

温泉の揚水影響に関する一考察

吉 川 恭 三、 山 下 幸 三 郎

(京都大学理学部地球物理学研究所)

(昭和34年11月11日受理)

1. ま え が き

温泉にかぎらず地下水一般について揚水の影響ということがさかんに問題とされるようになって来た。ここで用いる揚水という言葉はポンプを用いて水を汲みあげることだけに限らず、新しく井戸を掘つて水を自噴させることも含み、ともかく現状以上に多量の採水を始めるすべての施設を総称するものとする。この問題は温泉地や工場地域で新しい揚水をどの程度におさえねばならないかという実際上の要求から生れて来たものであるが、之に充分な解答を与える科学的方法となると非常にむづかしい。一般に温泉や地下水で地下にかつて埋蔵されたものを使いつくしていくというのはそのごく一部の量が殆どは年々新に生成されていると考えるのが妥当であろう。したがって、その供給量が分ればそれとつり合う採水量を以てその地域の採水可能限界とすることが出来るわけであるが、この量を見出すことは全く困難な仕事であり又、この供給量もその地域について一定というわけではなく採水量の変化につれて変動する場合がある。例えば、温泉水強化の一策として赤湯(山形)城崎(兵庫)道後(愛媛)の諸温泉で、地下に人工的に水を浸透させる方法を取り成功したと言われているから、川の近くで揚水するとか堰をつくるとかにより地表水として流れ去るべき水量の一部を地下に浸透させ温泉供給量を増加させることも可能な場合がある。このように考える時、採水量を増して地下水位を低めることは、地表水又は地下水としてその地域からむだに流れ去つて行く水を採水して有益な資源として活用すると言う点に意味があるとしなければならない。しかし、地下を流れ去つて行くはずの温泉水を揚水により呼び戻すことの有益な点は言うまでもないが、新にその地域に流入して来る温泉水についてはその量に限度があることが当然考えられ、又、たといその流入が若干増加しても其以上の冷地下水が流れこんで来るようなことがあれば、温度の低下のために温泉としては役立たないことになってしまう恐れがある。

このような問題をとくにはその道程に実に難問が山積して容易には決論に到達出来ない。この論文ではこの問題に近づく一手段として、現在の総採湯量は温泉水の供給可能限度以下で地下水圧勾配に比例した量だけは常にその地域に流入して来る状態にあり、多数の採水井戸を含む沖積層中の透水層に対してただ種類の温泉水のみが供給されている場合を取扱う。このように簡単化された場合にも揚水の影響を考えるには尚種々な問題を含んでいる。

2. 揚水影響についての基本的な考え方

先述したように井戸から揚水することはむだに流れ去っていた温泉水を採水して活用すると言う地下資源開発に第一の意義を持つている。その点から、揚水影響を論じる場合にはその地域で採水・利用される温泉水の総量がどれだけ増加するかをまず考えねばならない。他に井戸のない地域で Q の量の揚水を開始すればその地域での採水量が Q の増加をすることは言うまでもないが、他に井戸のある場合、新しい揚水はそのような出量を減少させて総採水量の増加は Q に達しない。この現象を説明するため、最も簡単な場合として他に一つだけの井戸が自噴している海岸地下水層を取り扱う。

海岸線を $y = 0$ にとりそこでは水位は一定に保たれているとして、 y 方向に無限に続く地下水層中を温泉水が勾配 α で流動して $y = 0$ で海中に流れ去つていくとする。 $x = 0$ 、 $y = a$ に q の量を自噴している半径 r_w の井戸があり、そのゆう出口での水圧を海水面からの淡水柱の高さ h で表わす。このとき $x = l$ 、 $y = m$ 、に Q の揚水を行い、充分時間が経過して定常状態になつた後に先の井戸からのゆう出量が q' にまで減少したとする。

今、この透水層の透水量係数を T とすると、揚水開始前における任意点 (x, y) での水圧 p は次式で与えられる。

$$p = \frac{q}{4\pi T} \log \frac{x^2 + (y-a)^2}{x^2 + (y+a)^2} + \alpha y$$

この井戸の井戸壁での水圧は h であるから、

$$h = \frac{q}{2\pi T} \log \frac{r_w}{2a} + \alpha a \dots\dots\dots(1)$$

揚水開始後には (x, y) における水圧は二つの井戸からの影響を共に受けて p' に変わり、

$$p' = \frac{q'}{4\pi T} \log \frac{x^2 + (y-a)^2}{x^2 + (y+a)^2} + \frac{Q}{4\pi T} \log \frac{(x-l)^2 + (y-m)^2}{(x-l)^2 + (y+m)^2} + \alpha y$$

自噴井戸では、ゆう出水位はそのまま変らぬ故、

$$h = \frac{q'}{2\pi T} \log \frac{r_w}{2a} + \frac{Q}{4\pi T} \log \frac{l^2 + (a-m)^2}{l^2 + (a+m)^2} + \alpha a \dots\dots\dots(2)$$

(1)から(2)を引くことにより

$$q - q' = \frac{Q}{2} \frac{\log \frac{l^2 + (a-m)^2}{l^2 + (a+m)^2}}{\log \frac{r_w}{2a}} \dots\dots\dots(3)$$

このようにして揚水の影響による他の自噴井戸でのゆう出量の減少が求められるが、ここで注意されることはこのような場合の揚水影響は井戸半径と各井戸のその地域における位置関係のみにて定まり、一般に地下水層の重要な性質として考えられている透水量係数 T には無関係なことで、 T は揚水量に対して井戸水位がどれだけ低下するかと言うような水量と水位との関係については重要な係数であるがこのように水量のみの関係を表わす場合には含まれて来ない。

(3)式で、一般に自噴井戸と揚水井戸とはある程度離れているから、 $q - q'$ は当然 Q よりも小さい。その差だけの水量が、従来海へ逃げ去つていたものを呼びもどしてこの地域で利用出来るようになったことになり、この差が大きい程、無駄に逃げるものを生かして使うと言う揚水本来の意味からは新しい揚水の効果が大きいと言える。

(3)式をみると、井戸が唯一の場合でもかなり複雑な計算が必要なが分り、之が多数の井戸を含む問題となればこのように一つ一つの井戸について考えてゆくことは非常に困難で、定量的な正確さはいささか欠くとしてももつと簡単な方法が望ましい。

著者はこの見地から、井戸密集地域においては各井戸からのゆう出量を平均して透水層の到る所から水のゆう出があると言う状態におきかえて揚水影響を解析する方法を提案し、その数理的方法については他論文で発表した。ここでは簡単にその結果のみに重点をおき、むしろ定性的に揚水影響に含まれるいろいろな問題を考えることにする。

3. 井戸密集地域における揚水影響の解析

かつて、野満等³⁾は別府温泉の各ゆう出口で水のゆう出する水位を変化さすことにより次の関係が成立することを知った。

$$q = c (H - h) \dots\dots\dots(4)$$

Hは温泉水頭と言われ、人工的にゆう出を止めた場合にその井戸で温泉水の上昇し得る高さ、hはゆう出する水位、qはゆう出量で、cは各ゆう出口についての常数と考えられた。他で揚水を行つたために各井戸での温泉水頭がH'に低下し、ゆう出量もq'に減少したとすると、その時c、hはそのまま変化がなく次の関係が成立するであろう。

$$q - q' = c (H - H') \dots\dots\dots(5)$$

すなわち、ゆう出量の変化は温泉水頭の変化に比例する。

考える地域一帯に一樣な井戸が密集して、新たな揚水により各単位面積毎に温泉水圧の低下sに比例したゆう出量の減少bsが起り、その比例常数bもまた一樣と仮定される時、揚水開始後の定常状態について、揚水井戸に向う流量が揚水前にくらべ各単位面積毎にbsづつ増加すると考えて、次の方程式の得られることは既に示した。

$$\frac{d}{dr} \left(2\pi r T \frac{ds}{dr} \right) - 2\pi r b s = 0 \dots\dots\dots(6)$$

ここでrは揚水井戸よりの距離である。

ほゞ円形の地域の境界で水の供給や流出が行われていてその水圧は揚水の影響を受けず揚水前と同じに保たれる場合に、その地域のほぼ中央での揚水による他の井戸への影響を考える。この境界を $r=r_c$ とすると、そこで $s=0$ という条件の下に、(6)式から $r=0$ でQの揚水を行つた場合を考えればよい。以上の解析は揚水前の状態に対する比較についてのみなされるのであるから、境界のどの部分で水の供給・流出が行われているかを考える必要は無く、又、揚水前にくらべての流出量の減少はこの地域へそれだけ供給量が増したという考えにおきかえることが出来る。

rの距離での地下水圧低下量は K_0 、 I_0 という0階のベッセル函数を用いて次のように求められる。⁴⁾

$$s = \frac{Q}{2\pi T} \left[K_0 \left(\sqrt{\frac{b}{T}} r \right) - K_0 \left(\sqrt{\frac{b}{T}} r_c \right) \cdot I_0 \left(\sqrt{\frac{b}{T}} r \right) / I_0 \left(\sqrt{\frac{b}{T}} r_c \right) \right]$$

この時、この地域のすべての井戸からゆう出する水量の総和は次の量だけ減少する。

$$\int_0^{r_c} 2\pi r b s dr = Q \left\{ 1 - \frac{1}{I_0 \left(\sqrt{\frac{b}{T}} r_c \right)} \right\} \dots\dots\dots(7)$$

r_c が非常に大きく、特に対象として考える範囲に対して無限と考えられる時には(6)式から次の解が得られる。

$$s = \frac{Q}{2\pi T} K_0 \left(\sqrt{\frac{b}{T}} r \right) \dots\dots\dots(8)$$

半径r内に含まれる既存の井戸からのゆう出量減少の総和は次により計算される。

$$\int_0^r 2\pi r b s dr = Q \left\{ 1 - \sqrt{\frac{b}{T}} r K_1 \left(\sqrt{\frac{b}{T}} r \right) \right\} \dots\dots\dots(9)$$

次に、一方が例えば海等に限られていて他方に無限に広い地下水層の到る所からゆう出のある場合に、海岸から d の距離で Q の揚水を行つた時、従来海に流れ出ていた水量は $Qe^{-\sqrt{\frac{b}{T}} d}$ だけ減じ、その全地域からのゆう出量の減少は次式で与えられ、そのくわしくは既に発表した。²⁾

$$Q \left(1 - e^{-\sqrt{\frac{b}{T}} d} \right) \dots\dots\dots(10)$$

以上三つの場合の何れも、既存の井戸からのゆう出減少の総和に対する揚水影響はその地域での $\frac{b}{T}$ の値の大小により大きく左右されることが示され、 $\frac{b}{T}$ の大きい程、新しい揚水を含めてこの地域から採水される総量の増加は小さい。この状態は(7)、(9)、(10)のそれぞれの場合に r_e 、 r 、 d の値を適当にえらび、いろいろな $\frac{b}{T}$ の値に対応して計算した表1からうかがうことが出来る。 $\frac{b}{T}$ のある値以上になると新しい揚水量に殆ど匹敵するだけの量が他の井戸のゆう出量から引き去られ、たといその地域から海に逃げ去つて行く水量が尚かなりあるとしてもそれを引きとめて採水量の増加にまわす効果が非常に小さく、結局、未利用地下水源開発という意味からは新しい揚水は殆ど全く利益をもたらさないと云える。したがつて、新しく揚水を行おうとする時にはその地域の $\frac{b}{T}$ の値についてあらかじめ知識を持つことが必要となつてくる。

〔表 1〕

$\frac{b}{T}$ (m ⁻²)	$1 - \frac{1}{I_0 \left(\sqrt{\frac{b}{T}} r_e \right)}$		$1 - \sqrt{\frac{b}{T}} r K_1 \left(\sqrt{\frac{b}{T}} r \right)$			$1 - e^{-\sqrt{\frac{b}{T}} d}$		$\frac{K_0 \left(\sqrt{\frac{b}{T}} r \right)}{K_0 \left(\sqrt{\frac{b}{T}} r_w \right)}$	
	r_e 2000 m	r_e 1000 m	r 500 m	r 200 m	r 100 m	d 500 m	d 200 m	r 100 m	r 50 m
1×10^{-6}	0.56	0.22	0.17	0.045	0.016	0.393	0.181	0.225	0.287
5×10^{-6}	0.942	0.63	0.447	0.145	0.055	0.674	0.361	0.151	0.231
1×10^{-5}	0.99	0.82	0.608	0.234	0.093	0.794	0.47	0.137	0.205
4×10^{-5}		0.99	0.896	0.503	0.238	0.958	0.718	0.082	0.149
8×10^{-5}			0.967	0.689	0.354	0.988	0.833	0.057	0.119
1×10^{-4}			0.98	0.821	0.399	0.99	0.865	0.049	0.109
4×10^{-4}				0.95	0.72		0.982	0.014	0.054
8×10^{-4}				0.99	0.863		0.996	0.0058	0.033
1×10^{-3}					0.896			0.0038	0.026

4. 任意の井戸のゆう出量に対する揚水の影響及び $\frac{b}{T}$ という係数の持つ意味

別府の各自噴井戸でゆう出水位 h を上下さすことによりそれに比例したゆう出量の減少・増加の起ることが多数の観測でたしかめられ、(4)式でその関係が示されている。之から今、温泉水頭 H が一定で h が s_w だけ低下した場合にゆう出量が Δq の増加をみるとすると、

$$\Delta q = Cs_w \dots\dots\dots(11)$$

別府のような井戸密集域で一つの井戸のゆう出量を増加させた時の周辺の水圧低下量は r の比較的小さな範囲については前の(8)式が成立するであろう。この井戸の井戸壁での水位低下量 s_w は(8)式での r を井戸半径 r_w に等しくおくことにより近似的に求められる。

$$s_w = \frac{\Delta q}{4\pi T} K_0 \left(\sqrt{\frac{b}{T}} r_w \right)$$

之を(11)式と組合わせて、

$$c = 4\pi T / K_0 \left(\sqrt{\frac{b}{T}} r_w \right) \dots\dots\dots(12)$$

一つの井戸で新しく Q の揚水を開始した時、それから r の距離にある井戸についてその温泉水頭は(8)式で与えられる s だけ低下し、その時 h には変りがないから(5)式にしたがい s に比例したゆう出量の減少が起る。

$$\begin{aligned} -\Delta q = cs &= \frac{4\pi T}{K_0 \left(\sqrt{\frac{b}{T}} r_w \right)} \cdot \frac{Q}{4\pi T} K_0 \left(\sqrt{\frac{b}{T}} r \right) \\ &= Q \frac{K_0 \left(\sqrt{\frac{b}{T}} r \right)}{K_0 \left(\sqrt{\frac{b}{T}} r_w \right)} \dots\dots\dots(13) \end{aligned}$$

之が揚水井戸から r 離れた井戸からのゆう出量に対する揚水影響で、一例として $r_w = 0.023(m)$ とした時にいろいろな $\frac{b}{T}$ の値について計算した結果が表1の最後の行に示される。之によると、ある特定の井戸のゆう出量に対する揚水影響は $\frac{b}{T}$ の値の大きい程小さいことが示され、前節で考えたようなある範囲内のゆう出量の総和に対する影響の場合と全く反対の傾向が示されることに注意されねばならない。すなわち、 $\frac{b}{T}$ の大きい程、各々一つの井戸からのゆう出量の減少は小さいが、それをすべての井戸について加え合わせた値は大きくなるわけである。

ではこの $\frac{b}{T}$ の値の大小とは実際の地下水域のどういう性質を示すものであろうか。之までの理論の基礎としての考え方は T は透水量係数、 b は浸出の係数としてその層の到る所から層内外の水圧差に比例した水の浸出が行われるとした時の比例常数であつた。しかし、実際にその浸出は各井戸を通してのみしか行われていない場合を取扱っている。

各井戸について、温泉水頭の低下とゆう出量の減少との間には(13)式の関係があることは既に述べた。今、井戸数が非常に多く平均して各単位面積毎に N 個の井戸が存在しているとみなせる時、各々の井戸についての(13)の関係を加え合わせて各単位面積につき次の関係が求められる。

$$-N\Delta q = Ncs = bs$$

(12)式を代入することにより

$$\begin{aligned} b &= Nc = 4\pi T N / K_0 \left(\sqrt{\frac{b}{T}} r_w \right) \\ \therefore \frac{b}{T} &= 4\pi N / K_0 \left(\sqrt{\frac{b}{T}} r_w \right) \dots\dots\dots(14) \end{aligned}$$

このように考える時、 $\frac{b}{T}$ は井戸密集度 N と井戸半径 r_w のみの関数で特に N すなわち単位面積当

りの井戸数により大きく左右されることが分る。一例として、 $r_w=0.023m$ のときの $\frac{b}{T}$ と N との関係を(14)式から計算して表2に示す。

〔表 2〕 $\frac{b}{T}$ と N との関係 ($r_w=0.023m$ のとき)

$\frac{b}{T}$ (m^{-2})	1×10^{-5}	5×10^{-5}	1×10^{-4}	5×10^{-4}	1×10^{-3}	5×10^{-3}
N (m^{-2})	1.53×10^{-5}	7.03×10^{-5}	1.35×10^{-4}	6.12×10^{-4}	1.17×10^{-3}	5.2×10^{-3}

この表からは $\frac{b}{T}$ のかなり大きい時には $\frac{b}{T} \approx N$ と考えてもよいことになるが、この関係は定量的には余り信用出来ない。よほど井戸が密集している場合でない限り、実際の殆どすべての場合に N は1以下であり、一つの井戸からのゆう出量をその周辺に均等に分配すると言うことは実際の状態に対してかなりの誤差を生むに違いない。又、水圧の低下量 s についても同様に、各井戸での水頭変化を各単位面積毎に一律な水圧低下におきかえることは正しくはない。その他、実際の地下水域では井戸の分布はかなり不規則で、それを平均した N の値は平均の方法により相当の誤差を生じ、実際の地域の井戸集中度 b から $\frac{b}{T}$ の値を直ちに求めることは現在のような理論的基礎に基づいてだけでは余り安心して行えない。しかしながら、定性的には $\frac{b}{T}$ が主に井戸密度 N の大小により左右される函数で、 N の大きい地域程 $\frac{b}{T}$ の値も大きいと言うことは充分な正しさを持ち、この意味において(14)式は価値を持っていると言えよう。したがって、ある地域の井戸密度から直ちに $\frac{b}{T}$ の値を見積る方法については尚今後の研究に待つこととし、現在の段階では井戸のたくさんある地域ほど $\frac{b}{T}$ の値は大きく、井戸のまばらな地域では $\frac{b}{T}$ は小さいという定性的な関係を示すにとどめよう。

尚、 $\frac{b}{T}$ が透水量係数 T に無関係なことから、之は地下水層の一つの性質を示す独立した係数としてとり扱われるべきと考えられる。

5. 揚水影響の大小を判定する場合の注意

揚水影響の問題がますます重要となつて来ているにかかわらず、其をとり扱う科学的方法はまだあまり進んでいない。一般的な解析方法としては定常状態についてのチームの方法、不定常状態でのタイスの方法が与えられているだけであるが、之等は新しい揚水以外の他の井戸からのゆう出量は揚水前後を通じて一定を保っていると仮定した場合に揚水井戸周辺の水圧低下を対象としたもので、この論文で取扱うような井戸密集域の問題にそのまま用いることは適当ではない。

数地域について揚水影響の大小を比較するような場合には、実際にそれぞれの地域で揚水を行うつて周辺の井戸でのゆう出量や水位の変化を観測することが最も实际的ではあるが、この観測結果の解釈の上に大きな問題が残っている。例えば、共に半径 $0.023m$ の多数の自噴井戸を含む二つの地域があり、その各々で新たに $100l/m$ の揚水を始めたとする。その揚水点から $5m$ 離れた井戸でのゆう出量を各々の地域で観測し、第1の地域では揚水前にくらべ $2l/m$ の減少、第2の地域では $2.6l/m$ の減少をみたすれば、表1により、 $\frac{b}{T}$ の値は第1の地域では $1 \times 10^{-5} (m^{-2})$ で第2の地域については $1 \times 10^{-3} (m^{-2})$ であり、 $\frac{b}{T}$ の大きい即ち井戸がより密集している第2の地域の方が揚水の響影は小さいとみられる。しかし、その揚水井戸の周囲 $100m$ 以内のすべての井戸からのゆう出量減少の総和を表1から計算すると、第1地域で $9.3l/m$ 、第2地域で $89.6l/m$ であり、この観点からは井戸の密集した第2地域の方がはるかに揚水の影響が大きい。そして揚水量も含めてその半径 $100m$ 以内で採水される総量は第2地域では $100l/m$ の揚水を行うにかかわらず僅かに $10.4l/m$ しか増

加しないと言う結果となり、この地域で周囲の温泉所有者に損害を与えながら新しい揚水を行うだけの理由は極めてうすくなる。

従来、表面に現われた揚水影響の問題の多くは揚水点からある距離の特定の井戸のゆう出量についてのものであるが、このような問題に当たっても、その地域に含まれる他の井戸のゆう出量の変化にも関心を持ち、たとえ一つ一つの井戸のゆう出量の減少は少くともその地域全体の総採水量が新しい揚水を含めてどの程度増大し得るかに注意を払う必要がある。

次に揚水点から任意の距離にある井戸水位への揚水影響は(8)式で与えられるが、 $K_0(x)$ と言うベツセル関数は x の大きい程小さくなるから、同じ揚水量に対し揚水点からの距離の等しい井戸での水位低下はその地域の T の値が大きい程、又 $\frac{b}{T}$ の値の大きい程小さい。したがって、透水量係数の等しい地域で同量の揚水を行う時、 $\frac{b}{T}$ の大きい即ち井戸のより密集している地域の方が地下水位の低下は小さく、ある特定の井戸の水位とかゆう出量に対して与えられる揚水影響の大小から直ちにその地域での影響の大小を論じることは重要な誤りをおかす危険のあることが示される。

6. $\frac{b}{T}$ の値の求め方

以上の諸論から、揚水の影響をしらべるのにその層の持つ $\frac{b}{T}$ の値が最も重要な係数であることを知った。しかしこの $\frac{b}{T}$ の値について、各井戸での水位変化とかゆう出量変化の実測にもとづき(8)式や(13)式から求めようとする試みは実際の井戸分布がどうしても不均等なため誤差を招きやすい。したがって、 $\frac{b}{T}$ を求めるためには対象とする地域毎の総計とか平均とかの状態についての取扱が必要と考えられる。

まず考えられる方法は実際に揚水を行って、例えばその周囲半径100m以内のすべての井戸のゆう出量変化を測定し、その総計から表1を用いて $\frac{b}{T}$ の値を求めることである。この方法はその地域で揚水試験が行えることと、その地域のすべての井戸でゆう出量が連続的に測定出来ることを必要とするが、実際にこのような井戸密集域ですべての井戸のゆう出量を測るということがなかなかむずかしく、又、そのゆう出量変化の合計は大きくても一つ一つの井戸での変化は小さくて海の干満とか降雨とかの影響による変化が加わるため、測定誤差範囲に入ることが多く、実際にこの方法の使える場合は少ないであろう。山下の別府温泉での揚水試験における不断的努力にかかわらず、現在まですべての温泉について測定の出来た地域は殆どなかった。

海岸地下水層では海水位変化に伴う地下水圧変化から $\frac{b}{T}$ の値を求めることが出来る。海面が潮の干満で変化する状態が $p_0 \sin \omega t$ で表わせると、海から d の距離にある地下水圧の変化 ξ は次式で示される。

$$\xi = p_0 e^{-\alpha x} \sin(\omega t - \beta x)$$

$$\alpha = \sqrt{\frac{r^2 b^2 + S_w + b}{2T}} \quad \beta = \sqrt{\frac{r^2 b^2 + S_w - b}{2T}}$$

海岸からの距離に応じてこの変化の振巾の減衰と位相のおくれから α と β の値が求められ、この二つの値についての連立方程式をとくことにより $\frac{b}{T}$ の値が得られる。

別府温泉ではこの方法により温泉地域の平均的な値として、 $\frac{b}{T} = 2.5 \times 10^{-5} \text{ (m}^{-2}\text{)}$ が得られた。もちろん、特に井戸の密集している市街中心部ではこの値は更に非常に大きいであろう。表1を用いて、別府市街地の中心部、例えば海岸から500mの距離で、新しく揚水を行っても他の泉源からのゆう出量を減じさせる効果のみが大きく、別府温泉全体の採水量を増すためには、もつと海

岸近くか又は之まであまり採水をしていない山の手で採水量の増大をはからねばならないが、海岸の一部の温泉では既に海水の浸入がみられることから、海近くでの揚水は海に逃げ去る温泉水を呼びもどすよりも海水の浸入を促進することが考えられる故、今後の開発は山の手方面か、従来殆ど採水の行われていない地域に向う以外にないと推測される。このような地下水圧の週期的変化を利用して $\frac{b}{T}$ を求める方法は、ただ海水位変化の影響を観測出来る場合にとどまらず、河川水位や気圧・降雨量の変化の影響からも解析することが出来てかなり実用範囲は広いと考えられ、現在のところ広い範囲にわたつての平均的な $\frac{b}{T}$ の値を求める最良の方法であろうが、この方法では例えば別府温泉全体というような相当広い地域の平均しか与えられず、井戸密集度がかなり不均一な場合にも到る所 $\frac{b}{T}$ の値は同じとしてしか求められないという欠点に伴う。したがつて、この方法で求めた $\frac{b}{T}$ はその全地域を対象とした問題を考える場合には役立つが、その中の小範囲内の問題についてそのままの値を用いることは誤りを犯すおそれが多い。

以上のように $\frac{b}{T}$ を一度に求める以外に T と b とを別々に求める方法もあり得る。透水量係数 T を求める方法については従来多くの研究がされて居り、特にチームやタイスの方法が実用によく使われているが、之等の方法は揚水試験中その近くに他のゆう出井戸がある時にはあまり正しい結果を与えず別府温泉のような井戸密集域には適用しがたいため、別府温泉については古くから京都大学研究所によりいろいろな角度からの研究が行われて来たにかかわらず尚、 T の値は求められていない。しかし、揚水試験中他の井戸からのゆう出をおさえることの出来る場合には、タイスの方法から T の値を求められる。 b を求める最も簡単な方法は単位面積当りの総ゆう出量 Nq とそこでゆう出口以上の温泉水頭の高さ $H-h$ を実測から求める方法で、例えば、別府温泉における温泉水頭分布と地表高度分布から、別府のいわゆる H の湯温泉脈に沿い鉄道以東ではその差 $H-h$ は $1 \sim 2$ m、同じくゆう出量分布からはその地域の 100 m 平方当り $200 \sim 400$ l/m のゆう出量のあることが知られ、 100 m 平方につき $b = \frac{Nq}{H-h}$ より b の値は $1 \sim 4 \times 10^{-5}$ (min^{-1}) が求められる。

その他、各井戸のゆう出水位を変化させて求めた(4)式の c の値にその地域の井戸密集度 N をかけて、 $b = Nc$ の関係から b を求める方法、又は(4)式を用いて N の値から直接 $\frac{b}{T}$ を求める方法が考えられ、これらは簡単ではあるが余りにも多くの誤差を生む危険が伴うように思える。この $\frac{b}{T}$ を求める方法については之迄直接この問題について研究されたことがなく、現在やつと井戸密集域における揚水影響をとく手がかりが与えられこの $\frac{b}{T}$ の値の重要性が認められた状態であるから、主として今後の研究に大いに期待される問題と考えられる。

7. 他の透水層から水の浸入のある場合

以上の議論はすべて採水が同一層から行われ他層との間に水の出入は無いとした場合のものであつた。この節ではこの採水層の上又は下にもう一つの透水層があり、この両層の間にはさまつて居るいわゆる不透水層が完全には不透水性ではなく透水性は悪いけれども尚それを通つて上下両層の水圧差に比例した垂直方向の流れが起り得る場合を取扱う。このように他層と連絡のある時に、他にゆう出している井戸のない地域での揚水影響については Hantush と Jacob がくわしく解析し居り、他層から浸入して来る水量の両層の水圧差に対する比例常数 b は間にはさまる半透水性の層の透水係数とその厚さとの比に等しいことを示している。

この方法とこの論文で前節までに示した解析方法とは係数 b の持つ意味が異なる以外は全く同じで、この両者を組合わすことにより多数の井戸がゆう出していしかも他層からの水の浸入の起り得る層から揚水を行つた場合の影響を解析出来る。他の井戸からのゆう出量の変化に対する係数を b_1 、他層からの浸入水量の変化に対する係数を b_2 とすると、基礎式(6)において、 $b = b_1 + b_2$ の関係のあることが知られる。したがつて、無限に広い地域で Q の揚水を行つた時の地下水圧の低下量 s につき、

(8)式と同じく、

$$s = \frac{Q}{2\pi T} K_0 \left(\sqrt{\frac{b_1+b_2}{T}} \cdot r \right)$$

が求められ、この場合に揚水井戸から半径r内でのゆう出量減少の総和は、

$$\int_0^r 2\pi r b_1 s dr = Q \frac{b_1}{b_1+b_2} \left[1 - \sqrt{\frac{b_1+b_2}{T}} r K_1 \left(\sqrt{\frac{b_1+b_2}{T}} r \right) \right]$$

又、その範囲内で他層から浸入して来る水量の総増加量は

$$\int_0^r 2\pi r b_2 s dr = Q \frac{b_2}{b_1+b_2} \left[1 - \sqrt{\frac{b_1+b_2}{T}} r K_1 \left(\sqrt{\frac{b_1+b_2}{T}} r \right) \right] \dots (15)$$

と与えられる。

このように新しい揚水量をまかなうためには、他の既存の井戸からのゆう出量の減少、遠方から流入して来る水量の増加と共に、それと連絡のある他の層からの水の浸入の起り得ることが示され、この浸入して来る水が之まで採水している温泉水にくらべて低温な時はこの近傍の温泉では温度が低くなり、逆に浸入水の方が高温の時には温度が上昇する。之等の現象もまた揚水の影響という言葉に含まれるべきものである。尚、この節で用いている他層からの水の浸入の増加という言葉は揚水開始前の状態に対して相対的なもので、元々その層の方が他層より水圧が高く浸出していた場合には浸出水の減少と言うことに当り、その時には当然温度の変化等は起り得ない。

別府駅前に建築物の基礎工事が1958年7月より引き続き行われ、その間地下水位を下げるための揚水が特に7月20日より10月まで活発に行われた。その揚水作業の資料については知り得なかつたが、京都大学研究所で毎週金曜日に行っている数箇所の温泉の温度・ゆう出量の定期観測中、その工場のすぐ隣の揚水点から40m位の距離にある温泉 No.472に明かにその揚水の影響と思われる変化が現われた。

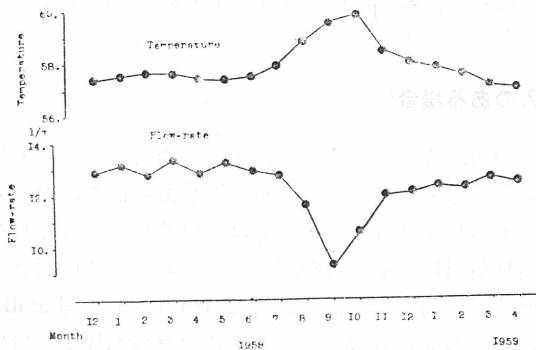


図 1 別府 No.472泉におけるゆう出量と泉温の変化 (1957年12月より1959年4月まで)

図1にその変化の状況を示すが、ゆう出量と温度は共に週1回の観測値を月平均した値である。揚水開始と共に明かにゆう出量は減少し、揚水の影響を示しているが、それと同時に温度の上昇していることに注目される。そして、揚水停止後、ゆう出量・温度共に次第に揚水前の状態に復帰している。

一般にゆう出口で測つた泉温はゆう出量の多い時に高く、ゆう出量が減少すれば温度も低くなる場合が多い。之は地中から地表までゆう出する途中の冷却率の違いによるとされている。 図1の場合には、ゆう出量が減少したにかかわらず温度が上昇して居り、どうしても地下流動中に既に温度を高める効果が働いたと考えねばならず、この点から他層の異つた種類の水系との連絡が推定される。

別府温泉では一般に、地下深くほど温度が高く、特に、温泉脈と言われる地帯では地下ある深さで急激に温度の高くなることが知られている。この No.472 泉は大体海門寺 温泉脈の近傍にあり、その温泉脈上での地中温度の資料によると、地下60m余りで温度の飛躍的上昇があつて其以深では60°C以上に及んでいる¹¹⁾。別府温泉全体としては、いろいろな層の水も互に混じ合う機会が多く特に別々の隔絶された層を考慮することなく唯一つの透水層で代表して考えてよい場合が多いが、このように地域毎の問題となると、ある範囲内では上下の層は一応透水性の悪い層によりへだてられていると考えねばならぬ場合がある。

このような時に、揚水の影響で温度の上昇した原因については次の二つの場合が考えられよう。第一は、この温泉水層に対して浸入していた浅い低温な水の水圧が揚水により低下して浸入量がへり、そのため温泉水の温度が上昇したとの考えである。之は、この温泉が地表まで自噴して浅い低温水よりも高い水圧を持つと思われるから、その間に連絡があるとすればむしろこの温泉水が浅くまで浸出していると考えねばならず、そのためこの低温水浸入量の減少という考えは否定される。したがつて、この温度上昇の原因は第二の理由、即ち、揚水によりこの温泉水層内の圧力が低下し其れに応じて下層の高温水が上昇して混入して来たという(15)式に基づき解釈がもつとも妥当であろう。

(15)式で $\frac{b_2}{T}$ の値は地層の持つ性質で人工的には変らず一定と考えられるが、 $\frac{b_1}{T}$ は井戸数に關係するから開発の進むと共に次第に増加してゆくべきもので、同じ地層でも井戸数の多少のため揚水により新たに他層から浸入して来る量に違いが出来るであろう。(15)式を変形して他層からの浸入量の増加を次のように書き変える。

$$Q \frac{b_2/T}{(b_1+b_2)/T} \left[1 - \sqrt{\frac{b_1+b_2}{T}} rK_1 \left(\sqrt{\frac{b_1+b_2}{T}} r \right) \right]$$

$\frac{b_2}{T}$ を一定に保ち $\frac{b_1}{T}$ の値のみが変化する時、〔 〕内は表1から $\frac{b_1}{T}$ の値の増大する程大きくなることは明らかであるが、之を $\frac{(b_1+b_2)}{T}$ で割つた値については例えば $r=100m$ の場合に次表のように $\frac{b_1}{T}$ の大きい程小さいことが示される。

〔表 3〕

$\frac{b_1+b_2}{T}$ (m ⁻²)	1×10^{-6}	1×10^{-5}	1×10^{-4}	1×10^{-3}
$\left[1 - \sqrt{\frac{b_1+b_2}{T}} rK_1 \left(\sqrt{\frac{b_1+b_2}{T}} r \right) \right] / \frac{(b_1+b_2)}{T}$	16×10^3	9.3×10^3	3.99×10^3	0.896×10^3

このことから、井戸のより密集して $\frac{b_1}{T}$ の値の大きい程、揚水量をまかなう為に他の井戸からのゆう出量の減じる効果が強くなり、たとい其より下層に優力な水源が存在しても其からの供給量は余り増加しないことが知られる。

以上この論文での議論から、あまりに多数の井戸が密集している場合には新しく揚水を行つて採水量を増そうとしても、周囲の井戸からのゆう出量をへらすのみで、地表水又は地下水としてその地域から流れ去る水量を呼びもどして採水・利用する効果は少ない。之がいわゆる井戸干渉と言われる現象で、採水量を増そうとする努力がいたずらに他の井戸からのゆう出量をへらすのみに使わ

れ、その地域全体としての採水量を増す効果は少ない結果となる。したがって、開発を進めようとする温泉又は地下水域においては、井戸相互の干渉を出来るだけ少くしながらその地域で利用出来る水量を最大限にするよう地域的に井戸を分散させるほか、更に、深さの異なる他の透水層からも直接の採水を計つてゆくような計画が望ましい。

8. 他の井戸がポンプを用いている場合

以上の解析では他の井戸はすべて自噴して、新しい揚水が行われても其等の揚水水位には変化が無く自噴量のみが影響をうけると考えて来た。もし、他の井戸での水位が地面以下でポンプ揚水を行っている時、以上の解析方法がはたして満たされるであろうか。このような場合の揚水影響はまず各井戸の水位を低下させ、そのためポンプの性能によりその汲み上げ量が減少すると考えられる。ポンプの性能にはいろいろとむずかしい問題が含まれているが、ここではもつとも基本的で簡単な次式を用いることにする。¹²⁾

$$W = \rho q H / 102 \eta$$

W はkwで表わしたポンプの馬力、 ρ は水の密度、 q は揚水量、 H は揚程、 η は効率である。今、 $c = 102 \eta W / \rho$ とおくと

$$q = \frac{c}{H} \dots\dots\dots (16)$$

新しく揚水を始める前に各井戸で(16)式の関係が成り立っていたとし、揚水により水位が s だけ低下し、揚水量が q' に変わったとする。この水位低下が H にくらべ比較的小さく、その間、効率 η をほぼ一定と考えてもあまりさしつかえないような場合を仮定しよう。

$$q' = \frac{c}{H+s} = \frac{c}{H} \left(1 - \frac{s}{H} + \frac{s^2}{H^2} - \dots\dots\dots \right)$$

$H \gg s$ の条件により、各井戸についての揚水量の減少 $-\Delta q$ は次式で示される。

$$-\Delta q = q - q' \approx \frac{c}{H^2} (H - s) = \frac{Q}{H} (H - s) \dots\dots\dots (17)$$

Q と H とは各井戸につき新しい揚水以前の値であるから s の値に関係なく、実測で求められる。これから、水位低下 s の大きい程、それに比例して揚水量の減少して行くことが示され、このような井戸が密集している地域での揚水影響については前節までの自噴泉地域におけると同様の解析が満たされるであろう。

9. 結 び

新しく揚水を行う井戸と連絡している透水層には、どこまでもその揚水の影響が伝わり、揚水影響の有無と言うよりその量的な問題が考えられねばならない。

実際問題としての揚水影響は多くの場合、他の井戸の揚水量がどれ程減るかと言うことにあるにかかわらず、従来の方法は主として、他の井戸からの揚水量はそのまま変らないとして、揚水後地下水圧がどのように変化してゆくに關心が向けられていた。この論文では、既にたくさんの井戸が掘られている地域で新しく揚水をした時に、その地域の既存の井戸からの揚水量の総和がどう変化するかと言う問題が取扱われた。この総和の減少量が新しい揚水量にくらべて小さい時はその地域での総採水量に対して揚水の効果があがったことになるが、井戸が密集している程その効果は少くなり、ある程度以上井戸の密集した地域では新しく揚水を行つても他の井戸の揚水量を

減少させるだけで総採水量にはあまり変りがないという結果となり、未利用水源の開発と言う揚水本来の意味からは遠ざかる。

しかし、その揚水井戸からある距離離れた一つの井戸のゆう出量の減少や水位の低下に対する影響には、むしろ井戸の密集している方が小さいという傾向があり、実際に揚水影響の大小を考える時には注意されねばならぬ。

以上のような井戸密集地域での揚水影響に関して、その層の特性係数である $\frac{b}{T}$ の値が非常に重要な意味を持ち、別府市街地温泉全域での平均の値として 2.5×10^{-5} (m^{-2}) が求められたが、この値を更にいろいろな地域で実際に求める方法については今後研究が進められるであろう。

この論文作製に当り終始御批判を頂いた瀬野錦蔵博士と、別府 No.472 泉の観測及び資料整理をわずらわした岨部典生、森忠敬の両氏にあつく感謝をささげる。尚、この研究に要した費用の一部は文部省科学研究費によつた。

文 献

- (1) M. Muskat, Flow of Homogeneous Fluids through Porous Media. (McGraw-Hill) p.522, (1937) (2)吉川恭三、陸水学雑誌、20、3、(1959) (3)野満隆治；瀬野錦蔵；山下馨、地球物理、2、3、(1938) (4)C. E. Jacob, Trans. Amer. Geoph. Union. 27, 198-205, (1946) (5)山下幸三郎、大分県温泉研究会報告、7、(1956) 8. (1957) 9. (1958) (6)吉川恭三、陸水学雑誌、17、3、(1955) (7)山本莊毅、地下水調査法(古今書院) (8)瀬野錦蔵、地球物理、2、3、(1938) (9)M. S. Hantush and C. E. Jacob, Trans. Amer. Geoph. Union. 36, 286-292, (1955) (10)瀬野錦蔵・西田久雄、地球物理、2、1、(1938) (11)野満隆治・山下馨、同上、2、3、(1938) (12)例えば、石原藤次郎編、応用水理学、中1、p.248、(丸善、1954)

Effect by Withdrawal of Thermal Groundwater in Multiple-Well System.

Kyōzō KIKKAWA, Kōzaburō YAMASHITA
Beppu Geophysical Observatory,
Kyōto University, Beppu, Ōita Prefecture.

Analytical methods predicting the variations of discharges from multiple-well system caused by future withdrawal of groundwater from a well are simillary presented as those in leaky aquifer already found by Hantusch and Jacob, and show that the denser the distribution of wells in the area, the larger is the pumping effect on the total discharge from other wells. Then, it often happens that the total yield from a well system gains only little advantages by a new pumping. But, it is also analytically found that the denser the distribution of wells, the smaller is the pumping effect on the discharge or water level of any observed well. Therefore, it must be carefully treated to discuss the quantitative effects of pumpings from the observed results in different well-systems.

An observation in Beppu finds that pumping effect rises the temperature of one nearby spring though its flow-rate is decreased. It shows that the withdrawal from an aquifer introduces the up-flow of more thermal water from deeper aquifer.