

温 泉 科 学

第 10 卷 第 3 号

昭和 34 年 9 月

原 著

道後温泉の揚水試験に関する一考察

湯 原 浩 三

(京都大学理学部)

(昭和34年 6 月 5 日受理)

1. 緒 言

温泉の地下に於ける流動状況やその供給量を知るための有力な方法の一つは、既存の温泉井で揚水試験を行い、隣接温泉井間の相互影響を知ることである。道後温泉に於ては、さきに地質調査所の遠藤氏等によつて揚水試験が行われ、その結果が詳細に報告されている^{1),2)}。道後温泉は花崗岩中の割れ目に沿つて温泉水が上昇して来るものであると報告されており、地質的に見ても砂層の様な平面的に拡がった帯水層は存在しないであろう。しかし各温泉井間の相互影響が顕著であり、現在かなり広い範囲で掘さくによる温泉湧出をみている事から考えても、花崗岩中の割れ目の発達は著しく、細い網目状になつていと想像される。したがつて、砂層の様な帯水層ではないが、最も単純化したモデルとして、地下にほぼ均質な帯水層に近いものを想定し、それに基づいて考察を進めることも意味のないことではない。この様な立場から筆者は遠藤氏等の測定結果に非平衡井戸理論を応用することを試み、道後温泉の地下状況を推論する一助とした。

2. 揚水による水位変化に対する理論的考察

道後温泉の温泉井は当時第 1 図に示されている如く分布していた。(現在は第10号井まで存在する。)遠藤氏等は No. 1 から No. 4 までの4ヶの温泉井の揚水をすべて停止し、その後 No. 2、No. 3、No. 4 の温泉井を揚水したり止めたりしながら、No. 1 の温泉井で水位を測定した。揚水状況及び No. 1 の水位変化は第 2 図に示されている。さらにこの測定結果から、No. 1 と No. 4 が直接にかかなり大きく干渉していること、No. 1 と No. 3 は間接的に干渉していること、No. 1 と No. 2 とは殆んど干渉のないことを結論された。しかしこれらの結論は見掛の水位変化より導かれたものであつて、温泉井間の距離や揚水量の相違が直接的に考慮されていないので、干渉の大小を以て直ちに温泉井相互の連絡の良否とするわけにはゆかない。

Theis^{3),4)}一野満の研究によれば、均質等方無限に広つた帯水層に於て、一つの井戸で揚水を行つた時、隣接の井戸の水位変化は次式で示される。

$$y = \frac{Q}{4\pi T} \int \frac{r^2 S}{4Tt} \frac{e^{-u}}{u} du \quad (1)$$

こゝにyは観測井の水位の低下量、Qは揚水量、rは観測井と揚水井間の距離、Tは帯水層の透水係数と厚さとの積、Sは貯溜係数、tは揚水を開始してから時間である。

道後の揚水試験では、最初それまで継続していた揚水を急に停止して、それによる水位の上昇が測定された。この様な場合には、揚水が非常に長く続いているために、水位低下が極めてゆるやかになっているか、或は帯水層への層外からの温泉水の供給が揚水量と釣合つていて、水位が定常状態を保つていたと仮定すれば、(1)式をそのまま用いることが出来る。

但しこの場合、yは水位の上昇量となり、Qは揚水を停止した量である。更に2ヶ以上の井戸で揚水又は揚水停止を行つて、それらの影響を1ヶの井戸で観測する場合、水位変化は個々の揚水影響の代数和で表はすことが出来る。即ち、

$$y = \sum \frac{C_i}{4\pi T_i} \int \frac{r_i^2 S_i}{4T_i t_i} \frac{e^{-u}}{u} du \quad (2)$$

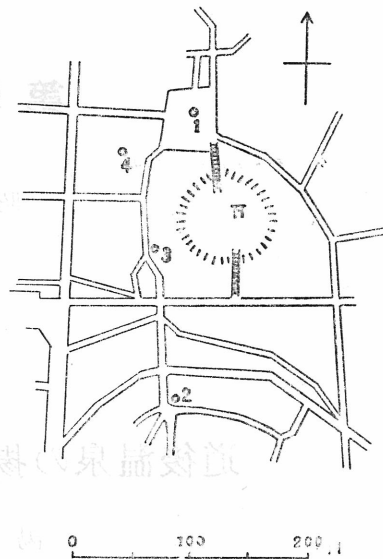
この様な取扱は既にJacob⁵⁾によつてTexasの井戸について行われたことがある。T,Sは帯水層に関する常数であるから、同一帯水層を貫いている夫々の井戸の揚水に対して共通な一定の値でなければならない。しかし実際には夫々の井戸の揚水から求めた値は仲々一致しない。更に道後温泉に於て理想的な一枚の帯水層を考えることは無理であるから、かえつて夫々の井戸の揚水から求めた値の違いに注目すれば、それらがある平均的な意味に於て観測井と揚水井との間の関係を示していると考えることが出来る。したがつて(2)式に於けるT_i, S_iなる値はNo. iの井戸と観測井を結ぶ帯水層の特性と見做すわけである。(1)、(2)の積分は井戸函数と呼ばれるものであるが、充分大きなtに対しては近似的に

$$\int \frac{r^2 S}{4Tt} \frac{e^{-u}}{u} du \approx \ln \frac{4Tt}{r^2 S} - 0.5772 \quad (3)$$

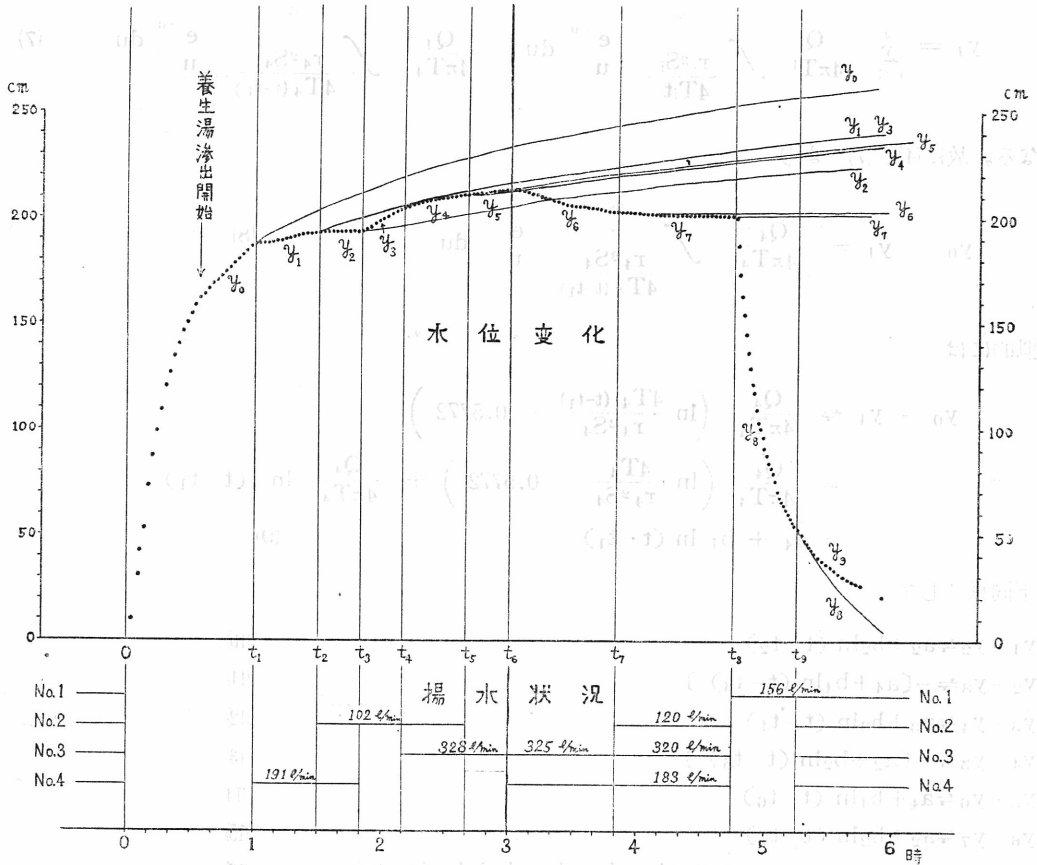
とかける。

道後温泉で行われた揚水試験に於て、最初No. 1~No. 4の揚水を停止した時刻を時間原点とし、それ以後の時間の経過をtで示す。次にNo. 4が揚水を始めた時刻をt₁、時間々隔 t=0~t₁までの水位及びこれを時刻t₁以後に外挿した水位をy₀とする。(第2図参照)。即ちy₀はすべての井戸の揚水を停止した時の水位であり、更に又、その状態がずっと継続されていると考えた時の仮想水位

第1図 道後温泉の泉源分布(昭和25年)



である。次に No. 2 の揚水を始めた時刻を t_2 、 $t=t_1 \sim t_2$ 間の水位及びこれを後に外挿した水位を y_1 とする。以下同様に、第 2 図に示す如く、いずれかの井戸の揚水状況に変化がある毎にその時刻を t_3, t_4, \dots とし、それに対応する観測井の水位を y_2, y_3, \dots とする。



第 2 図 No. 1 ~ No. 4 源泉の揚水状況とそれに伴う No. 1 源泉の水位変化

(2)式より

$$y_0 = \sum_{i=1}^4 \frac{Q_i}{4\pi T_i} \int \frac{e^{-u}}{r_i^2 S_i} du \quad (4)$$

近似的には(3)式より

$$\begin{aligned} y_0 &\doteq \sum_{i=1}^4 \frac{Q_i}{4\pi T_i} \left(\ln \frac{4T_i t}{r_i^2 S_i} - 0.5772 \right) \\ &= \sum_{i=1}^4 \frac{Q_i}{4\pi T_i} \left(\ln \frac{4T_i}{r_i^2 S_i} - 0.5772 \right) + \sum_{i=1}^4 \frac{Q_i}{4\pi T_i} \ln t \\ &= \sum_{i=1}^4 a_i + \sum_{i=1}^4 b_i \ln t \end{aligned} \quad (5)$$

但し、

$$\left. \begin{aligned} a_i &= \frac{Q_i}{4\pi T_i} \left(\ln \frac{4T_i}{r_i^2 S_i} - 0.5772 \right) \\ b_i &= \frac{Q_i}{4\pi T_i} \end{aligned} \right\} \quad (6)$$

こゝでは水位 y はある基準の深さから上方に正に取っているから、 Q の符号は揚水を停止した量が正である。したがって代数和をつくるに際して、揚水再開に対応するものゝ符号は負にしなければならぬ。 y_1 については、 t_1 時に No. 4 が揚水を再開したから

$$y_1 = \sum_{i=1}^4 \frac{Q_i}{4\pi T_i} \int \frac{r_i^2 S_i}{4T_i t} \frac{e^{-u}}{u} du - \frac{Q_4}{4\pi T_4} \int \frac{r_4^2 S_4}{4T_4 (t-t_1)} \frac{e^{-u}}{u} du \quad (7)$$

となる。故に(4)、(7) より

$$y_0 - y_1 = \frac{Q_4}{4\pi T_4} \int \frac{r_4^2 S_4}{4T_4 (t-t_1)} \frac{e^{-u}}{u} du \quad (8)$$

近似的には

$$\begin{aligned} y_0 - y_1 &\doteq \frac{Q_4}{4\pi T_4} \left(\ln \frac{4T_4 (t-t_1)}{r_4^2 S_4} - 0.5772 \right) \\ &= \frac{Q_4}{4\pi T_4} \left(\ln \frac{4T_4}{r_4^2 S_4} - 0.5772 \right) + \frac{Q_4}{4\pi T_4} \ln (t-t_1) \\ &= a_4 + b_4 \ln (t-t_1) \end{aligned} \quad (9)$$

以下同様にして

$$y_1 - y_2 \doteq a_2 + b_2 \ln (t-t_2) \quad (10)$$

$$y_2 - y_3 \doteq -(a_4 + b_4 \ln (t-t_3)) \quad (11)$$

$$y_3 - y_4 \doteq a_3 + b_3 \ln (t-t_4) \quad (12)$$

$$y_4 - y_5 \doteq -(a_2 + b_2 \ln (t-t_5)) \quad (13)$$

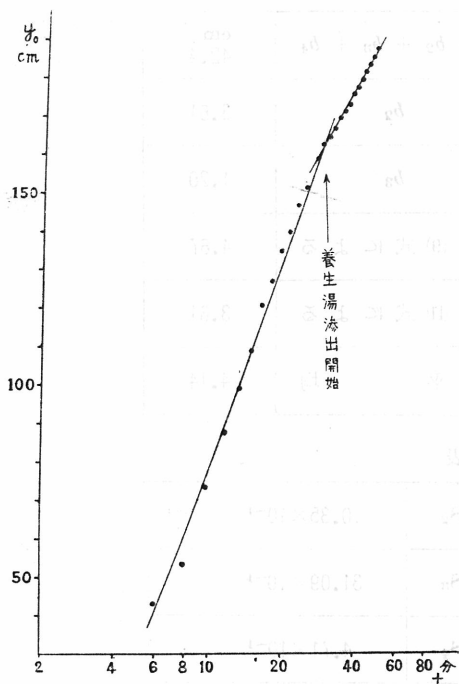
$$y_5 - y_6 \doteq a_4 + b_4 \ln (t-t_6) \quad (14)$$

$$y_6 - y_7 \doteq a_2 + b_2 \ln (t-t_7) \quad (15)$$

$$y_7 - y_8 \doteq (a_1 - a_2 - a_3 - a_4) + (b_1 - b_2 - b_3 - b_4) \ln (t-t_8) \quad (16)$$

$$y_8 - y_9 \doteq (a_2 + a_3 + a_4) + (b_2 + b_3 + b_4) \ln (t-t_9) \quad (17)$$

$t=0 \sim t_1$ の間で水位が近似的に(5)式で示されるかどうかは、水位と時刻を半対数グラフの両軸にとって示す時第3図の如き直線となることから確認される。これから $(a_1 + a_2 + a_3 + a_4)$ 及び $(b_1 + b_2 + b_3 + b_4)$ を求めることが出来る。但し第3図ではグラフ上の直線は折れているが、その点¹⁾は No. 1 源泉の副源泉である養生湯の滲出が始まった時刻に対応している。 $(a_1 + a_2 + a_3 + a_4)$ 及び $(b_1 + b_2 + b_3 + b_4)$ の値は時刻 t_1 以後の y_0 の値を外挿するに用いるものであるから、折点より右側の直線についてそれらの値を求めるのが妥当である。かくして求めたこれらの係数を用いると $t_1 \sim t_2$ 間の y_0 を外挿することが出来、この期間の実測水位 y_1 との差は(9)式で示される関係をもつ。(9)式から前と同様に係数 a_4, b_4 を求め、 $t_2 \sim t_3$ 間の y_1 を外挿すれば(10)式より a_2, b_2 を求めることが出来る。以下(17)式まで同様な手順を順次行えば、それぞれの係数を求めることが出来る。しかしこの様にして求めた値は同じ a_i, b_i についても同じではない。それは理論をあてはめる為に仮定された条件が実際には完全に満たされていないことによるのであろう。更に又、上述の手順を順次繰返せば後になる程誤差が大きくなる。したがってなるべく初めの方で、しがもすべての係数が一応出揃うところまで、即ち(9)、(10)、(11)、(12)式を用いて、それらのグラフ第4図、第5図、第6図、第7図から $a_2, a_3, a_4, b_2, b_3, b_4$ の値を求めた。それらの値は第1表に示す。



第3図すべての源泉が揚水を停止した後のNo.1源泉の水位上昇

次に(6)式の関係を利用して夫々の値

$$r_2=250\text{m}, \quad r_3=125\text{m}, \quad r_4=70\text{m}$$

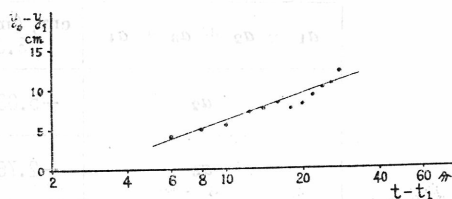
$$Q_2=111\text{l/min.}, \quad Q_3=325\text{l/min.},$$

$$Q_4=187\text{l/min.}$$

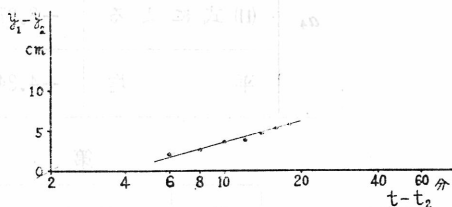
を考慮すれば、T、Sの値を求めることが出来る。それを第2表に示す。これらの値は、いずれもtが充分大きくて(3)式が成立するという仮定のもとに求められた。そこで近似の程度を知るために、逆に、求められたT、Sの値を用い、種々なtの値に対して

$$R = \int \frac{\infty}{r^2 S} \frac{e^{-u}}{u} du - \ln \frac{4Tt}{r^2 S} + 0.5772 \quad (18)$$

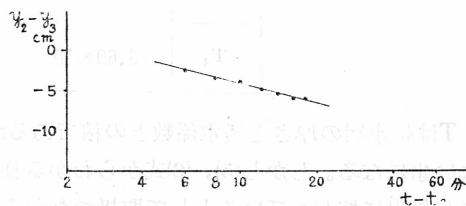
を計算した。その結果Rを大略20%以上におさえるためには、だいたい、 T_2, S_2 に対しては $(t-t_2)$ が10分以上、 T_3, S_3 に対しては $(t-t_4)$ が20分以上、 T_4, S_4 に対しては $(t-t_1)$ 及び $(t-t_3)$ が8分以上であればよいことがわかる。Rを20%も認める事は、近似としては決して満足すべき事ではないけれども、この様な揚水試験に対する取扱としては、あまり詳しく計算することは無意味であつて、この程度が限度であろう。しかもそれによつて、第2表に示された値の相対的な意味をそこなうものでもないと思われる。



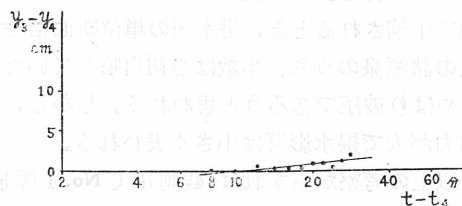
第4図 t_1 時にNo.4が揚水を再開した為のNo.1の水位変化



第5図 t_2 時にNo.2が揚水を再開した為のNo.1の水位変化



第6図 t_4 時にNo.4が再び揚水を停止した為のNo.1の水位変化



第7図 t_4 時にNo.3が揚水を再開した為のNo.1の水位変化

第 1 表

$a_1 + a_2 + a_3 + a_4$		cm, (min) 13.0	$b_1 + b_2 + b_3 + b_4$		cm 42.4
a_2		-5.00	b_2		3.61
a_3		-2.76	b_3		1.20
a_4	(9) 式による	-4.70	b_4	(9) 式による	4.67
	(11) 式による	-3.97		(11) 式による	3.61
	平 均	-4.34		平 均	4.14

第 2 表

T_2	$2.45 \times 10^3 \text{ cm}^2/\text{min}$	S_2	0.35×10^{-4}
T_3	21.56×10^3	S_3	31.09×10^{-4}
T_4	3.60×10^3	S_4	4.71×10^{-4}

T は帯水層の厚さと透水係数との積であるから、 T の値が大きい程揚水井と観測井の間の連絡がよい事になる。しかし(5)、(6)式からわかる様に T が大きい程水位変化 y は小さくなる。これは帯水層が無限に拡がっているとして取扱つたから、 T の大きい時は揚水井と観測井の連絡が密接であると共に、それ以外の遠方からの補給も急速になされて、揚水による水位変化があまり大きく表われないのである。 S は貯留係数で、不圧帯水層では砂層の空隙率を、被圧帯水層では、帯水層が弾性的に圧縮される時、帯水層の単位断面積を持つた垂直柱状部から解放される水量を示す。道後温泉の諸源泉のうち、半数は当初自噴⁶⁾していたし、第2表の S の値も比較的小さいので、温泉帯水層はやはり被圧であろうと思われる。しかし、不圧、被圧いずれにしても、 S の大きい程帯水層の産出力が大で揚水影響は小さく表われる。

以上の考察からすれば、観測井(No. 1源泉)と最も連絡のよい揚水井はNo. 3で、帯水層はNo. 1から見ればNo. 3のやゝNo. 4よりの方向に最も発達している。この方向はNo. 1源泉に関する資料から得られた裂平面 $N30^\circ E$ ⁷⁾の方向とほぼ一致し、又その後昭和30年に新掘された諸源泉⁶⁾の採湯位置もほぼこの線に沿っている。

T 、 S の値は他の温泉地では未だあまり求められていないが、筆者が熱海温泉に関して求めたもの⁷⁾と比較すれば第3表の如くである。これを見れば、道後の方が熱海に比して帯水層の流通が良く、貯留係数も大きい。しかしこのことは、温泉勢力が大きいというのではなく、道後温泉のいくつかの源泉の相互の連絡が良く、花崗岩中の裂れ目の発達が著しい事を示していると思われる。

第 3 表

	$T \text{ cm}^2/\text{min}$	S
道 後	$2.4 \sim 21.6 \times 10^3$	$3.5 \sim 310.9 \times 10^{-5}$
熱 海	$1.2 \sim 4.1 \times 10^3$	$1.1 \sim 2.9 \times 10^{-5}$

終りに御指導を賜った瀬野錦蔵博士に謝意を表する。この研究に要した費用は科学研究費に依つた。併せて感謝する。

参 考 文 献

- 1.) 遠藤 六郎他：道後温泉増湯計画調査報告書，1950.
- 2.) 高律 寿雄他：愛媛大学地域社会総合研究所報告、B第4号，1955.
- 3.) C. V. Theis：Trans. Amer. Geophys. Union, pp. 519—524. 1935.
- 4.) 野満 隆治他：地球物理，第7巻，第1号，1943.
- 5.) C. E. Jacob：Trans. Amer. Geophys. Union, pp. 744—756, 1941.
- 6.) 高律 寿雄他：愛媛大学地域社会総合研究所報告，B第11号，1957.
- 7.) 湯原 浩三：日本温泉科学学会第9回大会講演，1956.

On the Pumping Test in Dogo Spa

KOZO YUHARA

(Bepp Geophysical Observatory, Kyoto University)

Interference-effect among some wells of hot springs has been investigated in Dogo Spa. From the water-level data, the author calculated approximately the coefficients of storage and the transmissibility of the aquifer and estimated its geological structure. Underground communication among the hot springs may be rather close and the hot-water in this area may have a common source.

