

## 箱根姥子温泉の湧出量の変化

大山正雄\*、平野富雄\*、大木靖衛\*\*

神奈川県温泉地学研究所

Decreasing of the Ubako Hot Spring discharge, Hakone

by

Masao OYAMA, Tomio HIRANO and Yasue OKI

Hot Springs Research Institute of Kanagawa Prefecture

Hakone, Kanagawa

(Abstract)

Ubako hot spring is an ephemeral spring and issues from the avalanche debris of Mt. Kamiyama in Hakone caldera. The water has temperature ranging between 45°C and 53°C, and its pH is at 2 to 3. The spring has been believed to have a medical virtue for eye disease. Since 1966, the spring discharge have been decreased. The peak of hydrograp reached more than 2,500 ℓ/min till 1974 and became less than 1,000 ℓ/min in 1986. The authors apply a tank model to analyze the lowering of the Ubako hot spring discharge based on observed discharge and precipitation data. The numerical simulation agreed satisfactory with measured values. The results are as follows.

- 1) Almost 80 to 90% of newly percolated water into the Ubako thermal system discharges in 3 months.
- 2) The spring discharge had considerably dropped in 1966~1967 and has been keeping the smaller value until the present. The decreasing was attributed to the apperance of water wells with a discharge of about 1,200 ℓ/min (1,700m<sup>3</sup>/day), which were drilled in the Ubako hot spring area for the period from 1966 to 1973.

---

\* 神奈川県温泉地学研究所 箱根町湯本997 〒250-03

\*\* 新潟大学積雪地域災害研究センター 新潟市五十嵐二の宮8050 〒950-21

神奈川県温泉地学研究所報告 第22巻, 第3号, 1-26, 1991.

## 1 はじめに

姥子温泉は箱根火山中央火口丘神山（標高1,438m）の北西斜面の中腹（標高889m）に位置している自然湧泉である（図1、写真1、2）。姥子温泉の歴史は平安時代の末、天喜3年（1055）まで遡ることができる。足柄山の金太郎が眼を患った時、この湧泉で治したという伝説がある。現在では、姥子温泉が箱根に残っている昔からの湯治場（秀明館、写真3）である。姥子温泉の湧出量は20年前から年々減少し、涸渇化の傾向にある。涸渇化の原因として、この湧泉の上流での掘削井（図2）による温泉と浅層冷地下水の採取が考えられる。温泉井が新規に掘削されたとき、姥子温泉への影響調査が行われた。しかし、姥子温泉の湧出量は降水に敏感に反応するため、掘削井の揚水による影響の有無は特定できなかった。

本報告の数値シミュレーションによって姥子温泉と新規源泉との関係を再検討したところ、新規源泉が姥子温泉に影響を与えていることが明らかになった。なお、本報告の一部は、1989年度日本温泉科学会（大山、1989）で発表した。

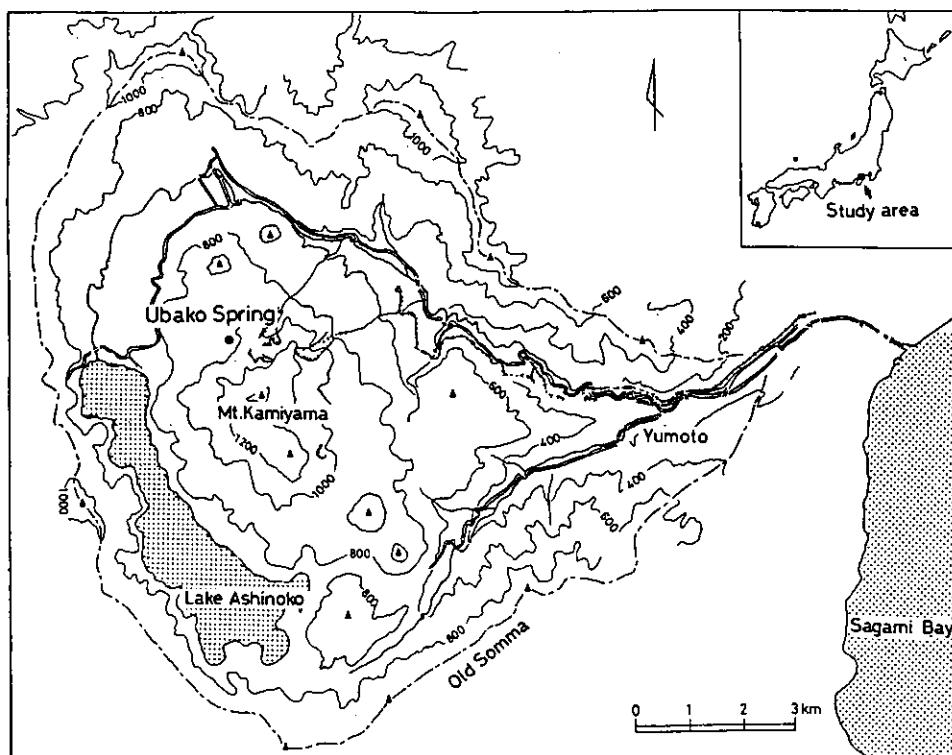


図1 箱根姥子湧泉の位置

Fig. 1 Location of the Ubako spring

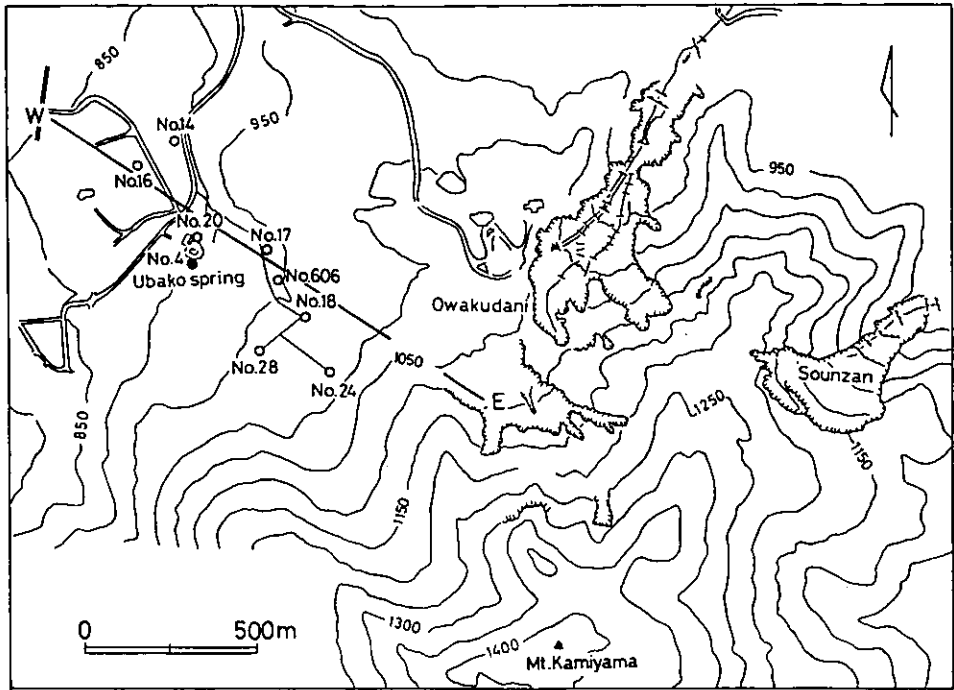


図2 姥子湧泉(●)と温泉井(○)の分布

Fig. 2 Distribution map of the Ubako spring(●) and drilled wells of thermal water(○)

## 2 姥子温泉の概要

姥子温泉(元箱根第4号)は神山山崩れ堆積物の中を大涌谷噴気地帯方面から流下してきた浅層地下水が中腹の地形変換点で湧出したものである。久野(1952)によれば、神山山崩れ堆積物は、大涌谷付近で起きた水蒸気爆発によって山体の一部が崩壊し、土石流となって北西斜面に流下したもので、約3,100年前(大木・袴田、1975)に形成された。

姥子温泉の泉質はpH 2~3の酸性硫酸塩泉である。湧出量は冬期に枯渇するが、降水量が10日間積算で80~120mmに達すると、6日後に自然湧出が始まる(大木ら、1969)。湧出時期はおおむね3月頃である。湧出期間中の湧出量は500~600ℓ/minであるが、一時的に3,000ℓ/minを越すことがある(広田ら、1976)。湧出期間中の温度は45~53℃の範囲にあり、湧出量が1,000ℓ/minを超しても44℃を下がることはない(大山ら、1985)。

図3は姥子周辺の地質断面図である(大木ら1969)。温泉の主要な帯水層は、神山山崩れ堆積物と地表から300~400mの部分に存在し、この間に宙水的な帯水層が分布している。姥子温泉の周辺では1965年頃から温泉採取のボーリング掘削が始まり、姥子温泉への影響関係が問題になっていた。



写真1 神火山崩れ堆積物と湧泉

神山の蒸気爆発（約3,100年前）によって生じた神火山崩れ堆積物は仙石原に流下し、水流をせき止めて芦ノ湖（左端）をつくった。山崩れ堆積物の末端にはイタリー湧泉群が、中腹の地形変換点に姥子湧泉が分布している。中央の池はイタリー湧泉によるものである。



写真2 姥子湧泉（中央火口丘神山）

金太郎の眼病を治したとの伝説をもつ姥子湧泉（52℃）は神山中腹の神火山崩れ堆積物中から流出している。



写真3 姥子秀明館  
箱根に残る唯一の湯治旅館



写真4 湧出量の測定水路

表1 箱根大涌谷の月平均降水量 (1966年~1987年)

Table 1 Monthly mean precipitation at Owakudani, Hakone (1966~1987)

降水量 (mm)	1月	2月	3月	4月	5月	6月	7月	8月	9月	10月	11月	12月	平均	合計
	111	159	310	350	307	432	424	468	385	277	174	101	292	3,498

### 3 姥子付近の降水量

箱根山は伊豆半島から丹沢山塊に延びている多雨帯（レインバンド）の中でも降水量の多い地域である。特に、中央火口丘での降水量は多い。箱根ロープウェイ大涌谷駅（標高1050m）での測定によれば、1966~1987年の22年間における年間降水量は2,405mm~4,688mm、平均3,501mmである。月間降水量は6月から8月にかけて400mm以上になり、11月になると174mmに、12月には100mmに減少する（表1）。姥子温泉の湧出に必要とされる月間降水量は、大木らの調査（1969）から200mm以上と推定されている。その時期はおよそ3月から10月である。

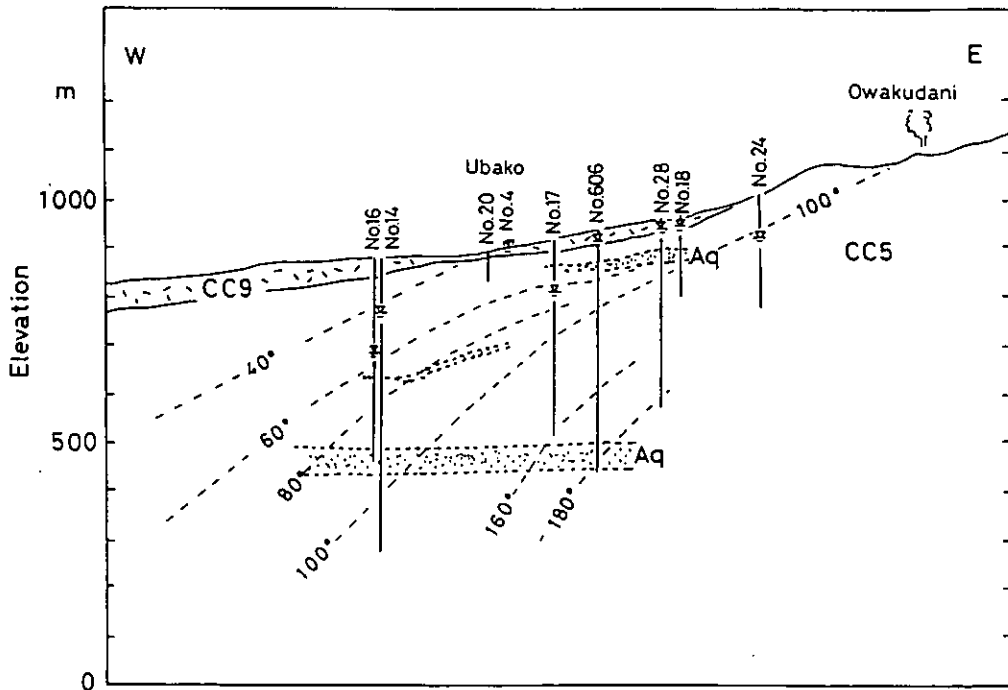


図3 姥子周辺の地質断面図 (図2のW-E)(大木ら、1969原図)、

CC5 : 神山溶岩類、CC9 : 神山山崩れ堆積物、Aq : 主要帯水層  
 Fig.3 Geological profile along W-E in Fig.2 (after Oki et al.1965)

CC5 : Mt.Kami lavas, CC9 : Mt.Kami avalanche debris, Aq : main aquifer.

#### 4 湧出量の数値シミュレーション

湧泉の流出量は一降雨に対して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を把握することは水循環の基礎的課題の一つである。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洪水対策（高水流量）、水利用対策（低水流量）にとって役立つのみならず、集水域における自然条件の変化、あるいは、人為的作用の水文環境に与える影響を評価することもできる。降雨と流出との応答関係についてはさまざまなモデルが提案されている。降雨が地中に浸透してから流出に至る循環過程の物理的機構が複雑なため簡便で精度のよい予測方法は確立されていない。

流出現象の解析方法には、ハイドログラフに含まれるパラメータと流域特性との間の関係から湧出現象を解析する研究と、降水量と流出量の資料だけから流域の応答をいかに合理的に求めるかという研究との二種類に大別される。

前者は流域の水文特性を考慮してハイドログラフを合成しようとするものである。パラメーターとしては貯流係数、時間の遅れなどの要因、流域特性としては流域面積、地形勾配、地質条件、植生などが上げられる。この方法は、パラメーターと流域特性の間の諸関係が確立していれば、降水量と流出量との資料が不十分でも流出量を予測することができる。しかし、各要因の水文特性を把握することは理論的に可能でも実際的には非常に困難であり、近い将来においても解明し尽くされる展望は小さい。

後者は流域をひとつのシステムとしてマクロに捉えるもので、入力と出力との間に介在する要因は問わない考え方である。しかし、入力としての降水量と出力としての流出量のみが把握の困難な諸要因の内で測定がもっとも容易であり、高い精度の得られる資料であることは重要である。この方法の原型として単位図法（unit hydrograph method）がある。単位図法は1932年にアメリカの Sherman により提出された最初の流出解析法であり、今日も広く世界に用いられている。現実の流出現象は非線形であるが、単位図法では降水量と流出量との関係を線形と仮定して解析を試みている。このため、単位図法は長期流出に対しては適合性が良いが、短期流出には適合性が悪い（金丸・高樺、1983;高瀬、1978）。菅原のタンク・モデル（菅原、1972）は流出過程の非線形性をうまく取り入れたもので、実用上も十分に精度があることが広く認められている（日野・長谷部、1985;椎貝、1985;日野、1986）。

タンクモデルの長所は現実の流出機構に近い表面、中間、地下水流出成分という物理的概念から成っている。また、流出の時間遅れを表すことができ、短期流出のみならず長期流出にも同時に適用が可能であるので実際の流出とよく合うと評価されている。短所としては、実際の流域はタンクモデルのように単純なシステムではなく、個々の水文的要因を追求することが困難である。しかしながら、タンクモデルは便宜的な手法ではあるが、流出変化の原因をシステム自体の変化と捕らえるならばシステムについての考察も可能である。

姥子温泉は集水面積がたかだか1 km<sup>2</sup>程度での浅い地下水であり、湧出機構も図3の地質断面図から

比較的単純であると想定される。また、冬期には涸渇し、降雨と湧出との間に非線形的現象も認められることから、タンクモデルのよいケーススタデーになりうる地域である。そこで、本研究はタンクモデルを用いて姥子温泉の流出解析を行った。一般に、タンクモデルは多数のタンクの組合せによって計算精度をよくすることに主眼を置いており、パラメータの物理的意味付けが十分でないように思われる。本研究ではパラメータは Buckingham のパイ定理 (Buckingham's  $\pi$  theorem) により無次元化してその数を整理し、これまで軽視されている時定数などの物理的意味付けを行い、降水量と湧出量との関係、地下水の入れ替え時間などに関して考察した。あわせて、姥子周辺における地下水開発が姥子温泉に与えた影響についても検討した。

#### 4-1 主な記号

R	: 単位時間当りの降水量	$[m/day] = [m^3/m^2 \cdot day]$
$\alpha$	: 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)	$[m^2]$
$A_1$	: 第 1 タンクの断面積 (集水面積)	$[m^2]$
$A_2$	: 第 2 タンクの断面積 (集水面積)	$[m^2]$
H	: 第 1 タンクの水位の閾値 (Threshold)	$[m]$
$h_1(t)$	: 第 1 タンクの水位	$[m]$
$h_2(t)$	: 第 2 タンクの水位	$[m]$
$\nu$	: タンクの湧出孔の湧出係数	$[m^2/day]$
$\nu_{11}$	: 第 1 タンクの湧出孔 $a_{11}$ の湧出係数	$[m^2/day]$
$\nu_{12}$	: 第 1 タンクの湧出孔 $a_{12}$ の湧出係数	$[m^2/day]$
$\nu_2$	: 第 2 タンクの湧出孔 $a_2$ の湧出係数	$[m^2/day]$
$Q(t)$	: タンクの湧出孔からの湧出量	$[m^3/day]$
$Q_{11}(t)$	: 第 1 タンクの湧出孔 $a_{11}$ からの湧出量	$[m^3/day]$
$Q_{12}(t)$	: 第 1 タンクの湧出孔 $a_{12}$ からの湧出量	$[m^3/day]$
$Q_2(t)$	: 第 2 タンクの湧出孔 $a_2$ からの湧出量	$[m^3/day]$
$Q_{base}$	: 基底湧出量	$[m^3/day]$
$Q_T(t)$	: 総湧出量 (計算値) $= Q_2(t) + Q_{base}$	$[m^3/day]$
$Q_T^*(t)$	: 総湧出量 (計算値) $= 0.694 Q_T(t)$	$[l/min]$
$Q_M^*(t)$	: 実測湧出量	$[l/min]$
T	: タンクの湧出孔の時定数	$[day]$
$T_{11}$	: 第 1 タンクの湧出孔 $a_{11}$ の時定数	$[day]$
$T_{12}$	: 第 1 タンクの湧出孔 $a_{12}$ の時定数	$[day]$
$T_2$	: 第 2 タンクの湧出孔 $a_2$ の時定数	$[day]$
t	: 時間	$[day]$



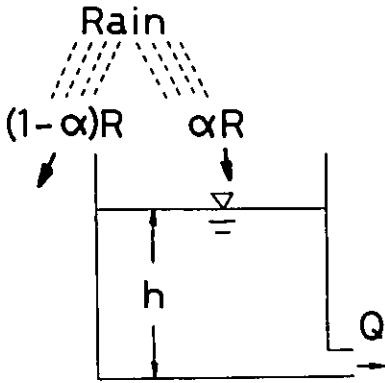


図4 タンクモデル  
 R : 降水量、 $\alpha$  : 浸透率、 $h$  : タンクの水位、  
 Q : 流出量  
 Fig. 4 Tank model  
 R : precipitation,  $\alpha$  : ratio of infiltration,  
 $h$  : water-level, Q : discharge

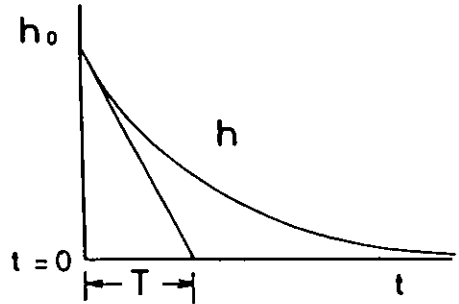


図5 水位の減水曲線  
 T : 時定数、 $a$  : 時間  
 Fig. 5 Depletion curve of water level  
 T : time constant,  $t$  : time.

4-2 基礎式

タンク (図4) からの湧出速度  $v$  は水位  $h$  に比例するものと仮定して、比例定数を  $k$  とすると、

$$v = kh \quad [\text{m/day}] \quad \text{-----(1)}$$

$$k = \text{const.} \quad [1/\text{day}]$$

となる。

タンクの湧出孔の断面積を  $a$  [ $\text{m}^2$ ] とすると湧出量  $Q$  は、

$$Q = av = akh \quad [\text{m}^3/\text{day}] \quad \text{-----(2)}$$

$$\leq \nu h \quad [\text{m}^3/\text{day}] \quad \text{-----(3)}$$

とする。ここで、 $\nu$  [ $\text{m}^3/\text{day}$ ] は、「湧出しやすさ」に相当する量で、以後、湧出係数と呼ぶ。したがって、湧出によるタンク水位の変化は次の1次遅れ系の応答を表す微分方程式で表される。

$$\frac{dh}{dt} = -\frac{Q}{A} = -\frac{\nu}{A} h = -\frac{h}{T} \quad \text{-----(4)}$$

ここで、 $A$  はタンクの断面積、 $T = A/\nu$  はいわゆる時定数に相当する。

4-3 2段のタンクモデル

姥子温泉は、図3の地質構造から浅層の地下水層とその下部の温泉層との関係とみなすことができるので、本研究では図6に示す2段のタンクモデルを用いて湧出量の数値シミュレーションを行った。この場合、降水量は次のように設定する。

$$R = G + D + E \quad \text{-----(5)}$$

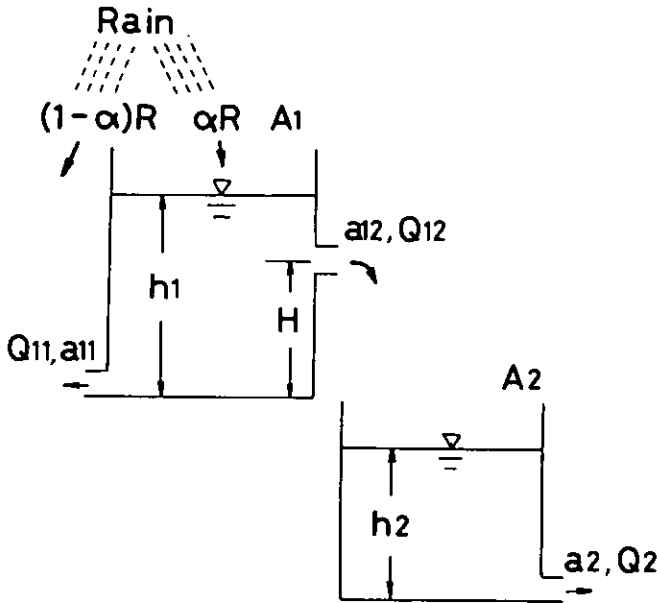


図6 2タンク・モデル  
 A : タンクの断面積、H : 閾値、  
 a : 流出孔の断面積  
 Fig.6 Two Tank model  
 A : sectional area of tank,  
 H : threshold,  
 a : sectional area of orifice.

ここで、Rは降水量、Gは地下水涵養量、Dは地表流となって流れ出す量、Eは蒸発散量である。

降水の地下水涵養率を  $\alpha$  とし、地下水涵養量を

$$G = \alpha R \quad \text{-----}(6)$$

とすると、式(5)は次式で表される。

$$R = \alpha R + (1 - \alpha) R \quad \text{-----}(7)$$

ここで、 $\alpha R$ は地下水涵養の有効降水量、 $(1 - \alpha) R$ は損失降水量となる。

図6の第1段のタンクは2つの湧出孔を有している。下端の湧出孔  $a_{11}$ からの湧出量は湧泉の流域外とさらに深部に湧出する量である。この中には毛管現象により再び地表に達し蒸発散として失われる量も含んでいる。第1段の湧出孔  $a_{12}$ からの湧出は、水位  $h_1$ が閾 (いき) 値 (Threshold)  $H$ 以上を上昇したとき始まり、第2段のタンクに流入する。

降水量を  $R$  [m/day] とすると、対象となる面積  $A_1$  [m<sup>2</sup>] において地下水に涵養される水量は、 $\alpha R A_1$  [m<sup>3</sup>/day] である。この量が同じ断面積  $A_1$ を持つ第1段タンクに流入するものとする、第1タンクの水位変化は次式により表される。

$h_1 \geq H$  の水位のとき、

$$\frac{dh_1}{dt} = \alpha R(t) - \frac{\nu_{11}}{A_1} h_1 - \frac{\nu_{12}}{A_1} (h_1 - H) \quad \text{-----}(8)$$

$0 \leq h_1 < H$  の水位のとき、

$$\frac{dh_1}{dt} = \alpha R(t) - \frac{\nu_{11}}{A_1} h_1 \quad \text{-----}(9)$$

なお、数値計算上の対応として、

$h_1 \leq 0$  の水位になったとき、

$$\frac{dh_1}{dt} = \alpha R(t) \quad \text{-----}(10)$$

のようにする。したがって、第1タンクの湧出孔  $a_{12}$  からの湧出量  $Q_{12}$  は;

$h_1 \geq H$  の水位のとき、

$$Q_{12} = \nu_{12} (h_1 - H) \quad \text{-----}(11)$$

$h_1 < H$  の水位のとき、

$$Q_{12} = 0 \quad \text{-----}(12)$$

となる。

第1タンクからの湧出量  $Q_{12}$  は断面積  $A_2$  をもつ第2タンクの水位  $h_2$  を上昇させる。第2タンクの水位変化は第1タンクからの流入と第2タンクからの湧出との関係による質量保存の法則から次式を得る。

$$\frac{dh_2}{dt} = \frac{Q_{12}}{A_2} - \frac{\nu_2}{A_2} h_2 \quad \text{-----}(13)$$

第2タンクからの湧出量は、

$$Q_2 = \nu_2 h_2 \quad \text{-----}(14)$$

となる。

#### 4-4 無次元化

上記の基礎式に現われる定数および変数は、長さ [m] と時間 [day] を組み合わせた次元を持つので、

$$\text{代表長さを} \quad (A_1)^{1/2} \quad [\text{m}]$$

$$\text{代表時間を} \quad T_{11} = A_1 / \nu_{11} \quad [\text{day}]$$

とすることによって以下のように無次元化される。

$\alpha$ [-]	----->	$\alpha$
$R$ [m/day]	----->	$\tilde{R} = R / (\nu_{11} / (A_1)^{1/2})$
$A_1$ [m <sup>2</sup> ]	----->	$\{(A_1)^{1/2}\}^2$
$A_2$ [m <sup>2</sup> ]	----->	$\tilde{A}_2 = A_2 / A_1$
$H$ [m]	----->	$\tilde{H} = h / (A_1)^{1/2}$
$h_1$ [m]	----->	$\tilde{h}_1 = h_1 / (A_1)^{1/2}$
$h_2$ [m]	----->	$\tilde{h}_2 = h_2 / (A_1)^{1/2}$
$\nu_{11}$ [m <sup>2</sup> /day]	----->	$\nu_{11} = A_1 / T_{11}$
$\nu_{12}$ [m <sup>2</sup> /day]	----->	$\tilde{\nu}_{12} = \nu_{12} / \nu_{11}$
$\nu_2$ [m <sup>2</sup> /day]	----->	$\tilde{\nu}_2 = \nu_2 / \nu_{11}$
$Q_{12}$ [m <sup>3</sup> /day]	----->	$\tilde{Q}_{12} = Q_{12} / (\nu_{11} (A_1)^{1/2})$
$Q_2$ [m <sup>3</sup> /day]	----->	$Q_2 = \tilde{Q}_2 / (\nu_{11} (A_1)^{1/2})$
$t$ [day]	----->	$\tilde{t} = t \nu_{11} / A_1$

このように定義された無次元数を用いて式(8)、(9)、(11)、(12)、(13)、(14)を無次元形にすれば各々以下のようになる。

式(8)、(11)は、

$\tilde{h}_1 / \tilde{H} \geq 1$  の時;

$$\frac{d\tilde{h}_1}{d\tilde{t}} = \alpha \tilde{R} - \tilde{h}_1 - \tilde{\nu}_{12} (\tilde{h}_1 - \tilde{H}) \quad \text{-----(15)}$$

$$\tilde{Q}_{12} = \tilde{\nu}_{12} (\tilde{h}_1 - \tilde{H}) \quad \text{-----(16)}$$

となる。したがって、式(15)と(16)をまとめると第1タンクから第2タンクへの流入量変化は、

$$\frac{d\tilde{Q}_{12}}{d\tilde{t}} = \alpha \tilde{\nu}_{12} \tilde{R} - \tilde{H} \tilde{\nu}_{12} - (1 + \tilde{\nu}_{12}) \tilde{Q}_{12} \quad \text{-----(17)}$$

となる。

$\tilde{h}/\tilde{H} \leq 1$  の時、式(9)、(12)は、

$$\frac{d\tilde{h}_1}{dt} = \alpha \tilde{R} - \tilde{h}_1 \quad \text{-----(18)}$$

$$\tilde{Q}_{12} = 0 \quad \text{-----(19)}$$

となる。式(13)は、

$$\frac{d\tilde{h}_2}{dt} = \frac{\tilde{Q}_{12}}{\tilde{A}_2} - \frac{\tilde{\nu}_2}{\tilde{A}_2} - \tilde{h}_2 \quad \text{-----(20)}$$

となる。式(14)は、

$$\tilde{Q}_2 = \tilde{\nu}_2 \tilde{h}_2 \quad \text{-----(21)}$$

したがって、式(20)と(21)をまとめると第2タンクからの湧出量変化が、

$$\frac{d\tilde{Q}_2}{dt} = \frac{\tilde{\nu}_2}{\tilde{A}_2} (\tilde{Q}_{12} - \tilde{Q}_2) \quad \text{-----(22)}$$

となる。

得られた連立微分方程式(17)と(22)に対する係数は次のように整理される。

代表量は、

$$(A_1)^{1/2} \quad \text{[m]} \quad \text{-----(23)}$$

$$T_{11} = A_1 / \nu_{11} \quad \text{[day]} \quad \text{-----(24)}$$

無次元パラメータは、

$$\pi_1 = \alpha \tilde{\nu}_{12} = \alpha \nu_{12} / \nu_{11} \quad \text{-----(25)}$$

$$\pi_2 = \tilde{H} \tilde{\nu}_{12} = \{H / (A_1)^{1/2}\} (\nu_{12} / \nu_{11}) \quad \text{-----(26)}$$

$$\pi_3 = \tilde{\nu}_{12} = \nu_{12} / \nu_{11} \quad \text{-----(27)}$$

$$\pi_4 = \tilde{\nu}_2 / \tilde{A}_2 = (\nu_2 / \nu_{11}) / (A_2 / A_1) = (\nu_2 / A_2) T_{11} \quad \text{-----(28)}$$

ここで、 $\pi_1$ は降水の地下水涵養量、 $\pi_2$ は水位の閾値、 $\pi_3$ は第1タンクの湧出孔  $a_{12}$ の湧出係数、 $\pi_4$ は第2タンクの湧出孔  $a_2$ の湧出係数に各々対応する。

以上のパラメータを与えることにより連立微分方程式が確定し、1日刻みで差分化することによって数値的に解くことができる。湧泉の湧出量は上記で得られた第2タンクからの湧出量  $Q_2$ と基底湧

出量  $Q_{base}$  (一定値) の合計として

$$Q_T(t) = Q_2(t) + Q_{base} \quad \text{-----(29)}$$

により得られる。実測値との比較のために、単位を  $[m^3/day]$  から  $[l/min]$  に変換し、変数名に \*印を付けて区別した。

#### 4-5 数値解析

一日の始まりに添字  $j$ 、24時間後の時点に添字  $j+1$  を付ける。

$\bar{Q}_{12}^{-(j)} > 0$  の時のみ、

第1タンクの湧出孔  $a_{12}$  の湧出量は式(17)より、

$$\frac{\bar{Q}_{12}^{-(j+1)} - \bar{Q}_{12}^{-(j)}}{\Delta \bar{t}} = (\pi_1 \bar{R} - \pi_2) - (1 + \pi_3) \frac{\bar{Q}_{12}^{-(j+1)} + \bar{Q}_{12}^{-(j)}}{2} \quad \text{-----(30)}$$

となる。したがって、

$$\bar{Q}_{12}^{-(j+1)} \left\{ 1 + (1 + \pi_3) \frac{\Delta \bar{t}}{2} \right\} = \bar{Q}_{12}^{-(j)} + \Delta \bar{t} \left\{ (\pi_1 \bar{R} - \pi_2) - (1 + \pi_3) \frac{\bar{Q}_{12}^{-(j)}}{2} \right\} \quad \text{-----(31)}$$

$$= \bar{Q}_{12}^{-(j)} \left\{ 1 - \frac{\Delta \bar{t}}{2} (1 + \pi_3) \right\} + \Delta \bar{t} (\pi_1 \bar{R} - \pi_2) \quad \text{-----(32)}$$

となる。式(22)は

$$\frac{\bar{Q}_2^{-(j+1)} - \bar{Q}_2^{-(j)}}{\Delta \bar{t}} = \pi_4 \left( \bar{Q}_{12}^{-(j+1)} - \frac{\bar{Q}_2^{-(j+1)} + \bar{Q}_2^{-(j)}}{2} \right) \quad \text{-----(33)}$$

したがって、

$$\bar{Q}_2^{-(j+1)} \left( 1 + \frac{\Delta \bar{t}}{2} \pi_4 \right) = \bar{Q}_2^{-(j)} + \Delta \bar{t} \pi_4 \left( \bar{Q}_{12}^{-(j)} - \frac{\bar{Q}_2^{-(j)}}{2} \right) \quad \text{-----(34)}$$

となる。

$\bar{h}_1 / \bar{H} < 1$  のとき、

$$\frac{d\bar{h}_1}{d\bar{t}} = \alpha \bar{R} - \frac{\bar{h}_1^{-(j+1)} - \bar{h}_1^{-(j)}}{2} \quad \text{-----(35)}$$

上式を整理して未知数  $h_1^{(j+1)}$  について解けば、

$$h_1^{(j+1)} = \{h_1^{(j)} (1 - \frac{d\tilde{t}}{2} + \alpha \bar{R} d\tilde{t}) / (1 + \frac{d\tilde{t}}{2})\} \quad \text{-----}(36)$$

となる。

$\bar{h}_1 / \bar{H} \geq 1$  のとき、

$$\frac{h_1^{(j+1)} - h_1^{(j)}}{d\tilde{t}} = \alpha \bar{R} - \frac{h_1^{(j+1)} - h_1^{(j)}}{2} - \tilde{\nu}_{12} \left\{ \frac{h_1^{(j+1)} - h_1^{(j)}}{2} - \bar{H} \right\} \quad \text{-----}(37)$$

したがって、

$$h_1^{(j+1)} = \frac{\{h_1^{(j)} \text{cons } 1 + d\tilde{t} (\alpha \bar{R} + \tilde{\nu}_{12} \bar{H})\}}{\text{cons } 2} \quad \text{-----}(38)$$

となる。ここで、

$$\text{cons } 1 = 1 - \frac{d\tilde{t}}{2} - \frac{d\tilde{t}}{2} \tilde{\nu}_{12} \quad \text{-----}(39)$$

$$\text{cons } 2 = 1 + \frac{d\tilde{t}}{2} - \frac{d\tilde{t}}{2} \tilde{\nu}_{12} \quad \text{-----}(40)$$

である。

#### 4-6 計算結果の説明と最適化

図7は1974年の湧出量のシミュレーション結果である。図中の実線は計算値、×印は実測値、破線は実測推定値、縦線は日降水量である。降水量は箱根ロープウェイ大涌谷駅（標高1,050m）での測定値を用いた。シミュレーションではタンクの初期水位の影響を小さくするため、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集水面積の平方根  $\sqrt{A_1}$ 、第1タンクの湧出孔  $a_{11}$  の時定数  $T_{11}$ 、降水の地下水かん養量に対応する  $\pi_1$ 、水位の閾値に対応する  $\pi_2$ 、第1タンクの湧出孔  $a_{12}$  の湧出係数に対応する  $\pi_3$ 、第2タンクの湧出孔  $a_2$  の湧出係数に対応する  $\pi_4$ 、基底湧出量  $Q_{base}$  の7個である。なお、 $\sqrt{A_1}$ 、 $\pi_1$ 、 $\pi_2$ 、 $\pi_3$ 、 $\pi_4$  は図中で各々  $rt-A1$ 、 $P_1$ 、 $P_2$ 、 $P_3$ 、 $P_4$  として示してある。また、姥子湧泉は冬期に涸渇するので  $Q_{base} = 0$  とした。

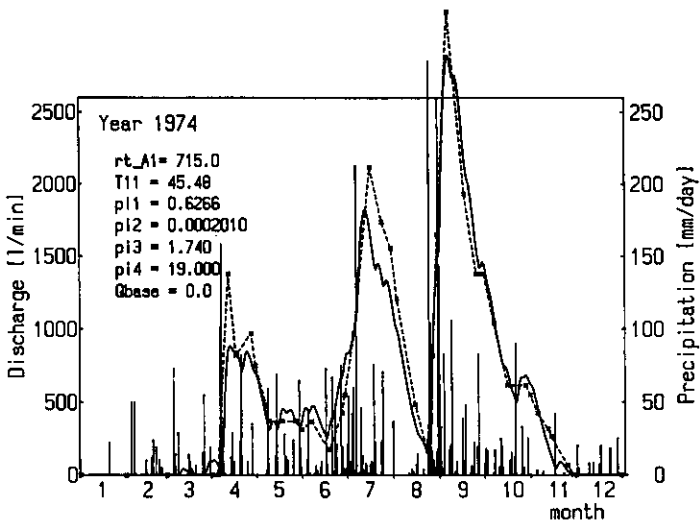


図7 Gタンクモデルによるシミュレーション結果  
 実線：シミュレーション結果、破線：実測流出量、縦線：1日の降水量  
 Fig. 7 Result of numerical simulation by 2 tank model  
 Solid line : calculated discharge, Dotted line : observed discharge, Vertical line : precipitation per day

涵養量  $\alpha$ 、閾値  $H$ 、時定数  $T_{12}$  と  $T_{21}$  については各々(24)、(25)、(26)、(27)、(28)から、

$$\alpha = \pi_1 / \pi_3 \quad \text{-----(41)}$$

$$H = (\pi_2 / \pi_3) (A_1)^{1/2} \quad \text{-----(42)}$$

$$T_{12} = T_{11} / \pi_3 \quad \text{-----(43)}$$

$$T_2 = T_{11} / \pi_4 \quad \text{-----(44)}$$

として得られる。

次に、実測湧出量と計算湧出量との差を最小にするためにパラメータの最適化を行った。パラメータの探索は試行錯誤的に行うこともできるが、数が多くなるとその組合せは指数関数的に増加し、同定が困難になる。また、パラメータの選択方法が確立されなければ定量的比較も再現性も得られない。実測値と計算値との一致度を表わす非負の評価関数としては絶対誤差による次式を用いた。

$$J = \{ 1 / (t_2 - t_1) \} \int_{t_1}^{t_2} | Q_T^* - Q_M^* | dt \quad \text{-----(45)}$$

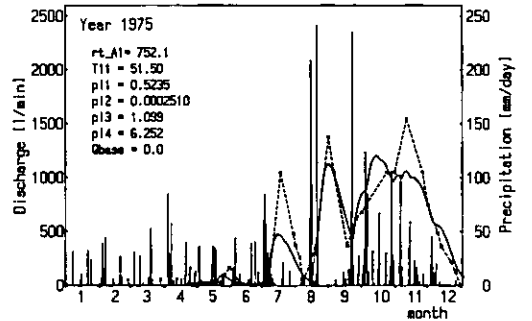
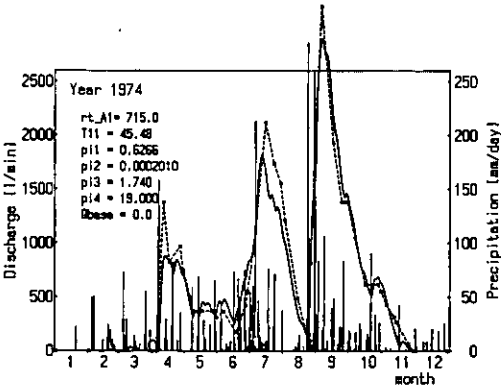
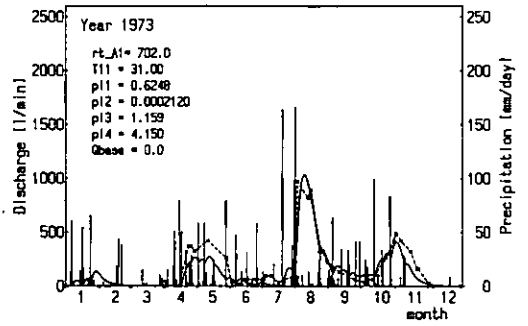
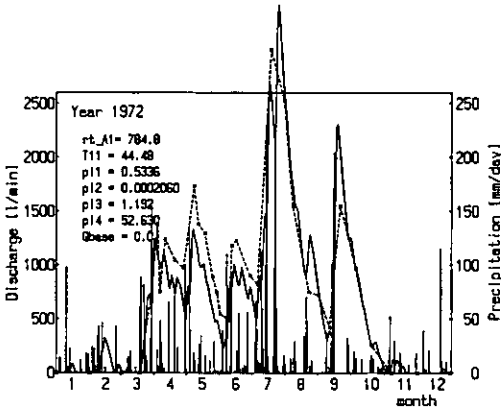
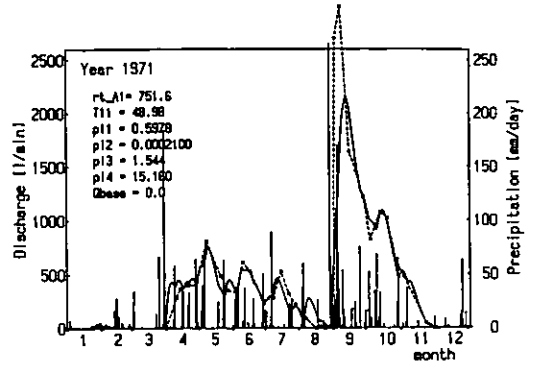
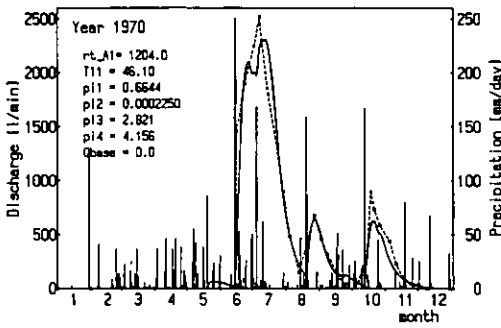
ここで  $t_1$  と  $t_2$  は評価を行う時間範囲の始点と終点である。  $Q_T$  は計算値、  $Q_M$  は実測値である。

数値シミュレーションはタンクの初期水位の影響を小さくするため、半年前から計算を開始した。

### 5 数値シミュレーション結果

姥子温泉の観測は1968年から行われた。湧出量は、湧出孔が浴槽になっているので排水路の途中に設けた四角堰（写真4）で測定した。





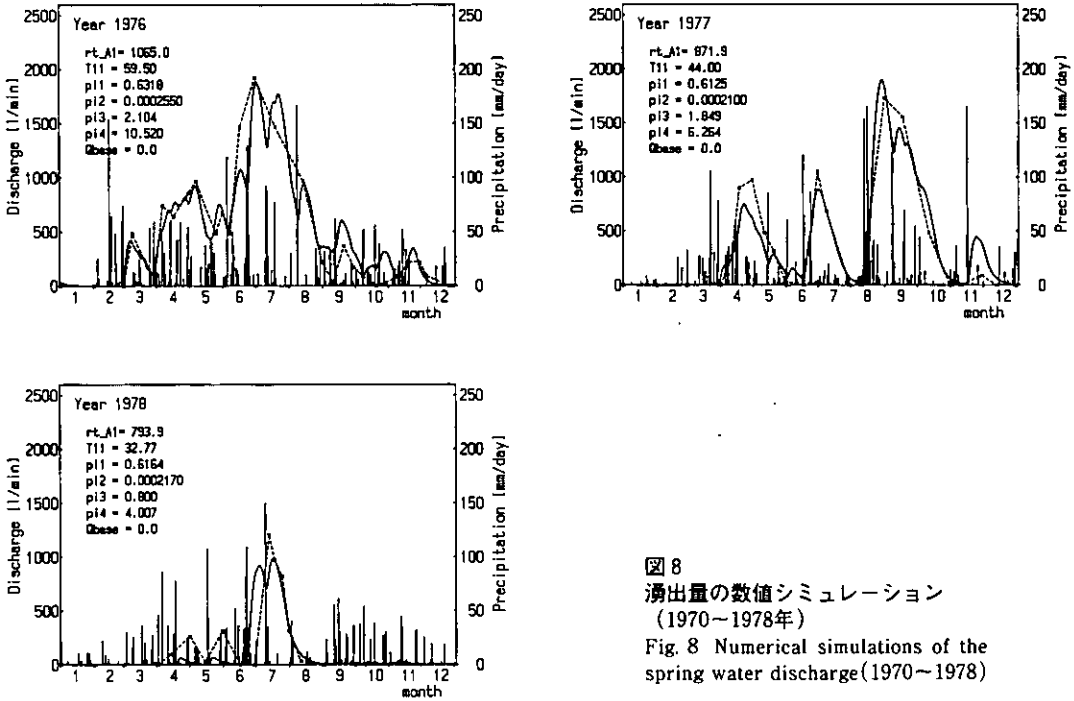


図 8  
 湧出量の数値シミュレーション  
 (1970～1978年)  
 Fig. 8 Numerical simulations of the  
 spring water discharge(1970～1978)

図 8 は1970年 6 月から12月および1年間定期的に測定された1971年から1978年の湧出量のシミュレーション結果である。湧出量は降雨に敏感に反応し、増加と減少が急激に変化することを示している。また、降水量の多い1972年と1974年は湧出量も多く、最大3,000 l/min 以上に達したが、降水量の少ない1973年には最大970 l/min 程度であった。実測は月に2～3回程度であるが、計算値は、湧出の開始と終了の時期、および、湧出期間中もおおむね実測値と一致し、モデルの妥当性を示している。

最適化で得られた時定数は27～55日で、平均36日である。タンクモデルの流動システムでは、初めにあった水が入れ替わる量は時定数の時間だけ経過しても63%にすぎず、時定数の2.3倍で約90%、4.6倍で約99%に達する。タンクの水が完全に入れ替わるには理論上無限の時間を必要とするが、99%の水ではほぼ入れ替わったとしても実用上は差し支えないと考えられている(梶根、1975)。本湧泉の時定数を36日とすると、入れ替わる量が80%で約2月、90%で約3月、99%で約6月である。したがって、姥子湧泉は降雨後2～3月間で地下に浸透した新しい降水に相当する量が湧出してしまふ。このため、降水量の著しく少なくなる11月から2月にかけて姥子温泉は温水となるわけである。

図 9 は1971～1978年についての年間降水量(R)と降水のタンクへの涵養率 $\alpha$ との関係である。回帰式は

$$\alpha (\%) = 83.4 - 0.011 R (\text{mm/year}) \quad \text{-----}(46)$$

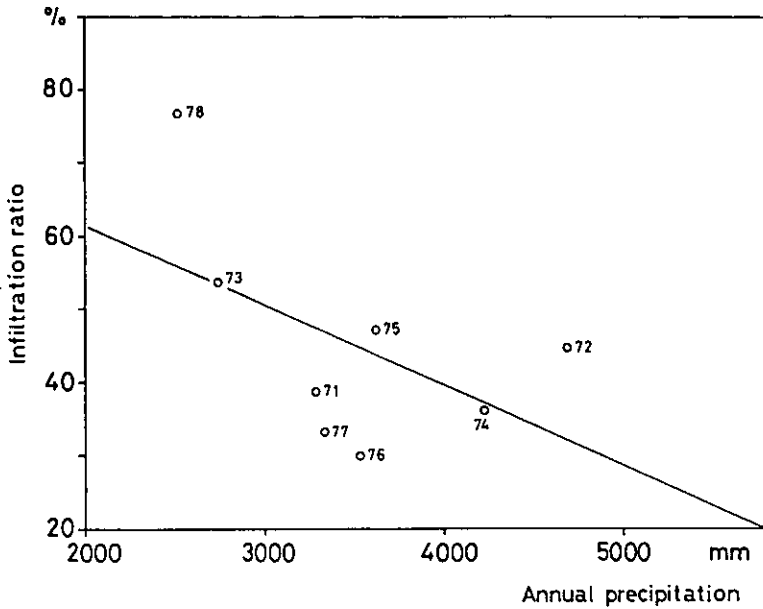


図9 年間降水量(R)と計算上の地下水涵養率(I)との関係  
 Fig.9 Relation between annual precipitation (R) with ratio (I) of computational infiltration

となる。降水量が増加すると地下水への涵養率は減少している。これは、多雨年には降水の直接および中間湧出量が多いことを示唆している。

6 湧出状況の評価

図10は1974年のパラメータで1971年の湧出量を計算したものである。計算値と実測値との平均誤差

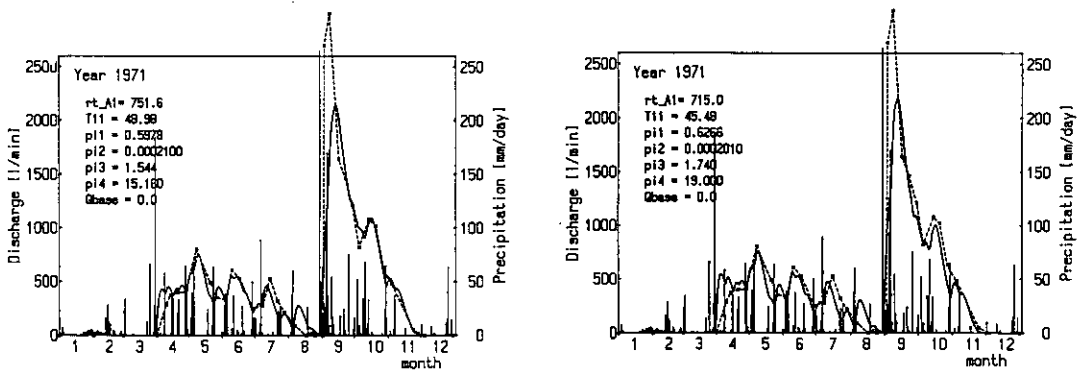


図10 最適パラメータ値(左図)と1974年のパラメータ値による湧出量(右図)の比較

Fig.10 Comparison between the calculated discharge by optimal parameter (left) with one by the parameter values of 1974 (right)

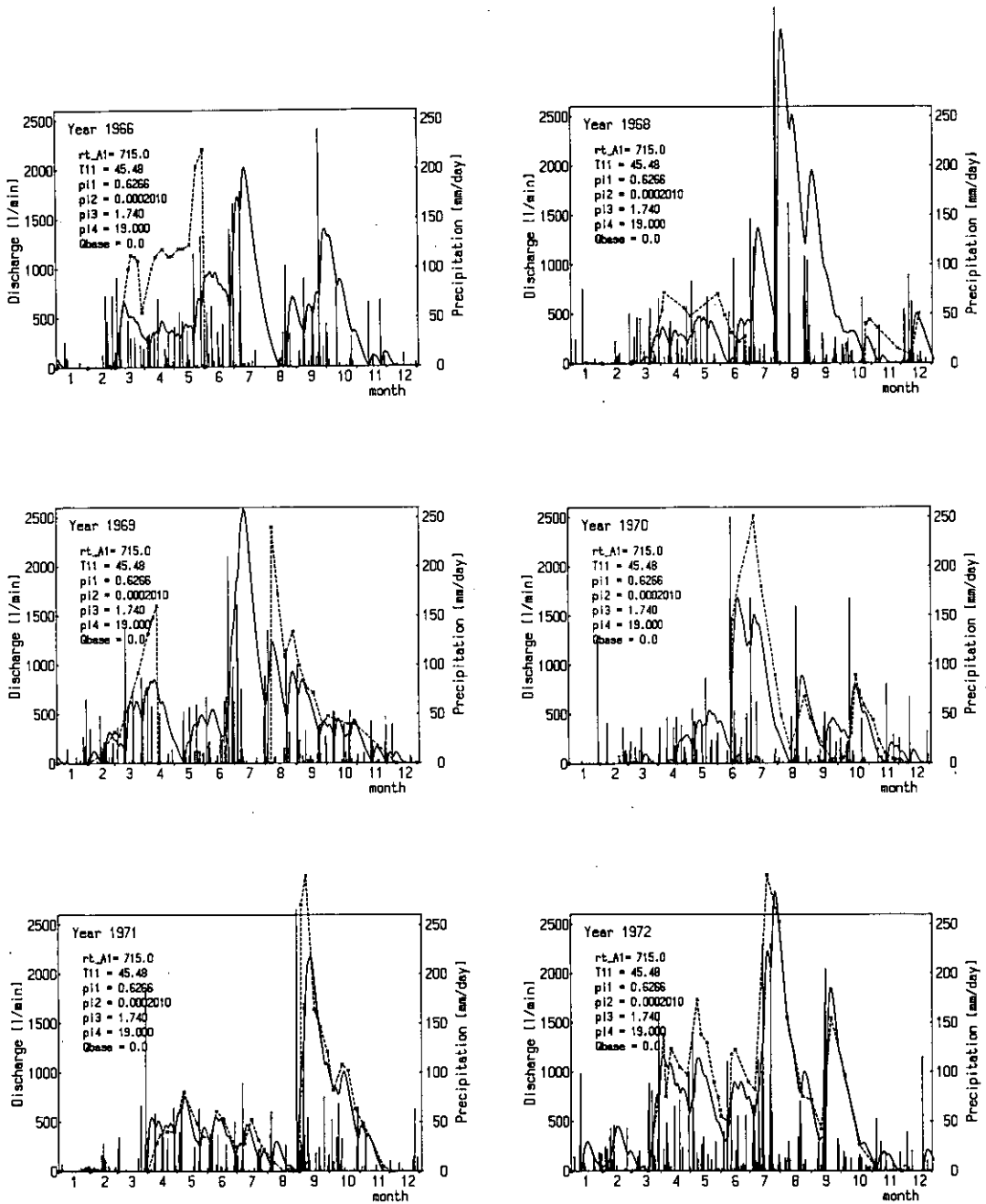


図11 1974年のパラメータでの数値シミュレーション (1966~1972年)  
 Fig.11 Numerical simulations of the spring water discharge (1966 ~ 1972) in the case of the parameter values of 1974

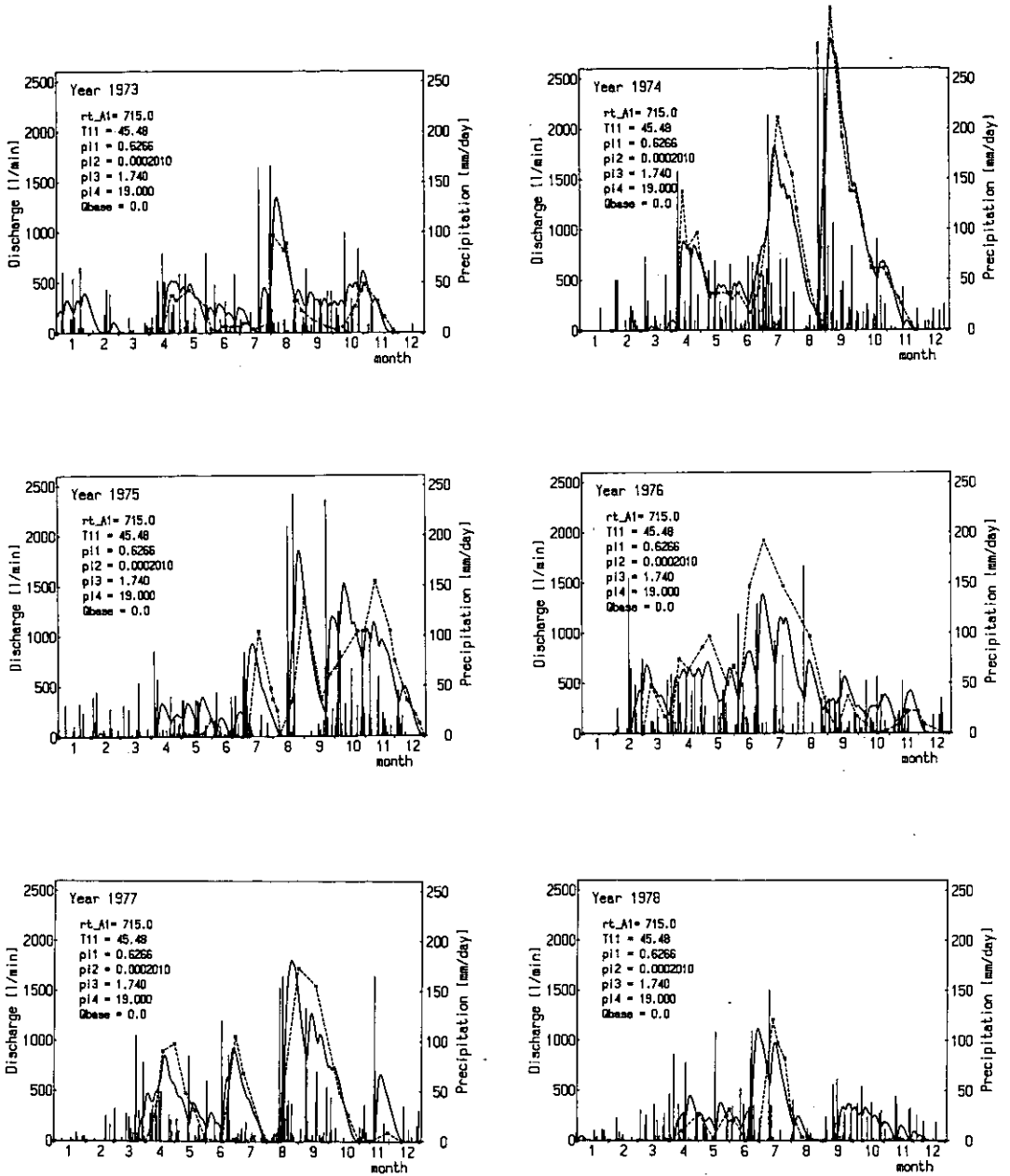


図11 1974年のパラメータでの数値シミュレーション (1973~1978年)  
Fig.11 Numerical simulations of the spring water discharge(1973~1978) in the case of the parameter values of 1974

値 $93.7 \ell/\text{min}$  は最適パラメータでの誤差値 $79.9 \ell/\text{min}$  よりもたかだか17%増加したにすぎない。計算値は実測値と比較的一致度がよく、再現性があるといえる。そこで、1974年のパラメータを用いて1966～1978年の湧出量をシミュレーションをしたのが図11である。なお、1966年から1969年にかけて実測値が得られているのは、1966年が3～6月、1968年が4～6月と10月26日～12月、1969年が1～4月と8～12月の期間である（平野ら、1969）。

図11から、湧出量は後に述べる1976年を除くと、1974年の近傍で計算値と実測値とがほぼ一致している。しかし、湧出量は1970年以前では計算値よりも大きく現れている。また、春の湧出開始時期は1975年以降において計算値よりも約半月遅れている。また、実測湧出量は1975年以降になると計算値よりも減少しているのが認められ、降水量の少ない1978年には6月の後半および9月から10月にかけてほとんど湧出していない。以上から、湧出量は1966年以降しだいに減少し、涸渇化を示している。

## 7 考 察

姥子温泉の周辺では孔井の掘削が1966年以降に次々に行われ、温泉採取が始まった（表2）。この内、姥子温泉（標高889m）より標高の高い孔井は大涌谷方面の第18号（標高959m）、第24号（標高983m）、第28号（標高959m）である。第18号はエアリフト・ポンプで揚湯している温泉井（深度91m）、第24号（200m）と第28号（400m）は熱水混じりの火山性蒸気を自噴する蒸気井である。この蒸気は脇に深度40mと70mの水井戸から水中ポンプで揚水した冷地下水を混合して温泉を造成し、仙石原に送湯されている。これらの孔井は浅層の温泉を主に採取しているので姥子温泉への影響が指摘されていた（大木ら、1969）。

数値シミュレーションから、姥子温泉の湧出量が減少した時期は第18号の完成した1966年以降である。第18号が工事中の1976年には湧出量が計算値よりも多い（図11）。これは湧出量が増加していることを示している。これらの事例は、第18号の温泉採取が下流部に位置する姥子温泉に影響を与えていることを示唆している。ところで、第18号が稼働する前の1966年の実測値は図11から計算値と500～700  $\ell/\text{min}$  の差がある。この差は新規の温泉井の出現によって減少した量と考えられる。第18号がすでに揚湯している1968年の場合、3月から6月にかけての実測値と計算値との差は約300  $\ell/\text{min}$  である。図11からも、実測値は減少し、しだいに計算値に近づいていることが認められる。第18号泉の揚湯量は300～350  $\ell/\text{min}$  である。その後掘削された第24号と第28号の熱水噴出量はそれぞれ120  $\ell/\text{min}$  と見積られている（大山ら、1971）。以上から、この3源泉からの採取量は約600  $\ell/\text{min}$  になる。また、第18号泉が工事中の1976年の場合、実測値と1974年のパラメータでの計算値との差が300～500  $\ell/\text{min}$  である。さらに、静水位は、第18号が943m、第24号が904mと姥子温泉の位置（889m）よりも高い（図3）。したがって、1965年以降に掘削された第18号、第24号、第28号による採水が姥子温泉に影響を与えていることは明かである。さらに、温泉造成のための冷地下水を約600  $\ell/\text{min}$  採取していることも湧泉に影響を及ぼしていると考えられる。

表2 姥子地域の源泉

Table 2 Thermal water sources in the Ubako area

	源泉番号	標高 (m)	深度 (m)	種別	揚湯量 ℓ/min	
					掘削時	1986年
古来より	第4号	889		自然湧泉		
1965年	第18号工事終了	959	91	温泉井		
1966年	第18号動力装置設置	959	91	温泉井	329	309
1966年	第20号工事終了	889	60	温泉井		
1967年	第20号動力装置設置	889	60	温泉井	40	12
1971年	第24号工事終了	983	200	蒸気井	120	
1973年	第28号工事終了	959	400	蒸気井		321※
1975年	第18号修理工事着手	959	91	温泉井		
1976年	第18号修理工事終了	959	91	温泉井		
1977年	第24号修理工事着手	983	200	蒸気井		
1978年	第24号修理工事終了	983	200	蒸気井		335※

※：温泉造成量

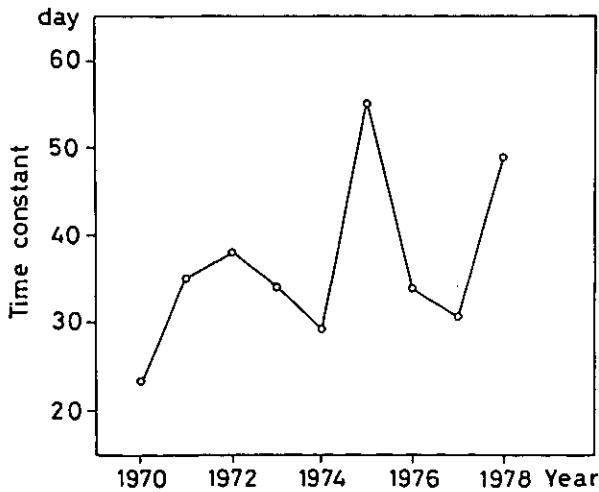


図12 時定数の経年変化

Fig.12 Secular variation of the time constant

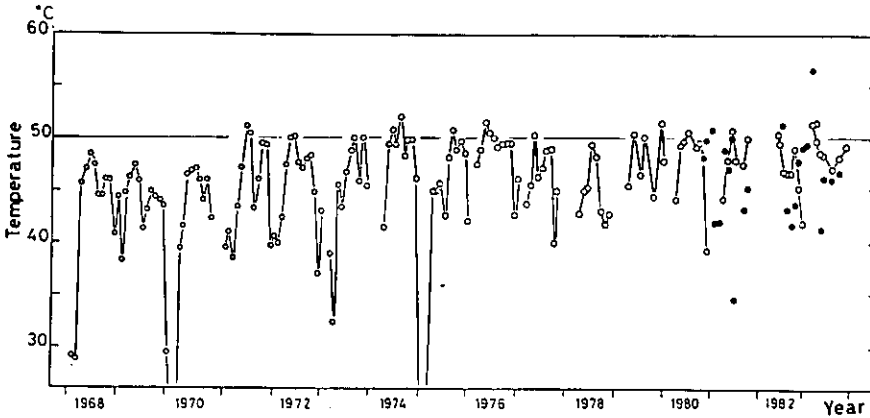


図13 姥子湧泉 (○) と温泉井 (●) の温度の経年変化  
 Fig.13 Secular variation of the temperature of the Ubako spring (○) and temperature of thermal water (●) of a drilled well.

図12は最適化で得られた時定数の経年変化である。時定数は変動しているが、経年的に増加傾向が認められる。また、温度は図13に示す経年変化から、1970年まで47°Cを前後し、50°Cを越えることがなかったが、第24号が完成した1971年以降には上昇し、最高53°Cに達している。したがって、掘削井からの温泉と浅層冷地下水の採取により、浅部の地下水が減少し、姥子温泉には比較的深部の滞留時間の長い地下水が湧出していると推定される。

図14は、1974年のパラメータで1986年の湧出量（平野ら、1987）についてシミュレーションした結果である。湧出状況は、春の湧出開始が明らかに遅れており、10年前に比べて6月から10月の湧出量

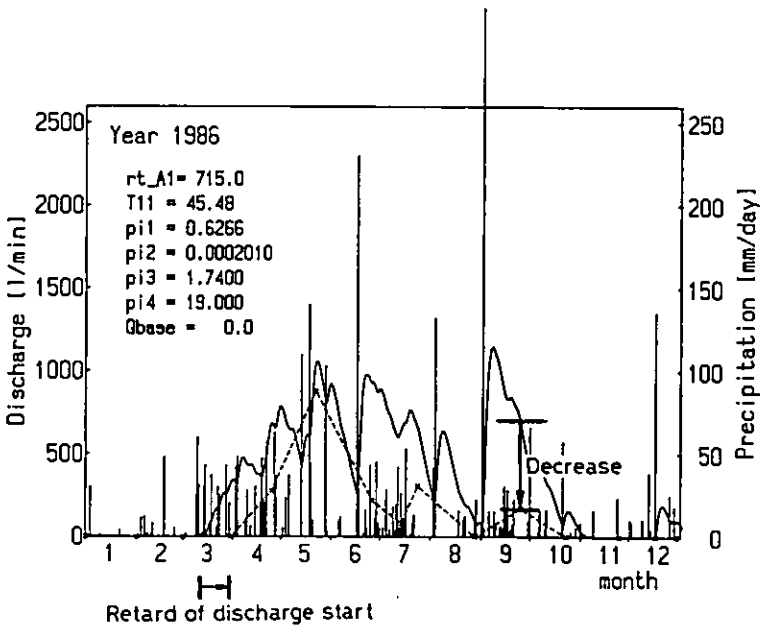


図14 現在(1986)の湧出状況計算値は1974年のパラメータ  
 Fig.14 Actual spring water discharge (1986) Numerical simulation of the spring water discharge by the parameter values of 1974



がさらに300ℓ/min程度減少している。したがって、地下水位がさらに低下し、婁子温泉の涸渇化が進行している。図15はその模式図である。

婁子温泉の周囲における温泉開発が婁子温泉に影響を与えることは地形、地質および泉質などから定性的に理解されていた。しかし、湧泉の湧出量が降雨により著しく変化するため温泉揚水による影響が特定できなかった。本研究により、婁子温泉への影響を明確にするとともに影響の程度を定量的に示すことができた。

## 8 まとめ

本研究から、次のことが明らかになった。

- 1) 婁子温泉は、地下に浸透した新しい降水量の80~90%に相当する量が降雨後2~3カ月で湧出してしまう。このため、湧泉は降水量の著しく少なくなる12月から3月にかけて渇水状態となる。
- 2) 1966年から1973年にかけて行われた婁子周辺での地下水開発により、3温泉井から約600ℓ/min、2水井戸から約600ℓ/minが新たに採取された。この結果、婁子温泉の湧出量は減少し、湧出開始時期も半月程遅れるようになった。
- 3) 婁子湧泉は、時定数が増大し、温度が上昇していることから、掘削井による地下水の揚水で浅層地下水が減少し、滞留時間の長い地下水の割合が多くなった。
- 4) 現在(1986年)の婁子温泉は、10年前に比べて、湧出量がさらに300ℓ/min程度減少している。これは、地下水位の経年的低下を示すものである。婁子温泉の涸渇化は進行している。
- 5) 以上から、本研究の湧出量の数値シミュレーションは新規源泉の温泉採取による婁子温泉への影響を明確にするとともに影響の程度を定量的に示すことができた。

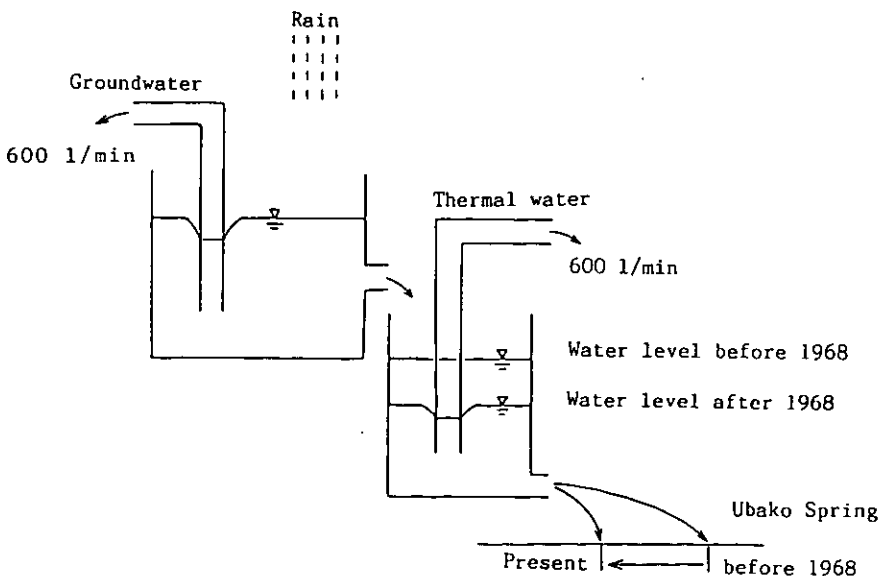


図15 模式図  
Fig.15 Model

6) また、本タンクモデルによる数値シミュレーションは水文環境の変化の予測に対して有力な武器であることを示した。

#### あとがき

神奈川県衛生部はこの地域での温泉開発により姥子温泉の涸渇化が進むことを懸念し、昭和42年9月(1967年)に温泉保護地域に指定した。また、衛生部は平成元年(1989年)より姥子温泉に湧出量の観測装置を設置し、連続観測を開始して温泉源の保護対策をはかっている。しかし、温泉の涵養源である浅層地下水に対する規制がまだ行われていない。温泉保護には浅層地下水を含めた対策が早急に必要である。

#### 謝 辞

本研究をまとめるにあたり、姥子秀明館の前経営者西村秀一氏、小田原保健所温泉課広田茂副技幹には調査に協力していただいた。箱根ロープウェイ株式会社には降水量の資料をいただいた。工学院大学水野明哲教授にはプログラムの開発にお世話になった。以上の方々に厚くお礼を申し上げる。なお、本研究は温泉湧出機構等調査・研究費によった。

#### 参考文献

- 日野幹雄、長谷部正彦(1985):水文流出解析、p254、森北出版。
- 日野幹雄(1986):最近の水文学から、“ながれ”、日本流体力学誌、Vol. 5、282-293。
- 平野富雄、田島より子(1969):箱根姥子湧泉の泉質の連続観測、神奈川温研報告、第8号、13-22。
- 平野富雄、伊東 博(1987):箱根温泉の温度と湧出量の観測、神奈川温地研報告、第19巻、第3号、55-78。
- 広田 茂、小鷹滋郎(1976):箱根火山における温泉および水位の連続観測、昭和50年(1975):神奈川温研報告、第7巻、第1号、19-26。
- 金丸昭治、高棟琢馬(1983):水文学、p.197~215。
- 大木靖衛、荻野喜作、広田 茂、小鷹滋郎、小沢 清、平賀士郎、河西正男、平野富雄(1969):箱根姥子温泉調査報告、神奈川温研報告、第8号、1-12。
- 大木靖衛、袴田和夫(1975):箱根芦ノ湖の誕生の謎をさぐる、国土と教育、築地書店、5、1-9。
- 大山正雄、平野富雄、粟屋 徹、鈴木孝雄(1971):箱根火山の蒸気、神奈川温研報告、第2巻、第3号、133-142。
- 大山正雄、伊東 博、大木靖衛(1985):箱根温泉の温度と湧出量の観測、神奈川温地研報告、第16巻、第4号、41-52。
- 大山正雄(1989):姥子湧泉の流出量の変化、日本温泉科学会創立50周年大会講演要旨集、pp.16。
- 椎貝博美(1985):タンクモデルのプログラム、“ながれ”、日本流体力学誌、Vol. 4、345-348。
- 菅原正巳(1972):流出解析法、p.257、共立出版。
- 高瀬信忠(1978):河川水文学、p.67~107、森北出版。