

別府温泉の湧出量と水頭との相關*

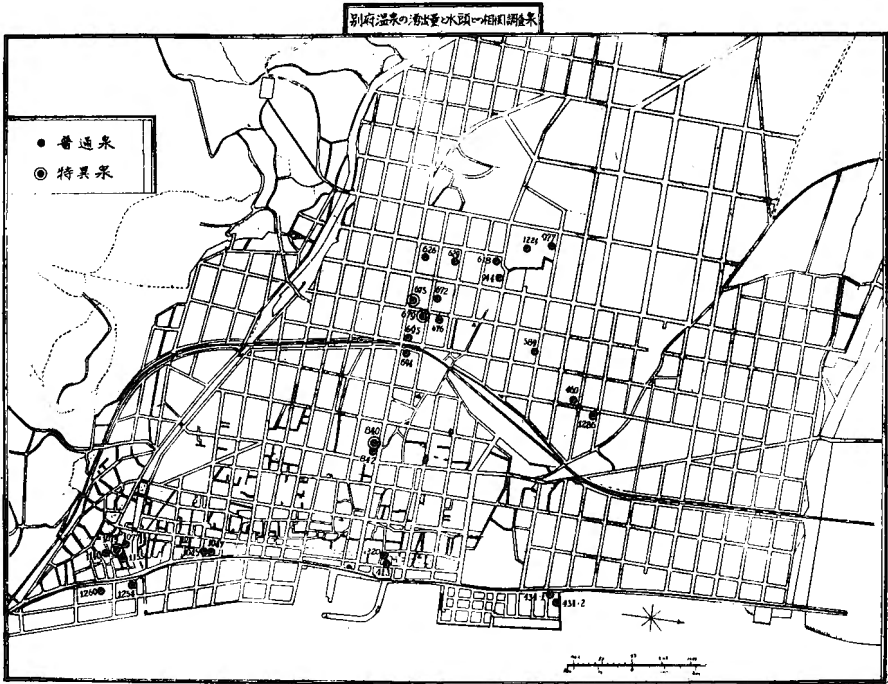
其の一 層 状 泉

理 學 博 士 野 滿 隆 治
理 學 士 瀨 野 錦 藏
理 學 士 山 下 馨

1. 緒 論

或温泉が地下水として如何なる態様にあるかを研究することは温泉研究上根本的必要の事項である de Launay は温泉を層状泉と脈状泉の二つに大別したが、吾々は別府温泉

第 1 圖 水頭効果調査泉の位置



* 本文の要旨は昭和10年東京にて日本数學物理學會總會に發表した。

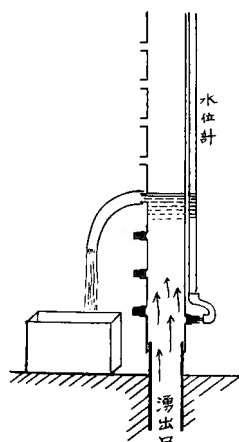
がその孰れに屬するかを診斷する一方法として、湧出口の高さを變ずるに伴ひ湧出量が如何に變化するかを型式を調査することにした。つまり湧出量と水頭との相關型式によつて別府温泉地帯に於ける地下温泉水の態様を判斷する一つの材料にしようとするのである。而して此の様な湧出口の高さを加減することにより湧出量が如何様に變化するかを知つて置くことは、温泉理論上より頗る有意義なばかりでなく、實用上からも種々の點に有益である。例へば或掘穿温泉に於て湯量の多少により湧出口従つて浴槽を地面より何程位まで下に設くべきか等、温泉經營上重大な問題の解決に關係があるからである。

本稿では先づ第1圖に示す別府市街地の温泉三十口につき研究した結果を報告する。温泉の總数は市街地だけでも千口に近い多數であるが、其の多くは既報⁽¹⁾の如く湧出口上端は埋込み夫れに連結した別の水平導管より流出する様な構造になつて居るので、片々の研究目的にかなふものは甚だ少いのを遺憾とするが、それでも市街地全面に亘り三十餘口の調査があれば地下温泉水態様の判定には充分である。

2. 測定方法

湧出量と水頭との關係を知る最も簡単な直接法は、第2圖の如く湧出口直上に側管の附いた

第2圖 直接測定法



た管を繼ぎ加へて、流出口の高さを種々變へて其の時の湧出量と水頭とを測定するのである。かゝる操作は湧出井泉管が腐朽して弱つてゐるものでは水壓の變化によつてその破壊を來たす恐れなしとしないから、埋設井泉管が鐵管であるか或は竹ならば新しい場合でないといふ安心して實行出来ない。又温泉の靜止水頭が地表以上のものでなければ測定實行上困難がある。實際には湧出量を増加せしむる爲に地表下に湧出口を開けたものが多く實測に不便である。

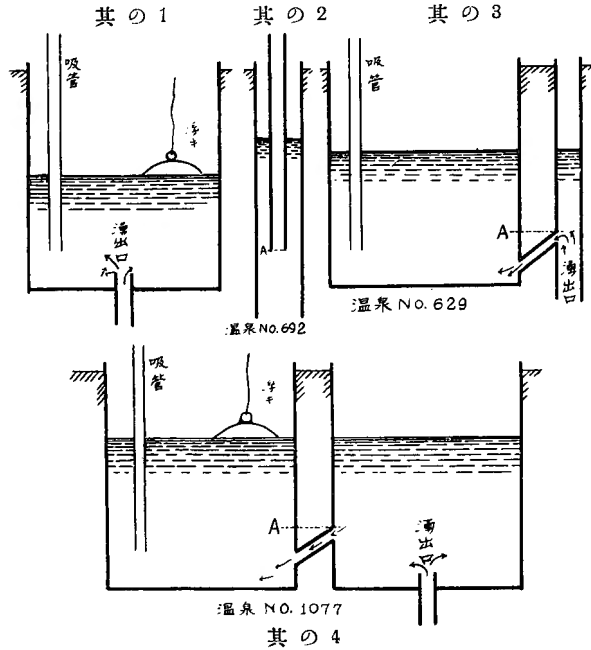
然し靜止水頭が一層低い處では、第3圖の様に湧出口直上に湯溜めタンクを附して、浮子の上下により自動的に吸管を以て温泉水を吸上げ浴槽に送つて居るのが可なりある。是等は湧出口上に水壓が自然と變化する様になつて居るから、吸上げの止んだ後、温泉水面の自然に上昇する速度の變化

(1) 本誌第1巻第1號23頁。

別府温泉の湧出量と水頭との相關

を測つて湧出量と水頭との相關を知る間接法とすることが出来る。この時の水面上昇速度の観測は、自記水位計を用るか或は既報⁽²⁾の如き湧出量計を用ふれば充分である。湯溜

第 3 圖 湯溜めタンクを有する湧出口の色々



めタンクの構造には第 3 圖其の 2, 3, 4 の如き少々變型のものもあるが、それとて水位が A 點以上のときのみ就いて測定すれば同じことになる。

3. 實測の結果. 正常の例

以上二つの方法で測定した結果は一括して資料欄に「別府市内温泉の水頭と湧出量との相關観測表⁽³⁾」と題して掲げるが、茲には説明の便宜上其の僅か一部を第 1 表及び第 4 圖に例示する。

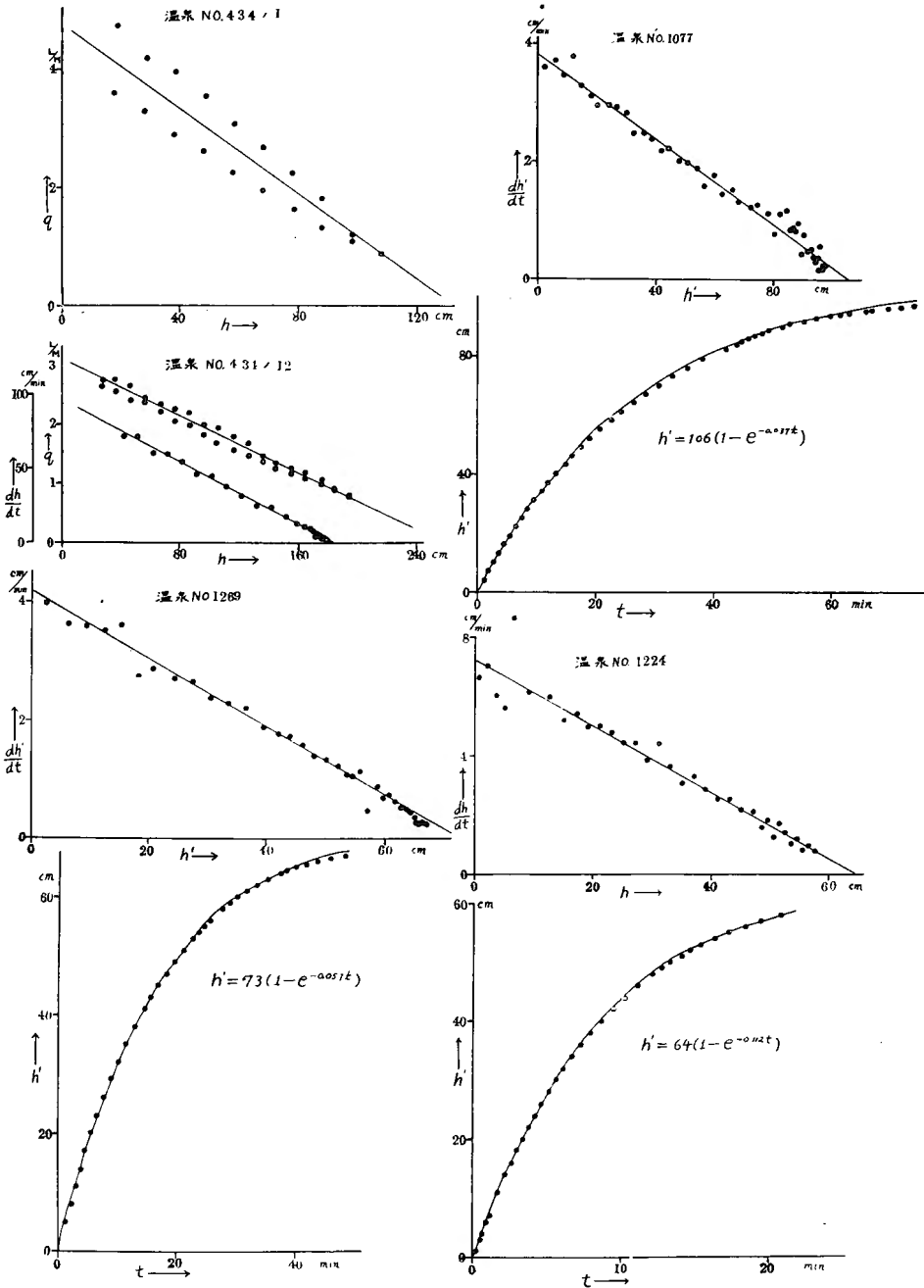
湧出量と水頭との關係：—第 4 圖を見ると直接法によつたものでは、測定そのままで温泉の湧出量 q が其の時の水頭 h と一次的直線關係にあるを知る。只その中の温泉 No. 434 / 1 の點列が交叉してゐるのは、水頭を低位から高位に變へて行き再び低位に戻つて観測して居る中に潮汐の影響を受けたのであつて、その潮汐影響を除去するため往復の平均として中央に線を引けば、矢張り湧出量は水頭に直線的關係を有することが明瞭である。

(2) 野滿・瀬野・中日：別府温泉と潮汐；本誌第 2 卷第 1 號 3 頁。

(3) 本誌本號 290 頁

別府温泉の湧出量と水頭との相関

第4圖 水頭と湧出量又は水位上昇速度との関係(正常例)



別府温泉の湧出量と水頭との相関

第1表 水頭と湧出量又は水位上昇速度との関係(正常例)

温泉 No. 434 / 1 鶴水園

深度 165 m; 埋没管, 鐵, 口径 4.3 cm; 水位ノ標準ハ地表ナリ。

観測年月日 1936 May 4th

観測時	水位	湧出量	観測時	水位	湧出量	観測時	水位	湧出量
h m	cm	L/M	h m	cm	L/M	h m	cm	L/M
9.08	18.3	4.74	9.56	87.8	1.82	11.12	57.8	2.25
13	28.9	4.18	10.06	97.7	1.20	19	47.5	2.62
19	38.5	3.94	19	107.5	0.99	25	37.6	2.39
26	48.4	2.52	23	97.7	1.09	32	28.0	3.27
32	58.3	3.08	47	87.7	1.32	38	17.7	3.59
40	67.6	2.68	56	78.3	1.64	46	119.3	最高水位
47	77.8	2.24	11.04	67.5	1.96			

温泉 No. 434 / 12 鶴水園

深度 264 m; 埋没管, 鐵, 口径 4.5 cm; 水位ノ標準ハ地表ナリ。

(イ) 観測年月日 1936 May 7th

観測時	水位	湧出量	観測時	水位	湧出量	観測時	水位	湧出量
h m	cm	L/M	h m	cm	L/M	h m	cm	L/M
8.09	27.4	2.74	8.43	145.3	1.23	9.38	136.0	1.35
12	37.1	2.74	46	154.3	1.24	40	126.9	1.45
15	47.4	2.64	50	164.5	1.17	42	116.7	1.55
17	56.8	2.40	55	174.5	1.05	45	106.5	1.63
21	67.0	2.34	9.00	184.2	0.90	47	96.4	1.83
24	77.0	2.25	7	193.3	0.76	49	86.3	1.97
27	86.6	2.19	12	192.6	0.77	51	76.3	2.08
28	96.4	1.99	18	194.0	0.88	53	67.0	2.19
31	106.6	1.92	21	174.4	0.99	56	57.0	2.38
34	116.5	1.78	28	155.3	1.15	58	47.0	2.36
37	126.7	1.68	33	164.7	1.06	10.00	37.2	2.55
40	136.0	1.46	35	145.2	1.24	1	27.3	2.61

(ロ) 観測年月日 1936 May 7th, 16^h 24^m~34^m

水位	時	$\frac{\Delta h}{\Delta t}$	水位	時	$\frac{\Delta h}{\Delta t}$	水位	時	$\frac{\Delta h}{\Delta t}$
cm	min	cm/min	cm	min	cm/min	cm	min	cm/min
37.0	0.00	70.9	127.0	1.88	25.5	173.0	5.00	5.5
47.0	0.14	70.4	137.0	2.22	23.1	174.0	5.18	5.6
57.0	0.28	59.9	147.0	2.65	16.7	175.0	5.40	4.0
67.0	0.45	59.9	157.0	3.25	12.8	176.0	5.65	3.3
77.0	0.62	54.6	162.0	3.64	10.0	177.0	5.95	2.0
87.0	0.80	46.1	167.0	4.14	8.6	178.0	6.28	1.9
97.0	1.02	44.6	169.0	4.38	7.3	179.0	6.32	1.4
107.0	1.24	37.5	171.0	4.65	3.0	180.0	7.52	1.1
117.0	1.51	31.6	172.0	4.93	5.0	181.0	9.45	
127.0	1.33		172.0	5.00		181.3	最高水位	

別府温泉の湧出量と水頭との相關

温泉 No. 1269 近庄六氏宅

深度 53 m; 埋没管,竹,口径 4.8 cm; tank 直径 61.5 cm; 泉温 51°.4C; 水位ノ 0 點ハ地下 198 cm.

観測年月日 1936 Feb. 11th, 15^h52^m~16^h40^m

水位	時	$\frac{\Delta h}{\Delta t}$	水位	時	$\frac{\Delta h}{\Delta t}$	水位	時	$\frac{\Delta h}{\Delta t}$
cm	min	cm/min	cm	min	cm/min	cm	min	cm/min
0	0.00	3.95	35	11.60	2.17	56	25.60	0.44
5	1.27	3.60	38	13.02	1.36	58	27.85	0.88
8	2.10	3.60	41	14.63	1.76	59	28.98	0.67
11	2.93	3.53	43	15.77	1.72	60	30.47	0.72
14	3.78	3.60	45	16.93	1.53	61	31.85	0.60
17	4.62	2.73	47	18.20	1.40	62	33.52	0.52
20	5.72	2.86	49	19.63	1.33	63	35.43	0.48
23	6.77	2.69	51	21.18	1.21	64	37.53	0.43
26	7.88	2.65	53	22.78	1.05	64.5	38.70	0.36
29	9.02	2.37	54	23.73	1.03	65.0	40.08	0.20
32	10.28	2.28	55	24.70	1.11	65.5	41.77	0.25
35	11.60		56	25.60		66.0	43.78	0.25
						66.5	45.78	0.21
						67.0	48.15	

温泉 No. 1077 川正旅館

深度 62m, 63m; 口径 4.1cm, 3.6cm; 泉温 43°.3C; tank 直径 66.0cm; 水位ノ 0 點ハ地下 146cm.

観測年月日 1936 Feb. 9th, 16^h19^m~17^h35^m

水位	時	$\frac{\Delta h}{\Delta t}$	水位	時	$\frac{\Delta h}{\Delta t}$	水位	時	$\frac{\Delta h}{\Delta t}$
cm	min	cm/min	cm	min	cm/min	cm	min	cm/min
0	0.00	4.61	46	15.93	2.02	87	46.83	0.81
1	0.22	3.60	49	17.42	1.98	88	48.07	0.92
4	1.05	3.75	52	18.93	1.89	89	49.15	0.40
7	1.85	3.46	55	20.52	1.57	90	51.63	0.74
10	2.72	3.75	58	22.43	1.76	91	52.98	0.45
13	3.52	3.28	61	24.13	1.43	92	55.22	0.49
16	4.43	3.10	64	26.23	1.51	93	57.27	0.38
19	5.40	2.95	67	28.22	1.31	94	59.92	0.31
22	6.42	2.95	70	30.50	1.22	94.5	61.55	0.32
25	7.43	2.90	73	32.95	1.27	95.0	63.10	0.17
28	8.47	2.81	76	35.32	1.12	95.5	66.05	0.53
31	9.53	2.47	79	38.00	0.76	96.0	67.00	0.17
34	10.75	2.47	82	41.97	1.12	96.5	69.98	0.23
37	11.97	2.40	84	43.75	1.18	97.0	72.12	0.22
40	13.22	2.20	85	44.50	0.83	97.5	74.37	
43	14.58	2.22	86	45.70	0.88			
46	15.93		87	46.83				

別府温泉の湧出量と水頭との相關

温泉 No. 1224 陸軍小倉衛戍病院別府分院

深度 54 m; 埋没管, 鐵, 口径 5.1 cm; tank 直径 90 cm; 泉温 52.9°C; 水位ノ 0 點ハ地下 286 cm.

観測年月日 1936 Feb. 7th, 15^h13^m~15^h34^m

水位	時	$\frac{\Delta l}{\Delta t}$	水位	時	$\frac{\Delta l}{\Delta t}$	水位	時	$\frac{\Delta l}{\Delta t}$
cm 0	min 0.00	cm/min	cm 24	min 4.17	cm/min	cm 48	min 12.02	cm/min
1	0.15	6.67	26	4.62	4.44	49	12.67	1.54
3	0.43	7.04	28	5.07	4.45	50	13.22	1.82
4	0.60	6.02	30	5.58	3.87	51	14.03	1.23
6	0.94	5.63	32	6.08	4.45	52	14.62	1.70
7	1.05	8.70	34	6.64	3.62	53	15.33	1.40
11	1.70	6.15	36	7.28	3.09	54	16.30	1.03
14	2.20	6.00	38	7.88	3.33	55	17.15	1.18
16	2.58	5.21	40	8.58	2.86	56	18.37	0.82
18	2.95	5.46	42	9.37	2.55	57	19.40	0.97
20	3.35	5.00	44	10.15	2.55	58	20.73	0.75
22	3.75	5.00	46	11.07	2.18			
24	4.17	4.30	48	12.02	2.11			

今温泉の静止水頭を h_0 とすると、使用水頭 h が h_0 に等しくなれば湧出量 q は零となるべきであるから、上述の事柄は次式で表はすことが出来る。

$$q = c'(h_0 - h) \quad (1)$$

茲に c' は或常数である。

間接測定法を取つた場合にも第 4 圖に示された測定結果によると、タンクに溜る温泉水面上昇速度は静止水頭と現在の水頭との差に比例することが明瞭である。従つてタンク内の水位を h' 、時間を t で表はせば

$$\frac{dh'}{dt} = c''(h_0 - h') \quad (2)$$

茲に c'' は比例常数である。尤も h' と h とは殆んど差がなく、實用上は h' を以て其儘湧出時の水頭 h と見なしてよいから (2) 式は

$$\frac{dh}{dt} = c''(h_0 - h) \quad (2')$$

と書いてもよい。而してタンクの切斷面積を A とすれば、

$$A \frac{dh'}{dt} = q = A \frac{dh}{dt}$$

別府温泉の湧出量と水頭との相関

であるから、(2) 或は (2') は結局 (1) と同じことを表して居るといつてよい。只 $Ac''=c'$ に當るわけである。

依つて今湧出口埋設管の斷面積を a とし、又水頭效果係數として

$$c = \frac{c'}{a} = \frac{Ac''}{a} \quad (3)$$

と置けば、同一湧出口に就いては上記二方法の孰れによつても c の値は略ほ同じ値を與ふる筈である。温泉 No. 434ノ12 に就いては實際兩方から c を出して見たが果して略ほ一致することを確めた。實測口數 30 許りの内 26 口までも (1) 或は (2) 式を満足した。かくして求めた水頭效果係數 c の値を靜止水頭 h_0 並に掘鑿深度と共に第 2 表に掲げる。湧出口により c の値は随分違ふが、それは泉管の種類、腐蝕又は沈澱の程度、或は含湯層の透水率などの相異によるのである。

第 2 表 湧出量に及ぼす水頭效果係數 c

温泉番號	c	靜止水頭 (海拔) h_0	掘 穿 深 度	温泉番號	c	靜止水頭 (海拔) h_0	掘 穿 深 度
320	min^{-1} 55.2	m 1.3	m 82	840	min^{-1} 0.16	m —	自然湧出
413	71.4	2.9	—	842	0.02	2.5	自然湧出
434ノ1	2.7	4.3	165	944	3.7	18.6	22 ^m
434ノ12	{(1) 0.76 {(2) 0.53	4.9	264	977	31.1	22.7	27
460	11.7	4.3	121	1045	5.5	1.9	137
589	4.1	14.9	—	1047	9.9	2.4	109
618	18.2	16.8	40	1077	12.4	2.2	62
626	9.3	16.1	49	1140	10.8	0.8	109
629	20.8	14.3	27	1155	34.4	2.1	55
672ノ1	40.2	14.0	48	1224	34.9	21.3	55
676	34.8	12.8	49	1254	11.9	1.0	33
694	2.3	8.9	45	1269	9.4	1.7	53
695	13.1	11.5	65	1286	18.4	12.2	127

434ノ12 の内 (1) は測定の方法、(2) はその第 2 法にて得たものである。

湧出曲線(h, t): タンク内に湯の溜る模様を一層明瞭にするには、時間 t と共に水位 h が如何に變るかを定むればよい。(2') 式に於て潮汐など外の影響がなく靜止水頭 h_0 を一定と見做し得る場合には、(2') 式を積分し且つ h は時間 $t=0$ に於ける水位を基準として測れば

$$h = h_0(1 - e^{-ct}) \quad (4)$$

別府温泉の湧出量と水頭との相關

で、 (h, t) 關係は指數函數的になる筈である。

之を實測と照合するには、先づ第4圖の様な $\left(\frac{dh}{dt}, h\right)$ 圖上で $\frac{dh}{dt}=0$ に當る h の値を求めて h_0 とし、又 $h=0$ に對する $\frac{dh}{dt}$ の値を求めて、其の兩者から

$$c'' = \left| \frac{dh}{dt} \right|_{h=0} \div h_0$$

により c'' を算出する。かくして求めた h_0 と c'' とを(4)式に代入して (h, t) 曲線を描き實測値と對照すればよい。第4圖中に其の若干例を示してあるが、(4)式はよく實測と符合して居る。温泉 No. 1077 の如き二聯送タンク(第3圖其の4)でも全く同様の法則が成り立つて居る。

潮汐の影響:— 以上吾々は $h_0=定數$ と假定したが、實際には泉源の盛衰、降雨或は

第3表 温泉 No. 1254 (泉孫旅館)観測表の一部

深度 33m; 埋没管, 鐵, 口径 6.4cm; tank 直径 58.5cm; 泉温 47°.3C; 水位ノ0點ハ地下 279cm.
 \VI. 観測年月日 1936 Mar. 11th, 15th 21^m~56^m

水位	時	$\frac{\Delta h}{\Delta t}$	水位	時	$\frac{\Delta h}{\Delta t}$	水位	時	$\frac{\Delta h}{\Delta t}$
cm	min	cm/min	cm	min	cm/min	cm	min	cm/min
0	0.00	9.88	40	6.83	2.75	59	19.67	0.50
5	0.58	8.56	45	8.65	2.16	59.5	20.67	0.50
10	1.12	7.51	49	10.50	1.82	60.0	21.67	0.42
15	1.78	7.14	51	11.60	1.28	60.5	22.87	0.35
20	2.48	5.77	53	12.05	1.28	61.0	24.32	0.28
25	3.35	5.17	55	14.62	0.92	61.5	26.10	0.22
30	4.32	4.88	57	16.80	0.78	62.0	28.40	0.19
35	5.43	3.57	58	18.08	0.63	62.5	30.05	0.10
40	6.83		59	19.67		62.8	34.08	

(VII) 観測年月日 1936 Mar. 11th, 23^b 35^m~12th, 0^b 00^m; 水位ノ0點ハ地下 279cm.

水位	時	$\frac{\Delta h}{\Delta t}$	水位	時	$\frac{\Delta h}{\Delta t}$	水位	時	$\frac{\Delta h}{\Delta t}$
cm	min	cm/min	cm	min	cm/min	cm	min	cm/min
0	0.00	16.67	50	4.22	7.69	85	10.42	3.19
5	0.30	15.02	55	4.87	7.32	90	11.98	2.50
10	0.63	13.84	60	5.55	6.67	95	13.98	2.05
25	1.72	11.77	65	6.30	6.52	100	16.42	1.54
35	2.57	10.00	70	7.07	5.18	103	18.37	1.31
40	3.07	9.38	75	8.03	4.69	105	19.90	0.91
45	3.60	8.10	80	9.10	3.80	107	22.10	0.59
50	4.22		85	10.42		109	25.49	

別府温泉の湧出量と水頭との相関

(IX) 観測年月日 1936 Mar. 12th, 1^h45^m~3^h16^m; 水位ノ0點ハ地下 279cm.

水位	時	$\frac{\Delta h}{\Delta t}$	水位	時	$\frac{\Delta h}{\Delta t}$	水位	時	$\frac{\Delta h}{\Delta t}$
cm	min	cm/min	cm	min	cm/min	cm	min	cm/min
0	0.00	18.06	75	12.95	1.61	87.05	32.62	0.04
5	0.38	11.77	78	14.82	1.23	87.15	36.17	-0.13
15	1.23	10.71	80	16.45	1.18	87.00	37.37	-0.02
20	1.70	10.00	81	17.30	0.97	86.90	42.53	-0.05
25	2.20	8.58	82	18.33	0.79	86.65	47.58	-0.08
30	2.78	8.82	83	19.60	0.68	86.22	53.13	-0.07
35	3.35	7.32	83.5	20.33	0.71	85.74	59.82	-0.06
40	4.03	6.25	84.0	21.03	0.67	85.36	65.90	-0.06
45	4.83	5.56	84.5	21.78	0.56	85.08	70.53	-0.10
50	5.73	4.76	85.0	22.68	0.47	84.59	75.70	-0.11
55	6.78	4.35	85.5	23.75	0.34	84.08	80.50	-0.14
60	7.93	3.85	86.0	25.22	0.32	83.40	85.48	-0.10
65	9.33	3.13	86.5	26.80	0.17	82.87	90.68	
70	10.83	2.36	87.0	29.82	0.02			
75	12.95		87.05	32.62				

(X) 観測年月日 1936 Mar. 12th, 5^h33^m~6^h07^m; 水位ノ0點ハ地下 279cm ナリ。

水位	時	$\frac{\Delta h}{\Delta t}$	水位	時	$\frac{\Delta h}{\Delta t}$	水位	時	$\frac{\Delta h}{\Delta t}$
cm	min	cm/min	cm	min	cm/min	cm	min	cm/min
0	0.00	10.71	45	6.55	3.62	70	17.48	0.81
5	0.47	9.69	50	7.93	3.09	71	18.72	0.97
10	0.98	9.09	55	9.55	2.73	72	19.75	0.74
15	1.53	7.89	58	10.65	2.28	73	21.10	0.67
20	2.17	7.32	61	11.97	2.14	74	22.62	0.52
25	2.85	6.67	63	12.90	1.79	75	24.55	0.47
30	3.60	6.00	65	14.02	1.54	76	26.70	0.38
35	4.43	5.17	67	15.32	1.46	77	29.32	0.42
40	5.40	4.35	69	16.68	1.25	77.5	30.50	0.25
45	6.55		70	17.48		78.0	32.53	

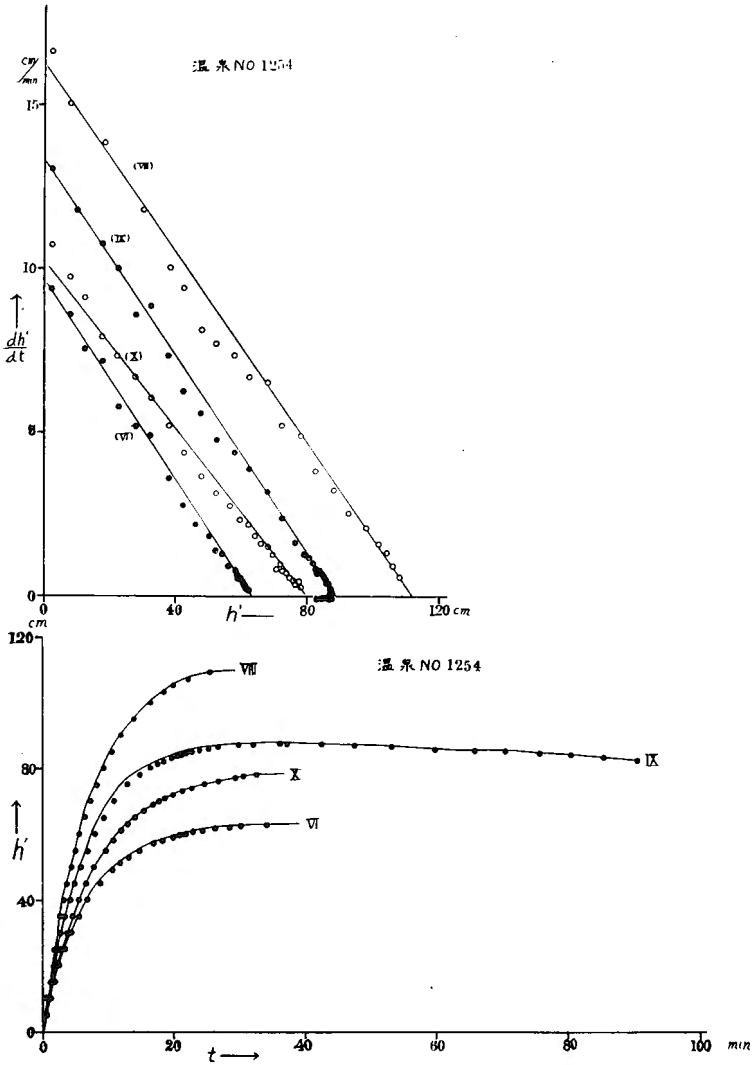
潮汐によつて變化するもので、特に最後の潮汐作用の如き短時間中に大なる變化を與へるものは數時間の観測中にも h_0 の値に變化を生ぜしむる。第3表及び第5圖に掲げた温泉 No. 1254 の場合は明かに其の事實を示して居る。かゝる場合には h_0 を時間の函數と見ると、(2') は

$$\frac{dh}{dt} + c''h = c''h_0(t) \quad (5)$$

の形となる。 c'' は井泉管及び地質に關する常數で數時間の間は勿論時間的には不變とす

別府温泉の湧出量と水頭との相関

第 5 圖 温泉 No.1254 の湧出曲線(潮汐影響をも含む)



べきであるから、(5)の解は $t=0$ にて $h=0$ とすれば

$$h = e^{n t} e^{-c t} \int_0^t h_0(t) e^{c t} dt \quad (6)$$

然るに別府温泉では湧出量は潮汐と一次的関係を持つことは既に吾々の研究⁽²⁾で明かにされて居るから、 h_0 も潮汐と一次的関係を持つ筈である。故に $h(t)$ の時間的關係は潮汐の時間的關係で決せらるべく、今潮高を $H = \sum_m H_m \cos(V_m t - k_m)$ とし、 n を或常數とすれば

(2) 前出

$$h_0(t) = \bar{h}_0 + nH = \bar{h}_0 + n \sum H_m \cos(I_m t - k_m) \quad (7)$$

こゝに \bar{h}_0 は平均潮位 ($H=0$) のときの静止水頭を表はす。

之を (6) 式に代入すれば

$$h = \bar{h}_0(1 - e^{-c't}) + c''n \sum \frac{H_m}{c''^2 + I_m^2} \left\{ c'' \cos(I_m t - k_m) + I_m \sin(I_m t - k_m) - (c'' \cos k_m - I_m \sin k_m) e^{-c't} \right\} \quad (8)$$

更に $c > I_m$ なることに注意すれば

$$h \approx \bar{h}_0(1 - e^{-c't}) + n \sum H_m \{ \cos(I_m t - k_m) - \cos k_m e^{-c't} \} \quad (9)$$

之は (2') 式に従ふべき温泉に潮汐の影響が加はる場合の一般式であるが、特に温泉 No. 1254 に於ける如く観測時間が二時間程度以内では更に簡単に行ふことが出来る。即ち短時間の間ならば近似的に潮位が時間と一次的関係にあつて $H \approx H_0 + \beta t$ と見なしてもよい場合が多い。さう云ふ時は

$$h_0 = \bar{h}_0 + n(H_0 + \beta t) = {}_0h_0 + n\beta t \quad (10)$$

と置ける。こゝに H_0 及び ${}_0h_0 = \bar{h}_0 + nH_0$ は $t=0$ の時の潮位及び温泉の静止水頭を表はす。

この (10) を (6) 式に入れると

$$h = n\beta t + \left({}_0h_0 - \frac{n\beta}{c''} \right) (1 - e^{-c't}) \quad (11)$$

今便利の爲

$$h'' = h - n\beta t, \quad h_0'' = {}_0h_0 - \frac{n\beta}{c''} = \text{常數} \quad (12)$$

と置けば、(11) から

$$h'' = h_0''(1 - e^{-c't}) \quad \text{或は} \quad \frac{dh''}{dt} = c''(h_0'' - h'') \quad (13)$$

といふ (2') 式と全く同形の式を得、 h'' が潮汐なき場合の h と全く同様の性質を有することが分る。

(11) 或は (13) 式を實測によつて檢證するには、先づ未知數 $n\beta$, c'' , ${}_0h_0$ (或は h_0'') の三つを定めねばならぬ。それには實測の (h, t) 圖か $\left(\frac{dh}{dt}, h \right)$ 圖から

$$t=0 \text{ (従て } h=h''=0) \text{ のときの } \left. \frac{dh}{dt} \right|_{h=0} = n\beta$$

別府温泉の湧出量と水頭との相関

で $n\beta$ を求め、 $\left(\frac{dh''}{dt}, h''\right)$ 圖を描きて

$$dh''/dt=0 \text{ のときの } h''=h_0''$$

$$h''=0 \text{ のときの } \frac{dh''/dt}{h_0''}=c''$$

第 4 表
温泉 No. 1254 泉孫旅館に於ける諸常数

観測番號	c	h_0	湖位 H_0	$n\beta$
(I)	$\frac{\text{min}^{-1}}{12.1}$	$\frac{\text{cm}}{145.0}$	$\frac{\text{cm}}{144}$	$\frac{\text{cm/min}}{\text{---}}$
(II)	11.4	152.1	126	-0.268
(III)	11.2	164.0	200	-0.178
(IV)	12.6	127.3	84	-0.123
(V)	12.8	105.0	76	+0.198
(VI)	12.5	96.7	22	-0.044
(VII)	11.3	112.7	80	+0.222
(VIII)	11.9	146.3	156	-0.115
(IX)	12.1	124.0	86	-0.110
(X)	11.2	108.9	86	+0.102
平均	11.91			

によつて c'' と h_0'' 従つて h_0 を算定する。之等を (11) に代入して (h, t) の理論曲線を畫き實測値と對照すればよい。

第 4 表は温泉 No. 1254 に就いて求めた各種の常数で之を以て計算した理論湧出曲線が第 5 圖に添記してある。

實測と充分一致して居ることが分る。

4. 特異性ある湧出曲線

別府市内温泉では殆んど何れも湧出量が湧出水頭と一次的關係を保つこと上記の如くであるが、只稀に然らざるもの若干あつた。即ち田の湯泉脈上にある No. 675, No. 679, No. 840 の三泉と濱脇温泉脈上の No. 1079 と都合四口が夫れである。第 5 表及び第 6 圖は夫れ等に就ての観測例で、湧出量と水頭との關係は明かに直線的ではない。自然湧出泉 No. 840 の外は寧ろ拋物線的關係にある。No. 1079 の観測値は資料欄に譲つて本文には略したが、それは濱脇の弱勢温泉脈なる事實を裏書するかの様に湧出水位を著しく低下すれば湧出量の動搖甚だしく水位との相関極めて不規則であるけれども、或高さ以上の水位では矢張り湧出量と水位との關係は拋物線的である。

然らば此の關係は果して如何なる數學式を以て表はし得るものであるかを知る爲に、實測値の $\frac{dh/dt}{(h_0-h)}$ と (h_0-h) との關係圖を作つて見る。前節で述べた一般の別府温泉で

別府温泉の湧出量と水頭との相関

第 5 表 特異性ある温泉

温泉 No. 675 末田耕太郎氏宅

深度 36m; 埋没管, 竹, 口径 3.8cm; tank 直径 67 cm; 泉温 55°.0C; 水位ノ 0 點ハ地下 202cm.

観測年月日 1937 Jan. 27th, 14^h29^m~15^h06^m

水位	時	$\frac{\Delta h}{\Delta t}$	水位	時	$\frac{\Delta h}{\Delta t}$	水位	時	$\frac{\Delta h}{\Delta t}$
cm 0	min 0.00	cm/min	46	7.30	cm/min	77	17.25	cm/min
5	0.65	7.69	49	7.95	4.62	78	17.87	1.62
10	1.28	7.90	52	8.63	4.39	79	18.53	1.50
15	1.96	7.14	55	9.37	4.09	80	19.25	1.39
20	2.77	6.38	58	10.13	3.92	81	20.03	1.28
25	3.52	6.67	61	10.97	3.60	82	20.93	1.11
30	4.32	6.25	64	11.87	3.33	83	22.00	0.94
34	5.02	5.17	67	12.87	3.00	84	23.23	0.81
37	5.55	5.63	70	13.93	2.81	85	24.73	0.65
40	6.10	5.45	73	15.18	2.40	85.5	26.02	0.41
43	6.68	5.15	75	16.18	2.00	86.5	28.45	0.41
46	7.30	4.86	77	17.25	1.87	87.0	31.78	0.15
						87.3	36.33	0.06

温泉 No. 679 關口別荘

深度 49 m; 埋没管, 竹, 口径 3.8 cm; tank 直径 60.0 cm; 水位ノ 0 點ハ地下 215 cm.

観測年月日 1937 Jan. 25th, 15^h31^m~15^h49^m

水位	時	$\frac{\Delta h}{\Delta t}$	水位	時	$\frac{\Delta h}{\Delta t}$	水位	時	$\frac{\Delta h}{\Delta t}$
cm 0	min 0.00	cm/min	24	4.38	cm/min	42	10.40	cm/min
8	1.28	6.24	26	4.87	4.18	43	10.98	1.72
10	1.60	6.31	28	5.37	4.00	44	11.67	1.46
12	1.98	5.22	30	5.87	4.00	45	12.52	1.18
14	2.32	5.99	32	6.45	3.43	45.5	13.12	0.83
16	2.70	5.22	34	7.07	3.24	46.0	13.67	0.91
18	3.10	5.00	36	7.78	2.79	46.5	14.30	0.79
20	3.50	5.00	38	8.43	2.86	47.0	15.42	0.45
22	3.88	5.22	40	9.33	2.35	47.5	16.63	0.41
24	4.38	4.00	42	10.40	1.87	48.0	18.43	0.28

別府温泉の湧出量と水頭との相關

温泉 No. 840 日名子旅館

自然湧出；泉温 48°C；水位ノ0點ハ地下 158 cm.

観測年月日 1936 Feb. 11th, 14th44^m~15th05^m

水位	時	$\frac{\Delta h}{\Delta t}$	水位	時	$\frac{\Delta h}{\Delta t}$	水位	時	$\frac{\Delta h}{\Delta t}$
cm 0	min 0.00	cm/min 2.50	cm 8	min 4.23	cm/min 1.43	cm 16	min 13.03	cm/min 0.90
1	0.40	2.31	9	4.93	1.43	17	14.15	1.03
2	0.83	2.07	10	5.63	0.70	18	15.12	0.87
3	1.32	1.88	11	7.07	0.71	19	16.27	0.91
4	1.85	1.76	12	8.47	0.83	20	17.37	0.94
5	2.42	1.62	13	9.67	0.85	21	18.43	0.91
6	3.03	1.76	14	10.85	0.92	22	19.53	0.94
7	3.60	1.58	15	11.93	0.91	23	20.60	
8	4.23		16	13.03				

は $\frac{dh/dt}{(h_0-h)}$ は Constant c'' になるのであるが、本節の特殊湧出口では常数ではなくて h 軸に傾いた直線に近い曲線になるのである 従つて之は

$$\frac{dh/dt}{(h_0-h)} = c'' - B(h_0-h)^m$$

即ち
$$\frac{dh}{dt} = c''(h_0-h) - B(h_0-h)^{1+m} \quad (14)$$

の形で表はされ、 $\left(\frac{dh}{dt}, h\right)$ 曲線は實際に拋物線と極めて近いことが分る。常數 c'' 及び B の値は $\left(\frac{dh/dt}{(h_0-h)}, h\right)$ 圖からか或は最小自乗法によつて求められる。第6表は其の結果

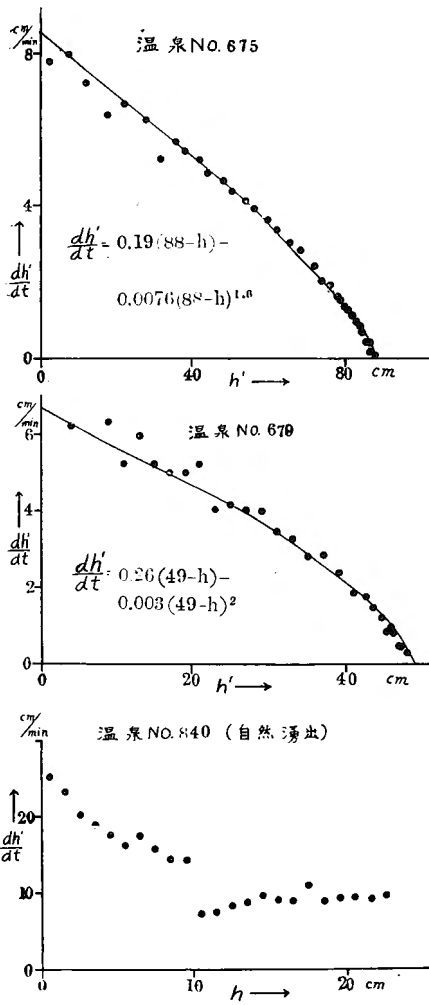
第6表 c'', m, B 表

温泉番號	c'' ($\times 1/a$)	B ($\times 1/a$)	$1+m$
675	$\frac{\text{min}^{-1}}{59.0}$ (0.187)	$\frac{\text{cm}^{-m} \cdot \text{min}^{-1}}{(2.4)}$ 0.0076	1.60
679	$\frac{\text{min}^{-1}}{(64.0)}$ 0.26	$\frac{\text{cm}^{-m} \cdot \text{min}^{-1}}{(0.75)}$ 0.003	2.00
1079	$\frac{\text{min}^{-1}}{(78.0)}$ 0.29	$\frac{\text{cm}^{-m} \cdot \text{min}^{-1}}{(11.6)}$ 0.043	1.30

であるが、(3式)に従つて c'' 及び B に $1/a$ をかけた値をも括弧内に併記して置いた。只自然湧出泉 No. 840 だけは、其の關係が複雑で而も水頭の増高が或程度以上になれば湧出量は少しも減ぜず、特異例中の特異例に屬する。

次に是等極少數の温泉だけが他の多くの温泉間に介在しながら異なる性質を呈するのは何故であらうか。此の問題に答ふるには、先づ第一に是等特異性の温泉が既述の如く何れも自然湧出泉であるか若くは自然湧出のある開放温泉脈上に位する事實に着目すべきである。第二に特異性の人工掘鑿泉は其の挿入導管が

第6圖 特異性ある湧出曲線



鐵管でなく竹管であり而も夫れが既に何十年も経過して古いものであることに留意すべきである。自然湧出ならば無論のこと、人工泉でも挿入導管が竹で年數を経ると次第に腐朽して其の途中に破損個處の出来ることが想像せられる。さういふ場合には温泉水位の昇降従つて湧出壓の大小により導管途中から温泉水の漏洩乃至浸入が起り、湧出量對水頭の正常關係に從はぬ場合があり得ると吾々は考へる。そして夫れが開放温泉脈附近の人工泉だと拋物線關係になつて然るべき理由があるのであるが、その邊のことは次節に詳論することとして、茲には特異性を呈することの可能な所以を述ぶるに止めて置く。尙ほ自然湧出泉では、別府市街地の様な幾段もの透水砂層がある沖積層中だと其の上昇水路は途中で周圍透水層と連絡があつて水の出入可能なばかりでなく其の連絡は種々複雑なものが多かるべきこと想像に難くない。従つて其の湧出量と水位との相関も種々複雑な特異性を呈す

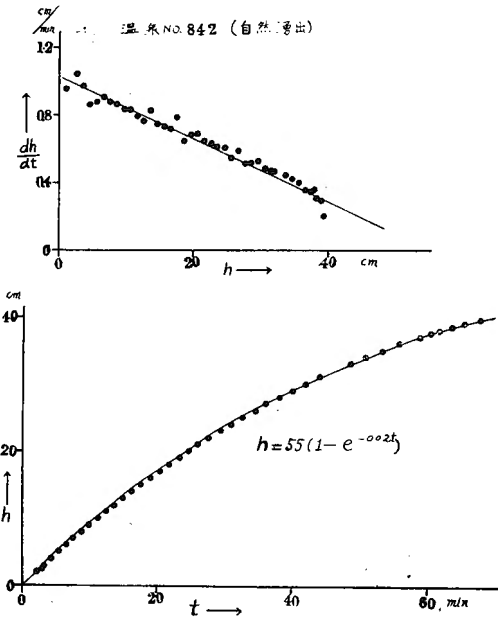
ることも首肯出来るわけである。

然らば自然湧出泉は皆特異性を發揮すべきかといふに、必ずしもさうとは限らない。例へば同じ田の湯脈に屬する自然湧出泉 No. 842 は、第7表及び第7圖に見る如く、殆んど(2')式の正常關係を満足する。之は非常に永年に渉る連續湧出のため、其の上昇路周壁に沈澱充塞が行はれて最早やパイプの様な漏洩のない水路を形成して居るのだと解される。No. 840泉とは極めて近接して存在し其の間隔は10米もない位なのに拘らず、兩者の對照が甚だしい。何れにしても自然湧出泉では地下の狀況により其の性質が色々に分れる

(4) 別府市内温泉臺帳抄；本誌第1卷第1號28頁。

別府温泉の湧出量と水頭との相関

第7圖 自然湧出温泉 No. 842 の正常湧出曲線



可能性が多いことだけは確かである。

終りに温泉 No. 434 / 10 では資料欄にある通り水位を幾回も下げたり上げたり繰り返して観測してみたが、同一水頭に歸る毎に dh/dt は同一でなく常に幾分減少を示した。之は勿論同温泉が海岸北埋立地にある関係上引き汐の影響であるが、潮汐の影響を引き去つても尚湧出量と水頭との関係は幾分拋物線的傾向を示して居る。然し潮汐作用が加味されると事態が愈々複雑になるので今は詳論しない。

第7表自然湧出温泉 No. 842 廣島館での観測

水位の0點は地下 164 cm; 観測年月日 1936 II 9th 14^h 34^m ~ 15^h 52^m

水位	時	$\frac{\Delta h}{\Delta t}$	水位	時	$\frac{\Delta h}{\Delta t}$	水位	時	$\frac{\Delta h}{\Delta t}$
cm	min	cm/min	cm	min	cm/min	cm	min	cm/min
0	0.00	0.95	15	17.42	0.78	29	39.92	0.52
2	2.12	1.04	16	18.78	0.71	20	41.85	0.48
3	3.08	0.97	17	20.18	0.78	31	43.93	0.46
4	4.12	0.86	18	21.47	0.64	32	46.13	0.44
5	5.28	0.87	19	22.03	0.68	33	48.40	0.44
6	6.43	0.90	20	24.52	0.69	34	50.68	0.42
7	7.55	0.87	21	25.97	0.64	35	52.10	0.39
8	8.70	0.86	22	27.53	0.63	36	55.68	0.35
9	9.87	0.83	23	29.12	0.61	37	58.62	0.34
10	11.07	0.83	24	30.77	0.61	37.5	60.12	0.35
11	12.27	0.79	25	32.42	0.54	38.0	61.58	0.20
12	13.53	0.76	26	34.28	0.58	38.5	62.27	0.29
13	14.85	0.82	27	36.00	0.51	39.0	65.05	0.20
14	16.07	0.74	28	37.95	0.51	39.5	67.65	

5. 湧出曲線の物理的意義

別府市内温泉は層状線:— 別府市内の温泉は一般に湧出口端を静止水頭より低下するに従ひ其低下量に比例して湧出量の増加を來す事實は、それ等の温泉水が地下に於て相當

面積に互り被壓状態の下に廣く瀰漫して居ることを裏書し、所謂被壓層狀温泉に屬することを示すものである。之は前論文⁽⁵⁾のボーリングによる研究とも一致する。

砂層の様な透水層内の地下水流動は Darcy 法則により

$$\frac{Q}{S} = \alpha \frac{\partial h}{\partial s} \quad (15)$$

で表はされる。こゝに S は透水層の垂直斷面積、 Q は s を通過する地下水流量、 s は S に直角な方向の距離、 h は水頭で、 α は透水率又は地常數 (Soil Constant) と稱する透水層の性質に關する常數である。此の様な性質をもつた含水層が廣く水平に擴がつて居る處に垂直井戸を穿つて水を連續汲出すときは井戸内の水頭は低下する。而して其の汲出量と水頭低下量との關係は Thiem⁽⁶⁾ の井戸理論によると

$$\text{被壓地下水の場合 } q = d'(h_0 - h) \quad (16)$$

$$\text{不壓地下水の場合 } q = d'(h_0 - h) - B'(h_0 - h)^2 \quad (17)$$

の如くなるべきである。こゝに q は單位時間毎の汲出量、 h_0 と h は靜止水頭及び現水頭、 d' と B' とは地常數や井戸の直徑や透水層の厚さなどに關する常數である。別府温泉の大部分は (16) 式を満足するから被壓層狀泉たることは明かで、不透層間に挟まれた透水性地層内に温水が充満してアルテシアン狀になつて居ると斷言してよい。只第4節に述べた特異性温泉若干口だけは、其の泉底から被壓層狀の温水を湧出する上に導管中途の含水層からも導管の破損部を通じて別系の湯も這入つて来る。特に是等特異性温泉は何れも開放温泉脈附近にある關係上、地面眞下の不壓温水 (自然湧出があつたり地下を一寸掘ればすぐ湯が出るなどの事實から其の存在は確實) が混入して湧出するので (17) 式に近い關係が成立するのである。現實の關係 (14) が (17) 式と完全に同じでないとしても、それは不壓温水層と泉管との連絡が (17) 式を導いた様な理想的完全連絡でないことから起る差異と思はれる。何れにせよ是等數口の特異性温泉は、被壓温水の外に地面眞下の最上層不壓温水をも混じて不壓層狀泉の性質をも加味したものと斷定してよい。

氣壓係數と水頭係數との比較:— 水頭 h_0 , h による壓力を絶對單位で表はし P_0 , P とすれば、別府温泉の湧出量對水頭の關係式 (1) は

(5) 野滿, 山下: 別府舊市内の地中溫度分布と温泉脈; 本誌第2卷第3號233頁。

(6) A. Thiem: Das Wasserwerk der Stadt Nürnberg, 1879.

E. Prinz: Lehrbuch der Hydrologie, 1923, SS. 169-171.

$$q = \frac{c'}{g\rho}(P_0 - P) = \frac{ac}{g\rho}(P_0 - P) \quad (1')$$

となる。 g は重力加速度, ρ は水の密度である。

此の式は別府温泉に及ぼす⁽⁷⁾気圧影響と全く同形式であり, 而も第2表に得た水頭効果係数 c の値と先きに研究した気圧効果係数 c' とを対照すれば略ほ同程度であることを知る。此のことは気圧の温泉湧出量に及ぼす影響が如何なる機構によるかを指示する有力な材料である。

抑も気圧が温泉に作用し得る方法を想像して見ると, 湧出口直上から水頭の増減と全く同様に湧出圧を調節すること, 海面上の気圧變化が海底壓の變化を來して海底より温泉底壓を調節すること, 気圧が地面を壓して地層内の温水搾り出しをなすこと等が考へられる。其の内, 海上の気圧變化は海水の昇降を伴ひ結局海底壓には大差なく, 爲めに海底を通じて温泉湧出量に影響を及ぼすことは殆んどないことは既述の通りである。地層の壓縮による搾り出し作用だと, 気圧が増せば湧出量は増加すべきであるのに事實は其反對で気圧と湧出量とは負の一次的關係にあるから, 絞り出しの作用によるものでないことは明である。従つて気圧の効果は主として湧出口直上から湧出圧を調節するにあるといふべく, 結局本論文中の水頭の作用と全く類似の性質である。而も気圧係数と水頭効果係数とが同程度なることは一層上の斷定を確ならしめ, 気圧による地盤の絞り出しや海底壓を通じての作用などはあるにしても極めて小なることを示すものである。

6. 結 論

以上數節に亙つて述べたことを要約すれば

- 1) 温泉は湧出口上端を低く下ぐれば下ぐる程湧出量を増すが, 其の増し方は別府市内温泉の大部分では靜止水頭 h_0 から現水頭 h までの低下量 $(h_0 - h)$ に正比例する。
- 2) この事實は別府市内温泉は被壓層狀温泉に屬し, 上下不透水層で挟まれた透水層内一杯に温泉水が充滿して廣く瀰漫して居ることを示す。
- 3) 別府市内温泉中極めて少數の温泉は, 湧出量と $h_0 - h$ とが拋物線的關係を示す。そして是等の特殊温泉は何れも自然湧出のある開放温泉脈上にある。

(7) 野満, 瀨野, 中日 別府温泉と潮汐附氣壓效果; 本誌第2巻第1號1頁。

別府温泉の湧出量と水頭との相関

4) 是等少数の特異温泉は泉底より被壓層狀水を導入する上に、最上部不壓温水と連絡があつてその温水をも混合湧出せしめて居るに違ひない。即ち**不壓層狀泉**の性質をも併有して居る。

5) 以上何れにせよ、別府市内温泉の源湯は皆層狀で而も大部分は**被壓状態**にあり只開放温泉脈の附近だけは地面直下の最上透水層にも含まれ自由表面を有する**不壓状態**にある。

6) 湧出量に及ぼす氣壓の影響係数は水頭效果係數と略ほ同程度である。之は氣壓の作用が水頭の作用と同性質のもので、湧出口上端の湧出壓を調節するによることを示す。