

箱根湯本湧泉の流出解析 (第2報)

大山正雄

神奈川県温泉地学研究所 *

Simulation Numerique du Débit d'une Source thermale

par

Masao OYAMA

Institut de Recherche des Sources Thermales du Département de
Kanagawa, Hakone

(Résumé)

L'estimation du débit d'une source est un problème sérieux en ce qui concerne les ressources d'eau pour divers usages. Bien que de nombreuses techniques d'estimation ont été proposées jusqu'à présent, aucune méthode simple et sûre n'a encore été établie. Nous proposons une simulation numérique qui est fondée sur une méthode approchée dite "modèle du tank" (Fig. 1). La précipitation cause l'augmentation du niveau d'eau dans le réservoir, le débit y'est proportionnel et décroît en fonction du temps après la fin de la précipitation. Un débit de base qui est supposé indépendant des variations de précipitations, s'y ajoute. Nous avons appliqué la simulation numérique à la source naturelle de Yumoto, Hakone (Fig. 2, 3). Le résultat est comparé avec le débit observé à chaque année. Les Figures 4 ~ 12 montrent la bonne concordance entre hydrogrammes observés et calculés. Les paramètres qui sont utilisés pour la simulation, sont affectés par la variation des précipitations annuelles, mais, clairement, le débit de base décroît d'année en année (Fig. 13). Ce abaissement du débit de base peut être expliqué par l'exploitation par plus de cent puits de grande profondeur (300 ~ 800 m) réalisés depuis quarante ans. Le débit total de la station thermale de Yumoto-Tonosawa a ainsi augmenté de 1,630 l/min (1930) à 5,690 l/min (1986), ce qui a entraîné l'abaissement de la pression artésienne (Fig. 14) et la baisse du débit de la source naturelle.

* 神奈川県温泉地学研究所 神奈川県足柄下郡箱根町湯本997

神奈川県温泉地学研究所報告 第20巻、第2号、43-56、1989

1 はじめに

湧泉の流出量は一降雨に対して敏感に反応するとともに一年をサイクルとして増減を繰り返している。同様の現象は浅層の冷地下水のみならず深層から由来する温泉にも認められる。降水量と流出量との関係について把握することは水収支の基礎的課題である。また、降水量と流出量との関係を定量的に明らかにすることは水利用の計画と管理に役立つのみならず、集水域における自然条件の変化、あるいは、人為的作用の湧泉に与える影響を評価することができる。

本研究では第1報（大山ら、1984）で行ったタンク・モデルのプログラムを発展させ、箱根湯本の福住湧泉を例に流出シミュレーションを試みた。そして、計算結果は実測値と比較してモデルの有効性を実証するとともに湧出量等の経年変化に関して考察を行った。なお、本報告は日本地理学会1987年度秋季学術大会での発表（大山ら、1987）に修正、加筆したものである。

2 主な記号

| | | |
|----------------------|--|---|
| R | : 単位時間当りの降水量 | [m/day] = [m ³ /m ² ·day] |
| α | : 降水量の地下水かん養率 | [-], $0 \leq \alpha \leq 1$ |
| A | : タンクの断面積 (集水面積) | [m ²] |
| h (t) | : タンク水位 | [m] |
| Q _T (t) | : タンクからの流出量 | [m ³ /day] |
| Q _B | : 基底流出量 | [m ³ /day] |
| Q _T (t) | : 総流出量 (計算値) = Q _T (t) + Q _B | [m ³ /day] |
| Q _T '(t) | : 総流出量 (計算値) = 0.694Q _T | [ℓ/min] |
| Q _M '(t) | : 実測流出量 | [ℓ/min] |
| T | : タンクの流出孔の時定数 | [day] |
| t | : 時間 | [day] |
| (dh/dt) ₁ | : 降水による水面上昇速度 | [m/day] |
| (dh/dt) ₂ | : 流出による水面降下速度 (dh/dt) ₂ < 0 | [m/day] |

3 タンクモデル

降水量 R [m/day] のうち地下水に涵養される割合を α とすると、対象とする面積 A [m²] から地下水に涵養される水量は、 αRA [m³/day] である。この量が同じ断面積 A を持つタンクに流入するものとする (図1)、タンクの水位 h (t) の降水による上昇は次式により表される。

$$A(dh/dt)_1 = \alpha RA \quad (1)$$

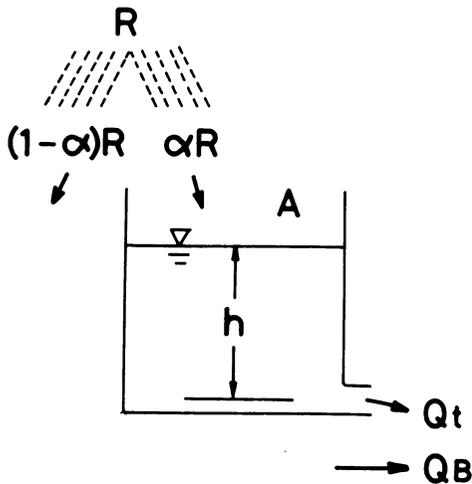


図1 タンクモデル

(R: 降水量、 α : 降水量のタンクへの流入率、A: タンクの断面積、h: タンクの水位、 Q_t : タンクからの流出量、 Q_B : 基底流出量)

Fig. 1 Modèle du tank

(R: Précipitation, α : Taux d'infiltration, A: Superficie, h: Niveau d'eau, Q_t : Débit du tank, Q_B : Débit de base).

また、自然流出による水位低下は時定数を T として、

$$(dh/dt)_2 = -h/T \quad (2)$$

の線形モデルを仮定する。一方、質量保存の法則によりタンクからの流出量 Q_t [m^3/day] と水位の低下は

$$A(dh/dt)_2 = -Q_t \quad (3)$$

の関係になる。したがって、タンクの水位変化は

$$\begin{aligned} (dh/dt) &= (dh/dt)_1 + (dh/dt)_2 \\ &= \alpha R(t) - h/T \end{aligned} \quad (4)$$

となる。1日分の変化量に Δ を付けて表せば

$$R\Delta t = \int_0^{\Delta t} R(t)dt$$

であるから

$$\Delta h/\Delta t \doteq \alpha \bar{R} \quad (5)$$

となる。 \bar{R} は1日の平均降水量である。したがって、1日の始めに添字 j 、24時間後の時点に添字 $j+1$ を付けると、(4)式は、Cranck-Nicolson 表示から、

$$(h_{j+1} - h_j)/\Delta t = \alpha \bar{R}_j - (h_j + h_{j+1})/2T \quad (6)$$

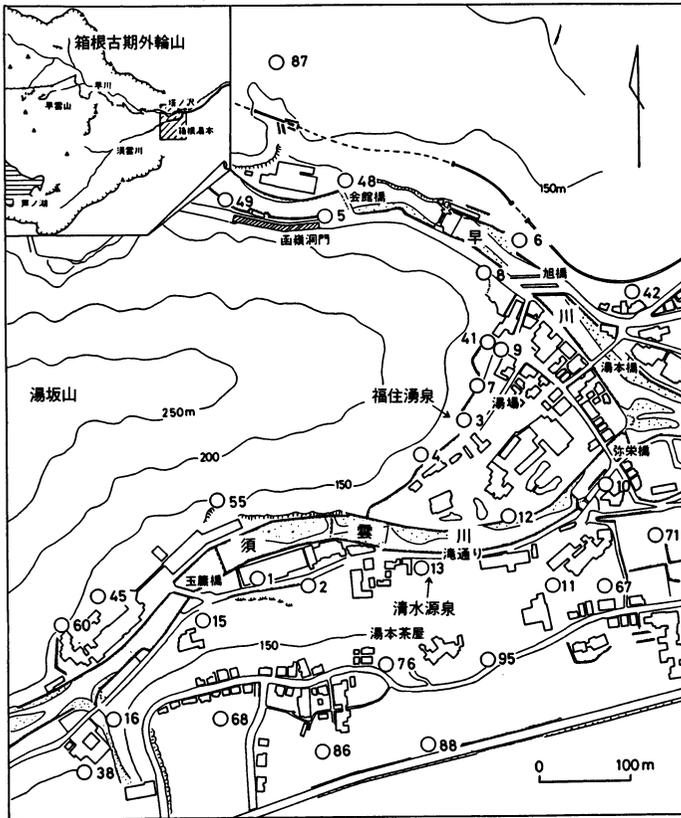


図2 箱根湯本福住湧泉(No. 3)の位置
(図中のNo. 3と7は湧泉、他の番号はボーリングによる源泉)

Fig. 2 Localisation de la source de Fukuzumi (No. 3) de la station thermale de Yumoto, Hakone.
(Sources naturelles (No.3 et 7) et forages (autre No.).)

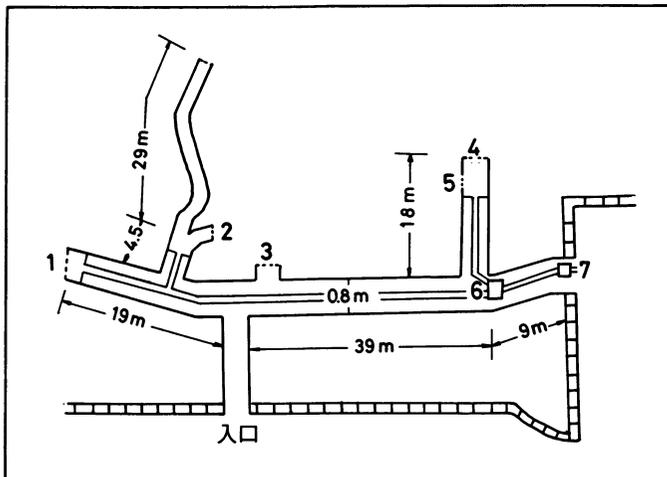


図3 福住湧泉の隧道内の概略図
(割れ目孔の湧泉温度：No. 1 (25～50℃)、No. 3 (54～56℃)、No. 4 et 5 (54～56℃)、全湧出量の測定はNo. 7)

Fig. 3 Schéma du réseau souterrain de la source de Fukuzumi.
(Température des sources No. 1 (25～50℃), No. 2 (54～56℃), No. 4 et 5 (54～56℃), Observation du débit total au point No. 7.)

を得る。

$\Delta t = 1$ 日 とすれば、 $r = R \Delta t$ は 1 日の降水量となる。(6)式を整理して未知数 h_{j+1} について解けば

$$h_{j+1} = \{2T\alpha r_j + h_j(2T - \Delta t)\} / (2T + \Delta t) \quad (7)$$

として当日の降水量 r_j と初めの水位 h_j から 24 時間後の h_{j+1} を求める式が得られた。この結果を(2)と(3)から得られた

$$Q_t = Ah/T$$

に代入することによりタンクからの流出量 Q_t が求められる。降水の影響を受けない一定の基底流出量 Q_B がこれに加わるものとする、総流出量は

$$Q_T = Q_t + Q_B \quad (8)$$

となる。なお、実測値との比較を行うために $[\text{m}^3/\text{day}]$ を $[\text{l}/\text{min}]$ に単位換算して結果を表示した。

4 計算結果と考察

4.1 福住湧泉の概要

箱根湯本温泉は箱根カルデラ内を流れる早川と須雲川の合流点付近で湧出している(図2)。福住湧泉はこの両河川に挟まれた新时期輪山湯坂山の基盤岩類である早川凝灰角礫岩僧および須雲川安山岩類中に掘られた横穴隧道内から自然湧出している。横穴隧道は明治30年代に掘削されたものである。隧道は枝状に分かれており、総延長が約140mである(図3)。温泉は岩盤の割れ目から湧出している。現在の主な湧出口は4箇所である。それぞれの湧出温度は異なっている。

No. 1：湧出温度は25～50℃である。湧出口の割れ目が西の方向(横穴の奥)に向かって延びている。流出量は降水に敏感に反応し、渇水期には枯渇する。春から夏にかけて流出を始め、量の少ないときは温度が50℃に達する。しかし、5～10月に起きる多雨時に流出量が著しく増大し、温度が著しく低下するので採水を止めることがある。

No. 2：湧出温度は54～56℃である。湧出量は少ないが、温度が最も高い。流出量と温度の変化は小さい。

No. 4と5：湧出温度は45～50℃である。湧出量は総湧出量の80%以上を占めている。

No. 2、No. 4、No. 5は隧道の底の割れ目から湧出していることが確認できる。これらの湧泉はNo. 6で全て合流する。総湧出量はNo. 7で測定される。総湧出量は降水に敏感に反応するので、本論のタンクモデルの有効さの検証に適していると考えられる。

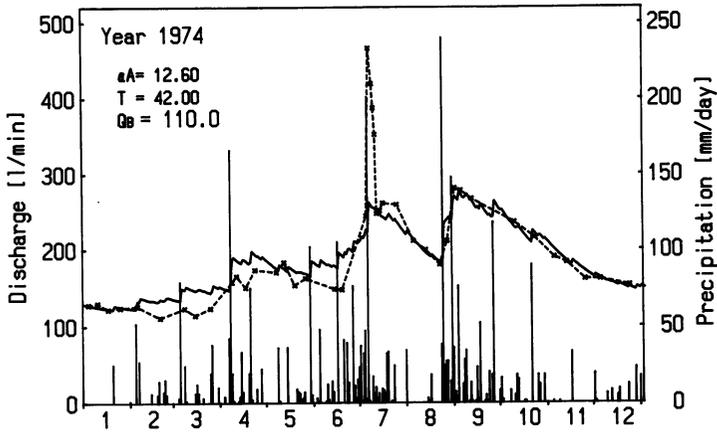


図4 福住湧泉流出量シミュレーション
(破線：実測流出量、実線：シミュレーション結果、 α ：降水の地下水涵養量、A：面積、なお、 αA は 10^{-3} 倍で表示、T：時定数(日)、 Q_B ：基底流出量)

Fig. 4 Comparaison entre un hydrogramme observe (Trait interrompu) et un hydrogramme calculé (Trait plein) sur la source de Fukuzumi (1974).
 α : Taux d'infiltration de la précipitation, A: Superficie, T: Constante de temps, Q_B : Débit de base.

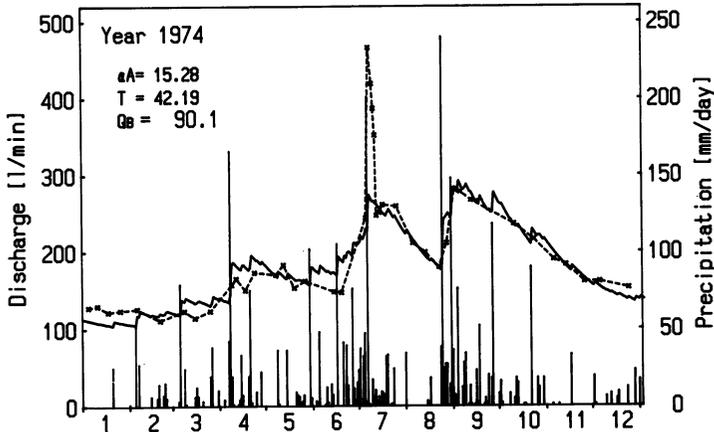


図5 自乗誤差による最適化 (1974年)

Fig. 5 Optimisation par l'erreur carrée (1974).

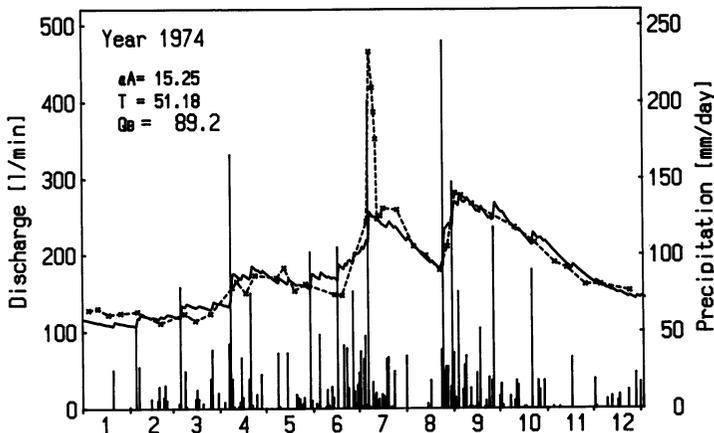


図6 絶対誤差による最適化 (1974年)

Fig. 6 Optimisation par l'erreur absolue (1974).

4.2 計算例

福住湧泉における流出量の実測値と上記のシミュレーションによる計算値とを対比した例を図4に示す。同図は昭和49年(1974)1月から12月までの流出量の比較である。図中の実線はシミュレーション結果を、×印は実測流出量を表している。また、縦線は1日の降水量である。シミュレーションではタンクの初期水位の影響を少なくするため、半年前から計算を開始している。用いられたパラメータはかん養率と集水面積の積 αA (以後、等価集水面積)、時定数 T 、および、基底流出量 Q_B である。図4で用いた3つのパラメータは、多数の試行錯誤の中から適当と判断された前回(大山ら、1984)の値である。湧出量の実測値と計算値とを比べると、8月中旬以降は良く一致しているが、2月から6月の間は計算値がやや多めで、7月は少なめである。

4.3 パラメータの最適化

図4で行ったシミュレーションでは適切なパラメータを選ぶのに多数の試行を行い、それらを比較して見当をつけていた。しかし、パラメータの選択方法が確立しなければ再現性も定量的な比較も得られないであろう。実測値と計算値との一致度を表す非負の評価関数としては、自乗誤差の積分

$$J_1 = \left\{ \frac{1}{(t_2 - t_1)} \int_{t_1}^{t_2} (Q_T^* - Q_M^*)^2 dt \right\}^{1/2} \quad (9)$$

あるいは、絶対誤差の積分

$$J_2 = \frac{1}{(t_2 - t_1)} \int_{t_1}^{t_2} |(Q_T^* - Q_M^*)| dt \quad (10)$$

表1 最適化による各年のシミュレーションパラメータ

Tableau 1. Paramètres de simulation de l'optimisation pour chaque année. (α : Taux d'infiltration de la précipitation, A: Superficie, T: Constante de temps, Q_B : Débit de base, J_2 : Débit d'erreur, R: Précipitation).

| 調査年 | 等価集水面積 | 時定数(日) | 基底流出量 | 誤差量 | 年間降水量 |
|-------|-------------------------------------|-------------|-----------------------------|---------------------------|--------------|
| année | αA ($\times 10^3 m^2$) | T (jour) | Q_B^1 (ℓ / min) | J_2 (ℓ / min) | R (mm/an) |
| 1974 | 15.25 | 51.33 | 89.2 | 12.0 | 3,229 |
| 1982 | 20.36 | 26.03 | 86.3 | 19.6 | 2,532 |
| 1983 | 18.22 | 30.63 | 64.6 | 23.0 | 3,226 |
| 1984 | 10.34 | 95.04 | 64.8 | 10.0 | 1,543 |
| 1985 | 14.02 | 50.82 | 57.1 | 19.5 | 2,989 |
| 1986 | 11.38 | 56.05 | 73.0 | 9.4 | 2,243 |
| 1987 | 6.51 | 40.69 | 76.3 | 4.4 | 1,766 |
| 平均 | 13.72 | 50.08 | 73.04 | 14.0 | 2,504 |

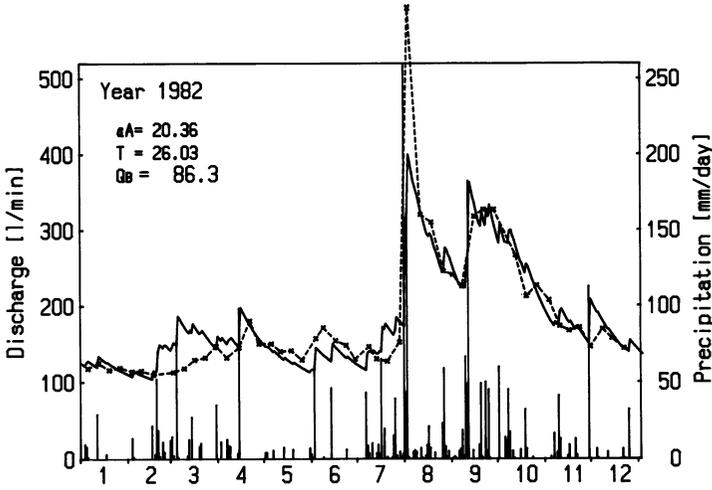


図7 流出量シミュレーション (1982年)

Fig. 7 Simulation du débit de 1982.

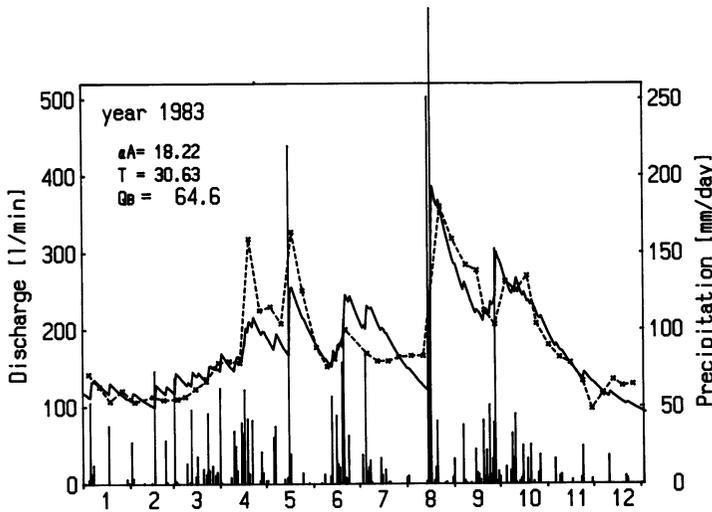


図8 流出量シミュレーション (1983年)

Fig. 8 Simulation du débit de 1983.

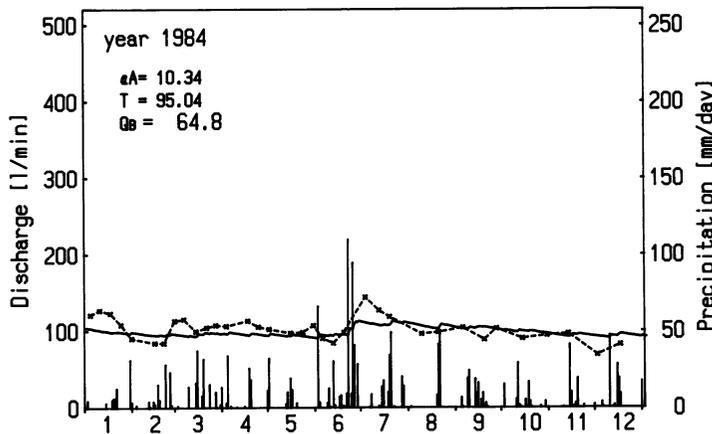


図9 流出量シミュレーション (1984年)

Fig. 9 Simulation du débit de 1984.

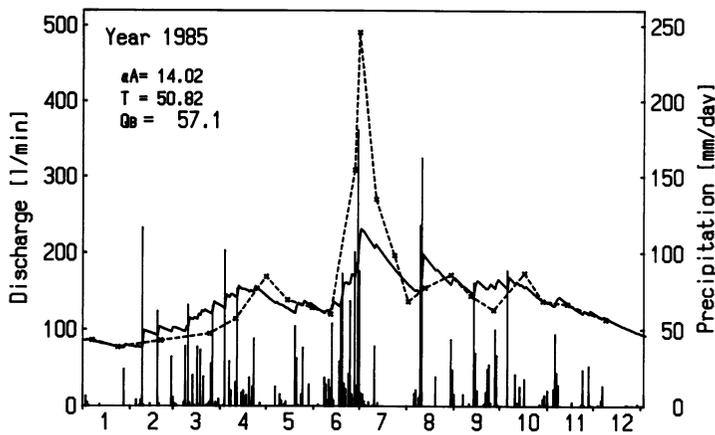


図10 流出量シミュレーション
(1985年)

Fig. 10 Simulation du débit de 1985.

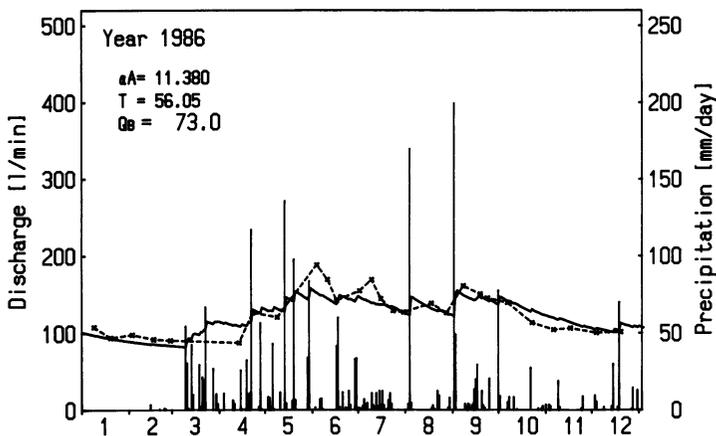


図11 流出量シミュレーション
(1986年)

Fig. 11 Simulation du débit de 1986.

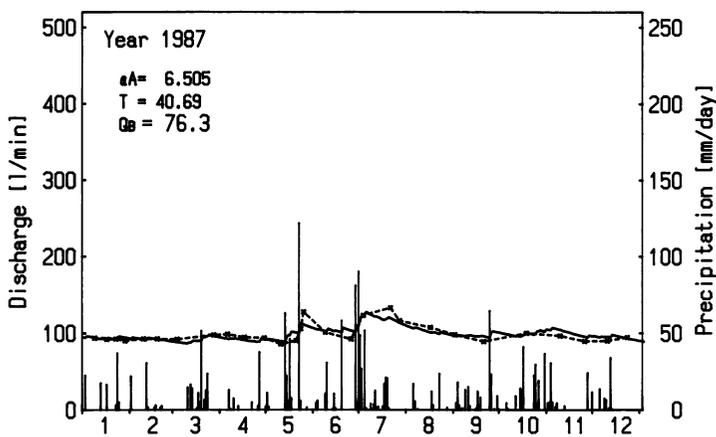


図12 流出量シミュレーション
(1987年)

Fig. 12 Simulation du débit de 1987.

が考えられる。ここで、 t_1 と t_2 は評価を行う時間範囲の始点と終点である。1974年のデータをもとに上記2種類の評価関数による最適化を行った結果を図5および図6に示す。

一般に自乗誤差の積分を最小にするという操作では、計算値と実測値とのずれの大きい部分が強い影響力を持つことになる。両図の比較で言うなら、図5では7月上旬のピークに引っ張られ、それ以外の部分が全体的に高目となっている。他方、絶対誤差による最適化の図6では全般的に誤差が分散されていて一致度はすぐれているといえる。したがって、以後は絶対誤差 J_2 による評価を行うことにする。

5 結果と考察

パラメータを最適化して得られた昭和57年(1982)から62年(1987)までの各年毎の数値シミュレーション結果を図7から図12に示す。なお、昭和50年(1975)から56年(1981)までの間は実測値の欠落があって計算値との比較ができなかった。計算値は、年により降水量の違いや測定回数の粗密度などから程度の差はあるが、おおむね実測値とよく合っている。昭和49年(1974)の場合、7月6日から12日にかけて計算値と実測値との一致度がよくない。この時には6月17日から7月6日までの19日間に446mmと7月7日の201mmの降水によって、渇水期には流出していないNo.1の割れ目から不圧状の冷地下水が多量に流入していた。No.1からの流入を止めた(7月12日)後には実測値と計算値とはよく一致している。このことから、数値モデルの妥当性が確認できるとともに、福住湧泉が被圧泉であることを示唆している。

最適化で得られた各年のパラメータの値を表1に示す。この内、基底流量の経年変化が図13である。同図から基底流量は経年的に減少していることが認められる。この減少傾向は福住湧泉から130m離れた須雲川対岸の清水源泉(第13号泉)の水位の経年的低下(図14)に対応するものであり、温泉の涸渇化を示している。昭和61年の基底流量は49年の81.8%である。この量は61年の最高 Cl^- 濃度が49年の83.1%に減少していることとほぼ一致している(大山ら、1988)。したがって、温泉湧出量の経年的減少は数値シミュレーションからも確認できた。

時定数は平年26~56日の範囲を変動しているが、異常渇水年となった昭和59年には95日を得た。時定数が地下水の循環速度や滞留時間に対応するならば次のことが考えられる。福住湧泉は湧出量が著しく増加するとNo.1からの流入を止めても温度と Cl^- 濃度が減少する。このことから福住湧泉は浅層冷地下水と地下深所から上昇してきた熱水との混合泉である。また、横穴隧道の各湧出孔により温度と溶容量が異なっていることも、福住湧泉はいろいろな流動過程を経た水が湧出点付近で混合して流出している。各々の流動過程の水は循環速度や滞留時間が異なっている。このため多雨期には滞留時間の短い浅層地下水が多量に混入するので、平均化された時定数は短くなる。一方、渇水期には地下水への涵養量が減少する。このため、滞留時間の長い深層地下水が多くなるので、時定数は長くなる。したがって、最適化で得られた1年間の平均時定数はその年の降水量の寡多に大きく影響される。

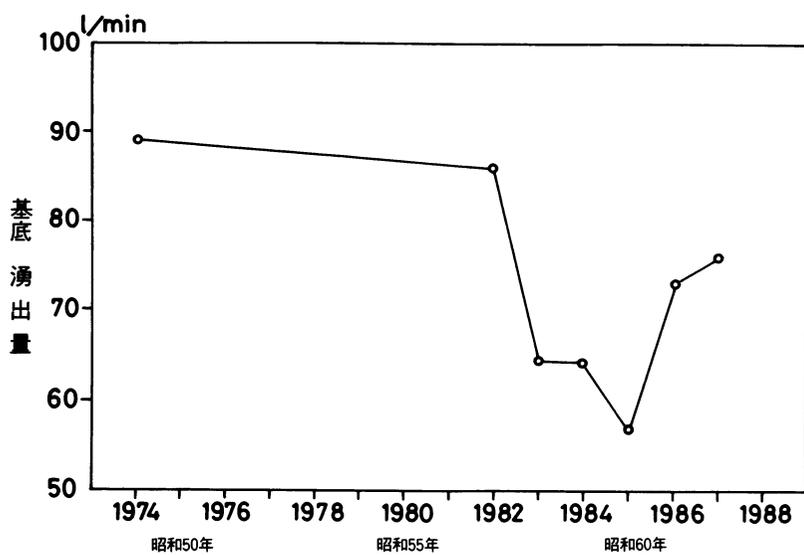


図13 基底湧出量の経年変化

Fig. 13 Variation seculaire du débit de base.

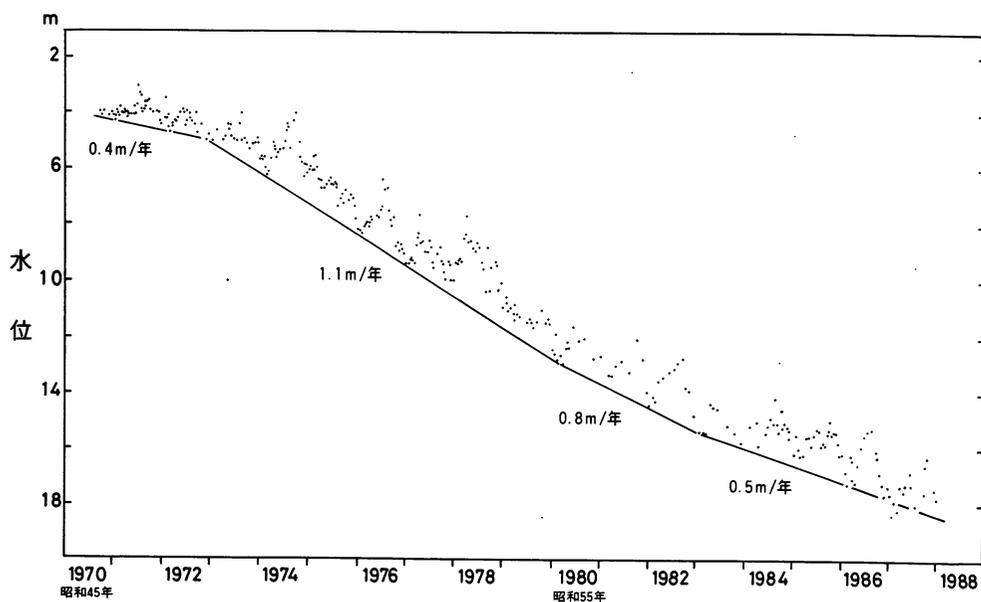


図14 箱根温泉水位の経年変化 (第13号泉)

Fig. 14 Variation seculaire du niveau d'eau thermale de Yumoto (Forage No. 13), Hakone.

6 まとめ

降水量に対して一次遅れの性質を持つタンクモデルを用いて、湧泉の流出シミュレーションを行った。箱根湯本の福住湧泉を例にとり、シミュレーション結果を実測値と比較し、モデルの妥当性を確認した。現象を支配する等価集水面積、時定数、基底流出量の3つのパラメータを各年毎に最適化し、それらのパラメータの変化を明らかにした。その結果、基底流出量は経年的に減少の傾向が認められた。

7 謝辞

この報告書をまとめるにあたり、福住湧泉所有者の福住旅館福住修治氏、同旅館の菊池辰見氏と秋山健吉氏、工学院大学の水野明哲助教、箱根町消防署、温泉地学研究所の大木靖衛所長と平野富雄専門研究員、同所諸星忠義管理課長をはじめ管理課の方々にはお世話になった。以上の方々に厚くお礼申し上げる。なお、この研究は神奈川県温泉地学研究所温泉湧出機構研究調査費による。

8 参考文献

- 大山正雄、水野明哲、平野富雄、荻野喜作、大木靖衛（1984）：箱根湯本湧泉の流出解析、神奈川県温地研報告、Vol.15、No.5、45-54.
- 大山正雄、鈴木正明、平野富雄（1988）：箱根湯本福住湧泉の湧出機構について、神奈川県温地研報告、Vol.19、No.3、37-54.
- 大山正雄、水野明哲（1987）：箱根湯本湧泉の湧出解析、日本地理学会予稿集、No.32、60-61.



写真1 隧道の入口

Photo. 1 Entrée de Fig. 3.

写真2 隧道の内部

Photo. 2 Interieur du réseau souterrain.





写真3 湧出地点No. 4

Photo. 3 Point No. 4 de Fig. 3.

写真4 湧出量の測定

Photo. 4 Mesure de débit total au point No. 7.

