

地球物理

第 2 卷 第 2 號

昭和 13 年 3 月

論

說

別府温泉涵養源としての雨量*

理學博士 野 滿 隆 治

理 學 士 池 田 亮 二 郎

理 學 士 瀨 野 錦 藏

別府温泉の内には大雨と共に湧出量が激増し旱天に漸減すること頗る顯著なるものあり、特に山の手に近い温泉ほど然りで、温泉水の大きな部分が雨水に基づくことは瞭然として明かなるものがある。

本論文は主として温泉涵養源の闡明といふ立場から、別府温泉の年変化及び永年変化と其の諸因を討究して之が定量的分析を試み、次に市内全泉の年湧出量と受水域年雨量とを對比して別府温泉の水量が如何に豊富なものであるかを示し、更に降雨の餘效が何年位は認められるか、温泉水中處女水が幾割位あるか等、温泉水の起源にまで論及せんとするものである。降雨影響の地方的差異や、降雨後幾日目位より影響を及ぼし始めるや等、温泉と雨量の関係には尙ほ幾多の興味ある問題があるけれども、夫等は總て別の論文に譲ることとする。

1. 湧出量年変化と其の諸因

1) 観測材料:— 別府温泉湧出量年変化の大勢は、既に前々號⁽¹⁾に於て、大正十四年四月より十五年三月まで一ケ年の 63 口平均と、特定の 8 口十ヶ年平均とが示してある。特に大

* 本文の前半は昭和十年四月大阪に於ける日本數學物理學會總會にて發表した。

(1) 別府温泉概観, II; 本誌第1巻第4號267頁

別府温泉涵養源としての雨量

正十四年は其の九月に別府研究所開設以來の記録的豪雨があつて特殊の重要性を有して居るが、然し資料欄に掲載中の別府温泉繼續観測表中には尙ほ年變化研究に利用すべき材料が豊富に残つて居るので、我等は其内から申分のないものだけは全部拾ひ上げて研究の精確を期したい。

別府温泉の繼續観測は大正十四年四月以來今日まで多數の湧出口につき毎週一回行はれて來たが、不幸にして昭和六年三月から昭和七年一月までは研究所の事情により全部缺測となつて居り、其の他でも年により観測泉を變更し或は口數を増減して居るし、又所有者に於て浚渫改掘其他の手入れを行つたものもあつて、観測結果全部を其の儘採用する譯には行かない。

依て茲には、先づ一ケ年連續記録があつて中途に缺測も改掘もない湧出口のみを選び出し、第1表の様な温泉番號のものを得た。昭和五年四月より昭和六年二月までの観測は僅か二ケ月の不足とはいへ一年に満たないから止むなく割愛した。

第1表 年變化研究に利用した湧出口表

年次	大正14年4月ヨリ 昭和2年3月マデ	昭和2年6月ヨリ 同 3年5月マデ	昭3年6月 ～4年5月	昭4年6月 ～5年5月	昭7年2月 ～8年1月	昭8年2月 ～9年1月	昭9年2月 ～10年1月
温 泉 番 號	4 343 544 868	31 343 692	4 820	4 671	4	58	4
	17 357 561 910	58 357 751	31 1040	31 771	58	130	58
	62 370 564 992	92 409 771	58 1153	58 801	87	343	87
	69 383 666 996	110 418 820	180 1291	87 1291	130	472	130
	92 409 675 1153	120 451 935	343	130	343	671	343
	100 430 692	130 472 996	418	343	418	1040	418
	130 451 771	147 506 1040	472	418	472	1153	472
	173 506 781	173 530 1045	530	472	530		564
	233 511 820	189 542 1050	542	530	542		634
	243 526 823	233 564 1153	571	542	580		813
	258 530 838	240 646 1280	671	564	671		1153
	279 534 854	263 671 1283	771	571	801		1260
	291 539 861	291 685 1291	801	580	1153		
口數	44	39	17	17	13	7	12

かくて8ケ年に亙り延湧出口193口について湧出量の月平均を算出し第2表を得た。其のグラフは第1圖中に描いてある。

別府温泉涵養源としての雨量

第2表 湧出量統計（毎分リットル単位） 各年観測口湧出量合計と其全平均

月 年	四月	五月	六月	七月	八月	九月	十月	十一月	十二月	一月	二月	三月	口数
大正十四年 (1925)	473.60	496.76	511.08	522.59	506.96	583.81	552.93	534.07	511.33	487.53	483.91	484.15	44
大正十五年 (1926)	448.84	447.65	458.22	452.40	441.84	471.35	445.54	425.76	428.81	412.82	377.00	399.39	44
昭和二年 (1927)			490.62	495.64	507.10	541.23	532.71	499.81	472.62	463.08	447.96	446.19	39
昭和三年 (1928)	435.42	432.34	215.65	226.64	238.61	241.54	230.16	229.22	214.35	206.18	202.65	193.76	17
昭和四年 (1929)	185.97	187.52	220.14	257.70	249.06	246.03	248.54	240.88	233.81	226.71	207.36	209.04	17
昭和五年 (1930)	197.24	201.63											17
昭和六年 (1931)											148.08	180.24	13
昭和七年 (1932)	124.32	120.41	147.23	169.53	166.09	166.07	165.64	155.28	149.64	135.67	60.10	58.01	13
昭和八年 (1933)	55.89	56.34	56.17	54.88	54.37	53.00	55.40	55.63	50.26	51.30	150.37	149.51	7
昭和九年 (1934)	143.08	141.36	133.43	132.69	127.78	142.24	141.17	148.31	142.77	141.52			12
延 口 数	193	193	193	193	193	193	193	193	193	193	193	193	193
全 平 均	10.70	10.80	11.57	11.93	11.87	12.67	12.29	11.86	11.42	11.01	10.76	10.73	

こゝに全平均といふのは勿論 193 口全部の平均であるから、各年度平均からだとなれ夫れ
の年の重さ(統計口数)を附した平均に當る譯である。又毎年度の季節的變化は統計湧出
口数の同じもの(大正十四年度と五年度)は勿論二年連續して考へてよいが、然らざるもの
は一年一年別々に切り離して見ねばならぬ。

忖斯くして得た別府温泉全平均年變化の狀勢は勿論大體に於て前々號所載のそれと一致
するが、然し今度は湧出量最小の月が五月になつたり多少修正された點もないではない。

然らば此の如き別府温泉の湧出量年變化の原因は何何であらうか。又それ等諸原因の相
對效果は如何なる比になつて居るであらうか。元來一般に温泉湧出量に影響を及ぼすと考
へられるものは

- (I) 内的原因: (1) 處女水量の變化
(2) 温泉水路の變化(水脈の變遷, 上昇管の閉塞或は擴大等)
- (II) 外的原因: (3) 浸透水の變化(雨量)
(4) 凝結水の變化(濕度或は飽差)
(5) 氣壓の影響
(6) 潮汐の影響

別府温泉涵養源としての雨量

などである。この内 (I) は地震や火山爆發其他突發的事件により間々異變を見ることがある以外には、永年變化に關してこそ重要であつても短期の季節的變化を論ずる限り考慮外に置いて宜からう。(II) の内(5)(6)は單に温泉湧出の調節瓣に當るもので、温泉水量の實質的増減を來すものではない。温泉水量の實質的變化を與ふるものは只(3)(4)あるのみである。(4) の凝結水とは空氣中の水蒸氣が地中の空隙内で冷却凝結するものを意味し、普通の地下水起源の一因として北歐の學者に強調せらるゝ所ではあるが、北歐の如き寒冷地方で而も降雨の少ない處では兎も角、別府の様な地温高き火山温泉地帶で而も雨量甚大なる場合には凝結水は假令あるとしても雨水の滲透に比して度外視し得べきことは何人も異存があるまい。勿論我々は後に飽差の調査もするが、果して此の豫想を裏切つて居ない。かくて別府温泉の涵養源としては雨が最も重要な外的要素であり、雨量の季節的變化は則ち温泉湧出量季節變化の一要因たることに疑ひはない。然し前掲の第2表乃至第1圖に示された湧出量年變化は雨量の影響の上に其の出方を調節する氣壓及び潮汐の効果が加味されて居る筈である。依て吾人は茲に湧出量年變化を雨量、氣壓、潮汐の三效果に分析し、其の相對比を決定したい。

之が爲めには先づ雨量、氣壓、潮位そのものの年變化を知らねばならぬ。第3表は即ち夫れ等の基礎材料を示すもので、其のグラフは第1圖に描いてある。

第3表 氣象要素及び海面年變化

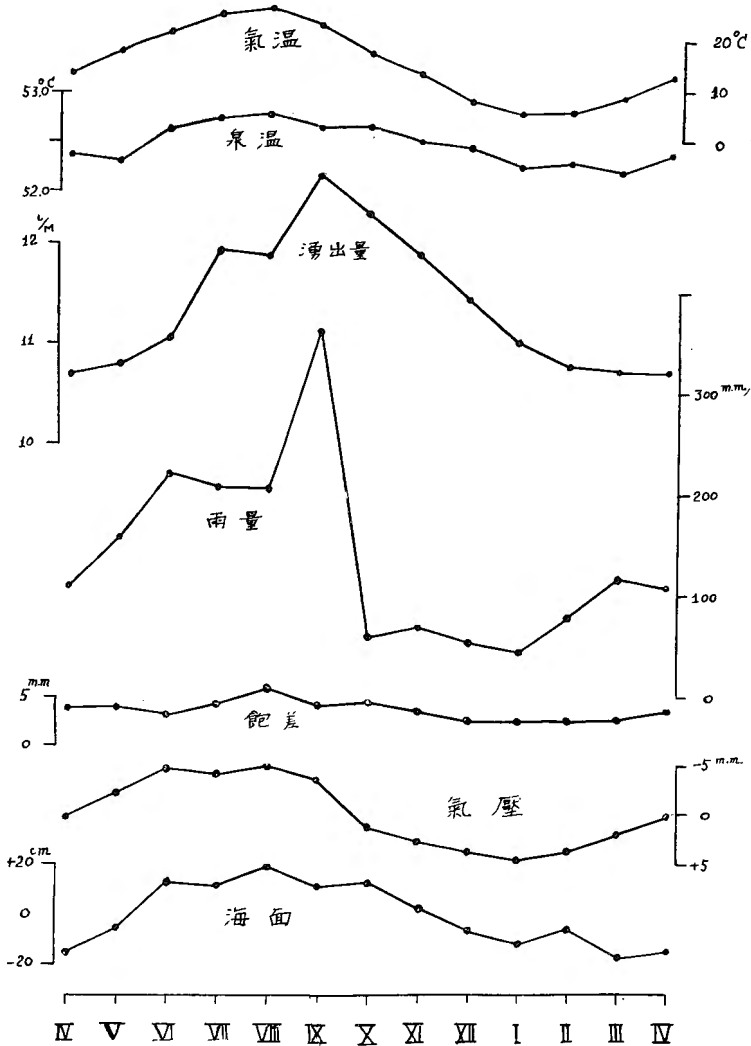
月	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII	I	II	III	平均
雨量 (mm.)	103.1	154.8	220.5	209.8	206.8	360.5	58.5	69.5	53.5	43.9	78.0	116.3	137.0
氣壓 (+700 mm.)	55.1	52.9	50.3	51.1	50.2	51.6	56.3	57.8	58.7	59.5	58.8	56.9	754.9
飽差 (mm.)	3.1	4.2	3.1	4.2	5.7	4.0	4.4	3.5	2.4	2.4	2.5	2.9	3.5
海面 (cm.)	117	126	145	143	151	143	145	134	125	120	126	114	132
海水比重 σ_t	24.83	24.54	24.50	24.29	23.85	22.68	24.59	24.77	24.89	24.84	24.79	24.96	24.46

尤も茲に一言注意して置きたいことは、雨量氣壓等の氣象要素年變化は本誌第1卷第2號⁽²⁾に十ヶ年平均が出て居るけれども、それは我々の今の目的には使へない。何故なら我々の温泉湧出量年變化は第1表に示された延193口の平均である以上、それと對照すべき氣

2) 別府の氣象； 本誌第1卷第2號105頁

別府温泉涵養源としての雨量

第1圖 湧出量, 泉温, 各種氣象要素並びに海面の年變化圖



象要素の年變化も相對應する年度に前同様の^{ウエイト}重さを附して平均したものでなくてはならぬ。第3表の値は本誌第1卷第2號の氣象各年報からその様にして作つたものである。只海面年變化だけは残念ながら多年に亙る材料がなく、僅に昭和七年の大分港築港事務所の驗潮記録を海軍水路部が整理して得た結果があるので、それを借用した。又海水比重は別府⁽³⁾灣内に於ける同年度の大分縣水産試験場の觀測値を⁽⁴⁾頂いた。これでは材料が多少不充分と

(3) 大分港の潮汐に就て；水路要報，昭和8年11月，475頁

(4) 大分縣水産試験場事業報告 昭和六—七年度

別府温泉涵養源としての雨量

思はれるか知れぬが、然し幸にも平均海面年變化の範圍は、日々の満干が潮差 2 米にも及ぶとは事違ひ、高々三四十センチに過ぎないから、其の湧出量に及ぼす影響は僅少にすぎないことが豫期せられるので、一ケ年の觀測材料を用ひても大して氣にするにも及ぶまい。

海面昇降が湧出量に影響を及ぼすのは海底水壓の變化によるものであるが、然し海面の季節的昇降は全部其の儘海底壓の變化を生ずるものではない。依て茲に準備として海底壓變化となる實效海面昇降を算出して置くを便とする。嘗て著者の一人(野滿)⁽⁵⁾が研究せる處によると平均海面の年變化は海水比重、氣壓其の他によつて靜力學的釣合にあるものと考えてよく、従つて數百米以上の深さを持つ海で深部の海水が水温も鹽分も殆んど年變化をしない場合には假令海面の高さに年變化があつても海底壓力には變化がない譯である。只海が淺く海底まで海水比重の變化を見る場合には夫れに應じて海底壓力の増減を見るのである。別府灣内は最深 70m 餘で海岸からの平均深度 35m 程度であるから、水温年變化は其の底にまで及ぶのでこの海底壓は當然年變化をする筈である。今之を計算するには、海面の實測昇降から海水比重 σ_t (0, 20, 40, 60 米平均) 及び氣壓による昇降を引去ればよい。第 4 表は前記の海面及海水比重と氣壓から計算した結果である。

第 4 表 海底壓に影響する實效海面年變化

		一月	二月	三月	四月	五月	六月	七月	八月	九月	十月	十一月	十二月
(i)	海面年變化 偏 差	cm -12	-6	-18	-15	-6	13	11	19	11	13	2	-7
(ii)	$\Delta\sigma_t$ 偏差	0.38	0.33	0.50	0.37	0.08	0.04	-0.17	-0.61	-1.78	0.13	0.31	0.43
(iii)	海面へ影響 $-\Delta\sigma_t \times \frac{3500}{1000}$	cm -1	-1	-2	-1	0	0	1	2	6	0	-1	-2
(iv)	氣壓が海面 へ及ぼす影響	cm -6	-5	-3	0	-3	6	5	6	4	-2	-4	-7
(v)	(iii) + (iv)	cm -7	-6	-5	-1	-3	6	6	8	10	-2	-5	-9
(vi)	(i) - (v)	cm -5	0	-13	-14	-3	7	5	11	1	15	7	2

上表にて

$$\text{比重の海面への影響} = -\frac{\Delta\sigma_t}{1000} \times 3500 \text{ cm}$$

$$\text{氣壓 } p \text{ の海面への影響} = -\Delta p \times 13.2 \text{ cm}$$

5) T. Nomitsu: The Causes of the Annual Variation of the Mean Sea Level along the Japanese Coast. Mem. Coll. Sci. Kyoto Imp. Univ. Ser. A, Vol. X, No. 3, 1927.

T. Nomitsu: On the So-Called "Grenzfläche" in the Current due to the Difference of Density. Ditto. Vol. X, No. 3, 1927.

を意味する。海深は平均 35 m と假用した。

2) 湧出量に及ぼす氣壓及び海面效果：— 扨愈これから別府温泉湧出量年變化を分析し各原因の效果を算定しやう。

氣壓の湧出量に及ぼす作用については別論文⁽⁶⁾によつて明かにされた如く、温泉湧出口上端の抑壓力増減によるもので、氣壓大となれば湧出量減じ氣壓小となればその増加を來たす。而して氣壓效果係數を c とし別府温泉 7 口につき調査の結果、平均として

$$\text{氣壓係數 } c = 8.6 \text{ min.}^{-1} \dots\dots\dots(i)$$

を得て居る。

又海水壓の別府温泉湧出量に及ぼす影響率⁽⁶⁾は之を h とし別論文⁽⁶⁾に日日の潮汐影響を調査して求めたものが相當多數にあつて、平均を出すと

$$\text{海面 1 cm の上昇につき湧出量増加率 } h = 0.024 \text{ リットル/分} \dots\dots\dots(ii)$$

である。

是等の氣壓係數及び潮汐係數は大體の程度を示すものとしては眞に有意義であるが、直ちに之を別府全市に適用することは妥當を缺ぎ必ずや過大の結果を與へるであらう。何故ならば我々が氣壓及び潮汐係數を計算し得た温泉は當然夫れ等の影響が顯著で分離研究の可能なりしものばかりである。夫れ等の影響が微少で不明瞭なため係數決定の出來兼ねるものが多數にあるから、市内温泉全部の平均係數は必然上記の数値よりも遙に小さく半分程度のものであらうことは想像出来る。扨然らば實際に於て全市の平均係數として何程に取つたらよいかをきめるために、吾々は次の様な工夫をした。

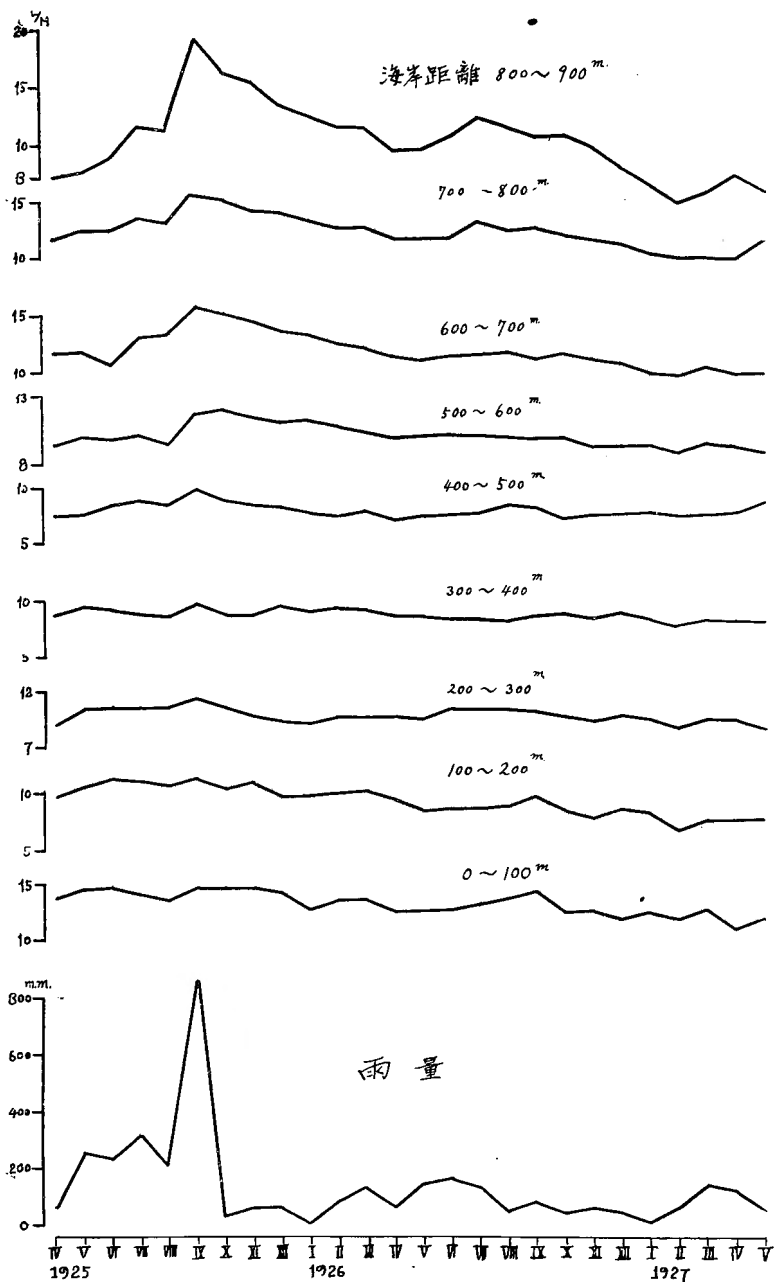
大正14年4月から昭和2年5月まで二ケ年の間は最も順調に44口といふ多數の湧出口につき觀測が續けられて居るから、其の湧出量を海岸距離によつて分類統計し100 m づゝに區切をつければ第2圖の様になる。之によると雨量の影響は海岸より遠きものに於て著しく海岸に近づくにつれ小となることが明瞭である。此の點に着目して上述の十ヶ年平均年變化統計を全部海岸よりの距離によつて分類すれば、第3圖の様になる。之についても雨の効果が海岸に小さく山の手に大なることは看取される。

そこで先きに得た少數温泉の潮汐係數 ($h=0.024$) と氣壓係數 ($c=8.6$) とを其儘全市に適用出来るものと假定して、氣壓潮汐の兩作用による湧出量年變化を計算して見ると第3

6) 野滿, 池田, 瀬野: 別府温泉と潮汐附氣壓效果; 本誌第2卷第1號1頁

別府温泉涵養源としての雨量

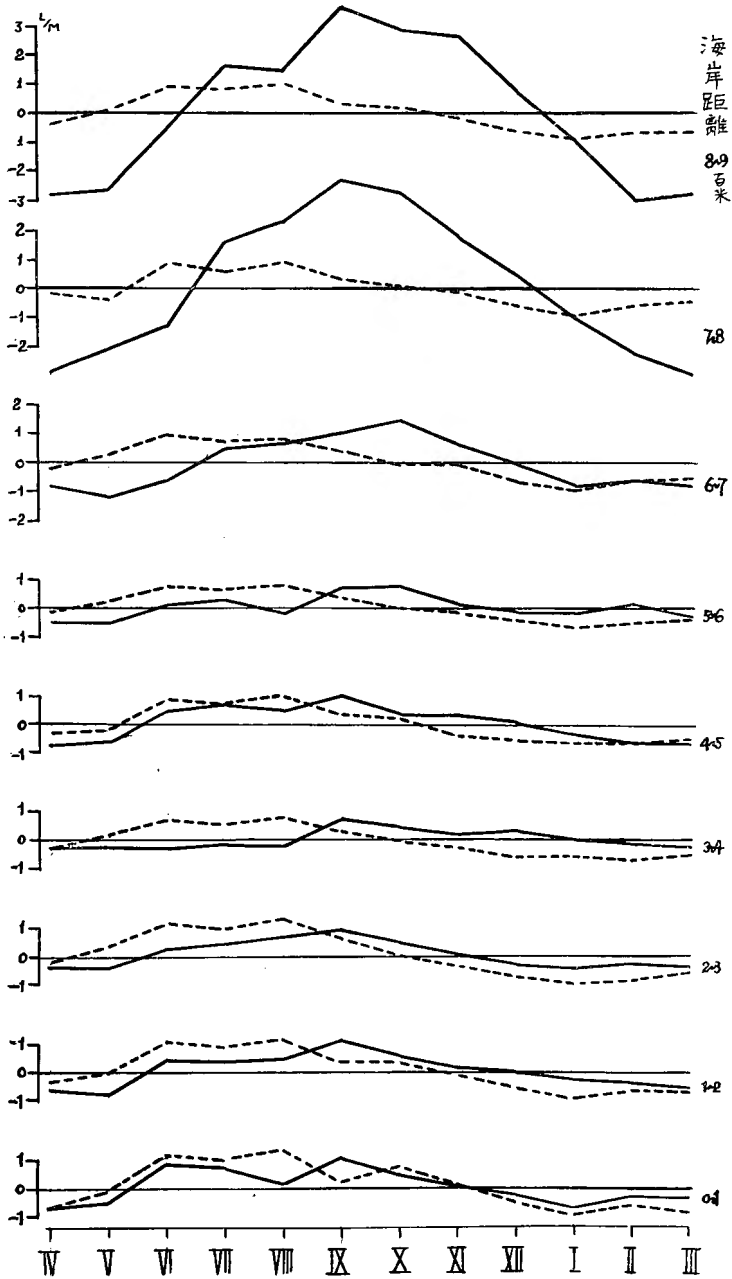
第2圖 湧出量變化と海岸距離との關係



圖に點線で示した様なものになる。之によると海岸距離 6~7 百米以上の湧出口については降雨の影響最も著しく爲めに氣壓潮汐の影響はかくされて直接には見にくいが、海岸距

別府温泉涵養源としての雨量

第8圖 湧出量十ヶ年平均年變化(實線)及び假算潮汐氣壓效果(點線)と海岸距離との關係



離 5~6 百米以下に於ては實際の變化と氣壓潮汐の影響と兩者の間の並行性が明瞭になつて来る。只注意すべきことはこの兩者並行でありながら常に計算値(點線)の方が過大にな

別府温泉涵養源としての雨量

つて居る。その割合は海岸距離0~1百米より5~6百米に至る全部につき平均すると、實測値÷計算値=0.54を得る。即ち全市に互る氣壓及潮汐係数は先きに得た少數泉の平均値(i)(ii)よりも約半分の0.54をかけたものになることを示すのである。尤も以上は潮汐と氣壓との合併作用についてのことで、各單獨に如何なる割合で減じられねばならぬかは明かでないから、止むを得ず茲には兩者とも減率を同じく0.54とする。

かくて全市に互る氣壓及び潮汐係数の平均値が推定出來た以上、別府市内全温泉の平均年變化中氣壓及び潮位による部分を算定することは容易である。即ち第3表の氣壓偏差に氣壓係数を、第4表の實效海面年變化に潮汐係数を乗すればよい。第5表及び第6表は斯くして得た氣壓及び海面效果である。

第5表 氣壓による湧出量年變化

月	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII	I	II	III
氣壓偏差(mm)	0.2	-2.0	-4.6	-3.8	-4.7	-3.3	-1.4	2.9	3.8	4.6	3.9	2.0
湧出量へノ影響(L/M)	-0.02	+0.18	+0.41	+0.34	+0.42	+0.30	+0.13	-0.26	-0.34	-0.41	-0.35	-0.18

第6表 海面年變化による湧出量變化

月	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII	I	II	III
實效潮位(cm)	-14	-3	7	5	11	1	15	7	-2	-5	0	-13
湧出量へノ影響(L/M)	-0.17	-0.12	+0.08	+0.05	+0.10	+0.08	+0.22	+0.10	+0.01	-0.07	-0.01	-0.16

3) 雨量の湧出量に及ぼす效果:— 上記の氣壓海面兩効果を湧出量年變化全量から引去つた殘餘は雨量の直接效果と見てよいであらう。即ち第7表の通りである。

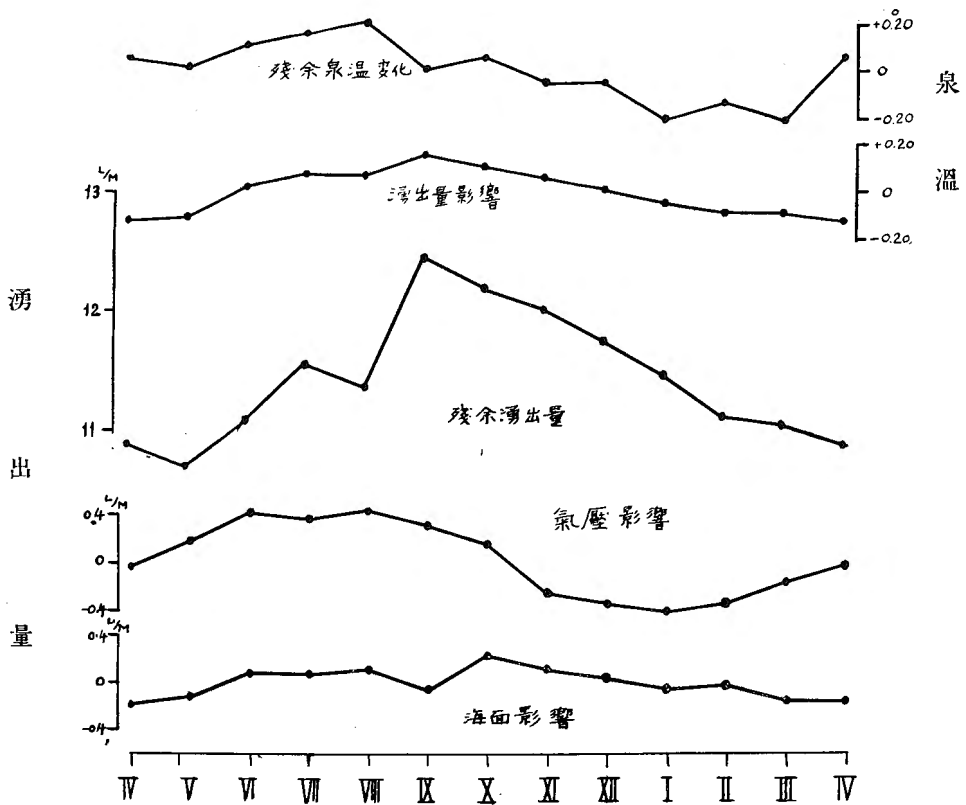
第7表 雨量效果 (L/M)

月	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII	I	II	III
全湧出量	10.70	10.80	11.57	11.93	11.87	12.67	12.29	11.86	11.42	11.01	10.76	10.73
氣壓の效果	-0.02	+0.18	+0.41	+0.34	+0.42	+0.30	-0.13	-0.26	-0.34	-0.41	-0.35	-0.18
海面效果	-0.17	-0.12	+0.08	+0.05	+0.10	-0.08	+0.22	+0.10	+0.01	-0.07	-0.01	-0.16
殘餘湧出量(雨量效果)	10.89	10.74	11.08	11.54	11.35	12.45	12.20	12.02	11.75	11.49	11.12	11.07

以上の結果を圖示すれば第4圖のようになる。勿論この殘餘年變化の内には雨量效果の外に自然老衰及び凝結水の效果も這入つて居るか知れぬが、第1圖にある飽差の年變化と湧

別府温泉涵養源としての雨量

第4圖 延193口10ヶ年平均の湧出量及び泉温年變化の分析



出量變化の趨勢とを一見すれば凝結水は殆んど考慮の要なきものの様である。即ちドイツ學者の所謂ベルリン型ではなくて寧ろバリ型である。實際茲に得た湧出量年變化の殘餘と雨量年變化とを對照すれば、其間に密接な關係が明瞭に認められる。曲線の外形だけでは可なり違つた變化の處もある様に見えるが、それは畢竟雨の餘效が雨後數ヶ月も殘ることを考へると一々成る程と背ける。即ち五月に最小であつた湧出量も六月の梅雨で俄然増加し始め、七月は多少雨量を減するも尙ほ年平均量よりは遙に多いから梅雨の餘效と相俟つて湧出量は増進の形勢を止めない。しかし八月に入ると雨が更に減るから湧出量も幾分減退する。九月颱風期になれば豪雨頻に至るから雨量と共に湧出量は一大躍進をなし一年中の最大に達する。それ以後一月まで雨量は激減するが、梅雨から颱風期にかけた多雨期の餘效で湧出量は若干の遞減を示すのみで尙優勢を持続する。一月より四月まで雨量に多少の増加を見るも尙年平均雨量に比すれば遙に少い乾燥期を脱しないから、湧出量遞減の趨

別府温泉涵養源としての雨量

勢は止まないで五月の極小に達する。其の他、月雨量の僅小な變動も一々湧出量變動の上に照應して其の跡が認められる。即ち湧出量の増進期に雨の少い月があると直ちに夫れだけ増進率が抑へられ、又乾燥期の湧出量減退中に多少の雨があれば夫れに應じて減退率が緩められて居る。

以上要するに、別府温泉湧出量の年變化は雨量・氣壓・海面の三效果によることが明かになった。而して其の三效果の相對比は第7表の振幅比を取つて大體

$$\text{海面:氣壓:雨量} = 0.39:0.83:1.17 \div 1:2:5$$

の割合なることを知る。尙此の三因とも何れも湧出量を夏期に大、冬期に小ならしめんとする方向に作用するが、實際の湧出量は雨量の餘效によつて晩夏より秋期に優勢で位相が、多少ずれ延びて居る。雨量の餘效に就ては更に項を改めて別に精密に考究する積りである。

2. 泉温年變化と其の諸因

別府温泉の泉温年變化に就きても湧出量のそれと同様に10ヶ年に亘る延湧出口193の平均を算出して第8表を得る。

第8表 別府温泉の泉温統計 (°C)

月 年	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII	I	II	III	口数
大正四年 (1925)	2340.5	2344.1	2344.9	2349.0	2351.5	2352.2	2347.3	2338.8	2334.3	2328.3	2325.6	2322.9	44
大正五年 (1926)	2324.4	2326.1	2326.7	2323.3	2328.4	2322.3	2319.5	2309.0	2314.6	2300.1	2292.4	2288.1	44
昭和二年 (1927)			2056.5	2060.1	2058.6	2052.9	2050.5	2040.3	2022.1	2026.4	2019.5	2020.9	39
昭和三年 (1928)	2017.7	2015.2	878.3	877.8	876.3	875.5	886.2	888.4	885.7	882.1	881.4	877.6	17
昭和四年 (1929)	876.1	876.5	896.0	902.4	901.9	900.0	899.6	899.3	898.2	895.1	892.3	891.2	17
昭和五年 (1930)	887.1	888.9											17
昭和六年 (1931)											695.5	694.0	13
昭和七年 (1932)	691.4	688.3	688.9	689.2	688.1	685.8	687.0	684.9	684.1	682.7	352.3	352.1	13
昭和八年 (1933)	356.2	352.4	351.5	348.5	355.7	353.4	352.8	351.2	350.5	352.7	628.3	627.3	7
昭和九年 (1934)	624.8	622.6	617.3	615.6	616.8	616.5	617.7	619.2	619.5	614.7			12
延口数	193	193	193	193	193	193	193	193	193	193	193	193	193
全平均	52.42	52.38	52.63	52.71	52.74	52.64	52.65	52.50	52.43	52.24	52.28	52.20	52.49

尙序に同様にして計算した平均気温を第9表に掲げ、泉温気温共にグラフとして第1圖中に併記した。

第9表 別府気温平均年変化 (°C)

月	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII	I	II	III	平均
気 温	12.7	17.4	20.6	25.1	26.0	22.6	17.1	12.0	7.9	5.4	5.6	8.2	15.1

第8表に得た泉温年変化は之を本誌第1巻第4號に掲げた泉温年変化と比較するに、其の(b)63口平均とは大體に一致し夏季に高く冬季に低くなつて居るが、然し(a)8口10年平均とは一致しない。然し之は當然なるべき理由があつて前掲の(a)は宜しくない。それはあの時の統計表(第2表)中にも記載ある通り8口の内4口まで途中に改掘乃至浚渫が行はれて居るのである。依て別府温泉の泉温年変化としては本論文の第8表を採用するが最も適切である。

扱泉温変化の原因として考へられるは第1に気温(及び表層地温)である。第1圖中の気温と泉温との曲線を眺めると、確に密接な關係のあることが看取される。然しそれだけでは説明されぬ部分もある。即ち泉温の極大は気温のそれと同様八月にあるが、極小は五月で湧出量の極小月と一致する。其他大體の形勢が、初夏に於ける泉温の上昇は急で秋季に於ける泉温の低下は緩徐となつて、湧出量の急増漸減狀況に一脈相通するものあるを發見する。即ち泉温変化の第二原因として湧出量の變化を數へなければならぬ。

事實我々は別論文⁽⁷⁾に於て潮の満干等による短週期の湧出量變化に伴つても確實に泉温の變化あることを調査研究した。従つて湧出量に影響を與ふるものは總て泉温変化の原因といへぬこともないが、然しそれ等は皆間接的のものであつて直接影響を與ふるものとして湧出量を以て代表せしめて宜い。然らば湧出量が泉温に影響する機構如何といふと、それは前記の別論文に明かにした如く別府では湧出口導管中を温水が上昇する間の冷却によるもので、湧出量多く上昇に要する時間が短ければ短い程冷却少く湧出泉温は高いのであつた。そして其の冷却温度は

$$T_b - T_n = -\frac{2\pi r l}{q} k \frac{\partial T}{\partial r} \dots\dots\dots (iii)$$

(7) 野満, 瀬野, 中目: 別府温泉と潮汐附氣壓效果; 本誌第2巻第1號1頁
瀬野, 西田: 別府温泉二三の湧出口導管中に於ける泉温分布と途中冷却率; 本誌第2巻第1號32頁

別府温泉涵養源としての雨量

但し T_b, T_u : 湧出口導管下端と上端との泉温,

$2r$: 導管口径, l : 導管の長さ

q : 湧出量, k : 地の熱傳導率,

$\frac{\partial T}{\partial r}$: 湧出導管壁の平均温度降下率

にて與へらるべく, 別府温泉16口の潮汐影響につき研究の結果 $k \frac{\partial T}{\partial r}$ の平均として

$$k \frac{\partial T}{\partial r} = 0.213 \text{ Calorie. cm. min.}$$

を得て居る。此の値は少數口の平均であるから多數口につきて用ふることは稍妥當を缺く恐れもあるが暫くこの値を採用する。尙ほ泉温統計を行つた延 193 口につきて $2r$ と l との平均は

$$\overline{2r} = 4.31 \text{ cm, } \overline{l} = 5705 \text{ cm.}$$

となる。是等の値を上 (iii) 式に入れて湧出口導管内での冷却による泉温年變化を計算すると第 10 表の通りになる。

第 10 表 延 193 口10ヶ年平均の泉温年變化分析 (°C)

	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII	I	II	III
實測泉温差	-0.07	-0.11	0.14	0.22	0.25	0.15	0.16	0.01	-0.06	-0.25	-0.21	-0.28
湧出量ニヨル影響偏差	-0.18	-0.12	0.08	0.07	0.06	0.18	0.11	0.06	0.01	-0.04	-0.08	-0.08
殘差	+0.05	+0.01	0.11	0.15	0.19	0.00	0.05	-0.05	-0.05	-0.21	-0.13	-0.21

之等をグラフにしたものが第 4 圖上端にある。湧出量による影響を去つた泉温は案の定殆んど八月を中心として對稱的となり氣温變化とよく平行する。然らば氣温が温泉温度に影響する方法如何といふに、之は湧出口附近の空氣及び土地上層へ熱の放散が夏冬によつて違ふのが主であらう。別府温泉の氣温による泉温年變化は僅に振幅 0.4 にすぎないから地下淺所に於ける氣温に近い地下水の混入による作用などは此處では考へぬでもよい。掘井戸式のや其他特殊の構造のものでは別府でも確に豪雨の際冷水の混入するものも若干あるが、大多數は殆んど左様な影響は認められぬ。

以上別府温泉の泉温年變化を氣温の效果と導管中途冷却によるものとに分析したが、其

の相対比率は

$$\text{湧出量効果：気温効果} = 0.28 : 0.40 \approx 2 : 3$$

となつた。

3 別府全泉年總出量と其の涵養

泉都別府の總湧出量に就いては、我が地球物理研究所に於て大正十三年と昭和八年の二回總ての活動湧出口の一齊調査を行ひ次表の結果を得て居る。湧出口数は昭和八年に幾分

年 次	活動湧出口数	總湧出量 (一日ニツキ)
大正十三年 九,十月	826	16.32×10^3 立方米
昭和八年 七,八月	756	18.79×10^3

減じながら全湧出量に於ては却つて幾分増加せる位で大體からいふと大差はない。

之より一年總量を知り度いのであるが、それには前節記載の様な年變化のあることを考慮せねばならぬ。大正十三年には繼續觀測がやつてなく、昭和八年も繼續觀測口数が餘りに少いから、止むを得ず年變化の状態は第2表下端の様な平均年變化をしたものと見做して計算すると、一年總湧出量は(一ヶ月を平均 30.50日及び 30.42日として)

$$\text{大正十三年} \quad 16.32 \times 10^3 \times 30.50 \times \frac{2 \times 136.97}{12.67 + 12.29} = 5.461 \times 10^6 \text{ 立方米}$$

$$\text{昭和八年} \quad 18.79 \times 10^3 \times 30.42 \times \frac{2 \times 136.97}{11.93 + 11.87} = 6.579 \times 10^6 \text{ 立方米}$$

で二回平均の 年量 6.020百萬立方米となるのである。

然るに一方此の別府温泉を涵養するものは内因として處女水、外因として雨量あるのみである。而して其の涵養雨域は之を陸地測量部の地圖上に求むるに、第5圖の分水線(點線)にて圍まれた部分とするを得べく、其面積を測つて

$$\text{別府温泉涵養雨域面積} = 23.07 \times 10^6 \text{ 平方米}$$

を得る。又雨量は昭和八年に於ては別府研究所觀測十ヶ年の平均よりも稍小雨の年で年量 1506 mm であり、大正十三年は研究所の觀測はないが大分測候所の觀測によると 1631mm で平年より幾分多い。大分及び別府の平年の雨量比 1.10 : 1 によつて大正十三年の別府雨量を同年の大分雨量から推定し 1794 mm とする。さすれば大正十三年と昭和八年の平均

(8) 別府温泉概観, I; 本誌第1巻第1號 20 頁

別府雨量 年 1650 mm と見てよい。故に當該年の

$$\text{全受水域年總雨量} = \frac{650}{1.565} \times 23.07 \times 10^6 \text{ m}^2 = 38.0 \times 10^6 \text{ 立方米}$$

従て別府温泉年總湧出量と受水區域の年總雨量との比は

$$\frac{\text{年總湧出量}}{\text{年總雨量}} = \frac{6.02 \times 10^6}{38.0 \times 10^6} = 0.16$$

で、實に別府市街地のみにて鶴見岳東側受水域全體の雨の 16 % にも及ぶ湯が湧出して居るのである。驚くべき結果ではないか。況んや温泉湧出は海底にても行はれて居ることは現に海岸の一部に天然砂湯といふ嚴然たる證據があり、又海岸埋立地にも湧出口多く而も湧出量が大であることによつても明かである。更に況んや同じ受水區域内には堀田、八幡、觀海寺、白湯、乙原等未だ我等が測定を了せざる温泉が多數にあつて、是等をも加算すれば總雨量の 20 % は愚か 30,40 或は更に何十 % の率に上るか 思ひ半ばに過ぎるであらう。

元來、雨水は滲透・蒸發・流出の三部分に分れその内の滲透分が普通の地下水乃至温泉涵養源ともなり得るのであるが、其の滲透率は土質や地面勾配によつて異なるものの、普通蒸發・流出分と共に各々 $\frac{1}{3}$ 程度とせられる。別府受水域は前々號口繪の別府地形から見て分る通り其の大部分は急勾配の山腹で、雨水は表面流出頗る迅速で滲透は比較的小率なるべきを思はしめる。又幾分平坦な別府市街地とても 1 軒に平均 30 米の高低差のある斜面⁽⁹⁾で而も屋宇櫛比し道路は随分堅くなつて居るから、山腹よりも却つて雨水の滲透は困難かも知れぬ。只土質は火山灰地方のため滲透に好都合の様でもあるが、滲透分が此の地勢で雨量の $\frac{1}{3}$ にも達するといふ様なことは先づあるまい。かくて別府の受水區域に降つた雨の滲透分はその大きな部分が温泉水と成ることは確である。のみならず岩漿起源の處女水も茲では相當量あるらしく、或は湧出量の幾割にも達するのではないかと想像せられる。

實際別府市街地では地を掘つて得るゝものは殆んど湯で、冷水を得ることの方が寧ろ困難といはれ、市民は炊事以外の雜用には皆湯を使ひ、上水道の出来る前は湯よりも寧ろ冷水の有難味が痛感せられる状態であつた。それでも勿論冷井泉が全く得られぬわけではなく、海岸より 40 米等高線あたりまでは冷井も相當あり、北部海岸の的ヶ濱の如き干潮の際に冷水の浸出あることを見れば、温泉源にならぬ雨水の滲透分もあるわけである。其の

(9) 瀬野錦藏：舊別府市街地の水準測量；本誌第 2 卷第 2 號 127 頁。



第5圖 別府舊市内温泉受水域

總量は幾何あるか未だ測定して居ないが何れ其の内この方面の研究も進める積りである。兎も角此の冷水量を雨量の滲透分から引去れば、別府温泉の涵養源として雨水の滲透分だけでは益々覺束なく、多量な處女水の存在を信ぜぬ譯に行かなくなる。

4 永年變化と雨量

温泉の湧出量及び温度は一年平均を取つても年々によつて變るのが一般である。所謂永年變化をするのである。而して其の原因としては第1節中に掲げた内因外因全部が考へられるのであるが、其の内氣壓及び海面の作用は頗る僅少で考慮外に置いてよい。何故なら平均氣壓の年々の差は一般に微少で別府十年間の最大最小の差 0.8 mm にすぎず、氣壓の季節變化10ミリに比し僅か8パーセントにしか當らぬ。又海面の昇降も日々の満干潮の差は2mもあり年變化の範圍も40cmほどあるが、年平均海面の年による差は頗る僅少で數cmを出でず、季節變化の十分の一を超えぬのである。従つて氣壓及び海面の温泉永年變化に及ぼす作用は、季節變化に對するものの十分の一以下で測定誤差の範圍内となるから全く度外視して差支ないのである。かくて永年變化に與る實效的原因は内因として處女水量及び温泉水路の變化と外因として雨量の變化あるのみである。

別府温泉の年々變化に就きては本誌第1卷第4號に特定の湧出口8ヶ平均が掲げてある。⁽¹⁰⁾十ヶ年繼續觀測の湧出口が少數で僅かに8口を得たのみならず其内4口までも中途に改渠が行はれて居るので、精密な議論をするには不充分であるが、大體の研究をなす爲め茲に該8口の永年變化圖を轉寫し且つ各年の雨量を併記する(第6圖)。

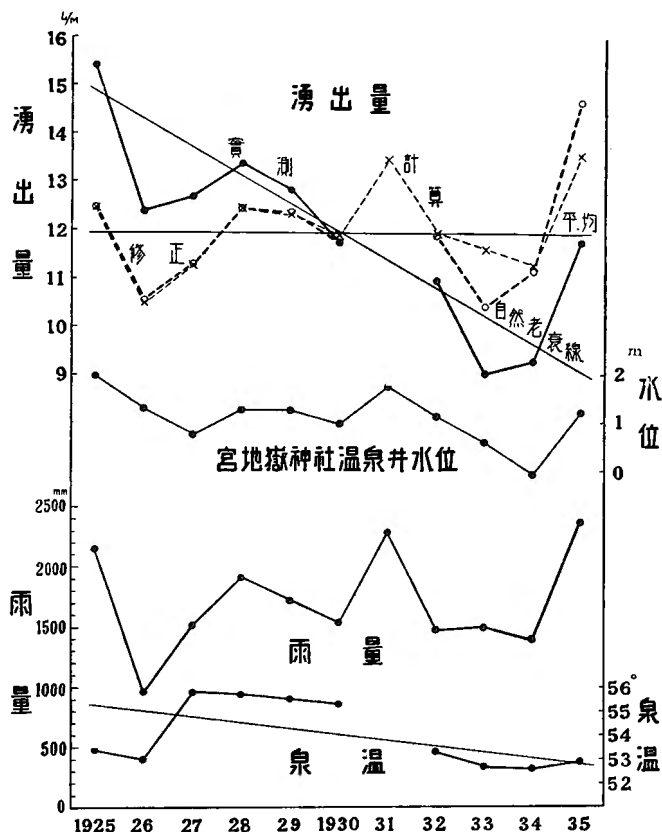
此の圖で最も著しく目を惹くことは湧出量・温度とも年々遞減の傾向を示すことである。之は「別府温泉概觀」中にも述べてある通り當地の掘穿温泉が十年内外で涸渫を要する事情と關聯するもので、泉井管が腐朽して漏洩或は流動への摩擦が増し、或は管内に湯の華沈澱し管内を漸次閉塞することが主な原因である。口繪に實例一二を示す。

處女水量の變化がこの内に含つて居るかどうか。今は斷定の材料はないが、百年千年の永きに亘らば別府温泉と雖も減衰の傾向を示すか知らぬが、僅か10年前後では先づ其の徴候はないと我等は信じて居る。其の一證としては、別府全泉の湧出量は大正十三年よりも9年後の昭和八年に於て却つて増加したことを舉げることが出来ると思ふ。

(10) 別府温泉概觀, II; 本誌第1卷第4號 267頁

第6圖 別府温泉8口の永年變化と雨量

永年変化



次に雨量の效果は永年變化に於ても的確である。第6圖の湧出量漸減傾向を取り去つた残り(修正湧出量)に就いて見れば、雨量の多き年は湧出量増し雨量減すれば湧出量亦減じ一々照應して居る。

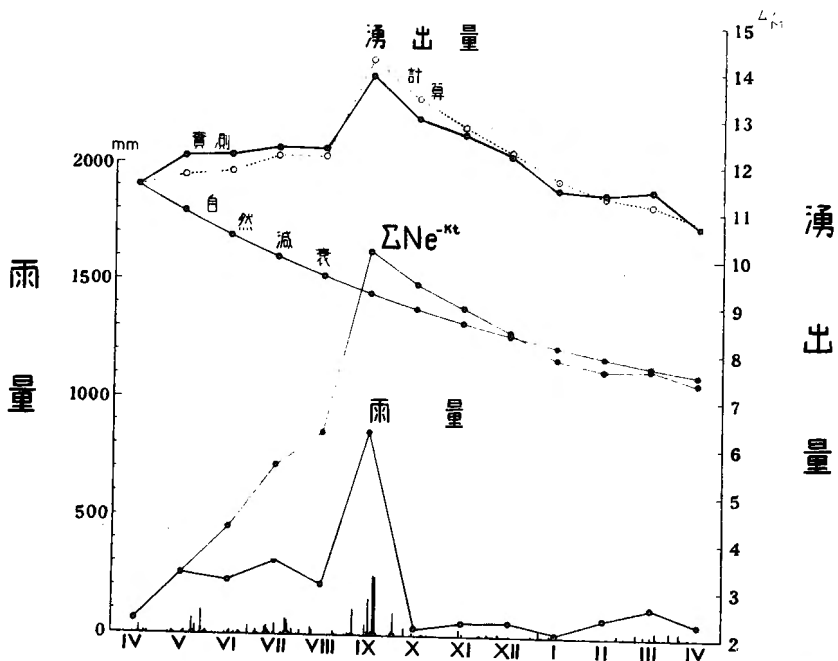
終りに泉温の變化も大體に於て湧出量に隨伴して明に正の相關を示して居る。之は泉温年變化の説明にあつた通り湧出量の増減に伴ふ導管内上昇時間に差を生じ、從つて其の間の冷却に差を生ずる爲めである。然し気温の泉温に及ぼす影響は永年變化としては度外視してよい。何故なら年平均気温は殆んど年々 15° 附近で、10年間の最高の年と最低の年と其差 0.8° にすぎない。夏冬の気温差 20° 以上の影響によつて泉温年變化に 0.5° 程度の振幅しか生じないことを知つた以上、其の二十分の一にも足りない気温年差による泉温の變化は全く考慮外として宜いこと明かである。

5. 雨の餘效及び處女水の推定

大雨が降れば湧出量は其月に激増するのみならず、其後雨がなくても翌月翌々月否數ヶ月後まで湧出量は中々多く、雨の効果が現はれることは既述の通りである。之を我々は雨の餘效と呼ぶことにし、本節ではその餘效問題を改めて研究する。

別府研究所十餘年の觀測中、大正14年は其の九月に月量實に 858.2 ミリに及び記録的豪雨を降らし而も翌月は僅に 30 ミリ弱で前者に比べ殆んど無雨といつてよい位であり、更に翌年一月まで頗る微雨で、雨の効果特にその餘效を研究するには持つて來いの實例を提示するものといふべく、恰も天が特別の實驗をして呉れた様な感がある。第7圖は即ち其の雨⁽¹⁰⁾量及び湧出量⁽¹¹⁾圖で第11表は其の數値である。雨量は月量の外に日量をも縦線にて圖示して置いた。九月の雨といつてもそれは 殆んど月初 1,4,5 の三日間に降つたものであることを念頭に置いて貰ひたい。

第7圖 大正14年9月豪雨の餘效



(10) 別府氣象觀測表，本誌第1卷第2號112頁

(11) 別府舊市内温泉概觀，II；本誌第1卷第4號271頁

別府温泉涵養源としての雨量

第11表 大正14年4月より15年4月までの一口平均湧出量と雨量

月	14年 Ⅳ	Ⅴ	Ⅵ	Ⅶ	Ⅷ	Ⅸ	X	Ⅺ	Ⅻ	15年 Ⅰ	Ⅱ	Ⅲ	Ⅳ
湧出量 (L/M)	11.51	12.14	12.17	12.32	12.31	13.90	12.97	12.62	12.18	11.46	11.38	11.45	10.69
雨量 (mm)	58.4	253.9	228.0	310.9	210.9	858.2	28.6	52.6	58.4	9.0	76.3	124.4	56.5

圖より明かなる如く、豪雨の影響は其月の温泉湧出量に跳躍的の激増を來せる許りでなく、翌月翌々月も殆んど雨なきに拘らず平均以上の湧出量を維持して居る。而して其の餘效は大體指數函數的 (exponential) の趨勢になつて居る。勿論雨の効果は日或は時を單位として論すれば降雨後即時に現はれるのでなく、幾時間目かから始めて湧出量の増加となり更に幾時間後かに最大効果を呈してそれより漸次減退するのであるが、本文に於ける如く月を單位とする場合には第7圖の實例を根據として雨の効果を

$$F = \alpha N e^{-\lambda t} = F_0 e^{-\lambda t} \quad (1)$$

と置いて大過あるまい。茲に

N = 月雨量, t = 降雨後經過した月數

F_0, F = 雨 N による當月及び t 月後の湧出量

α = 湧出量に及ぼす雨の効果係數

λ = 雨の効果遞減指數

である。之は理論的に考へても理由のあることで、受水域上流の水頭が減するのは湧出した水量に比例すべきがためである。係數 α, λ は不明であるが、我等は先づ λ を第7圖の遞減狀況から推算する。大正十四年十月の雨は九月の大雨に較べると極めて小であるから、九月より十月に至る湧出量の減衰は自然減衰に頗る近いであらう。又大正十五年一月は僅に9ミリの極めて微雨に過ぎないから前年十二月よりこの一月に至る湧出量減衰も亦甚だ自然減衰に近い筈である。吾等は自然減衰に近い此の二部分を利用して減衰指數 λ を決定する。

若し全く雨のない月が一つあれば、其の前月の湧出量を Q_1 、雨のない月の湧出量を Q_2 としやう。温泉の場合には雨量効果によらざる處女水 J もあるのが普通だから(1)式の F は實測湧出量 Q の一部にすぎない。 J を不變として(1)式から

$$(Q_2 - J) / (Q_1 - J) = e^{-\lambda} \quad (2)$$

別府温泉涵養源としての雨量

斯様な部分が別にも一ヶ所あつて其の二ヶ月の全湧出量が Q_1' , Q_2' だとすれば

$$(Q_2' - J) / (Q_1' - J) = e^{-x} \quad (3)$$

此の二つの式 (2) (3) から J と x の二量を決定し得る。即ち

$$J = \frac{Q_1 Q_2' - Q_2 Q_1'}{(Q_1 - Q_2) - (Q_1' - Q_2')} \quad (4)$$

$$x = \log_e(Q_1 - J) - \log_e(Q_2 - J) = \log_e(Q_1' - J) - \log_e(Q_2' - J) \quad (5)$$

で、湧出量の實測値 Q_1 , Q_2 , Q_1' , Q_2' のみから直ちに處女水量と同時に自然減衰指数が算出されるわけである。

今問題の別府温泉に於て十月と一月の湧出量を其のまゝ Q_2 及び Q_2' と見て、(4) (5) 兩式を使ふか、或は (2) (3) で (J, e^{-x}) 曲線の交會點を求め

$$J = 6.29 \text{ L/M}, \quad x = 0.13$$

を得る。然し實際は十月も一月も多少の雨があつたから其の修正をせねばならぬ。例へば十月の湧出量は雨がなかつたら第7圖の趨勢から 0.1 L/M 位は減じて居ると思はれる。其他氣壓及び潮汐等の影響をも修正して、吾々は

$$J = 6.1 \text{ L/M}, \quad x = 0.11$$

を得、之を採用する。

處女水 6.1 L/M は此の年の平均湧出量 12.08 L/M に對し實に 50.5% に當る多量である。又 $x = 0.11$ とすると雨の効果が月數と共に減する有様は第12表の通りになり、滿1ヶ年末には降雨當月の 27% ほどの餘效を見、第2年末になると 7.1%, 第3年末でも 1.9% だが、第4年末には僅か 0.5% になるわけで、雨の餘效は降雨後三年間は確かに残るが、四年目は最早や普通の意味では無視してよい。

第12表 別府温泉の雨效遞減表

t (月)	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	24	36	48	60
e^{-xt}	.896	.808	.719	.644	.577	.517	.468	.415	.372	.333	.298	.267	.071	.019	.005	.001

既に x の値がきまつたから、之で別府温泉湧出量の平均年變化が雨量年變化で定量的に一々説明し得るや否やを検討しやう。

1) 大正14年度の研究：— 我京都帝大別府研究所が湧出量繼續調査を始めたのは大正14年4月からであるから其の四月の湧出量 11.51 L/M を出立點にとり、之を三月以前

別府温泉涵養源としての雨量

の總ての雨の効果と 四月の雨の効果と 處女水の加はつたもの見る。そして假に五月以降一年中全く雨が無かつたとしたならば、其の後の湧出量は如何になるべきかと考へるに、天水起源の $11.51-6.1=5.41 \text{ L/M}$ が第12表の割合で減衰するものの上に、不變の處女水量 6.1 L/M を加へたものとなる筈である。第13表に其の計算を示す。

第13表 五月以降全く無雨とした場合の假想湧出量と雨の効果 (L/M)

月	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII	I	II	III	IV	
假出 想 湧量	5.41	4.85	4.34	3.89	3.48	3.12	2.80	2.51	2.25	2.01	1.80	1.61	1.44	計
天水起源 ($Q-f$)	11.51	10.95	10.44	9.99	9.58	9.22	8.80	8.61	8.35	8.11	7.90	7.71	7.54	
處女水を 加へし Q	—	1.19	1.78	2.38	2.78	4.68	4.07	4.01	3.88	3.35	3.48	3.74	2.15	
五月以降の雨の 効果	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	38.29

この假想湧出量を實測湧出量から引いた残りは五月以降の雨の効果に當る譯である。前表最下列は即ち夫れで、結局 (1) 式を各月の雨について計算し各月毎に夫れ等を累計したもの $\alpha \Sigma N e^{-\alpha x}$ に相當する。雨效係數 α は未だ不明であるが、 x は既知であるから $\Sigma N e^{-\alpha x}$ だけは第14表の様に計算出来る。

第14表 大正14年5月以降の $N e^{-\alpha x}$ (ミリ)

月	14年 V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII	15年 I	II	III	IV	
$N e^{-\alpha x}$	253.9	227.8	204.0	182.7	163.4	146.5	131.2	117.7	105.3	94.5	84.5	75.6	計
		228.0	204.4	182.3	164.0	146.8	131.6	118.0	105.7	94.7	84.9	76.0	
			310.7	278.5	249.7	223.6	200.3	179.5	160.6	144.1	129.0	115.7	
				210.9	189.7	170.0	152.8	135.4	122.1	109.5	98.2	87.9	
					858.2	770.0	690.0	608.0	552.7	495.5	440.0	398.0	
						28.6	25.8	23.2	20.7	18.6	16.6	14.9	
							52.6	47.2	42.3	37.8	33.9	30.4	
								58.4	52.3	46.9	41.9	37.6	
									9.0	8.1	7.2	6.5	
										76.3	68.4	61.4	
											124.4	111.6	
												56.5	
$\Sigma N e^{-\alpha x}$	253.9	455.3	719.1	855.4	1625.0	1485.5	1388.9	1287.4	1170.7	1126.0	1129.2	1072.1	12563.5

此の最下列に α を乗じたるものが第13表最下列の雨の効果に當る筈であるから、 α は前者を以て後者を割れば出る。各月毎に α を算出して其平均を取るも一法であるが茲には簡單に一ヶ年總和の比を求めて α を出すと

別府温泉涵養源としての雨量

$$\alpha = \frac{38.29}{12563.5} = 0.00302$$

を得る。この α を第14表下列の $\Sigma N e^{-\alpha t}$ に乗じて計算雨効果量を得、夫れに第13表第二列（無雨とした場合の假想湧出量）を加へて各月の全湧出量が計算出来る譯である。第15表は即ち其の結果である。

第15表 計算雨効果量と全湧出量（毎分リットル）

月	14年 I	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII	15年 I	II	III	IV
五月以降 の雨の效 果 計算湧出 量	—	0.77	1.37	2.17	2.58	4.01	4.49	4.18	3.99	3.54	2.40	3.42	3.24
	11.51	11.72	11.81	12.16	12.16	14.23	13.39	12.79	12.24	11.65	11.30	11.13	10.78

第7圖の點線はこの計算湧出量を圖示したものであるが、實測湧出量との一致は充分満足すべきものがある。只僅少の相違は潮汐や氣壓の影響もあらうし、又其月の雨といつても必ずしも其の中間に降つたわけではなく月の始め或は末に偏して居ることもあることなどから來る誤差と見てよい。

2) 10ヶ年平均年變化の研究：— 次に§1に述べた10ヶ年延湧出口193個平均年變化（潮汐及氣壓効果を去つた殘餘湧出量）が此の年間の雨量平均年變化（ウェイトを附した第3表）から説明されるかどうかを研究しよう。10ヶ年にも亘る平均の年變化であるから、雨も雨による湧出量も既に準定常状態になつた場合と同じと見做してよいであらう。そこで今始めには處女水 J のみがあつたところへ上記の様な年變化をする雨が降り出し爾後毎年毎年同様に降るとして、第1年第2年……無限年數を経た後の雨による湧出量を計算して見よう。此の場合には α の値さへ豫め分つて居れば、 J 及び α は既知の必要なく自然に算出し得る道がある。そこで α の値だけを大正14年のそれと同じと假定し $\alpha=0.11$ として先づ各月の雨效の割合を知る爲に $\Sigma N e^{-\alpha t}$ を計算すると第16表及び第8圖のようになる。最初の第1年度の計算は第14表のときと同様だが、第2年度からは前年度最終月（Ⅲ月）の値に第12表の $e^{-\alpha t}$ を掛けたものに第1年度分の各月の値を加へさへすればよい。又多年の後準定常状態となつた場合の最終月（Ⅲ月）の極限值は、第1年度最終月（Ⅲ月）の値 867.4 を初項とし満一ヶ年毎の減衰率 $e^{-12\alpha}$ を公比とする無限級數の和に當る筈であるから

$$\begin{aligned} 867.4 \left\{ 1 + e^{-12\alpha} + (e^{-12\alpha})^2 + (e^{-12\alpha})^3 + \dots + e^{-\infty} \right\} &= 867.4 \times \frac{1}{1 - e^{-12\alpha}} \\ &= 867.4 \times \frac{1}{1 - 0.267} = 1183.4 \end{aligned}$$

別府温泉涵養源としての雨量

而して其他各月の値は更に其の次年度のものと見ればよいから、結局 1183.4 に第 12 表の $e^{-\alpha t}$ を乗じたものと第 1 年度の値とを加へて得らるゝのである。

第16表 $\Sigma N e^{-\alpha t}$

月		Ⅳ	Ⅴ	Ⅵ	Ⅶ	Ⅷ	Ⅸ	X	Ⅺ	Ⅻ	Ⅰ	Ⅱ	Ⅲ
第 1 年 度	H=2V	118.3	106.0	95.0	85.1	76.2	67.7	61.2	54.8	49.1	44.0	39.4	35.3
			108.4	97.1	87.0	77.9	69.9	62.5	56.0	50.2	45.0	40.8	36.1
				220.0	197.1	176.7	158.2	141.7	126.9	113.7	101.9	91.3	81.8
					211.0	189.1	169.4	151.7	135.9	121.7	109.1	97.7	87.6
						184.0	164.9	147.8	132.3	118.5	106.2	95.1	85.2
							362.0	324.4	290.7	260.3	233.1	208.9	187.2
								86.2	77.2	69.2	62.0	55.5	49.7
									69.1	61.9	55.5	49.7	44.5
										53.3	47.8	42.8	38.3
											44.0	39.4	35.3
										78.1	70.0		
												116.4	
	計 = i	118.3	214.4	412.1	580.2	703.9	992.0	975.5	942.9	897.9	848.6	838.2	867.4
第 2 年	iiノ三月間 ×e ^{-αt} =ii' i+ii'=ii	777.2	696.5	622.7	558.6	500.5	448.4	401.6	360.0	322.7	288.8	258.5	231.8
		895.5	910.9	1035.8	1138.8	1204.4	1440.4	1377.1	1302.9	1220.6	1137.4	1096.7	1099.0
第 3 年	iiノ三月間 ×e ^{-αt} =iii' i+iii'=iii	984.7	882.5	790.2	707.8	634.1	568.2	509.8	456.1	408.8	366.0	327.5	293.4
		1103.0	1096.9	1202.3	1288.0	1338.0	1560.2	1484.3	1399.0	1306.7	1214.6	1165.7	1160.8
第 4 年	iiiノ三月間 ×e ^{-αt} =iv' i+iv'=iv	1040.1	932.1	834.6	747.3	669.8	600.1	537.4	481.7	431.8	386.5	345.9	309.9
		1158.4	1146.5	1246.7	1327.8	1373.7	1592.1	1512.9	1424.6	1329.7	1235.1	1184.1	1177.3
定 常 狀 態	前年度分 自然減衰 i+(上列)	1060.3	950.3	850.9	762.1	682.8	611.8	547.9	491.1	441.1	394.1	352.7	316.0
		1178.6	1164.7	1263.0	1342.3	1386.7	1603.8	1523.4	1434.0	1339.0	1242.7	1190.9	1183.4

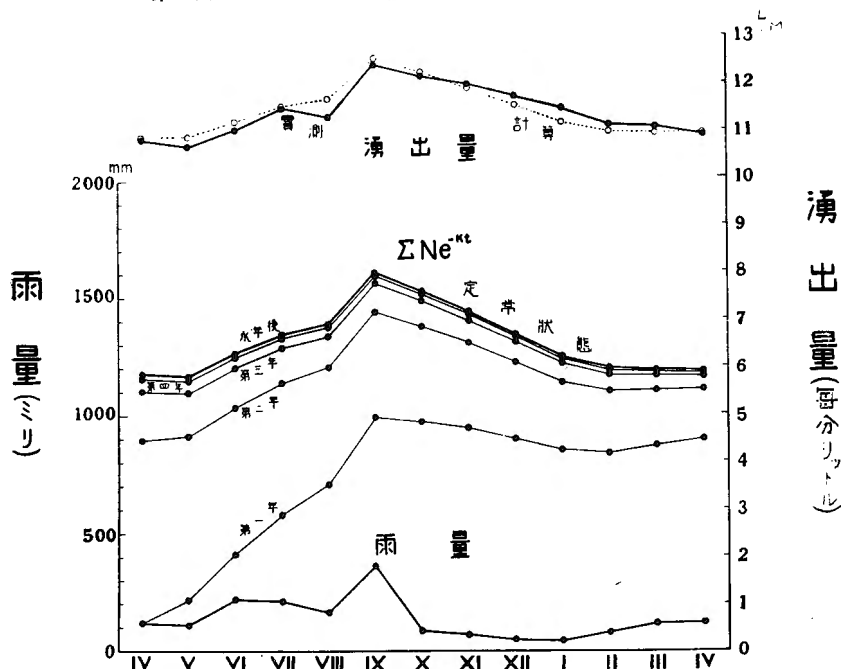
此の定常状態の $\Sigma N e^{-\alpha t}$ は之に α を掛けると實測湧出量の天水起源の部分になる筈であるから、 α は兩者の變化部分だけの比を取つても得られる譯である。依て吾等は兩者の振幅比(又は平均値からの各月の偏差の絶対値總計の比)から α を出し

$$\alpha = \frac{12.45 - 10.74}{1603.8 - 1164.7} = \frac{1.71}{439.1} = 0.00390$$

この α を定常状態の $\Sigma N e^{-\alpha t}$ 年平均値 1321.0 にかけると天水起源の平均湧出量を得、それを實測湧出量平均値 11.49 L/M から引けば處女水量を得るわけである。即ち

別府温泉涵養源としての雨量

第8圖 平均年變化雨量に應ずる $\Sigma Ne^{-\alpha t}$ 及び湧出量



天水起源湧出量平均 $\bar{F}=1321.0 \times 0.00390=5.16 \text{ L/M}$

岩漿水起源湧出量 $J=11.49-5.16=6.33 \text{ L/M}$

又 α を定常状態の $\Sigma Ne^{-\alpha t}$ 各月値に掛けると天水起源の湧出量 F を得、それに處女水量 $J=6.33 \text{ L/M}$ を加ふれば全湧出量年變化となるわけである。第17表は即ち其の結果である。

第17表 別府温泉湧出量平均年變化計算値

月	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII	I	II	III
天水起源湧出量 F	4.60	4.53	4.93	5.24	5.41	6.26	5.95	5.60	5.22	4.85	4.65	4.62
全湧出量 $F+J$	10.93	10.86	11.26	11.57	11.74	12.59	12.28	11.93	11.55	11.18	10.98	10.95

第8圖にはこの計算湧出量を實測湧出量の上に添記して置いた。此の種の推算としては計算と實測とが誠に一致して居るといつてよい。

尙本項にて得た重要な結果の一つは處女水量の推定で、十ヶ年の間の平均として $J=6.33 \text{ L/M}$ は實に平均全湧出量 $Q=11.49 \text{ L/M}$ の 55.1% に當るのである。而も推算法の

別府温泉涵養源としての雨量

全く異なる大正14年度の $J=6.1\text{ L/MI}$ と略ほ一致する値を得たことは頗る意味が深く、此の数値の信用度を増すばかりでなく處女水は數年間では餘り變らぬことを示す。兎も角別府市街温泉水は約半分強が岩漿起源の處女水だといふことになり、先に受水域總雨量と別府市街全温泉の湧出量總計との比較から豫想して置いた本地域岩漿活動の旺盛さが裏書されたわけである。只 α の値が前項の場合より少々大きく出たが、之は大正14年9月の様な豪雨は流出分が大きく滲透分が小さくなるので、温泉涵養源としても比較的效果が少ない爲に違ひない。然し、 α の滲透した水が再湧出する模様は徑路が同一なる限り同様であるから α は同一としてよい。

3) 永年變化の研究：次に本誌第1巻第4號に掲げた湧出量永年變化⁽¹²⁾を同年間の雨で説明しやう。永年變化といつても大正14年から昭和10年まで滿10年間で、而も其間同一湧出口で連續觀測が完全に行はれたのは僅か8孔に過ぎない甚だ不十分な材料に拘らず、下記の推算は案外に好結果を示すのである。

茲に雨量と湧出量とを摘記すれば第18表及び第6圖の通りである。氣壓及海面の年々の差は一年中の季節的の差に比し十分の一にも足らぬから、湧出量に及ぼすそれらの差は測定誤差の範圍内にあつて考慮の要はない。

第18表 別府温泉8口平均湧出量の永年變化と雨量

年 次	1925	1926	1927	1928	1929	1930	1931	1932	1933	1934	1935
雨 量 (mm)	2149	961	1522	1913	1732	1586	2269	1473	1502	1399	2374
湧出量 { 實 測	15.39	12.39	12.68	13.36	12.92	11.74	缺測	10.96	9.01	9.29	11.75
(L/MI) { 自然老衰修正	12.47	10.54	11.29	12.43	12.86	11.74	—	11.99	10.40	11.14	14.67

既に屢々注意せる如く同一湧出口の湧出量は泉管内の沈澱充塞等のため自然老衰なる現象があるから、それを修正して雨と較べねばならぬ。第6圖の趨勢から全平均 11.94 L/MI を中央の1930年にとり、夫より前後1年を距る毎に自然老衰の影響として 0.463 L/MI となる様な直線を引き、之に應ずる修正を實測湧出量に施こして第18表の最下列に記入した。之を雨の永年變化で説明すればよい。取扱ふ年間は前項2)の場合と同じであるから、減衰指數 α 及び處女水の歩合は同じと見て、 $\alpha=0.11$ 、 $J=6.33 \times \frac{11.94}{11.49}=6.58\text{ L/MI}$ として大

(12) 別府舊市内温泉概観Ⅱ；本誌第1巻第4號281頁第4表及び第4圖

(13) 別府氣象觀測表；本誌第1巻第2號104頁

別府温泉涵養源としての雨量

過はあるまい。さすれば大正14年(1925)度湧出量を出発点として、前々項1)の場合の取扱に準じて雨量から湧出量が割出せる。第19表は其の計算である。

第19表 別府温泉8口平均の湧出量永年變化の計算

年次	1925	1926	1927	1928	1929	1930	1931	1932	1933	1934	1935
$N e^{-\alpha t}$		961	228 1522	54 361 1913	12 85 452 1732	3 20 107 410 1536	1 5 25 97 364 2289	— 2 6 23 86 543 1473	— — 2 5 20 128 349 1502	— — 2 5 30 83 356 1399	— — — — 2 7 19 84 332 2374
$\Sigma N e^{-\alpha t}$		961	1750	2328	2282	2076	2781	2133	2006	1875	2818
$\alpha \Sigma N e^{-\alpha t}$		2.31	4.27	5.73	5.89	5.20	6.98	5.37	5.04	4.70	6.95
$F_1 = Q - f$	5.89	1.57	0.42	0.11	0.03	0.01	0	0	0	0	0
$F_1 + f$	12.47	8.15	7.00	6.69	6.61	6.59	6.58	6.58	6.58	6.58	6.58
$\frac{F_1 + f}{1 + \alpha \Sigma N e^{-\alpha t}}$	12.47	10.46	11.27	12.42	12.30	11.89	13.46	11.95	11.62	11.28	13.53

こゝに F_1 は初年度(1925)の修正湧出量 Q のうち天水起源の分 $12.47 - 6.58 = 5.89$ L/M の自然減衰するもの、又 α は前々項 1) の場合に準じ

$$\alpha = \frac{\{Q - (F_1 + f)\} \text{の總和}}{\Sigma N e^{-\alpha t} \text{の總和}} = \frac{45.10}{18855} = 0.0024$$

として、 $\alpha \Sigma N e^{-\alpha t}$ の計算に使用した。

第19表最下列の計算湧出量が第18表の修正湧出量と殆んど一致することは第6圖中にも示してある。尙同圖には参考のため市内宮地嶽神社温泉井の観測水位を併記して、缺測になつた1931年の湧出量増加の趨勢を想像する助けとした。尙茲に一言したいのは、 α の値が前の場合より比較的小さく出たことである。同一温泉に對しては雨の効果が豪雨と霖雨とで異なり大正14年9月の様な颱風に伴ふ豪雨が短時日に降つても地下に滲透する部分は雨量の割合に小さく、寧ろ梅雨の様にしとしと永く續く雨が雨量の割に比較的多く滲透して α を大ならしむことは既に述べたが、違つた温泉で地下の徑路や地質を異にするも

のでは亦雨量効果を異にするのは當然である。年變化の研究に使つた湧出口は大正14年度でも10ヶ年平均でも全市に亘り頗る多數であるから先づ同一温泉で地下の徑路も同一と見做して差支なく α の差異を生として雨の降り方に歸してよいが、永年變化の研究に使つた湧出口は僅かに8口で而も7口までが海岸に近く山手のは只1口しかないから全市に亘る多數湧出口の平均とは全く α を異にしても差支ない。否寧ろ此の山手より遠く海岸に近い湧出口に對する α が全市平均の α より小さく出たといふことは大に意義のあることで、雨の効果が山手に強く海岸に弱いことを示すのである。この事は別の研究「別府温泉の降雨影響度分布」⁽¹⁴⁾とも調和する。尤も其數値 $\alpha=0.0024$ に就ては固執しない。蓋し地下徑路を異にする違つた湧出口では α のみならず κ も違つてよい譯であるから、特定の8口に就いても全市平均の $\kappa=0.11$ を使ふのに異論があつてもよいが、今の處之を決定する道がないので止むを得ない。 α が變れば κ も變るであらう。

6 結 論

前數節に亘りいろいろ別府温泉の湧出量と雨の關係を述べて來たが、其の要點を摘記すれば下の如し。

- (1) 別府舊市内温泉一年間總湧出量は涵養雨域年總雨量の16%にも及ぶ優勢さで、而も溫度平均53°の高溫を保持する。年々かゝる多量の水を忽ちにしてかゝる高溫に化する別府地帶の熱源が如何に優勢なるか驚嘆に値すべく、恐らく他に例の少いものと思はれる。
- (2) 此の溫泉水は處女水と雨水とによつて涵養され、雨の滲透分はその大きな部分が湯になるのみならず、處女水も多量に含まれ實に全湯量の55%にも及ぶのである。以て別府温泉地帶が如何に活潑なる岩漿地區であるかを想像するに足る。
- (3) 温泉は一年中の季節によつて相當に變化する。湧出量も溫度も大體に於て暖季に盛で寒季に衰へる。而して
 - (4) 湧出量の年變化は雨量、氣壓、海面の年變化によつて生ずるもので、其の影響の程度は

$$\text{雨量} : \text{氣壓} : \text{海面} = 5 : 2 : 1$$

(14) 瀬野錦藏：別府温泉の降雨影響度分布；本誌本號162頁

の割合である。

(ロ) 泉温年変化は湧出量に關係する分と気温に伴ふ部分とがあり、其の比は約2:3である。前者は温泉水が泉源より湧出口上端に來る迄に熱を地層に吸収され冷却するため、後者は湧出口上端の地表面乃至空氣により冷却される爲である。

(4) 温泉は又年々に盛衰があり、所謂永年變化をする。別府温泉では特定の湧出口に就て云ふと湯の華の沈澱により泉井管の充塞を來し或は泉管が腐朽して抵抗をまし、爲めに湧出量は年々老衰するがため平均10年毎には浚渫改掘を要する状態である。然し別府全市の地下温泉總量は決して未だ衰運の状態にないことは大正13年及昭和8年兩度の一齊調査結果が之を證明して居る。只年変化と同様年々の雨量によつて湧出年量も變化する。然し氣壓及海面の年々の差は年変化に於ける季節の差に比し10分の1にも足らぬから、其の効果も測定誤差範圍内にあつて考慮の要はない。同様に気温の年々の差は微少であるから、その影響は泉温の永年變化には殆んど與らない。

(5) 雨量の湧出量に及ぼす効果は其の當月に最も著しいが、然し其後も三年位は効果が残る。即ち餘效がある。雨の餘效は大體指數函數的に漸減する。即ち N を雨量(ミリ)とすると $e^{-\alpha N}$ の形になる。

(6) 我々は降雨餘效係数 α 、その減衰指數 λ 及び處女水 f を實測湧出量から算定する方法を示した。雨量をミリ、湧出量を L/N で測ると別府では大體平均一湧出口につき

$$\lambda=0.11 \text{ (月單位)}, \quad \alpha=0.0039, \quad f=6.3 \text{ } L/N$$

を得る。此の三量が定まつた以上、雨の豫報が出來れば湧出量の豫測も出來ることになる。

終りに、以上の如く満足すべき良好な結果を得たのは、廣く全市に亘り夥だしい多數の泉口につき十餘年の永い間連續觀測を實行し來つた多數所員の辛苦勸精の賜であつて、僅か一二口の井泉につき數日乃至數ヶ月位の短期觀測をした位では中々得られるものではあるまい。茲に永年感興の少い測定作業に厭きず従事された諸君に今更ながら吾々は深甚なる感謝の念を禁することが出来ない。