



Title	2. 温泉特に地下水起源温泉の自噴機構ならびにその湧出量と温度・化学成分濃度との関係について
Author(s)	福富, 孝治; FUKUTOMI, Takaharu
Citation	北海道大学地球物理学研究報告, 20, 15-35
Issue Date	1968-09-20
DOI	https://doi.org/10.14943/gbhu.20.15
Doc URL	https://hdl.handle.net/2115/13942
Type	departmental bulletin paper
File Information	20_p15-35.pdf



2. 温泉特に地下水起源温泉の自噴機構 ならびにその湧出量と温度・化学成分 濃度との関係について

福 富 孝 治

(北海道大学理学部地球物理学教室)

— 昭和 43 年 5 月 受 理 —

I. 序 言

普通の被圧地下水が自噴する場合はあまり多くはないが、この自噴の原因はこの地下水の水源である地表水または自由面地下水の流入口における水位が湧出口の高さよりもかなり高いためであると考えられている。

温泉では、その文字の意味するように、天然の場合は申すまでもなく掘さくによる場合も開発の当初は自噴することが多い。これは如何なる原因によるのであろうか。温泉も多くは一種の被圧地下水であって、その水の大部分は地表水または地下水起源と考えられているが、温泉と普通の地下水との地下構造の違いは、

- (1) 温泉はその水源である地表水または地下水が岩石中の割れ目を伝って地下1~3kmの深さまで流入し再び流出していること、
- (2) この地下流路が普通の土地の地下増温率よりも大きい地下増温率によって熱せられている、

と考えられることである。

北海道の主要温泉について筆者¹⁾が研究した結果では、温泉の半数はいわゆる裂か泉であって岩石の割れ目から直接湧出するか薄い表層下の割れ目から湧出しており、残りの半数は温泉水が地表近くの帯水層に拡がっている、いわゆる層状泉であるが、この場合にも温泉水は地下深くからこの帯水層まで岩石の割れ目伝いに上昇すると考えられている。しかも、温泉地の熱 energy の研究²⁾から、北海道の温泉地総数の 86% に当る熱階級 III 以下の温泉は地下水起源と考えてよく説明されるのである。

このような地下構造によって考えられるのは地下流路の受熱により流入側の水温に比較して流出側の水温が高くなることによる水の密度差が流動に及ぼす影響であるが、これが定量的にどの程度の効果を及ぼすかを検討しなければならない。また、温泉の場合には受熱のほかに

1) 福富孝治；北海道の温泉について、火山、II-11 (1966), 127-144.

2) 福富孝治；地下水起源の温泉の温度、北大地球物理学研究報告, 13 (昭 40), 53-70.

流路の壁の岩石から鉱物質を溶解する作用もあり、これは流入側と流出側の密度差に対し水温と逆の効果を及ぼす理であるから、この点についても定量的検討が必要である。

D. E. WHITE³⁾ はアメリカ合衆国 Nevada 州の Steamboat Hot Springs について研究を行なった結果、この温泉の水は meteoric water 起源の温泉であり、岩石中の割れ目伝いに 2~3 km の深さに侵入した地下水が地下で熱せられて再び上昇し湧出しているものであって、その湧出の機構は流入口が流出口に比較して高いことにもよるが、主として降水と上昇水との温度差に原因した密度差によることを示唆している。

しかし、地下の岩石の割れ目を流路とした地下水起源の温泉水の自噴機構についての理論的研究は、筆者の知る限りではほとんどないので、本論文はこのような問題を中心に温泉特に地下水起源温泉の湧出量をきめる因子について理論的に研究することを目的とした。まず、第 II 章では地下水の流入口と温泉流出口の高さに差があり、岩石中の流路で受熱が行なわれる場合について考察し、第 III 章においては更に地下流路の壁から鉱物質を溶解し、したがって化学成分を含有する温泉として湧出する場合を取扱った。また、第 V 章においてはこれらの結果について多少の論議を行なったのである。

II. 地下水起源の単純温泉の場合

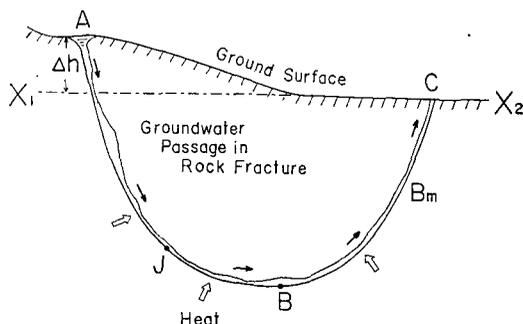
先ず最も簡単な地下水起源の単純温泉の場合を考える。

第 1 図において $X_1 X_2$ を温泉口 C を通る水平面とし、A は $X_1 X_2$ 面から Δh の高さにある地表水または自由面地下水の水面とする。A B B_m C は水の通路となる岩石中の割れ目で、その最深部 B は地表から 1~3 km の深さに達するものとする。この一連の割れ目に A から地表水または地下水が流入し、B, B_m を通って湧出口 C から湧出量 Q が流出している場合を考える。流路 A B_m は受熱区域で B_m C は放熱部分とする。まず、水の性質と受熱の状況等について次の仮定をおいて考察を進める。

【仮定 1】 水の密度は圧力によって変化しないが、水温によっては変化するものとする。

【仮定 2】 この割れ目の中の水の流動および受熱は、定常状態に達しているものとする。

いま、流路 A B B_m C の両端 A および C に energy 保存の法則を適用すれば、単位流質量に対し



第 1 図 地下水起源温泉の地下流路の説明図
Fig. 1. Diagrammatic representation of a hot spring system of meteoric water origin.

3) D. E. WHITE; Hydrology, Activity, and Heat Flow of the Steamboat Springs Thermal System, Washoe County Nevada, Geol. Survey Professional paper, 458-C (1968), 1-105.

$$\frac{u_1^2}{2} + g \Delta h + \frac{\pi}{\rho_1} + e_1 + G = \frac{u_2^2}{2} + \frac{\pi}{\rho_2} + e_2 \quad (1)$$

が得られる。ただし、 g は重力の加速度、 π は大気圧、 u_1 および u_2 はそれぞれ A および C における流速、 ρ_1 および ρ_2 はそれぞれ A および C における水の密度、 e_1 および e_2 はそれぞれ A および C における単位流質量のもつ内部 energy、 G は単位流質量が A から C まで流れる間に周囲の岩石から受けた熱 energy である。

熱力学の第一法則によれば、流路 A B B_m C に外部から供給される熱量 G と摩擦によって単位流質量当り発生する熱量 F との和は、内部 energy の増加と膨脹による仕事に等しく

$$G + F = (e_2 - e_1) + \int_{\frac{1}{\rho_1}}^{\frac{1}{\rho_2}} p d\left(\frac{1}{\rho}\right) \quad (2)$$

で表わされる。ただし、 p は流路の任意の場所 J の水圧で、 ρ はその点の水の密度である。

(2) 式の G を (1) 式に代入し整理すれば

$$\Delta h + \int_{\frac{1}{\rho_1}}^{\frac{1}{\rho_2}} \left(\frac{p - \pi}{g}\right) d\left(\frac{1}{\rho}\right) = \frac{F}{g} + \frac{u_2^2}{2g} \left\{1 - \left(\frac{u_1}{u_2}\right)^2\right\} \quad (3)$$

が得られる。ただし、この式中の F は流路 A B B_m C 中を水が流れる間に水の単位流質量が摩擦によって消耗した mechanical energy と考えればよい。

さて、(3) 式左辺第 2 項の積分を変形すれば

$$\begin{aligned} \int_{\frac{1}{\rho_1}}^{\frac{1}{\rho_2}} \left(\frac{p - \pi}{g}\right) d\left(\frac{1}{\rho}\right) &= \int_{\log \frac{1}{\rho_1}}^{\log \frac{1}{\rho_2}} \left(\frac{p - \pi}{\rho g}\right) d\left(\log \frac{1}{\rho}\right) \\ &= \int_{\log \frac{1}{\rho_1}}^{\log \frac{1}{\rho_2}} \left(z + \frac{p - \pi}{\rho g}\right) d\left(\log \frac{1}{\rho}\right) + \int_{\log \frac{1}{\rho_1}}^{\log \frac{1}{\rho_2}} (-z) d\left(\log \frac{1}{\rho}\right) \end{aligned} \quad (4)$$

を得る。ただし、 z は湧出口 C を通る水平面 X₁ X₂ から測った流路上の任意の点 J の高さで上向を正方向としている。したがって、 $\left(z + \frac{p - \pi}{\rho g}\right)$ は J における水頭を X₁ X₂ から測った値である。

流路中の水の密度 ρ は流入口においては水温が低いのでやや大きい値であるが、受熱流路 A B B_m の間でだんだん小となり B_m 点で極小値 ρ_m となる。その後、放熱流路 B_m C の間でまたやや大となる。したがって、 $\rho_m < \rho_2 < \rho_1$ すなわち $\frac{1}{\rho_1} < \frac{1}{\rho_2} < \frac{1}{\rho_m}$ なる関係がある。

第 2 図、第 3 図は横軸に $\log \frac{1}{\rho}$ をとり、縦軸にはそれぞれ $\left(z + \frac{p - \pi}{\rho g}\right)$ および $(-z)$ をとって、流路を水が A から B および B_m を通って C へ達するまでにこれらの値が如何に変るかを模式的に示したものであるが、(4) 式右辺第 1 項の積分の値は第 2 図中に斜線を施した面積であり、(4) 式第 2 項の積分の値は第 3 図中に斜線を施した面積である。

ゆえに、 $\log \frac{1}{\rho}$ が $\log \frac{1}{\rho_1}$ から $\log \frac{1}{\rho_2}$ に至る間の $\left(z + \frac{p - \pi}{\rho g}\right)$ すなわち水頭の平均値を $\zeta_1 \Delta h$ とおけば

で表わされる。ここに、 λ は抵抗係数、 μ は水の粘性係数、 l は水の流動方向に測った割れ目の長さ、 b は割れ目の横幅、 d は割れ目の間隙である。

(3)式で考えている流路 ABB_mC は必ずしも一様な形および断面とは考えていないが、その一部分は(9)式で示される様な流路であり、常数の異なったこれらの部分の連続と考えてよいから、(8)式により

$$\frac{F}{g} = \rho_2 Q \left(\sum \frac{\lambda}{\rho} \right) \quad (10)$$

で表わし、 $\frac{\lambda}{\rho}$ は流路に沿って積分する意味で Σ を付すことにした。

次に、(3)式右辺の第2項について検討する。福富によれば、岩石の割れ目中の温泉水の流動の場合にはこの項は無視できるとしている。尚、この場合について再吟味してみると、(8)式の関係から

$$\frac{u_2^2}{2g} \left\{ 1 - \left(\frac{u_1}{u_2} \right)^2 \right\} = \frac{Q^2}{2ga_2^2} \left\{ 1 - \left(\frac{\rho_2}{\rho_1} \right)^2 \left(\frac{a_2}{a_1} \right)^2 \right\} \quad (11)$$

である。一温泉地域から湧出する地下水起源温泉の湧出量²⁾は200~2000 L/minの程度であるから $Q=2000$ L/minをとり、 $a_2=bd$ の d を定山溪温泉⁵⁾の観察から0.3 cm、 $b=50$ mとおいてみると $\frac{Q^2}{2ga_2^2}$ は0.24 cm程度の小さい値に過ぎない。さらに、 $a_1=a_2$ とすれば $\left\{ 1 - \left(\frac{\rho_2}{\rho_1} \right)^2 \right\}$ の値は最大 3×10^{-2} のorderの微小量であるから(11)式の値は最大 1×10^{-2} cm程度の微小量で Δh や $\frac{F}{g}$ の項に対し無視できるのである。

ゆえに、(7)式、(10)式および(11)式の結果を(3)式に代入すると

$$\Delta h + (\bar{h}_1 + \zeta_1 \Delta h) \log \frac{\rho_1}{\rho_2} \simeq \rho_2 Q \left(\sum \frac{\lambda}{\rho} \right) \quad (12)$$

が得られる。ゆえに、湧出量は

$$Q = \frac{\Delta h + \bar{h}_1 \left(1 + \zeta_1 \frac{\Delta h}{\bar{h}_1} \right) \log \frac{\rho_1}{\rho_2}}{\rho_2 \left(\sum \frac{\lambda}{\rho} \right)} \quad (13)$$

で与えられる。

すなわち、地下水起源の単純温泉については、湧出口に対する流入口の水面の高さ Δh が大きい程、湧出口における水の密度が流入口における水の密度に比較して小さくて(換言すれば湧出する温泉の温度が高い)、地下流路の加重平均深度が大きい程、温泉の湧出量は大きくなるが、流路内の抵抗が大きいと湧出量は減少する。

(13)式の結果は単純温泉の場合に限定する必要はなく、流入水が化学成分濃度を持っている場合でも流路中でこの濃度に増減が無ければ適用できるのである。例えば、海水が地中の割

5) 福富・須川・徳永・大槻・三好・和気・愛沢；定山溪温泉の調査，札幌市商工部編，定山溪温泉調査報告(昭39)，25。

れ目に侵入してそのままの濃度で温泉として湧出する場合には適用可能である。

III. 地下水起源の化学成分含有温泉

次に、前章で取扱った地下水起源の場合をもう少し一般化するために、流路の形状、受熱の状態は前章と同様であるが、流路の途中で鉱物質が溶解して化学成分濃度が0~10 g/kgの温泉となって湧出している場合について考究する。

このために次の仮定をおく。

【仮定 3】 流路の壁から溶解する量は場所や温度により変化するが、各化学成分の種類とその割合は場所や温度に関係なく一定であって、これらを総括して単一化学成分とみなしたときの平均密度 δ も場所や温度に関係せず一定値とする。

【仮定 4】 溶解の状態は時間的にも場所的にも定常状態に達しているものとする。

第1図において、流入口 A における流量を V_1 、水の密度を ρ_1 、湧出口 C における湧出量を Q 、水の密度を ρ_2 、流路 ABC 中の任意の一点 J における流量を V 、水の密度を ρ とおけば、連続の条件から前章(8)式の代りに

$$\left. \begin{aligned} \rho_1 V_1 + W &= \rho_2 Q \\ \rho_1 V_1 + w &= \rho V \end{aligned} \right\} \quad (14)$$

なる関係がある。ただし、 w および W はそれぞれ水が A から J までおよび A から C まで流れる間に流(質)量に対し流路の壁から溶解した化学成分(質)量であるが、 w の値は A において 0 であるが流れるにしたがって漸次増加し C において W となるとする。 w に含まれる n 種類の化学成分の内、任意の一化学成分の質量を w_i 、 W に含まれるその一化学成分の質量を W_i とすれば

$$w = \sum_{i=1}^n w_i, \quad W = \sum_{i=1}^n W_i \quad (15)$$

および

$$\frac{w}{\delta} = \sum_{i=1}^n \frac{w_i}{\delta_i} \quad (16)$$

である。ただし、 δ_i はその一化学成分の溶解以前の密度、 δ は n 種の化学成分を単一化学成分とみなしたときの密度である。

いま、流路 ABB_mC の両端 A および C に energy 保存の法則を適用すれば

$$\rho_1 V_1 \left(g \Delta h + \frac{\pi}{\rho_1} + e_1 \right) + G' + M + K \simeq \rho_2 Q \left(\frac{\pi}{\rho_2} + e_2 \right) \quad (17)$$

を得る。ただし、前章に述べたように、運動 energy の項は微小であるから無視した。ここに、 G' 、 M および K は流(質)量に対し A から C の間の流路において、それぞれ外部から熱伝導により受けた熱量、溶解した化学成分が水に与えた potential energy および溶解した化学成分

が水に与えた溶解熱であり、 e_1 および e_2 はそれぞれ A および C において水の単位流質量が持っている熱 energy であって、その他の記号は前章と同様である。

熱力学第一法則から、この場合には次式を得る。

$$F' + G' + K = (\rho_2 Q e_2 - \rho_1 V_1 e_1) + \int_{(A)}^{(C)} p \left(dV - \frac{dw}{\delta} \right) \quad (18)$$

ただし、 F' は流(質)量が A から C まで流動する間に内部摩擦によって発生する熱量であり、右辺積分中の dV は流路中の任意の一点 J において V なる流量が温度上昇に伴う熱膨脹と化学成分が dw だけ更に溶解したことによる水の体積増加であり、 $\frac{dw}{\delta}$ は流路の壁から dw だけ溶解したことによる流路の容積の増加であって、 $\left(dV - \frac{dw}{\delta} \right)$ が圧力 p に抗して周囲の水を押し退けるべき体積部分である。この積分は A の値から C における値まで行なうことを意味する。

(14) 下段の式から dV を求めると

$$dV = (\rho_1 V_1 + w) d\left(\frac{1}{\rho}\right) + \frac{dw}{\rho}$$

であるから

$$dV - \frac{dw}{\delta} = \rho_1 V_1 dx, \quad \text{但し, } x \equiv \frac{1}{\rho} + \frac{w}{\rho_1 V_1} \left(\frac{1}{\rho} - \frac{1}{\delta} \right) \quad (19)$$

を得る。故に、

$$\int_{(A)}^{(C)} p \left(dV - \frac{dw}{\delta} \right) = \rho_1 V_1 \int_{\rho_1}^{\rho_2 + \frac{W}{\rho_1 V_1} \left(\rho_2 - \frac{1}{\delta} \right)} p dx \quad (20)$$

となる。

流路 ABC 間で溶解により流質量に加った質量 W のもつ位置の energy は

$$M = g \int_0^W z dw \quad (21)$$

であり、また流路を流れる流質量 ρV が A から C までの間で内部摩擦によって失う器械 energy は (9) および (14) 式下段によれば

$$F' = g (\rho_1 V_1)^2 \int_0^{l_0} \left(1 + \frac{w}{\rho_1 V_1} \right)^2 \lambda'(l) dl \quad (22)$$

である。ただし、 l および l_0 はそれぞれ流入口 A から流路の任意の一点 J および湧出口 C まで流路に沿って測った長さ、 $\lambda' \equiv \frac{12\mu}{\rho^2 g b d^3}$ であるが、 b および d は l の関数、 μ は水温の関数、 ρ は水温および w の関数、水温 θ および w もまた l の関数であるから、結局 λ' も l の関数である。

(18), (20), (21) および (22) 式を (17) 式に代入し整頓すれば

$$\Delta h + \int_{(A)}^{(C)} \left(z + \frac{p - \pi}{\rho g} \right) d \left(y + \frac{w}{\rho_1 V_1} \right) + \int_{(A)}^{(C)} (-z) dy - \frac{\pi}{\delta g} \frac{W}{\rho_1 V_1} = \rho_1 V_1 U \quad (23)$$

となる。ただし、

$$dy \equiv \rho dx - d\left(\frac{w}{\rho_1 V_1}\right) \quad (24)$$

および

$$U \equiv \int_0^{l_0} \left(1 + \frac{w}{\rho_1 V_1}\right)^2 \lambda'(l) dl \quad (25)$$

である。

(24)式に(19)式の x を代入し、流路のAからJまでの区間について $\frac{w}{\rho_1 V_1}$ が微小であることに留意して近似的に積分すれば

$$y \simeq \left(1 + \frac{w}{2\rho_1 V_1}\right) \log \frac{\rho_1}{\rho} - \frac{\rho + \rho_1}{2\delta} \frac{w}{\rho_1 V_1} \quad (26)$$

を得る。

(23)式左辺の第2項または第3項の積分について第2図または第3図と同様の考察を行なうと

$$\int_{(A)}^{(C)} \left(z + \frac{p - \pi}{\rho g}\right) d\left(y + \frac{w}{\rho_1 V_1}\right) \simeq \zeta_2 \Delta h \left\{ \left(1 + \frac{W}{2\rho_1 V_1}\right) \log \frac{\rho_1}{\rho_2} + \left(1 - \frac{\rho_1 + \rho_2}{2\delta}\right) \frac{W}{\rho_1 V_1} \right\} \quad (27)$$

および

$$\int_{(A)}^{(C)} (-z) dy \simeq \bar{h}_2 \left\{ \left(1 + \frac{W}{2\rho_1 V_1}\right) \log \frac{\rho_1}{\rho_2} - \frac{\rho_1 + \rho_2}{2\delta} \cdot \frac{W}{\rho_1 V_1} \right\} \quad (28)$$

で近似的に表わされる。ただし、 ζ_2 は0から1の間のある値であり、 \bar{h}_2 は第1図において水平面 $X_1 X_2$ から測った流路の深さの y に対する平均値である。

(14)式上段、(27)および(28)式を(23)式に代入すれば

$$\begin{aligned} \Delta h + (\bar{h}_2 + \zeta_2 \Delta h) \left(1 + \frac{W}{2\rho_1 V_1}\right) \log \frac{\rho_1}{\rho_2} \\ - \frac{W}{\rho_1 V_1} \left\{ (\bar{h}_2 + \zeta_2 \Delta h) \frac{(\rho_1 + \rho_2)}{2\delta} + \frac{\pi}{\delta g} - \zeta_2 \Delta h \right\} = \rho_2 Q \left(1 - \frac{W}{\rho_2 Q}\right) U \end{aligned} \quad (29)$$

を得るが、この論文では $\bar{h}_2 = 1 \sim 2$ km, $\Delta h = -100 \sim +100$ m の範囲の値を取扱っており、また $\log \frac{\rho_1}{\rho_2} \leq 3 \times 10^{-2}$, $\frac{W}{\rho_2 Q} \leq 0.01$, ζ_2 は1/2程度であるから、(29)式の各項の計算に10 cm程度の誤差を許せば $\frac{W}{\rho_1 V_1}$ は $\frac{W}{\rho_2 Q}$ とにおいても差支えない。故に、温泉の湧出量は

$$Q = \frac{\Delta h + (\bar{h}_2 + \zeta_2 \Delta h) \left(1 + \frac{W}{2\rho_2 Q}\right) \log \frac{\rho_1}{\rho_2} - \frac{W}{\rho_2 Q} \left\{ (\bar{h}_2 + \zeta_2 \Delta h) \frac{(\rho_1 + \rho_2)}{2\delta} + \frac{\pi}{\delta g} - \zeta_2 \Delta h \right\}}{\rho_2 \left(1 - \frac{W}{\rho_2 Q}\right) U} \quad (30)$$

で与えられる。

すなわち、一般に地下水起源の温泉については、湧出口に対する流入口の水面の高さ Δh が大きいか、また湧出する温泉の温度が高いために湧出口における水の密度が流入口における

水の密度に比較して小さくて、しかも地下流路の平均深度 \bar{h}_2 が大きい程、温泉の湧出量は大きくなるが、流路内の抵抗が大きい場合や湧出する温泉の化学成分濃度 $\frac{W}{\rho_2 Q}$ が流入水に比較して大きくなると湧出量は減少する。(29) 式中に $\frac{W}{\rho_2 Q} = 0$ とおけば前章で取扱った (13) 式と一致することは申す迄もない。

IV. 化学成分を含有する温泉水の密度の近似的推定

常温の流入水量を V_1 、その密度を ρ_1 、流入水が地下を流動する間に溶解する諸鉱物質 (総質量 W) を単一鉱物質とみなしたときの密度を δ 、その鉱物質が水に溶解した場合の体積減少率を κ とし、温泉 (湧出量 Q 、密度 ρ_2) を常温に冷却した場合の量を V_2 、その密度を ρ'_2 とすれば

$$\rho_2 Q = \rho'_2 V_2 \quad (31)$$

および

$$\left. \begin{aligned} \rho_1 V_1 + W &= \rho'_2 V_2 \\ V_1 + \frac{\kappa}{\delta} W &= V_2 \end{aligned} \right\} \quad (32)$$

なる関係があるから、この両式から温泉水の常温における密度 ρ'_2 は次式で与えられる。

$$\frac{\rho'_2}{\rho_1} = \left\{ 1 - \left(\frac{W}{\rho_2 Q} \right) \left(1 - \rho_1 \frac{\kappa}{\delta} \right) \right\}^{-1} \simeq 1 + \frac{W}{\rho_2 Q} \left(1 - \rho_1 \frac{\kappa}{\delta} \right) + \left(\frac{W}{\rho_2 Q} \right)^2 \left(1 - \rho_1 \frac{\kappa}{\delta} \right)^2 \quad (33)$$

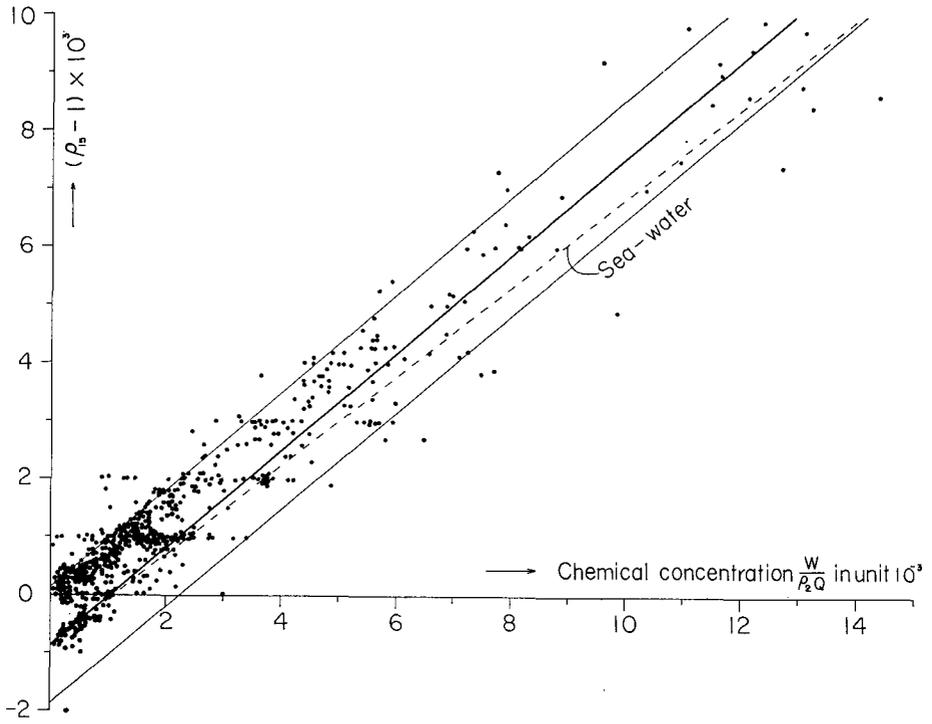
この論文では $\frac{W}{\rho_2 Q}$ が 10 g/kg 以下すなわち 0.01 以下の場合を考えているので、 ρ'_2 の値に 0.0001 以下の誤差を許せば $\left(\frac{W}{\rho_2 Q} \right)^2$ 以上の高次の項は無視して差支えない。

いま、常温を 15°C、流入水を純水とすれば、15°C における温泉水の密度 ρ_{15} は

$$\frac{\rho_{15}}{D_{15}} \simeq 1 + \left(1 - D_{15} \frac{\kappa}{\delta} \right) \frac{W}{\rho_2 Q} \quad (34)$$

となる。ただし、 D_{15} は 15°C における純水の密度である。

一般に、温泉の含有成分の総分析が行なわれる場合、一定温度 (多くは 15°C) における温泉水の比重が測定されていることが多いので、15°C における温泉水の密度が判る。厚生省大臣官房国立公園部編の日本鉱泉誌 (昭 29) を用い、各温泉の化学成分濃度 (1 kg の温泉水に含まれる gas を除く総化学成分量) $\frac{W}{\rho_2 Q}$ が 0~15 g/kg の範囲について、横軸に $\frac{W}{\rho_2 Q}$ を g/g の単位でとり、縦軸にはそれに対応する 15°C の温泉水の密度 ρ_{15} を $(\rho_{15} - 1) \times 10^3$ で表わした値をとり、これらの関係を調べると第 4 図中に黒点で示した関係が得られる。図から判るように、点がかかなり散在し温泉によっては溶解した成分の割合がかかなり異なるものもあることを示しているが、期待される直線的関係が近似的には成立していることが判る。第 4 図中に太い実線で示した直線は



第4図 温泉水の15°Cにおける密度 ρ_{15} を $(\rho_{15}-1)\times 10^3$ の形で表わした値と化学成分濃度との関係(点線は海水における関係を示す)

Fig. 4. Relation between density of hot spring water ρ_{15} at 15°C expressed by the form $(\rho_{15}-1)\times 10^3$ and the corresponding chemical concentration. (Dotted line shows that in sea-water.)

$$\rho_{15} = 0.9991 \left\{ 1 + 0.838 \left(\frac{W}{\rho_2 Q} \right) \right\} \quad (35)$$

である。この関係を用いると、 $\frac{W}{\rho_2 Q}$ の値が判っておれば15°Cにおける温泉水の密度が ± 0.001 の誤差以内で近似的に推定される。

次の問題は温度が15°C~100°Cの範囲内の任意の温度における温度水の密度を近似的に推定することである。

純水の密度と温度との関係はよく知られている。いま、温度が15°C~100°Cの範囲内の任意の温度 θ における純水の密度を D 、15°Cにおける純水の密度を D_{15} 、純水の体膨脹係数を β_0 とおけば

$$\frac{1}{D} = \frac{1}{D_{15}} \left\{ 1 + \beta_0 (\theta - 15) \right\} \quad (36)$$

と書けるが、水の場合には β_0 は温度の関数であって近似的には

$$\beta_0 = b \left\{ 1 + c (\theta - 15) \right\} \quad (37)$$

第1表 (36)式から計算した純水の密度と正しい値との比較
 Table 1. Comparison of density of pure water calculated by the equation (36) with the known correct value.

温度 °C Temperature	15	20	30	40	50	60	70	80	90	100
計算密度 Calculated density	0.9991	0.9982	0.9957	0.9925	0.9884	0.9837	0.9782	0.9720	0.9652	0.9577
正しい密度* Correct value	0.99910	0.99820	0.99564	0.99221	0.98804	0.98321	0.97778	0.97180	0.96531	0.95833
誤差 Error	0.0000	0.0000	+0.0001	+0.0003	+0.0004	+0.0005	+0.0004	+0.0002	-0.0001	-0.0006

* 東京天文台編理科年表 (昭 43) による。

で表わされる。ただし、

$$b = 0.168 \times 10^{-3}, \quad c = 2.38 \times 10^{-2} \quad \text{および} \quad D_{15} = 0.9991$$

である。第1表は(36)式から計算した D の値を理科年表 (昭 43) に掲載されている D の値と比較したものであるが、 ± 0.0006 以下の誤差の程度で一致している。

次に化学成分濃度が $0 \sim 10 \text{ g/kg}$ の温泉水の温度 θ における密度を ρ 、 15°C における密度を ρ_{15} 、その体膨脹係数を β とすれば

$$\frac{1}{\rho} = \frac{1}{\rho_{15}} \left\{ 1 + \beta(\theta - 15) \right\} \tag{38}$$

であるが、 β は温度と化学成分濃度の関数と考えられるから

$$\beta = \beta_0 \left\{ 1 + \varepsilon \left(\frac{W}{\rho_2 Q} \right) \right\} \tag{39}$$

で表わされるものと仮定する。 β_0 は(37)式で与えられる純水の体膨脹係数である。

(36)式と(38)式とから $\beta_0(\theta - 15)$ を消去すれば

$$\frac{\rho}{D} = \left(\frac{\rho_{15}}{D_{15}} \right) \left\{ 1 + \frac{(D_{15} - D)}{D_{15}} \varepsilon \left(\frac{W}{\rho_2 Q} \right) \right\} \tag{40}$$

を得るが、右辺分母の第2項は1に比べて微小と考えられるから

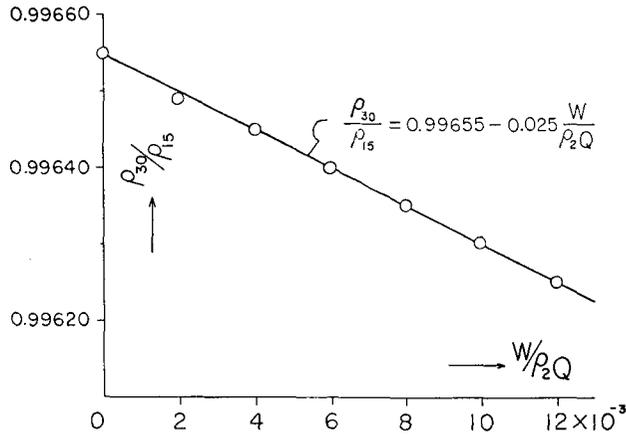
$$\frac{\rho}{D} \approx \left(\frac{\rho_{15}}{D_{15}} \right) \left\{ 1 - \frac{(D_{15} - D)}{D_{15}} \varepsilon \left(\frac{W}{\rho_2 Q} \right) \right\} \tag{41}$$

または

$$\frac{\rho}{\rho_{15}} \approx \left(\frac{D}{D_{15}} \right) \left\{ 1 - \frac{(D_{15} - D)}{D_{15}} \varepsilon \left(\frac{W}{\rho_2 Q} \right) \right\} \tag{42}$$

と書くことができる。

任意の温度および任意の化学成分濃度における温泉水の密度 ρ の測定値があれば(42)式を用いて ε の値が推定されるのであるが、残念ながら筆者の知る限りではこのような資料は皆無である。したがって、多くの温泉水について種々の温度でその密度を測定することが必要であ



第5図 海水を真水で薄めた海水の30°Cと15°Cとの密度の比と海水の化学成分濃度との関係

Fig. 5. Relation between the ratio of density of 30°C to 15°C of sea-water diluted by pure water and the corresponding chemical concentration.

るが、これは将来の問題として、ここでは海水の ϵ の値を用いることにした。尤も温泉水の中には海水と似た成分のものが少くないことは事実である。参考として、塩分の薄い海水について15°Cにおける密度と塩分量(g/g)との関係を第4図中に点線で示した。塩分が $0 \sim 10^{-2}$ の範囲では平均の温泉成分にかなり似た傾向を示している。

さて、神戸海洋気象台編の海洋観測常用表(昭15)を用いて、 $\theta = 30^\circ\text{C}$ 、塩分すなわち $\frac{W}{\rho_2 Q}$ が $0 \sim 12 \times 10^{-3}$ の範囲について海水の $\frac{\rho_{30}}{\rho_{15}}$ の値を求め、これを縦軸にとり、横軸に $\frac{W}{\rho_2 Q}$ の値をとって、その関係を調べた結果、第5図を得た。図から

$$\frac{\rho_{30}}{\rho_{15}} = 0.99655 - 0.025 \left(\frac{W}{\rho_2 Q} \right) \quad (43)$$

なる関係が得られた。(42)式中に $\theta = 30^\circ\text{C}$ を入れれば D および D_{15} は判っているから、これと比較の結果

$$\epsilon = 7.26$$

を得た。

次に、(34)式を(41)式に代入して $\left(\frac{W}{\rho_2 Q}\right)^2$ 以上の高次項を無視すれば

$$\rho \simeq D \left[1 + \frac{W}{\rho_2 Q} \left\{ \left(1 - D_{15} \frac{\kappa}{\delta} \right) - \frac{\epsilon}{D_{15}} (D_{15} - D) \right\} \right] \quad (44)$$

を得る。(34)式と(35)式とを比較すれば、平均的温泉水に対しては

$$\left(1 - D_{15} \frac{\kappa}{\delta} \right) = 0.838$$

としてよいから、(44)式に数値を入れると

$$\rho \simeq D \left\{ 1 + \frac{W}{\rho_2 Q} (7.266D - 6.422) \right\} \quad (45)$$

が得られる。

本論文では、温度が $15^\circ \sim 100^\circ \text{C}$ の範囲内の任意の温度、化学成分濃度が $0 \sim 10^{-2}$ の任意の濃度に対する温泉水の密度 ρ の近似値を (45) 式を用いて推算した。

V. 理論から推察される事柄とそれに対する論議

1. 地下水起源の単純温泉

第1図の地下流路 $AB B_m C$ において、純水に近い常温 (密度 ρ_1) の地表水または地下水が A から流入し単純温泉水 (密度 ρ_2) が C から流出している場合に、流動も受熱も定常状態に達しているものとし流出する温泉水は流入する冷水よりも温度高く、したがって $\rho_1 > \rho_2$ とする。

この場合には、温泉の湧出量 Q は第II章(13)式で与えられる。故に、温泉が湧出するためには

$$\bar{h}_1 \log \frac{\rho_1}{\rho_2} + \Delta h \left(1 + \zeta_1 \log \frac{\rho_1}{\rho_2} \right) \geq 0 \quad (46)$$

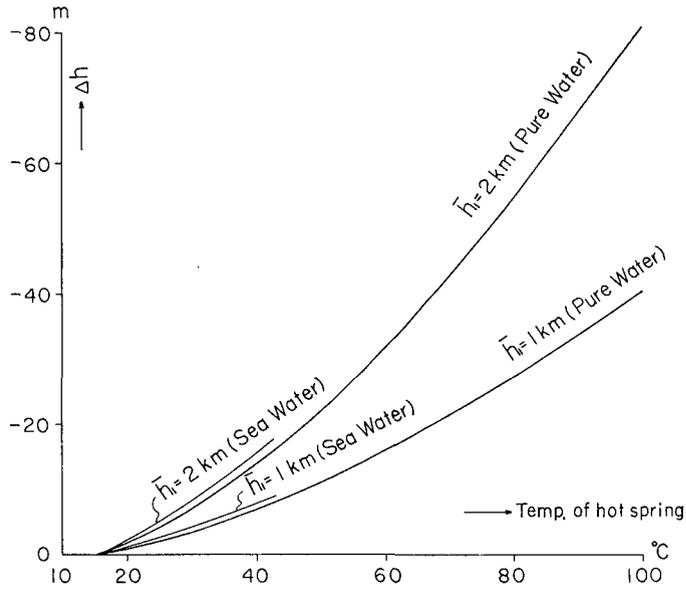
でなければならない。ここに、 \bar{h}_1 は第3図および(6)式で示されるように、湧出口 C を通る水平面 $X_1 X_2$ から測った地下流路の各点の深さを $\log \frac{1}{\rho}$ について A から C まで平均した値、 Δh は第1図から判るように、流入口の水面の $X_1 X_2$ 上の高さ、 $\zeta_1 \Delta h$ は第2図および(5)式に示されるように $X_1 X_2$ から測った地下流路内の水頭を $\log \frac{1}{\rho}$ について A から C まで平均した値であり、 ζ_1 は水路内の流動抵抗等に関係し 0 と 1 との間のある値を示すのである。流入水も湧出する温泉も純水とし、流入水の水温を 15°C とすれば、 ρ_1 および ρ_2 は温度だけの関数であって既知である。

(1) $\Delta h \geq 0$ すなわち流入口の水面が湧出口より高いか同じ高さの場合には (46) 式の左辺は常に正であるから C から温泉が湧出する。

(2) $\Delta h < 0$ すなわち流入口の水面が湧出口より低い場合には、(46) 式左辺の第1項が第2項の絶対値よりも大きい場合にだけ C から温泉が湧出する。(46) 式の $\zeta_1 \log \frac{\rho_1}{\rho_2}$ は考える温度範囲では 1 に対し微小であるから近似的に $\zeta_1 \simeq \frac{1}{2}$ とおいて、水路の平均深度 \bar{h}_1 が 1 km または 2 km の場合に (46) 式の左辺が零となる任意の温泉温度に対する Δh の critical な値を求め、横軸に温泉の湧出温度をとり縦軸にこの Δh の値をとって第6図にその関係を示した。すなわち、湧出する温泉の温度が高ければ、流入口の水面が湧出口より低くても、第6図に示す深さ ($-\Delta h$ の値) を越えない範囲内であれば温泉は湧出することになる。例えば、湧出温度が 100°C ならば流入口の水面が湧出口より 0~80 m 低くても温泉は湧出するのである。

2. 海水起源の温泉

1 の場合の流入水を常温の海水と考えると、海底から地下の割れ目に流入した常温の海水が海底の他の場所に湧出することは $\Delta h = 0$ の場合であるから 1-(1) と同様の理由で可能であ



第6図 温泉が湧出するに必要な流入口の水面と温泉の湧出口との高さの差 Δh の限界値と温泉の温度との関係 (単純温泉の場合)

Fig. 6. Change of difference in altitude between recharge and discharge orifices in the critical condition of flowing due to change in temperature of simple thermal springs.

る。次に、海底から地下の割れ目に流入した常温の海水が地下で熱せられて陸上に再び湧出する場合は1-(2)の $\Delta h < 0$ の場合と同様であるが、温度に対応する密度の値が異なっている。一般に海洋学で用いられる海水密度を求める実験式は温度 40°C 以下に適用可能であるので、この式と(46)式とから Δh と温度との関係を算出して第6図に示したが、その関係は純水の場合と概略一致する。故に、海水が1-(2)と同じ機構で陸上に湧出することは湧出地点の高さが海面上あまり高くなければ可能であり、湧出温度が 100°C とすれば湧出口の高さが海面上大略 80 m 以下であれば可能ということになる。

しかし、実際には海岸近くに湧出する温泉で海水がその濃度のまま温泉となって湧出したと思われる例は極めて少なく、海水に普通の地下水が混合している場合が多いと思われる。この場合には温泉の湧出は第6図に示される高さよりもやや低い値となるとと思われる。

3. 地下水起源の化学成分含有温泉

第1図においてAから流入した常温で化学成分をほとんど含まない地表水また地下水が地下流路を流れながら周囲の岩石から熱を受けるとともに流路の壁から化学成分を溶解してCから温泉となって湧出する場合を考え、しかも流動も受熱も溶解も定常状態に達しているものとする。この場合には温泉の湧出量 Q は第III章(30)式によって与えられる。故に、温泉が自噴すべき条件は

$$\left\{ \left(1 + \frac{w}{2\rho_2 Q} \right) \log \frac{\rho_1}{\rho} - \frac{\rho_1 + \rho}{2\delta} \cdot \frac{w}{\rho_2 Q} \right\} \dots \dots (\text{流路の path の関数})$$

について A から C まで平均した値でその他の記号は **1** の場合と同様である。

まず、流入口の水面と湧出口の高さが等しく、すなわち $\Delta h = 0$ の場合について、地下流路の壁から溶解する鉱物質の平均密度に $\delta = 1.5, 2.0, 2.5 \text{ gr/cm}^3$ の3つの値を採用し、地下流路の深度の加重平均 \bar{h}_2 の値としては流動する地下水の限界深度 3 km を参考として 2 km を採用し、(47) 式の左辺を丁度零ならしめる温度と化学成分濃度との関係すなわち、温泉が自噴するために必要な湧出温度の最低値と化学成分濃度の最大値を示す温泉の自噴限界線を計算し、横軸に温泉の化学成分濃度 $\frac{W}{\rho_2 Q}$ をとり、縦軸には湧出する温泉の温度をとって第 7 図に実線で示した。すなわち、 $\delta = 2.0$ の場合、温度 25°C の温泉は化学成分濃度 1.5×10^{-3} 以下でなければ湧出し得ないが、温度 50°C の温泉は化学成分濃度 8.9×10^{-3} 以下であれば湧出することを示している。尚、この critical な化学成分濃度より低い濃度である程湧出量は増加するのである。 $\delta = 1.5$ または $\delta = 2.5$ とした場合と $\delta = 2.0$ の場合の自噴限界線の差は、図から判るように、あまり大きくはない。また、以上の計算には $\bar{h}_2 = 2 \text{ km}$ としたが、 $\Delta h = 0$ の場合には (47) 式左辺第 3 項中括弧内の各項の値を比較すれば、 $\frac{\rho_1 + \rho_2}{\delta}$ は主要項であって δ の値により 0.8~1.3 程度の値であるが、 $\frac{2\pi}{\bar{r}g} \bar{h}_2$ は \bar{h}_2 の値により $3 \times 10^{-3} \sim 10 \times 10^{-3}$ 程度の値であり前者に対し補正項であるから、 $\bar{h}_2 = 1 \sim 3 \text{ km}$ の範囲で変化させても $\Delta h = 0$ の場合には自噴限界線の値にはほとんど影響しない。

次に、 $\bar{h}_2 = 2 \text{ km}$ 、 $\delta = 2.0$ の場合に、 $\Delta h = +10 \sim -70 \text{ m}$ 、すなわち流入口の水位が湧出口の高さよりも 10 m 高い場合から 70 m 低い場合まで 10 m 毎に自噴限界線の値を (47) 式から計算して第 7 図に示した。(47) 式左辺第 3 項中括弧内では $\frac{\rho_1 + \rho_2}{\delta}$ が主要項でその概値は 1 であり、 $\frac{2\zeta_2 \Delta h}{(\bar{h}_2 + \zeta_2 \Delta h)}$ は $0.5 \times 10^{-2} \sim -3 \times 10^{-2}$ 程度の補正項であるから $\zeta_2 \approx \frac{1}{2}$ を採用したが、このことによる誤差は小さい。

さきに参照した日本鉱泉誌 (昭 29) を資料として化学成分濃度が 10×10^{-3} 以下の本邦の温泉 839 について、それぞれ温度および化学成分濃度を温度を 10° 毎、化学成分濃度を 1×10^{-3} 毎に区分し、各区分に属する温泉数を求め第 7 図に各区分の中央にその数を記入し、その数によって 0.5~2.5, 2.5~5.0, 5~10, 10~25, 25~50, 50 以上の 6 段階に分けて斜線の粗密別で示した。

図において、見掛け上 $\Delta h = 0$ および $\Delta h = +10 \text{ m}$ の両自噴限界線間に含まれる温泉数は第 2 表 M_1 欄に示されるように 13 であるが、これらの温泉は $\Delta h \leq 0$ では湧出し得ないから $\Delta h > 0$ でなければならない。しかし、もし Δh が $+10 \text{ m}$ よりもかなり高いとすれば、その Δh に相当する自噴限界線と $\Delta h = +10 \text{ m}$ の自噴限界線との間にいくつかの温泉が存在すべきであるが、実際には図から判るように、ほとんど温泉は認められないから、実際の温泉の Δh の上限は

第2表 地下流路の深度の加重平均 $\bar{h}_2=2\text{ km}$ の場合に本邦の温泉 (化学成分濃度 10^{-2} 以下) における Δh の値の頻度分布

Table 2. Frequency distribution of Δh of hot spring in Japan (Chemical concentration $\leq 10^{-2}$) in the case where the weighted mean of depth of underground passage \bar{h}_2 is 2 km.

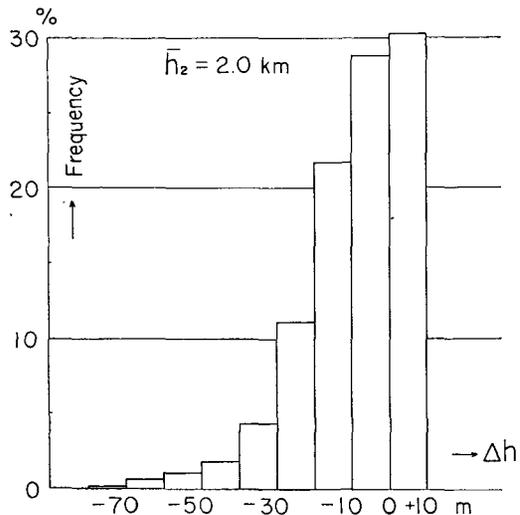
M_1 : 第7図中の Δh の相隣れる線間にある見掛けの温泉数
 Apparent number of hot springs exist in an area bounded by two successive lines of Δh in Fig. 7.
 N : Δh の各区分間の修正された温泉数と百分率 (括弧内)
 Corrected number and percentage of hot springs belonged to a class of Δh .

Δh の区分 Class of Δh (m)	M_1	N (%)
10 ~ 0	13	254 (30.3)
0 ~ -10	119	241 (28.8)
-10 ~ -20	263	182 (21.7)
-20 ~ -30	229	94 (11.2)
-30 ~ -40	107	37 (4.4)
-40 ~ -50	42	15 (1.8)
-50 ~ -60	22	8 (1.0)
-60 ~ -70	26	5 (0.6)
-70 ~ -80	18	2 (0.2)
(Total)		838 (100.0)

+10 m かそれよりも僅かに高い値であると考えるのが妥当であろう。したがって、13温泉の Δh の値は $0 \sim +10\text{ m}$ の範囲内にあると言ってよい。

次に、 $\Delta h = -10\text{ m}$ および $\Delta h = 0$ の両自噴限界線間の見掛けの温泉数は119であるがこれらの温泉は $\Delta h \leq -10\text{ m}$ では湧出し得ないから Δh の値は $-10 \sim +10\text{ m}$ の範囲内にあることになる。この範囲内では一様に分布すると仮定すれば Δh が $-10 \sim 0\text{ m}$ の区分と $0 \sim +10\text{ m}$ の区分とに60宛の温泉が分布することになる。

全く同様の方法を Δh の各区分内の見掛けの温泉数 (第2表中 M_1) について繰返し、 Δh の各区分に入る温泉数を加算すれば Δh の各区分の値をもつ真の温泉数 (第2表 N) が求められる。第8図は、この関係すなわち温泉流入口の水面と湧出口との高さの差 Δh が実際の温泉ではどうなっているかを示したも



第8図 本邦の温泉における Δh の値の頻度分布 ($\bar{h}_2=2\text{ km}$ とした場合)

Fig. 8. Frequency distribution of the value of Δh of hot springs in Japan in the case where \bar{h}_2 is assumed as 2 km.

第3表 本邦の単純温泉における Δh の値の頻度分布

Table 3. Frequency distribution of Δh of simple thermal springs in Japan.

T : Δh の区分に対応する温度範囲

The corresponding temperature extent to a class of Δh .

M_2 : T の各温度範囲内にある見掛の温泉数

Apparent number of hot springs in the respective temperature extent.

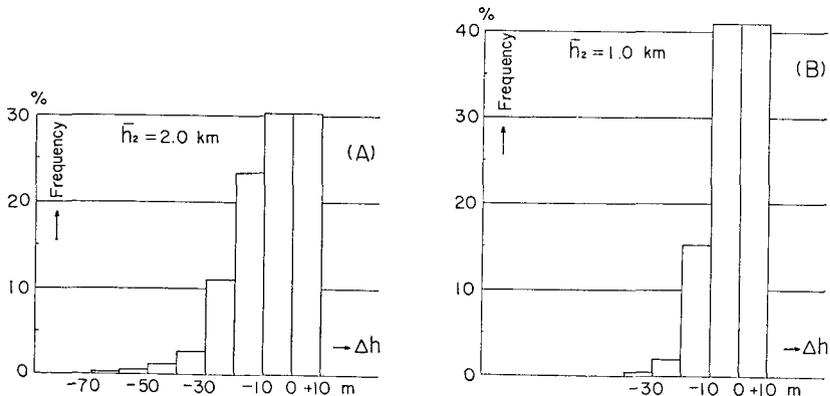
N : Δh の各区分間の修正された温泉数と百分率 (括弧内)

Corrected number and percentage of hot springs belonged to a class of Δh .

Δh の区分 Class of Δh (m)	T (°C)		M_2		N (%)	
	$\bar{h}_2=2$ km	$\bar{h}_2=1$ km	$\bar{h}_2=2$ km	$\bar{h}_2=1$ km	$\bar{h}_2=2$ km	$\bar{h}_2=1$ km
10~ 0					114 (30.4)	153 (41.1)
0~-10	15.0~34.5	15.0~47.5	51	192	114 (30.4)	153 (41.1)
-10~-20	34.5~47.5	47.5~67.5	141	149	88 (23.5)	57 (15.3)
-20~-30	47.5~58.3	67.5~84.0	125	23	41 (11.0)	8 (2.0)
-30~-40	58.3~67.5	84.0~99.2	24	9	10 (2.7)	2 (0.5)
-40~-50	67.5~76.2	—	17	—	5 (1.3)	—
-50~-60	76.2~84.2	—	6	—	2 (0.5)	—
-60~-70	84.2~91.8	—	5	—	1 (0.3)	—
-70~-80	91.8~99.4	—	4	—	0.4 (0.1)	—

のである。すなわち、地下流路の深度加重平均を $\bar{h}_2=2$ km とした場合には Δh の範囲は +10 ~ -80 m であるが、 $\Delta h = +10 \sim -30$ m の温泉が多いことを示している。

しかし、 $\bar{h}_2=2$ km とした以上の結果は \bar{h}_2 を変えると変化するおそれがあるので、第3表に単純温泉 (化学成分濃度が $0 \sim 10^{-3}$ の範囲内の温泉) について $\bar{h}_2=2$ km または $\bar{h}_2=1$ km として同様な方法を用いて実際の温泉の Δh の値の頻度分布 (第3表 N 欄) を調べて比較を行なった。第9図 (A) および (B) はそれぞれ $\bar{h}_2=2$ km および $\bar{h}_2=1$ km の場合の単純温泉の Δh の値の頻度分布であるが、(A) とさきに述べた第8図の化学成分を含有する普通の温泉と比較す



第9図 本邦の単純温泉における Δh の値の頻度分布。

(A) は $\bar{h}_2=2$ km, (B) は $\bar{h}_2=1$ km の場合

Fig. 9. Frequency distribution of the value of Δh of simple thermal springs in Japan. (A) and (B) show respectively those in $\bar{h}_2=2$ km and in $\bar{h}_2=1$ km.

れば Δh の範囲や頻度の高い Δh の範囲は全く一致する。次に (A) と (B) とを比較すれば、 Δh の範囲は $\bar{h}_2=2$ km の場合には $+10\sim-80$ m であるに対し、 $\bar{h}_2=1$ km の場合は $+10\sim-40$ m となっている。また、 $\bar{h}_2=2$ km の場合には総温泉数のおよそ 95% は $\Delta h=+10\sim-30$ m の範囲にあるが、 $\bar{h}_2=1$ km の場合には総温泉数の 97% は $\Delta h=+10\sim-20$ m の範囲にあることが判った。

流動する地下水が存在する深さの最高は 3 km ぐらいというのが通説であるから、地下流路の加重平均深度に当たる \bar{h}_2 は 1~2 km であることが推察される。したがって、実在の自噴温泉においては上記を総合して Δh は $+10\sim-80$ m の範囲にあるが、その 95% は $\Delta h=+10\sim-30$ m の範囲にあるという結論に達する。

4. 温泉が普通の被圧地下水よりも自噴することの多い理由

普通の被圧地下水が自噴する場合は少ないのに温泉は多くの場合に自噴する。現在は湧出していない温泉も開発の当初は自噴したことが多い。

被圧地下水の場合は水源である流入口の水面の高さが湧出口よりも高くなければ、換言すれば $\Delta h > 0$ でなければ自噴は起らない。しかし、温泉では、第 2 表また第 3 表から判るように、自噴する温泉の中、 $\Delta h > 0$ の場合は温泉総数の 30~40% に過ぎず、残りの 70~60% は湧出口の高さよりも 0~80 m 低い水面を持つ地表水または主に地下水が水源となって自噴しているのである。これは、温泉の自噴には流入口の水位が湧出口より高いということよりも、流入側流路と流出側流路内の水の密度差特に温度差の影響が大きいことを意味している。これが温泉は地下水よりも自噴し易い理由であるが、温度が 40°C 以下で化学成分濃度が 3×10^{-3} 以下の部分を除外すると、 $\bar{h}_2=2$ km では、第 7 図から判るように、湧出温度の 10°C の変化は Δh のおよそ 10 m の変化に対応し、 $\bar{h}_2=1$ km では温度 20°C の変化は Δh のおよそ 10 m の変化に対応するのである。

5. 温泉の地下流路における水の流動を始動するための条件

第 II 章または第 III 章において、第 1 図に示したような地下流路 A B B_m C を考え、この流路の中の水の流動は流入口 A から B を通って湧出口 C へ向って定常的に流れていると仮定した。

このような水の流動が起るためには、この流動を始動する作用が必要であるが、これは普通の被圧地下水の場合のように、水源となる地表水または地下水の水面の高さが湧出口よりもある程度高く、換言すれば $\Delta h > 0$ であるか、あるいは流管の流出側が流入側よりも常に多少強く熱せられて流出側の水の密度が流入側の水の密度よりもやや小さくなっていることが必要条件である。このような条件は何れも実在可能なことであり、特に後者が大きい役割を演じていると思われることは既に前節にも述べた通りである。

VI. 総括および結語

本研究を要約すれば次のようである。

1. 第1図に示した地下流路 $AB B_m C$ において、A から地表水または地下水が流入し、地下を流動する途中で周囲の岩石から熱を受け、また流路の壁の鉱物質を溶解し湧出口 C から温泉となって流出している場合を考えたが、水の密度は圧力によって変化しないこと、溶解する物質の平均密度は場所に関係なく一定であること、湧出する温泉水の化学成分濃度は 10^{-2} 以下であること、および流動も受熱も溶解も定常状態にあることを仮定して、温泉の湧出量 Q を(30)式として求めた(第III章)。ただし、単純温泉の場合には(13)式となる(第II章)。

また、これらの式から温泉が湧出するに必要な条件式として(47)式および(46)式(単純温泉)を得た。

2. これらの式を用いて論議するためには、任意の温度と化学成分濃度の温泉水の密度を知ることが必要である。第IV章ではこの問題を考究し近似式として(45)式を得た。

3. 上記の理論と実在の温泉の温度、化学成分濃度の資料から次の結果を得た。

(1) 流入口の水面(地下水面)が温泉の流出口よりも数10m低くても単純温泉の湧出は可能である(第6図)。

(2) 海水が海底の割れ目から地下へ侵入し再び温泉となって海底の他の場所へ湧出することは可能である。また、このような海水起源の温泉が陸上へ湧出することは、その湧出口の高さが海面上80m以下であれば可能である。

(3) 温泉の化学成分濃度が $0 \sim 10^{-2}$ の場合に、流入口の水面と湧出口の高さとの差 Δh が一定であれば、如何なる温度以下、如何なる化学成分濃度以上であれば温泉が湧出し得ないかの限界を第7図に実線で示した。これらを用いて実際の温泉の Δh の値の分布を推定したが、流入口の水面の高さが湧出口よりも10m高いものから80m低いものまでであるが、流入口が湧出口よりも10m高いものから30m低いものが多いことを指摘した(第2, 3表参照)。

(4) 温泉においては普通の被圧地下水よりも自噴することが多いのは、地下水では $\Delta h > 0$ でなければ自噴し得ないが、温泉では $\Delta h = +10 \sim -80$ m の広い範囲で自噴可能であることに原因することを示した。

(5) 温泉の地下流路における水の流動が始動されるためには、 $\Delta h > 0$ であるか、 $\Delta h < 0$ であれば流路の流出側が流入側よりも強く熱せられることが必要であること、特に前者よりも後者が主なる役割をしていることを示し、このような条件は実在可能であることを述べた。

本論文では、湧出する温泉が水蒸気や gas を伴う場合については論じなかった。また、湧出量と温度と化学成分濃度と Δh との関係については数量的検討を行なわなかった。これらの問題については、次の機会に譲ることにしたい。

終りに、本論文の数値計算と製図は三浦カヲル嬢の手を煩した。ここに記して謝意を表する。

2. On the Mechanism of Flowing Springs of Meteoric Water Origin

By Takaharu FUKUTOMI

(Department of Geophysics, Faculty of Science, Hokkaido University)

1. Under the following assumptions :

- (i) surface water or ground water flows into orifice A of the underground channel of interconnected fractures in rocks and circulates through the channel to the maximum depth of 2 or 3 kilometers, being heated entirely by conduction and dissolving minerals of wall of the passage, and discharges again from another orifice C as a hot spring, as shown in figure 1,
- (ii) water density ρ does not depend upon pressure,
- (iii) average density of minerals δ dissolved to water is always constant and independent with the position in the passage,
- (iv) chemical concentration of flowing springs is less than 10^{-2} ,
- (v) flow, temperature and dissolution of water in the underground channel are in steady state,

discharge-rate of a hot spring Q is theoretically obtained as equation (30), and that of simple thermal spring is given by equation (13).

The equation of the critical condition of flowing is expressed by (47).

2. In discussion of these equations, it is necessary to know the quantitative relation among temperature, chemical concentration and the corresponding density of hot spring water. Equation (45) is given as that of the first approximation.
3. As the result of the above-mentioned theoretical study, conclusions are obtained as follows :

- (1) Difference in altitude between recharge and discharge orifices Δh is assumed to be constant, and lines of the critical condition of flowing are indicated in figure 7. From the distribution of the apparent frequency of hot springs in Japan lying between two successive critical lines, true frequency distribution of Δh is discussed as shown in tables 2 and 3. It is worthy of note that numerical value of Δh of hot springs in Japan lies in the extents from +10 m to -80 m, and about 95% of the total number of hot springs indicate $\Delta h = +10 \sim -30$ m. This is just the reason why the flowing hot spring is more frequent than the flowing cold ground water in Japan.
- (2) It is possible that sea water flowed into sea-bottom fractures discharges again to the other part of sea bottom as a saline hot spring. It may be also, possible that such saline hot springs be able to discharge on land surface, if the altitude of orifice of the hot spring is less than 80 m above sea-level, as shown in figure 6.