



| | |
|------------------|---|
| Title | 7. 裂罅状温泉における影響度と枯渇現象の理論的研究 |
| Author(s) | 福富, 孝治; FUKUTOMI, Takaharu |
| Citation | 北海道大学地球物理学研究報告, 17, 65-83 |
| Issue Date | 1967-02-20 |
| DOI | https://doi.org/10.14943/gbhu.17.65 |
| Doc URL | https://hdl.handle.net/2115/13925 |
| Type | departmental bulletin paper |
| File Information | 17_p65-83.pdf |



7. 裂罅状温泉における影響度と 枯渇現象の理論的研究

福 富 孝 治

(北海道大学理学部地球物理学教室)

— 昭和 41 年 10 月受理 —

I. 序 言

温泉の湧出形態は層状温泉と裂罅状温泉とに大別されるが、北海道では温泉地域総数のおよそ半数ずつがこれらに属している。

前報¹⁾において、筆者は層状温泉の中で多数を占める被圧層状温泉の相互影響と枯渇現象について理論的考察を行なった。しかし、裂罅状温泉の影響度、枯渇現象についての研究は筆者の知る限りでは全くないので本論文においては、裂罅状温泉の影響度と枯渇現象について理論的考察を進める。

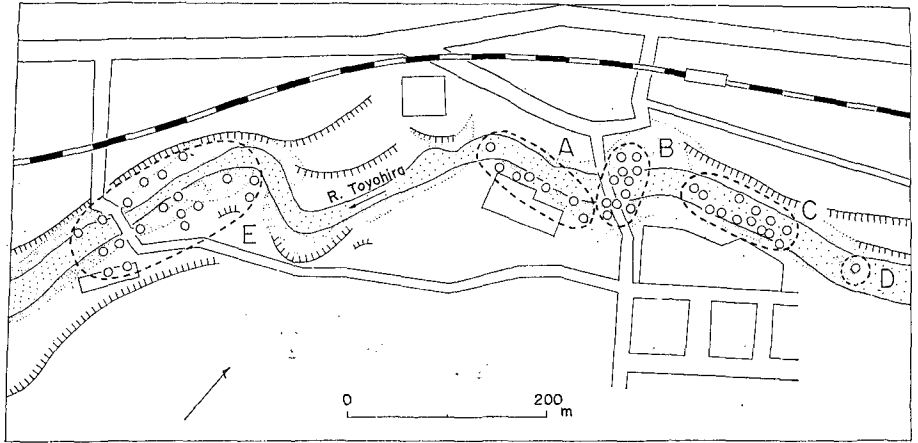
II. 裂罅状温泉の湧出口付近の地下構造

北海道における代表的な裂罅状温泉で湧出状況が直接観察されるのは定山溪、温根湯、北湯沢などの温泉地域である。その湧出口付近の地下泉脈の様子を定山溪温泉の場合を例にとって考察してみよう。

第 1 図は定山溪温泉における湧出口の分布図²⁾である。図中粗に点を施した部は豊平川であるが、その川底および岸には第三紀石英斑岩³⁾が露出している(密に点を施した部分)。この岩石中には多くの小さい割れ目があって川に斜交しており、その割れ目の諸所から温泉がわき出している。白丸は温泉湧出口の位置であるが、川底には図に記入してない未開発の湧出個所がいくらかある。点を施した部分の外側は石英斑岩の上を覆っている少なくとも 2 段の河成段丘堆積物であって、その面は川と付近に露出している石英斑岩の表面上数 m から 30 m の高さにある。

すなわち、定山溪において温泉水を地下から導くのは石英斑岩中の割れ目であって、各湧出口からの温泉水は、その温度と塩素量の関係²⁾から見てほぼ 1 系統の温泉水であることから、

- 1) 福富孝治; 被圧層状温泉における相互影響と枯渇現象の理論的研究, 北大地球物理学研究報告, 15 (昭 41), 33~48.
- 2) 福富・須川・徳永・大槻・三好・和気・愛沢; 定山溪温泉の調査 (昭和 39 年 8 月) 報告, 札幌市観光課編, 定山溪温泉の調査 (昭 39), 1~23.
- 3) 鈴木 醇・石川俊夫・鈴木淑夫・勝井義雄; 定山溪温泉地質調査報告, 北海道衛生部編, 北海道温泉調査報告, 6 (昭 33), 1.



第1図 定山溪温泉における湧出口の分布 (白丸) (密な点々の部分は石英斑岩の露出部, 太い点線は温泉群を示す)

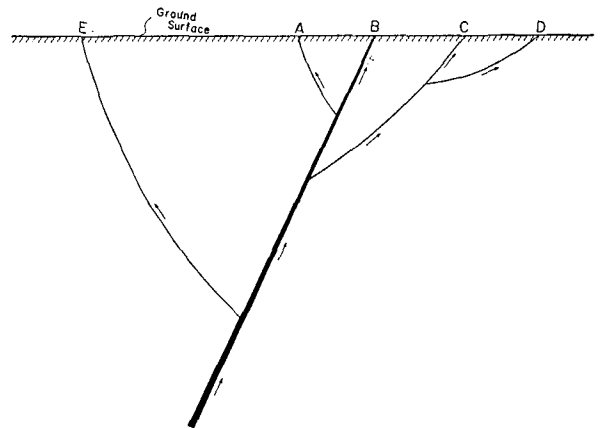
Fig. 1. Horizontal distribution of orifices in Jozankei hot springs.

地下深くにはこの温泉水を導く主な1つの割れ目があって、それから何段にも分岐した割れ目から温泉がわき出しているものと推察される。

第1図をよく見ると、湧出口の分布はA, B, C, DおよびEの5群になっていることが判る。互に距離の近い温泉群ほど温泉水を導く割れ目は地下浅い所で分岐しているという常識的な仮定をすると、温泉水を導く地下の主な割れ目の分岐の概況は第2図に示すようになる。図においてA, B, CおよびEの各割れ目は地表近くでさらに多くの小さい割れ目を地表まで派出して温泉水を湧出させていることは第1図からみて明かである。

このような小さい割れ目の枝が地表付近にだけ存在すると考えるのは不合理であるから、第2図に示した主な枝のおのおのにもこのような小枝の分岐はあるのであろう。しかし、これらの小枝は地表まで達することなく消失するか、あるいは流動抵抗が大きい実質的にはないに等しいとか、または再び元の大きい枝に合流するのではないだろうか。

この問題については第III章でさらに検討するが、流動という見地からは地下泉脈として第2図の構造とA, B, CおよびEに派生した小割



第2図 定山溪温泉の地下において温泉水を導く地下の主な割れ目の分岐概況

Fig. 2. A schematic representation of underground network of fractures in rocks in Jozankei hot spring locality.

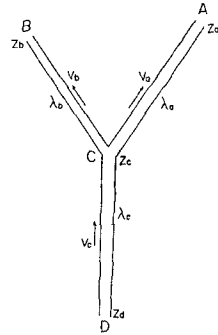
れ目を考えればよいはずである。

III. 割れ目中の温泉水の定常流動の方程式とその性質

この章の表題については既に筆者が前報⁴⁾に述べた。しかし本論文の問題解決の基礎となる事項については、多少重複するが次に述べておきたい。

1. 定常流動の近似式

地下岩石の割れ目のなかを温泉水が定常的に流動している場合、その通路の一部分を第3図のように考え AC, BC および CD の割れ目の各枝では枝毎に断面の形および面積は一樣であると仮定し、したがって、それぞれ流量を V_a, V_b, V_c 、流動抵抗係数を $\lambda_a, \lambda_b, \lambda_c$ とする。また、流路の端 A, B, D および分岐点 C の高さおよび水圧をそれぞれ z_a, z_b, z_c および p_a, p_b, p_c とおく。ただし、分岐点 C において AC 側, BC 側, CD 側の水圧ならびに流速をそれぞれ p_{c1}, p_{c2}, p_{c3} および v_{c1}, v_{c2}, v_{c3} とする。



第3図 地下流路の一部分の模型
Fig. 3. A model of a part of underground passage.

この場合、それぞれ流路 DC, CA, CB の両端に BERNOULLI の方程式および福富の研究⁴⁾を適用すれば

$$\left. \begin{aligned} z_a + \frac{p_a}{\gamma} &= z_c + \frac{p_{c3}}{\gamma} + \lambda_c V_c \\ z_c + \frac{p_{c1}}{\gamma} &= z_a + \frac{p_a}{\gamma} + \lambda_a V_a \\ z_c + \frac{p_{c2}}{\gamma} &= z_b + \frac{p_b}{\gamma} + \lambda_b V_b \\ V_c &= V_a + V_b \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

を得る。ただし、

$$\lambda = \frac{12\nu l}{gbd^3} \quad (2)$$

であり、 $\gamma = \rho g$ 、 g は重力の加速度、 ρ は水の密度、 ν は水の動性粘性係数、 d は割れ目の厚さ、 b は割れ目の横幅、 l はその割れ目の流路部分の長さである。

また、分岐点 C においては

$$\frac{p_{c3}}{\gamma} = \frac{p_{c1}}{\gamma} + \frac{v_{c1}^2 - v_{c3}^2}{2g} = \frac{p_{c2}}{\gamma} + \frac{v_{c2}^2 - v_{c3}^2}{2g} \quad (3)$$

なる関係がある。

4) 福富孝治; 岩石の割れ目中の温泉水の流動, 北大地球物理学研究報告, 14 (昭40), 31~48.

割れ目の中の流れを層流と考えているが、層流であるためにはその平均流速はおよそ次式で与えられる限界速度 v よりも小でなければならない。

$$v \simeq \frac{2000\nu}{d} \quad (4)$$

温泉がわき出る岩石の割れ目の厚さ d は、定山溪では 0.1~1.0 cm 程度の値である。ゆえに定山溪温泉の温度 80°C に対する $\nu = 0.0041$ c.g.s を用いて (4) 式から v を計算すると 8~80 cm/sec となる。割れ目の中の流速としてこの限界速度の平均値 44 cm/sec を採用したとしても $\frac{v_{c1}^2}{2g}$, $\frac{v_{c2}^2}{2g}$, $\frac{v_{c3}^2}{2g}$ などの値は 1 cm の程度である。他方、裂隙状温泉の湧出口に最も近い地下流路について測定された p/r の値は湧出口上、定山溪ときわ泉源において 70 cm, 同じく鹿の湯前岩石の亀裂において 80 cm, カルルス温泉において 130 cm であったので、地下の流路では湧出口の高さと地下流路の高さの差だけ増加する。さらに地下深くなる程その値は水が通過する流路の長さの減少に伴い増大するから p/r の値は地下岩石の割れ目中では数 10 cm から数 m であると考えられる。

したがって、(3) 式において $\frac{v_{c1}^2 - v_{c3}^2}{2g}$ および $\frac{v_{c2}^2 - v_{c3}^2}{2g}$ は $\frac{p_{c3}}{r}$, $\frac{p_{c1}}{r}$ および $\frac{p_{c2}}{r}$ と比較して微小であるから無視すれば、近似的には

$$p_{c1} \simeq p_{c2} \simeq p_{c3} \equiv p_c \quad (5)$$

として差支えない。

ゆえに、(1), (2) 式は

$$\left. \begin{aligned} z_a + \frac{p_a}{\gamma} &= z_c + \frac{p_c}{\gamma} + \lambda_c (V_a + V_b) \\ z_c + \frac{p_c}{\gamma} &= z_a + \frac{p_a}{\gamma} + \lambda_a V_a \\ z_c + \frac{p_c}{\gamma} &= z_b + \frac{p_b}{\gamma} + \lambda_b V_b \end{aligned} \right\} \quad (6)$$

となる。これが近似的ではあるが地下岩石の割れ目の中の温泉水定常流動の基礎となる方程式である。

2. 基礎方程式の応用範囲の拡張

上記方程式の応用範囲は次に述べるように拡張される。

(1) 地下流路の 1 枝については流動抵抗係数 λ が一定であると仮定したが、もしこの枝が異った流動抵抗係数 $\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_n$ の部分の連結体であった場合は、この λ を

$$\lambda = \lambda_1 + \lambda_2 + \dots + \lambda_n \quad (7)$$

と考えておけばよい (前報参照)。

(2) 地下流路の 1 枝の途中で 2 枝に分流して後、再び合流している場合、1 枝の部分と 2 つの分枝の流動抵抗係数をそれぞれ λ_f および λ_j, λ_k とすれば、この系を同じ流量の流動抵抗

係数 λ なる 1 枝の流路とみなした場合には

$$\lambda = \lambda_j + \frac{\lambda_j \lambda_k}{\lambda_j + \lambda_k} \tag{8}$$

と考えておけばよい (前報参照)。

この論文では繁雑を防ぐため以降は

$$\frac{\lambda_j \lambda_k}{\lambda_j + \lambda_k} \equiv \lambda_{j,k} \tag{9}$$

とおいて $\lambda_{j,k}$ を用いることにする。 $\lambda_j > \lambda_k$ とすれば $\lambda_j > \lambda_k \geq \lambda_{j,k} \geq \frac{\lambda_k}{2}$ である。すなわち、一般に $\lambda_{j,k}$ は λ_j, λ_k のいずれよりも小であるが、 λ_j が λ_k に比べて非常に大きいとき $\lambda_{j,k}$ は最大となり λ_k に等しく、 $\lambda_j = \lambda_k$ のとき最小となり $\lambda_k/2$ となる。

第 II 章の終りの部で述べた泉脈の一部がいくつかに分流していても再びその枝に合流しておれば 1 つの枝とみなしても差支えないことは上に述べた理由からである。

(3) 第 3 図に示した Y 字形流路において、流路の上端 A, B がそれぞれ z_a および z_b の高さで地表に達し水を流出している場合には A, B 流路の湧出量比 V_a/V_b は次式で与えられる。

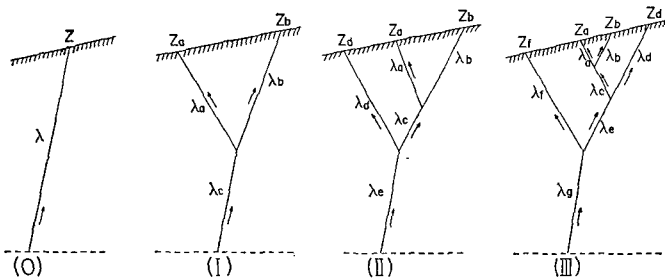
$$\frac{V_a}{V_b} = \frac{z_b - z_a}{\lambda_a V_b} + \frac{\lambda_b}{\lambda_a} \tag{10}$$

もし、 $z_b = z_a$ であれば、湧出量比 V_a/V_b はそれらの流路の抵抗係数の比の逆数 λ_b/λ_a に等しい。

(4) (3) に述べた Y 字形流路を、この流路の下端 D と同じ高さ、水圧および流量をもち上端は地表に達している 1 流路として取扱うことにすれば、後者の湧出口の高さ z および流路の抵抗係数 λ は

$$\left. \begin{aligned} z &= \lambda_{a,b} \left(\frac{z_a}{\lambda_a} + \frac{z_b}{\lambda_b} \right) \\ \lambda &= \lambda_c + \lambda_{a,b} \end{aligned} \right\} \tag{11}$$

を満足するようにとればよい。この逆もまた真である (前報参照)。



第 4 図 湧出口付近の地下流路模型

Fig. 4. Four models of underground passages in the neighborhood of an orifice.

すべての水圧は大気圧を基準として測るものとし、(6)式に $p_a = p_b = 0$ を代入して変形すれば(11)式の関係が得られる。

もし、湧出口 A, B の高さが等しければ、 z もこの高さに等しいことは(11)式から判る。

(5) 第4図(I)は第3図の Y 字形流路と同様なものであるが、(II)および(III)は(I)を少しずつ複雑にしたものである。各流路の枝の流動抵抗係数 λ と各湧出口の高さ z を図のように suffix をつけて表わすこととし、図のように1本の流路(0)を考え、その下端が(I), (II), (III)の流路系の下端における高さ、水圧および流量と同じ値をもつものとする。その流動抵抗係数を λ 、湧出口の高さを z として(I), (II), (III)の流路系を(0)流路で置換したとき、 λ, z の値は次式で与えられる。

(I) に対して;

$$\left. \begin{aligned} \lambda &= \lambda_c + \lambda_{a,b} \\ z &= \lambda_{a,b} \left(\frac{z_a}{\lambda_a} + \frac{z_b}{\lambda_b} \right) \end{aligned} \right\} \quad (11)$$

(II) に対して;

$$\left. \begin{aligned} \lambda &= \lambda_c + \lambda_{d,(c+a,b)} \\ z &= \lambda_{d,(c+a,b)} \left\{ \frac{z_d}{\lambda_d} + \frac{\lambda_{c,a,b}}{\lambda_c} \left(\frac{z_a}{\lambda_a} + \frac{z_b}{\lambda_b} \right) \right\} \end{aligned} \right\} \quad (12)$$

(III) に対して;

$$\left. \begin{aligned} \lambda &= \lambda_g + \lambda_{f,(e+d,(c+a,b))} \\ z &= \lambda_{f,(e+d,(c+a,b))} \left[\frac{z_f}{\lambda_f} + \frac{\lambda_{e,d,(c+a,b)}}{\lambda_e} \left\{ \frac{z_d}{\lambda_d} + \frac{\lambda_{c,a,b}}{\lambda_c} \left(\frac{z_a}{\lambda_a} + \frac{z_b}{\lambda_b} \right) \right\} \right] \end{aligned} \right\} \quad (13)$$

但し、

$$\left. \begin{aligned} \lambda_{f,(e+d,(c+a,b))} &\equiv \frac{\lambda_f \{ \lambda_e + \lambda_{d,(c+a,b)} \}}{\lambda_f + \lambda_e + \lambda_{d,(c+a,b)}} \\ \lambda_{d,(c+a,b)} &\equiv \frac{\lambda_d (\lambda_c + \lambda_{a,b})}{\lambda_d + \lambda_c + \lambda_{a,b}} \end{aligned} \right\} \quad (14)$$

であり、

$$\lambda_{c,a,b} \equiv \frac{\lambda_c \lambda_{a,b}}{\lambda_c + \lambda_{a,b}} = \frac{1}{\frac{1}{\lambda_c} + \frac{1}{\lambda_a} + \frac{1}{\lambda_b}} \quad (15)$$

であるから(15)式において c, a, b の順序を変えてもよい。

(11)式は既に(4)節において求められている。(II)の場合は第4図と(11)式から判るように、(I)と同様な Y 字形流路として C', D, E の枝を考え $\lambda_{c'}$ の代りに $\lambda_c + \lambda_{a,b}$ を入れ、 $z_{c'}$ の代りに $\lambda_{a,b} \left(\frac{z_a}{\lambda_a} + \frac{z_b}{\lambda_b} \right)$ を入れればよい。(III)の場合も同様に Y 字形流路 E', F, G を考え E' に(II)の値を代入すればよい。

湧出口の高さがみな等しい場合には (II), (III) のいずれの場合にも z の値はこれらの値と等しくなる。

(6) 前節 (5) の (I) の場合, 分岐前の流量を V_c とし, 分岐後の湧出口の 1 つ例えば A 湧出口の湧出量を V_a とおけば (10) 式から次の関係が得られる。

$$V_a = \frac{z_b - z_a}{\lambda_a + \lambda_b} + \frac{\lambda_b}{\lambda_a + \lambda_b} V_c \tag{16}$$

全く同様にして, (II) の場合の最下端の流量 V_c と V_a との間には次の関係がある。

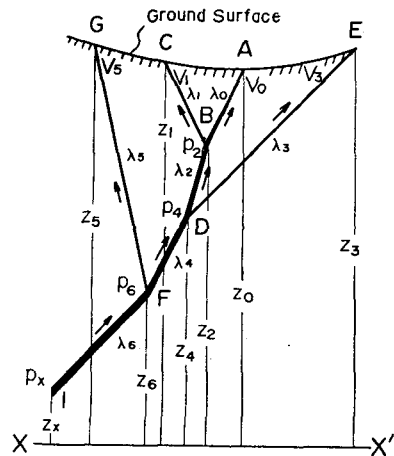
$$V_a = \frac{\lambda_b z_a + (\lambda_c + \lambda_d) z_b - (\lambda_b + \lambda_c + \lambda_d) z_a}{(\lambda_a + \lambda_b)(\lambda_{a,b} + \lambda_c + \lambda_d)} + \frac{\lambda_b}{(\lambda_a + \lambda_b)} \cdot \frac{\lambda_c}{(\lambda_{a,b} + \lambda_c + \lambda_d)} V_c \tag{17}$$

IV. 裂罅状温泉における湧出量変化の影響

1. 3本の支脈をもつ流路系における影響度

裂罅状温泉の湧出口相互間の影響を調べるために第5図に示したように地下における流路の分岐を仮定する。この図は前報⁴⁾第1図の模型と全く同じである。

図において ABDF は地表から地下深くまで連なっている温泉水の上昇流路の地表付近の一部であってそれに FG, DE, BC の支脈があり, 各枝の上端 A, C, E および G から温泉水がそれぞれ湧出量 V_0, V_1, V_3 および V_5 だけ地表にわき出しているものとする。FI はこれらの流路系と温泉水の本源 I とを結ぶ 1 本の流路である。各枝の流動抵抗係数を BA は λ_0 , BC は λ_1 , DB は λ_2 , DE は λ_3 , FD は λ_4 , FG は λ_5 , IF は λ_6 とする。分岐点 B, D, F および温泉水の本源 I における水圧をそれぞれ p_2, p_4, p_6 および p_x とし, 水圧は大気圧を 0 として測るものとする。高さの基準面としては任意の水平面 XX' を用い, A, C, B, E, D, G, F および I の高さをそれぞれ $z_0, z_1, z_2, \dots, z_6$ および z_x とおく。また, 温泉水の本源 I における水圧 p_x は一定であるとする。



第5図 問題の湧出口付近の地下流路の模型

Fig. 5. A schematic representation of underground network of hot water passages in the neighborhood of a certain orifice.

この流路系と本源とを結ぶ流路 IF は流動抵抗の異なる多くの流路の連結と考えられるが, この流動抵抗係数を λ_6 で代表させてもよいことは前章 2-(1) に述べた。地表付近の実際の流路が上記の模型より複雑であっても前章 2 節の (1)~(5) をこの模型に適用すれば, いくらかでも実際に近い場合を表現できるのであって, ここで上記の模型を採用することによって一般性は失なわれない。

前章 (6) 式をこの流路系に適用すれば

$$\text{流路 BA; } H_2 = z_0 + \lambda_0 V_0 \quad (18)$$

$$\text{流路 BC; } H_2 = z_1 + \lambda_1 V_1 \quad (19)$$

$$\text{流路 DB; } H_4 = H_2 + \lambda_2 (V_0 + V_1) \quad (20)$$

$$\text{流路 DE; } H_4 = z_3 + \lambda_3 V_3 \quad (21)$$

$$\text{流路 FD; } H_6 = H_4 + \lambda_4 (V_0 + V_1 + V_3) \quad (22)$$

$$\text{流路 FG; } H_6 = z_5 + \lambda_5 V_5 \quad (23)$$

$$\text{流路 IF; } H_x = H_6 + \lambda_6 (V_0 + V_1 + V_3 + V_5) \quad (24)$$

但し、

$$H_i \equiv z_i + \frac{P_i}{\gamma} \quad (25)$$

が得られる。

(18)~(24) 式から H_2 , H_4 , H_6 を消去すれば

$$\left. \begin{aligned} \lambda_0 V_0 - \lambda_1 V_1 &= z_1 - z_0 \\ \lambda_2 V_0 + (\lambda_1 + \lambda_2) V_1 - \lambda_3 V_3 &= z_3 - z_1 \\ \lambda_4 V_0 + \lambda_4 V_1 + (\lambda_3 + \lambda_4) V_3 - \lambda_5 V_5 &= z_5 - z_3 \\ \lambda_6 V_0 + \lambda_6 V_1 + \lambda_6 V_3 + (\lambda_5 + \lambda_6) V_5 &= H_x - z_5 \end{aligned} \right\} \quad (26)$$

となる。

連立方程式 (26) から V_0 , V_1 , V_3 および V_5 を求めると次式を得る。

$$V_0 = \frac{\left(\frac{\lambda_1}{\lambda_4}\right) \lambda_{4,5,6} \lambda_{3,(4+5,6)} \left(\frac{H_x}{\lambda_6} + \frac{z_5}{\lambda_5}\right) + \left(\frac{\lambda_1}{\lambda_3}\right) \lambda_{3,(4+5,6)} z_3}{(\lambda_0 + \lambda_1) (\lambda_{0,1} + \lambda_2 + \lambda_{3,(4+5,6)})} \quad (27)$$

$$V_1 = \frac{\left(\frac{\lambda_0}{\lambda_4}\right) \lambda_{4,5,6} \lambda_{3,(4+5,6)} \left(\frac{H_x}{\lambda_6} + \frac{z_5}{\lambda_5}\right) + \left(\frac{\lambda_0}{\lambda_3}\right) \lambda_{3,(4+5,6)} z_3}{(\lambda_0 + \lambda_1) (\lambda_{0,1} + \lambda_2 + \lambda_{3,(4+5,6)})} \quad (28)$$

$$V_3 = \frac{(\lambda_{0,1} + \lambda_2) \lambda_{5,6} \left(\frac{H_x}{\lambda_6} + \frac{z_5}{\lambda_5}\right) - (\lambda_{0,1} + \lambda_2 + \lambda_4 + \lambda_{5,6}) z_3 + \lambda_{0,1} (\lambda_4 + \lambda_{5,6}) \left(\frac{z_1}{\lambda_1} + \frac{z_0}{\lambda_0}\right)}{(\lambda_3 + \lambda_4 + \lambda_{5,6}) (\lambda_{0,1} + \lambda_2 + \lambda_{3,(4+5,6)})} \quad (29)$$

$$V_5 = \frac{(\lambda_3 + \lambda_4) (\lambda_{0,1} + \lambda_2 + \lambda_{3,4}) H_x - (\lambda_{0,1} + \lambda_2 + \lambda_3) (\lambda_{(0,1+2),3} + \lambda_4 + \lambda_6) z_5}{(\lambda_5 + \lambda_6) (\lambda_3 + \lambda_4 + \lambda_{5,6}) (\lambda_{0,1} + \lambda_2 + \lambda_{3,(4+5,6)})} + (\lambda_{0,1} + \lambda_2) \lambda_6 z_3 + \lambda_{0,1} \lambda_3 \lambda_6 \left(\frac{z_1}{\lambda_1} + \frac{z_0}{\lambda_0}\right) \quad (30)$$

すなわち、各湧出量はその湧出口の高さとは負の直線関係にあるが、その他の湧出口の高さおよび本源における水頭 H_x とは正の直線関係にある。換言すれば、湧出口が高くなるとその湧出量は減少し、他の湧出口の高さや本源の水圧が高くなると湧出量は増加する。

各分岐の直ぐ上流の流路における流量 V_2 , V_4 および V_6 は (27)~(30) 式から次の様になる。

$$V_2 = V_0 + V_1 = \frac{\left(\frac{\lambda_{4,5,6}}{\lambda_4}\right) \lambda_{3,(4+5,6)} \left(\frac{H_x}{\lambda_6} + \frac{z_5}{\lambda_5}\right) + \frac{\lambda_{3,(4+5,6)}}{\lambda_3} z_3 - \lambda_{0,1} \left(\frac{z_1}{\lambda_1} + \frac{z_0}{\lambda_0}\right)}{(\lambda_{0,1} + \lambda_2 + \lambda_{3,(4+5,6)}} \quad (31)$$

$$V_4 = V_0 + V_1 + V_3 = \frac{(\lambda_{0,1} + \lambda_2 + \lambda_3) \lambda_{5,6} \left(\frac{H_x}{\lambda_6} + \frac{z_5}{\lambda_5}\right) - (\lambda_{0,1} + \lambda_2) z_3 - \lambda_{0,1} \lambda_3 \left(\frac{z_1}{\lambda_1} + \frac{z_0}{\lambda_0}\right)}{(\lambda_3 + \lambda_4 + \lambda_{5,6}) (\lambda_{0,1} + \lambda_2 + \lambda_{3,(4+5,6)}} \quad (32)$$

$$V_6 = V_0 + V_1 + V_3 + V_5 = \frac{(\lambda_3 + \lambda_4 + \lambda_5) (\lambda_{0,1} + \lambda_2 + \lambda_{3,(4+5,6)}) H_x - (\lambda_{0,1} + \lambda_2 + \lambda_3) \times (\lambda_{(0,1+2),3} + \lambda_4) z_5 - \lambda_5 (\lambda_{0,1} + \lambda_2) z_3 - \lambda_{0,1} \lambda_3 \lambda_5 \left(\frac{z_1}{\lambda_1} + \frac{z_0}{\lambda_0}\right)}{(\lambda_5 + \lambda_6) (\lambda_3 + \lambda_4 + \lambda_{5,6}) (\lambda_{0,1} + \lambda_2 + \lambda_{3,(4+5,6)}} \quad (33)$$

すなわち、各分岐の直ぐ上流の流量はそれよりも上流で分岐した湧出口の高さ、または本源の水圧が高くなると増加するが、それより下流で分岐した湧出口の高さが高くなると減少する。

問題をもう少し具体的にするため、第5図において湧出口 A の高さ z_0 を人為的に段々高くしていくとしよう。但し、他の湧出口の高さは変化させないとする。自然湧出の場合は加工しない限り湧出口の高さは一定である。この場合には A の湧出量 V_0 は、(27) 式から判るように、しだいに減少し z_0 が次式で与えられる h_0 の値になると温泉の湧出は止つて了う。この h_0 を湧出口 A の静止水頭という。

$$h_0 = \frac{\left(\frac{\lambda_1}{\lambda_4}\right) \lambda_{4,5,6} \lambda_{3,(4+5,6)} \left(\frac{H_x}{\lambda_6} + \frac{z_5}{\lambda_5}\right) + \left(\frac{\lambda_1}{\lambda_3}\right) \lambda_{3,(4+5,6)} z_3 + (\lambda_2 + \lambda_{3,(4+5,6)}) z_1}{\lambda_1 + \lambda_2 + \lambda_{3,(4+5,6)}} \quad (34)$$

(34) 式を (27) 式に代入すると

$$V_0 = \frac{(\lambda_1 + \lambda_2 + \lambda_{3,(4+5,6)})}{(\lambda_0 + \lambda_1) (\lambda_{0,1} + \lambda_2 + \lambda_{3,(4+5,6)})} (h_0 - z_0) \quad (35)$$

となる。(35) 式は湧出口 A の高さ z_0 に対する湧出量 V_0 を与える式である。

(35) 式から z_0 を求めると

$$z_0 = h_0 - \frac{(\lambda_0 + \lambda_1) (\lambda_{0,1} + \lambda_2 + \lambda_{3,(4+5,6)})}{\lambda_1 + \lambda_2 + \lambda_{3,(4+5,6)}} V_0 \quad (36)$$

となる。 h_0 は z_0 を含まないから

$$\frac{\partial z_0}{\partial V_0} = - \frac{(\lambda_0 + \lambda_1) (\lambda_{0,1} + \lambda_2 + \lambda_{3,(4+5,6)})}{\lambda_1 + \lambda_2 + \lambda_{3,(4+5,6)}} \quad (37)$$

である。

湧出口 A の湧出量 V_0 を変化させたとき他の湧出口 C, E および G の湧出量 V_1 , V_3 および V_5 の変化は

$$\frac{\partial V_1}{\partial V_0} = \frac{\partial V_1}{\partial z_0} \frac{\partial z_0}{\partial V_0}, \quad \frac{\partial V_3}{\partial V_0} = \frac{\partial V_3}{\partial z_0} \frac{\partial z_0}{\partial V_0}, \quad \frac{\partial V_5}{\partial V_0} = \frac{\partial V_5}{\partial z_0} \frac{\partial z_0}{\partial V_0} \quad (38)$$

で表わされるから、(28)~(30) 式から $\frac{\partial V_1}{\partial z_0}$, $\frac{\partial V_3}{\partial z_0}$ および $\frac{\partial V_5}{\partial z_0}$ を求め、これらと (37) 式を (38)

式に代入すれば

$$\frac{\partial V_1}{\partial V_0} = - \frac{\lambda_2 + \lambda_{3,(4+5,6)}}{\lambda_1 + \lambda_2 + \lambda_{3,(4+5,6)}} \quad (39)$$

$$\frac{\partial V_3}{\partial V_0} = - \left(\frac{\lambda_1}{\lambda_1 + \lambda_2 + \lambda_{3,(4+5,6)}} \right) \left(\frac{\lambda_4 + \lambda_{5,6}}{\lambda_3 + \lambda_4 + \lambda_{5,6}} \right) \quad (40)$$

$$\frac{\partial V_5}{\partial V_0} = - \left(\frac{\lambda_1}{\lambda_1 + \lambda_2 + \lambda_{3,(4+5,6)}} \right) \left(\frac{\lambda_3}{\lambda_3 + \lambda_4 + \lambda_{5,6}} \right) \left(\frac{\lambda_6}{\lambda_5 + \lambda_6} \right) \quad (41)$$

を得る。 $\frac{\partial V_1}{\partial V_0}$, $\frac{\partial V_3}{\partial V_0}$ および $\frac{\partial V_5}{\partial V_0}$ を湧出口 C, E および G の湧出量に及ぼす湧出口 A の影響度と言う。

(39)~(41) 式から影響度について次の事柄が判る。

(1) (39)~(41) 式の右辺は流路の流動抵抗係数 λ だけの関数であり、 λ は温度が等しければその割れ目に固有な値であるから、 $\frac{\partial V_1}{\partial V_0}$, $\frac{\partial V_3}{\partial V_0}$, $\frac{\partial V_5}{\partial V_0}$ はそれぞれ異った一定値となる。したがって、湧出口 A の湧出量 V_0 が ΔV_0 だけ増加したために湧出口 C, E, G の湧出量 V_1 , V_3 , V_5 がそれぞれ ΔV_1 , ΔV_3 , ΔV_5 だけ減少したとすれば、 ΔV_1 , ΔV_3 , ΔV_5 は ΔV_0 に比例する。しかも、各流路の流動抵抗係数 λ は正の値であるから、影響度は 0 から -1 の間の値である。すなわち、 ΔV_1 , ΔV_3 , ΔV_5 は ΔV_0 よりも大きくなることはない。

(2) (39)~(41) 式から判るように、影響度は $\lambda_1/(\lambda_2 + \lambda_{3,(4+5,6)})$, $\lambda_3/(\lambda_4 + \lambda_{5,6})$ および λ_5/λ_6 の値によってきまるが、もしこれらの分子と分母とが同程度の値であれば、 $\left| \frac{\partial V_1}{\partial V_0} \right| > \left| \frac{\partial V_3}{\partial V_0} \right| > \left| \frac{\partial V_5}{\partial V_0} \right|$ という関係があり、この場合には A の流路からいくつか流路を隔てた湧出口群ほど湧出口 A の影響度の絶対値は小となる。遠い枝の湧出口群ほど水平距離が大きいであろうことは推察されることであるから、層状温泉の場合のように影響度が湧出口間の距離と密接な関係を示すことはないが、裂隙状温泉の場合にも、前報²⁾ 第 14 図に見られるように、遠く隔った湧出口群ほど平均して影響が小さいという傾向はあるはずである。

2. さらに複雑な場合への拡張

(1) 流路系の支脈が 1 本増加した場合

第 5 図の流路系をもう少し複雑にして流路系の下部流路 FI の中途の J から地表に達する支脈 JK を考え、その流動抵抗を λ_7 , FJ の流動抵抗を λ_6 , J から温泉水の本源 I までの流動抵抗を λ_8 とすれば、(39)~(41) 式から V_1 , V_3 , V_5 , V_7 に及ぼす V_0 の影響度は次のように推察される。

$$\left. \begin{aligned} \frac{\partial V_1}{\partial V_0} &= - \frac{\lambda_2 + \lambda_{3,(4-8)}}{\lambda_1 + \lambda_2 + \lambda_{3,(4-8)}} \\ \frac{\partial V_3}{\partial V_0} &= - \left(\frac{\lambda_1}{\lambda_1 + \lambda_2 + \lambda_{3,(4-8)}} \right) \left(\frac{\lambda_4 + \lambda_{5,(6-8)}}{\lambda_3 + \lambda_4 + \lambda_{5,(6-8)}} \right) \\ \frac{\partial V_5}{\partial V_0} &= - \left(\frac{\lambda_1}{\lambda_1 + \lambda_2 + \lambda_{3,(4-8)}} \right) \left(\frac{\lambda_3}{\lambda_3 + \lambda_4 + \lambda_{5,(6-8)}} \right) \left(\frac{\lambda_6 + \lambda_{7,8}}{\lambda_5 + \lambda_6 + \lambda_{7,8}} \right) \\ \frac{\partial V_7}{\partial V_0} &= - \left(\frac{\lambda_1}{\lambda_1 + \lambda_2 + \lambda_{3,(4-8)}} \right) \left(\frac{\lambda_3}{\lambda_3 + \lambda_4 + \lambda_{5,(6-8)}} \right) \left(\frac{\lambda_5}{\lambda_5 + \lambda_6 + \lambda_{7,8}} \right) \left(\frac{\lambda_8}{\lambda_7 + \lambda_8} \right) \end{aligned} \right\} \quad (42)$$

但し、繁雑を防ぐため次の記号を用いた。

$$\lambda_{3, \{4+5, (6+7, 8)\}} \equiv \lambda_{3, (4-8)} \tag{43}$$

すなわち、本流に支脈が何本あっても、上記の影響度は同様にして容易に求めることができる。

(2) 支脈がさらに増加する場合

第 II 章において、地表近くでは主な流路から小さい流路がいくつか分岐する場合が多いことを指摘した。いま、このような小枝が第 5 図の BA 流路の途中から分岐して BA が第 4 図 (I) に示した Y 字形流路になっている場合を考えよう。そして、 V_a を変化させた場合の V_b, V_1, V_3, V_5 への影響度を求めてみよう。

(42) 式において λ_8 を λ_6, λ_7 を λ_5, λ_6 を λ_4, λ_5 を λ_3, λ_4 を λ_2, λ_3 を λ_1, λ_2 を λ_c, λ_1 を λ_b, V_7 を V_5, V_5 を V_3, V_3 を V_1, V_1 を V_b, V_0 を V_a とおけば、 V_a が他湧出口に及ぼす影響度は

$$\left. \begin{aligned} \frac{\partial V_b}{\partial V_a} &= -\frac{\lambda_c + \lambda_{1, (2-6)}}{\lambda_b + \lambda_c + \lambda_{1, (2-6)}} \\ \frac{\partial V_1}{\partial V_a} &= -\left(\frac{\lambda_b}{\lambda_b + \lambda_c + \lambda_{1, (2-6)}}\right) \left(\frac{\lambda_2 + \lambda_{3, (4-6)}}{\lambda_1 + \lambda_2 + \lambda_{3, (4-6)}}\right) \\ \frac{\partial V_3}{\partial V_a} &= -\left(\frac{\lambda_b}{\lambda_b + \lambda_c + \lambda_{1, (2-6)}}\right) \left(\frac{\lambda_1}{\lambda_1 + \lambda_2 + \lambda_{3, (4-6)}}\right) \left(\frac{\lambda_4 + \lambda_{5, 6}}{\lambda_3 + \lambda_4 + \lambda_{5, 6}}\right) \\ \frac{\partial V_5}{\partial V_a} &= -\left(\frac{\lambda_b}{\lambda_b + \lambda_c + \lambda_{1, (2-6)}}\right) \left(\frac{\lambda_1}{\lambda_1 + \lambda_2 + \lambda_{3, (4-6)}}\right) \left(\frac{\lambda_3}{\lambda_3 + \lambda_4 + \lambda_{5, 6}}\right) \left(\frac{\lambda_6}{\lambda_5 + \lambda_6}\right) \end{aligned} \right\} \tag{44}$$

となる。(44) の下 3 式と (39)~(41) 式とを比較し、且つ

$$\frac{\partial V_i}{\partial V_a} = \frac{\partial V_i}{\partial V_0} \cdot \frac{\partial V_0}{\partial V_a} \quad \text{但し, } i = 1, 3, 5, \dots \tag{45}$$

であることに留意すれば

$$\frac{\partial V_0}{\partial V_a} = \frac{\lambda_b}{\lambda_b + \lambda_c + \lambda_{1, (2-6)}} \tag{46}$$

であることが判る。

(3) 第 5 図において BC, DE, FG 等の支脈が第 4 図 (I), (II), (III) のように地表に達する分岐した枝を持つ場合を考え、その湧出口の 1 つ、例えば a の枝の湧出量 V_a に対する第 5 図 BA の枝の湧出量 V_0 の変化による影響度を考えてみよう。

(I), (II), (III) の場合、これらの下端の流量をそれぞれ V_a, V_c, V_g とすれば、これらの影響度は

$$\left. \begin{aligned} \left| \frac{\partial V_a}{\partial V_0} \right|_I &= \frac{\partial V_a}{\partial V_c} \cdot \frac{\partial V_c}{\partial V_0} \\ \left| \frac{\partial V_a}{\partial V_0} \right|_{II} &= \frac{\partial V_a}{\partial V_c} \cdot \frac{\partial V_c}{\partial V_0} \\ \left| \frac{\partial V_a}{\partial V_0} \right|_{III} &= \frac{\partial V_a}{\partial V_g} \cdot \frac{\partial V_g}{\partial V_0} \end{aligned} \right\} \tag{47}$$

で与えられる。然るに第 III 章 2-(6) により

$$\left. \begin{aligned} \frac{\partial V_a}{\partial V_c} &= \frac{\lambda_b}{\lambda_a + \lambda_b} \\ \frac{\partial V_a}{\partial V_e} &= \left(\frac{\lambda_b}{\lambda_a + \lambda_b} \right) \left(\frac{\lambda_d}{\lambda_{a,b} + \lambda_c + \lambda_d} \right) \\ \frac{\partial V_a}{\partial V_g} &= \left(\frac{\lambda_b}{\lambda_a + \lambda_b} \right) \left(\frac{\lambda_d}{\lambda_{a,b} + \lambda_c + \lambda_d} \right) \left(\frac{\lambda_f}{\lambda_{(a,b+c),d} + \lambda_e + \lambda_f} \right) \end{aligned} \right\} \quad (48)$$

となる。 V_a, V_e, V_g は第 5 図の BC, DE または FG 等支脈の湧出量 V_1, V_3, V_5 等のいずれであつてもよいが、例えば DE の枝について考えれば、(47) 式中の $\frac{\partial V_c}{\partial V_0}, \frac{\partial V_e}{\partial V_0}$ および $\frac{\partial V_g}{\partial V_0}$ には (40) 式で示される $\frac{\partial V_3}{\partial V_0}$ の値を用いればよい。

3. 一般的構造の場合の影響度

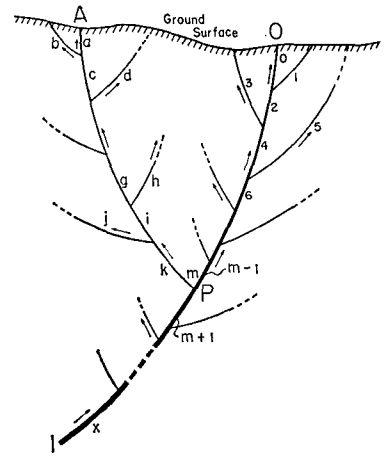
以上の結果を総合して第 6 図に示した一般的な模型について影響度を求めることにする。図中 AO は地表、I は温泉水の本源、 x を I に最も近い流路とし、I から x を経て上昇する温泉水は途中で分流しながら P において PO と PA に分岐し、この 2 つの流れはさらに上昇の途中図に示した様に分流して、結局それぞれ O および A から地表に湧出量 V_0 および V_a で流出するものとする。流路 IPO およびその支脈は湧出口 O から数えて 0, 1, 2, 3, ..., $m-1, m, m+1, \dots, x$ なる番号の幹の流路と支脈から成立っている。但し、 m は奇数、 x は偶数で、偶数は幹の流路、奇数は支脈である。支脈 m はその湧出口 A から IPO 流路との分岐点 P まで各流路とその支脈に図の様に a, b, c, ..., h, i, j, k の順の番号をつける。また、各流路の流動抵抗係数 λ にはその流路の番号を付けて表わし、分岐点 P における支脈 m の流量を V_m とおく。

いま、湧出口 O の湧出量 V_0 を変化させたとし、それが湧出口 A に及ぼす影響度 $\frac{\partial V_a}{\partial V_0}$ を求めることにする。

$$\frac{\partial V_a}{\partial V_0} = \frac{\partial V_a}{\partial V_m} \frac{\partial V_m}{\partial V_0} \quad (49)$$

であるが、 $\frac{\partial V_m}{\partial V_0}$ および $\frac{\partial V_a}{\partial V_m}$ はそれぞれ (42) 式および (48) 式から次のように推察される。

$$\begin{aligned} \frac{\partial V_m}{\partial V_0} &= - \left(\frac{\lambda_1}{\lambda_1 + \lambda_2 + \lambda_{3,(4-x)}} \right) \left(\frac{\lambda_3}{\lambda_3 + \lambda_4 + \lambda_{5,(6-x)}} \right) \dots \\ &\dots \left(\frac{\lambda_{m-2}}{\lambda_{m-2} + \lambda_{m-1} + \lambda_{m,(m+1-x)}} \right) \left(1 - \frac{\lambda_m}{\lambda_m + \lambda_{m+1} + \lambda_{m+2,(m+3-x)}} \right) \end{aligned} \quad (50)$$



第 6 図 1 流路系における温泉本源 I と湧出口 O および A との連絡経路の一般形

Fig. 6. A general model of passages connecting the origin of hot springs in the locality I and the orifices O and A.

$$\frac{\partial V_a}{\partial V_m} = \left(\frac{\lambda_b}{\lambda_b + \lambda_a} \right) \left(\frac{\lambda_c}{\lambda_c + \lambda_e + \lambda_{b,a}} \right) \cdots \left(\frac{\lambda_h}{\lambda_h + \lambda_g + \lambda_{f,(e-a)}} \right) \left(\frac{\lambda_j}{\lambda_j + \lambda_i + \lambda_{h,(g-a)}} \right) \quad (51)$$

但し、 λ_m は (11)~(13) 式から判るように

$$\lambda_m = \lambda_k + \lambda_{j,(i-a)} \quad (52)$$

である。したがって、(50) 式と (51) 式との積として影響度 $\frac{\partial V_a}{\partial V_0}$ は求められる。(50), (51) 式の各項の分母中の例えば $\lambda_{3,(4-2)}$ は x の値が大きいと非常に大きい値となるように見えるが左様ではない。 $\lambda_{(4-2)}$ の値が λ_3 よりも大であると、第 III 章 2-(2) に述べたように、 $\lambda_{3,(4-2)}$ は λ_3 に等しいか λ_3 よりも小である。

以上の結果から影響度について次の事柄が推論される。

(1) (50) 式および (51) 式の括弧内は一般に 1 より小さい正の値であるから、これらを多く掛け合せた影響度の絶対値は 1 よりもかなり小となる。

(2) もし、支脈 m の各枝の湧出口の高さを皆等しいと考え、各幹および各枝の流量 V にその枝の番号を付けて表わすものとする。この場合には、(51) 式は (16), (17) 式から次のように書くことができる。

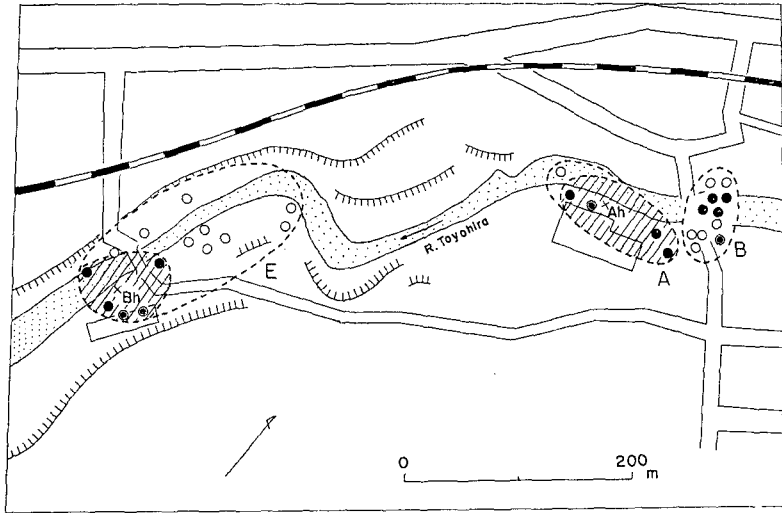
$$\frac{\partial V_a}{\partial V_m} = \frac{V_a}{V_c} \cdot \frac{V_c}{V_e} \cdots \frac{V_g}{V_i} \cdot \frac{V_i}{V_k} = \frac{V_a}{V_k} = \frac{V_a}{V_m} \quad (53)$$

すなわち、支脈 m では、湧出量の大きい湧出口ほど $\frac{\partial V_a}{\partial V_m}$ が大きくなり、したがって V_0 の変化に対する影響度 $\frac{\partial V_a}{\partial V_0}$ は大きくなる。

(3) 本章 1-(2) において、湧出口 O から支脈 m の分岐点 P の深さは、常識的にその間の分岐数が多いほど大きく、P の深さが大きいほど OA 間の水平距離も大きいと考えられるので、相互間の水平距離の大きい温泉群ほどその相互影響度が小さい傾向があることを述べた。しかしながら、(53) 式から推察されたように、支脈 m から湧出する温泉群の湧出口の内、その湧出量の大きいものほど影響度が大きい傾向もあるから、裂隙状温泉における影響度と距離との関係は、層状温泉の場合におけるような明瞭な関係は見られないであろう。

4. 実 例 (定山溪温泉における影響度)

第 7 図は第 1 図に示した定山溪温泉湧出口の内、A, B および E 温泉群の湧出口の分布図である。他の湧出口の揚湯を全部停止させた状態において 1 つずつの湧出口から pump による揚湯を行なった場合に、A 温泉群の A_h 湧出口と E 温泉群の B_h 湧出口について静止水頭の低下が測定された。このことについては前報²⁾ に詳細に報告されている。 A_h および B_h 湧出口については湧出量と湧出口の高さとの関係も明かにされているので、測定された静止水頭の低下から、これらの湧出口が自然湧出の状態にある場合の湧出量の減少は求められる。このようにして、湧出口 A_h または B_h 付近の他の湧出口において停止状態からある量の揚湯を行なったために生じた A_h または B_h の湧出量の減少から影響度を計算した。



第7図 定山溪温泉において A_h および B_h 付近の湧出口の湧出量を変化させた場合、湧出口 A_h および B_h に及ぼす影響度 c の分布。二重丸、黒丸および白丸はそれぞれ $c > \frac{1}{500}$, $\frac{1}{500} > c > \frac{1}{5000}$ および $\frac{1}{5000} > c$ の場合を示す。

Fig. 7. Distribution of the interference coefficient at the orifice A_h or B_h in the Jozankei hot spring due to the change of volume output of any other orifice in the neighborhood of A_h or B_h . Double, black and white circles are respectively the orifice of which coefficient c shows a value in the extents $c > \frac{1}{500}$, $\frac{1}{500} > c > \frac{1}{5000}$ and $\frac{1}{5000} > c$.

その結果、定山溪温泉の場合は影響度が極めて小で最大 8.4×10^{-3} に過ぎなかった。図中に、 A_h および B_h の位置を掛印で、影響度が 2×10^{-3} 以上の場合に揚湯した湧出口を二重丸で、影響度が 0.2×10^{-3} 以上で 2×10^{-3} 以下の場合には黒丸で、影響度が 0.2×10^{-3} 以下の場合には白丸で示した。

図から判るように、A, E 両温泉群共に静止水頭の測定個所に近接した湧出口で揚湯を行なうと影響度は比較的大きいが、同じ群では離れた枝では影響度が小である。一般に、離れた群ではほとんど影響は見られないが、 A_h の場合に見られるように隣りの B 温泉群の一部で影響度がやや大きくなっているのは、地下における割れ目の構造がこの部分は A 群と密接な関係を持つためであろう。B 群において白丸の中にただ1つ二重丸が見られるが、この湧出口の揚湯量が定山溪温泉で最大を示し 1500 l/min に及んでいることから、この比較的大きい影響度の原因は本章 3-(3) に述べたことに帰せられると思う。

V. 1 温泉地域の温泉全般への影響、特に温泉の枯渇現象について

前章では裂隙状温泉において掘削により新温泉を生じたとき、または1湧出口の湧出量を pumping により増加させたとき他の湧出口の湧出量にどんな減量がおこるかについて論じた。

このような影響は局部的である。この章においては、このような事柄とその重複がこの地域の全温泉に与える影響について考察しよう。

1. その温泉地域の全湧出量に及ぼす影響

まず、第5図の流路系について考える。温泉水の本源からこの温泉地域地下の流路系に通ずる通路IFの流量を Q とおけば、 Q はこの温泉地域の全温泉の湧出量の合計であって、この図の場合には

$$Q = V_0 + V_1 + V_3 + V_5 \tag{54}$$

となる。(54)式の V_1, V_3, V_5 を V_0 で表わすこととし、(28), (29), (30)式の z_0 に(27)式を代入したものを(54)式に入れると次式を得る。

$$Q = B + \left(\frac{\lambda_1}{\lambda_1 + \lambda_2 + \lambda_{3,(4-6)}} \right) \left(\frac{\lambda_3}{\lambda_3 + \lambda_4 + \lambda_{5,6}} \right) \left(\frac{\lambda_5}{\lambda_5 + \lambda_6} \right) V_0 \tag{55}$$

但し、 B は H_x, z_1, z_3, z_5 のほか各流路の流動抵抗係数 λ を含む常数である。

いま、湧出口 O の高さ z_0 を下げて湧出量を ΔV_0 だけ増加させたとき総湧出量が ΔQ だけ増したと考えれば、(55)式から

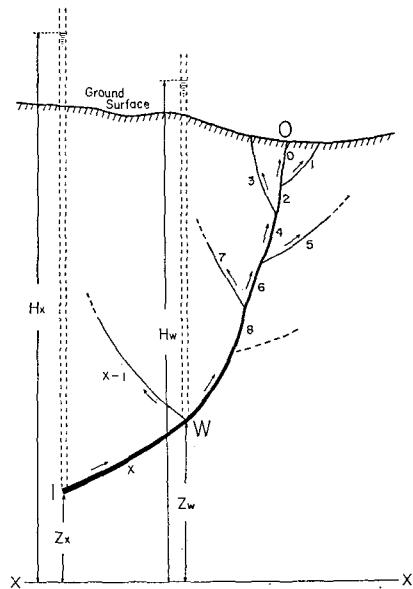
$$\Delta Q = \left(\frac{\lambda_1}{\lambda_1 + \lambda_2 + \lambda_{3,(4-6)}} \right) \left(\frac{\lambda_3}{\lambda_3 + \lambda_4 + \lambda_{5,6}} \right) \left(\frac{\lambda_5}{\lambda_5 + \lambda_6} \right) \Delta V_0 \tag{56}$$

を得る。

いま、第5図の場合を拡張して第8図のように一般的な場合を考え、図のように温泉の本源に通ずる流路を O の湧出口から順次に番号を付けて x とする。 O から x に通ずる本流から分岐する支脈の数は $x/2$ となる。但し、 x は偶数である。この場合、(56)式は次のようになる。

$$\Delta Q = \left\{ \prod_{s=1}^{x/2} \left(\frac{\lambda_{2s-1}}{\lambda_{2s-1} + \lambda_{2s} + \lambda_{(2s+1), (2s+2 \rightarrow x)}} \right) \right\} \Delta V_0 \tag{57}$$

すなわち、(56)式または(57)式において()内は1より小さい正の値であるから、湧出口 O の湧出量が ΔV_0 だけ増加すれば、その地域の総湧出量は増加し、温泉の本源からその地域に供給される温水量も増加する。しかし、その増加量は ΔV_0 より小である。この現象は V_0 の変化に対してだけでなく、他の湧出量 V_1, V_3, \dots に対しても同様である。この関係は(33)式によって伺うことができる。しかし、その比例常数は各場合で異なる。



第8図 地下流路の一般的模型

Fig. 8. A general model of the underground conduit system.

湧出口 O を除いた他の湧出口の湧出量の総量の変化を $\Delta Q'$ とすれば

$$\Delta Q' = \Delta Q - \Delta V_0 = - \left[1 - \left\{ \prod_{s=1}^{z/2} \left(\frac{\lambda_{2s-1}}{\lambda_{2s-1} + \lambda_{2s} + \lambda_{(2s+1), (2s+2 \rightarrow z)}} \right) \right\} \right] \Delta V_0 \quad (58)$$

であり、[] 内は 1 より小さい正の値となるから湧出口 O が ΔV_0 増量すれば他の湧出量の総量は減少する。しかし、その減量の絶対値は ΔV_0 より小である。

2. 地域全温泉の水圧に及ぼす影響

まず、1 温泉地域の地下に第 5 図に示した流路系を考え、この地域の温泉はすべて図の流路から湧出するものとする。温泉水の本源 I および本源に最も近い分岐点 F における水頭は基準水平面 XX' から測ってそれぞれ H_x および H_6 である。流路 FI における流量、すなわちこの温泉地域に湧出する総湧出量を Q とすれば (24) 式から

$$H_6 = H_x - \lambda_6 Q \quad (59)$$

が得られる。

ここで、第 8 図に示した一般的な流路系を考え、この地域に湧出する温泉水流路の最深分岐点 W と温泉水の本源 I における水頭を基準面 XX' から測った値を図のように H_w および H_x とし、流路 IW の流動抵抗係数を λ_x とすれば、(59) 式と全く同様に

$$H_w = H_x - \lambda_x Q \quad (60)$$

を得る。

H_6 または H_w はこの地域の温泉水頭を代表していると考えられ、 H_x は一定と考えられるから、この地域の任意の湧出口 (単数でも複数でもよい) の湧出量が増加すればする程、すなわち総湧出量が増加すればする程、水頭 H_w は低下する。W 点における流管の基準面からの高さを z_w 、流管中の水圧を p_w とすれば、(25) 式から判るように

$$H_w = z_w + \frac{p_w}{\gamma} \quad (61)$$

であるから水頭 H_w の低下はこの地域全温泉の水圧 p_w の低下を意味する。

1 つの湧出口における増量のための水頭 H_w の低下は小さいものであるが、このような湧出量の増加が多くの湧出口で起ると、その地域全般の温泉水圧すなわち水頭の低下は顕著になり、最初自噴していた温泉もみな自噴しなくなり、強力な pump の使用により水頭はさらに低下するであろう。本州の温泉地ではこの低下が地下 100 m にも及んでいる所があるが、温泉の開発に伴い多少の差はあってもこの低下はどの温泉でも起っているのである。この現象が著しい場合、これを温泉の枯渇と言っている。

被圧層状温泉の研究において筆者¹⁾ は温泉の枯渇係数と枯渇進行度を定義したが、裂罅状温泉の場合には (60) 式において λ_x が枯渇係数であり、 $(H_x - H_w)$ すなわち $\lambda_x Q$ が枯渇進行度に当る。

例えば、はじめ湧出口 O の湧出量が V_0 であった所、この湧出量を ΔV_0 だけ増加させたため地域の総湧出量 Q は ΔQ だけ増加した場合には、 ΔV_0 と ΔQ との関係は (57) 式で与えられる。この際、水頭 H_w が ΔH_w だけ変化したとすれば、(60) 式から

$$\Delta H_w = -\lambda_x \Delta Q \tag{62}$$

$$\therefore \Delta H_w = -\lambda_x \left\{ \prod_{s=1}^{x/2} \left(\frac{\lambda_{2s-1}}{\lambda_{2s-1} + \lambda_{2s} + \lambda_{(2s+1), (2s+2-x)}} \right) \right\} \Delta V_0 \tag{63}$$

となり、 ΔV_0 の増加により水頭 H_w には (63) 式で与えられる水頭低下が起る。

地域の総湧出量 Q は容易に測定されるから枯渇係数 λ_x が求められれば枯渇進行度 ($H_x - H_w$) はすぐ計算される。

(60) 式における水頭 H_w を実測することは困難であるから、それに代るべき量として1つの湧出口、例えば湧出口 O の静止水頭の高さ h_0 を考える。湧出口に管を連結して立て洩水しないようにすれば管中に水が上昇して水位が h_0 の高さに至って静止する。この水位が静止水頭である。

第5図について考えれば、 h_0 は (34) 式で表わされる。(26) の下3式に $V_0=0$ とおけば

$$\left. \begin{aligned} z_1 &= H_x - (\lambda_1 + \lambda_2 + \lambda_4 + \lambda_6) V_1 - (\lambda_4 + \lambda_6) V_3 - \lambda_6 V_5 \\ z_3 &= H_x - (\lambda_4 + \lambda_6) V_1 - (\lambda_3 + \lambda_4 + \lambda_6) V_3 - \lambda_6 V_5 \\ z_5 &= H_x - \lambda_6 V_1 - \lambda_6 V_3 - (\lambda_5 + \lambda_6) V_5 \end{aligned} \right\} \tag{64}$$

であるから、(64) 式を (34) 式に代入すれば

$$h_0 = H_x - (\lambda_2 + \lambda_4 + \lambda_6) V_1 - (\lambda_4 + \lambda_6) V_3 - \lambda_6 V_5 \tag{65}$$

が得られる。

これを一般化するため、第8図の場合について考えれば h_0 は次式で与えられる。

$$h_0 = H_x - \sum_{i=1}^{x/2} \left(\sum_{s=i}^{x/2} \lambda_{2s} \right) V_{2i-1} \quad \text{但し、} i \text{ は正の整数} \tag{66}$$

h_0 , H_x は基準水平面 XX' から測った水頭の高さであるが、基準面の位置は何ら制約がないので、これを湧出口 O を通る水平面とすれば、 h_0 は測定可能である。

湧出口 O としてはその地域内の他の温泉から少し離れた単独の湧出口を選ぶ方がよい。定山溪温泉の場合を例にとると、第1図または第2図の湧出口 D を O にとり、C 温泉群の湧出量の合計を V_1 , AB 両温泉群の湧出量の合計を V_3 , E 温泉群の湧出量の合計を V_5 とすれば、O における静止水頭 h_0 と V_1 , V_3 , V_5 との関係は (65) 式で与えられる。ここで h_0 , V_1 , V_3 , V_5 は測定可能な量であり、 H_x , λ_2 , λ_4 , λ_6 は未知ではあるが常数であるから、人為的に V_1 , V_3 , V_5 の湧出量を4回変化させて、それらに対応する h_0 の値を測定すれば、これらの値を (65) 式に代入して得られる4組の式から H_x , λ_2 , λ_4 , λ_6 が求められる理である。

さらに複雑な流路系の場合には (65) 式の代りに (66) 式を用いて同様の操作を行なえばよい。

VI. 総括および結語

北海道において温泉のおよそ半数は裂隙状温泉であって岩石の割れ目から地表に湧出するか、あるいはそれに近い状態で湧出している。このような裂隙状温泉において1湧出口の湧出量を増量させたり、新しい温泉の掘削により湧出量が増加した場合に、他の湧出量に及ぼす影響を知ることは必要であり、さらに多くの新温泉の増加、または多くの湧出口での湧出量の増加に伴う枯渇現象の研究も大切である。筆者は前報⁴⁾において岩石の割れ目中の温泉水または地下水の流動について研究を行なったので、この理論を応用して裂隙状温泉の影響度と枯渇現象について本論文において論議したのである。

本論文の結果を総括すれば次の様である。

(1) 裂隙状温泉における地下流路の構造は、第2図に1例として定山溪温泉の場合を掲げたが、樹枝状の流路系をなしている。

(2) 第6図に示した一般的な流路構造において、湧出口Aに及ぼす湧出口Oの湧出量変化の影響度 $\frac{\partial V_a}{\partial V_0}$ は(49)式および(50)、(51)式で表わされる。この影響度は湧出口Oから支脈 m を経て湧出口Aまでの流路の分岐数が多い程小となる。また、支脈 m の各流路の湧出口の高さがみな等しいとすれば、支脈 m から湧出する温泉群の湧出口の内、湧出量の大きいもの程影響度が大きい。

(3) 湧出口Oの湧出量を $4V_0$ だけ増加したとき、その流路系の総湧出量は $4Q$ だけ増加するが、その値は(57)式で与えられる。しかし、 $4Q$ は $4V_0$ より小である。

(4) 第8図に示した一般的な流路系の最深分岐点における静止水頭 H_w は総湧出量 Q が増加すると減少する。その関係は(60)式で与えられる。 H_w の低下はこの地域全温泉の水圧低下を意味する。1つの湧出口における増量のための H_w の低下は小さいが、このような湧出量の増加が多くの湧出口でおこると、全般的水圧低下が顕著となり、いわゆる温泉の枯渇が生ずるのである。

(5) H_w の低下を直接測ることは困難であるが、1つの湧出口、例えばOにおける静止水頭 h_0 とその地域のすべての湧出量を何回か測定すれば、原理的には H_w の変化を求め得るはずである。

7. A Theoretical Study on Discharge Interference and Drain of Hot Springs Discharging from a System of Underground Fracture Network.

By Takaharu FUKUTOMI

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

One half of the total number of hot springs in Hokkaido belongs to those of the fracture discharge type. In previous paper, the writer studied on flow of water through fracture network in underground rocks. Applying this result to a hot spring system of fracture type in a locality, he discussed theoretically, in this paper, on the effect of the change of volume output at a hot spring orifice upon the discharge from the other orifices and the general pressure decrease of the hot spring locality. The results are summarized as follows:

(1) The underground conduit system in a hot spring locality is a dendritic form. For an example, the underground network of Jozankei hot springs is shown in Fig. 2.

(2) In the general underground conduit system shown in Fig. 6, effect of the change of volume output at an orifice O upon any other orifice A is expressed by the equations (49), (50) and (51). Larger the total number of junctions in a passage from the orifice O to the orifice A, smaller the interference coefficient $\left(\frac{\partial V_a}{\partial V_0}\right)$. And if the heights of all orifices belonged to a tributary m are equal in each other, larger the volume output from an orifice, bigger the interference coefficient of the orifice.

(3) If volume output of an orifice O is increased by ΔV_0 , the total volume output in the same underground conduit system rises ΔQ and its amount is given by the equation (57). But, the value of ΔQ is always smaller than that of ΔV_0 .

(4) The hydraulic head H_w at the deepest junction in a general conduit system shown in Fig. 8 decreases with the rise of the total volume output Q discharged from all of the orifices in the system as indicated by the equation (60). The depletion of H_w means the decrease of pressure of all hot springs in the locality. The decrease of pressure due to the increase of volume output at an orifice is small. But, if the increase of volume output is occurred at many orifices, the decrease of pressure becomes conspicuous.

(5) It may be difficult to measure directly the depletion of H_w , but it is possible theoretically to estimate the depletion by observing the changes of the hydraulic head h_0 at a certain orifice O with the changes of the respective volume output at all of the orifices in the same system.