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), 地下水の賦存量あるいは賦存量とは、それを利用するという立場から見た、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、ある地下水層を通す平均年流量、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を採取する際にも、通常の地下水の場合と同様に、温泉湧水の低下をはじめとする、望ましくない現象が起こる。温泉湧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)の氷理学的研究、甘露寺ら(1975)の事例解析などがあり、また冷泉寺(1978)は総合報告を行っている。最近、由佐(1984a, 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難く、また、開発の事前調査は何を標的にすればよいか、必ずしも明らかではないようである。こうした実情は、温泉がローカル的な特色に富み、採取状態・泉質・泉温は千差万別で、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のかかもしれない。

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ってみたい。温泉水の場合は、通常の地下水に比べて、泉質・泉温に関する考察がより重要となるのはもちろんである。

2. 温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け、多くの地熱・温泉地域の地下深層には、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集めた地熱・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

温泉水生成前の自然状態では、深層の熱水層から温泉水層へ、濃度Cの濃度θの熱水が一定量Q供给され、一方、浅層地下水層からは濃度Cの濃度θの地下水が浸透し、両者が混合して濃度C・濃度θの温泉水となって系外へ流出している。このとき、浅層からの浸透量Qは浅層地下水位H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の比例と仮定して、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びH=0と仮定。

\[
Q = B (H_0 - H), \\
D = K (H - H_E) \quad (1)
\]

ただし、\(H_E=0\)
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。これに温泉水位Hのみが影響を受け、QT・H0・H8（＝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。

\[ H^* = \frac{\Delta H}{H_0} = \frac{\varepsilon}{1 + \eta} (1 - e^{-\alpha t}) \]  

ここに、H0は初期の温泉水位、\( \Delta H \)は時間tにおける水位低下量であり、パラメーター\( \varepsilon, \eta \)および\( \alpha \)は、それぞれ次のような内容をもつ。

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

Sは温泉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、\( \varepsilon \)は賦存量に対する採取量の比である。これを発開率と呼ぶ。\( \eta \)は温泉水層への水の供給と流出の度合を表す水理定数である。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、温泉水の補給状態に関係するので、補給係数と名付けることにする。

\( \alpha \)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。これを構成する定数K、S、\( \eta \)は温泉水層毎にまちまちの値をつけるので、定常で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ことがある（由佐, 1984 a）。たとえば、ここで取扱っている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、\( \varepsilon \)と\( \eta \)のみによって決まる。

\[ H^*_{\infty} = \frac{\varepsilon}{1 + \eta} \]  

すなわち、H*∞は開発率\( \varepsilon \)に比例して大きく、補給係数が大きいほど小さい。もし\( \eta \)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、\( \eta \)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と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き、温泉水流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。

\[ C* = \frac{C - C_0}{C_0 - C_G} = \frac{1}{1 + \eta + \eta \varepsilon} \cdot \left( 1 + \eta + \eta \varepsilon e^{-\beta_1 t} \right) \]

\[ \beta_1 = \frac{1 + \eta + \eta \varepsilon}{1 + \eta} \]

ここに、C₀は初期の濃度、Cは時間tにおける濃度、C₀は清水水の濃度である。C*は、もちろん、0 ≤ C* ≤ 1の値をとる。\( \tau \)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。

\[ \tau = V / D \]

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) \( \varepsilon > 1 + \eta \): 下層系外から逆流する場合

\[ C* = \frac{1}{\varepsilon} \left[ 1 + (\frac{\varepsilon}{1 + \eta} - 1) \cdot C*_{E} + \{ \varepsilon - 1 - (\frac{\varepsilon}{1 + \eta} - 1) \cdot C*_{E} \} e^{-\beta_2 t} \right] \]

\[ \beta_2 = \frac{\varepsilon}{\tau} \]

\[ C* = \left( C_E - C_0 \right) / \left( C_0 - C_G \right) \]

ここに、\( C_E \)は下流系外に分布する水の濃度である。もし、系内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。

\[ C* = \frac{1}{\varepsilon} \left( 1 + (\varepsilon - 1) e^{-\beta_2 t} \right) \]

\section*{2-3 温泉の変化}

温泉には、温泉水流を構成する固体部分に蓄えられた熱が関係する。ここでは簡単なため、温泉水と固体部分は常に等温と仮定し、また、地下での温度と温泉は等しいものとみなす。

(A) \( \varepsilon \leq 1 + \eta \): 逆流しない場合

無次元化した温泉\( \theta^* \)の変化は、次のように表される。

\[ \theta* = \frac{\theta - \theta_G}{\theta_G - \theta_0} = \frac{1}{1 + \eta + \eta \varepsilon} \cdot \left( 1 + \eta + \eta \varepsilon e^{-\tau_1 t} \right) \]

\[ \tau_1 = \frac{1}{\eta + \eta \varepsilon} \]

ここに、\( \theta_0 \)は初期の温泉、\( \theta \)は時間tにおける温泉、\( \theta_G \)は清水水の水温、\( \rho c \)は温泉水の熱容量、\( \rho c_r \)は固体部分の熱容量、\( n \)は空隙率である。\( \theta^* \)は前式（5）式と同一形式であり、\( \beta_1 \)が\( \tau_1 \)に置き換えられているだけである。

(B) \( \varepsilon > 1 + \eta \): 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）式と同じ形式となり、次のように表される。

\[ \theta* = \frac{1}{\varepsilon} \left[ 1 + (\varepsilon - 1) \cdot \theta^*_{E} + \{ \varepsilon - 1 - (\varepsilon - 1) \cdot \theta^*_{E} \} e^{-\tau_2 t} \right] \]

\[ \tau_2 = \frac{1}{\varepsilon} \]

\[ \theta^*_{E} = (\theta_E - \theta_0) / (\theta_0 - \theta_G) \]

ここに、\( \theta_E \)は下流系外の水温である。
\[ \theta_E = \theta_0 \] のときは，簡略化されて，
\[ \theta^* = \frac{1}{e} \cdot \{ 1 + (e - 1) \cdot e^{-\gamma c t} \} \]  
(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の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，
\[ C_E = C_0, \theta_E = \theta_0, \eta = 1 \] という簡単な場合に着目，\( \varepsilon = 0.5 \)としたときの各量の変化を調べよう。この例では，\( \varepsilon < 1 + \eta \)であるから，下流系からの逆流はない。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，かなり実測値である値，K/S=0.2day^{-1}を与える。また，泉温の計算に必要な定数は，\( \rho = 1 \text{cal/cm}^3 \cdot ^\circ \text{C}, \rho c = 0.5\text{cal/cm}^3 \cdot ^\circ \text{C} \)および\( n = 0.1 \)とする。濃度と泉温に関する平均滞留時間\( \tau \)の値は，別府温泉南部地の扇状地表において，7.8年と見積まれた例があるが（田中，1984 b），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まれることを期待したい。ここでは，別府温泉の規模を想定して，\( \tau = 10 \text{年} \)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），\( C_0 = 260\text{mg/l}, \theta_0 = 65^\circ \text{C}, C_0 = 10\text{mg/l}, \theta_0 = 15^\circ \text{C} \)としたときの次元量\( C \)と\( \theta \)を右側の軸に目盛ってある。

図3 溫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\( \theta^* \)の変化

例：計算条件：\( \varepsilon = 0.5, \eta = 1.0, \tau = 10 \text{年}, n = 0.1, \rho c = 1\text{cal/cm}^3 \cdot ^\circ \text{C}, \rho c = 0.5\text{cal/cm}^3 \cdot ^\circ \text{C} \)の右の縦軸は\( C_0 = 260\text{mg/l}, \theta_0 = 65^\circ \text{C}, C_0 = 10\text{mg/l}, \theta_0 = 15^\circ \text{C} \)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Tに大きく左右され、T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∞ = θ∞ = 0 の場合について、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) \( \varepsilon \leq 1 + \eta \): 逆流しない場合
\[
C^\infty = \theta^\infty = (1 + \eta) / (1 + \eta + \eta \varepsilon)
\]  (12)

(B) \( \varepsilon > 1 + \eta \): 下流系外から逆流する場合
\[
C^\infty = \theta^\infty = 1 / \varepsilon
\]  (13)

まず、基本的特徴を調べよう。上記（12）、（13）ともに、\( \partial C^\infty / \partial \varepsilon < 0 \)、また（4）式より\( \partial H^\infty / \partial \eta < 0 \)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、水位は低下しない濃度・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）式に明らかのように、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\( H^\infty \)を、縦軸に\( C^\infty \)（または\( \theta^\infty \）をとって、（4）、（12）、（13）式から求められた関係を示した。右下の曲線群は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\( H_\infty^* \)と化学成分濃度\( C_\infty^* \)（または泉温\( T_\infty^* \））の関係。
\( H_\infty^* > 1 \)は下流系外から逆流する範囲。

4. おわりに

地下深層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が形成されるという見解は、一般的に受け入れられているように思われる。本論では、この見解を簡単なモデルによって表現し、それを用いて、温泉開発にもなる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) 三要素の変化的度合の間には、水位低下が大きいと濃度・泉温の低下が小さく、逆に、水位低下が小さいと濃度・泉温の低下が大きい、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もりを目指すべきである。

- 温泉水の貯存量（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
泉開発が徐々に進行する場合の取扱いも含めて、別の機会に述べたいと思う。

終わりに当り、この課題を提示され、筆者に考察の契機を与えられた本学会と村上悠紀雄会長、特に感謝の意を表します。

参考文献

福富孝治（1966）：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，北海道大学地球物理学研究報告，15，33-48。

福富孝治（1967）：裂隙状温泉における影響度と枯渇現象の理論的研究，北海道大学地球物理学研究報告，17，65-83。

環境庁（1978）：温泉資源の保護復元化に関する研究

甘露寺泰雄，益子安（1973）：温泉源の選別採取と枯渇現象について，第1報，修善寺温泉における適正な採取量の推定，温泉工学会誌，10，1，16-25。

甘露寺泰雄（1978）：温泉統計と枯渇現象，温泉科学，29，3，118-128。


山本正敏（1953）：地下水調査法，古今書院。

山本正敏（1966）：水資源ハンドブック（安芸，多田共編），朝倉書店。

由佐悠治（1984）：温泉水採取における地表下階層水系の変化1，漏れのある被圧下地下水層における水位低下の進展，温泉科学，34，2，45-56。

由佐悠治（1984）：同上2（別府温泉南部域における塩素イオン濃度の低下と地下湯水源層の水理的特性，温泉科学，34，3，92-104。