

温泉の流動と賦存

—温泉開発の影響に関する考察—

京都大学理学部地球物理学研究施設

由佐 悠 紀

General Aspect of Changes in Hydraulic Head, Chemical Content and Temperature of Hot Spring Water Due to Development of Withdrawal

Yuki YUSA

Geophysical Research Station, Kyoto University

1. はじめに

地下水の賦存量が「ある区域内における利用しうる地下水の総量」と定義されているように(山本, 1966), 地下水の賦存あるいは賦存量とは, それを利用するという立場からみた, 地下水のありかたと量に関する概念である。ここで, 「利用しうる総量」という定義には「望ましくない結果を生じさせることなく採取できる総量」という精神が込められており, いわゆる安全揚水量(safe yield) (Todd, 1959)に通ずるものである。そして, もともとは, ある地下水層を通過する平均年流量, 言い換えれば, 自然状態における平均的な年涵養量(または年流出量)に等しい量という意味であったように思われる(山本, 1953)。

地下水の一種である温泉水を採取する際にも, 通常の地下水の場合と同様に, 温泉水位の低下をはじめとする, 望ましくない現象が起こる。温泉水は多量の化学成分を含み, また, 高温であるがゆえに, 冷地下水の混入による影響などは, むしろ顕著に現れやすい。温泉開発にともなって, 温泉水位(湧出量を含む)・泉質・泉温など, 温泉の三要素に現れる変化は, 利用上不都合なことが多く, 温泉枯渇現象と総称されてきた。近年では, 地熱開発が周辺温泉に及ぼす影響も危惧されている。

温泉枯渇現象については, 福富(1966, 1967)の水理学的研究, 甘露寺ら(1975)の事例解析などがあり, また甘露寺(1978)は総合報告を行っている。最近, 由佐(1984 a, b)は, 別府温泉における塩化物イオン濃度の低下を水理的に解析し, 高地部における高温水採取の影響であることを指摘した。

以上のような研究はあるものの, 温泉開発の影響に関する考察が十分になされているとは言いがたく, また, 開発の事前調査は何を標的にすればよいのかも, 必ずしも明らかではないようである。こうした実情は, 温泉がローカルの特色に富み, 採取状態・泉質・泉温などは千差万別で, 一般的な取扱いは非常にむずかしい, という観念が支配的なためかもしれない。

しかし, これまでに報告された事例によれば(環境庁, 1978; 甘露寺, 1978など), 温泉枯渇の

ありかたは、浅層地下水や海水など他水系との交流の度合に大きく左右されているように思われる。そこで、本課題では、温泉水系の簡単なlumped parameter modelを用いて、温泉の賦存と開発による影響の関係を考察し、温泉の適正採取量を評価するための指針を探りたい。温泉の場合は、通常の地下水に比べて、泉質・泉温に関する考察がよりいっそう重要となるのは、もちろんである。

2. 温泉水系のモデルと解析

地熱開発等による深い掘さく調査データが集積するにつれ、多くの地熱・温泉地域の地下深所には、熱水だまりの存在が明らかとなった。得られた資料や多くの研究者の考えをまとめた地熱・温泉系の模式図を図1に示す。解析は、これを簡略化した図2のlumped parameter modelを用いて行う。

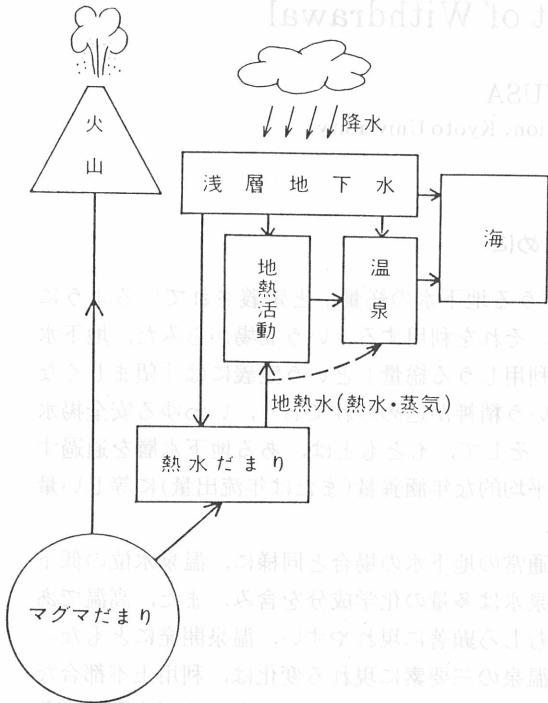


図1 温泉生成機構の模式図

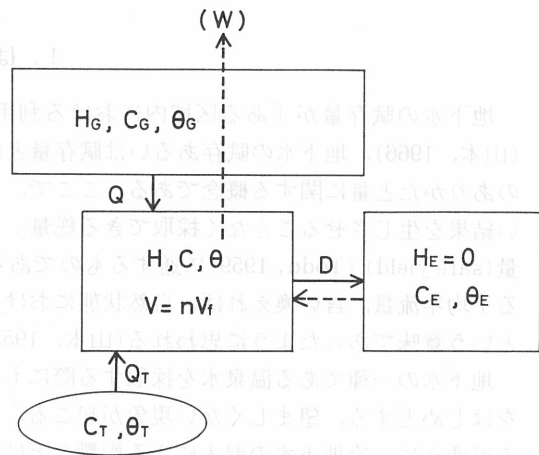


図2 解析に用いるlumped parameter model
(記号は本文参照)

温泉開発前の自然状態では、深所の熱水層から温泉水層へ、濃度 C_T ・温度 θ_T の熱水が一定量 Q_T 供給され、一方、浅層地下水層からは濃度 C_G ・温度 θ_G の地下水が浸透し、両者が混合して濃度 C ・温度 θ の温泉水となって系外へ流出しているとしよう。このとき、浅層からの浸透量 Q_G は浅層地下水位 H_G と温泉水位 H の差に比例し、系外への流出量 D は温泉水位 H と系外の水位 H_E に比例すると仮定して、次のように表わす。なお、解析の際には簡単のために、系外の水位を基準に選り $H_E = 0$ と置く。

$$\left. \begin{aligned} Q_G &= B(H_G - H), \\ D &= K(H - H_E) \\ &= KH, \text{ ただし } H_E = 0 \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

ここに、 B と K は定数である。 D は先述の賦存量に相当する。 また、熱水・温泉水・浅層地下水の密度と比熱はすべて等しいものとみなし、熱伝導による熱の逸散は無視する。

2-1 温泉水位の低下

温泉を開発し、一定量 W で連続して採取するものとする。 これにより温泉水位 H のみが影響を受け、 $Q_T \cdot H_G \cdot H_E (= 0)$ は不変とすれば、無次元化した温泉水位低下量 H^* は次のように表される。

$$H^* \equiv \frac{\Delta H}{H_0} = \frac{\varepsilon}{1+\eta} (1 - e^{-\alpha t}) \quad (2)$$

ここに、 H_0 は初期の温泉水位、 ΔH は時間 t における水位低下量であり、パラメーター ε 、 η および α は、それぞれ次のような内容をもつ。

$$\varepsilon = W/D, \quad \eta = B/K, \quad \alpha = (1+\eta) \cdot K/S \quad (3)$$

S は温泉水層全体としての貯留係数である。

もし H^* が1より小ならば、温泉水位は系外の水位より高い状態にとどまっているので、温泉水は下流系外へと流出している。 H^* が1を越えると、温泉水位は系外の水位より低下していることになり、下流から温泉水層へ向かう逆流が生ずる。

さて、 ε は賦存量に対する採取量の比である。これを開発率と呼ぼう。 η は温泉水層への水の供給と流出の度合を表現する水理定数である。たとえば、この値が大きいほど、温泉水位の低下に対して、浅層地下水層からの水の補給がすみやかに対応することを意味する。すなわち、温泉水の補償状態に関係するので、補償係数と名付けることにする。

α は、水位低下速度、または定常に達するまでの時間を規定するパラメーターである。これを構成する定量 K 、 S 、 η は温泉水層毎にまちまちの値を待つので、定常に達するまでの時間もまた、まちまちである。しかし、多くの場合、水位低下はかなり早く、比較的短時間のうちに定常状態となるようである(由佐, 1984 a)。たとえば、ここで取扱っているのと類似のモデルによって計算された別府温泉の例によれば、数日程度で定常に達することが示されている(由佐, 1984 b)。

定常状態の水位低下量 H_∞^* は、(2)式より次のようになり、 ε と η のみによって決まる。

$$H_\infty^* = \frac{\varepsilon}{1+\eta} \quad (4)$$

すなわち、 H_∞^* は開発率 ε に比例して大きく、補償係数が大きいほど小さい。もし η が十分に大きいと、自然状態での賦存量を越える採取($\varepsilon > 1$)が行われても、水位低下は目立たないことになる。したがって、水理的な面だけに注目すれば、 η の値が大きい温泉水層ほど優れていると言えそうである。しかし、後に述べるように、温泉における事情は、それほど簡単ではない。

また(4)式より、下流系外から温泉水層への逆流の有無に関する指標が次のように得られる。

(i) $\varepsilon < 1 + \eta$: 温泉水層から下流系外へ流出。

(ii) $\varepsilon = 0$: 流出量 0。

(iii) $\varepsilon > 1 + \eta$: 下流系外から温泉水層へ逆流。

2-2 泉質(化学成分濃度)の変化

泉質と泉温については、下流系外からの逆流の有無によって、取扱いを変えねばならない。また、化学成分としては、地層との間にほとんど交換を起さないであろう塩化物イオンなどを想定する。

水位変化に代表される地下水理状態の変化速度に比べ、化学成分濃度の変化は一般にかなり遅い。したがって、化学成分濃度変化を考えると、温泉水層中に存在する温泉水量の時間変化の直接的効果は無視されてよいであろう(由佐, 1984 b)。そうすれば、このモデルにおける無次元化した濃度 C^* の変化は、次のように表される。

(A) $\epsilon \leq 1 + \eta$: 逆流しない場合

$$\left. \begin{aligned} C^* &\equiv \frac{C - C_G}{C_0 - C_G} = \frac{1}{1 + \eta + \eta \epsilon} \cdot (1 + \eta + \eta \epsilon e^{-\beta_1 t}), \\ \beta_1 &\equiv \frac{1 + \eta + \eta \epsilon}{\tau(1 + \eta)} \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

ここに、 C_0 は初期の濃度、 C は時間 t における濃度、 C_G は浅層地下水の濃度である。 C^* は、もちろん、 $0 \leq C^* \leq 1$ の値をとる。 τ は自然状態における温泉水の平均滞留時間で、次のような内容をもつ。

$$\tau = V/D \quad (6)$$

ここに、 V は温泉水層中に存在する温泉水の体積、 D は賦存量である。

(B) $\epsilon > 1 + \eta$: 下流系外から逆流する場合

$$\left. \begin{aligned} C^* &= \frac{1}{\epsilon} \left[1 + \left(\frac{\epsilon}{1 + \eta} - 1 \right) \cdot C_E^* + \left\{ \epsilon - 1 - \left(\frac{\epsilon}{1 + \eta} - 1 \right) \cdot C_E^* \right\} \cdot e^{-\beta_2 t} \right], \\ \beta_2 &\equiv \epsilon / \tau, \quad C_E^* \equiv (C_E - C_G) / (C_0 - C_G) \end{aligned} \right\} \quad (7)$$

ここに、 C_E は下流系外に分布する水の濃度である。もし、系外の水が海水のように高濃度のものであれば、 C^* は1を越えて増加する。 $C_E = C_G$ の場合には、次のように簡単な関係となる。

$$C^* = \frac{1}{\epsilon} \cdot \{ 1 + (\epsilon - 1) \cdot e^{-\beta_2 t} \} \quad (8)$$

2-3 泉温の変化

泉温には、温泉水層を構成する固体部分に蓄えられた熱が関係する。ここでは簡単のため、温泉水と固体部分は常に等温と仮定し、また、地下での温度と泉温は等しいものとみなす。

(A) $\epsilon \leq 1 + \eta$: 逆流しない場合

無次元化した泉温 θ^* の変化は、次のように表される。

$$\left. \begin{aligned} \theta^* &\equiv \frac{\theta - \theta_G}{\theta_0 - \theta_G} = \frac{1}{1 + \eta + \eta \epsilon} \cdot (1 + \eta + \eta \epsilon e^{-\gamma_1 t}), \\ \gamma_1 &\equiv \frac{n \rho c}{(1 - n) \rho_r c_r + n \rho c} \cdot \beta_1 \end{aligned} \right\} \quad (9)$$

ここに、 θ_0 は初期の泉温、 θ は時間 t における泉温、 θ_G は浅層地下水の水温、 ρc は温泉水の熱容量、 $\rho_r c_r$ は固体部分の熱容量、 n は空隙率である。(9)式は前出(5)式と同一形式であり、 β_1 が γ_1 に置き換えられているだけである。

(B) $\epsilon > 1 + \eta$: 下流系外から逆流する場合

この場合も、化学成分に関する(7)式と同形式となり、次のように表される。

$$\left. \begin{aligned} \theta^* &= \frac{1}{\epsilon} \left[1 + \left(\frac{\epsilon}{1 + \eta} - 1 \right) \cdot \theta_E^* + \left\{ \epsilon - 1 - \left(\frac{\epsilon}{1 + \eta} - 1 \right) \cdot \theta_E^* \right\} \cdot e^{-\gamma_2 t} \right], \\ \gamma_2 &\equiv \frac{n \rho c}{(1 - n) \rho_r c_r + n \rho c} \cdot \beta_2, \\ \theta_E^* &\equiv (\theta_E - \theta_G) / (\theta_0 - \theta_G) \end{aligned} \right\} \quad (10)$$

ここに、 θ_E は下流系外の水温である。

$\theta_E = \theta_G$ のときは、簡略化されて、

$$\theta^* = \frac{1}{\epsilon} \cdot \{ 1 + (\epsilon - 1) \cdot e^{-r_2 t} \} \quad (11)$$

3. 水位・濃度・泉温の変化の比較

3-1 時間変化の例

温泉開発にともなう温泉の三要素の変化は、どのような順序で現れ、その度合はどの程度であるのか、ということが温泉開発における重大な関心事のひとつである。前節に述べた関係式は、理想化されたモデルから求められたものであり、それらを現実の系にそのままあてはめるは適当でないかもしれない。しかし、上記の問題に対する目安にはなり得るであろう。ここでは、 $C_E = C_G$ 、 $\theta_E = \theta_G$ 、 $\eta = 1$ という簡単な場合につき、 $\epsilon = 0.5$ としたときの各量の変化を調べよう。この例では、 $\epsilon < 1 + \eta$ であるから、下流系外からの逆流はない。したがって、用いる式は、(2)、(5)、(9)である。水位変化に関する(2)式に含まれる水理定数としては、かなり現実性のある値、 $K/S = 0.2 \text{ day}^{-1}$ を与える。また、泉温の計算に必要な定数は、 $\rho c = 1 \text{ cal/cm}^3 \cdot \text{C}$ 、 $\rho_r c_r = 0.5 \text{ cal/cm}^3 \cdot \text{C}$ および $n = 0.1$ とする。濃度と泉温に関係する平均滞留時間 τ の値は、別府温泉南部域の扇状地帯において、7.8年と見積られた例があるが(由佐, 1984b)、これまであまり調べられていないようである。今後、各温泉地での値が見積られることを期待したい。ここでは、別府温泉程度の規模を想定して、 $\tau = 10$ 年と与える。

図3は、その計算結果である。なお、図の縦軸には各無次元量とともに(左側の軸)、 $C_0 = 260 \text{ mg/l}$ 、 $\theta_0 = 65^\circ\text{C}$ 、 $C_G = 10 \text{ mg/l}$ 、 $\theta_G = 15^\circ\text{C}$ としたときの次元量 C と θ を右側の軸に目盛りしてある。

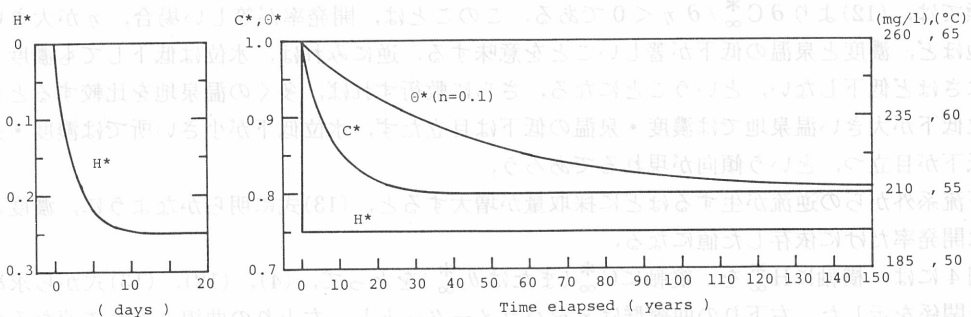


図3 温泉開発にともなう無次元の水位 H_∞^* 、化学成分濃度 C_∞^* および泉温 θ_∞^* の変化

例. 計算条件: $\epsilon = 0.5$, $\eta = 1.0$, $\tau = 10$ 年, $n = 0.1$, $\rho c = 1 \text{ cal/cm}^3 \cdot \text{C}$, $\rho_r c_r = 0.5 \text{ cal/cm}^3 \cdot \text{C}$. 右の縦軸は $C_0 = 260 \text{ mg/l}$, $\theta_0 = 65^\circ\text{C}$, $C_G = 10 \text{ mg/l}$, $\theta_G = 15^\circ\text{C}$ としたときの次元量。

水位は急速に低下するので、左側の図に時間を拡大して描いたが、わずか10日程度で定常値にまで低下している。一方、濃度はゆるやかに低下し、定常値になるまでに20~30年を要する。泉温の低下は空隙率が小さいほど遅れるが、 $n = 0.1$ の場合には100年を過ぎてようやく定常値に達するほど、非常にゆっくりと低下する。

次元量を見れば、濃度は10年以内に、明らかな低下を検出できると思われる。一方、泉温は、

30年を経てもなお60℃のレベルを保っており、泉温の低下はあまり注意を引かないであろう。しかし、きわめてゆっくりとではあるが、低下し続ける。もちろん、濃度と泉温の低下は平均滞留時間 τ に大きく左右され、 τ が小さいと、もっと早く定常に達する。

このように、温泉の三要素に現れる影響は、時間的に大きくずれる。このことは、温泉を開発するに当たり、水理的な面だけの検討は危険であり、泉質と泉温の変化を考慮した長期展望が必要なことを示している。

3-2 定常状態

この節では、浅層地下水と下流系外の水が同濃度・同温、すなわち $C_E^* = \theta_E^* = 0$ の場合につき、定常状態における水位(H_∞^*)・濃度(C_∞^*)・泉温(θ_∞^*)を比較する。パラメーターは ϵ と η のみとなり、 H_∞^* は前出(4)式で、また、 C_∞^* と θ_∞^* は次のように同一の式で表される。

(A) $\epsilon \leq 1 + \eta$: 逆流しない場合

$$C_\infty^* = \theta_\infty^* = (1 + \eta) / (1 + \eta + \eta \epsilon) \quad (12)$$

(B) $\epsilon > 1 + \eta$: 下流系外から逆流する場合

$$C_\infty^* = \theta_\infty^* = 1 / \epsilon \quad (13)$$

まず、基本的特徴を調べよう。上記(12)、(13)ともに、 $\partial C_\infty^* / \partial \epsilon < 0$ 、また(4)式より $\partial H_\infty^* / \partial \epsilon > 0$ である。したがって、ある温泉地では、採取量が増えるほど、水位・濃度・泉温の低下が大きくなる。これは、ごく常識的な結果である。

次に η の効果をみよう。(4)式より $\partial H_\infty^* / \partial \eta < 0$ である。したがって、開発率が等しい温泉地を比べると、 η が大きいほど水位低下の割合は小さい。一方、下流系外から逆流が生じない状態では、(12)より $\partial C_\infty^* / \partial \eta < 0$ である。このことは、開発率が等しい場合、 η が大きい温泉地ほど、濃度と泉温の低下が著しいことを意味する。逆にみれば、水位は低下しても濃度・泉温はさほど低下しない、ということになる。さらに敷衍すれば、多くの温泉地を比較するとき、水位低下が大きい温泉地では濃度・泉温の低下は目立たず、水位低下が小さい所では濃度・泉温の低下が目立つ、という傾向が現れるであろう。

下流系外からの逆流が生ずるほどに採取量が増大すると、(13)式に明らかなように、濃度と泉温は開発率だけに依存した値になる。

図4には、横軸に H_∞^* を、縦軸に C_∞^* (または θ_∞^*)をとって、(4)、(12)、(13)式から求められた関係を示した。右下りの曲線群は η をパラメーターとし、右上りの曲線とそれに連なる水平な直線群は ϵ をパラメーターとしている。 $H_\infty^* > 1$ は、下流系外からの逆流が生じている範囲である。

図は複雑であるが、先に述べた基本的特徴が読み取れるであろう。なお、浅層地下水層からの補給量には限度があると考えられるので、 ϵ が大きくなると、このこと(具体的には、浅層地下水位の低下)も考慮した考察が必要となる。

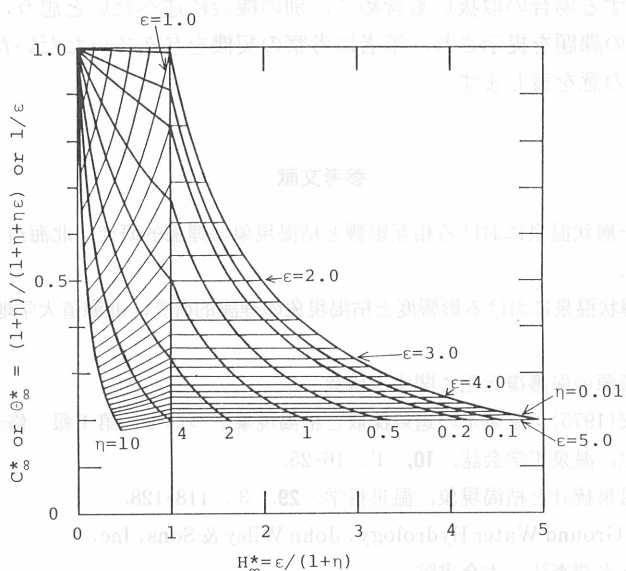


図4 定常状態における無次元の水位 H_{∞}^* と化学成分濃度 C_{∞}^* (または泉温 θ_{∞}^*)の関係。

$H_{\infty}^* > 1$ は下流系外から逆流する範囲。

4. おわりに

地下深所から上昇する熱水と浅層から浸透する地下水との混合によって温泉水が形成されるといふ見解は、一般的に受け入れられているように思われる。本課題では、この見解を簡単なモデルによって表現し、それを用いて、温泉開発にともなう温泉三要素の変化を調べ、その結果を解説した。変化の様相は、次のように要約される。

- (1) 温泉三要素の変化は、水位(湧出量)、化学成分濃度、泉温の順に現れる。水位変化は短時間のうちに現れるのに対し、濃度と泉温の変化はゆっくりと進行する。泉温の変化は、とくに緩慢である。
- (2) 三要素の変化の度合の間には、水位低下が大きいと濃度・泉温の低下は小さく、逆に、水位低下が小さいと濃度・泉温の低下は大きい、という裏腹な現象が生ずる。

したがって、温泉の開発は水理的・化学的・熱的観点から検討されねばならず、また、長期展望が必要である。とくに、泉質と泉温の変化はゆるやかであるから、影響の有無を判断するに当たっては、長期にわたる観測と慎重な考慮が要求される。

温泉資源評価のための調査は、次のような量の見積りを目指すべきである。()中の記号は本文中で用いたものである。

- ・ 温泉水の賦存量(自然状態における流量)(D)
- ・ 温泉水の平均滞留時間(τ)
- ・ 温泉水層の空隙率(n)
- ・ 浅層地下水との水理的交流に関する定数(B)
- ・ 温泉水層からの流出に関する水理定数(K)
- ・ 温泉水層の貯留係数(S)

本文中に記した各関係式は、いずれも今回導出したものである。その導出過程については、温

