

# 湧出量と泉温の関係について

国立防災科学技術センター 湯原 浩三

(昭和42年12月20日受理)

## On the Temperature of the Hot Spring as a Function of the Discharge Rate

Kozo YUHARA

National Research Center For Disaster Prevention

The temperature of the hot spring varies with the change of the discharge rate. The main cause of this variation is the cooling of the hot water ascending from the bottom to the top of the well pipe. The cooling is remarkable when the discharge is relatively small, and it becomes negligible when the discharge is large. Another important factor of the temperature variation is the cold ground water which mixes with the original hot water in the ground, but it is not always that the mixing of the cold ground water lowers the spring temperature, because the mixing of the cold water brings an increase of the discharge which may act as impediment to the cooling. In this paper the relationship between discharge and temperature of the hot spring are discussed quantitatively.

### 1. 泉温の変化

よく知られているように、泉温は常に一定ではなく、時間的に変化する。変化の様子はまちまちで、短周期の微細で不規則な変化、1日あるいは半日周期の変化、1年周期の季節的变化、非周期的な変化、長い間の経年変化などがある。泉温を変化させる原因としては、気温変化、潮汐、気圧変化、降雨、地震、地殻変動、火山活動、地下水流動状況の変化、揚水などの人工的な操作、温泉井の腐蝕や破損、沈殿物の付着などが考えられるが、これらの原因を大別すると、2つに分けることができる。すなわち、1つは、温泉水の冷却率を変化さすように働くものであり、他は温泉水の構成を変化させるように働くものである。冷却率の変化は、温泉の湧出量の変化と、周囲の温度変化による場合とが考えられる。温泉水の構成の変化、すなわち、高温の温泉水とそれより低温の温泉水や地下水との混合割合の変化も、本質的な温泉水に消長がある場合と、混入する方の低温水に消長がある場合とが考えられる。

これらのいくつかの場合の中で、最も普通で、しかも顕著な泉温変化をもたらすものは、湧出量の変化と、冷地下水の混合である。以下、それについて論ずる。

### 2. 湧出量変化に伴う泉温変化

温泉井内を上昇する温泉水の温度については、瀬野<sup>5)</sup>、須川<sup>4)</sup>によってすでに論じられている。井管内の温泉水の温度は、孔底からの上昇距離 $z$ のみの関数であり、管に垂直な断面内では変らないと仮定し、管内の温泉水の冷却は周囲の地中への熱伝導のみにより行われるものとする。

温泉井の半径を  $r_0$ 、温泉の湧出量を  $q$ 、温泉水の温度を  $\theta$ 、密度を  $\rho$ 、比熱を  $c$  とする。また、周囲の土地の熱伝導率を  $K$ 、地中温度を  $\Theta$  とすれば、温泉水が微小距離  $dz$  上昇する間の冷却は、

$$q\rho c \frac{d\theta}{dz} = 2\pi r_0 K \left( \frac{\partial \Theta}{\partial r} \right)_{r=r_0} \quad (1)$$

$r$  は井管の軸からの水平距離である。

地中温度  $\Theta$  は  $r=r_0$  では  $\theta$  に等しいとおけるが、深さによって異なり、又、温泉井があるために擾乱を受けている。今、近似的に、それぞれの深さでの冷却は、温泉水の温度と擾乱を受けていない地中温度、すなわち、温泉井から無限の遠方の地中温度との差に比例すると仮定すると、比例常数を  $h''$  とかいて、

$$K \left( \frac{\partial \Theta}{\partial r} \right)_{r=r_0} = -h'' (\theta - \Theta_{r=\infty}) \quad (2)$$

次に、擾乱を受けていない地中温度は深さと共に1次的に昇温するものとすれば、孔底での地中温度を  $\theta_b$ 、とかくと、

$$\Theta_{r=\infty} = \theta_b - \alpha z \quad (3)$$

ここで、 $\alpha$  は地温勾配であって、地表における Newton 冷却を考えると、その係数を  $h'$ 、平均気温を  $\theta_a$ 、温泉井の深さを  $D$  とかいて、 $\alpha = (\theta_b - \theta_a) / (K/h' + D)$  で与えられる。地表面温度が平均気温と等しいとおけるときには  $\alpha = (\theta_b - \theta_a) / D$  である。

(1) に (2)、(3) を代入し、 $z=0$  (孔底) で  $\theta = \theta_b$  という条件で解くと

$$\theta = \theta_b - \alpha z + \alpha \beta q \left\{ 1 - \exp \left[ -\frac{z}{\beta q} \right] \right\} \quad (4)$$

ここに  $\beta = \rho c / 2\pi r_0 h''$  である。泉温は湧出口での温度であるから、これを  $\theta_0$  とかくと、(4) で  $z=D$  として、

$$\theta_0 = \theta_b - \alpha D + \alpha \beta q \left\{ 1 - \exp \left[ -\frac{D}{\beta q} \right] \right\} \quad (5)$$

これが湧出量と泉温の関係を示す式である。

湧出量変化に伴う泉温変化の状態を知るために、(5) を  $q$  について微分すると、

$$\frac{d\theta_0}{dq} = \alpha \beta \left\{ 1 - \left( 1 + \frac{D}{\beta q} \right) \exp \left[ -\frac{D}{\beta q} \right] \right\} \quad (6)$$

ここで  $(1 + D/\beta q) \exp[-D/\beta q]$  は  $D/\beta q$  が正のときは常に1より小さいから、 $d\theta_0/dq$  は常に正である。したがって、冷地下水の混入がない限り、湧出量の増加は必ず泉温の上昇をもたらす。ただし、湧出量が非常に大きいときは、

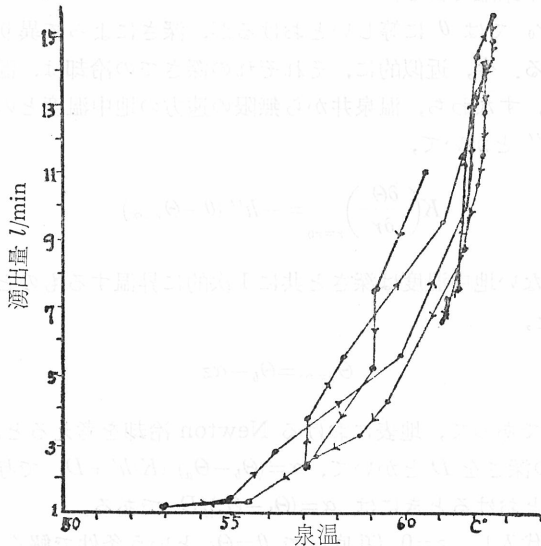
$$q \rightarrow \infty, \quad \frac{D}{\beta q} \rightarrow 0, \quad \theta_0 \rightarrow \theta_b, \quad \frac{d\theta_0}{dq} \rightarrow 0$$

となって、泉温変化はほとんど認められなくなる。 $0 < D/\beta q < 1$  の範囲では、

$$\frac{d\theta_0}{dq} \doteq \frac{\alpha D^2}{\beta q^2} \quad \text{あるいは} \quad \theta_0 \doteq \theta_b - \frac{\alpha D^2}{\beta q}$$

となり、泉温と湧出量の関係は双曲線型となる。また、湧出量が非常に小さいときには、

$$q \rightarrow 0, \quad \frac{D}{\beta q} \rightarrow \infty, \quad \theta_0 \rightarrow \theta_b - \alpha D, \quad \frac{d\theta_0}{dq} \rightarrow \alpha \beta$$



第1図 湧出量と泉温の関係 (別府 No. 199 源泉の例)

すなわち、湧出量変化と泉温変化は直線関係になる。第1図は、川端<sup>2)</sup>によって観測された別府の1温泉の潮汐による湧出量と泉温の変化であって、湧出量と泉温の関係は上の理論によってうまく説明できる。

しかし、湧出量と泉温の相関は一般にはかなり複雑で、いろいろな場合がある。石見<sup>1)</sup>は第2図に示したように、それらを併行型、相反型、独立型に分類した。併行型は個々の温泉の湧出量の少ない別府などでは最も普通にみられる型であり、独立型は湧出量の大きい場合に対応し、共に上の議論で説明される。一方、相反型は上の議論では説明できなくて、低温の地下水や他の温泉水が浸入していて、その混合率が変化したと考えねばならない。

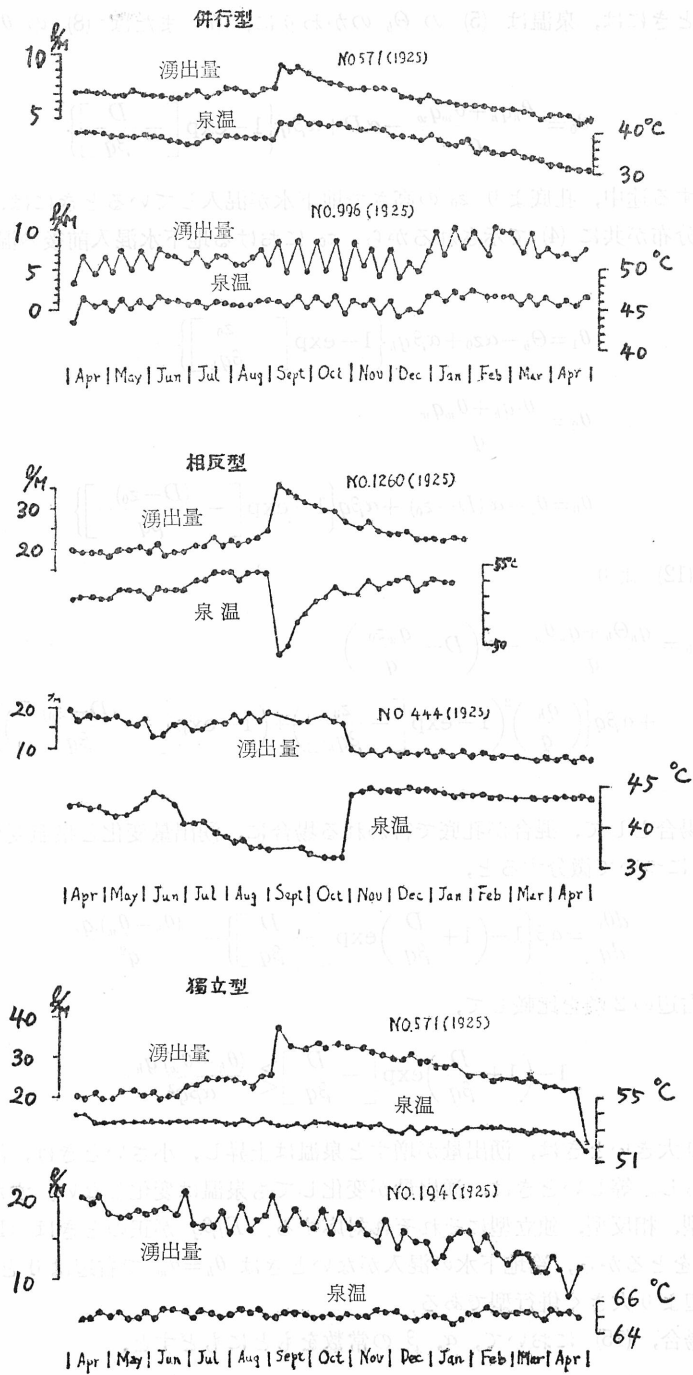
### 3. 冷地下水の混入

温度  $\theta_h$ 、流量  $q_h$  の温泉水と温度  $\theta_w$ 、流量  $q_w$  の地下水が混合して、温度  $\theta$ 、流量  $q$  の温泉水になったとすると、

$$\theta = \frac{\theta_h q_h + \theta_w q_w}{q} \quad (7)$$

混合前の温泉水と地下水の容量比を  $q_h/q_w=1/R$  であらわすと、(7) はまた、

$$\theta = \frac{\theta_h + \theta_w R}{1+R} \quad (8)$$



第 2 図 湧出量と泉温の季節的变化の相関型

ともかける。このような混合が温泉井の孔底で行われて、温泉井を上昇する際には前述のような冷却があるときには、泉温は (5) の  $\theta_b$  のかわりに、(7) または (8) の  $\theta$  をかけばよい。すなわち、

$$\theta_0 = \frac{\theta_h q_h + \theta_w q_w}{q} - \alpha D + \alpha \beta q \left\{ 1 - \exp \left[ -\frac{D}{\beta q} \right] \right\} \quad (9)$$

温泉井を上昇する途中、孔底より  $z_0$  の高さで地下水が混入しているときには、 $z_0$  以下も以上も温度の垂直分布が共に (4) で示されるから、 $z_0$  における地下水混入前後の温度を  $\theta_1$ ,  $\theta_2$  とすると、

$$\theta_1 = \theta_b - \alpha z_0 + \alpha \beta q_h \left\{ 1 - \exp \left[ -\frac{z_0}{\beta q_h} \right] \right\} \quad (10)$$

$$\theta_2 = \frac{\theta_1 q_h + \theta_w q_w}{q} \quad (11)$$

$$\theta_0 = \theta_2 - \alpha (D - z_0) + \alpha \beta q \left\{ 1 - \exp \left[ -\frac{(D - z_0)}{\beta q} \right] \right\} \quad (12)$$

(10), (11), (12) より

$$\begin{aligned} \theta_0 = & \frac{q_h \theta_b + q_w \theta_w}{q} - \alpha \left( D - \frac{q_w z_0}{q} \right) \\ & + \alpha \beta q \left\{ \left( \frac{q_h}{q} \right)^2 \left( 1 - \exp \left[ -\frac{z_0}{\beta q_h} \right] \right) + \left( 1 - \exp \left[ -\frac{(D - z_0)}{\beta q} \right] \right) \right\} \end{aligned} \quad (13)$$

が得られる。

最も簡単な場合として、混合が孔底で行われる場合に、湧出量変化と泉温変化の関係を求める。(9) を  $q$  について微分すると、

$$\frac{d\theta_0}{dq} = \alpha \beta \left\{ 1 - \left( 1 + \frac{D}{\beta q} \right) \exp \left[ -\frac{D}{\beta q} \right] \right\} - \frac{(\theta_h - \theta_w) q_h}{q^2} \quad (14)$$

いま (14) の右辺の 2 項を比較して、

$$1 - \left( 1 + \frac{D}{\beta q} \right) \exp \left[ -\frac{D}{\beta q} \right] \gtrless \frac{(\theta_h - \theta_w) q_h}{\alpha \beta q^2} \quad (15)$$

左辺が右辺より大きいときは、湧出量が増すと泉温は上昇し、小さいときは、湧出量増加は泉温低下をもたらす、等しいときは、湧出量が増しても泉温は変化しない。すなわち、第 2 図に示した併行型、相反型、独立型にそれぞれ対応する。 $D/\beta q$  が正のときは (15) の左辺は 0 と 1 の間の値をとるから、冷地下水の混入がないときは  $\theta_h = \theta_w$  で右辺は 0 となり、(15) の左辺は常に右辺より大きく併行型である。

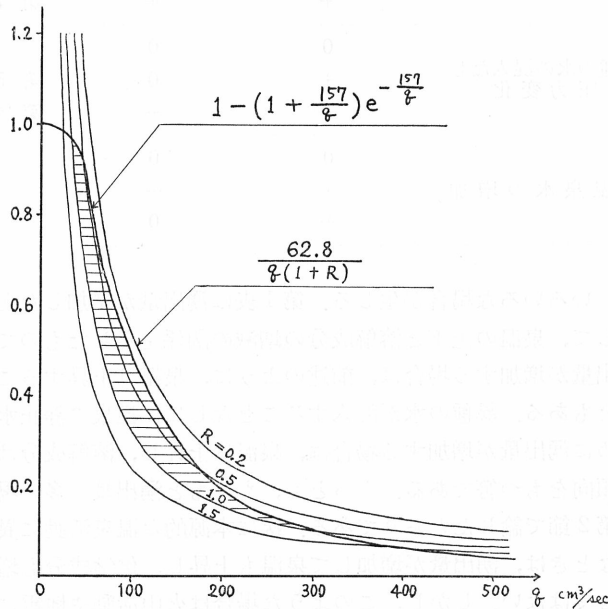
混入がある場合、(15) において、 $\alpha$ ,  $\beta$  の常数をもとにもどすと、

$$1 - \left( 1 + \frac{2\pi r_0 h'' D}{\rho c q} \right) \exp \left[ -\frac{2\pi r_0 h'' D}{\rho c q} \right] \gtrless \frac{2\pi r_0 h'' \left( \frac{K}{h'} + D \right) (\theta_h - \theta_w) q_h}{\rho c (\theta_b - \theta_a) q^2} \quad (16)$$

いま、 $r_0=5\text{ cm}$ 、 $D=5\times 10^3\text{ cm}$ 、 $\rho=1\text{ g/cm}^3$ 、 $c=1\text{ cal/deg}\cdot\text{g}$ 、 $\theta_b-\theta_a=60^\circ\text{C}$ 、 $\theta_h-\theta_w=20^\circ\text{C}$ 、 $h''=10^{-3}\text{ cal/deg}\cdot\text{cm}^2\cdot\text{sec}$ 、 $K/h'=10^3\text{ cm}$ 、とおき、 $q=q_h(1+R)$  という関係を用いると、(16) は c.g.s. 単位で

$$1 - \left(1 + \frac{157}{q}\right) \exp\left[-\frac{157}{q}\right] \begin{matrix} \geq \\ < \end{matrix} \frac{62.8}{q(1+R)} \quad (17)$$

(17) の左辺と右辺を別々に、横軸に  $q$  をとり、縦軸に関数の値をとって示したものが第3図である。但し、右辺については  $R$  が 0.2 から 1.5 の範囲の値をとるときの曲線を示してあ



第3図 冷地下水が混入し湧出量が増加した場合、混入による泉温低下と冷却率の減少のための泉温上昇との大小関係を示す。  $R$  は地下水の源温泉に対する割合、横線は  $R=1$  のとき冷地下水が混入しても泉温が上昇する範囲を示す。

る。第3図では、左辺の曲線が右辺の曲線より上にあるときは併行型を、下にあるときは相反型を示している。たとえば、 $R=1$ 、すなわち、温泉水と地下水が等量に混合したときでも、第3図の横線で示したように、湧出量が  $70\text{ cm}^3/\text{sec}$  から  $300\text{ cm}^3/\text{sec}$  の範囲で、湧出量の増加によって泉温が上昇する。すなわち、この場合は、地下水の混合量が増すと、湧出量増加による冷却率の低下が、混合による温度低下を上回り、結局泉温が上昇することになる。

#### 4. 湧出量と泉温と溶解成分の関係

前節の議論によって、温泉水にそれより低温の水が地下で混入しても、必ずしも泉温が下るとは限らず、ある条件のもとでは、むしろ泉温が上昇する場合があることが示された。混入する低温水が普通の地下水であれば、溶解化学成分は減少するが、海水が混入すれば、一般には溶解成分は増加する。したがって、湧出量変化にもなる泉温や溶解成分の変化も、湧出量変

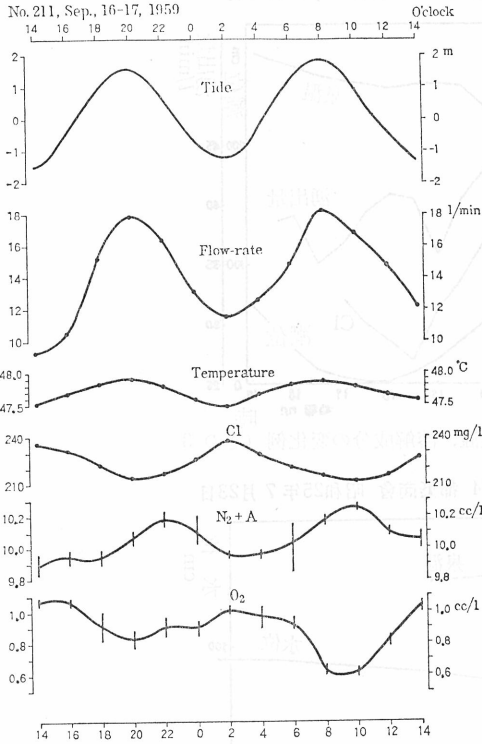
第1表 湧出量増加と泉温の上下、溶解成分の増減の関係  
(+)は上昇または増加, (-)は低下または減少

| 湧出量増加の原因            | 泉温の上下 | 溶解成分の増減 | 例            |
|---------------------|-------|---------|--------------|
| 冷地下水の混入             | -     | -       | 第4図          |
|                     | 0     | -       |              |
|                     | +     | -       |              |
| 海水の混入               | -     | +       | 第6図          |
|                     | 0     | +       | 第7図          |
|                     | +     | +       |              |
| 異種の水の混入なし<br>(圧力変化) | 0     | 0       | 第5図<br>(第4図) |
|                     | +     | 0       |              |
|                     | +     | -       |              |
| 源温泉水の増加             | 0     | 0       |              |
|                     | +     | +       |              |
|                     | +     | 0       |              |

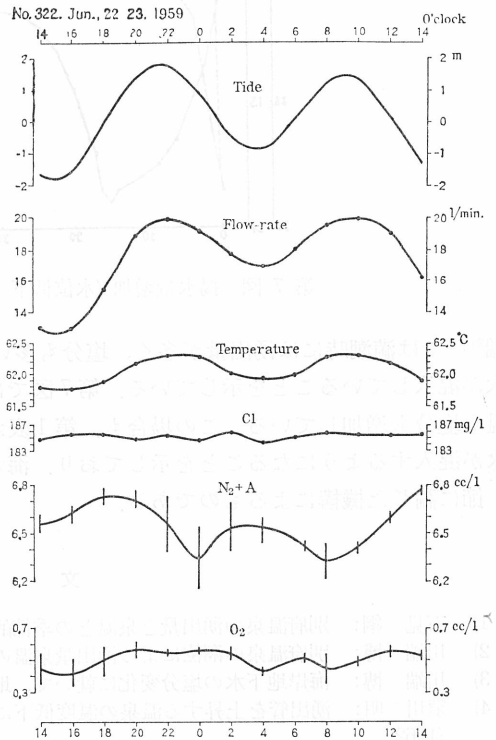
化の原因に応じて、いろいろな場合が生じる。第1表は湧出量が増加したとき、考えられるいくつかの原因に対して、泉温の上下と溶解成分の増減の関係を示したものである。冷地下水や海水が混入して湧出量が増加する場合は、前述のように、泉温は上昇することも、低下することも、変わらないこともある。異種の水が混入することなしに、温泉の静止水頭が変化したり、あるいは揚水のために湧出量が増加する場合は、泉温は上昇し、溶解成分は変らないか、変るとすれば減少する傾向をもつ筈である。もっとも、もともと湧出量の多い場合、泉温がほとんど変らないことは第2節で論じたとおりである。次に本源的な温泉活動に異変が生じて活動が盛んになったようなときは、湧出量が増加して泉温も上昇し、化学成分も増加するような場合も考えられないことではない。しかし、このような場合は火山活動や地震にともなう特殊な場合である。

湧出量が減少したときは、第1表に示した上下、増減の関係はすべて逆になる。

実際に、温泉について、湧出量、泉温、溶解成分のそれぞれの変化が観測されたときには、それらの変化のあらわれ方から、湧出量変化の原因を推定することができる。第4図は別府のNo. 211 源泉が潮汐の影響を受けて湧出量その他を変化させている状態である(湯原<sup>6)</sup>)。この例では、湧出量の増加に伴って泉温は上昇し、溶解成分は減少している。したがって満潮時に湧出量が増加するのは、潮汐が温泉の静止水頭を変化させるだけであって、異種の水の混入は全くないか、あるいは、満潮時に冷地下水が混入するかのどちらかである。この例では、温泉水中に溶存している窒素は満潮時に多く、酸素は満潮時に少く、規則正しく変化しているので、塩分の少ない窒素の多い酸素の少ない温度の低い水が満潮時にやや多く混入して湧出すると考えたほうが都合がよい。別府のように、沖積層に数層の温泉帯水層があるところでは、それぞれの層によって潮汐影響の感じ方も当然異なるので、干潮時と満潮時では地表に湧出する温泉水の構成が多少変わっても不思議ではない。第5図のNo. 322 源泉の例は満潮時に湧出量が増加し泉温も上昇しているが、溶解成分の変化はほとんどないので、異種の水の混入はなくて、潮汐影響が温泉の静止水頭の変化としてのみ表われている例である。第6図の亀川No. 248の3(川



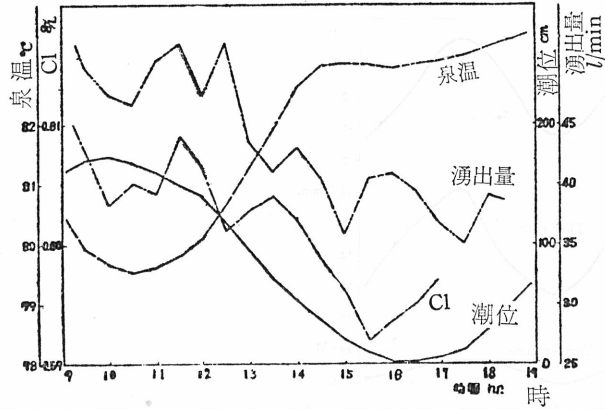
第 4 図 潮汐による湧出量, 泉温, 溶解成分  
の変化例 (その 1)



第 5 図 潮汐による湧出量, 泉温, 溶解成分  
の変化例 (その 2)

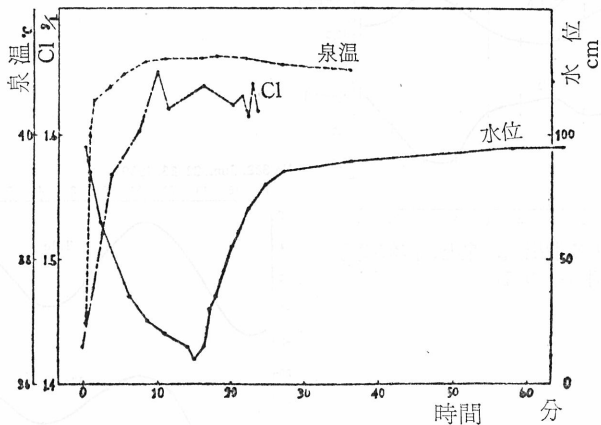


別府市 亀川温泉 No. 248ノ3 昭和24年 8月12日



第 6 図 潮汐による湧出量, 泉温, 溶解成分の変化例 (その 3)

別府温泉 No. 1174 都築商會 昭和25年 7月23日



第 7 図 揚水量増加 (水位低下) による泉温, 溶解成分の変化例

端<sup>3)</sup>では満潮時には湧出量が多く、塩分も多いのに泉温は低い。これは明らかに満潮時に海水が混入していることを示している。第7図では揚水量が増加(井戸の水位が低下)すると泉温も塩分も増加している。この場合も、第1表からみて、揚水量を増加すると、より多くの海水が混入するようになることを示しており、海水が混入してもかえって泉温が上昇するのは第3節に論じた機構によるものである。

#### 文 献

- 1) 石見 綱: 別府温泉の湧出量と泉温との季節的变化の相関型, 地球物理, 8, Nos. 2—4 (1950).
- 2) 川端 博: 別府温泉の潮位による湧出量泉温の相関に就いて, 地球物理, 8, Nos. 2—4 (1950).
- 3) 川端 博: 海岸地下水の塩分変化に就いて, 地球物理, 9, No. (1951).
- 4) 須川 明: 湧出管を上昇する温泉の温度低下について, 北海道大学地球物理学研究報告, 第9号 (1962).
- 5) 瀬野錦蔵: 温泉湧出導管中に於ける温度垂直分布の近似解, 地球物理, 5, No. 3 (1941).
- 6) 湯原浩三: 温泉水中の窒素ガス (2), 火山, 第2集, 7, No. 1 (1962).