

地球物理

第 2 卷 第 1 號

昭和 13 年 2 月

論 說

別府温泉と潮汐附氣壓效果*

理學博士 野 滿 隆 治

理 學 士 瀨 野 錦 藏

理 學 士 中 目 廣 安

海岸の温泉が潮汐の干満によつて其の湧出量や泉温を變化することは、古くより方々で知られて居ることで、其の地方の人々の間にはいろいろな言葉で其の間の消息が言ひ傳へられて居る。

海に臨み風光明媚な我が別府温泉に於ても、潮汐の影響を受けることは早くから民間に知られ、故志田博士も亦この點に留意され、大正九年冬既に大分測候所長山川軍治氏及び理學士柴久光の兩氏をして僅か一口の温泉一日半の小手調べ的な調査ではあるが海面の昇降と湧出量との同時觀測を二三時間間隔に行はしめ兩者の間に並行性あるを認められ、更に大正 13 年別府市内温泉臺帳⁽¹⁾の作製に當つても各湧出口に就いて所有者乃至使用者の認識如何が調査されてある。大正 14 年にも只一泉だけではあるが理學士南葉宗利、若桑光雄氏等に命じ一ヶ月に亘り泉温・水位・電氣電導度の變化を觀測して潮汐と對照させられた。其の結果の一部は圖示して研究所内に掲げられたが、別にその解析研究は行はれなかつたので發表に至つて居ない。依て吾々は再び此の問題を取上げ、新たに充分豊富な觀測材料を作りて之が解析研究を進め潮汐影響の特質を闡明せんことを期し、晝夜連續觀測に便利

*此の論文の概要は昭和 10 年 4 月大阪に於ける日本數學物理學會總會にて發表した。

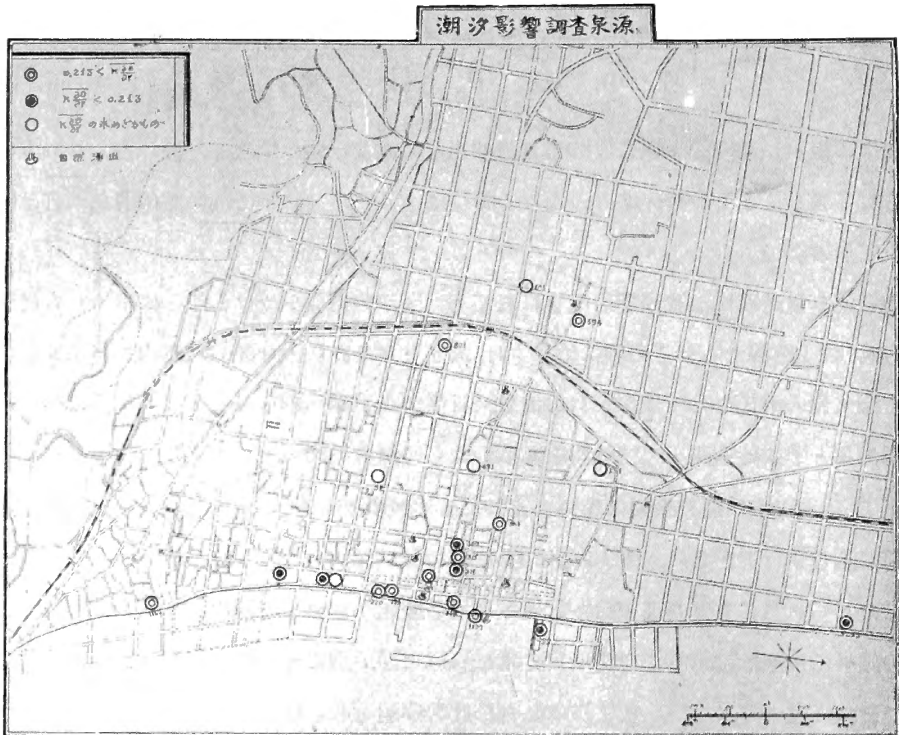
(1) 本誌第 1 卷第 1 號 28 頁、資料「別府市内温泉臺帳抄」。

な湧出口 21 口を選び其の湧出量・泉温・電気傳導度を 毎二時間置きに 測定し特に前二者につきては満干潮時前後は 30 分乃至 10 分毎に 観測を續くること 2 日乃至 1 ヶ月に及んだ。本文はその観測結果による研究報告である。

1. 観測泉の位置と観測法及び其の結果

潮汐の影響を調査する温泉としては勿論成るべく海岸に近い湧出口が第一に必要であるが、然し夫れだけではいけない。潮汐影響が海岸を距るにつれ如何様に變るかとか、位相に遅速があるなどの問題研究には是非共内陸相當の處まで成るべく多數の泉源に就いて観測することが肝要である。依て筆者等は夫れ等の純理的立場と測定實行上の便否乃至泉源所有者の理解の程度等により結局第 1 圖に示す様な 21 口の泉源を選んだ。

第 1 圖 潮汐影響調査泉源の位置

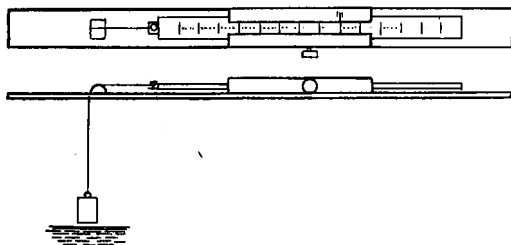


別府温泉の構造は既報の如きもの⁽²⁾であるから、湧出量の測定は自然の状態⁽²⁾で浴槽に流入

(2) 別府温泉概観, I, 本誌第 1 卷第 1 號 20 頁。

する温泉水量を測ればよいわけである。依て吾々は一方で浴槽の斷面積を測定し置き、他方では浴槽の湯を適當の處まで汲出した後に流入し來る湯のために浴槽内の水位の上昇する速さを觀測した。各高さに於ける浴槽面積は殆んど一定ではあるが、測定間隔位置を固定することによつて種々の誤差を除き得た。又垂直間隔を精密に定めるには、當研究所多年の經驗からすると、普通の桿尺や開放硝子管内に尺を挿入したものよりも或は電氣接觸による法よりも寧ろ第2圖に示す様な装置によるが簡便で而も精確なるを知つた。即ち底面の

第2圖 湧出量測定器



水平な錘を糸で吊し糸の他端は可動スケールに結び付け、スケールの移動によつて錘の底面に適當量の昇降を與へ、前後二つの位置に於て浴槽内の水面が錘の底面に接觸する時刻を測るのである。錘の

水に映る影によつて水面が漸次上昇し錘底に近よる狀況を窺ひ得るし、正に接觸した瞬間は漣波の起ることで精確に判定が出来る。

泉温測定は出来るだけ湧出口で行ふことが望ましいけれども種々なる障害のため「元箱」で行つたが、その結果は特別なものを除きては單に幾らか埋設管の深さを増したと考へられる以外格別の不都合はなかつた。寒暖計は $\frac{1}{10}^{\circ}\text{C}$ 目盛のものを使用し、一ヶ月觀測は特に $\frac{1}{100}^{\circ}\text{C}$ 目盛の Beckmann 寒暖計を使用して精密を期した。

温泉水の化學成分が受ける變化は、化學分析によつて明かにすることが出来れば甚だ結構ではあるが、この度の調査した温泉は多くは單純泉に屬し、従つてその變化も少く分析誤差と同一程度であるから、かゝる場合には化學分量に並行する電氣傳導度を測定する方がその變化狀況は一層精密に檢出する。尤も電氣傳導度は現場では溫度變化に伴ふ影響があるから、温泉水を採取の上研究所に持ち歸り恒温槽内で測定した。恒温槽自身の微少な溫度の相違は 0.02 以下であれば電導度測定の結果に格別の影響を及ぼさないことを確めた。

以上の如くして觀測した湧出量・泉温・電導度は全部資料欄に「別府温泉の潮汐影響調査觀測表⁽³⁾」として掲出するが、茲には其の概況を總括して第1表を得た。又其の變化狀況を

(3) 本誌本號, 84頁。

別府温泉と潮汐附氣壓效果

第 一 表 温泉に及ぼす潮汐の影響概表

温 泉		深 度	導 管 種 別	口 徑	水 長 平 導 管 サリ	海 岸 ノ 距 離	平 湧 出 均 量	湧 出 量 化	平 均 泉 温	泉 温 變 化	電 氣 傳 導 率	氣 壓 係 數		潮 汐 係 數		$k \frac{\partial T}{\partial r}$	
番 號	所 有 者											ρ	c	h	$c\lambda$		
No. 211 (S)	廣 壽 旅 館	45	竹 管	4.5	0	30	10	8.5	51	2.9	1.25			0.0490	3.08	0.446	
〃 (N)	廣 壽 旅 館	66	〃	4.5	8	30	16	5	58	2.7	1.50			0.0843	2.16		
No. 235	ひ さ ご 旅 館	73	〃	2.0	5	84	14	8.5	64	0.9	1.69			0.0502	4.97	0.174	
No. 309	永 井 旅 館	72	〃	4.2	2	180	24	11	66	0.5	1.62			0.0407	2.94	0.215	
No. 1197	天 然 砂 湯 上 湯	78	鐵 管	5.1	10	0	35	19.74	66	0.5	1.82			0.109	5.95	0.206	
No. 801	杉 原 壽 氏 宅	122	〃	2.8	3	690	13	0.65	38	2.2	—	0.086	10.5	0.00336	0.55	0.038	
No. 671	石 川 喜 十 郎 氏 宅	40	竹 管	4.2	2	870	11	1	52.3	0.3	1.13	0.112	6.1	0.00430	0.32		
No. 491	米 屋 旅 館	55	〃	5.0	17	390	7.6	1.1	52.7	0.4	1.17	0.023	0.9	0.00358	0.18		
No. 427	二 條 館 別 荘	91	〃	4.9	1	—18	14	10	65.5	3.0	2.17			0.0372	1.97	0.308	
No. 551	松 野 屋 旅 館	102	〃	2.8	16	420	12	3	52.7	0.5	1.71	0.300	20.0	0.0060	0.53		
No. 365	備 中 屋 旅 館	54	〃	4.9	11	240	5	1.3	49	2.2	1.29			0.0148	0.78	0.165	
No. 199	住 三 旅 館	98	〃	6.1	8	24	8	15	60	9.33	1.62			0.101	3.46	0.087	
No. 594	大 正 館	69	〃	2.8	0	780	5.2	0.71	55.5	0.5	1.07	0.187	12.5	0.00235	0.21	0.122	
No. 4	丸 山 旅 館	104	〃	3.3	3	42	17	7.0	55.7	0.7	1.49			0.0367	4.29	0.260	
No. 1165	金 新 旅 館	62	〃	5.8	1	18	13	18.44	53	4.32	4.42			0.0127	4.81	0.208	
No. 35	別 府 市 役 所	73	〃	6.0	1	318	3.2	0.8	46.3	0.22	1.18	0.178	4.8	0.00409	0.14		
No. 1299	な る み 別 荘	132	〃	3.9	15	42	57	6	43.3	0.12	1.20			0.0334	2.79	0.340	
No. 316	關 屋 旅 館	45	〃	4.5	3	96	12	6	61.2	0.8	—			0.0256	1.61	0.285	
No. 315	關 屋 旅 館	56	〃	4.5	0	120	8	8	58.3	2.7	—			0.0342	2.15	0.208	
No. 319	鶴 万 旅 館	58	〃	4.5	4	30	8	5	62.7	0.9	—			0.0278	1.75	0.139	
No. 220	和 田 彦 別 荘	119	〃	4.0	0	24	21.2	14.4	62.1	1.18	1.66	0.035	5.1	0.0578	4.56	0.201	
												平均				平均	
												8.6				0.213	

具體的に略易き様、第 3, 4, 5, 6, 7 圖に觀測結果のほんの一部を例示した。尙ほ最近泉温と電氣傳導率は自記計を海岸附近に据付け連續記録中である。

他の必要資料中、潮汐記録は當時尙ほ別府海岸に檢潮器なきため大分港記録 ($\frac{1}{20}$ 縮小) を大分測候所長山川軍治氏の好意により借用し、前記觀測表中に併記して置いた。その後我が研究所でも驗潮儀を別府海岸に設置したから、大分と別府の同時驗潮記録を用ひ兩地

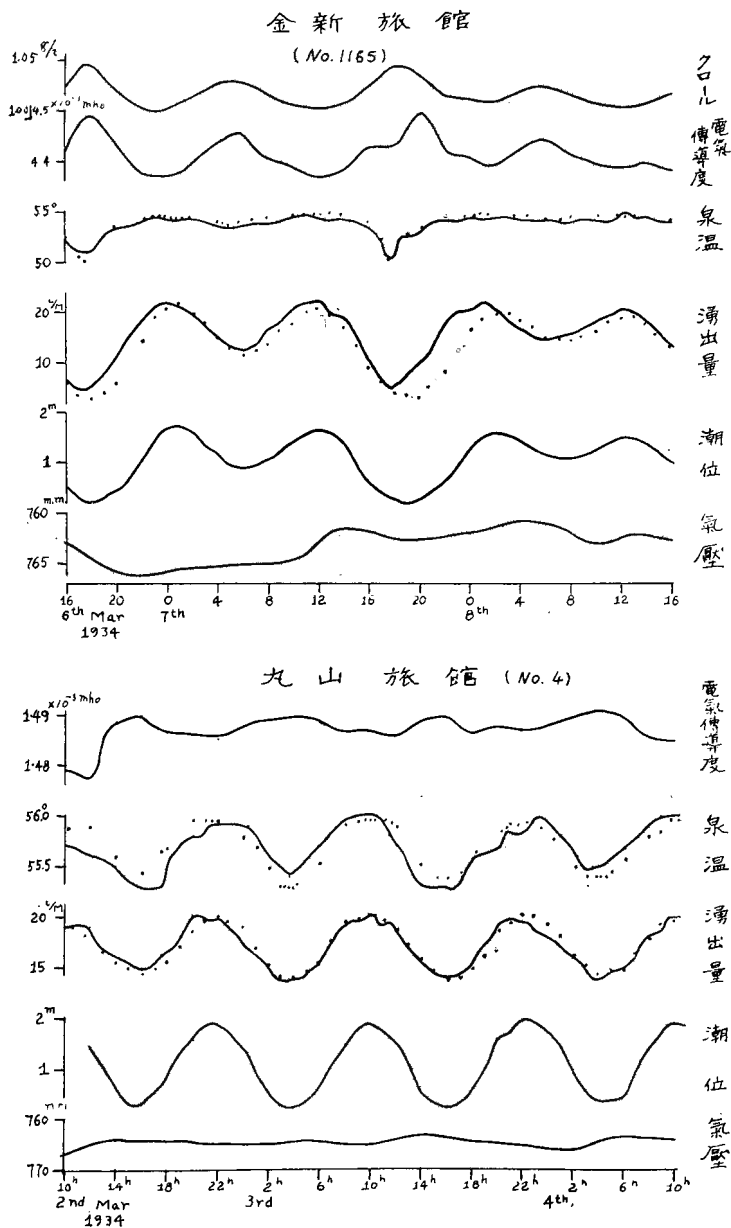
(4), (5) 本誌本號口繪參照。

別府温泉と潮汐附気圧效果

の潮汐を調和分析して第2表に掲げ其の異同を比較対照するに便した。

氣象要素は當京大別府研究所(海拔74m, 海岸距離1.75km)に於ける観測結果を採用⁽⁶⁾

第3圖 海岸に近き湧出口



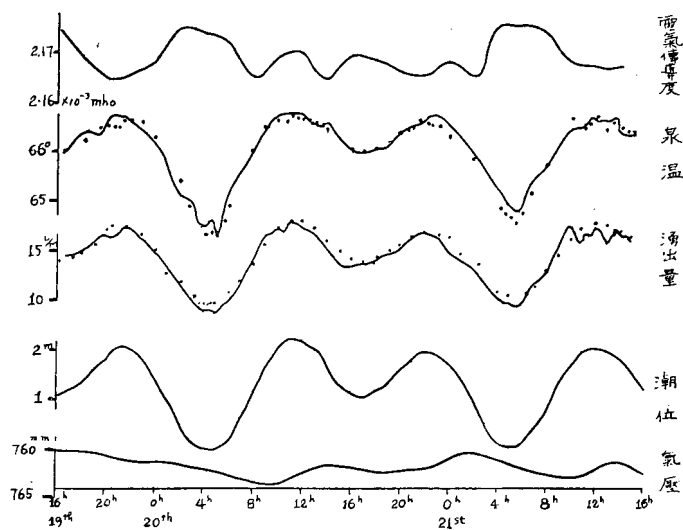
(6) 別府氣象各年報; 本誌第1卷第2號104頁。

別府温泉と潮汐附気圧效果

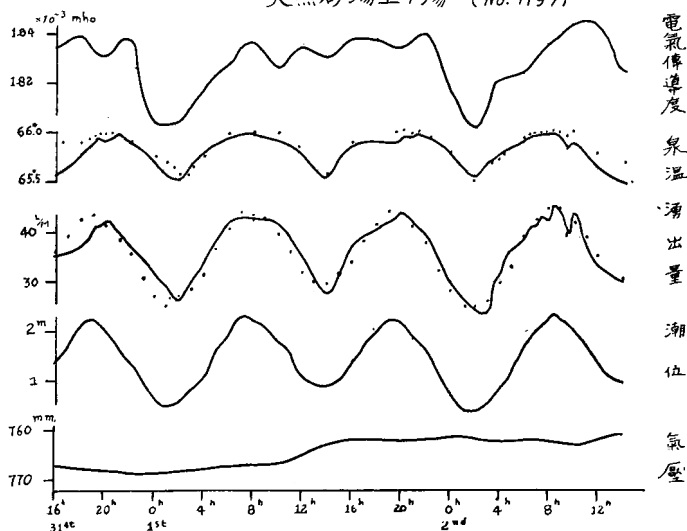
する。

第4圖 海岸に近き湧出口

二條館別荘 (No. 427)



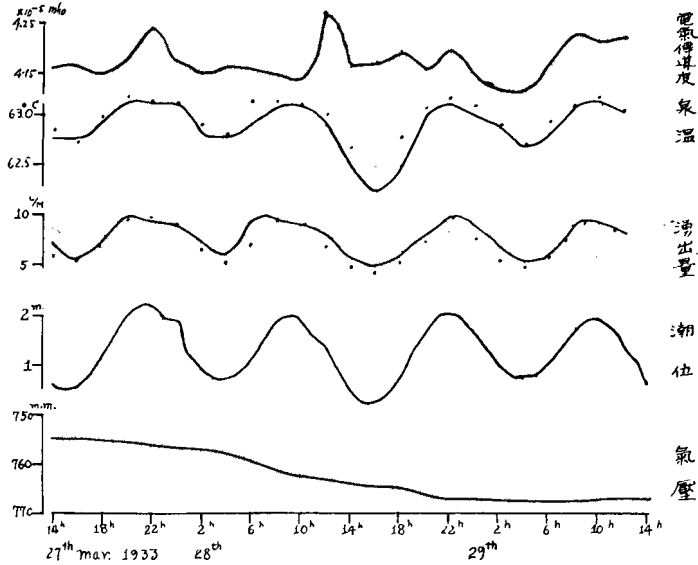
天然砂湯上り湯 (No. 1197)



別府温泉と潮汐附氣壓效果

第5圖 海岸に近き湧出口

鶴万旅館 (No. 319)



2. 湧出量變化と潮汐及び氣壓

湧出量の連續觀測から次の事項を知ることが出来る。

1) 湧出量變化は潮位變化に比例して増減し、第一次的近似として兩者に正の一次的關係がある。即ち湧出量を q , 潮位を H とすれば

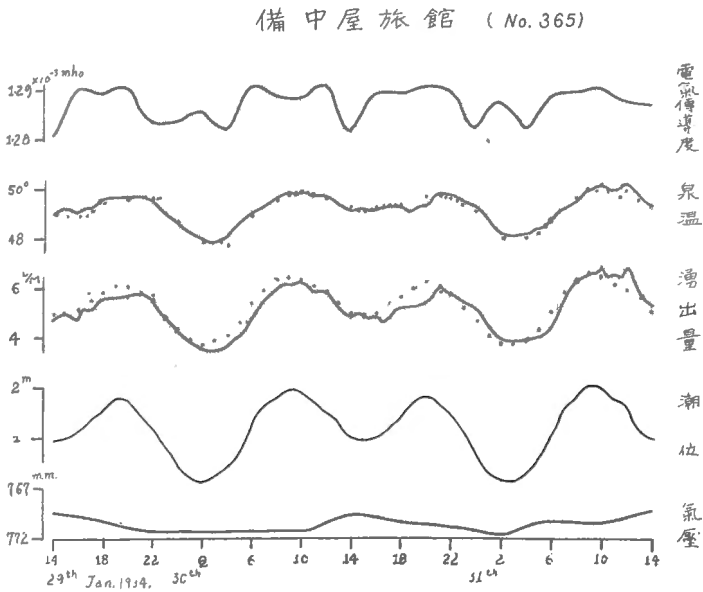
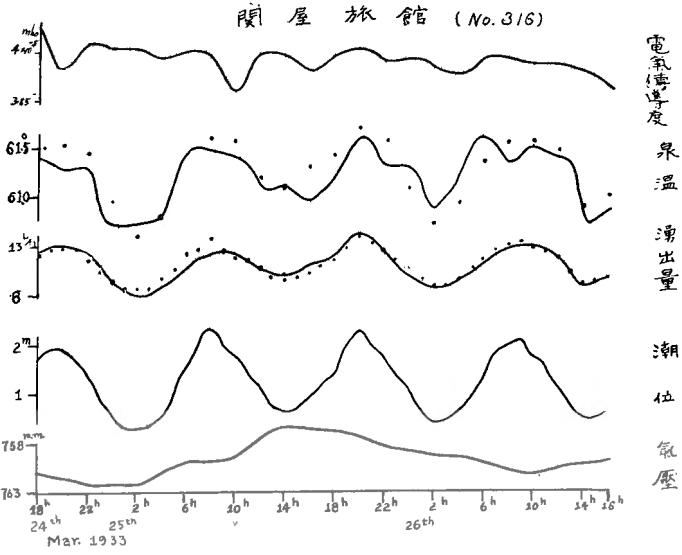
$$\partial q / \partial H = h (\text{常數}) \quad (1)$$

こゝに h は湧出口に固有な或る常數で、吾々は之を潮汐係數と呼ぶことにする。此の關係の存在は第 3 乃至 6 圖を見ただけでも略は見當はつくが、尙念の爲め其の内の二三につき (q, H) 曲線を引けば第 8 圖の如く略ほ直線上に配列するので首肯出来る。

觀測温泉全部の各々に對する h の値を算出して第 1 表中に示してある。 h の算定には、 Δq と ΔH は夫れぞれ q 及び H の最大最小値の差を求め、之によつて $\Delta q / \Delta H$ を出しその平均をとつた。第 3 乃至 6 圖の湧出量變化曲線に重ねて記入した點は上に求めた h の値を用ひ潮位より算出した湧出量である。大體に於て實測値とよく一致するのを見るべく、(1) 式の成立を裏書する。

別府温泉と潮汐附氣壓效果

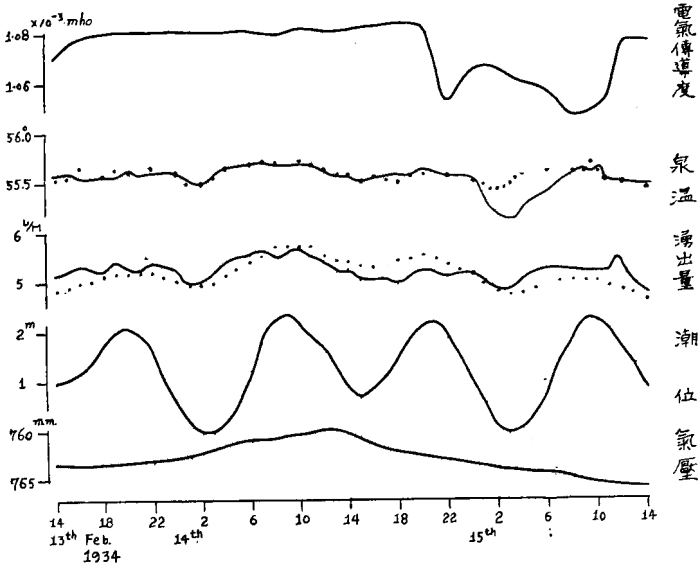
第6圖 海岸に少々遠き湧出口



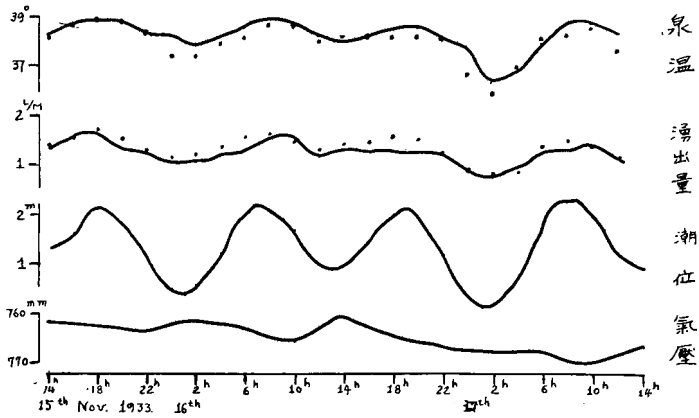
別府温泉と潮汐附氣壓效果

第7圖 海岸に遠き湧出口

大正館 (No. 594)



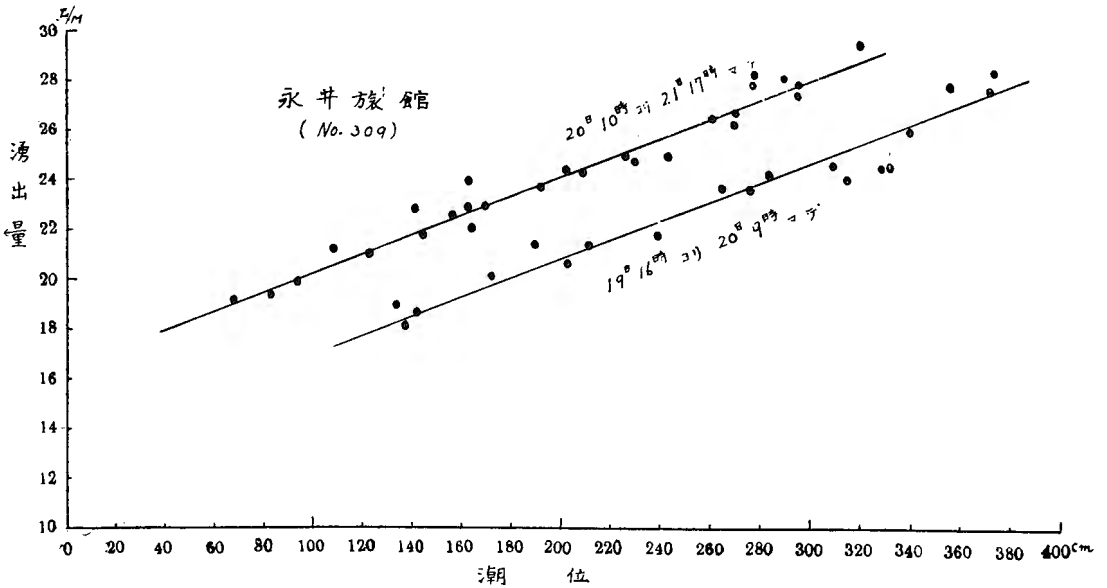
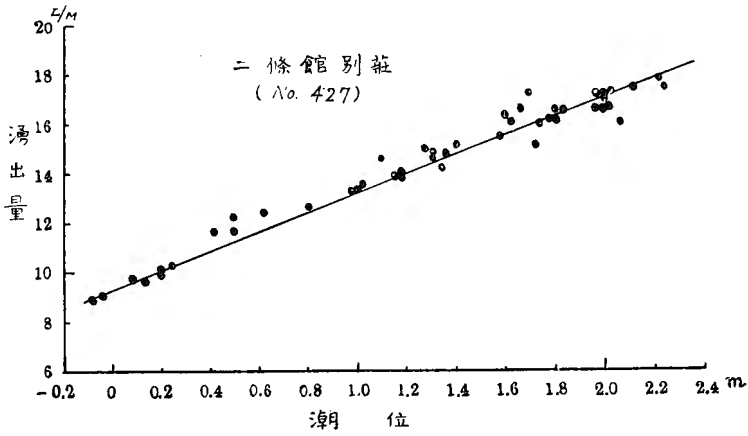
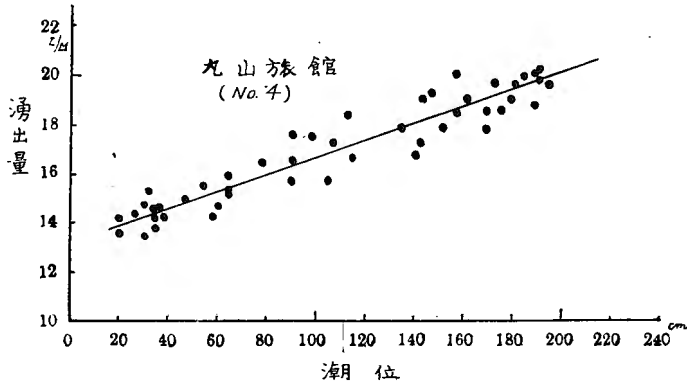
杉原壽氏宅 (No. 801)



和田彦別莊 (温泉 No. ~~201~~²²⁹) に於ける一ヶ月連続観測は潮汐の各分潮が夫れぞれ如何なる單獨効果を有するかを見るために行つたのであるが、其の湧出量及び同期間の大分港潮汐を共に調和分析して見ると第二表の如くである。各分潮によつて h の値は幾分か異なるけれども、大體に於て同一といつてよい。観測時期は違ふが後に我が研究所で得た別府海

別府温泉と潮汐附氣壓效果

第8圖 q-H 曲線數例



別府温泉と潮汐附氣壓效果

第二表 潮汐、湧出量及び泉温の調和分析概要

(i) 1934. V 17~VI. 16.

分 潮	大分港 潮汐	湧 出 量	泉 温	$h = \frac{\text{湧 出 量}}{\text{大分港潮汐}}$	大分港潮汐ニ對スル 湧出量ノ位相差	湧出量ニ對スル 泉温ノ位相差	
M ₂	k _m	252°	250°	270°		-2°	+20°
	H _m	c.m. 56.6	L/M 3.116	0.2179	L/M/m 5.40		
O	k _o	196°	193°	209°		-3°	+16°
	H _o	c.m. 18.3	L/M 1.045	0.1000	L/M/m 5.70		
S ₂	k _s	287°	285°	292°		-2°	+7°
	H _s	c.m. 22.0	L/M 1.241	0.1004	L/M/m 5.64		
K ₂	k'	287°	285°	292°		-2°	+7°
	H'	c.m. 6.0	L/M 0.338	0.0274	L/M/m 5.64		
K ₁	k'	203°	201°	212°		-2°	+11°
	H'	c.m. 23.1	L/M 1.283	0.1090	L/M/m 5.56		
P	k _p	203°	201°	212°		-2°	+11°
	H _p	c.m. 7.7	L/M 0.428	0.0363	L/M/m 5.56		

(ii) 1937. III. 1~III.31

(iii)

分 潮	大分港 潮汐	別府潮汐	大分港潮汐 別府潮汐	大分港別府ノ 潮汐位相差	$h = \frac{\text{湧 出 量}}{\text{別府潮汐}}$	別府潮汐ニ對スル 湧出量ノ位相差
M ₂	k _m	250°	251°		+1°	-3°
	H _m	c.m. 58.6	c.m. 61.2	0.959	L/M/m 5.18	
O	k _o	187°	190°		+3°	-6°
	H _o	c.m. 17.3	c.m. 19.0	0.912	L/M/m 5.20	
S ₂	k _s	280°	280°		0°	-2°
	H _s	c.m. 24.9	c.m. 26.6	0.935	L/M/m 5.28	
K ₂	k'	280°	280°		0°	-2°
	H'	c.m. 6.8	c.m. 7.3	0.935	L/M/m 5.28	
K ₁	k'	203°	207°		4°	-6°
	H'	c.m. 28.3	c.m. 30.7	0.924	L/M/m 5.14	
P	k _p	203°	207°		4°	-6°
	H _p	c.m. 9.4	c.m. 10.2	0.924	L/M/m 5.14	

(i) 別府海岸和田彦別荘温泉の湧出量、泉温の観測記録と之と同時に大分港潮汐記録による。

(ii) 大分港と別府海岸との各々の驗潮記録の同時のものによる。

(iii) は(i)と(ii)とを比較して得たるもの。

別府温泉と潮汐附氣壓效果

大分港潮汐調和常数 (小倉博士) 水路要報第 12 年第 11 號

M ₂		S ₂		K ₂		K ₁		O ₁		P ₁	
H _m	k _m	H _s	k _s	H''	k''	H'	k'	H ₀	k ₀	H'	k'
^m 0.59	242°	^m 0.24	270°	^m 0.07	270°	^m 0.26	208°	^m 0.19	185°	^m 0.09	208°

岸の潮汐記録から算定した分潮との比を取れば、 h は更に同値に近く益々吾々の信念を固くする。

別論文⁽⁷⁾にて發表の筈になつて居るが、別府温泉に於ては湧出量は水壓差に比例して變化することが明かにされて居る。即ち温泉の靜止水壓を P_0 、湧出口上端までの水柱による水壓を P_i 、湧出口切斷面積を a とすれば湧出量 q は

$$q = \frac{c}{g\rho} a (P_0 - P_i) \quad (2)$$

こゝに g は重力加速度、 ρ は温泉水の比重、 c は各湧出口特有の常数である。

湧出量が潮位に比例する爲には、(2) より P_0 が潮位に比例すると考へられる。即ち λ をある常数とすれば

$$P_0 = \lambda g \rho H \quad (3)$$

今の精密度では $\rho=1$ と考へてよいから、式 (1) (2) (3) より

$$c = h/a \quad (4)$$

こゝに c は地下の地層及び湧出導管の性状に関する常数であり、 λ は (3) より見れば潮位が海水壓として作用する減縮係数であるが、今のところ λ は分離しては求められないから、その儘積の形で h/a に等しいとして計算し第 1 表に掲げた。

2) 別府では全體として潮位と湧出量との變化に位相差は殆んどない。觀測は 30 分毎であるからそれ以上精密にはいへないけれども、位相差の認め難い温泉が多い。勿論時には位相差の認められるものも無いわけではないが、海岸よりの距離と位相差との間にも判然たる關係が見られない。金新旅館(第 3 圖)の如き湧出量の位相の進みが 1 時間ほど見られるかと思へば、之に極く接近した泉孫旅館(温泉 No. 1254/1)に於ては明かに 30 分程の遅れがある。砂湯上り湯(第 4 圖)林旅館(第 6 圖)備中屋旅館(第 6 圖)に於ては 1 時間内外の遅れが見られ、二條館(第 4 圖)には多少の進みが見られる。和田彦別莊に於ける一ヶ月連續觀測では、特に満干潮前後には 10 分毎の測定を行ひ精密を期したが、第 10 圖

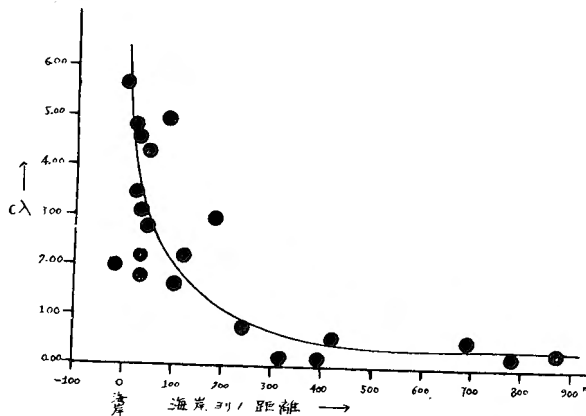
(7) 「別府温泉の湧出量と湧出口の高さとの相關」、近く本誌にて發表の豫定。

の如く位相差は明かでない。尤もこの一ヶ月観測を調和分析に附した結果(第2表)を見ると、各分潮とも僅に數度の位相の進みが出て来るが、之は僅々一ヶ月観測による調和分析の誤差範圍に屬すべきもので、第2表に附記した小倉博士⁽⁸⁾の出された大分港潮汐調和常数と對照すれば首肯出来る。

要するに上述の事柄は別府全體としては湧出量と潮汐の間に位相差が無いと云ふ方が真相に近い。

3) 潮汐影響は海岸を遠ざかるに伴ひ減少する。第1表の温泉21口につき其の α と海岸距離とを縦横軸にとつて圖にすると第9圖の様になり、 α の値が温泉の深度や湧出量などには無關係に海岸からの距離に従ひ漸減する傾向が明白に見られる。元來 α は地層の

第9圖 α と海岸距離



狀況やその他にも之に關係するものがあらうから海岸距離のみの函數ではないが、全體として見れば主として海岸距離に左右されるものであることは圖上から肯定される。而して此のことは結局湧出量に及ぼす潮汐の影響なるものが海岸を遠ざかるに従つて減少することを示すものである。

其の影響度が小となるにつれ影響の様式狀況は不規則で不明瞭となるのは自然の數である。之は、影響度が観測誤差の程度になるといふことも一つの理由であるが、又他の原因例へば氣壓變化や地層中の種々の事情によつて来る湧出量變化が潮汐影響の上に重さなり之を掻き亂すことも亦その理由である。和田彦別莊に於ける10分毎の観測にも不明の原

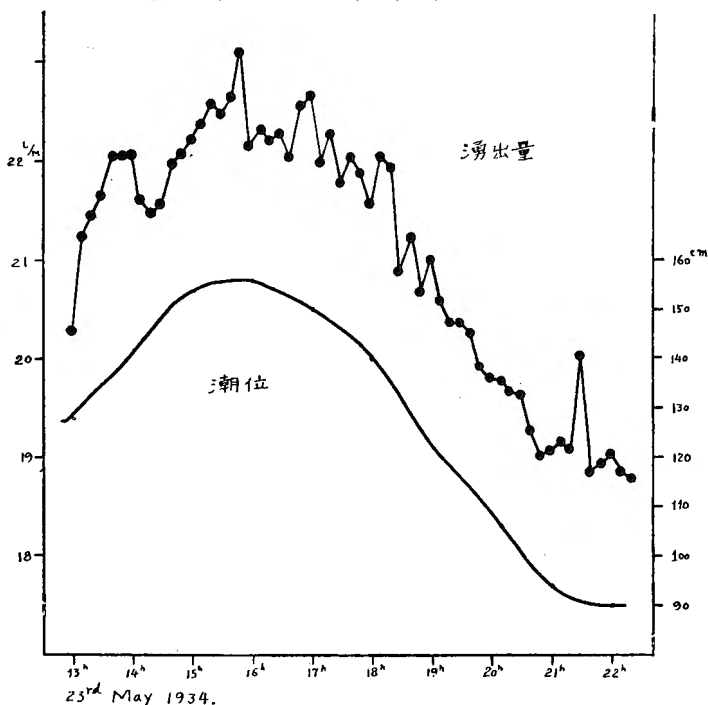
(8) 小倉伸吉「大分港潮汐調和常数」水路要報第12年、第11號
我々の値との違ひは1ヶ年観測の分析だからであらう。

別府温泉と潮汐附氣壓效果

因(海セイシの作用も含まれて居る様ではあるが)による 小さな變化が第10圖の如く現はれた。又泉孫旅館に於ける更に精密な觀測にも絶えず變動が見られた。是等も上述のこと

第 10 圖

和 田 彦 別 荘 に 於 け る 湧 出 量 の 十 分 毎 觀 測 の 一 例



を傍證して居ると見てよい。

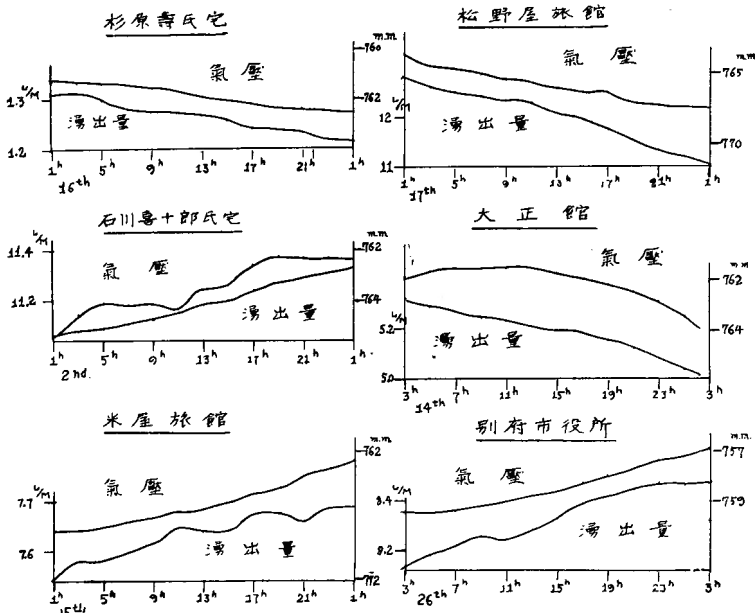
4) 氣壓の影響。海岸より遠ざかり潮汐の影響が小さくなるに従つて氣壓變化の影響が湧出量の上に明瞭に浮き上つて見える様になる。例へば第7圖の杉原壽氏宅 (No. 801) と大正館 (No. 594) の温泉に於ける觀測では、二日四回の満干潮は略ほ同高で頗る整然たるものであるが、湧出量の方は其の影響の上に更に大體として氣壓の作用を受けて居る形勢が窺はれ、氣壓大となれば湧出量は小となり氣壓が減すれば湧出量は増して居る。

此の相關關係を一層判然と了解するためには、湧出量の全變化から潮汐の效果を除去して氣壓影響のみを残す工夫をせねばならぬ。それには毎25時間の平均をとつて其の中間時刻の値とすればよい。さすれば海岸から遠い潮汐影響の小さい處では殆んど其の潮汐影響は消去される筈である。尤も氣壓が一日週期の變化をする場合には此の方法では其の影響までが同時に消去されるから、其の様な日は避けて氣壓遞昇或は遞降だけの場合を選ん

別府温泉と潮汐附氣壓效果

でやらなければ適切でない。此の様な考へで前記杉原壽氏宅及び大正館の外、石川喜十郎氏宅 (No. 671), 米屋旅館 (No. 491), 松野屋旅館 (No. 551), 別府市役所 (No. 35) の諸温泉で観測した結果を處理し第 11 圖を得た。

第 11 圖 湧出量と氣壓との關係(海岸より遠き諸泉)



是等は何れも海岸より遠き (320 m ~ 870 m) 諸泉であるが、氣壓と湧出量との關係は一目瞭然で、略近的には負の一次的關係を示す。即ち氣壓を P とすれば湧出量 q との間に

$$\partial q / \partial P = -\rho (\text{常數}) \quad (5)$$

なる關係がある。茲に ρ は各湧出口に特有な常數で、吾人は之を湧出量變化の氣壓係數と呼ぶことにする。第 11 圖に掲げた 6 泉の氣壓係數は (5) 式で計算し第 1 表中に示してある。

潮汐と氣壓とが共に作用するときの湧出量は (1) 及び (5) 式から

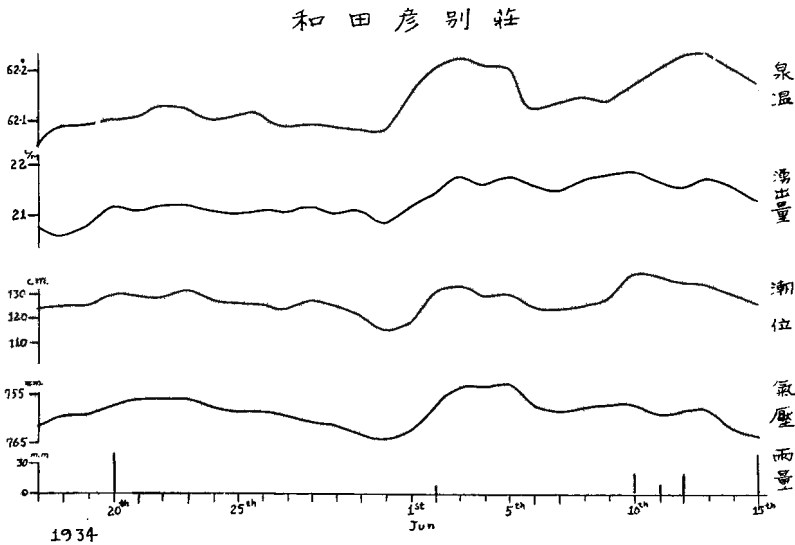
$$q = hH - \rho P + C \quad (6)$$

の様に表示することが出来る。こゝに C は雨のない短期間中は略ほ一定と見られる量で、 H と P とが零なる場合の基準湧出量にあたる。第 7 圖の大正館及び杉原壽氏宅に於ける湧出量曲線に重ねて打つた點は観測潮位と氣壓とを用ひ (6) 式で計算した湧出量である。観測値と計算値とは満足な一致を示すといつてよい。かくの如く海水壓及び氣壓の効果が湧出量と一次的關係を有することは一般地下水學上に於て成立する Darcy 法則が別府温泉

地下でも成立し、所謂層状温泉の状態にあることを暗示するものである。

尚ほ茲に気圧効果に關して注意を要する一事がある。それは海岸に近い（二三十米を超えない）湧出口では湧出量の變化が潮汐効果だけで説明され気壓の影響は考へなくてもよいかの様に見えることである。第 3, 4, 5 圖の諸例いづれも然りであるが、特に鶴萬旅館のそれ（第 5 圖）は著しい氣壓上昇に拘らずその影響は直接には認められない。然し之は決して眞實に氣壓の影響がないのではない。海面に働く氣壓の變化に伴ふ氣象潮は湧出量に影響を及ぼし得ざる性質のものなるに拘らず、それまで天文潮同様な効果をもつものと見て全潮位と湧出量とを關係づければ、最早や外に氣壓の効果が無い様に思はれるにすぎない。此の點を一層明かにするには、長期連續觀測を行つて日平均をとり日日の二回の顯著な天文潮を除去して研究するがよい。吾々の和田彦別莊（温泉 No. 220）に於ける一ヶ月連續觀測も實は調和分析を行ふ目的の外この點を明かにする意圖もあつたのである。此の温泉は海岸に近く距岸僅に 24 米に在るので、一日二回の干満の影響が頗る大で氣壓の影

第 12 圖 和田彦別莊1ヶ月連續觀測結果(日平均)



響を直接に識別することは困難であるが、一日平均をとつて見ると第 3 表及び第 12 圖の様な結果になり、氣壓の増減に伴ひ湧出量及び泉温の減増を來すことが實に氣持よく明瞭に浮き出して來る。而して茲に注意すべきは日平均海水位も亦湧出量變化と全く併行的に變化をして居る。讀者或は疑ふ人あるかも知れない、「この湧出量變化は海水位變化の效果で氣壓効果にあらず」と。然し吾々の見るところでは之は正しく氣壓効果で、海水位の變

別府温泉と潮汐附氣象效果

第三表 No. 220 和田彦別荘 一日平均値

昭和九年五月十七日ヨリ六月十五日マテ

日	湧出量	泉温	電氣傳導度	潮位	氣壓	氣温	濕度
5月		60.005°C	×10 ⁻³ mho				
17日	L/M 20.785	2.0807	1.6565	c.m 124	m.m 760.69	19.0	% 75
18	20.601	2.0808	1.6540	126	59.28	19.0	81
19	20.792	2.0854	1.6582	125	59.33	19.7	67
20	21.149	2.1083	1.6497	131	59.40	18.8	88
21	21.093	2.1106	1.6494	130	56.09	19.1	89
22	21.184	2.1285	1.6486	129	55.73	21.1	62
23	21.207	2.1286	1.6521	132	55.62	19.4	68
24	20.852	2.0928	1.6501	128	57.62	18.5	64
25	21.016	2.1129	1.6474	127	58.46	18.2	65
26	21.113	2.1126	1.6509	126	58.67	19.7	62
27	21.005	2.0880	1.6513	124	59.23	19.9	69
28	21.200	2.0373	1.6505	128	60.40	19.2	78
29	21.022	2.0318	1.6482	126	62.09	21.3	65
30	21.008	2.0837	1.6480	122	62.42	20.5	69
31	20.866	2.0814	1.6521	126	64.44	20.9	77
6月							
1	21.122	2.1503	1.6480	128	62.89	21.4	77
2	21.400	2.2035	1.6475	131	57.23	20.7	81
3	21.841	2.2156	1.6476	133	52.63	22.7	70
4	21.646	2.1816	1.6471	129	54.43	21.8	56
5	21.813	2.1777	1.6463	130	52.76	20.7	64
6	21.560	2.1216	1.6452	125	57.47	21.1	38
7	21.514	2.1360	1.6457	124	58.44	20.9	49
8	21.632	2.1504	1.6453	124	58.26	21.1	71
9	21.706	2.1374	1.6461	128	57.87	20.9	69
10	21.916	2.1784	1.6460	133	56.99	19.1	30
11	21.630	2.2014	1.6470	127	58.87	22.4	76
12	21.530	2.2263	1.6463	125	58.56	19.9	36
13	21.767	2.2389	1.6440	134	58.64	19.9	81
14	21.549	2.2184	1.6456	131	62.00	22.1	57
15	21.321	2.1730	1.6450	127	62.32	18.9	31

化其のものまで氣壓の作用による二次的氣象潮に外ならぬ。その理由は著者の一人(野滿)が嘗てその著「海面昇降の諸原因」論中⁽⁹⁾に明かにした如く、海面に働く氣壓の變化は之に釣合ふ負の海面昇降(氣象潮)を生じて結局海底壓としては變化を與へないと云ふことで説明される。第12圖に現はれた海面變化は海上の氣壓變化を補充するもので海底壓としては互に打消し合ひ影響を及ぼさない。従つて其の方面からの湧出量に及ぼす效果は期待されない。かくて氣壓は湧出口直上からも海上からも働くに拘らず、湧出口直上の氣壓のみが感じられ、海岸近くの温泉にも内陸同様な氣壓效果が及ぶのである。

以上の如く考へるときは鶴萬旅館に於ける場合、一見氣壓の作用がない様に思はれるのも實は然らずで、實測の全潮汐(氣象潮をも含む)と湧出量が一次的關係にあること自體が既に氣壓の影響を證據立てて居るのである。

以上縷説せし如く、氣壓の效果は湧出口直上へのみ作用すると見てよいとすれば、海水壓の如く其の作用が湧出口の位置(海岸距離)によつて減少されることはない筈である。依つて潮汐影響係數 c を(1)から(4)の様に出したと同様な手順で氣壓係數を(5)から求める場合には $\lambda=1$ と考へてよいであらう。即ち

$$c = \rho/a \quad (7)$$

として、各温泉の氣壓係數を計算し第1表に併記してある。その結果は明かに海岸よりの距離には關係なく、略々同一程度の数であることは上述の豫想を立證して居るといつてよい。

5) 潮汐及び氣壓效果の機構。別府の温泉が潮汐及び氣壓の作用で湧出量の變化する機構に就いては吾々は次の如く考へる。氣壓の作用は湧出口直上に働き、温泉湧出力を阻止するものであつて、其の阻害作用が氣壓の増減に伴つて變化し恰も水道栓を開閉する様な關係で直接其の湧出量に影響を及ぼす。又潮汐の作用は其の海底壓によつて別府温泉の海中湧出を調節し、延いては陸上に湧出口下端の温泉壓の増減となり其の結果湧出量に影響を及ぼすこと、恰も水道の下端に於ける使用量が上部水道栓の出方にまで影響する様なものである。

或は潮汐の干満や氣壓の變化は地盤の荷重に變化を及ぼし、地盤傾斜による流速の變化や地下温泉層の伸縮によつて温泉水の絞り出しに影響を及ぼすといふことも考へられぬこ

(9) T. Nomitsu and M. Okamoto, The Causes of the Annual Variation of the Mean Sea Level along the Japanese Coast. 京都帝大理學部紀要, A, 第10巻, 第3號, 125頁。

とはないが、然し別府に於ては潮汐による地盤の傾斜は 0.05 程度で水頭勾配に比し桁違ひであるし、又其の泉狀其他種々の方面から見て絞り出しの作用も殆んど無いか若くは有つても極めて微小であらう。例へば潮汐の作用と氣壓の作用が同じく荷重でありながら、湧出量に及ぼす相關は正負反對であることや、氣壓係数は海岸距離に關係なく、且つ氣壓は海面を通じては荷重とはならないから潮汐と氣壓の荷重作用區域は全然別でありながら、其の平均值と海岸近くに於ける潮汐係数の平均值との比が、湧出口水位變化と潮位變化との比と同じものであることが後に別論文⁽⁷⁾で報告する泉孫旅館に於ける測定より知られることなど、何れも潮汐作用は温泉埋設管下端の水壓に影響し、氣壓作用は湧出口直上に作用するものと見て充分なることを示す。

6) 潮汐係数と氣壓係数との比較異同。第1表を見れば同一温泉に在りては氣壓係数が常に潮汐係数より大きい。又氣壓作用は海岸距離には無關係であるのに、潮汐影響は海岸距離と共に激減する。

是等の事實は矢張り上記5)の見解を取れば譯なく理解出来る。即ち同じ壓力でも、氣壓は其の儘湧出口直上に作用するから少しも減じられることなしに影響を及ぼし、又海岸距離には無關係なるべく之に反し潮汐は海底壓として地層を通じ湧出口下端に作用するから海岸近くに於ても幾分減少されて影響し氣壓係数よりも小なる係数を與へ、海岸を距れば益々其の影響は減衰する。尙別府温泉の地下状況及び温泉水脈は「別府舊市内温泉概観」⁽¹⁰⁾中に述べた様になつて居り、海中温泉も確かにあつて海底との連絡も疑なく存在することなどを併せ考へると、別府温泉に對する潮汐の作用は海岸の汀渚そのものからではなく若干沖合からも傳はるものと推察される。

3. 泉温に及ぼす潮汐及び氣壓の影響

第3乃至7圖を見れば、泉温變化も湧出量と同じく潮位變化に並行し正の相關を示して居る。但し其の相關は簡単な一次的關係のものではないことが、二條館別荘、金新旅館、住三旅館に於ける觀測（第3,4圖）で窺はれる。

1) 泉温が潮汐によつて變化する原因は海水の直接混入によるのではない。なぜなら、潮汐のために泉温の變化を見る範圍は海岸から相當距つた所までも及んで居るが、潮汐の

(10) 本誌、第1卷第4號、1頁。

干満によつて夫れ程廣範圍に互り地層中を海水が出入するとは考へ難い。のみならず、次項にのべる鹽分及び電氣傳導度は一般に泉温の増加するときに却つて減少して居る。更に第 12 圖に掲げた和田彦別莊に於ける觀測の結果に見ても泉温は湧出量及び潮位に並行であるが、此の場合の日平均潮位の變化は既述の如く海底壓に變化を與へるものでないから之が爲めに地層中を海水が出入するとは全然考へられない。かくて泉温の變化は海水の直接混入によるものではないことが明かである。然らば如何なる理由によるであらうか。

2) 潮汐に伴ふ泉温變化は湧出量變化による二次的影響で、導管上昇中の冷却に差異を生ずるからである。即ち潮位が高く湧出量が増せば、温泉水の地表に出づる迄の時間が短く従つて途中の冷却が少く原温に近い高温を保持し得るに反し、潮位低く湧出量減すれば温泉水の地表に出づる時間が長くなり、途中に冷却さるゝこと著しくために泉温の低下を來すわけである。このことは間もなく別論文⁽¹¹⁾で湧出口導管中に於ける泉温分布を満干潮時に測定し立證するのであるが、間違のないことと確信する。

扱て地表に平行な温泉高温層より細き垂直導管にて低温地層を経て地表まで温泉水が湧出するときの地温 T の變化は、圓筒座標 (r, z) を用ふると次の微分方程式で表はされる。

$$s\rho \frac{\partial T}{\partial t} = k \left(\frac{\partial^2 T}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial T}{\partial r} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right) \quad (8)$$

こゝに k は地層の熱傳導率、 s は比熱 ρ は密度 t は時間で、垂直座標 z は地表から下方へ測ることとする。

吾々の今の目的には

$$\begin{cases} z=0 \text{ (上端) で } T=f(r), & z=l \text{ (下端) で } T=\text{一定} \\ r=r_1 \text{ (導管外壁) で } q \frac{\partial T}{\partial z} = -2\pi r_1 k \frac{\partial T}{\partial r}, & r=\infty \text{ で } \frac{\partial T}{\partial r} = 0 \end{cases}$$

なる條件で (8) が解ければよいが、完全解は到底困難である。そこで最も簡単に略算を行ふこととし、導管の下端から上端まで $k \frac{\partial T}{\partial r}$ の平均を用ひ、湧出量を q とすれば

$$-q(T_b - T_u) = 2\pi r_1 l k \overline{\frac{\partial T}{\partial r}} \quad (9)$$

こゝに

(11) 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；本誌本號 32 頁。

$T_b =$ 下端泉温, $T_u =$ 上端湧出温度

従つて

$$\Delta T_u = \Delta \frac{1}{q} \cdot 2\pi r_1 l k \frac{\partial T}{\partial r} \quad (10)$$

を得る。(10)式で湧出量及び泉温の變化から $k \frac{\partial T}{\partial r}$ を求めることが出来る。

かくして求めた各泉の $k \frac{\partial T}{\partial r}$ の絶対値を第1表に併記し、更に此の値を用ひ實測の湧出量變化から導管途中の冷却度を計算して得た泉温變化を第3, 4, 5, 6圖中に實測の泉温變化曲線に重ねて點線で表はした。略ほ實際の泉温變化を説明し得たといつてよいであらう。但し泉温及び湧出量の變化の甚だ小なる湧出口に對しては、上の計算法は無理であるから行はなかつた。

尙ほこの $k \frac{\partial T}{\partial r}$ の分布狀況を見るために、第1圖中に $k \frac{\partial T}{\partial r} \geq 0.213$ に従つて湧出口を分類記載してある。之によると、流川や濱脇及び竹瓦温泉附近はその値が小さい。若し地層の傳導率 k が全區域大差なきものならば、上述の個所は $\frac{\partial T}{\partial r}$ が小さく従つて附近地温が比較的高いことを示す。實際是等の地點は古來自然湧出の筋といはれる地帯に一致し興味深きを感じる。

$k \frac{\partial T}{\partial r}$ が得らるれば、湧出口上端の温度から下端の原温も推算出来るが、それ等は又他日に譲る。

3) 氣温の影響。温泉水が地表に出てから長い水平導管に導かれる様な構造の温泉では氣温の影響が認められる。特に埋設垂直管が浅いものや湧出量の小なるものに著しい。米屋旅館及び松野屋旅館の温泉は其の適例である。

4) 泉温と湧出量との位相差は多く之を認めることが出来ない。然し上述の如く導管中を上昇する間に冷却することが泉温變化の眞因であるならば、泉温の位相がいくらか遅れてもよいわけではある。事實和田彦別莊に於ける觀測の調和分析では30分乃至1時間半の遅れが出て来る。しかしこの場合下端から上端まで温泉水の上昇所要時間は約7分になるから、これでは上の遅れの説明には不充分である。實際には湧出口導管に入る以前の冷却も多少はあるかも知れぬし、又嚴密には(9)式が成立せないためもあらうし、調和分析が只一ヶ月觀測によつた不充分さもあつて、餘り嚴格な議論は進められない。まづ大體に於て目立つ程の位相差はないといふ方が無難と思ふ。

4. 電氣傳導度變化

温泉水の溶解物質が微量なるものに就いては潮汐によつて受ける影響は亦甚だ小なるため、化學分析上は勿論、電氣傳導度につきても規則的な變化を見出すことが出来ない。しかし溶解物質の多い温泉につきましては可なり法則的な變化を示す。例へば第 3, 4 圖に掲げた砂湯上り湯、永井旅館、二條館別荘、松野屋旅館、丸山旅館、金新旅館等に於て然るを見る。此の内砂湯上り湯だけは電氣傳導度變化が潮汐に正の相關を示して居るが、他のものはすべて負の相關を示して居る。金新旅館に於けるクロール量も同様である。

一般には海水が直接温泉に混入しないであらうことは前節にのべた通りである。混入によるとすれば、潮位の上昇につれ泉温は上りクロール及び電氣傳導度が反對に減ずることは説明出来ない。依てこゝに於ても亦、湧出量の變化に伴ふ二次的影響と見られるのではないかと思ふ。別府温泉の溶解物質の量的分布圖⁽¹²⁾を見れば可なり複雑なもので、溶解物質の一因は湧出口下方附近の地層にもあるやうである。されば溶解物質を溶解しつゝ湧出口に集合する温泉水は、湧出量の増大するときは集合の速さが大となるが溶解物質の量はそれに比例して増加せず結局溶解率の減少となるのであらう。たゞ砂湯上り湯だけが湧出量と共に電導度の増加を見るのは、同泉が自然湧出線上にあつて而も砂湯の海中湧泉である如き特異な地點にある關係上直接海水の混入などが可能なのかも知れない。

5. 結 論

以上述べ来たことを要約すれば

- (1) 湧出量變化は潮汐變化に比例して増減する。その差の大なるものは 19.74 L/M に及び、甚だしきものは平均湧出量に對し 94% に及ぶものすらある。
- (2) 湧出量に對する潮汐影響は海岸近くで大きく之を遠ざかるにつれて急に激少するが別府市内では潮汐の影響を多少とも受けないところはない。
- (3) 湧出量は氣壓の増減に反して變化する。
- (4) 潮汐が湧出量に及ぼす作用はその海水壓として温泉水頭を變化せしめ、氣壓の作用は湧出口直上のみより及ぼし海面を通じては及ぼさない。

(12) 山下、木戸、丸田；別府市内温泉のクロール量分布、本誌第 1 卷第 2 號 92 頁。

別府温泉と潮汐附氣壓效果

- (5) 湧出量變化と潮汐變化との間には位相差がない。
- (6) 泉温は湧出量變化に並行して上下し、其の差 9.3°C に及ぶものもある。
- (7) 泉温は氣壓の増減に反して上下する。
- (8) 泉温變化は潮汐若くは氣壓の直接影響ではなく、湧出量の變化に伴ふ導管中の冷却に差を生ずる二次的效果である。
- (9) 導管中の冷却度は自然湧出のある附近では小さい。之はその附近の地層が比較的高温なるに基づくものであらう。
- (10) 電氣傳導度乃至クロール量の變化は潮汐に反して増減する。之も潮汐の直接影響ではなく、湧出量變化に伴ふ二次的變化のやうである。

畢竟するに、潮汐は海水壓として直接湧出量に影響し、泉温及び溶解分の變化は湧出量の變化に伴うて生ずるものと考へられる。

尙ほ長期變化（例へば年變化）の性質及び其の原因につきては更に調査研究を新にする積りである。

終りに此の研究にあたり測定の便宜を與へられた温泉所有者各位の厚意を謝し、更にその測定に惜しみなき助力を給はつた竹上藤七郎、池田亮二郎、土生片樟、山下馨、松崎卓一、山下幸三郎、上野良雄、神田護重の諸氏に衷心より感謝する。

尙、本研究の費用の一部に學術振興會援助金の一部を充當したことを明記して、茲に同會に深謝の意を表する。