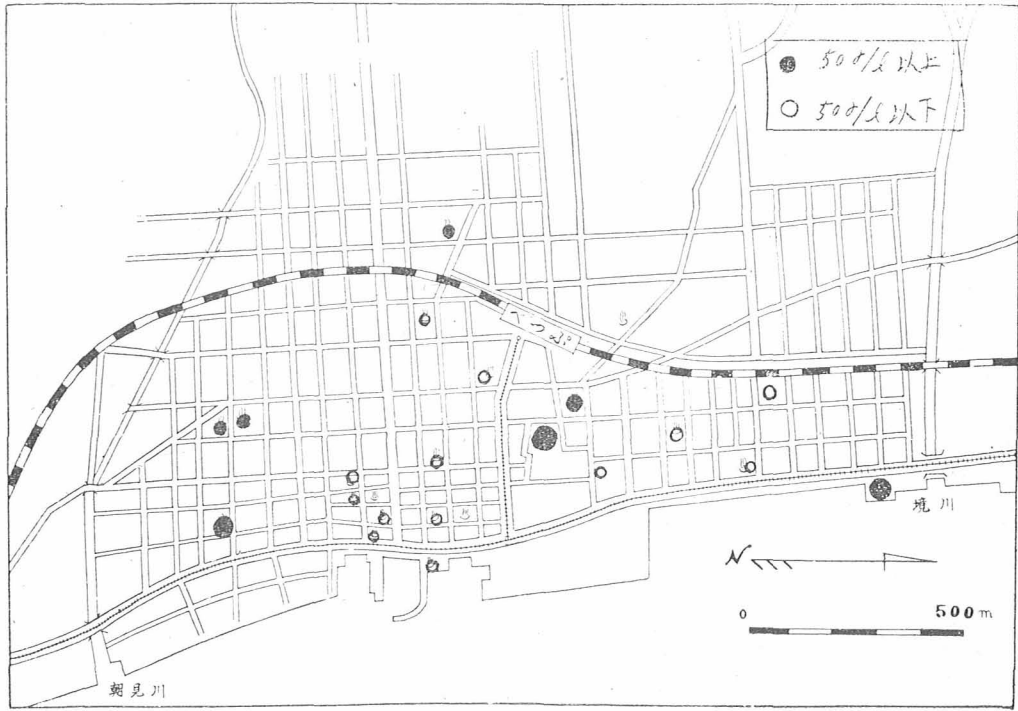


図2 別府温泉のNO₃⁻の分布 (B)



4、1、NH₄⁺の分布

別府温泉のNH₄⁺含有量は比較的少なく、38個所中2mg/l以上は1つしかなかった。

この点、同じ火山性温泉である雲仙、阿蘇、内ノ牧温泉の60mg/lを越すと違って平均は0.65mg/lである。もちろん、図I Aより明らかな通り、明礬、鉄輪地区に多く、亀川地区は少なかった。旧市内は図I Bのように北部方面が多く、南部地区が小であった。

尚、本坊主地獄の噴気凝縮水のNH₄⁺の量は2.11mg/lで別府温泉中最大を示し、噴気にはNH₄⁺が多いことを示す。したがって噴気に水をあてた温泉の堀田温泉も若干多い。

4、2、NO₂⁻・NO₃⁻の分布

NO₂⁻の定量例は少ないが、別府温泉でもその量は多くはなく、最高は温研泉の56 μ l/lで血ノ池地獄の44 μ l/lがこれに次いだ。

38個所の平均は、8 μ l/l強であり、明礬、旧市内地区が少なかった。一方NO₃⁻-Nは、

表I 別府温泉のチ素化合物

地区	No.	泉名	°C 温泉	PH	NH ₄ ⁺ mg/l	μ l/l NO ₂ ⁻ -N	μ l/l NO ₃ ⁻ -N
明礬	1	地蔵	49	3.0	1.51	0	0
	2	野天風呂	82	2.1	1.74	2	20
	3	薬師	65	2.5	1.00	7	40
鉄輪	4	海地獄	84	2.2	1.03	10	52
	5	十万〃	96	3.8	1.65	4	35
	6	鬼山〃	94	3.3	0.76	0	10
	7	雷園〃	83	3.5	2.01	4	55
	8	柴石	63	3.0	0.56	2	18
	9	血ノ池地獄	60	2.4	1.33	44	310
	10	竜巻〃	98	2.5	1.58	0	10
亀川	11	御夢想	43	7.3	0.29	6	280
	12	亀湯	54	7.9	0.24	9	1850
	13	筋湯	57	7.7	0.22	10	1980
	14	四ノ湯	52	8.1	0.15	14	1800
堀田・観海寺	15	堀田	59	5.8	0.51	12	150
	16	観海寺	57	6.7	0.20	2	580
	17	温研	53	6.8	0.21	56	690
	18	〃(堀田)	44	6.8	0.41	8	236

		本坊主地獄 噴気凝縮水		2.11	18	130	
旧	19	北弓ヶ浜	46	6.6	0.88	14	130
	20	弓ヶ浜	50	6.7	0.61	6	16
	21	的ヶ浜	51	6.9	1.15	6	10
	22	上のヶ浜	50	6.8	0.40	8	44
	23	春日	54	6.5	0.67	4	60
	24	弓松	64	7.1	0.85	4	36
	25	海門寺	59	6.3	0.33	10	90
	26	北町	49	7.0	0.27	2	8
	27	梅園	62	6.5	0.31	3	26
	28	竹瓦	60	6.5	0.59	7	16
市内	29	砂湯	60	7.6	0.70	7	20
	30	霊潮	61	7.1	0.37	4	14
	31	〃(蒸湯)	62	6.3	0.31	2	12
	32	柳	46	6.0	0.16	2	8
	33	楠	55	6.8	0.29	7	30
	34	松原	54	7.5	0.25	10	130
	35	永石	52	7.1	0.13	3	60
	36	紙屋	52	7.1	0.47	9	50
	37	不老	52	6.3	0.20	7	20
	38	田ノ湯	46	7.6	0.50	14	72

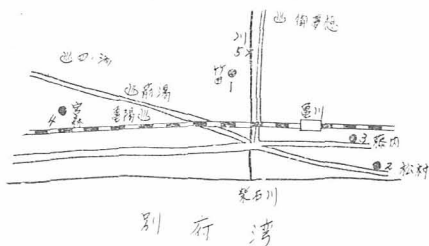
極めて特長があり、図2(A)に示すように明礬、鉄輪、旧市内は大半が100 r/l以下であったが、亀川、堀田、観海寺地区は大量に含まれており、特に亀川地区は平均1500 r/lにも及ぶ。本坊主地獄噴気凝縮水にも130 r/l程度含まれているので、人工泉型の堀田観海寺地区に多いのは容易に想像され、この外、混入水からの影響が相当に大であると思われる。

亀川地区で、何故にこの様に多いか問題であるが、湯原や川上も別々の測定方法から亀川地区に溶存 N₂

表2 別府各地区の平均チッ素化合物量

地区名	(mg/l) NH ₄ ⁺	(r/l) NO ₂ -N	(r/l) NO ₃ -N	(ml/l) N ₂	(ml/l) O ₂
明礬	1.42	3	20	4.5	2.42
鉄輪	1.27	9	70	6.8	2.48
亀川	0.22	10	1480	9.8	2.95
堀田	0.33	19	410	8.1	1.78
観海寺	0.27	6	43	8.3	1.48

図3 亀川地区の温泉及井戸水の所在図



や O₂ が多いことを指摘しており(表2参照)一つは、これらにも因があるのであろう。温泉の他に井戸水や川水について調べてみると、表3のように井戸水の方が温泉より多く、これらの汚染も相当に考えられる。

4、3、NO₂⁻とNO₃⁻との関係

NO₂⁻ は不安定なのでNO₃⁻ に酸化されてなると思われるが、湧出時のNO₂⁻ とNO₃⁻ との関係は図4に示される。これによると、明礬、鉄輪地区の酸性泉は正比例の関係あり、NO₂⁻ の酸化も酸性溶液ではゆるやかなので、かかる比例関係があるのであろう。

旧市内も中性泉で、ばらついてはいるが大体正比例の関係が存在する。

しかし、堀田、観海寺地区は加える水の成分によるので、バラバラである。

亀川地区は図5のようで井戸水には、正の比

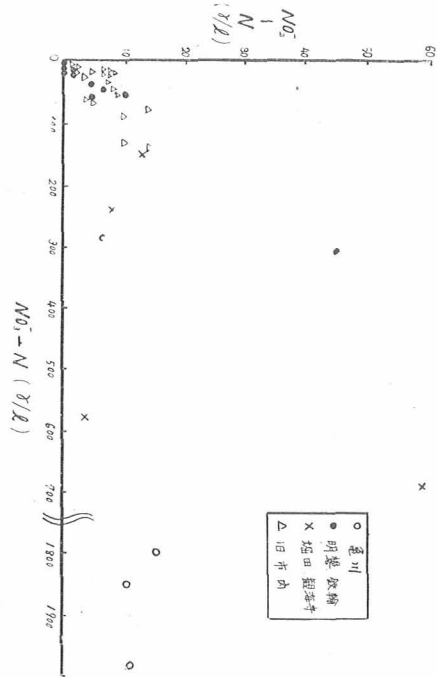
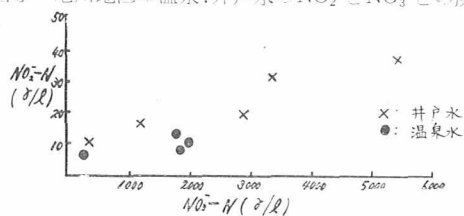


図4 別府温泉のNO₂⁻とNO₃⁻との関係

図5 亀川地区の温泉、井戸水のNO₂⁻とNO₃⁻との関係



例関係があるが、温泉水は、さ程ではなかった。

表3 亀川井戸水の N_2 化合物量

No.	井戸水	mg/l NH_4^+	r/l $\text{NO}_2^- - \text{N}$	r/l $\text{NO}_3^- - \text{N}$
1	竹田	0.48	10	300
2	松村	0.64	20	2900
3	藤内	0.36	37	5500
4	宮森	0.29	34	3300
5	川水	0.33	16	1150

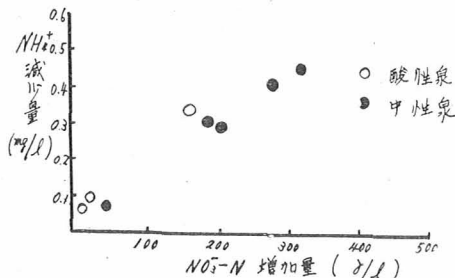
4、4、放置後のチツ素化合物

温泉水は放置しておく、次第に NO_3^- が増大してくる。このことは $\text{NO}_2^- \rightarrow \text{NO}_3^-$ も考えられるが含有している NO_2^- の量が少いので、余り考慮に入れる必要はなく、むしろ NH_4^+ の硝化によるものと考えられる。一例を、表4と図6で示す。これによると、 NO_3^- の増加は必然的に NH_4^+ の減少を伴うことが分る。しかしながら、図6に示すように、酸性泉の方が硝化がおそ

表4 放置後の NH_4^+ 減少量と NO_3^- 増加量

泉名	NH_4^+ (mg/l)		$\text{NO}_3^- - \text{N}$ (r/l)	
	湧出時	放置後	湧出時	放置後
海地獄	1.03	0.96	52	64
十万	1.65	1.31	35	205
竜巻	1.58	1.49	10	35
四ノ湯	0.15	0.08	1800	1850
堀田	0.51	0.04	150	468
弓ヶ浜	0.61	0.31	16	225
砂湯	0.70	0.41	20	215
田ノ湯	0.50	0.09	72	360

図6 放置後の NH_4^+ 減少量と NO_3^- 増加量との関係

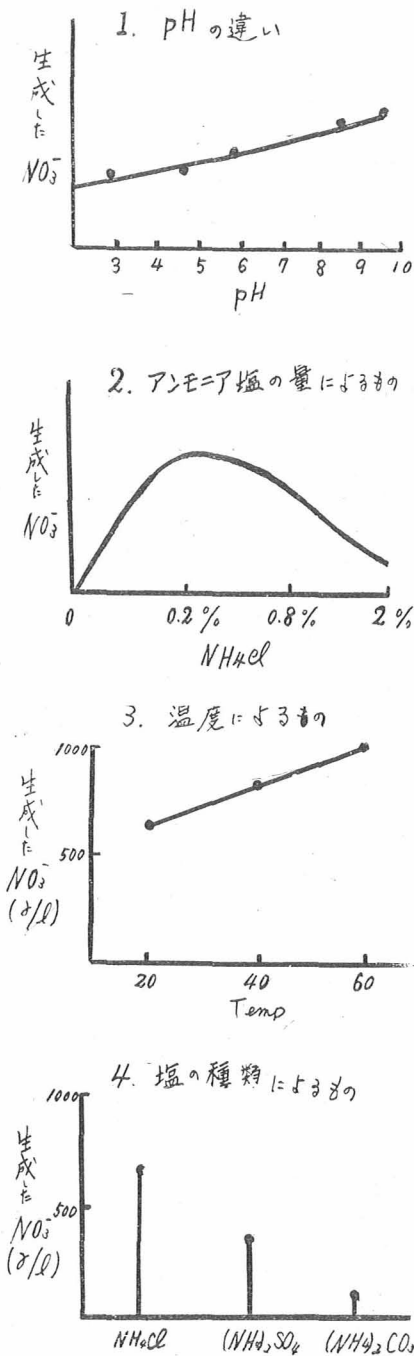


く、おそいことが分る。すなわち、酸性泉では NH_4^+ の減少量は少い。十万地獄はやや多いがPHは3.8であった。

4、5、 NH_4^+ の硝化

4、4から分るように NH_4^+ の硝化が行なわれるがこの条件を求めてみると、図7のようになる。すなわ

図7 NH_4^+ の硝化条件



ち NH_4Cl の0.2%液にairを通じて調べると

- 1、PHの違い…PHの大なるほど $\text{NH}_4^+ \rightarrow \text{NO}_3^-$ なり易い。
- 2、 NH_4^+ 塩の量によるもの→

→量が多い程 No_3^- になり易いのではなく、大体
0.2%位が量も硝化しやすいことが分った。

3、温度によるもの→

→温度は高い程硝化しやすく、20~60°C間では、正比例の関係があった。

4、塩の種類によるもの→

→同じ NH_4^+ の量で実験を行うと、
 $\text{Cl} > \text{SO}_4 > \text{CO}_3$ の順であった。温泉水では、
大体 NH_4^+ 、 Cl が主であるとみられ、硝化の条件にもっとも適していると思われる。

以上のような化学的な硝化だけでなく、バクテリアによる硝化作用も行われると思われ両者が相まって放置後の No_3^- の増加が起るものであろう。

5. 結 論

別府温泉39箇所について NH_4^+ 、 No_2^- 、 No_3^- の分布を調べ、つぎの結果を得た。

1、別府温泉の NH_4^+ 含有量は他の火山性温泉とくらべて、そう多くはなく2mg/l以下で平均は0.65mg/lであった。 No_2^- も少なく8r/lの平均値で No_3^- は233r/lであった。

2、別府温泉各地区の分布図は極めてはっきりしており NH_4^+ は明礬、鉄輪地区に多く亀川地区は少なかった。旧市内は北部地区に多く南部地区に少なかった

No_2^- は明確な特長はなく明礬、旧市内地区は少なかった。これにみし No_3^- は極めて特長があり亀川及び掘田観海寺地区に大量に含まれており、特に亀川地区は特に多く地下水の影響が極めて多いことを確めた。

3、温泉を放置すると No_3^- の量が増加するが、これは NH_4^+ の減少をとまうので NH_4^+ の硝化作用によると思われる。なお、 NH_4^+ の硝化条件について種々検討した。

(終りに、種々御指導御鞭撻頂いた当所々長の八田秋教授に深く感謝する。なお、この研究は大分県温泉調査研究会の研究費によったものである。)

文 献

- 1、瀬野、湯原、大分県温泉調査研究会報告 第9号P.1(昭33.3) 第10号P.1(昭34.3)
- 2、川上、温研紀要、第12巻、P.1(1960)
- 3、杉原、岡山大学温泉研究所報告、第9号 P32(1953)
- 4、K.Kimura,Y.Yokoyama,N.Ikeda; "Publication n°37de l'Association Internationale d'Hydrologie" P.201、202
- 5、F.L.Fisher,E.R.Ibert,H.F.Beckman;Anal. Chem, 30.1972(1958)

NH₄⁺の量に別府温泉の特長あり

別府温泉中のニッケルの定量 並びに分布について

九州大学温泉治療学研究所

温泉理学科 野 崎 秀 俊

緒言 温泉の医治効果を論ずる場合、泉水中の微量元素の影響を無視することは出来ない。また泉水中の微量成分特に普通の岩石及び地表水中にあまり多くない元素の泉水中への混入等を調査することは、温泉の特性及び成因を考える場合、普通の化学成分を調査するよりもその混入による変化が単純であり、特に好都合である。

別府温泉水中の微量成分についてはすでに多くの研究がなされているが、今回未分析のニッケルについて定量並びに分布について実験を行ったので報告する。

測定方法 定量には泉水 1 ℓ を使用、約 50 ml に濃縮、クエン酸ソーダ、ピロリン酸ソーダを加え、pH を 8.5~9.0 とし、0.1% ジエチルジチオカルバミン酸ソーダ 1 ml で発色、四塩化炭素 5 ml により振盪抽出、

328 mμ にて測定した。

検量曲線 スタンダードとして特級硝酸ニッケルを用い検量曲線を求めた。ニッケル量 0~10 γ/5 ml 間においてこの呈色物質は Beer の法則に従い定量に用いることが出来る。

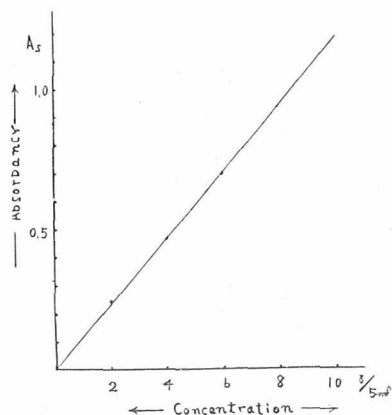
Tab. 2 別府温泉水中のニッケル含量

No.	泉名	泉温	PH	Ni γ/l	Fe mg/l	Mg mg/l
1	鷺ノ湯	54.0	7.14	0.5 ₀	0.28	20.3
2	地藏泉	59.0	2.40	3.4 ₄	3.58	8.74
3	露天風呂	78.0	2.40	0.6 ₀	10.2	—
4	岡本屋明礬泉	81.0	2.20	1.2 ₄	6.17	18.4
5	山田湯	65.0	1.80	4.8 ₈	12.4	22.5
6	薬師泉	64.8	2.30	10.8 ₆	2.52	3.35
7	紺屋温泉	62.3	3.13	5.2 ₆	3.14	20.4
8	海地獄	84.0	2.11	2.0 ₆	5.40	41.8
9	十万地獄	72.0	5.20	1.0 ₄	0.90	18.3
10	鬼山地獄	92.0	4.00	3.0 ₂	1.60	24.9
11	柴石温泉	63.0	2.48	1.8 ₁	5.83	13.3
12	血ノ池地獄	60.0	2.07	2.6 ₀	12.8	—
13	竜巻地獄	98.0	2.35	1.4 ₂	5.17	—
14	御夢想温泉	42.5	7.21	0.7 ₀	0.40	9.85
15	浜田温泉	58.0	7.04	0.7 ₁	0.29	33.5
16	亀陽泉	54.0	7.60	0.2 ₂	0.22	25.1
17	筋湯	57.8	7.04	0.4 ₀	0.22	22.5
18	四ノ湯	52.0	6.60	0.8 ₀	0.22	27.0
19	北弓ヶ浜泉	53.5	7.10	0.7 ₅	2.96	97.8
20	弓ヶ浜温泉	45.5	7.10	0.4 ₅	1.42	19.6
21	的ヶ浜温泉	51.0	7.75	0.3 ₈	1.11	25.7
22	上のヶ浜温泉	50.0	6.85	0.3 ₈	1.43	31.9
23	弓松温泉	64.5	7.44	0.1 ₆	0.82	14.1
24	春日温泉	54.0	6.68	0.1 ₇	1.71	22.4
25	海門寺温泉	58.5	6.92	0.6 ₀	1.96	8.20
26	北町温泉	59.0	6.60	0.1 ₆	2.53	42.6
27	梅園温泉	62.0	6.80	0.1 ₄	2.39	18.5
28	竹瓦温泉(男)	60.0	7.05	0.6 ₂	1.56	80.3
29	靈潮泉(男)	60.5	6.86	0.1 ₅	1.59	83.4
30	柳温泉	40.4	6.39	0.1 ₀	3.36	54.6
31	楠温泉	55.0	6.58	0.1 ₆	2.77	41.5
32	紙屋温泉(男)	51.5	7.08	0.1 ₄	0.94	37.5

Tab.1 各濃度におけるニッケルの吸光係数

Concentration		Trans- mission Ts%	Absor- bancy As	Absor- bancy index as
γ/5ml	mg/l			
2	0.0004	57.0	0.244	610
4	0.0008	34.0	0.469	586
6	0.0012	20.1	0.697	581
8	0.0016	11.5	0.939	587
10	0.0020	7.0	1.155	577

Fig. 1 ニッケル定量の検量曲線



33	永石温泉(女)	53.5	6.70	0.2 ₀	0.19	14.4
34	松原温泉	54.2	7.30	0.6 ₈	0.64	19.1
35	田ノ湯温泉	46.0	6.42	0.1 ₄	4.20	34.0
36	不老泉	52.0	6.30	0.1 ₄	0.49	35.1
37	観海寺泉	57.0	7.10	0.4 ₅	0.29	0.57
38	八幡温泉	57.5	7.00	0.6 ₀	0.84	15.5
39	堀田温泉	58.5	6.15	0.6 ₂	0.55	12.2
40	温研泉	53.0	7.30	0.4 ₃	0.26	12.4
41	温研(堀田泉)	43.5	6.98	0.5 ₆	0.37	14.3

結果及び考按 別府温泉中41ヶ所の主要温泉についての測定結果は、Tab. 2 に示す通りで、¹⁾田中氏による我国最高天徳泉(佐賀県) 9.38mg/l には及ばないが、最高は明礬薬師泉の 10.8 γ /l で、地区別に見ると明礬鉄輪地区に含有量の高いものも多く、他の旧市内、亀川地区は1 γ /l 以下である。

泉温との相関関係は見出されない。高温度泉の多い明礬鉄輪地区に含有量の高いものが多いが、これはむ

しろ pH によるものと思はれる。pH との相関的な関係は見出されないが、酸性泉には含有量が高い。これは湧出途時、岩石、鉱石等を溶解して来た結果と考えられる。岩崎氏によると、Ni, Co, Cr, Ti, V. 等は岩漿中の濃度は小であるが初期晶出の比重の大なる鉱物中に入るのので大体において岩石圈の下部の深いところに蓄積されるという。地表水に含有量の少ないニッケルが、これら酸性泉に多量含まれるということはこれを含む岩石が深所に多いということからその湧出源が比較的深いところにあるといひ得よう。同じ明礬地区で高温酸性泉でありながら、露天風呂はその含有量が少ない。同地区の他の温泉と異り深所よりの湧出水ではないのでないかと思はれる。特にその湧出地区の状況、量から噴気の凝縮水でその酸性は地表近くでの SO₂ の酸化に依りもたらされたものであろうと考えられる。

次にニッケルは同じ第8族に属する鉄に併つて出

Fig. 2 別府温泉のニッケルの分布

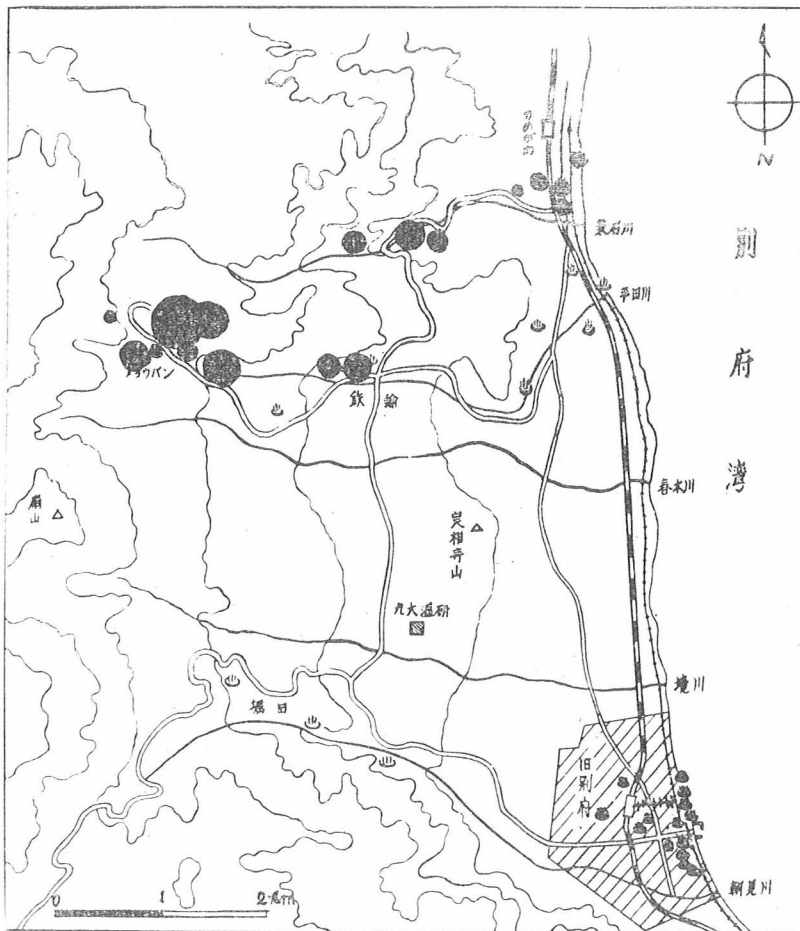
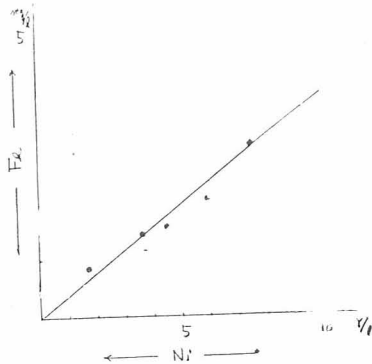


Fig 3 北弓ヶ浜泉系におけるFeとNiの関係



来るのではないかと考えられるが、鉄の含有量はニッケルに比し多く比較が困難である。しかし一応その関係を見ると、Fig. 3に見られる様に北弓ヶ浜、弓ヶ浜、的ヶ浜、上のヶ浜、弓松系統の温泉に、相関関係が見られ、しかもその含有量は北より順次少なくなっており同一泉脈に属するものであると推定される。それ以外の温泉については鉄との関係は明確には見られなかった。

ニッケルのイオン半径は 0.78 \AA でマグネシウムと同じであり、マグネシウムを含む岩石に擬装して入り込むといわれるが、全体的に見た場合、相関関係は見られない。これも局地的に見ると北弓ヶ浜、弓松間の一系列と明礬地区の一部に相関関係に近いものが見受けられる。

微量成分としてのニッケルを医学的な見地から見た場合、メタルエンチームと呼ばれる一群の中に数えら

れ、還元的触媒として働いているものと考えられている。

人間の皮膚の色については直感的に白いとか黒いとかいわれ、特にそれを科学的に測定した報告は見受けられないが、これら皮膚の黒白は主としてそこに含まれるメラニンの量によるとされている。メラニンは皮膚の酸化部位と還元部位のうち明らかに酸化部位のみ在するという。皮膚の還元能が高まればメラニンが減じ、しがって色が白くなるわけで、近時皮膚の色を白くさせるのにニッケルが関係しているといわれ、コバルトが逆の働きをすとの説があるが、温泉水中にはニッケルに比しコバルトは非常に少ない。従来より硫黄に皮膚の漂白作用ががると云はれており、温泉では硫黄泉にその期待がもたれていたが、今度の測定で酸性硫黄泉中にニッケル含量の高いものが多く見受けられた。この温泉中のニッケルがどの様に生体に働くか、今後の研究にまたねばならないが、その働きが充分期待出来るのではないかと思はれる。今回は生体に対する働きに迄及ばなかったが、これを機会に泉水中に微量含有されるニッケル等メタルエンチームと呼ばれる一群の元素の生体に及ぼす影響について、今後研究を続けていきたい。

この研究にあたり温泉調査研究会より御援助をいただいたことに深く感謝する。

文 献

- 1) S.Tanaka; Bull. Soc. Chem. Japan
18.201, (1943)
- 2) 岩崎岩次:火山の化学
(1948)

地熱地帯の地下熱構造に関する研究 (その2)

京都大学理学部 湯 原 浩 三
九州大学温研 古 賀 昭 人

1) 前報に於て、九重山麓大岳地熱地帯にある九電3号噴気井は、弱い蒸気を噴出するに過ぎないが、地表下60~70mのところに水位があり、その水位が上下に激しく変動していること、又水面の上下する附近に沈澱物が非常に附着しやすい事等が明らかにされた。水位変動の状況をくわしく調査し、その原因を究明することや沈澱物が水面のあるところに附着する理由、及噴気井内の高温水や沈澱物の化学的性質を明らかにすることは、地熱地帯の熱構造に関する本質的な問題を解く有力な手がかりとなると思われる。

第1表 九重山麓 九電3号井分析表

泉温 98.4 °C
比重 1.2155 (20°C/4°C)

1. 九電3号井内の高温水の化学的性質

昭和35年8月22日、九電3号井内に鉄製容器を下げ約3ℓの高温水を採取した。これの化学分析表は第1表の如くである。

これによると蒸発残分は335g/lに及び、実に海水の10倍の濃度である。今迄に知られている本邦最高は有馬天満宮の湯の67g/l²⁾で、世界最高はドイツの冷泉・Bernburgの268g/l³⁾であるから、有馬のものゝ5倍、世界最大の含有量を示すことになる。もっとも採取された水は噴気井(6.5インチのケーシングが挿入されて

昭和35年8月22日 採水

PH 5.8
蒸発残留物 335.7 g/ℓ

Cation	mg/ℓ	millival	millival %	Anion	mg/ℓ	millival	millival %
H ⁺	0.002	0.0016	0.00	F ⁻	32.00	1.684	0.03
K ⁺	17,950.	459.1	8.39	Cl ⁻	188,800.	5325.	98.07
Na ⁺	114,200.	4966.	90.74	Br ⁻	494.2	6.184	0.11
Li ⁺	279.8	40.32	0.74	I ⁻	61.30	0.483	0.01
NH ₄ ⁺	0.832	0.046	0.00	SO ₄ ²⁻	3,768.	78.50	1.45
Ca ²⁺	50.00	2.495	0.04	HCO ₃ ⁻	1,110.	18.20	0.34
Mg ²⁺	58.00	4.770	0.09	HPO ₄ ³⁻	2.225	0.046	0.00
Fe ²⁺	1.434	0.051	0.00	NO ₂ ⁻	0.015	0.000	0.00
Al ³⁺	1.952	0.217	0.00	NO ₃ ⁻	0.063	0.001	0.00
Mn ²⁺	0.000	0.000	0.00				
計	132,542.	5472.95	100.00	計	194,268.	5430.10	100.00

イオン合計 326,810.
H₂SiO₃ (meta) 204.4
HBO₂ (meta) 810.0

Ra 20.5×10⁻¹² g/ℓ
重水濃度 (SMOW基準) -0.7%

総計 327,824. 泉質 強食塩泉(含臭素、ヨウ素、ホウ酸食塩泉)

いる)内の地表下60~70mの深さにある水であって、有馬天満宮の湯の様に自噴しているものではないので全く同列に論じるわけにはいかないが、とにかくこの様な高濃水が地熱地帯の噴気井内に発見されたことは非常に興味あることである。

この様に高濃度であるために、多くの元素が本邦最大の含有量を示す。第2表に示す様にLi, K, Na, Cl, Brの5元素がそれである。Ra は一般に食塩泉に多いとされているが、20.5×10⁻¹²g/lでそれ程多くはない。

第2表

元素名	大岳九電3号井	本邦最高値 ⁴⁾ (温泉名)
Li	0.280 g/ℓ	0.059 g/ℓ (有馬有明湯)
Na	114.2	20.53 (有馬天満湯)
K	17.95	4.664 (")
Cl	188.8	43.79 (")
Br	0.494	0.085 (有馬池之坊鉦泉)
I	0.061	0.197 (茂原鉦泉)
HBO ₂	0.810	5.543 (嶺鉦泉)

しかし、別府温泉の最高は $6.5 \times 10^{-12} \text{g/l}$ ⁵⁾であるので、その約3倍量含むことになる。

この温泉水の泉質は強食塩泉に属する。この様な多量の食塩が、たとえばドイツのBernburgの様に地下に岩塩層があって、それから溶け出たものか、古代の海水の濃縮されたものか、或は火山性食塩が濃縮されたものかを検討することは重要である。そのため、この噴気井の掘さく途中に行われた未完成の分析結果（

第3表

PH	7.2
蒸発残留物	4187mg/l
Cl	1480
SO ₄	588
CO ₂	0
SiO ₂	964
Ca	82
Mg	17
Fe+Al	41

(昭和30年1月22日採水⁶⁾)

されていた為か、或は、噴気井内の水が深さによって化学組成を若干異にし、今回の採水が水面近くで行われた様な点に起因しているのかもしれない。

一方、この噴気井内の温泉水は常に沸騰しており、その結果として上端より弱い蒸気を噴出する。この噴出蒸気量は昭和34年10月の測定では 5fg/l に過ぎなかった。又、この噴気凝集水には塩素イオン等がほとんどなく、ほぼ蒸留水と考えるとよいので、昭和30年1月当時第3表に示された様な温泉水があって、それが5年7ヶ月間煮沸された為に濃縮されて現在の濃い温泉水が出来たものと考えられる。この考えを裏付けるために、塩素イオン量について簡単な数量的検討を行ってみる。今、塩素イオン濃度は噴気井内の上下で変らな

第4表

	海洋水 ⁷⁾	大岳九電3号井	有馬有明湯 ²⁾	火成岩 ⁷⁾
Li/Na	10^{-5}	2.45×10^{-3}	2.7×10^{-3}	2.3×10^{-3}
K/Na	3.6×10^{-2}	15.7×10^{-2}	22.7×10^{-2}	9.2×10^{-2}
SO ₄ /Cl	0.14	0.02	0.00	5.0
HCO ₃ /Cl	7.4×10^{-3}	5.9×10^{-3}	13.6×10^{-3}	5.2
B/Cl	2.4×10^{-4}	1.06×10^{-3}	13.2×10^{-3}	10^{-2}
Br/Cl	3.4×10^{-3}	2.62×10^{-3}	1.25×10^{-3}	5×10^{-3}
I/Cl	3×10^{-6}	3.25×10^{-4}	2.1×10^{-5}	1×10^{-3}
Br/I	1300	8.06	60.2	
Ca+Mg/Na+K	1.53×10^{-1}	5.22×10^{-4}	1.6×10^{-1}	1.1

いと仮定すれば、管径16.5cm、当時の深度230mからこの噴気井内の水量は

$$\frac{16.5 \times 16.5 \times 3.14}{4} \times (23000 - 7000) = 3.42 \times 10^6 \text{ cm}^3$$

したがって、全塩素イオン量は昭和35年8月現在

$$\frac{188.8}{1000} \times 3.42 \times 10^6 = 6.5 \times 10^5 \text{ g} \quad (1)$$

となる。一方、5年7ヶ月間の噴出蒸気量は、噴出が常に 5fg/l であったと仮定して、 $164.102 \times 10^6 \text{ g}$ となるから、最初 $(164.102 + 3.42) \times 10^6 \text{ cm}^3$ の温泉水が5年7ヶ月の間に $3.42 \times 10^6 \text{ cm}^3$ に濃縮されたことになる。この考えに従えば、最初の温泉水中に含まれていた全塩素イオン量は、第3表の資料を用いて、

$$\frac{1.48}{1000} \times (164.102 + 3.462) \times 10^6 = 2.5 \times 10^5 \text{ g} \quad (2)$$

となる。(1)と(2)の結果が、大略の計算のため完全に一致しないのは当然であるが、そのオーダーが一致する事は、上の様な沸騰による濃縮で充分説明し得ることを示すものである。尚、(2)の結果が(1)より小さいのは噴出蒸気量が以前は 5fg/l より多かったため、(2)に於て過少に計算されているのが一つの原因であろう。

次に、これらの化学成分の起源が海塩にあるのか、火山性のものであるかという点について考察を行う。このため、第4表に示した各成分間の比について検討する。K/Naは海水は小さく油田塩水はもっと小さい値をもつ⁸⁾。火山性の食塩泉では普通約0.1であり、最高は0.3位までである⁸⁾。九電3号井の結果は有馬有明湯より小さいが海水よりはずっと大きい。次に大事なことはLi/Naであって、海水は極めて小さく (10^{-5}) で油田塩水は 10^{-4} 程度である⁹⁾。火山性食塩泉の特長はこの比が大きいことである。したがってこの九電3号井も純然たる火山性食塩泉であろう。この温泉水が長年月の間に濃縮されたとして、アルカリ元素間の比が当初と同様であったかどうかは、当初の分析表がないの

で不明であるが、周囲の岩石との交換によって当然変化していると思われる。一般に Na は濃縮され、K は失われ、Li も幾らか減少するといわれるから、当初の Li/Na は現在よりもっと大であったろうと推定される。

アルカリ金属に対応するハロゲン化合物も多いが、Br/Cl は海水より小さい。別府の『十万地獄』の食塩泉は 2.31×10^{-3} であるから大体同じである。I/Cl は海水の約 100 倍であり、有明湯より 1 桁大きい。したがって Br/I は他は他とくらべて相当小さい。

SO_4/Cl は昭和30年のときは 0.397 で別府の地獄地帯と同様なオーダーを示したが、現在は 0.020 に下がっている。これは、 SO_4 が地下の浅いところで出来るものであるという見解に立てば、それ以前の温泉水が濃縮されたと考えられないこともないが、詳細は後の機会にゆずる。

Ca と Mg は非常に少ないが、これは次に述べる沈澱物の性質とも併せて考えねばならない。又、この温泉の重水濃度は D 偏差 SMOW 基準 -0.7% であって、これからみても、火山性食塩水の濃縮されたものであると思われる。

2 九電 3 号井内の沈澱物の附着状況と化学的性質

前報に於てすでに述べた如く、九電 3 号噴気井は昭和34年10月迄は深さ 65m のところで閉塞しており、弱い蒸気を噴出するに過ぎなかった。同年11月に浚渫を行ったところ、閉塞していたのは約 3m の間で丁度そこに水位があり、その下は貫通して、深さ 230m のところで再び閉塞していた。この浚渫によって噴出蒸気量は目立って変ることもなかったが、非常に激しい水位変動が知られる様になった。その後昭和35年12月に水位観測のため浮子を挿入したところ、深さ約 65m で塞っていることがわかった。昭和36年3月再び浚渫を行うに先立って、このスケールを採取して分析した

第5表

深さ65m の所の沈澱物	深さ340m の所の沈澱物
NaCl 98.25%	CaCO ₃ 94.12%
Na ₂ SO ₄ 1.21%	MgCO ₃ 5.79%

結果を第5表に示す。これから見られる様に全く食塩そのものといえる。浚渫に

際しては、注水のみでスケールが完全に除去される様な状態であった。これもスケールが食塩そのものであることがわかった後に考えれば至極当然の事であった。更に、この注水によって 230m の閉塞箇所も貫通し、深さ 340m 迄達することが出来た。この沈澱物は注水によって除けるものでもなく、サンドポンプによ

って採取した資料の分析結果を第5表に示すが、大部分が炭酸カルシウムの結晶であった。

噴気井内の温泉水は前節で示した如く飽和に近い濃度をもっているから、沸騰のため水位が激しく変動する 60~70m の間では、食塩が析出して管壁に次第に附着し、管径をだんだん狭めて遂には塞いでしまうものと思われる。

一方、340m の箇所から採取された沈澱物が CaCO₃ を主成分とするものであったことは予想外の事実であった。噴気井内の温泉水には、既に述べた如く Ca と Mg は非常に少なかった。それにも拘らず 340m の下には CaCO₃ や MgCO₃ の結晶が沈澱物として存在するのは、噴気井内の温泉水の化学組成が上下で異つていることを暗示するものと思われる。

次にこの CaCO₃、MgCO₃ の由来について考えることも興味深い。即ち第3表に示されている程度の温泉水の濃縮によって析出したものか、或は壁岩との反応によつて特に多く得られて来たものがそこに沈澱したのか、という二つが考えられる。しかし、いずれにしても、何故下の方にのみ CaCO₃ の濃度が高くなるか、という点が不明であるし、後者では、この地区は少くとも地下 900m 迄全部火山噴出岩であり、この附近に石灰岩等の存在は知られていないので、この点いささかの矛盾が感じられる。とにかく、この点を追究することは今後に残された問題の一つと云うことが出来る

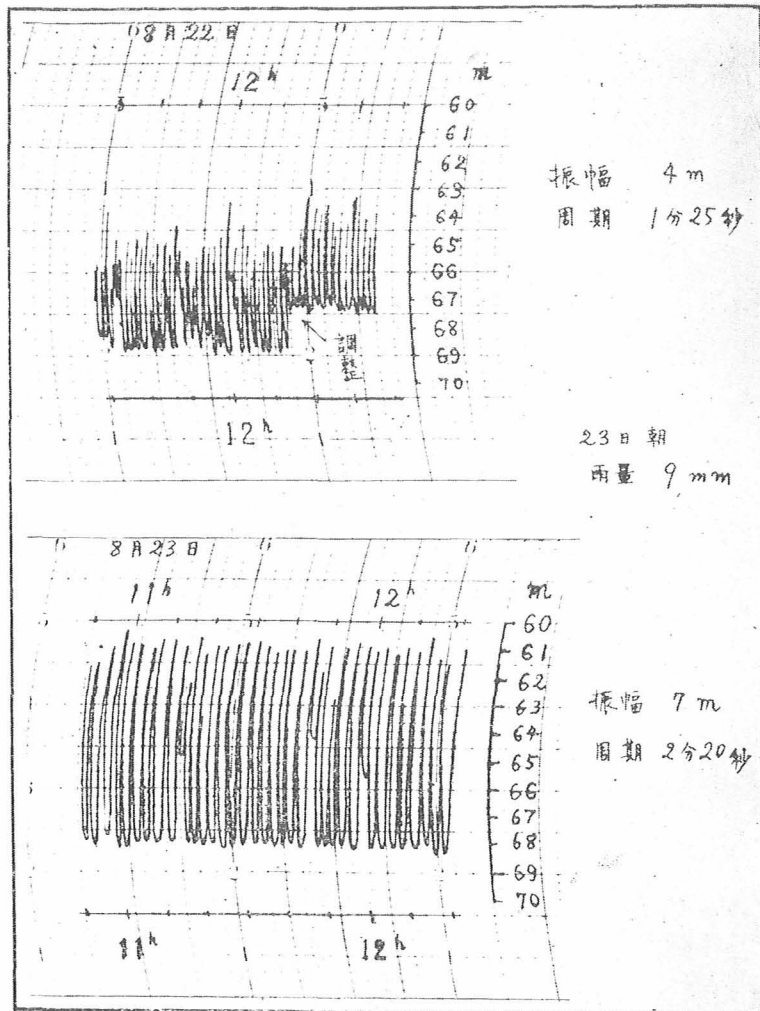
3 九電 3 号井内の水位変動

九電 3 号井内では深さ 60~70m のところに水位があつて、それが数分おきに数 m の中で非常に激しく変動していること、又その原因が深さ 90m 附近より上の部分の沸騰にある事が既に述べられた。その後この水位変動の状況を詳細に知るために、自記水位計による観測が続けられている。前節で述べた如く、昭和34年11月の第1回の浚渫より約1年間再び閉塞したが、その間は孔底温度の連続測温や、水位観測法の改善に努力がむけられたので、この間の全体を通じての水位変動の傾向を詳細に述べるに足る資料は得られなかった。しかし、次に述べる二三の点が明らかになった。

(1) 水位は 1~3 分おきに急昇するが、上昇しない時の水位は 68~70m 位 1 年間を通じてあまり変化はない。

(2) 水位変動の周期と振幅は時によって異り、その模様はあまり規則的ではない様である。たゞ周囲の土地が乾燥している時は周期短く振幅が小さく、湿っている時は周期長く振幅が大きくなる傾向をもっているこの好例は 8 月 22 日と 23 日に見られた。即ち第 1 図に

第1図



示す様に8月22日には振幅4m、周期1分25秒であったものが、23日朝雨量9mmの雨が降った後では振幅7m、周期2分20秒に変化した。

9mm程度の雨で変動状況がこの様に著しく変化する理由はよくわからないが、あるいは後述の注水実験の結果とも考え併せて、管壁の破れが存在し、雨後地下水が井内に流入することによるのかもしれない。

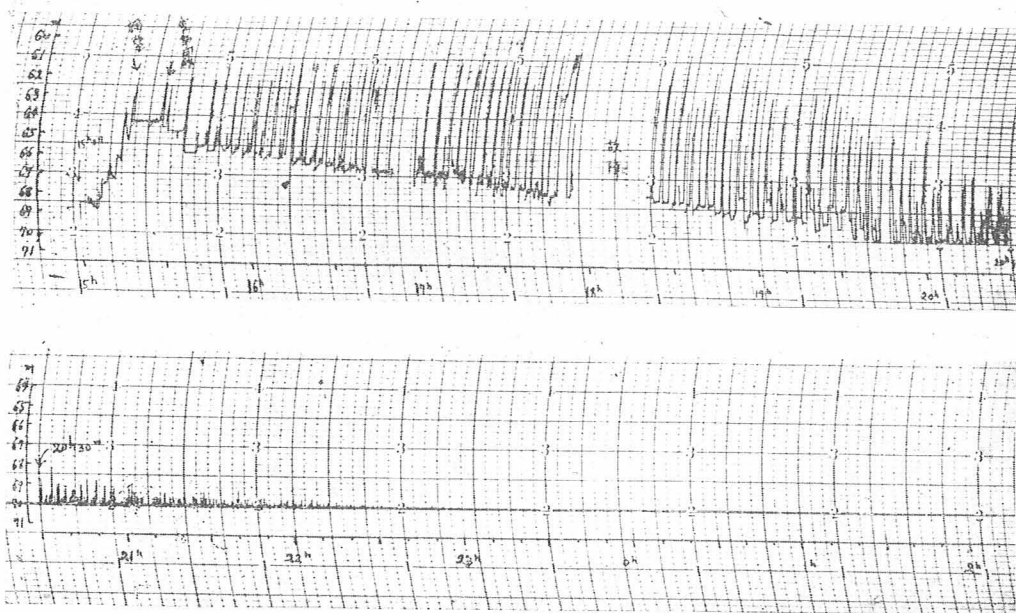
又、変動状況の変化が、地殻潮汐の如き天文学的原因によつたり、気圧変動等の気象要素に支配されるかも知れない。これ等の点を明らかにすためには観測の精度を高めなければならないが、直径6.5寸の井戸の70m下で起っている激しい変動を連続的に正確に記録することは非常に厄介な事であつて、浮子が躍動するために転倒したり、ひっかかったり、浮子をつなぐ

スティールワイヤーが理解し難いほど自然にもつれたり、動きが激しいために滑車や輪軸からワイヤーがはずれたり、更に又、腐蝕のためワイヤーの寿命が短いこと等のために、現在のところ一日以上の間連続記録をとるのは無理である。

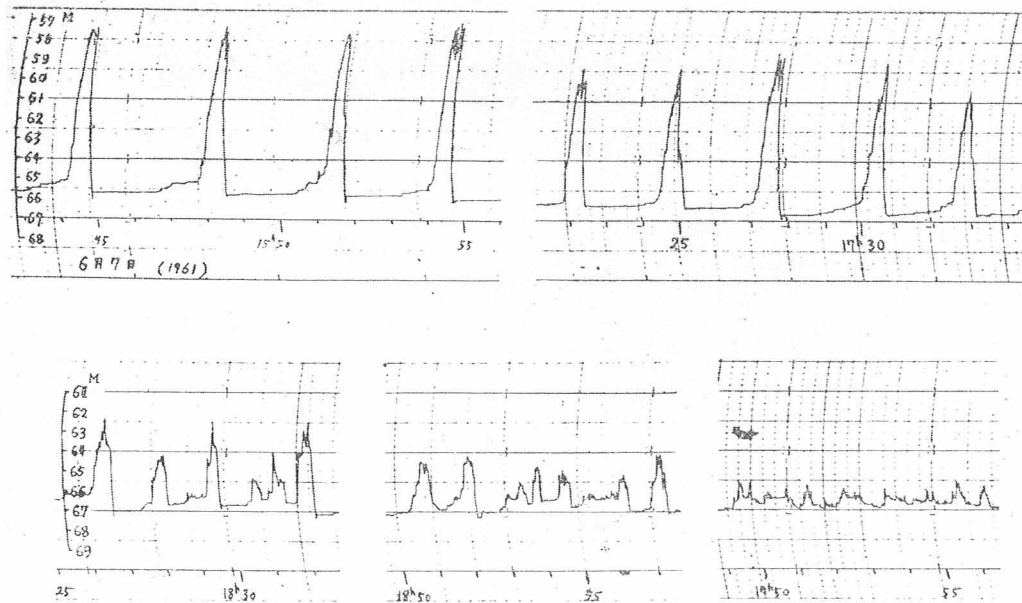
昭和36年3月に行った2回目の浚渫に際して、注水のみでスケールが除去されることが判つた。しかしその後は非常に閉塞しやすくなったので、水位観測に先立って必ず注水を行わなければならない様な状況である。

注水を行うと、そのため水位が上昇し、食塩を主とするスケールは溶解し除去される。又注水のため冷却されて、蒸気の噴出は止まり、噴気井は全く静かになる。その後暫くして(注水量により時間は異なる)水位

第2図



第3図



変動を再開するが、平均水位は漸次低下し注水前の所に近づく。又、一般的に云って、最初は比較的周期が長く振幅もあまり大きくない。その後次第に振幅が大きくなり、極大期を過ぎると周期が短くなると共に振幅も小さくなる。この頃になると変動状況がやや不規則になる。更に時間が経過すれば、絶えず小さく動く

様になり、遂には動きが全く止まってしまう。この時噴気井は閉塞してしまっており、浮子はスケール中に完全に捕捉されている。この様な注水による水位変動の様子は第2図に示す。又一つ一つの水位上昇の形を明らかにするために、早廻し時計でとった記録を第3図に示す。

水位変動の原因は深さ約90mより上の部分の沸騰にあることがわかっているから、変動周期と振幅から、沸騰のために消費される熱量を求めることが出来る。数量的な取扱いの詳細は別稿⁽¹⁾にゆずって、ここでは第6表にその結果を示す。又一方、(a)注水の際の注水

量と静穏時間との関係、及び(b)注水量と再び閉塞してしまうまでの時間との関係からも噴気井内に運ばれる熱量を概算することが出来る。この結果を示したものが第7表である。第6表の結果は $4 \sim 6 \times 10^2$ cal/secで大体揃っており、周期や振幅が異っても、噴気井内

第6表

年月日	時分～時分	平均振幅 h ₁ -h ₀ cm	平均周期 T sec	一周期間の 気化蒸気量 g	毎秒あたり 気化蒸気量 g/sec	毎秒あたり 消費熱量 Q cal/sec
1960						
8 22	11.35~11.45	400	85	86	1.01	5.3×10^2
23	11.15~11.45	700	140	150	1.07	5.7
1961						
4 6	13.36~13.46	550	100	118	1.18	6.2
6 6	17.00~17.30	600	160	128	0.80	4.2
7	6.16~6.40	400	75	86	1.15	6.1
7	15.30~16.00	850	200	182	0.91	4.8

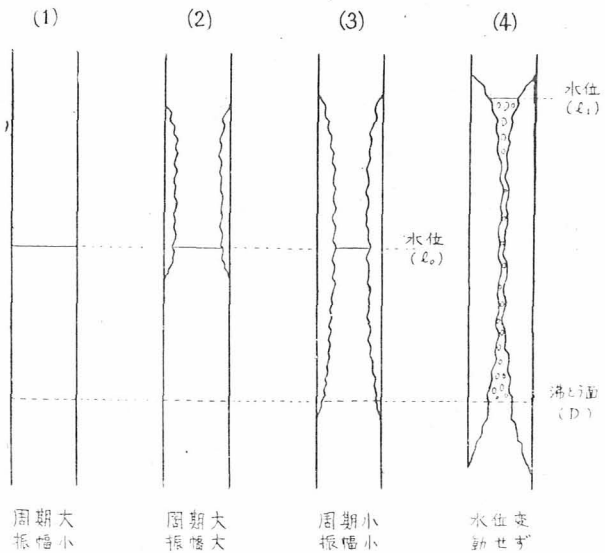
第7表

注水開始 年月日 時分	注水量 ℓ	注水温度 °C	水位上昇 m	変動開始 時分	変動終了 時分	管内の湿り蒸気 がもつ全熱量 * cal	毎秒あたり 消費熱量 Q cal/sec
1961 6 6 1500	86	36.0	4.0	15 28	23 00	1498×13^3	a) 2.3×10^3 b) 1.7
6 7 1323	119	26.2	5.5	13 58	2 00	1666	a) 3.3 b) 1.7

* 注水温度を基準とした値
a) 注水後の静穏時間より計算 b) 変動期間より計算

での熱の流れがほぼ一定していることを示している。第7表の結果も大体揃っているが、第6表のものに比して4~5倍大きい。このくい違いの原因としては、(イ)第3図に見られる様に、一回の水位上昇に際しても山の数は実際にいくつかある場合もあるから、山が一つとして計算した第6表の結果は過少となっている場合もある。(ロ)第7表の計算に際しては、管内に冷水がたまるため、管外からの熱伝導による流れが大きくなるが、これを無視した。又注水の際に70m以浅の管内で注入水が水面に達する迄に周囲の地温によって加熱される点も無視した。但しこのための誤差は第7表の(b)の場合の如く全体の時間が長い時はあまり大きく

第4図

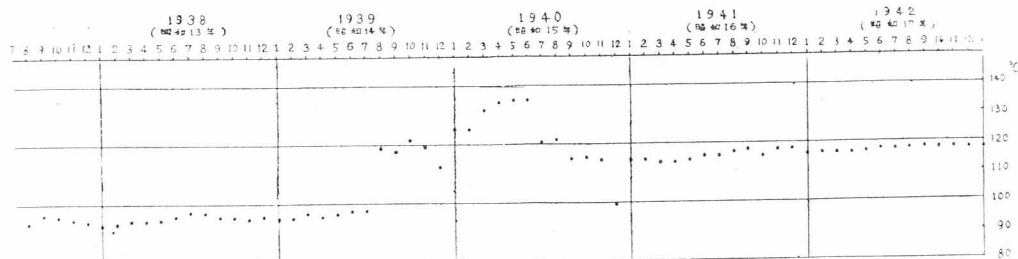


ない。結局第7表の結果は数倍は過大に評価されているかもしれない。

以上の諸点を考慮して、この噴気井内での熱量の流れは約 1×10^3 cal/sec 程度 (1 cm^2 あたり約 5 cal/sec であると思われる。

次に水位の変動状況が変化することの主な原因は、前に述べた注水後の変動の模様から、管内のスケールの附着状況に支配されていると云えそうである。スケールのつき方は、はじめは、水位が上昇する際に管壁を洗う部分に食塩が附着し、後次第に液中の濃度が高くなるにつれて、上昇前の水面下でも析出がはじまるであろう。第4図には、このスケールのつき方を模式的に示した。さて、第4図の(1)から(2)になる間は、沸騰する水の量は変わらないから、熱の流れが一定である限り、周期は変わらない。しかし、水面より上の部分の管径がスケールによって次第に狭められると、水は次第に高く迄上昇する様になる。次に(3)になって水面下の断面積もスケールによって狭くなると、沸騰すべき水の量が少くなって来るから、沸騰から沸騰迄の時間は短くなる。そして、水の量が少いから(2)の時の様に高く上らない。更にスケールが発達して(4)の様な状態となると、沸騰点より上の水量は極くわずかになるので、常に沸騰する。この時は水位は常に小さく動く様になる。又水位は沸騰のため全体として高く保たれる管であるが、第2図ではこの段階に至る迄に水位計が動かなくなる。最後に細い間隙だけを残して閉塞してしまうと、第1図の浸漬前に観測された様な、弱い湿り蒸気を噴出するだけの噴気井になってしまうものと思われる。

第5図



が残っていたので、これより月平均値を出し、経年変化を示したものが第5図である。これによると昭和14年の8月から温度が急激に上昇し、遂に 135°C に達し約1年後急に又下って 118°C 附近に落ち着いている。この様な急変の理由は、当時バルブの調節をしたことが記録されている以外、何も記録が残っていないので詳しくは不明であるが、その最高温度が、九電3号井内

4、大岳地熱地帯の地下熱構造

九電3号噴気井内では約 1×10^3 cal/sec の熱が、深さ90m以浅の沸騰のために使われていることがわかった。この熱がどこからどの様な方法で供給されているのかを知ることは興味深い。先ず第一に考えられるのは、深さ90mあたりに一次的な高温蒸気層があってそれによって管外からの熱伝導で熱が供給されているとする見方である。これによれば、数量的取扱は前と同様別稿にゆずるが、噴気井から3m距てた深さ90mの所の地温が 200°C を越えていなければ、それだけの熱量を常に噴気井内に供給することが出来ない。深さ90m附近には比較的強勢な蒸気層があることが知られているが、その様な高温は未だ観測されたことがないので、熱伝導によってのみ説明するのは苦しい。一方約90m以深の管内に対流渦が発達しており、これによって沸騰に使用される熱が下方から運ばれているとする説明の方が考えやすい。この場合、100m以深の温度勾配 $0.00258^{\circ}\text{C/cm}$ に対応して、渦熱伝導率として、 $10^3 \text{ cal/sec} \cdot \text{cm} \cdot \text{deg}$. のオーダーのものが考えられる。

この様に熱が下方より上方へ流れているとすれば、この熱の流れは噴気井内のみにあるものではなく、地熱地帯全体にあるものと思われる。噴気井外でも、水温がその圧力の飽和温度を超えれば、沸騰がおこり蒸気層が出来る。この蒸気層は古くはいわゆる東電太刀川井（現在は京都大学有なるも閉止中）、新しくは八幡井によって存在が知られているものであろう。東電井は昭和28年迄噴出していたが、昭和12年7月より昭和18年5月迄の間、隔日に孔口温度を測定した記録

の深さ90mの所で、水温と飽和温度が丁度一致した点の温度になっている事は極めて興味深い。

地中での高温水の沸騰によって生じた蒸気は、間隙をぬって表層に達し、自然噴気孔となり、地下水を熱して温泉や沸騰泉をつくる。したがってこれらの温泉は既に指摘されている如くほとんど溶解成分を含まない。蒸気層の下に存在する高温水は沸騰によって次第

に濃縮されるから、九電 3 号井内に於けると同様、地中にあっては次第に塩分濃度が高くなる。但し、地中では、噴気井内の様に隔離されてなく、絶えず地下水によって補給されたり地域外に流出したりするから極端に濃くはならない。第 3 表に示された値は昭和 30 年 1 月に掘さく中に深さ 350m で噴出したものゝ分析値であるから、この程度が大岳地熱地帯での地中での自然濃縮の値であろう。一般に噴気井から噴出する蒸気は、過熱蒸気でない限り、微細な水滴を含んでいる。この水滴は蒸気が噴出途中で凝結したものもあるが、水分の多いものでは、前述の地中での沸騰の結果、自然にある程度濃縮された水を水滴として運んで来る。したがってこの場合には噴気凝集水の塩素イオン濃度は比較的大きい。九電 1 号噴気井では掘さく当初に比べ、水分が多くなると共に凝集水の塩素イオン濃度は大きくなって来ている。

大岳地熱地帯の地下では、深い所にいわゆる熱水が存在し、約 100m 以浅に蒸気層が存在し、地表近くにはこの蒸気を熱源とする温泉が存在する。この事は今迄にも観測事実から推論されているところであって、今回の研究から結論されることも同様である。熱水の沸騰のために消費される熱量は、前に述べた様に地熱地帯全体にわたって、熱水層中を下から上へ対流によって運ばれているものと思われる。この場合の渦熱伝導体は、地層中であるので、噴気井内のものよりはずっと小さいのであろう。したがって、単位面積あたりの熱量の流れは、前述の 3 号噴気井内の値よりもずっと小さいが、地熱地帯全体で見れば、かなりの量の水蒸気を生産するに足る熱量となるであろう。次に、更に深いところの熱源については、岩しょう性の一次蒸気がどこかにあって、それによつて熱や化学成分が補給されていると想像される。¹³⁾ ニューゼーランドのワイラケイ地熱地帯の地下熱構造も大岳地熱地帯とよく似ていて、比較的浅い層に蒸気が存在し、その下は熱水である。そして本質的な熱源と思われる一次蒸気はやはりみつからない。地熱地帯のこの様な熱構造は地熱の本質に関連して、極めて興味深い点であって、今後の研究が望まれる。

終りに御助言戴いた京都大学の速水、瀬野両教授、及び分析に御協力戴いた九州大学の川上、野崎両博士に感謝する。又重水素濃度の測定は東京都大、千谷研究室にお願いした。併せて感謝する。

文 献

- 1) 速水領一郎、瀬野錦蔵、湯原浩三：大分県温泉調査研究会報告 11号, p.18, 1960
- 2) K.Kimura, Y.Yokoyama, N.Ikeda : I, D.G.G. Assemblee Generale de Rome, Tome II, p.202, 1954
- 3) 黒田和夫：温泉の科学，長谷川書店刊，p.35, 1948
- 4) 岩崎岩次：火山の化学，河出書房刊，p.65, 1948
- 5) 古賀昭人，野崎秀俊，川上弘泰：日化，78, P.642, 1957
- 6) 岡本督，森恒忠，江島康彦：九州電力研究期報臨時増刊号，1958
- 7) Rankama : Geochemistry, p.290, 1950
- 8) D.E.White : Bull.Geological Soc.Amer., 68, p.1659, 1957.
- 9) 太秦康光，那須義和，那須淑子：日化，81, p.1673, (1960)
- 10) 古賀昭人：日化，80, p.365, 1959
- 11) 湯原浩三：火山，投稿予定，1961
- 12) 地質調査所月報：6, 地熱号, p.11, 1955
- 13) F.E.Studt : New Zealand Jour. Sci., Tech., B38, p.595, 1957

別府市街地温泉の静止水頭調査

京都大学理学部 瀬野 錦 蔵

京都大学理学部 吉川 恭 三

1 静止水頭分布の意義

一般に被圧地下水の水圧はその点にある井戸内の水位で示され、之を地下水頭と呼ぶ。地下水はその水頭勾配に比例した流速をもって流動していると考えてよいから、被圧透水層内での地下水の流動状態を知るためには、まず、その地域での水頭分布を求めた上での考察が有力な方法とされている。しかし、実際の水頭測定は井戸が既に設置されている地点でのみ行えるもので、其以外では、もしその点に井戸が掘られたとしたら、その井戸内のどの高さまで水が上昇し得るかを仮想することによって水頭を定義するものであるからその附近の井戸で測られた水位分布に基づいて水頭を推定する以外に方法がない。そのためには、井戸内の水位で示される水頭とその周辺での地下水頭との間にあまり大きい違いがないという条件が必要である。

地下水頭はその透水層の持つ自然的な性質と人工的な条件の二つによりきめられ、次の関係がなりたつと考えられる。

$$\begin{aligned} (\text{地下水頭}) &= (\text{透水層の自然的性質による値}) \\ &+ (\text{井戸からの採水による影響}) \end{aligned}$$

今、地下水頭分布に時間的変化のない定常状態を考える時、透水層の自然的性質としては、その層の境界条件ともいべき他からの水の出入の状態と、透水量係数の地域的分布が主に影響し、水頭を実測出来る井戸が適当に配列して居れば、その値をつらねて水頭分布を求めることはあまり困難でない場合が多く、其れから逆に透水層の性質をさぐることも可能である。一方井戸からの採水の影響はその井戸に向う水頭勾配をつくり、特にその採水井戸に近いほどその勾配は急となるため、その井戸の近くでの水頭の推定はむつかしく井戸採水時の水位はその周辺での水頭を代表するに適しない。したがって、現実によつての井戸から採水を続けているままの状態での完全な水頭分布を得ることは不可能な場合がほとんどで、この困難をさけて出来るだけ現実に近い水頭分布を得るために、他の井戸での採水の状態は出来るだけ変えずに、一つ一つの井戸につき順次そのよう出を止めて水位を測り、之をある標準からの高さで表わしてその分布を求める方法が試みられる。このようにして得られた各井戸での水頭を

静止水頭と呼び、又、この値の等しい地点を結んでつくられた等静止水頭線の分布を静止水頭分布と名づける。この分布から求められる各点での水頭は現実によつての井戸から採水されている時の水頭よりは高いには違いないが、その静止水頭を測定する井戸からある程度以上離れると、その井戸から採水している場合と採水を停止した場合との水頭の違いは相当小さくなるから特に一つ一つの井戸に向う地下水流の状態を知る目的以外の大ざっぱな観点からは、この静止水頭分布により、その地域全体としての地下水の流動状態を近似的に推定出来るとみてよい場合が多い。もちろん、この近似度は、その地域の井戸の分布とか採水の状態により異なるから、このようにして求めた静止水頭分布を解釈する場合、常にその持つ意味について十分な注意を払うことが必要である。又、このような方法で得られた各井戸での静止水頭の値は、その井戸からの採水が停止されているだけで、透水層の自然的な性質による値のほかにもその地域に含まれる他の井戸すべからる採水の影響が加わったものであることにも注意しなければならない。

2 別府温泉の静止水頭に関する従来の研究

別府市街地温泉における温泉静止水頭の最初の研究は、野満・瀬野・山下によつて行われた⁽¹⁾。その研究では、各井戸につき、静止水頭を H 、水頭 h の場合のゆう出量を q 、井戸管の断面積を a とおいた時に、

$$q = ca (H - h) \dots\dots\dots(1)$$

という関係が多数の実測でほぼ満たされていることが示された。ここで、 c は各井戸についての常数で、井戸により相当の違いのあることが知られている。この関係は、水頭 h が時間的に変化する場合にも成立し井戸上に設けられた断面積 A のタンク内を温泉水が上昇して行く場合について次の関係が導かれた。

$$\frac{dh}{dt} = \frac{ca}{A} (H - h) \dots\dots\dots(2)$$

次に、瀬野⁽²⁾は別府市街地の温泉静止水頭分布を求めるため、1933年から1938年にかけて出来る限り多数の井戸について静止水頭を測定した。しかし、自噴井のゆう出を止めて静止水頭を測定するためには、井戸側管が鉄管などの相当丈夫なものでなければ破損の心配があり、温泉使用者の理解を得て実測出来たものは54

孔のみで全地域の水頭分布を得るためには不十分であった。その他の井戸では静止水頭の値を計算で推定する方法をとり、先の (1)式に、更に、井戸穿掘後の経過年数によりゆう出量の減少してゆく効果を加えて、

$$H = h + \frac{q}{c_0 a} e^{-0.81t} \dots\dots\dots(3)$$

という関係がすべての井戸で成立していると仮定し、それぞれの井戸で実測されている q 、 h 、 a の値を用いて H を求めた。この時、 c_0 の値としては、先に実測から (1) 又は (2) 式の関係が認められたすべての井戸で得られた c の値の平均値、 $20,0 \text{ (min}^{-1}\text{)}$ を用い、 t にはそれぞれの井戸の穿掘後の年数を与えた。このようにして、静止水頭の計算された 285 孔を先の実測された 54 孔に合せて市街地全部にわたる静止水頭分布を得たが、その結果から示されている主な点は次の通りである。

- (1) 井戸の深度はいろいろであっても、その静止水頭に地域的分布を求めることが出来ないほどの著しい差異はなく、大きく見た場合には別府市街地は一つの被圧層状泉と見られる。
- (2) 温泉静止水頭は平均海面より高く、大体、山手から

海に向って傾斜して低くなっている。その勾配は地表勾配よりいくらかゆるく、地高 10m 附近以上では静止水頭は地表より低い。

- (3) 海岸から山手に向う 2 本の線 (図 1 の鎖線) に沿って等静止水頭線が海方向に突出し、あたかもここに脈状泉源のあるような分布をしている。これは先に野溝・山下の地温分布の研究から示された田の湯温泉脈と海門寺温泉脈とにほぼ合致している。
- (4) 浅い冷地下水の水位に比べて、温泉静止水頭の方が殆んどの場所で高いが、海岸から遠ざかるにしたがって両者は接近し、海岸から約 1 km 以上で地下水が温泉の源となり得る可能性がある。

この研究で最も問題となる点は、ゆう出量等の値から静止水頭の値を計算で推定する方法にあることはいうまでもない。各井戸についての比例常数 c の値を画一的に $20e^{-0.81t} \text{ (min}^{-1}\text{)}$ とおいて計算することは、それが多数の実測例から平均的に定められたものであっても、個々の井戸に用いられる時には実際とは相当の違いをもつことが考えられ、又、この c_0 の値や井戸穿掘後の経過年数に地域的な差があればこの推定法から求められた静止水頭分布に地域的な違いを含む可能

図 1 別府市街地の静止水頭分布 (1960年 8月)



性もある。したがって、この方法は、当時、水頭を実測出来る井戸数が非常に限られていたための便宜的な手段であって、出来れば更に実測数を増してそのみで静止水頭分布を推定出来るにこしたことはない。かつて、別府温泉の井戸管としては、一部のポンプ使用の井戸で鉄管が用いられていた外は竹管が最も一般的であったが、最近になり次第にビニール管におきかえられる傾向を示している。したがって、自噴を抑制して静止水頭を測定する場合に井戸管を破損する恐れが少なくなって来たため、ビニール管又は鉄管の井戸について使用者の了解の下に水頭を実測し得る機会が多くなり、その実測値のみを用いてかなりの精度で静止水頭分布の得られる見込が強くなった。また現在では全地域にわたり充分な測定数を得るには至らないが、今後この測定可能な井戸が次第に増して来ることが予想されるから、今は幾分不完全ではあっても、最も安心して使用出来る実測静止水頭のみを使った水頭分布図を求めておけば、将来くり返して求められるであろうこの種の分布と比較して、温泉水圧の変動などの考察を行うのに有益な資料となると考えられる。

3 静止水頭の測定

静止水頭の測定にはかつて瀬野が用いたと殆んど同様な方法を行った。自噴井では透明なビニールホースを連結した金属管を木栓に突き通し、その栓をゆう出口に密着させると、ビニール管内を温泉水が急速に上昇してある高さに至って静止するから、この地表面上の高さを各ゆう出口毎に測定出来る。この方法で測定し得た井戸は79孔であった。一方、水位が地面より低く、揚水を行っているものについては、長く揚水を休止して、その水位が定常状態とみなせる場合はそのまま地表からの井戸水位を測定する。また、測定前まで揚水が行われていて、揚水停止後、水位が刻々高まって行くような場合には、その水位上昇速度 $\frac{dh}{dt}$ を実測から求め、同じく測定したAと a の値を用いて(2)式に基づきHをきめる方法をとった。かくして各井戸で地表からの静止水位の高さが求められた後、かつて、瀬野により行われた水準測量の結果を利用して、その地表の平均海面に対する高さを求め、各測定点における静止水頭の値を得た。測定は1960年8月1日から8日までにほぼ完了し、その間に季節的变化の影響はあまり含まれていないと考えられる。しかし、別府温泉では海洋潮汐の影響による水頭変化のかなり大きいことが知られており、別府観光港建設事務所の潮位計記録によると、この測定期間中の最大潮汐差は約2.5mであるからその影響は無視出来ない。野満・瀬

野・中目による別府温泉の潮汐影響度は海岸からの距離 x により、全体として、 $e^{-0.005x}$ の形で減衰してゆくとみられるから、海岸から400mではその値は0.135となり、2.5mの潮汐差に対しその距離で、最大0.34mの水頭変化が行われることとなる。そこで、静止水頭を実測した温泉のうち海岸から400m以内にあるものすべてにつき時間を違えて2度測定し直し、水頭は海水位変化に常に比例して変化すると仮定して潮位記録と対応しつつ、その平均潮位に対する値を推定した。この程度の操作では潮汐変化を完全に消したとは言えないが、かなりの程度には較正され、そのための誤差は全ゆう出孔を通じてほぼ0.3m以内にとどまるのではないかと考えられる。このようにして求められた静止水頭の値にもとづいて得られた分布を図1に示す。

図中の黒円は水頭の実測点を示し、129点で、かつて1938年の水頭分布を求めるために実測および推定された孔数の約 $\frac{2}{3}$ にすぎないが、これで別府市街地温泉の大体の範囲はおおむねおおうことが出来る。ただ、北部の富士見通附近の海岸部ではゆう出口上を塗り固めて水頭実測の出来ないものが多く水頭分布を得るに至らなかった。また、田の湯附近のエアリフトポンプを用いている井戸のうちには揚水管が井戸に直結してあって水位の測定出来ないものが相当あり、最も自噴泉の密集している流川通附近では、なお、竹管の井戸が多く、実測点が比較的少ない。

4 静止水頭分布

図1の静止水頭分布は1938年のものと全体としての傾向にはあまり大きい違いがなく、大体西北から東南に向って次第に低くなっていて、地下被圧層内の温泉がほぼ海に向って流れていると考えられる。しかし、先に記したように、この測定された静止水頭は透水層のもつ自然的性質の影響のほか、水頭測定井戸以外の各ゆう出孔からの採湯の影響をも含んでいるから、別府のように市街地全体にほぼ地表で自噴するゆう出孔が分布している場合、其等に温泉水が供給されるためには当然水頭分布は海に向って低くなるはずでありこの流動方向のみから必ずしも温泉水が地中で海に流出しているとは云えない。別府では、浜脇から中部埋立地附近にかけて温泉中に海水の混入して来ている状態が知られているから、市の南部域では温泉水と海水とは連絡しておるのに違いないが、海岸線の全部にわたって、そのような状態があるとは断言出来ない。

次にこの静止水頭分布の著しい特長は、北部埋立地南端から国鉄別府駅北端、野口踏切附近にかけての線上で静止水頭が高く、其から南と北に向って低くなり

あたかもこの線上から他地域に向って温泉水の供給があるような状態を示している点である。この線は前に地中温度の調査から海門寺温泉脈と名づけられ、透水層の下部から熱湯が供給される裂目が存在するのではないかと推定された脈状域とほぼ同じ位置にあり、又瀬野の1938年の水頭分布でも図1内の鎖線(2)上で静止水頭の高いことが示されているが、今回の分布では特に鉄道より海岸側でこの傾向が更にはっきりと現れている。しかし、之がこの透水層のどのような性質によるものかは尚検討を要する問題で、この脈状地域には北小学校などがある関係から、ゆう出孔数が之より南部の地域にくらべてかなり少ないこともこの温泉水圧が比的高く保たれている一つの原因ではないかと考えられる。それに対し、この地域より北の弓ヶ浜附近では同様にゆう出孔数も少く、又、その地域的なゆう出量もあまり大きくないにかかわらず、その静止水頭が低くなっていることは、人工的な影響以外の透水層の自然的な性質の違いが原因していると考えねばならないであろう。之が、前から推定されていたようにこの線に沿い深処から新しい温泉水のゆう出があるためか、又は、この線の南北で透水量係数に違いがあるためかは、まだ明かではない。

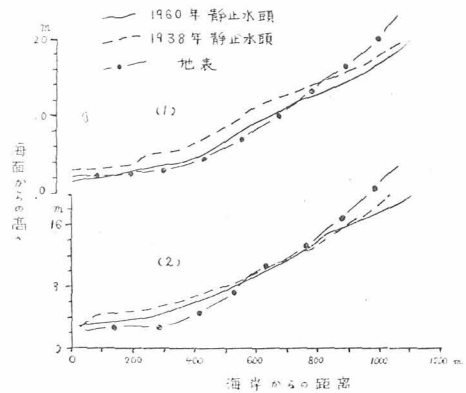
ここで注目されることは、従来の研究で地中温度に地下浅層で急な上昇があり、又、等静止水頭線が海方向に突出していて、海門寺温泉脈と同じくより深処から熱水のゆう出があると見られていたもう一つの地域の田の湯温泉脈(図1の鎖線(1))に沿い、今回の調査からは特に他にくらべて静止水頭が高いと云う特長が見られないことである。むしろ、3m、4m、6mなどの等静止水頭線の形から見ると、その附近の最も井戸密集度が高く地域的ゆう出量の大きい地域に対して他から温泉水の流入して来るような状態さえうかがわれる。

図1に記した鎖線(1)と(2)に沿い海岸からの距離と静止水頭の値とを対応させて図2をつくり、それぞれに地表の勾配を記入して対応させると、共に山手から海岸に向い次第に低くなって行くが、(1)では海岸から約700m、(2)では約600mで静止水頭は地表より低くなり、それより山手に行くにしたがって次第に地表よりの深さを増す。それより海岸近くの市街部では(1)の田の湯温泉脈上の静止水頭は殆ど地表に沿い、それより2~30cm高いままでほぼ平行を保ち海岸ごく近くで地表よりやや低くなっている。これは、この附近一帯にはほぼ地表で自噴している井戸の密集していることから当然予想されることである。それに反し、(2)の海門寺温泉脈上では地表面にくらべて勾配の変化が少く

海岸から3~400mでは尚地表上約1m近くの静止水頭を持っていることに注目され、この事実はこの附近にゆう出している井戸が少くて、実測静止水頭への他の井戸からの採水の影響が比較的小さいであろうと考えられることと対応している。

以上のように、別府温泉のような多数のゆう出孔を含む地域では、測定された静止水頭にいろいろな影響

図2 静止水頭と地表との関係



がくみ合わさっていて、その分布から地下透水層の状態をさぐることは困難な問題となるから、出来ればすべての井戸からのゆう出を同時に長時間停止し、人工的採水の影響を出来るだけ除いた後にその静止水頭を測定すれば、層のもつ自然的な性質を推定するに有益な資料が得られるのであるが、実際的にはそのような方法は実行し得ない。したがって、このような地域での静止水頭分布を見出すことの意義は、その分布の状態から地中の温泉水流動状態を推定してそのような状態を起す原因を考察すると云うことよりも、現実に行っている条件の加わっているままの状態、ある地点の温泉水の圧力がどれだけあるかを知り、実際に採湯をはかる場合の便宜を与えると共に、又、年月の経過により、その値がどのように変化し、それが他からの条件のどのような変化に対応しているかと云う問題を考察することに重点があると考えられる。

5 過去の静止水頭分布との比較

前節に記したように、今回の調査結果は1938年に発表されている静止水頭分布に対して、一見して、全体としての傾向には大きい変化はないが、田の湯温泉脈での等水頭線の凸部があまり明瞭でないなどの違いが認められるので、今、この二つの水頭分布を更にくわしく比較し、全地域にわたって、その間の温泉水圧の変化を見出すことを試みた。測定された一つ一つの井戸については両回の調査での対応が少く、同じ位置の

ものでも改掘が行われていたりするため、個々の井戸での測定値にこだわらず等静水頭線の分布にもとずいて比較することにした。その結果、静止水頭の高くなった地域はごく一部で、いくらか低下している地域の広いことが見出される。もちろん、両回の観測の間には、降雨量の違いによる季節的変化の影響があろうし又、潮汐変化をぬき去るための操作とか、各井戸での測定値にもとずいて等静水頭線を引く場合の任意性などにより、あまりこまかな比較は出来ないが、今回の結果が前回にくらべて1m以上低い地域と1m以上高い地域とを図3に示す。又、同図中にこの両回での静止水頭の値に差のなかった点をつらねて点線で示したが、この図によると以上の結果はあまりばらばらではなくて、静止水頭の大きい変化は比較的良好に固まって分布していることが見られ、この点からもこの約25年をへだてた両回の調査結果を比較することの意義が認められる。季節的変化の影響としては、雨量による水頭変化を比較的うけやすいとみられている上流部（静止水頭15m以上）でも両回の分布にあまり大きな違いはなく、その地域にある宮地嶽神社内の井戸水位をこの両回ともに分布図作製の資料として用いているが、その水頭が前回では25.5mであったのに対し、今回は24.9mで、0.6mの違いにすぎないことから考えても、市街地温泉全体を通じて1m以上の差を見るほどには大きく影響していないであろう。したがって、この1m以上の水頭変化には自然的な条件の変化よりも人工的な条件の変化の方が大きい原因となっていると考えられ、今、この1m以上の低下域を次の3地域に分けて考えることにする。

(a) 浜脇から棧橋附近にかけてほぼ海岸線に平行な地域

(b) 田の湯温泉脈に沿った脈状域

(c) 海門寺温泉脈以北

(a) 地域には常時又は干潮時に自噴がとまり、ポンプ揚水を行っている井戸が多く、その大部分は温泉中への海水の浸入になやまされている地域に属しているから、この地域への海水浸入の原因は温泉水圧の低下によるものと推定されたが、今回の調査結果はそれをうらみずけている。著者等が本報告第10号に述べたように、地下透水層中で温泉水と海から浸入した塩水との間に静水圧的つり合いが保たれているとすれば、内陸のある点で海水面下淡塩水境界面までの深さをh、静止水頭の値をH、温泉水と塩水との密度をそれぞれ ρ_1 、 ρ_2 とするととき次の関係がなりたつ。

$$h = \frac{\rho_1}{\rho_2 - \rho_1} H \dots\dots\dots(4)$$

ここで温泉水の温度を50°Cとみて、 $\rho_1 = 0.988$ 、海水の塩分を33.00%として $\rho_2 = 1.025$ をとるとき、 $h = 26.7H$ したがって、静止水頭の1mの低下は透水層内にある海水との境界面を26.7m上昇することとなり、この深度内で収水している井戸があれば、そのゆう出温泉水中の塩分が激増する結果となる。

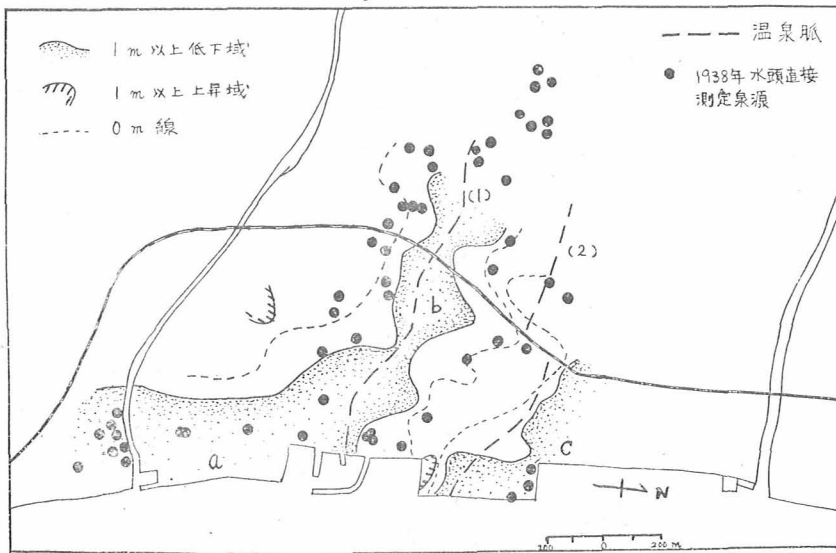
(c) 地域では埋立地附近に次第に井戸が密集して来て採湯に困難を来すようになって来た事実が認められているが、まだ海水混入の認められるほどには塩分が増加していない。別府温泉全体についても、現在までのところ海水浸入の明かな範囲は図1の静止水頭がほぼ2m以下の範囲に限られており、これは(4)式から計算した淡塩水境界面までの深さが53m以内の範囲となる。それより静止水頭の高い地域では、(4)式から塩水領域と推定される深さから収水している井戸でも塩分はあまり大きくなくてほぼ0.3g/l以下であることに注意され、本報告第10号に述べたように、別府温泉への海水浸入の機構についての問題を与えている。

以上のように(a)、(c)両地域では、今回の水頭測定をまたずして実際に採湯がしにくくなったと云う事実がはっきりしてきて、共にポンプ揚水を行う井戸が増加している。別府温泉が非常に井戸密集度が高いにもかかわらず、現在までのところ全体としての温泉水圧の低下があまり著しくないのは、その多くが自噴のまままでゆう出水位がほぼ地表でおさえられていたと云うことが大きい原因ではないかと考えられるが、一部の次第にポンプ揚水が増加して来た地域で静止水頭の低下が大きいと云う事実は今後警戒を要する点である。もちろん、これ等の地域でも水頭が低くなり温泉利用がむずかしくなったために己むを得ずポンプを用いるようになったには違いないが、その揚水により更に水頭の低下速度が増す可能性は大きく、特に海門寺温泉脈(鎖線(2))以北では、透水層の自然的性質として他よりも採湯のしにくい地域ではないかと推定される点もあり注意が肝要である。

以上二つの水頭低下域に対し、(b)の田の湯温泉脈に沿う地域の状態は異なっていて、上流部では従来から静止水頭が地表より低いためポンプが用いられているが、それより下流の静止水頭が10m以下の地域では、現在でも尚多くは自噴状態にある。この地域では前回の静止水頭分布が求められる以前からゆう出孔が密集してきて、その地域的なゆう出量も別府で最も多い範囲とされてきており、他地域にくらべて近年特に採湯が活発になったとは云えない。又、ずっと上流部の静止水頭が15m以上の範囲ではほとんどの井戸がポンプ揚水をしているが、その附近での静止水頭はあまり大きく

図3

1960年と1938年の両静止水頭分布の比較



は低下していないことが見出される。図2中に、1938年に得られている静止水頭の勾配を記入すると、海門寺温泉脈(鎖線(2))に沿っては水頭の違いは最大1m程度以内であり変化がないと見られるに対し、(b)地域に属する鎖線(1)に沿うては水頭低下が著しく、特に海岸から700m以内の自噴井密集地域でその低下が大きくほぼ2mにも及ぼうとしている。この附近での地域的なゆり出量は既に1924年の調査時に100平方あたり200~400立を示しており1949年の調査時よりもむしろ多いぐらいであって、採湯量の増加による水頭低下が主原因であるとも考えられぬから、この(b)地域の水頭低下には他の理由を求めねばならない。図3から見ると、この(b)地域は比較的南北に狭くいわゆる田の湯温泉脈に沿う井戸の最も密集している地域で、1938年の水頭分布図に示された等静止水頭線の海方向への突出部の範囲にほぼ限られている。この地域では比較的浅くて自噴井が得られるから、現在でも井戸管には竹を用いたものが多く、特に1938年以前には静止水頭の実測に適しない井戸がほとんどであった。図3中に1938年の分布図を得る際に静止水頭の実測された井戸の位置を黒円で記入したが、この(b)地域にはそのどれもが属していない。したがって、前回この地域の静止水頭はゆり出量などを基にして(3)式から計算により推定された値のみで、其と今回調査されたような実測静止水頭との間に違のあることも考えられる。もちろん、今回の測定もこの地域では数が少く、又、前回水頭を推定した井戸とはその深度も異っていてははっきりした断定は出来ないが、今後、このよ

うな調査がくり返される場合に、常に静止水頭の実測値にもとづいて比較する方がより安全にその間の温泉水圧の変動をうかがうことが出来る。

6 ゆり出量と水頭との相関

かって、ゆり出量と水頭との間に(1)式の比例関係が成立しているとして、多くの実測例につきcの値が求められているが、今回の測定資料を用いたcの値が其とどのように違っているかをうかがうことは興味がある。今回の調査は水頭の実測のみで自噴井のゆり出量は測られなかったため、1959年に大分県が行った別府温泉の総調査(4)の時に観測されたゆり出量の資料を合せて用いることにした。もちろん、その測定時が異なるためかなりの誤差も予想されるが、特に潮汐影響の大きいと思われる海岸から約400m以内の井戸を除き静止水頭H、ゆり出量hとゆり出量qならびに井戸断面積aの測られている46孔につき(1)式からcの値を計算したところ、1.7から76.2(min⁻¹)の間で相当の散らばりはあるが、其を単純平均して19.97(min⁻¹)の値を得る。

又、今回の調査のさい、ポンプ揚水を行っている井戸でポンプを停止してからの井戸水位上昇速度を測定し、(2)式の関係にあてはめてcの値を求めたものが12孔あり、その値の平均は18.45(min⁻¹)となる。この両者の平均値が大體等しいと考えられるほどよく似ていることから、自噴井についてその前年に測られたゆり出量を用いたことが非常に違った結果を与えているとも考えられない。そこでこの両者を一語にした56孔につき平均値を求めれば、19.66(min⁻¹)となり、そ

の散らばりの程度を示すため、次表に c の値の各範囲に属する井戸数を示すが大体 5 から 30 (min^{-1}) の範囲にあるものが多く、平均値 19.66 をその代表的な値として用いても差支えない場合が多いであろう。

表 1 c の値の分布

c (min^{-1})	0 ~ 5	5 ~ 10	10 ~ 20	20 ~ 30	30 ~ 40	> 40
井戸数	4	11	20	16	3	4

第 2 節で述べたように、瀬野は別府市街地温泉 40 孔で 1933 年から 1938 年までの間にいろいろな方法で調べられた c の値が 0.76 から 71.6 (min^{-1}) の間に散らばりその平均値として 20.0 (min^{-1}) が求められることを示して居り、其と今回の結果とをくらべると驚くべきほど一致した結果が得られたこととなる。この c の値にはいろいろな要素の影響することが考えられ、井戸自身の性質や透水層の自然的な性質のほかはその附近の井戸の密集度にもかなり影響されるが、現在の資料では c の値の地域的な分布を得るには至らなかった。又かつて瀬野は c の値が井戸掘さく後の年数 t により $c = c_0 e^{-0.81t}$ の形で減衰してゆくことを示したが、今回は資料数が少いためかそのような傾向を見出せなかった。この関係によると、掘さく後の年数 t による効果が非常に大きく、 c の値は 5 年たてば $\frac{1}{54}$ 、10 年たてば $\frac{1}{3300}$ にまで減少することとなる。1938 年に水頭分布を得る際の静止水頭の推定では (3 式の c_0 の値として 20.0 (min^{-1})) を用いたが、今回得られた 19.96 (min^{-1}) と云う値は経過年数 t の効果も加わった状態での c の値の平均値であり、比較的古い井戸の多い田の湯温泉脈上での静止水頭の推定値にこういう点からの違いが入って来て前分布図の等静止水頭線に突出部が現れたのではないとも考えられる。ともかく今回とほぼ変りのない値が得られたことは、別府市街地温泉でのゆう出量と水頭との間の関係を考察する場合の比例常数 c の値として、ごくあらつぽい意味ではその平均値として 20.0 (min^{-1}) が用いられることを示す。

7 結 び

別府市街地の温泉 129 孔につき静止水頭を測定し、大体全域にわたる分布図をつくつた。その測定に当っては、他の井戸からの採湯の状態は出来るだけ変えずに測定井戸のみのゆう出を止めて測つたから、全地域の井戸からの採湯の影響がすべて加わった状態での静止水頭の値が得られている。之を 1938 年に求められた分布と比較すると、全体としての傾向にはあまり大きい違いはないが、1 m 以上静止水頭の低下している地

域が相当広く地域的にかたまつて存在していることが見出される。一部で 1 m 以上高くなつた地域があるが其はごく小範囲であるため、その附近一帯の温泉水圧の変動とするほど明瞭ではなく、又 1 m 以下の違いについては、季節的变化の影響なども考えられてその原因が複雑なため、ここでは 1 m 以上の低下域のみを議論の対象とする。全体として上流部では静止水頭の低下が少なく、浜脇から関西汽船棧橋附近にかけてと、北部埋立地から弓ヶ浜附近にかけての両地域の海岸部で水頭低下が明かであり、之等の地域では既に自噴が困難となりポンプが多く用いられるようになっている。この附近ではもともと静止水頭と地表との差が少かったから、井戸数が増して温泉水圧が次第に減少すると特に干潮時には自噴による採湯が困難となりポンプ揚水が行われるようになって、そのためさらに静止水頭の低下が著しくなったものと思われる。

一方、田の湯温泉脈に沿つても静止水頭の低下が明かに示されており、かつて温泉脈の特長の一つとしてあげられていた等静止水頭線の海方向への突出部が見られなくなった。この原因がはたして採湯量の増加のような人工的な影響かどうかには問題がある。1938 年の水頭分布を得る際に、この地域での井戸の静止水頭は実測出来ず、ゆう出量から計算で推定を行ったものだけであるから、その推定に用いた常数の値に誤差を含んでいることも考えられる。

以上のような静止水頭の変化が行われた結果、今回の分布では、比較的变化の少かった海門寺温泉脈上の水圧の高いことが目立って来て、そこから南北に向い温泉水の供給が行われているような傾向が得られた。

一般に、温泉地域でのゆう出量・温度や化学成分には往々大きい変化が起り、その原因が自然的なものか又は人工的な影響かを考察しなければならぬ場合がある。それらの変化の多くは地層内の温泉水圧の変化に伴つた現象であるが、例えば別府温泉のような自噴井の多い地域で長期間にわたつての自噴量の変化を考へる場合に、自噴量にはその井戸のゆう出水位の変化はもちろん、井戸の収水部分や内部の状態の変化がかなり影響して来て、必ずしも地下透水層内の温泉水圧の変化に起因するとは云えないことがある。このような場合には、直接に温泉水圧の変動状態を調査することが望ましく、井戸でゆう出をとめて測定される静止水頭はそのままその温泉水圧を示すものであるから、その井戸管が破れないかぎり長期間をへだてての比較に用いる資料として最も適当と考えられる。

別府温泉では、近年次第に井戸管がビニールや鉄の丈夫なものにおきかえられて来て静止水頭を測定する

のに便利となって来たから、今後、採湯量の増加に伴う温泉水圧の低下状態をさぐるとか、温泉利用の計画をたてる場合の資料として、静止水頭の観測が重要な意味を持ってくるに違いない。例えば、自噴井で掘さく終了直後に必ずその静止水頭を測定しておくとか、又、各小地域毎で代表的な静止水頭観測井をきめて定期的な測定をくりかえすなどの方法も考えられる。

以上の調査の準備や整理には森忠敬、日高敏子の両氏にお世話になり、観測には山下幸三郎氏の助言を得た。共にあつく感謝をささげる。

参 考 文 献

- (1)野満隆治・瀬野錦蔵・山下馨：別府温泉の湧出量と水頭との相関、其の一、層状泉、地球物理 2 巻 3 号、PP.260—279
- (2)瀬野錦蔵：別府市街地の温泉水頭分布。地球物理

2 巻 3 号 PP.280—290

- (3)野満隆治・山下馨：別府旧市内の地中温度分布と温泉脈、地球物理、2 巻、3 号、PP.233—258
- (4)矢野行雄：別府旧市内温泉現況調査(1)、大分県温泉調査研究会報告、10号、PP.40—43
- (5)瀬野錦蔵：旧別府市街地の水準測量、地球物理、2 巻、2 号、PP.127—131
- (6)野満隆治・瀬野錦蔵・中目広安：別府温泉と潮汐附気圧効果、地球物理、2 巻、1 号、PP.1—23
- (7)吉川恭三・軽部末蔵：別府温泉の Cl 量分布の変動について、地球物理、8 巻2—4号、PP.55—63
- (8)瀬野錦蔵・吉川恭三：別府市内温泉の化学成分長期変化に関する調査報告、大分県温泉調査研究会報告、10号、PP. 15—24

自噴井群における揚水の影響について

京都大学理学部 山下 幸三郎

1 まえがき

地下水や温泉の優勢な地域の開発により多くの自噴井を持つ地帯において、新しく井戸を設置すると周辺の既設自噴井の湧出量が減少する。この場合新設井の自噴による周辺の被圧地下水圧の低下状態、周辺自噴井の湧出量の減少程度如何、又この現象が地層内部の物理的状态の如何なる機構によるかを知ることは自噴井地帯の開発にとって主要であり、興味ある地球物理学的研究の対象である。従来の揚水試験の公式によると、この問題の取り扱い是非常に複雑となり、実際面への利用は困難である。とくに自噴井が多い別府温泉など、近時新温泉の穿掘、増掘、浚渫が盛んであり、各地でも新温泉の探査、開発が行なわれ、温泉の採水量の増加を行ないこれらの実施により既設温泉の自噴停止や、泉温降下等の影響が現われ、これに対する研究は温泉の保護利用上重要な問題になりつつある。

別府旧市内温泉は南北約3.2km、東西約1.4kmの範囲にわたって700口以上の温泉井があり、そのほとんどが自噴井であって、最も密集した地域では100m平方内に約30口の自噴井がある。

京都大学地球物理学研究所は創設以来この地域の温

泉について各種の調査研究を行ない、多数の成果が地球物理学研究所報告に発表されているが、揚水の影響については土生博士の観測⁽¹⁾による資料があるのみである。

温泉の相互影響を研究する一つの方法として、筆者は1949年以来別府旧市内温泉群中の各所において多数の揚水試験を行なった。それらの結果はすでに数回にわたって報告したが、本論文ではこれらの揚水試験の結果見出された興味ある事実、たとえば、揚水の露響に地域的な特長があること、揚水による周辺温泉の湧出量の減少量と温泉口の密集度との間に特異な相関関係があることなどを説明し、これに理論的検討を加えて揚水試験の結果を意味づけ、上記諸問題の研究に資したと思う。

2 別府旧市内温泉の概況

別府旧市内温泉の所在地、泉温、湧出量、深度、口径等の一斉調査は過去4回^(4,5,6)行なわれ、その結果温泉の地理的分布、湧出量、泉温、深度等の分布が明らかにされた。第1表はその統計結果である。

温泉の分布(第1図)を見ると、市の中央部にそって海岸から西部山の手にわたる温泉密集地帯がある。

第1図

別府旧市内温泉分布図



第1表 別府旧市内温泉の概況

調査年月	活動口数	平均深度	平均泉温	平均湧出量	総湧出量
1924年8~9月	741	47m	53.74℃	12.88 ℓ/min.	9.54m ³ /min.
1933 7~8	702	69	54.50	16.09	11.33
1949 7~8	653	82	52.35	18.09	11.81
1959 2~3	713	99	52.30	14.09	10.04

往時この地帯には自然湧出温泉が各所において、温泉開発はこれを中心として進められた。温泉数の増加と共に自然湧出温泉は減少したが、現在なお数口ある。

穿掘深度は西部山の手地域が浅く、海岸に近づくにしたがって深くなり、また中央部温泉密集地帯で浅く南北に遠ざかるにしたがって深く、とくに北部では300mの深さに達するものもある。

穿掘深度は時と共に増深し、その平均値は1959年には1924年の2倍以上の深度になっている。また30m以浅の温泉数は、1924年には全口数の18.3%であったが1933年には8.6%、1949年には8.9%、1959年には僅か1.2%にまで減少している。

総湧出量は1924年が最も少ない。これは恐らく温泉開発が充分でなかったからであろう。湧出量は雨量との関係が主であり、雨量の多い時は湧出量も多い。長年の観測資料の統計によると、その年変化は雨期の9月に湧出量が最も多く、4月に最も少ない。その変化量は約20%である。これを考慮に入れても総湧出量は1933年以降はほとんど変化していない。然し乍ら活動口数に増減があり、穿掘の平均深度は30m増加し、深部の温泉水層が開発せられたにも拘わらず総湧出量が増加しないことは地下温泉水層の構造、湧出機構の解明に注目すべき事実である。

3 揚水試験の方法

新しい温泉の穿掘湧水が既設の温泉の湧出量におよぼす影響を調べることは実行がむずかしい、これと最も近い状態を知るのには既設温泉の揚水試験である。揚水試験では調査対象である地下水層に揚水井、観測井があれば最も都合がよいが、別府旧市内にはすでに多数の温泉井があり、これを利用し、つぎの二つの方法によって周辺温泉井の湧出量、泉温の変化を測定した。

1. 既設温泉にポンプを設置し過剰揚水する。
2. 既設温泉の湧出を停止させる。

一般に湧出量の微小変化の測定は水圧の測定に比べて困難であり、また温泉井のほとんどが個人所有であるため湧出口の構造、保護施設の状態、分湯施設の如何によって測定方法が制約せられる場合がある。温泉井の多い地域ではそのすべてを測定することができないので、観測井はできる限り正確に、かつ容易に測定で

きるものを選んだ。

揚水量は多量なほど揚水温泉の水圧低下も大きく、したがって周辺温泉の湧出量の減少も大きいから、その測定が容易であるが、温泉井の口径(直径5cm以下)泉温、温泉水層の性質、ケーシングの種類、その新旧による強度の相違によって揚水量の制限を受ける。あるときは過剰揚水のため温泉導管を破損し遂に湧出が停止したこともある。実際に観測された過剰揚水量は120~20 ℓ/minであった。

揚水継続時間は長いほどよいのであるが、長時間の揚水では降雨影響、気圧影響等が大きく現われて解析が困難になる恐れがあり、さらに温泉所有者の了解が得られない事情などもあって、2~6時間におさえたしかし実際行なった結果によると、温泉が被圧水であるから2時間位でほぼ定常状態に達する。(第3図参照)揚水の影響が揚水井を中心としてどの辺まで及ぶかは不明であったから、まず揚水井から100m以内の温泉について測定した。100m以遠の測定で影響の及ぶ場合もあったけれども多くはほぼ適切であることが判明した。

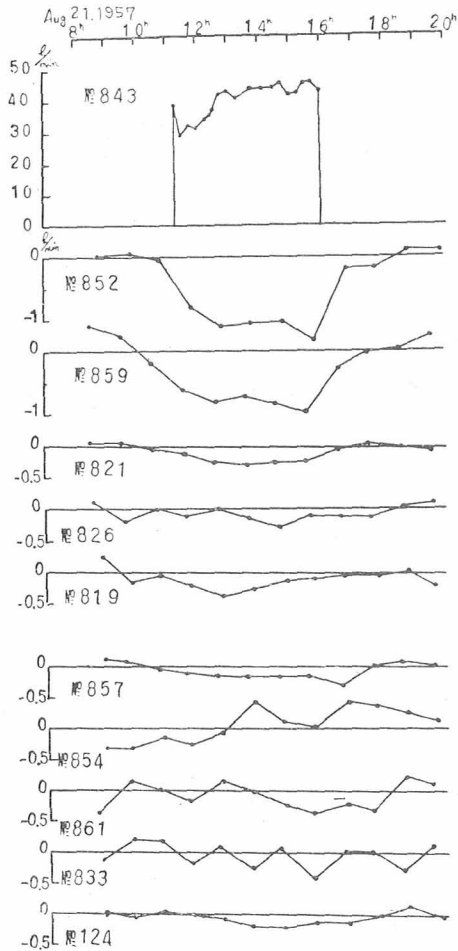
4 揚水試験の結果の解析

揚水試験は第1図に示す21ヶ所において行なったが揚水量が少ないこと、観測井の分布が一様でなく揚水井の近距離に観測井がないこと、あるいは揚水温泉水層の性質などによって影響が明らかでないものや、解析に十分な資料が得られなかったものもある。

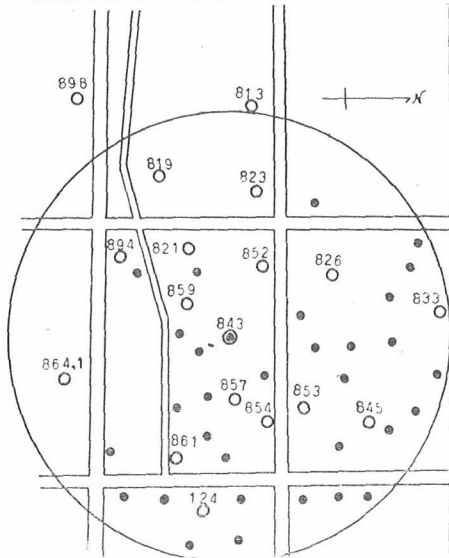
別府旧市内温泉はその殆どが海洋潮汐の影響を受けるので揚水による湧出量の減少が潮汐の影響と重合して不明確になる恐れがあるから、揚水試験に先だつて各観測井の潮汐の影響を観測し、この結果から揚水試験中のこの影響を推定してこれを除去した。これらの詳細の資料とその解析は別報告にゆずることとする^(8,9)

第2.3.4図は揚水試験の結果の一部を示したものであるが、周辺温泉の湧出量の減少量は揚水井から同じ距離にある温泉でも同一効果を示さず、著しい方向性を示すものや、あるいは揚水井からの遠近による大小関係の異なるものもある。これは温泉口の分布の不均一、温泉水層の構造即ち浸透係数の不均一などによる結果であると推定される。

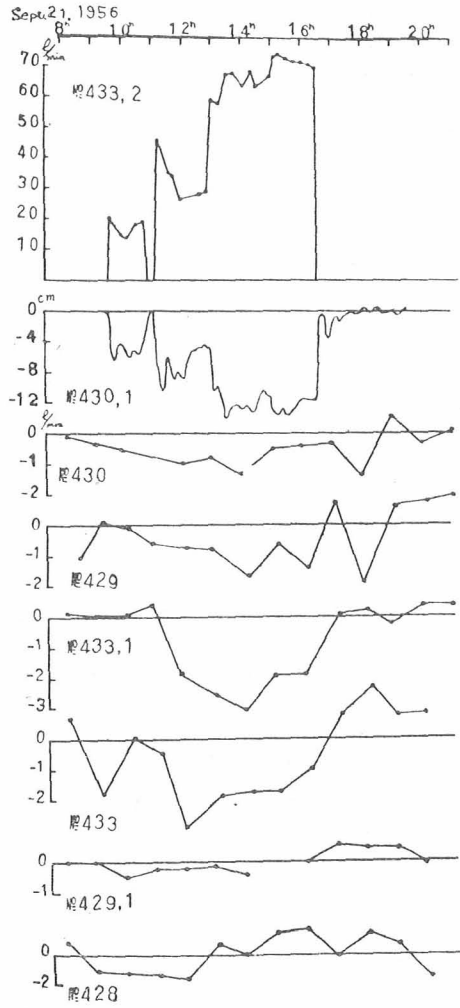
第2図A No.843揚井による周辺温泉の湧出量変化



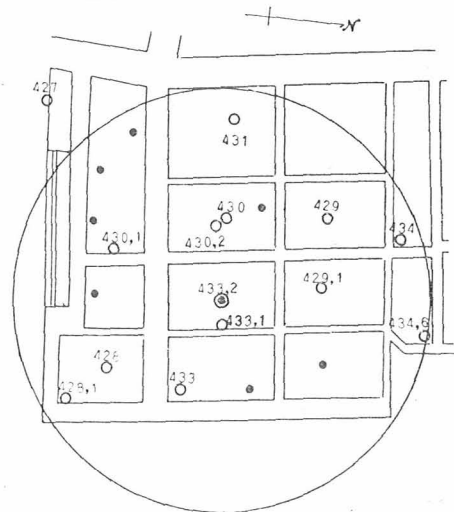
第2図B No.843揚水井周辺の温泉分布 (円の半径100m)



第3図A No.433-2揚水による周辺温泉の湧出量変化

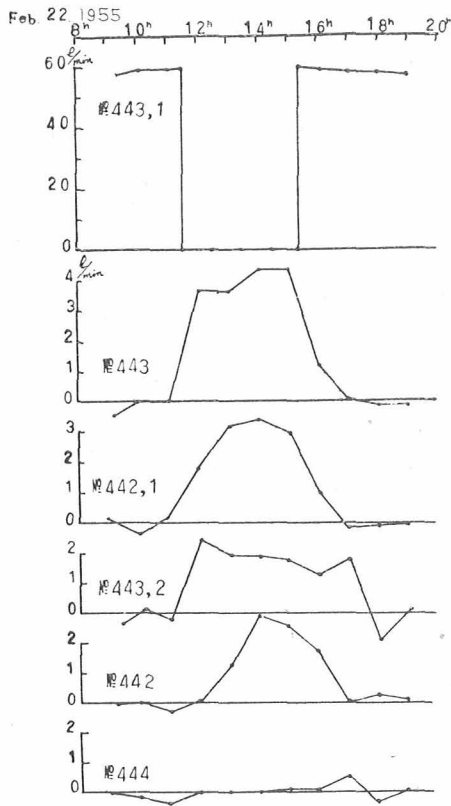


第3図B No.433-2揚水井周辺の温泉分布 (円の半径100m)



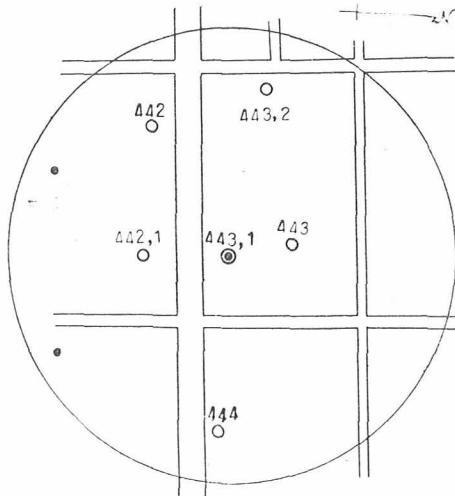
第4図A

No.443-1揚水による周辺温泉の湧出量変化



第4図B

No.443-1揚水井周辺の温泉分布 (円の半径100m)



地下水層の地質的構造については、過去の温泉ボーリングから多くの資料が得られているが、その

資料の不完全のためか温泉水層の広範囲にわたった同一透水層の連続するというような地層関係は検出されてない。全般的にみると深部程温泉水圧が高く、かつ高温である。前述した温泉の推移状態から見て温泉水層は不透水層によって互に完全に遮断されているのではなく、その間に交流があるものと思われる。

揚水試験から得られた揚水の影響の地域的な相違や揚水温泉水層の相違による揚水の影響の大小を比較するために、各揚水試験における揚水量を一定にした場合、揚水井から一定の距離における仮想温泉の湧出量の減少量を計算した。各揚水試験でどこでも同一距離に観測井があるというわけには行かないから、各試験において最も正確に減少量が決定できる距離として揚水井から40mの地点を選んだ。

湧出量の減少量の決定は前述のように方向性のあるものもあって、その選択方法によって幾分の違いが生ずるであろうが、ここでは観測されたもののうちその影響が明確であるものを用いて決定した。

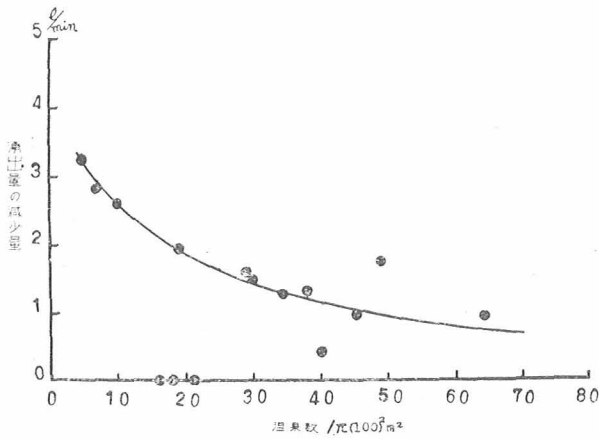
揚水量 50 l/min. に対する減少量を比較すると揚水井の周辺に温泉井の少ない地域では減少量が大きく、温泉井の密集した地域では減少量が小さい。この関係を一層明らかにするには揚水井周辺の温泉密集度を定めなければならない。しかし温泉の分布は不均一であって、揚水井からどの範囲の温泉を取るかその決定方法によって異なる値が得られるであろうが、揚水試験の結果から揚水量が 50 l/min. 程度ではその影響がほぼ 100m 程度で、不明瞭になることがわかっているから揚水井から 100m 以内の温泉口数、またはこの口数から求めた単位面積 (m²) の井戸数をもって密集度を表わすことにした。

こうして得られた温泉密集度と揚水による湧出量の減少量との関係を図示すると第5図のようになる。広範囲の自噴井地帯で地域的に揚水温泉水層の深度も異なり、したがって揚水温泉水層の構造性質にも相違があり、揚水の影響に幾分の相違があるのは当然であるが、実測の結果は全体的にみて口数の少ない地域では減少量が大きく、口数が多くなるにしたがって漸次減少しており、揚水井周辺の温泉密集度との間に密接な相関関係が認められる。

5 一様な滲出がある地下水層の揚水影響

地下水層からそれに掘られた多数の自噴井によって水の流出があるか、あるいは地下の不透水層が不完全で他層への滲出または他層からの浸入がある場合、この水層に新たな井戸を掘って揚水すれば揚水による水圧降下によって周辺自噴井の湧出量は減少し内部の滲出、浸入量も変化し、したがってこれらの水量変化

第5図 湧出量の減少量と温泉密集度との関係
(揚水量50 ℓ/min, 揚水井から40mの地点)



の如何によって揚水による水圧降下の様相も変わってくるであろう。

一般に井戸揚水に関する理論的考察は Thiem および Theis-野溝の理論によってなされているが別府のように多数の自噴井があり、しかもその分布が不規則であり、また内部温泉水層間に滲出や浸入が予想される場合に適用するには適当でない。

地下水層から層外に水の滲出がある場合の揚水に関する考察は速水、国司および Hantush, Jacob の諸氏による研究があり、その滲出が簡単な関係で示される場合、例えば地下水層の到る所で一様な滲出があり、その滲出水量が揚水地下水層の水圧変化に比例する場合その非定常流の解が求められている。自噴井からの流出を全面的な滲出と考えて取り扱ひ得るか否かは十分検討を要する問題であるが不連続的な分布を連続的な分布で近似する方法は広く用いられており、また前記の実験結果はその可能性を示唆しているようである。

地下に無限に広い被圧水層があって、この水層に多くの自噴井が一様に分布しているものと仮定する。この水層に新たな井戸を掘って一定量の揚水または注水を長時間行ない、地下水流動が定常状態になったとすれば揚水前の水圧に対する変動水圧の分布は次式で表わされる。

$$T \left(\frac{d^2 p}{dr^2} + \frac{1}{r} \frac{dp}{dr} \right) - f(N)w(p) = 0 \dots (1)$$

ここに T は揚水層の滲透係数、P は地下水圧の変動、r は揚水井からの距離、f(N)w(p) は自噴井を通じて水系外への水の滲出量である。

滲出量 f(N)w(p) は主として単位面積中の自噴井の口数 N に関係する量 f(N) および地下水圧の変動に関

係する量 w(p) によって定まると見てよいであろう。

野溝、瀬野、山下は別府旧市内温泉の多数の温泉井について、その湧出水位を変化させ湧出量を測定した結果、次式が成立することを発見した。

$$\Delta q = c(p - p_g) \dots (2)$$

ここに Δq は湧出量の変化量、p は q=0 なる時の温泉水頭の変化量、p_g は湧出水位の変化量、c は湧出口の口径、温泉水層の性質に關係する定数である。

自噴井では一般に湧出水位は一定にしてあるから湧出量の変化量 Δq は

$$\Delta q = cp$$

すなわち自噴井の湧出量の変化は温泉水層の水圧変化に比例する。したがって揚水による地下水温泉水層の降下量を s とすれば (1) 式の W は

$$W(p) = -c\rho g s$$

滲出水量は N が大きくなれば多くなるが N は r に無関係で一様であるとして cf(N) = b とすれば (1) 式は次のようになる。

$$\frac{d^2 s}{dr^2} + \frac{1}{r} \frac{ds}{dr} - \frac{b}{T} s = 0 \dots (4)$$

境界条件として

$$r \rightarrow \infty \quad s = 0 \dots (5, a)$$

$$r \rightarrow 0 \quad -2\pi r T \frac{ds}{dr} = Q \dots (5, b)$$

とおく

(4) 式は変形された零階の Bessel の微分方程式でその解は

$$s = AI_0 \left(\sqrt{\frac{b}{T}} r \right) + BK_0 \left(\sqrt{\frac{b}{T}} r \right) \dots (6)$$

ここに I₀(x), K₀(x) は第 1 種および第 2 種零階の変形された Bessel 函数である。

境界条件 (5, a) によって A = 0

$$\text{また (5, b) から } \lim_{r \rightarrow 0} \left(-2\pi r T \frac{ds}{dr} \right) = 2\pi T B = Q$$

$$\therefore B = \frac{Q}{2\pi T}$$

故に (4) 式の解は

$$s = \frac{Q}{2\pi T} K_0 \left(\sqrt{\frac{b}{T}} r \right) \dots (7)$$

また一方 (2) 式の結果は揚水量を変化させた時の井戸壁における水圧変化と揚水量の変化の關係を示すものと解される。井戸壁の水圧降下量について (7) 式の

$$\sqrt{\frac{b}{T}} \text{ および井戸半径、} r_w \text{ が小なる時は } -2\pi r T \frac{ds}{dr} \Big|_{r=r_w} = Q$$

と見做されるから Δq なる揚水を行なったときの井戸壁における水圧降下量 s_w は (7)式の r を井戸半径 r_w と置いて近似的に求められる。

別府旧市内温泉では、 $2r_w$ は $0.038\sim 0.050m$ で、その平均値は $0.045m$ であり、又後述の如くこの結果より求められた $\sqrt{\frac{b}{T}}$ は 0.1 以下であるから近似的に次式が成立するとみてよい。

$$s_w \doteq \frac{\Delta q}{2\pi T} K_0\left(\sqrt{\frac{b}{T}} r_w\right) \dots\dots\dots(8)$$

(2)式から $\Delta q = c\rho g s_w = Cs_w$

故に $C = 2\pi T/K_0\left(\sqrt{\frac{b}{T}} r_w\right) \dots\dots\dots(9)$

Q なる揚水により揚水井から r なる距離にある自噴井の湧出量の減少量を Δq_r とすれば

(2)式から

$$\Delta q_r = c\rho g s_r = Cs_r \dots\dots\dots(10)$$

故に (7) (9) (10)式から

$$\Delta q_r = Q \frac{K_0\left(\sqrt{\frac{b}{T}} r\right)}{K_0\left(\sqrt{\frac{b}{T}} r_w\right)} \dots\dots\dots(11)$$

$\frac{b}{T}$ がわかれば (11)式から一定揚水量 Q なる揚水を行なったときの定常状態における揚水井から r なる距離にある自噴井の湧出量の減少量 Δq_r が求められる。

$\frac{b}{T}$ は滲出の係数と揚水温泉層の滲透係数との比であるが、 $f(N)$ を求めるには $\frac{b}{T}$ が N と如何なる関係にあるかをみればよい。

第5図に示した揚水量 $50\ell/\text{min}$ の場合揚水井からの距離 $40m$ における仮想温泉の湧出量の減少量から(11)式を用いて $\frac{b}{T}$ の値を算出すると第2表の値が得られる

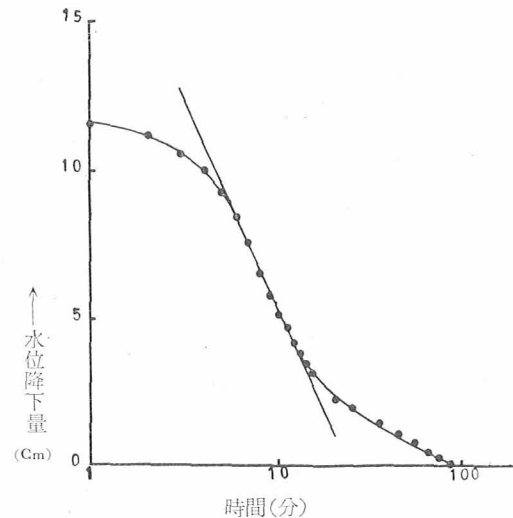
またこの $\frac{b}{T}$ は⁽¹⁵⁾Hantushによれば揚水開始後の揚水層の水圧降下、あるいは揚水停止後の水圧復元の時間的な変化が観測されている場合は、滲出のある地下水層の揚水試験における水圧降下の非定常流の解から図解的方法によって求めることができる。

No.433の2揚水において、これより $37m$ の距離にある同一温泉層に掘られた観測井No.430の2の自記水位記録が得られた。この記録から揚水停止後の時間 t と水位上昇量 s について t を対数にとり半対数紙上に t と s の関係を求めると第6図の如く成る。この曲線の変曲点に於ける勾配 m_1 およびその点の水圧降下又は上昇量 s_1 は理論的に次の如くなる。

第2表 揚水影響と滲出量に関する係数 (揚水量 $50\ell/\text{min}$)

揚水井番	半径100m以内の温泉数	揚水井から40mの地点における湧出量の減少	$b/T(m^{-2})$
433の2	19	1.96	1.01×10^{-3}
434の18	10	2.60	0.69 "
368	18	—	—
1186	16	—	—
19	34	1.30	1.65 "
443の1	7	2.85	0.59 "
536	21	僅少	—
448の2	5	3.25	0.48 "
331の2	40	0.43	4.10×10^{-3}
44	38	1.35	1.63 "
52	29	1.63	1.27 "
843	45	1.00	2.12 "
694	30	1.53	1.36 "
769	64	1.00	2.12 "
221の1	49	1.80	1.13 "

第6図 No.433の2揚水停止後のNo.430の2の水位変化



$$s_1 = \frac{Q}{4\pi T} K_0\left(\sqrt{\frac{b}{T}} r\right) = \frac{1}{2} s_m \dots\dots\dots(12)$$

ここに s_m は揚水開始後地下水流動が定常状態に成った時の水圧降下量である。

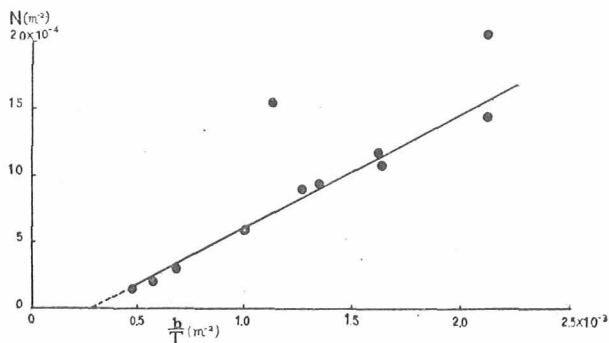
$$m_1 = \frac{2.3Q}{4\pi T} \exp\left(-\sqrt{\frac{b}{T}} r\right) \dots\dots\dots(13)$$

(12) (13)式から

$$f\left(\sqrt{\frac{b}{T}} r\right) = K_0\left(\sqrt{\frac{b}{T}} r\right) \exp\left(\sqrt{\frac{b}{T}} r\right) = 2.3 s_1 / m_1 \dots\dots\dots(14)$$

No.433の2の揚水における揚水停止後の水頭の回復

第7図 滲出に関する係数と温泉密集度との関係



状態を示す第6図から s_i, m_i を求めると

$$s_i = 0.059\text{m} \quad m_i = 0.135$$

(14式)の s_i, m_i に上記値を代入すると $f\left(\sqrt{\frac{b}{T}} r\right) = 1.005$

となり、これに対応する $\sqrt{\frac{b}{T}} r \doteq 1.3$ となる。

$r = 37\text{m}$ であるから $\frac{b}{T} = 1.23 \times 10^{-3} (\text{m}^{-2})$

第2表による値は $1.01 \times 10^{-3} (\text{m}^{-2})$ で両方法による値は略等しい。

第2表の $\frac{b}{T}$ の値とこれに対応する揚水井周辺の温泉密集度との関係を図示すると第7図のようになって、求められた点はほとんどが直線上に配列し、 $f(N)$ は N の一次関数であることがわかる。

各揚水井は地域的な関係、あるいは深度の違いによって T が異なるであろうし、また温泉分布は不均一であり、周辺温泉がすべて同一層からの湧出であるかどうかは明確でないが、実測の結果滲出に関する係数と温泉密集度との間に明瞭な一次関係が見られたのは注目すべきことである。これは(1)式の妥当性を示すものであるが、その物理的根拠は揚水の影響が本質的には拡散現象であることによると思われる。

これら観測値のうちとくに例外を除くと両者の関係は

$$\frac{b}{T} = 1.20N + 2.84 \times 10^{-4} \dots (15) \quad \frac{b}{T} (\text{m}^{-2})$$

と求められる。

上式によると N が零になっても $\frac{b}{T}$ は零にならない。

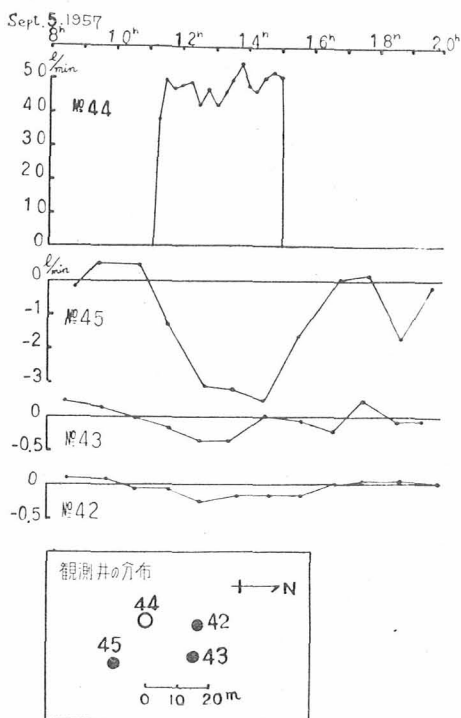
このことは密集度の減少に伴う近似度の低下にも起因するかも知れないが、その要因は自噴井によらない滲出、すなわち地下における揚水層から他層への滲出の減少、他層から揚水層への浸入の増加によると考え

られ、 $N=0$ における $\frac{b}{T}$ の値はその滲出

に関する係数を表わすものとみられる。以下これを内部滲出に関する係数とよぶ。これに対して、自噴井に依存するものを外部滲出に関する係数、両者を合せたものを単に滲出に関する係数とよぶことにする。

このように揚水層の水圧降下による浅部温泉水層への滲出の減少、あるいは深部温泉水層からの浸入の増加など、別府旧市内温泉の温泉水層間には交流があると考へられる。このことは温泉 No.44(深度150m、泉温 55.8°C)の揚水においてNo.42(深度91m、泉温 47.0°C)、No.43(深度108m、泉温 46.5°C)に明らかに揚水影響が現われていることからもうかがわれる。(第8図参照)

第8図 No.44揚水による周辺温泉の湧出量変化



周辺に温泉口数の少ない温泉 No. 443の1(湧出量 60.25 l/min.)の湧出停止によるNo.442の1(揚水井からの距離39m)における湧出量の実測増加量 Δq は 3.60 l/min. であるが、これを温泉密集度から(11)、(15)式によって算出すると $\Delta q = 5.48 \text{ l/min.}$ となって計算値は実測値より可なり大きくなる。いま計算値が実測値に一致するような $\frac{b}{T}$ の値を求め $\frac{b}{T}$ と(15)式とを同

一にすると(15)式の常数項が得られる。すなわち内部滲出に関する係数の値は $3.19 \times 10^{-4} (m^{-2})$ となる。このように内部滲出に関する係数の値は場所によって異なるものと思われるが、それは温泉水層の構造に予想される地域差から当然期待されることである。内部滲出に関する係数の分布は温泉水層の構造研究に有力な手がかりを与えるであろう。

以上述べたように別府旧市内温泉の各所における揚水試験の結果、自噴井からの湧出を揚水層からの全面的な水の滲出と見なして、その滲出量に関する係数と揚水井周辺温泉の密集度との関係式 (15)式が求まり、揚水による周辺温泉の湧出量の減少量を求める関係式 (11)式を導きだすことができたのであるが、両者を組み合わせると

$$\Delta q_r = Q \frac{K_o(\sqrt{1.20N + 2.84 \times 10^{-4} r})}{K_o(\sqrt{1.20N + 2.84 \times 10^{-4} r_w})} \dots\dots (16)$$

ここに $\Delta q_r (\ell/min.)$ は揚水井より r の巨離にある温泉湧出量の減少量、 $Q (\ell/min.)$ は揚水量、 N は揚水井周辺温泉の密集度、 $r_w (m)$ は温泉口の半径、 $K_o(x)$ の値は函数表から容易に求められる。

6 地域的な揚水影響の特長

前述のように揚水による周辺温泉の湧出量の減少量は揚水井周辺温泉の密集度から (16)式によって求められるのであるが、その詳細な点については地域的に揚水井周辺の温泉分布が不均一であって N を温泉の密集度と見なすことができない場合もあり、また地下構造の相違によって内部滲出に関する係数が一定でない場合もあって、揚水の影響は揚水井を中心とした同心円上で同量の減少量を示さない場合のあることは前述の通りであるが、地域によっては揚水の影響に共通した特性を示すものがある。各所の揚水試験の結果をこの特性によって分類すると次表のようになる。

第3表 揚水影響の特長による分類

型	揚水影響の特長	揚水井番号
1	揚水影響に方向性のあるもの	694. 843 433の2 43の418. 52
2	同上方向性のないもの	443の1 19 769.221の1 331の1 44 448

第1型について

この内No.694, No.843の揚水試験においては揚水井の西方に著しい影響が現われた。この2口は近接しており、別府旧市内温泉群の西端に近いところにある。西方には温泉口が少なく、東方は温泉密集地帯である。このような揚水影響の現われる原因は主として温泉分布、

すなわち N の値の不均一によるものと思われる。

それで揚水井を原点として y 軸を南北にとり y 軸を境界として x の正負によってその滲出に関する係数が異なるものとする。 y 軸より西方すなわち $x < 0$ なる地域の滲出に関する係数を $\frac{b_1}{T}$ 、 $x > 0$ なる地域の滲出に関する係数を $\frac{b_2}{T}$ で表わすと揚水による水圧降下は次のように考察される。

$\frac{b}{T}$ が揚水井からの方向 θ によって変化する場合、揚水による水圧降下量 s は r, θ の函数であるから(4)式は次の形になる。

$$\frac{\partial^2 s}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial s}{\partial r} + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 s}{\partial \theta^2} - \frac{b}{T}(\theta) s = 0 \dots\dots (17)$$

上記のように $\frac{b}{T}(\theta)$ は境界線($x=0$)附近では大きな変化があるが、その他の地点では変化はないから、 θ に対する s の変化も境界線附近を除いては小さいと考へられる。このような地域における水圧降下量 s は近似的に(17)式の $\frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 s}{\partial \theta^2} \div 0$ とすれば(4)式と同一になり、次式によって表わされる。

$$s \approx \frac{Q}{2\pi T} K_o \left(\sqrt{\frac{b}{T}(\theta)} r \right)$$

したがって $y=0$ なる東西線上の水圧降下量は

$$x < 0 \quad S_1 \approx \frac{Q}{2\pi T} K_o \left(\sqrt{\frac{b_1}{T}} r \right) \dots\dots (18)$$

$$x > 0 \quad S_2 \approx \frac{Q}{2\pi T} K_o \left(\sqrt{\frac{b_2}{T}} r \right) \dots\dots (19)$$

(18) (19)式を前記2揚水試験に適用して揚水の影響を求めると第4.5表のようになり、これを図にしたのが第9.10図である。

2例とも西方($x < 0$)は実測値と計算値はほぼ一致しているが、東方($x > 0$)の観測井における減少量は計算値より小さい。このくいちがいはすでに述べた東方の温泉密集地帯における内部滲出に関する係数の相違に起因するものであろう。試みにNo.694揚水における $x > 0$ では(15)式の定数項、すなわち内部滲出に関する係数を $1.4 \times 10^{-3} (m^{-2})$ とすれば第9図の点線が得られ、実測値と計算値の差は減少する。

No.433の2, No.434の18, No.52はいずれも東部および北部の方向に著しい影響が現われる。この内No.433の2 No.134の18 (3図参照)は温泉群の東部海岸の埋立地にある。この地域は温泉口数は少ない。この地域の西部も温泉口数は少ないが高温多量の湧出をしている。海岸から東は海であって温泉は存在しない。第6表にみるように、この地域では東部および北部に行く

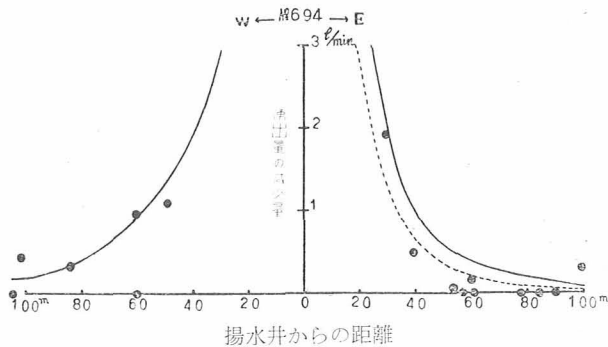
第4表 揚水井 No694 (揚水量 50 ℓ/min)

揚水井から西方 ($x < 0$) $\frac{b_1}{T} = 1.0 \times 10^{-3} (m^{-2})$				揚水井から東方 ($x > 0$) $\frac{b_2}{T} = 1.88 \times 10^{-3} (m^{-2})$			
観測井 番号	揚水井から の距離(m)	$\Delta q_r (\ell/min)$		観測井 番号	揚水井から の距離(m)	$\Delta q_r (\ell/min)$	
		実測値	計算値			実測値	計算値
635の1	49	1.10	1.53	717	30	1.93	2.00
695	60	0.97	0.87	709	40	0.49	0.98
690	84	0.33	0.36	791	60	0.16	0.40
689	72	0	0.56	740	100	0.33	0.06
692	102	0.46	0.19	715	95	0	0.07
685	102	0	0.19	744	82	0	0.13

第5表 揚水井 No843 (揚水量 50 ℓ/min)

揚水井より西方 ($x < 0$) $\frac{b_1}{T} = 2.30 \times 10^{-3} (m^{-2})$				揚水井より東方 ($x > 0$) $\frac{b_2}{T} = 3.60 \times 10^{-3} (m^{-2})$			
観測井 番号	揚水井から の距離(m)	$\Delta q_r (\ell/min)$		観測井 番号	揚水井から の距離(m)	$\Delta q_r (\ell/min)$	
		実測値	計算値			実測値	計算値
859	25	1.45	2.82	857	27	0.17	1.40
852	35	1.31	1.20	854	40	0	0.48
821	45	0.28	0.67	853	46	0	0.33
826	55	0.19	0.38	861	60	0	0.13
823	66	0	0.21	124	85	0.14	0.02
819	82	0.25	0.11	845	74	0	0.05
813	105	0	0.03				

第9図 湧出量の減少量と揚水井からの距離との関係



にしたがって泉温、湧出量共に低下し、また温泉水頭も低くなる。

したがってこの型における揚水の影響の方向性も前記の場合と同様の効果によって説明できるであらう。しかし温泉井の水頭、したがってその湧出量の分布に方向性があることはこの地域における温泉水層の構造ひいては内部滲出に関する係数の方向性を示唆しているが、今日の段階ではまだ資料が不十分で揚水効果の方向性を定量的に論ずることはできない。

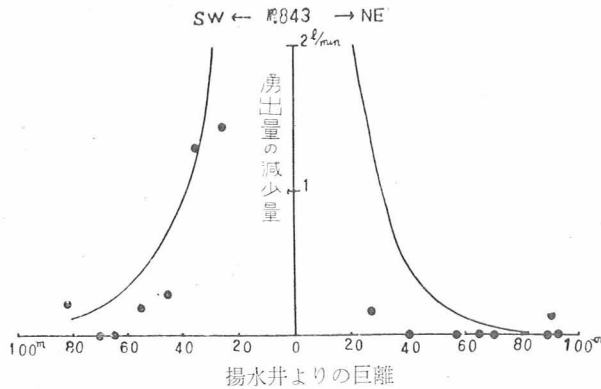
第2型について(第4図参照)

温泉群の中央部の地域ではその揚水の影響はいずれの方向にもほぼ同じ程度の影響が現われるか、或いは特定の温泉に著しく現われる場合がある。後者の場合揚水井周辺の温泉分布の不均一とは無関係である。温泉群の中央部ではどの方向にも温泉があり、その分布にも注目すべき大きな変動はないから、揚水の影響に方向性がみられないのは当然であると理解される。揚水影響に現われている不均一なならばは内部滲出に関する係数の局所的な不均一さ、あるいは揚水層と観測井の地下水層に相違があることなどに起因するものと思われる。

7 結論

別府旧市内温泉群中の各所において揚水試験を行なった結果、自噴井群中の揚水影響は自噴井の密集度と密接な関係があり、この関係は自噴井からの湧出を揚水層から全面的に水が滲出するものと仮定することによって十分の近似をもって取り扱われることがわかった。この方法によって観測値を整理して滲出に関する係数と揚水井周辺温泉の密集度との関係を導き、この温泉群に適用できる揚水影響の関係式を導きだすこ

第10図 湧出量の減少量と揚水井からの距離との関係



第6表

No433の2 揚水井周辺温泉の泉温および湧出量

南西部の温泉			北東部の温泉		
温泉番号	泉温 (°C)	湧出量 (ℓ/min)	温泉番号	泉温 (°C)	湧出量 (ℓ/min)
427	61.5	20.8	433の1	59.5	11.6
430の1	61.0	48.0	433	56.5	15.7
430	61.0	51.2	429の1	54.5	11.0
429	61.5	49.7	428の1	60.0	24.0
431	57.5	26.2	428	53.0	4.02
			432	55.0	4.00
			434の13	42.0	-

とができた。

1. 揚水による周辺温泉の湧出量の減少量は揚水量と周辺温泉の密集度から求めた滲出に関する係数の平方根に揚水井から周辺温泉までの距離を乗じたものを変数とする第2種零階の変形された Bessel 関数の値によって表わされる。

2. 滲出に関する係数と揚水井周辺温泉の密集度との関係は次式によって表わされる。

$$\frac{b}{T} = 1.20N + 2.84 \times 10^{-4}$$

b = 滲出に関する係数 (m⁻²)
 N = 揚水井周辺温泉の密集度 (m⁻²)

上式の右辺第1項は外部滲出に関する係数第2項は内部滲出に関する係数である。内部滲出に関する係数は単位面積の揚水層の水圧が単位量だけ変化した場合揚水層から単位時間に浅部の水層へ滲出する水量の変化と深部の水層から揚水層へ滲入する水量の変化との代数和を表わす尺度である。外部滲出に関する係数は同様な場合に自噴井を通じて外部に滲出する水量の変化を表わす尺度である。

3. 周辺温泉におよぼす揚水の影響は温泉井の密集度

るが方向によつて、内部における滲出量によって変化すつて揚水の影響に著るしい相違がある場合には一般に温泉の密集度の小さい方向に著るしい影響が現われる。

終りにのぞみ懇切なる御指導を賜つた速水頌一郎教授、瀬野錦蔵教授、有益なる助言を頂いた吉川恭三助教授、並に観測に終始御協力された京都大学地球物理学研究所員、大分県厚生部、別府市役所の関係諸氏に厚く感謝の意を表明したい。

参考文献

1. 上生片樟 別府温泉に及ぼす海セインの影響並隣接温泉の相関 地球物理第7巻第2号113頁1943
2. 瀬野錦蔵、山下幸三郎 別府温泉に於ける湧出量の相互関係について 大分県温泉調査研究会報告第1号 1頁 1950
3. 山下幸三郎 温泉湧出量の相互影響調査報告 第7号1頁, 第8号1頁, 第9号11頁
4. 京都大学地球物理学研究所 別府旧市内温泉概観 (I) 地球物理第1巻第1号 20頁 1937
5. 山下幸三郎 別府温泉の調査の結果について 大分県温泉調査研究会報告第1号 29頁 1950
6. 矢野行雄 別府市旧市内温泉現況調査 同上第10号 40頁 1956
7. 野満隆治、池田亮二郎、瀬野錦蔵 別府温泉湧養源としての雨量 地球物理第2巻第2号97頁1938
8. 野満隆治、瀬野錦蔵、中目広安 別府温泉の潮汐附気圧効果 地球物理第2巻第1号 1頁 1938
9. 山下幸三郎 温泉湧出量の相互影響調査報告 大分県温泉調査研究会報告第7号 1頁 1956
10. 京都大学地球物理学研究所 別府旧市内温泉概観 (II) 地球物理第1巻第4号 282頁 1938
11. 速水頌一郎、国司秀明 大阪市及び尼崎市に於ける地下水圧の変動と地盤沈下II 大阪港港湾技術調査会昭和27年報告 1953
12. M. S. Hantush and C. E. Jacob, Non-Steady Radial Flow in an Infinite Leaky Aquifer, Trans. Amer. Geophys. Union, vol. 36, No. 1, pp. 95-100, 1955
13. 野満隆治, 瀬野錦蔵, 山下馨 別府温泉の湧出量と水頭との相関 その一層状泉 地球物理第2巻第3号 260頁1938
14. 寺沢寛一 数学概論
15. M.S. Hantush, Analysis. of Data from Pumping Tests in Leaky Aquifer, Trans. Amer. Geophys. Union. vol.37, No.6, pp. 702-714, 1956

大分県庄内町阿蘇野に於ける温泉探査報告

山下 幸三郎

1 緒言

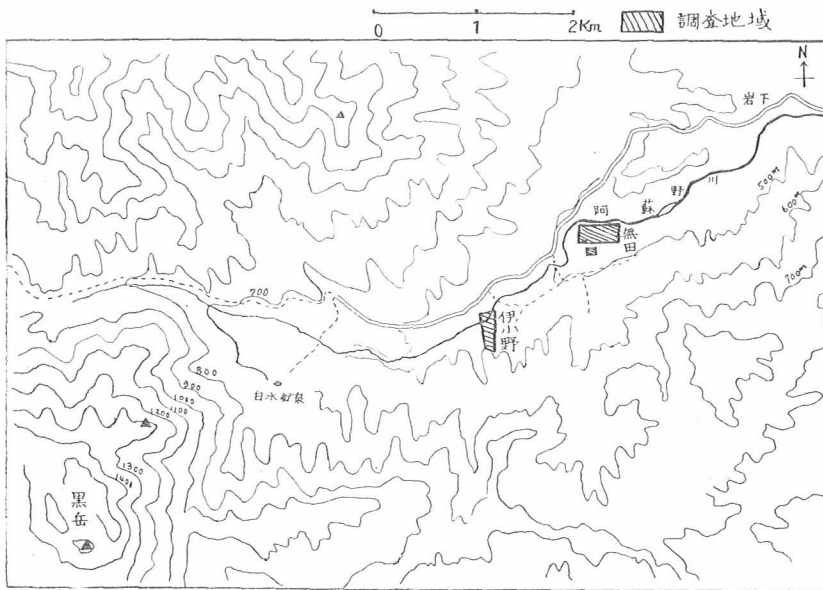
庄内町阿蘇野は九重連峯黒岳（海拔1556m）の東北麓にある。この地域には現在高温の温泉はないが調査地域の西方約2.5kmに白水鉦尻（泉温 8.4°C昭和35年・7.24.測定）があり、日本鉱泉分析表（昭和4年）に記載されている。

温泉徴候としては、温度20~23°Cの瓦斯を伴った湧水が各所にあり、後に述べるようにこれだけでも

温泉といえる。温泉試掘が調査地の東方に於て行なはれたが途中で中止したという。

調査は温泉徴候のある湧水を中心とした地域2ヶ所（字伊小野無田）で、地下1mの地温並に湧水のHCO₃⁻, Cl⁻量の測定を行なった。調査地域は海拔500~600mの高所で北面した傾斜地の水田である。（第1図参照）

第1図 庄内町阿蘇野に於ける地温調査地域



2 地温の分布

地温調査の結果その分布は第2図A、Bの如く伊小野（第2図、A）に於ては3ヶ所（採水点 No. 2、3、4）に瓦斯を伴った湧水があり、これ等の附近は他に比して高温である。

無田（第2図、B）に於ても数ヶ所に瓦斯を伴った湧水があり、これ等を中心とした高温帯がある。

地下1mの地温は日変化はないが、季節的变化があり、又日射の長短、地形、地質、裸地、草地等によって差違がある。この地域の測定期日に於ける地下1mの標準地温は正確には決定出来ないが、大分地方気象台の測定資料⁽¹⁾（5月に於ける月平均地温 16.5°C）、調査地の地高、及び測定された地温等から、14~15°C

と推定せられる。測定された高温帯は何れも上記標準地温に比して高くこれらの地温異状は明らかに地下高温水の湧出によると思う。

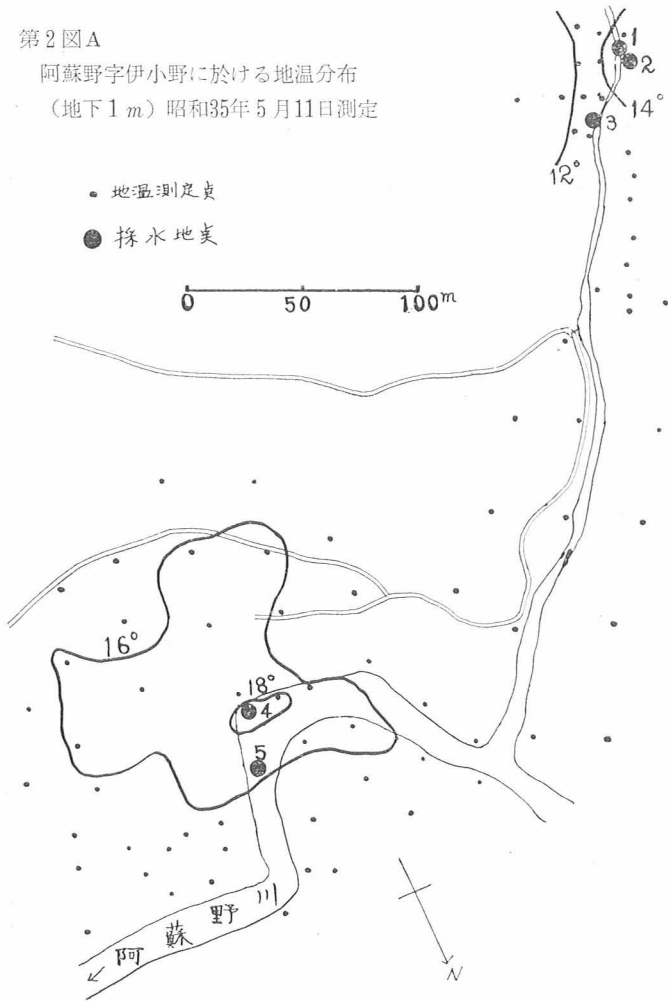
3 Cl⁻, HCO₃⁻及び水温の関係

両地域の湧水及び川水のCl⁻/HCO₃⁻を分析した結果高温地帯の湧水は何れも多量のHCO₃⁻を含み、Cl⁻とHCO₃⁻とは第3図の如く略一次関係が成立し、Cl⁻量の多いもの程HCO₃⁻量も多い。

HCO₃⁻と水温の関係は第4図の如く明確な一次関係は示さないがHCO₃⁻の多いもの程高温である。水温は5月と7月の2回測定したが湧水の水温差は甚だ小さい。これは地表の影響を受けていることが少ない事を物語り、而も比較的高温を示すことは可なり地中深く

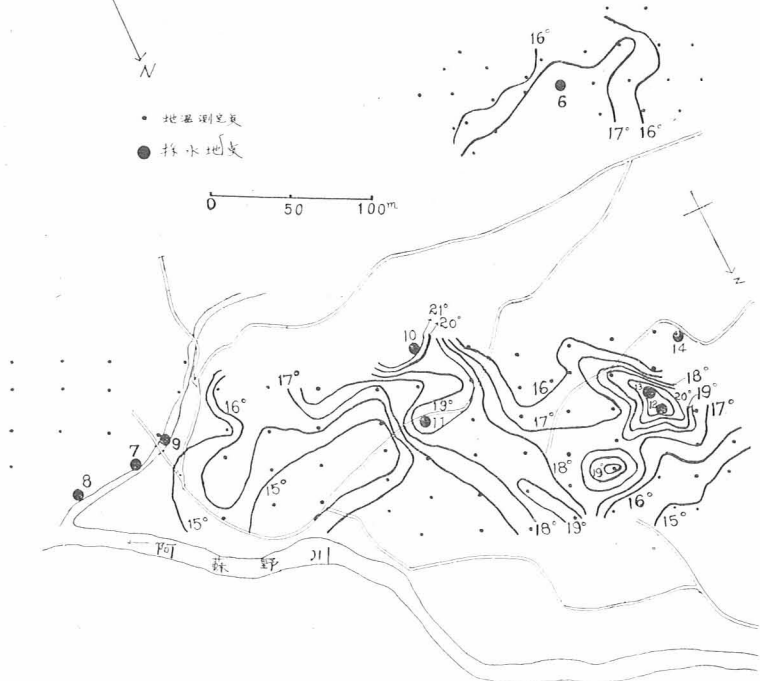
第2図A

阿蘇野字伊小野に於ける地温分布
(地下1m) 昭和35年5月11日測定

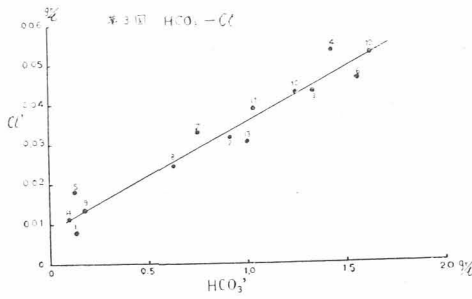


第2図B

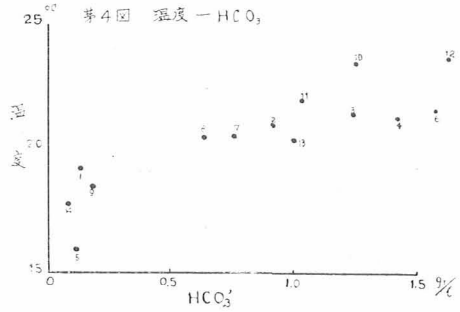
阿蘇野字無田に於ける地温分布 (地下1m) 昭和35年5月12日測定



第3図 HCO₃'-Cl'



第4図 温度-HCO₃'



第一表 湧水、流水のCl', HCO₃'量及び温度

番号	Cl' (gr/l)	HCO ₃ ' (gr/l)	温度 (°C)		備考	番号	Cl' (gr/l)	HCO ₃ ' (gr/l)	温度 (°C)		備考
			昭35.5.11	昭35.7.24					昭35.5.11	昭35.7.24	
1	0.008	0.141	11.8	19.2	流水	9	0.014	0.193	16.6	18.5	流水
2	0.032	0.920	20.8	21.0	湧水	10	0.044	1.253	21.5	23.6	湧水
3	0.044	1.340	20.8	21.5	〃	11	0.040	1.030	20.4	22.0	〃
4	0.055	1.422	20.5	21.3	〃	12	0.054	1.625	22.9	23.8	〃
5	0.019	0.128	14.8	15.8	流水	13	0.031	1.005	21.4	20.4	〃
6	0.047	1.572	21.4	21.7	湧水	14	0.012	0.099	—	17.8	〃
7	0.033	0.756	20.4	20.6	〃	白水	0.016	0.122	—	8.4	〃
8	0.025	0.638	20.0	20.5	〃	鉱泉					

循環してきた水であることを示すものとみてよい。

以上の調査結果から、この地域の地温異状はHCO₃'を多量に含む湧水によって生じたと考えられる。この程度の温泉が直ちに高温泉に由来するかどうかは尚言いきれない。HCO₃'は火山性の由来であるにしても高温水と行動を共にしてきたともいい難い。現在の水温も湧出途中の冷却がなければ300m以深の地温によって得られるゆけである。然し湧出量があまり多くない点

からみれば更に高温であることを予想するのは無理ではない。この様に考えるとボーリングによる高温水を得ると考えてよいであろう。試掘地点としてはHCO₃'を多量に含む湧水のある高温帯が有望である。

終りに御指導を賜った瀬野博士並に調査に協力した安部純意、末松竜雄、岐部典生の諸氏に厚く感謝する

参考文献

1. 大分地方気象台編 大分県の気象

別府市内温泉(内竈南北両石垣、南立石)現況調査(Ⅲ)

医務薬事課 佐藤 光 一
矢野 行 雄

別府市内温泉現況を本年度は別府市内大字内竈、南北両石垣及び南立石の三地域にわたり調査を行った。

調査方法としては従前どおり温泉台帳登載の温泉について温度、ゆう出量の観測、口径、深度、埋設管の種類別、温泉所有者の確認等を行い、あわせて字図による分布図を作成した、結果については次にしめすとおりであり、これを11年前の昭和24年の京大別府研究所の調査資料と比較した。

1 内竈地区について

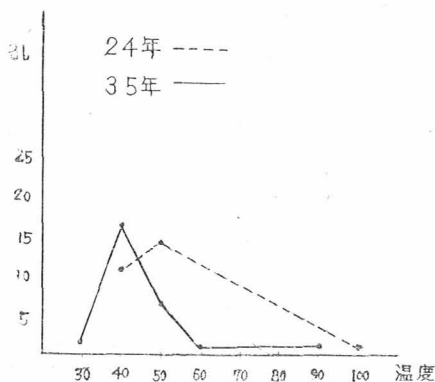
調査対象孔数 122孔でそのうち活動孔29孔(内掘さく泉24孔自然ゆう出泉5孔)停止孔5孔、残り88孔は埋孔され位置の確認はできなかった。

温度ゆう出量等は第1表及び第1図第2図のとおりである。

第1表

調査年月	台帳孔数	活動孔数	平均温度 °C	平均ゆう出量 ℓ/min	総ゆう出量 ℓ/min	平均深度 m
24.7		28	47.25	18.67	485.4	78
35.12	122	自噴27 動力2	43.60	25.53 3.40	536.3 6.8	78.7

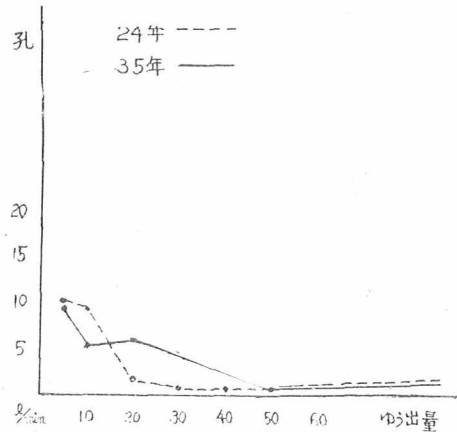
第1図 孔数と温度



昭和24年の調査時と今回の調査を比較すると活動孔は1孔増え、ゆう出量は若干増加しているが平均温度は3.65°C低下している。

深度は前回と大差は認められなかった、動力は、 $\frac{1}{2}$ HP 2 基見られ何れも渦巻式ポンプであった。利用状況は保養所3 公衆浴場2、旅館2 他は自家浴用とし

第2図 孔数のゆう出量



て使用されている。

2 南北両石垣地区の温泉について

調査対象孔数99孔の内活動孔49孔停止9孔埋孔確認出来なかったもの41孔あった両石垣地区温泉は掘さく泉のみで自然ゆう出泉全くない。

1) 南石垣地区の温泉

調査対象孔20孔のうち活動孔8孔埋孔し不明のものが12孔であった、その温度、ゆう出状況は次表のとおりである。

第2表

調査年月	活動孔数	台帳孔数	平均温度 °C	平均ゆう出量 ℓ/min	総ゆう出量 ℓ/min	平均深度 m
24.7	4		34.97	27.68	83.1	205.5
36.2	8	17	39.45	43.75	350.0	229.8

前回に比較し活動孔4孔増え、温度、ゆう出量ともに大きく増加している、これは主として昭和33年以降別府市有泉他3孔の新規掘さくによって開発されたための結果である、全孔自噴泉で動力揚湯はない、利用状況は自家浴用5孔他の3孔は温度が低いためなどで放流され、その量はこの地区の総ゆう出量の半分に近い155 ℓ/minである。

2) 北石垣地区の温泉

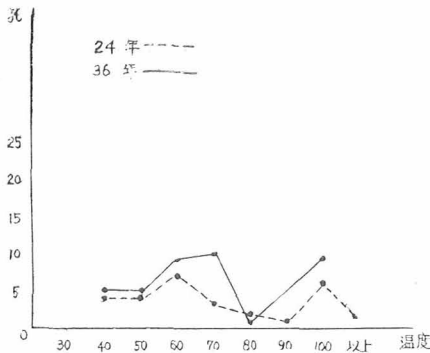
調査対象孔数は79孔内活動孔41孔停止9孔全く不明で確認出来なかったもの29孔であった。温泉の活

動状況は第3表及び第3、4、5図のとおりである

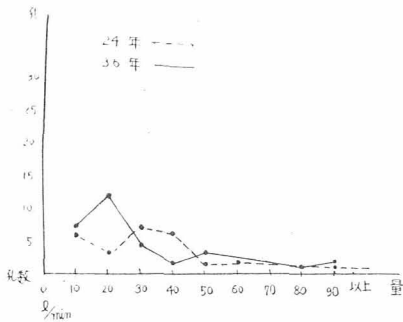
第3表

調査月	活動孔数	台帳孔数	平均温度 °C	平均ゆう出量 ℓ/min	総ゆう出量 ℓ/min	平均深度 m
24.7	28		66.8	32.03	916.9	187.5
36.2	自噴33 動力8	76	65.17	26.89 14.87	833.5 119.0	203.1

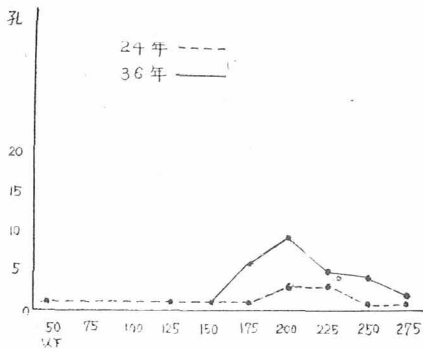
第3図 孔数と温度



第4図 孔数とゆう出量



第5図 孔数と深度



今回の調査では昭和24年当時より活動孔13孔増加しているが、総ゆう出量は35.6 ℓ/minの増加を示したが平均温度、平均ゆう出量は共にいく分減少を示している。

第3、4、5図は温度、ゆう出量及び穿掘深度状況を示したものである。

温泉水位は海岸線から山手に向うに従って低くなり、最も低いものは地表下30m前後と云われているが、ゆう出口を密閉して確認することは出来なかった。動力装置は活動孔41孔中8孔であり、エアークンプレッサー7基渦巻式1基で馬力数は ¼HP 3基、½HP 1基 2HP 4基となっている。

利用状況保養所4、病院1、公衆浴場2でその他は自家浴用として使用されている。

3 南立石地区温泉

調査対象孔数 201孔のうち活動孔86孔停止孔9孔残り106孔は埋孔し確認することはできなかった。

活動状況は第4表のとおりである。

第4表

調査月	台帳孔数	活動孔数	平均温度 °C	平均ゆう出量 ℓ/min	総ゆう出量 ℓ/min	平均深度 m
36.3	191	噴気70 温泉16	94.2 47.2	— 14.7	— 177	115.7 106.0

南石垣地区は噴気を利用し水を温め人口温泉として配湯する泉源となっているものが多い、活動孔86孔のうち配湯用としている温泉孔は37孔公衆浴場2孔旅館6孔暖房用4孔自家浴用4孔残りは1部むし物用に利用されているが大部分は放置されている。

むすび

1.内竈地区温泉の活動孔は県台帳数の24%弱に当りその他の泉孔は停止又は不明となっている。昭和24年調査に比較し1孔増加しているが11年間に4孔新に穿掘している。温度、ゆう出量に変化を与えているのはこの新穿掘泉によるものである。

2.南石垣地区は泉温、ゆう出量共に増加を示しているが、これは昭和33年以降4孔穿掘した、ためこの地区は温泉孔数少なく今後開発されるものと思われる

3.北石垣地区は北部旧農学校跡に高温の沸湯泉があるが南部に下るにつれて温度は低くなっている。昭和24年調査に比較し平均泉温平均ゆう出量は減少したがこれは第3、4図に示す如く比較的ゆう出量の少ない温泉孔が増加したためである。

4.南立石地区は活動孔の81%は噴気泉でありその多くは人工温泉として観海寺及び市内等に配湯し浴用に供されているが加熱用水に余裕があればまた配湯の余力は充分あるものと思われる。

終りに本調査に資料提供の京都大学地球物理学研究所並びに観測に協力を払われた別府市役所、別府保健所の方々に厚く感謝の意を表します。