

別府旧市内温泉井の水位変化について (第2報)

京都大学理学部地球物理研究施設 山下 幸三郎

(昭和41年3月3日受理)

Fluctuations of Water Level in Wells in the Old City of Beppu Spa. II.

Kosaburo YAMASHITA

Faculty of Science, University of Kyoto

From the hydrographs of the well observed in the old city of Beppu Spa, a close relationship has been found between the change of the water level and that of the atmospheric pressure. This relationship is inverse. The barometric efficiencies are not always the same value. Moreover, the phase of the water level precedes that of the atmospheric pressure. The cause of this abnormal phenomenon may be inferred chiefly from the fact that the observation well is located near a break in the aquiclude where the confined thermal waters are communicated with the shallow ground waters. By means of this treatment, the writer gave a theoretical explanation to this phenomenon.

1. 緒 言

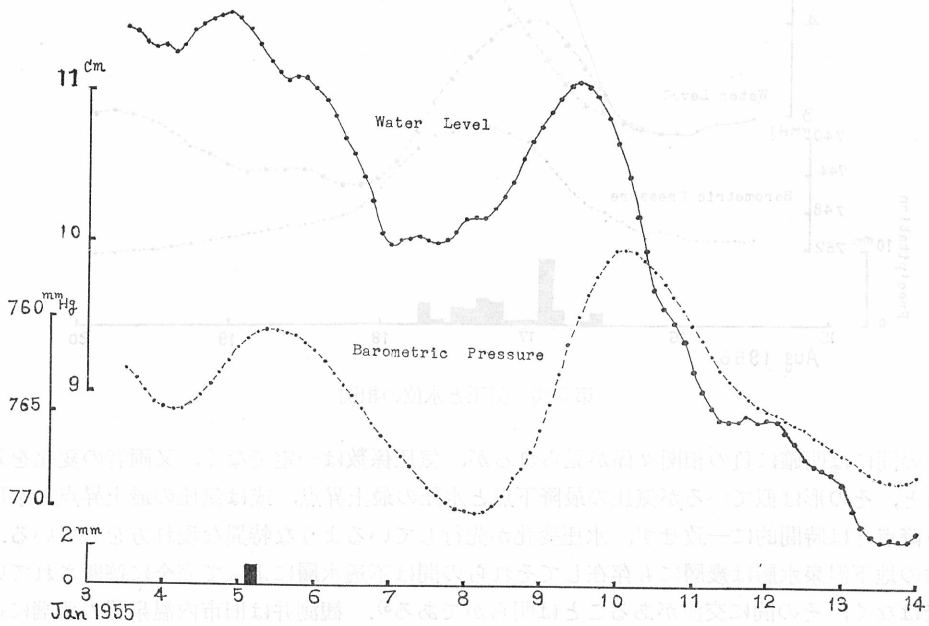
別府旧市内温泉の湧出量に及ぼす気圧の影響について多くの観測資料から負の一次相関のあることが見出されている¹⁾。しかし測定された気圧係数は温泉によって可成の相違がある。これは気圧変化が一般に小さいから、この影響も小さく、湧出量には潮汐や降雨等の影響が重合されているから、短期間の観測ではこれらの完全な除去が困難なことにもよるであろうが、温泉は広範囲にあってその深度に相違があり、又温泉水層の地下構造にも地域的に違いがあると考えられ、したがって気圧影響もまた違いがあると予想される。気圧影響を更に精しく調べるため、湧出量より精度の高い温泉水圧の長期連続観測を行った。観測井は気圧以外の潮汐や降雨の影響のないところが最も解析が容易であるが、両者の影響の全くないところはないから、常時現れる潮汐の影響の小さい山手の温泉を選んだ。観測井の位置、深度、口径並に潮汐、降雨の影響については既に発表した²⁾。今回は気圧影響について、気圧の変化とこれによる水圧変化の間には負の相関関係があるが、その位相には著しき相違があり、しかも水圧変化の方が先行している如き特異な変化を示した。このような変化はこの地域の地下温泉水層の特異な構造によると考え、この構造について一つの Model を考えこれについての理論的な考察からこの現象の解明を行った。

2. 観測井の気圧効果について

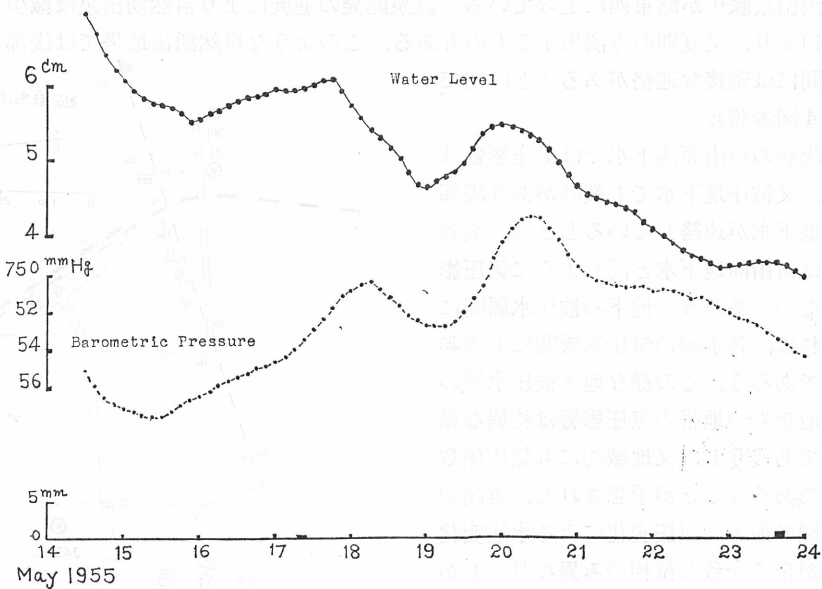
観測記録によれば潮汐影響があり、これは潮汐記録と対比して除去することが出来る。降雨影響は既に発表したように相当顕著に現われるから、気圧影響のみを調べるには降雨のないときの大きな気圧変動による水圧変化を調べるのが最も解析が容易である。しかし一般に大きな気圧変動には降雨を伴う場合が多い。この場合は既に求められた降雨効果の関係式を用いて除

去ることが出来る。別府温泉ではほとんどが自噴井であってその湧出水頭は一定にしてあるから揚水は定常状態にあると見做され、気圧の影響の短期的な変動について調べる場合は揚水による影響は無視することが出来る。実測記録には他の温泉の不連続的な揚水による影響は認められなかったの、これを無視して解析した。

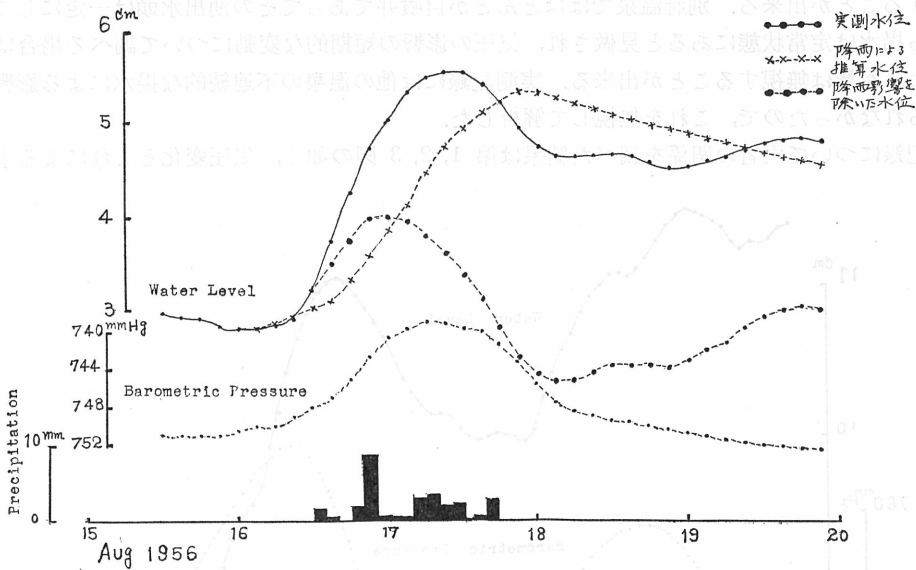
記録について両者の関係を調べた結果は第 1, 2, 3 図の如く、気圧変化とこれによる水圧変



第 1 図 気圧と水位の相関



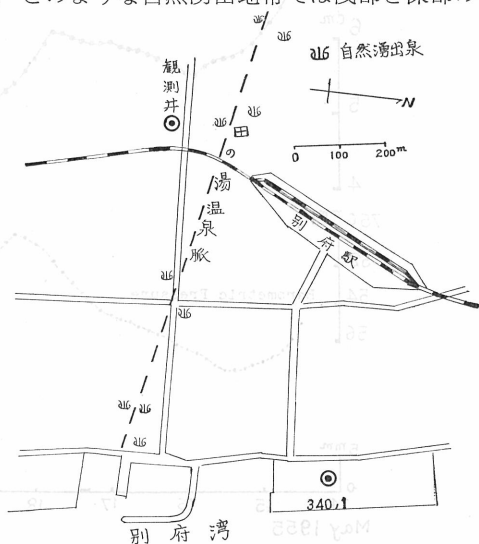
第 2 図 気圧と水位の相関



第3図 気圧と水位の相関

化の間には明確に負の相関々係が見られるが、気圧係数は一定でなく、又両者の変化を対比すると、その形は似ているが気圧の最降下点と水圧の最上昇点、或は気圧の最上昇点と水圧の最下降点とは時間的に一致せず、水圧変化が先行しているような特異な現れ方をしている。旧市内の地下温泉水層は幾層にも存在してそれらの間には不透水層によって完全に遮断されているのではなく、その間に交流があることは明らかである³⁾。観測井は旧市内温泉群の西端に近いところにあり、周辺温泉の密集度は大きくないが、これが北方 100~200m には自然湧出泉を持つ田の湯温泉脈⁴⁾が略東西に走っている。温泉開発の進展により自然湧出泉は減少したが、現在尚数口あり、又夏期のみ湧出するものもある。このような自然湧出地帯では浅部と深部の温泉水層間には密接な連絡があることは明である(第4図参照)。

一般に浅層の自由面地下水では気圧影響は現れない。又被圧地下水でも裂隙があり浅部と深部の地下水が連絡しているときは、裂隙の近傍では自由面地下水と同じように気圧影響は現れないであろう。地下の被圧水層間に連絡があれば、各水層の気圧影響間にも関聯が生ずるであろう。このような地下被圧水層の特異な構造をもつ地帯の気圧影響は特異な様相を示すであろうし、又地域的にも気圧係数は異なるであろうことが予想される。実測記録では前図の如く、気圧変化による水圧変化はその形が全く一致し位相のみ異なり、しかも水圧変化が先行する如き特異な変化を示す



第4図 観測井の位置

ことは深部被圧温泉水層が裂罅により浅部自由面地下水と連絡していることが主要な原因をなしていると思われる。したがって裂罅の存在が被圧地下水の気圧影響に如何なる作用を及ぼすかについて理論的な考察を行い、実測結果と比較検討を行った。

3. 裂罅の近傍における被圧地下水の気圧影響

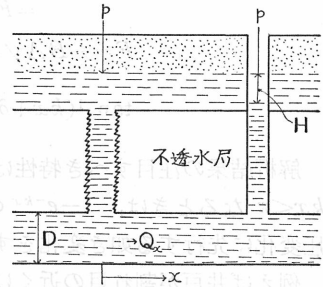
地下に単一の被圧地下水層があり、そのある地点において上部の不透水層に割れ目があり、浅部の自由面地下水と連絡しているとする。第5図はその割れ目に直角な断面を示す。この被圧水層に掘られた井戸の気圧係数を B とすると気圧変化 p に対応するこの井戸の水圧変化量 H は

$$H = -Bp \dots \dots \dots (1)$$

気圧変化による被圧水の水圧変化 h は

$$h = p + H = (1 - B)p$$

$$H = h - p \dots \dots \dots (2)$$



第5図

割れ目上では自由面地下水と被圧地下水とは連絡しているから気圧変化はそのまま被圧地下水に作用し、又自由面地下水の水位変化は起らないから、この点における被圧地下水の水圧変化は $h_0 = p$ であり、他の地点での水圧とは $h_0 - h = Bp$ の差が生ずることになる。したがって被圧水層内の水の流動は変化する。

今被圧水層の厚さを一様に D とし、割れ目の点より井戸までの距離を x 、透水量係数を T とすると、断面上の単位幅を流れる変動流量 Q_x は

$$Q_x = -T \frac{\partial h}{\partial x} \dots \dots \dots (3)$$

外圧の変化によるこの水層の圧縮又は伸長の係数を C_s 、水の圧縮率を C_w とすれば連続式は

$$\frac{\partial Q_x}{\partial x} = \rho g D C_s \frac{\partial(p-h)}{\partial t} - \rho g \theta D C_w \frac{\partial h}{\partial t}$$

$$= \rho g D C_s \frac{\partial p}{\partial t} - \rho g D (C_s + \theta C_w) \frac{\partial h}{\partial t} \dots \dots \dots (4)$$

ここに ρ は水の密度、 g は重力の加速度、 θ は被圧水層の空隙率である。

貯溜係数 S および気圧係数 B は次の如く表わされるから⁵⁾、(4) 式は次のようになる。

$$S = \rho g D (C_s + \theta C_w)$$

$$B = \frac{\theta C_w}{C_s + \theta C_w}$$

$$\therefore \frac{\partial Q_x}{\partial x} = S \left\{ (1 - B) \frac{\partial p}{\partial t} - \frac{\partial h}{\partial t} \right\} \dots \dots \dots (5)$$

(3) 式と (5) 式とから

$$\frac{\partial \{h - (1 - B)p\}}{\partial t} = \frac{T}{S} \frac{\partial^2 h}{\partial x^2} \dots \dots \dots (6)$$

今気圧変化が $p = A \cos \omega t$ なる週期的変化をすると仮定して次の条件により (6) 式を解くと

$$\left. \begin{aligned} t=0, & \quad h=0 \\ x=0, & \quad t>0 \quad h_0 = BA \cos \omega t \end{aligned} \right\} \dots \dots \dots (7)$$

$$h(x, t) = (1 - B) A \cos \omega t + B A e^{-kx} \cos(\omega t - kx) \dots \dots \dots (8)$$

ここに $k = \sqrt{\frac{S_w}{2T}}$ である.

井戸の水圧変化 $H(x, t)$ は (2) 式から

$$\begin{aligned}
 H(x, t) &= h(x, t) - p \\
 &= BA \{e^{-kx} \cos(\omega t - kx) - \cos \omega t\} \\
 &= F \cos(\omega t + kx + \delta) \dots \dots \dots (9)
 \end{aligned}$$

$$F = -BA \sqrt{e^{-2kx} - 2e^{-kx} \cos kx + 1} \dots \dots \dots (10)$$

$$\tan^{-1}(kx + \delta) = \frac{e^{-kx} \sin kx}{1 - e^{-kx} \cos kx} \dots \dots \dots (11)$$

解析結果の注目すべき特性は (11) 式で示される水圧変化の位相の遅れである. $kx + \delta$ は $kx < \pi$ なるときは, $1 - e^{-kx} \cos kx > 0$, $\sin kx > 0$ であるから常に正となり, 水圧変化は気圧変化に先行する如き変化をする.

例えば井戸が割れ目の近くにあると, 気圧変化の週期が短いときは影響が現れるが, 長い場合は $kx \rightarrow 0$, $F \rightarrow 0$ となって気圧影響は現れない. 又割れ目から遠い井戸は kx が大きくなるから, $F \rightarrow -BA$, $kx + \delta \rightarrow 0$ となって常に気圧影響が現れる.

本多⁶⁾ は東京における降雨影響の顕著な観測井において長週期の気圧変化は現れないが, 短週期では現れることが観測された. この結果は上記の如き機構を考えることによって説明されると思う.

4. 別府の観測井への適用

気圧の週期的変化の最も顕著なものは, 日変化と年変化とであるが, 年変化は前記解析結果から影響の現れない恐れがあるから, 日変化について特に顕著に現れた数日を取って気圧と水位を統計し, 位相の違いと振幅比を求めた. 振幅比 R は (10) 式から

$$R = \frac{F}{A} = -B \sqrt{e^{-2kx} - 2e^{-kx} \cos kx + 1}$$

観測井の B は不明があるから, 上式の kx の値に対する R 及び位相差を計算し半日週期及び一日週期の位相差から R の値を求めると

半日週期 $kx = 0.39$, $R = 0.43B$

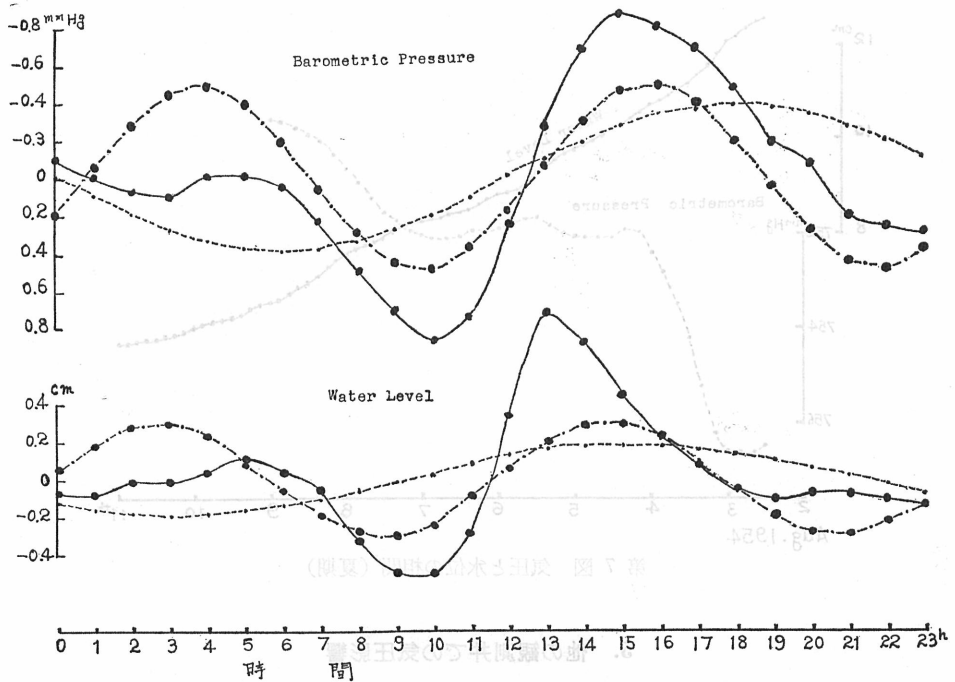
1日週期 $kx = 0.19$, $R = 0.23B$

実測された R の値はそれぞれ 0.45, 0.34 である. 両者を比較して B は 1 より大となるが, 気圧の日変化の較差は 1.8 mm Hg 程度であり, それによる水圧変化も小さく, 測定誤差や, 潮汐影響除去の除の誤差などもあるであろう. しかし B は 1 より大となり得ないから, 上記変化の大きい半日週期から B は 1

第 1 表 気圧と水位の日変化

時間	気 圧 (mm Hg)	水 位 (cm 水柱)	時間	気 圧 (mm Hg)	水 位 (cm 水柱)
0	-0.15	-0.06	12	0.21	0.33
1	-0.04	-0.09	13	-0.29	0.88
2	0.02	0.006	14	-0.71	0.74
3	0.04	-0.005	15	-0.92	0.46
4	-0.05	0.03	16	-0.84	0.21
5	-0.04	0.11	17	-0.74	0.10
6	0.002	0.03	18	-0.51	-0.07
7	0.21	-0.04	19	-0.22	-0.11
8	0.47	-0.32	20	-0.11	-0.07
9	0.67	-0.50	21	0.19	-0.10
10	0.85	-0.50	22	0.24	-0.11
11	0.72	-0.30	23	0.25	-0.15

週 期	半 日 週 期		一 日 週 期	
	気 圧	水 位	気 圧	水 位
振 巾	0.49	0.30	0.39	0.18
気圧に対する 水位の遅角	+ 34°		+ 41°	
振 幅 比	0.45		0.34	



第 6 図 気圧と水位の日変化

に近いものと思われる。

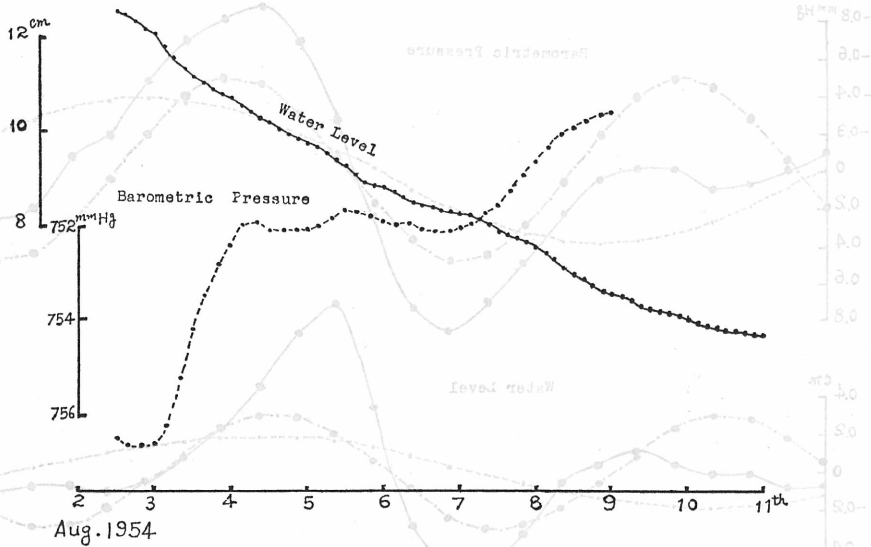
一般に大きい気圧変動は週期的ではなく変化期間も長い。このような気圧変化による水圧変化を週期的な変化と見做して位相差や R の値を求めると第 2 表の如くなる。

第 2 表 気圧と水位の相関

年月日	気圧の変化量 (mmHg)	水位の変化量 (cm)	位相の進み(時間)	同 左 (角度)	同 左 (計算値)	R	R 計算値	B	推定週期
1955 1, 8~11	14	1.8	14	42°	43°	0.095	0.15	0.6	5 日
1955 5, 19~21	5.6	1.2	7	42°	41.5°	0.16	0.21	0.76	2.5日
1956 8, 16~18	21	1.8	8	42°	42°	0.063	0.19	0.33	3 日

1956年 8 月における気圧影響は他に比して非常に小さい。記録によれば一般に夏期には気圧影響が現れ難い (第 7 図参照)。これは降雨影響が顕著なためこれが除去の際の誤差のみによるとは思われない。上記解析結果からみて夏期高水位時は浅部地下水と深部被圧水との連絡が冬期より密になる結果ではないかと推察される。

以上の結果は定量的にはよい一致ではないが、地下の温泉水層は仮想したような単純な構造ではなく、又変化も大きくないから完全な一致は望めないが、割れ目の存在を仮定した解析結果の特性はよく示されている。



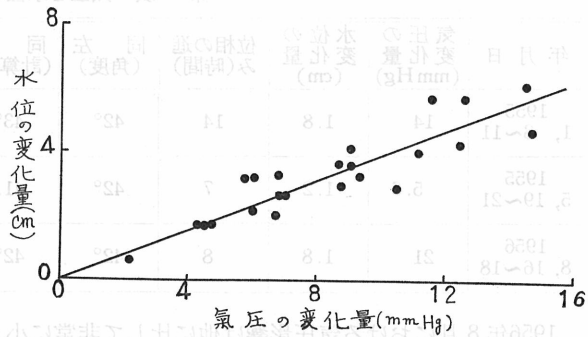
第 7 図 気圧と水位の相関 (夏期)

5. 他の観測井での気圧影響

(a) 別府旧市内で田の湯温泉脈から離れた海岸にある温泉井 No. 340 の 1 について一年間の自記々録がある (第 4 図参照)。この温泉井の深度は 148m, 静止頭は海面上 1.9m である。

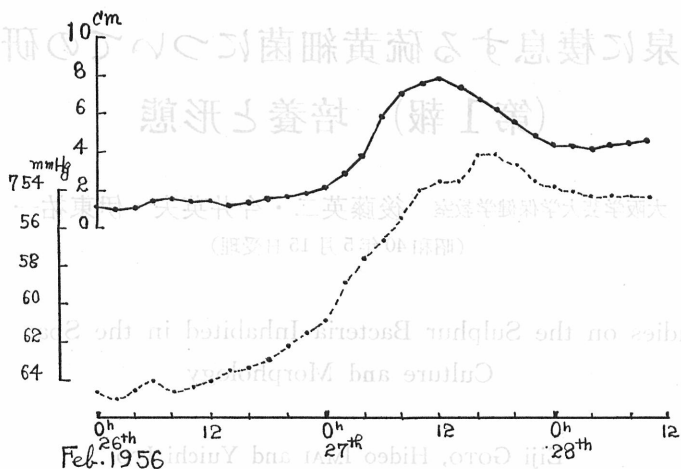
したがって孔底における温泉水圧は海水圧より低いはずであるが, 温泉水中に含まれる海水の主要成分である Na^+ , Cl^- は少なく海水と直接の連絡はないと推察される⁷⁾。降雨の影響はほとんど認められないが, 潮汐の影響は顕著でその最大変化は約 65cm, 潮汐係数は 0.28 である。気圧影響を調べるには先づ潮汐の影響を除去し, 次に海水面の気圧影響以外による変動例

例えば風の吹送による海水面の変動を除去して, 気圧の変化量とこれによる水位の変化量を対比すると, 第 8 図の如く, 略一次関係が成立し気圧係数は 0.27 となる。気圧の変化期間の長短による係数の違いや, 位相の違いは認められない。被圧地下水の気圧影響は地下の地層の弾性的性質に左右されるから, 地層の複雑な温泉地帯では狭い範囲内でも気圧の影響の様相は大きく異なることが推察される。



第 8 図 気圧と水位の相関 (No. 430ノ1)

(b) 由布院温泉は別府温泉の西方約 20km のところにあり約 400 口の温泉がある。大分県では別府温泉に次ぐ優勢な温泉群である。観測井は自然湧出地帯の近くで深度 18m, 泉温 51°C 静止水頭は地表面上約 50cm である。海岸から遠く隔れたところであるから潮汐の影響がなく, 気圧の影響の観測には最も都合がよい。しかし解析に十分な資料が得られなかったので詳



第9図 気圧と水位の相関 (由布院温泉観測井)

細な結果は得られなかったが、第9図のごとく別府での観測と同じような位相の違いが見られる。この観測井の $R=0.41$ であり、別府での観測井と比較して位相の違いも少なく、且つ R も大きい。又降雨の影響も明確に現れてない。恐らくこの温泉水層は浅層地下水との連絡が密接でないからと思われる。

文 献

- 1) 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, 1~23 (1938).
瀬野錦蔵：別府市宮地嶽神社温泉井における気圧影響，地球物理 5, 205~210 (1941).
- 2) 山下幸三郎：別府旧市内温泉井の水位変化について (第1報)，温泉科学 12, 73~77 (1961).
- 3) 山下幸三郎：自噴井群における揚水の影響について，大分県温泉調査研究会報告 12, 31~40 (1961).
- 4) 野満隆治・山下馨：別府旧市内の地中温度と温泉脈，地球物理 2, 223~259 (1938).
- 5) C.E. Jacob: On the Flow of Water in an Elastic Artesian Aquifer, *Trans. Amer. Geophys. Union* 21, 574~586 (1940).
- 6) K. Honda: Daily Periodic Change of the Level in Artesian Wells, *Publ. Imp. Earthq. Invest. Committ.*, 8, (1904).
- 7) 山下幸三郎：別府市鶴水園附近温泉の Cl^- 量について，大分県温泉調査研究会報告 14, 26~30 (1963).
- 8) 山下幸三郎：大分県由布院温泉について，大分県温泉調査研究会報告 2, 1~11 (1951).