

箱根湯本湧泉の流出解析

大山正雄*, 水野明哲**, 平野富雄*, 荻野喜作*, 大木靖衛*

神奈川県温泉地学研究所

Simulation d'un Débit de Source Thermale

par

Masao OYAMA, Akisato MIZUNO, Tomio HIRANO, Kisaku OGINO et Yasue OKI

Institut des Sources Thermales de la Préfecture de Kanagawa

Hakone, Kanagawa

(Résumé)

La température et le niveau de la nappe phréatique des eaux thermales baisse depuis plus de 30 ans dans la station thermale de Hakone-Yumoto (Fig. 1). C'est la cause de ce phénomène que l'on a forcé trop de puits et pompé intensivement des eaux thermales.

La température de l'eau de la source de Fukuzumi s'est abaissée près de trois degrés entre 1974 et 1982 (Fig. 4). On croit que la baisse reflète la décroissance de l'eau de la température plus élevée qui jaillit à la faveur des fissures du socle du volcan de Hakone.

Le débit de la source suit sensiblement l'influence de la pluviosité. Le débit $Q(t)$ peut être représenté par la courbe de décroissance de la forme ci-dessous :

$$Q(t) = A K \exp(-t/T) + Q_b$$

où A est une constante positive, K , la pluviosité, \exp , la base des logarithmes népériens, t , le temps écoulé depuis le début de la pluie, T , la constante de temps et Q_b le débit de base.

La figure 10 montre la bonne concordance entre un hydrogramme observé et un hydrogramme calculé en 1974. Dans ce cas, T est de 42 jours.

La figure 11 donne le résultat obtenu par la même méthode et les mêmes constantes en 1982. L'hydrogramme du calcul ne correspond pas à celui de l'observation en hiver et en été. L'écart en été est due à l'augmentation forte du ruissellement direct par une série de pluie et la pluie diluvienne. L'hiver est la saison sèche ; le ruissellement en surface est même nul. Un hydrogramme calculé demeure supérieure à un hydrogramme observé. L'écart montre la décroissance du débit de base de 20 l/min pendant une période de 8 années.

* 神奈川県温泉地学研究所, 神奈川県箱根町湯本997 〒250-03

** 工学院大学, 東京都新宿区西新宿1-24-2

神奈川県温泉地学研究所報告 第15巻, 第5号 45-54, 1984

1. はじめに

湯本・塔ノ沢地域の温泉は、昭和の初期まで自然湧泉であった。昭和7年（1932）頃から温泉井の掘さくが増え、渦巻ポンプ、次いで、エアーリフトでの揚湯が始まると温泉の揚湯量は著しく増加した（表1）。温泉量の増加は、温泉水位の低下を起す結果となり、自然湧泉が次々に消えた。自然湧泉は昭和27年（1952）に9源泉残っていたが、今日では、2つの横穴湧泉（源泉番号第3号、第7号泉）が利用されているだけである。

自然湧泉の湧出量、温度、水質は、水位のみならず、降水量によっても著しく変化する。そこで、湧出量変動の主要な自然要因である降水量と湧出量の関係を調べ、次いで、人為的作用による温泉水位の低下が湧泉にどのような影響を与えているかについて解析を行なった。

2. 福住横穴湧泉

湯本・塔ノ沢の温泉は、箱根山を深く刻んだ須雲川と早川に沿って分布している（図1）。福住湧泉はこの両河川に挟まれた新时期輪山湯坂山の山麓の横穴から湧出している。横穴は大正14年（1925）

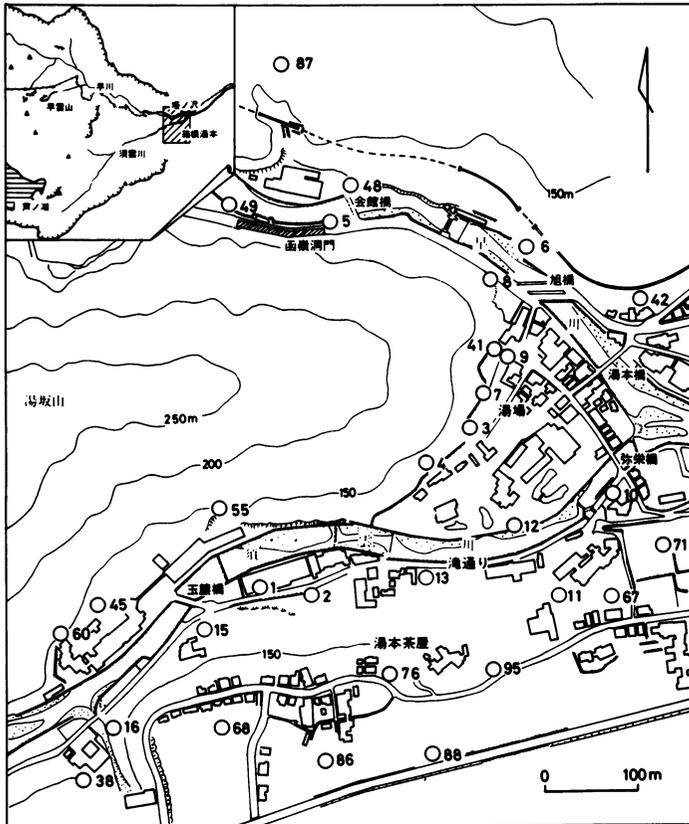


図1 箱根湯本温泉、湯場周辺の源泉分布図（番号は旧湯本町温泉台帳番号）

表1 箱根湯本・塔ノ沢温泉

調査年		総温泉量
1920年	大正10年	220ℓ/min
1932	昭和7	1630
1952	27	2810
1958	33	4360
1962	37	4580
1965	40	5050
1968	43	5290
1969	44	5260
1970	45	5270
1971	46	5610
1972	47	5580
1973	48	5410
1974	49	5890
1975	50	5640
1976	51	5850
1977	52	5640
1978	53	5420
1979	54	5577
1980	55	5944
1981	56	5680
1982	57	5994

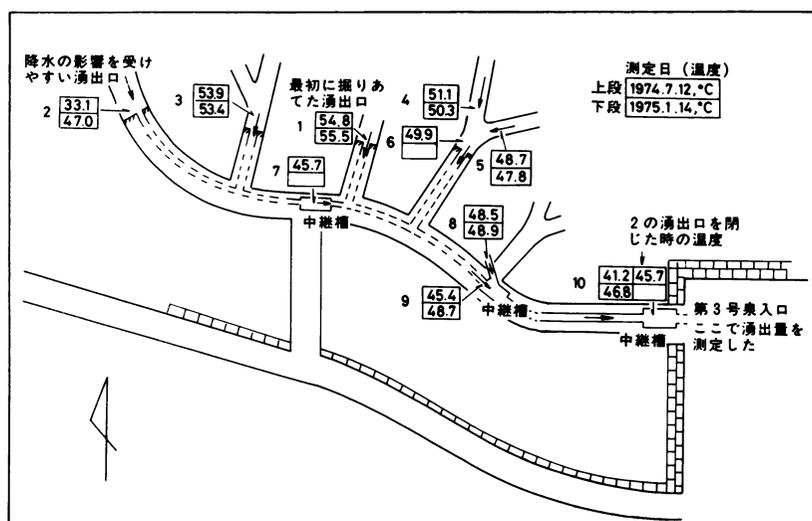


図2 福住湧泉（第3号泉）の横穴内湧出状況（1974年7月12日および1975年1月14日）

から昭和9年（1934）にかけて湯坂山の下部を構成する箱根火山基盤岩類の上部中新世須雲川安山岩類の中に掘られたもので、間口が69cm（2尺3寸）、高さが153cm（5尺1寸）、長さが67m（37間）である。福住湧泉の坑内の概略を図2に示す。坑内は枝状に分かれており、各々の亀裂から湧出する温泉を集めて利用している。泉温は亀裂によって異なっている。山腹に近い湧出孔（図中の2）の泉温は他に比べ低く、また、降水に最も影響される。

1974年から75年にかけての冬は無降水日が続き、湧出量が減少した。この時の各湧出孔の泉温は47.0～55.5℃（1975年1月14日）である。1974年6～7月は降水日が続き、7月7日の201mmの降水量で横穴湧泉の湧出量は急激に増加した。7月12日の各湧出孔の泉温は33.1～54.8℃である。この時の集湯温度は49℃から41℃まで下った。降水の影響を著しく受けやすい孔と泉温が最も高い孔以外は、冬の泉温よりも0.5～0.9℃高くなっていた。この温度上昇は気温の上昇および、温泉水位の上昇で高温の温泉の流入量が増加したためと考えられる。

湯本の気温（図3）は、最低が1月と2月に

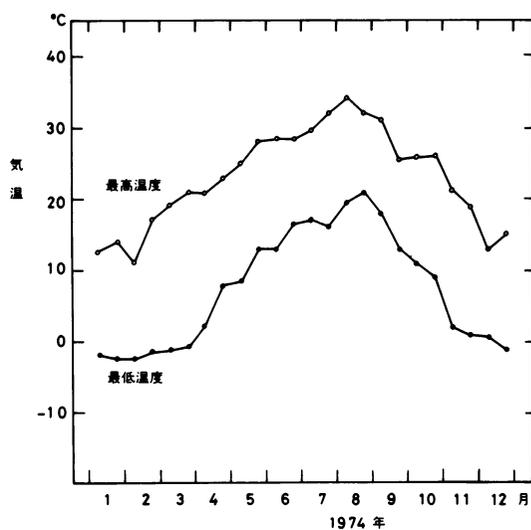


図3 箱根湯本の最高・最低気温（神奈川県気象月報、1974年）

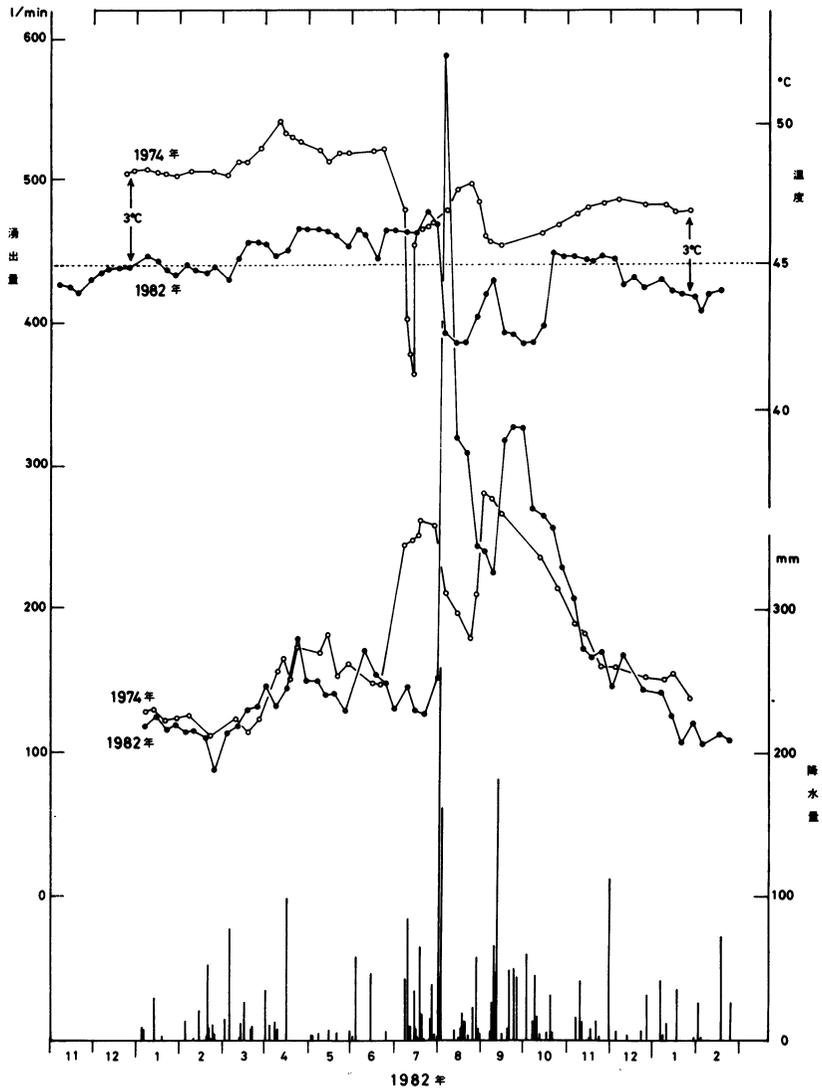


図4 福住湧泉のハイドログラフ

-2.6°Cを示し、最高が8月に34.0°Cを記録（気象月報，1974）している。気温の年間変動幅は最低・最高とも23°Cである。湧泉は降水に敏感に反応することから、泉温の変動に対して気温の影響も無視できない。

3. 湧出量と泉温の変化

図4は1982年の降水量に対する湧出量と泉温のハイドログラフである。湧出量と泉温は、降水後、短時間で変化する。湧出量は降水量にほぼ比例し、泉温は湧出量に対応していることが読み取れる。なお、図中には、1974年の湧出量と泉温を加え、両年における湧出状況の比較を行なった。

湧出量は降水量の少ない1～2月にかけて減少し、2月末に87ℓ/minを記録した。湧出量は降水量が多くなる3月中旬頃から130～140ℓ/minに増え、8月1～3日にかけての468mmの降水で、一挙に593ℓ/minに達した。

泉温は1973年11月末の44.0℃から、しだいに上昇し、1974年7月下旬に46.4℃を記録した。湧出量の著しい増加で、泉温は42.2℃まで下ったが、湧出量の減少とともに45.2℃まで回復した。しかし、湧出量が更に減少しても、泉温は上昇せず、むしろ、12月初旬頃から減少し始め、1月に14か月前の44℃に戻っている。冬に低く、夏に高くなる泉温の変化は気温に対応している。湧泉の冬と夏の温度差は約3℃である。

湧出量が著しく増加すると、泉温は急激に低下する現象があらわれている。図5は湧出量と運び出される熱量との対応を示している。湧出量と熱量とは、ほぼ比例関係にあるが、湧出量が160ℓ/minを超すと熱量の増加率が減少している。したがって、湧出量が160ℓ/minを超す場合は、浅層の冷地下水の流入量が著しく増加し、泉温を低下させるものと推定される。

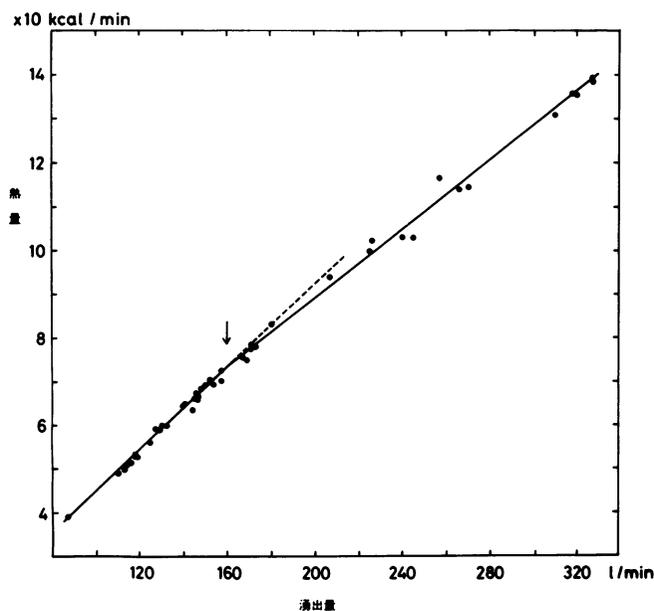


図5 湧出量と熱量 (1982)
(矢印は熱量変換点)

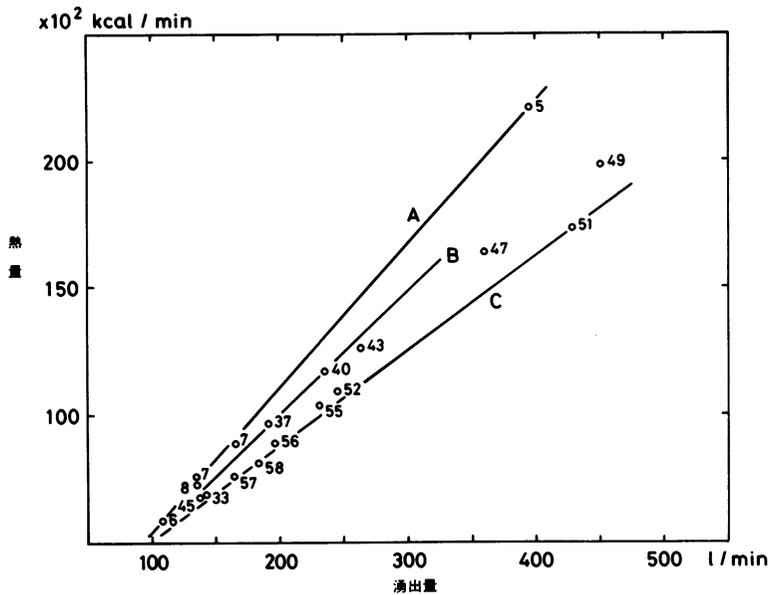


図6 湧出量と熱量の経年変化。

図中の数字は測定した昭和の年代（小田原保健所）

4. 泉温の経年変化

図4から、1974年と1982年の湧出量は、ほぼ同じハイドログラフを示しているが、泉温は約3℃、年間で0.37℃の割合で低下している。1930年（昭和5年）から1982年までの湧出量と熱量との関係を見ると（図6）、泉温は30年ほど前から低下が続いている。

福住湧泉から250m離れた須雲川の対岸（右岸沿い）にかつて自噴（1930年8月13日調査、49.8℃、72ℓ/min）していた深度205mの『きよ水源泉（第13号泉）』がある。本孔井の湧出は、1966～7年頃止まり、以来、孔内水位が低下している。1974年1月から1982年1月の間に、水位は5.6mから14.5mに、孔底温度は33.6℃から26.0℃に低下している。ところで、孔内深度20～130m間の温度低下は約3℃で、福住湧泉の場合と同じ値を示している。

5. 湧出量の解析

1974年と1982年の湧出量のハイドログラフがよく似ているので、周辺の温泉水位の低下は、福住湧泉の湧出量に関係がないかのように見える。しかし、湧泉の泉温が低温化していることから、地下深所から供給される温泉量は減少していると考えられる。

減少している温泉量を推定する一方法として、1974年の降水量で湧出量をシミュレートし、1982年との比較を行なった。湧出量の解析は菅原正巳のタンクモデル法を用いた。容器（図7）において流出孔からの水位が h_0 あり、その後水の供給がなく水量 Q が流出すると、水位の減少曲線（図8）は次式で示される。

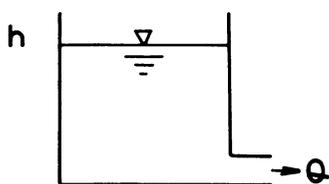


図7 タンクモデル

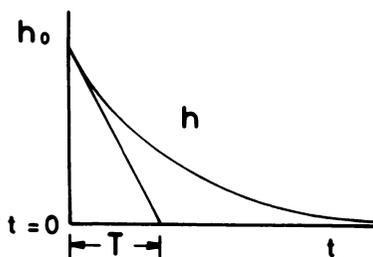


図8 水位の減衰曲線

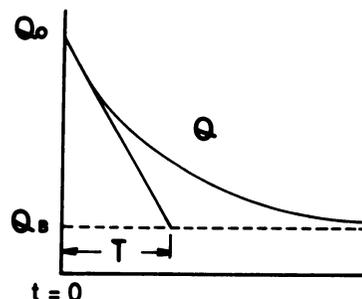


図9 湧出量の減衰曲線

$$h(t) = h_0 \exp(-t/T) \quad (1)$$

ここで、 h は t 時間後の水位、 h_0 は初期水位、 T は減衰の速度の割合を示す時定数である。時定数の逆数が減衰定数である。水位の減衰量は(1)式より

$$-\frac{dh}{dt} = \frac{1}{T}h + b \quad (2)$$

ここで、 b は定数である。(2)式の1階の線形微分方程式を解くと

$$h = -bT + C \cdot \exp(-t/T) \quad (3)$$

となる。ここで、 C は積分定数である。

初期条件 $t = 0$ のときの水位は $h = h_0$ 、 $t \rightarrow \infty$ のときの水位は $h = h_B$ とする。 h_B は基底水位とする。従って、(3)式は

$$h = (h_0 - h_B) \exp(-t/T) + h_B \quad (4)$$

となる。

地下水の流速は非常に小さいので、水位 h と流出流量 Q との関係は $h = aQ$

とみなしてよい。ここで、 a は定数である。従って、(4)式は

$$Q(t) = A \cdot K \exp(-t/T) + Q_B \quad (5)$$

$$A \cdot K = Q_0 - Q_B$$

ここで、 A : 日降水量の地下浸透定数、 K : 日降水量、 Q_0 : 初期流出量、 Q_B : 基底流出量である。(5)式を図にあらわすと図9のようになり、湧泉の流出量は時間とともに指数関数的に減衰する。湧出量を計算するにあたり、次の点を考慮した。

- 1) 1973年11月11日から1974年2月4日までの87日間の降水量は、わずか33mmである。このため、無降水時に等しい期間が長く続いたので、湧出量は111ℓ/min（2月21日）まで下った。
- 2) 1974年6月27日から毎日降水が続き、7月7日に201mmの降水によって、湧出量は急激に増加（46ℓ/min, 7月8日）した。しかし、温度上昇をはかるため、33℃に低下した湧出孔からの流入を止めると、湧出量は352ℓ/minから247ℓ/minに減少し、温度は41.2℃から45.7℃に上昇した。
- 3) 豪雨時や多雨期に生じる温度の低い浅層地下水の流入を無視した。

計算は日本電気のPC-8001を用い、3日毎の湧出量を図10に示した。実測値と計算値は比較的一致している。降水量以外は8年後も自然条件は変わらないとして、1974年の場合に求めた係数を用いて、1982

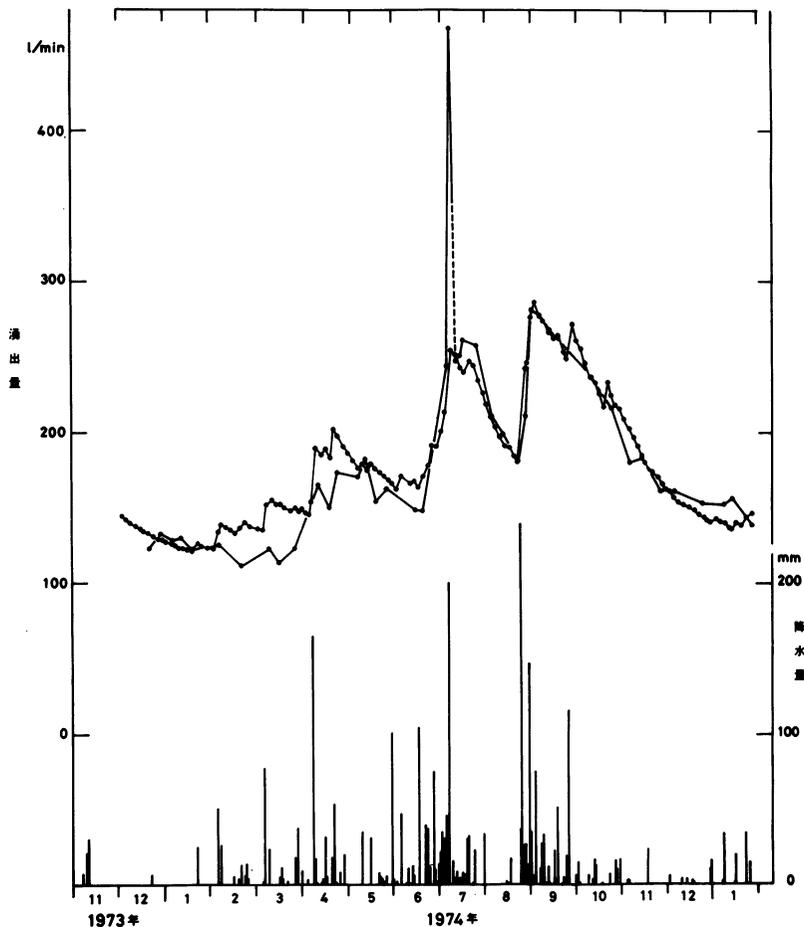


図10 湧出量の実測値と計算値（1974年）
黒丸は実測値，白丸は計算値を示す。

年の降水量で湧出量を計算したのが図8である。実測値と計算値は 降水量が増加した3月中旬から7月にかけて比較的一致しているが、降水量の少ない1～2月、多雨期の8～10月では一致しない。多雨期の不一致は、泉温が42℃まで下がっていることから、浅層地下水の流入によるものとみなせる。

降水量の少ない時期にあたる1～2月は、浅層冷地下水の流入がほとんどないので、温泉湧出量の比較の対象とすることができる。この時期の実測値は、計算値より約20 l/min少ない。したがって、

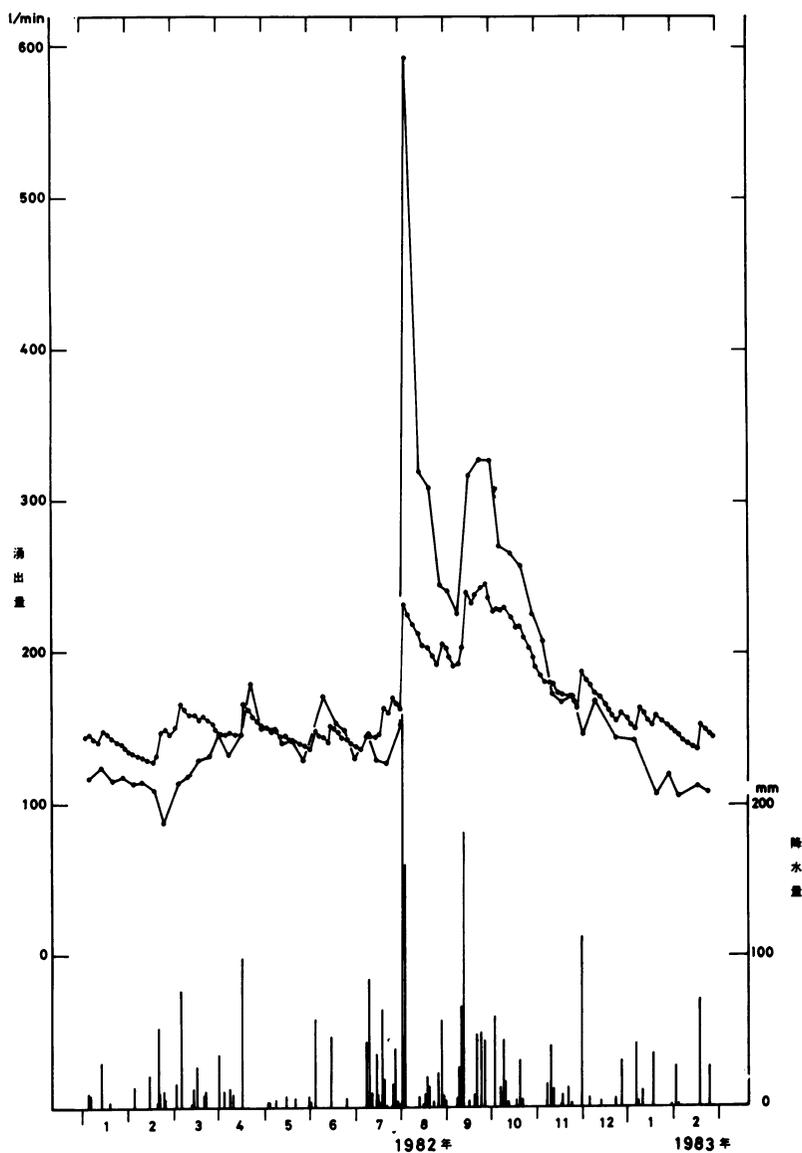


図11 湧出量の実測値と計算値(1982年)
黒丸は実測値、白丸は計算値を示す。

この量は周辺の温泉水位の低下により、温泉供給が減少した分量と考えられる。

6. ま と め

- 1) 自然湧泉は降水に敏感に反応するため、泉温も気温の変化に対応し、冬から夏にかけて約3℃上昇している。
- 2) 多雨期や豪雨時には、浅層冷地下水が著しく増加するので、泉温は低下する。降水による泉温低下は湧出量が160ℓ/minを超すと生じる。
- 3) 泉温は、気温や湧出量に対応して変動しているが、経年的には、30年ほど前から低下が続いている。最近の温度低下は、1974年から1982年の8年間に3℃、平均0.36℃/年である。この低下率は、周辺の孔井揚湯温泉の0.4~0.6℃/年（平野他1980）に相当する値である。
- 4) 湧出量と降水量との関係は、指数関数でもって、シミュレートすることができた。その結果、温泉湧出量は1974年から1982年の8年間に約20ℓ/min減少していると推定される。

7. 謝 辞

この報告書をまとめるにあたり、次の方々のお世話になった。

神奈川県温泉地学研究所 小鷹滋郎専門研究員、長瀬和雄、杉山茂夫、栗屋 徹、石坂信之主任研究員には調査に協力していただいた。平賀士郎研究部長、横山尚秀主任研究員には有益な助言および討論をしていただいた。伊東 博研究員には本解析のシミュレーションにあたり協力していただいた。以上の方々に厚くお礼を申し上げます。なお、この調査は神奈川県温泉地学研究所温泉等研究調査費によった。

参 考 文 献

- 日本気象協会横浜支部（1973~1975） 神奈川県気象月報，昭和48年12月~昭和50年1月。
- 平野富雄，大木靖衛，栗屋 徹（1972） 箱根湯本・塔ノ沢温泉の泉質，神奈川県温研報告，Vol. 3, No. 3, 109-130。
- 平野富雄，広田 茂，大山正雄，大木靖衛（1974b） 箱根湯本温泉の自然湧出泉について（その2） きよ水源泉の枯渇，神奈川県温研報告，Vol. 6, No. 1, 1-10。
- 平野富雄，大山正雄（1980） 箱根湯本温泉の自然湧出泉について，（その3） 第3号泉（福住湧泉）の経年変化，神奈川県温地研報告，Vol. 12, No 2, 23-34。
- 大山正雄，広田 茂，杉山茂夫（1980） 箱根火山における温泉の温度，昭和53~54（1978~1979） 神奈川県温地研報告，Vol. 12, No 2, 43-50。
- 大山正雄，杉山茂夫，平野富雄（1982） 箱根温泉の温度と湧出量の観測，昭和55~56年（1980~1981） 神奈川県温地研報告，Vol. 13, No. 5, 27-38。
- 小鷹滋郎，大木靖衛，広田 茂（1972） 箱根湯根・塔ノ沢温泉の湧出機構，神奈川県温研報告，Vol. 3, No. 3, 95-108。
- 小田原保健所（1983） 箱根湯本・塔ノ沢温泉の源泉調査結果。
- 菅原正巳（1972） 水文学講座7，一流出解析法一，共立出版株式会社。
- 徳 善温，梶谷行男（1974） 浅層地下水の変動解析について，東京都土木技研年報。
- 山本莊毅編（1968） 地球科学講座9，陸水，共立出版株式会社。
- 山本莊毅（1983） 地下水調査法，古今書院。