

福山大学工学部紀要
第3号 1981年3月

琵琶湖流域貯留高の非線形状態推定による計算結果

清水 光 ・ 三谷 康夫 ・ 有本 卓

Results on Nonlinear State Estimations for Water Storage Levels in the Basin of Lake Biwa

Hikaru SHIMIZU, Yasuo MITANI
and Suguru ARIMOTO

ABSTRACT

This paper studies the nonlinear state estimation for the system of hydrologic cycle in the basin of Lake Biwa. The internal states of the system are water storage levels, which can not be measured directly but eventually play an important role in calculating the amount of water in each process of the cycle such as snowmelt, snowpack, runoff, and evapotranspiration. Since the hydrologic process from precipitation to runoff has nonlinear characteristics, system-theoretic nonlinear state estimation technics are applied to the system in order to estimate unobservable water storage levels. As a result, some comparisons among estimation errors for various nonlinear state estimation methods are obtained.

1. ま え が き

生活に欠くことのできない水資源に関し、いろいろな角度から研究が進められてきた。たとえば、水循環に関する研究や水資源開発に関する研究、利水や治水に関する研究などがそれである。これらの中でも、水循環に関する研究は、水資源開発や利水、治水に関する計画に対し、一つの最も基本的な役割を果たす。従来、水循環に関しては、ある流域を対象に、水収支⁽¹⁾や流出解析⁽²⁾⁽³⁾⁽⁴⁾⁽⁵⁾、プロセス単位毎の水量算定⁽⁶⁾⁽⁷⁾⁽⁸⁾⁽⁹⁾⁽¹⁰⁾などによって多くの研究がなされてきた。一つの流域の水循環において、一般に、実測可能なのは河川流出量のみである。そこで、この河川流出量を手がかりに、逆に、実測不可能な流域降水量や蒸発散量などが推定できないものかという考えが出てくる。実際、システム理論の手法を用いれば、これが可能であるばかりでなく、流域の物理的屬性を抽出したモデルを用いて流出解析すれば、観測の困難な流域の浸透量や貯留量までも推定可能である。

ここでは、豊富な貯水量を有し、陸地において、ほぼ一つの閉じた水循環を構成しているとみなせる琵琶湖流域の貯留量を推定する問題について考察してみたい。琵琶湖流域の降水から、流出、琵琶湖の放流に至る水循環プロセスは、非線形離散形動的システムとして記述される⁽¹¹⁾。システムの出力となる流出量の観測精度は、一般に入力となる降水量や融雪量、蒸発散量などに比べて観測精度が良い。そこで、状態推定理論を琵琶湖流域の水循環システムに応用することにより、観測の不可能な流域貯留量が比較的精度良く推定できるものと思われる。ただし、水循環システムは、流出特性を反映して非線形となり、状態推定も何らかの近似手法によらざるを得なくなる。状態量を推定する方法には、大きくわけて、確率的手法と統計的手法がある。ここでは、確率的手法に基づく非線形フィルタリングと、統計的手法に基づく非線形スージングや非線形フィルタリングとスージングの併用などの方法に基づいて、琵琶湖流域水循環システムの非線形状態推定を実行し、一般に、観測不可能な流域貯留量や浸透量の推定精度について比較した。

2. 琵琶湖流域水循環システム

琵琶湖流域における降水から、蒸発散、浸透、流出、琵琶湖の蒸発、放流に至る水循環プロセスを、一つのダイナミカルシステムで表わすと以下ようになる。

流域の降水から流出に至る水循環プロセスについては目的に応じ、今までに多くの解析法が提案されてきた。

たとえば、洪水解析には、拡張貯留関数法⁽¹²⁾や Prasad Model⁽¹³⁾、3段タンクモデル⁽²⁾などがあり、日流量解析には、

Stanford Model⁽¹⁴⁾やTVA Daily Flow Model⁽⁵⁾、GMDH⁽⁵⁾、4段タンクモデル⁽²⁾などがある。また、長期単位の流出解析には、回帰分析⁽¹²⁾やARMA Model⁽¹³⁾などの有効性が示されている。ここでは、琵琶湖流域の日々の水循環を定量的に表わすことを目的とし、流出解析もできる限り簡単で、かつ、流域内部の貯留量を表わし得る流域モデルを選んだ。これらの点から、菅原の4段タンクモデルを用いて流域の降水から流出に至るプロセスを解析した。

流域貯留高 $x^*(k)$ を状態変数に選び、タンクモデルの計算法を用いると、次の差分方程式が成立する。

$$x(k) = Fx(k-1) - G\{f_n[x(k-1)] - u(k) + w(k)\} \quad k = 1, 2, \dots, N \quad (1)$$

* 水循環システム表現上の便宜のため、水循環プロセスの諸水量は、全て高さに換算して表わすことにする。

ただし、 $x_j(k) \geq 0, \quad j = 1, 2, 3, 4 \quad (2)$

ここで、F,Gは4×4の定数行列を示し、 $f_n[x(k)]$ 、 $u(k)$ 、 $w(k)$ は、それぞれ、非線形流出関数、入力、入力雑音を表わす。降水から流出への水循環プロセスは、一般に、非線形特性を示し、タンクモデルでは、これを部分線形で近似している。たとえば、地表部分の流出特性を表わした1段目のタンクについて、流域貯留高 $x_1(k)$ と流出高 $f_1(k)$ の関係を図示すると図1のようになる。

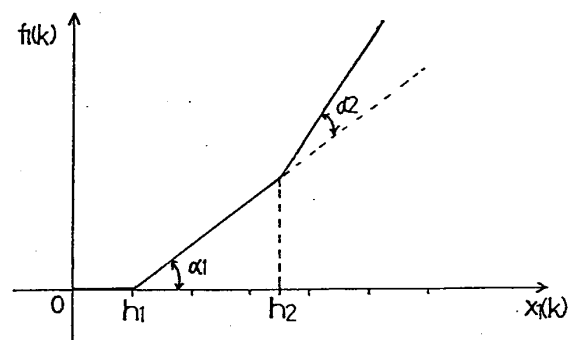


図1 タンクモデルの非線形性

一方、琵琶湖の日単位水収支は、地表水の流出時間を2日以内と仮定すると

$$\Delta h(k) = af_i[x(k)] + bf_i[x(k-1)] + r_1(k) - v_1(k) - f_0(k) \dots \dots (3)$$

と表わされる。ここで、 $\Delta h(k)$ は、琵琶湖の日水位の増分 $\Delta h(k) = h(k+1) - h(k)$ を示し、 $f_i[x(k)]$ と $r_1(k)$ は、収入となる流域の流出高と湖面降水量を示している。また、 $v_1(k)$ と $f_0(k)$ は、それぞれ、支出となる湖面蒸発高と放流高を示す。 $\Delta h(k)$ と $f_0(k)$ は毎時観測されている量で、いま、 $y(k) = \Delta h(k) + f_0(k)$ とおき、観測雑音 $v(k)$ を導入すると、(3)式より、次の観測方程式が導かれる。

$$y(k) = af_i[x(k)] + bf_i[x(k-1)] + r_1(k) + v(k) \dots\dots\dots (4)$$

ただし、係数 a 、 b は、 $a + b = 1$ を満たす。結局、琵琶湖流域の降水から琵琶湖の放流に至る水循環システムは、(1)、(2)、(4)式の離散形非線形ダイナミカルシステムで表わすことができた。

3. 入出力の算定

琵琶湖流域水循環システムの入力は、物理的には、流域の降水と蒸発散より成り、出力は、湖面の水位差と放流高より構成される。出力の観測データに基づき、状態推定を実行して、流域内部の観測不可能な流域貯留高や浸透高を推定するために、まず、入出力の算定が必要になる。

3.1 入力算定

琵琶湖流域は、冬期に北、西部を中心に一般に積雪があり、入力を算定するために、降水量や気温、積雪高、融雪高などを、まず、計算しておかなければならない。

ここでは、詳細な記述は避け、基本的な考えについてのみ述べる。

降水量：

流域を高度や地形によって (i, j) 地帯に分割し、各分割された地帯毎に平均降水量 $\bar{r}_{ij}(k)$ を算定する。

$$\bar{r}_{ij}(k) = d_i \bar{r}_{i1}^0(k) (1 + a_m C_{ij})$$

$i, j = 1, 2, 3, 4 \dots\dots\dots (5)$

ここに、右肩の添字 0 は観測値を示し、 C_{ij} は高度割増率を、 d_i と a_m は適当なパラメーターをそれぞれ示している。

気温：

高度による気温低下率は一定で、他の影響は無視できるとして、平均気温 $\bar{t}_{ij}(k)$ を算定する。

$$\bar{t}_{ij}(k) = \bar{t}_{ij}^0(k) - C_t (\bar{z}_{ij} - \bar{z}_{ij}^0)$$

$$\bar{t}_{ij+1}(k) = \bar{t}_{ij}(k) - \Delta t_i \dots\dots\dots (6)$$

ここに、 C_t は気温の高度低下率、 Δt_i は (i, j) と $(i, j+1)$ 地帯間の気温差、 \bar{z}_{ij} は平均高度を、それぞれ示している。

積雪高：

ある気温 t_c (ここでは、境界気温と呼ぶ)以下であれば降水は雪となり、 t_c を越えれば降水は雨になると仮定して、平均積雪高 $\bar{S}_{d,ij}(k)$ を算定する。

$$\bar{r}_{ij}(k) > 0 \text{ の時}$$

$$\bar{S}_{d,ij}(k) = \begin{cases} \bar{S}_{d,ij}(k-1) - \bar{S}_{m,ij}(k), & \bar{t}_{ij}(k) > t_c \\ \bar{S}_{d,ij}(k-1) + \bar{r}_{ij}(k) - \bar{S}_{m,ij}(k), & t_c \leq \bar{t}_{ij}(k) > 0 \\ \bar{S}_{d,ij}(k-1) + \bar{r}_{ij}(k), & \bar{t}_{ij}(k) \leq 0 \end{cases}$$

$\dots\dots\dots (7)$

$\bar{r}_{ij}(k) = 0$ の時も同様な考えで算定できる。ここに、 $\bar{S}_{m,ij}(k)$ は、以下に示される (i, j) 地帯の平均融雪高を表わしている。

融雪高：

太陽放射と降雨からの熱伝導により融雪が生じると仮定して、⁽⁵⁾平均融雪高を算定する。

$$\bar{r}_{ij}(k) > 0 \text{ の時}$$

$$\bar{S}_{m,ij}(k) = \begin{cases} \frac{1}{80} \bar{r}_{ij}(k) \bar{t}_{ij}(k) + m \bar{t}_{ij}(k), & \bar{t}_{ij}(k) > t_c \\ m \bar{t}_{ij}(k), & t_c \leq \bar{t}_{ij}(k) > 0 \\ 0, & \bar{t}_{ij}(k) \leq 0 \end{cases}$$

$\dots\dots\dots (8)$

$\bar{r}_{ij}(k) = 0$ の時も同様に考えて算定できる。ここに、 m は、平均気温に関する融雪高のパラメーターを示している。

入力：

流出に寄与する入力は、降雨量と融雪高よりなり、結局、平均入力 $\bar{u}_1(k)$ ($\bar{u}(k)$ の第一成分を示す)は、上記の算定結果より求められる。

$$\begin{aligned} \bar{u}_i(k) &= \sum_{j=1}^4 u_{ij}(k) \\ &= \begin{cases} \sum_{j=1}^4 [\bar{r}_{ij}(k) + \bar{s}_{m,ij}(k)], & \bar{t}_{ij}(k) > t_c \\ \sum_{j=1}^4 \bar{s}_{m,ij}(k), & \bar{t}_{ij}(k) \leq t_c \end{cases} \dots\dots (9) \end{aligned}$$

3.2 出力算定

琵琶湖の日単位水収支より導かれた観測方程式(4)式の $y(k)$ が、水循環システムの出力を表わしている。琵琶湖の日平均水位の増分 $\Delta h(k)$ と放流高 $f_o(k)$ は、それぞれ、5点と4点の観測所で毎時観測されており、他の水循環プロセスの水量に比べて、一般に算定精度が良いものと思われる。ここでは、日平均水位の増分は、算術平均より、また、放流高は、各地点の日平均流量の総和より、それぞれ、算定した。

4. 流域貯留高の非線形状態推定

水循環システムを構成する他の諸量に比べて、精度の良い観測値 $y(k)$ から、水循環システム内部の量である流域貯留高 $x(k)$ を推定する問題を考える。そのために、まず、(1)、(4)式で表わされる琵琶湖流域水循環システムを、次のように一般的な状態方程式と観測方程式に書きなおす。

$$\begin{aligned} x(k) &= f[x(k-1)] + Bn(k), k=1, 2, \dots, N \quad (10) \\ y(k) &= h[x(k)] + Z(k) \quad (11) \end{aligned}$$

ここで、入力 $n(k)$ と観測雑音 $Z(k)$ 、初期値 $x(0)$ の確率的性質を、それぞれ、次のように仮定する。

$$\begin{aligned} E[n(k)] &= \bar{n}(k) & E[Z(k)] &= \bar{Z}(k) \\ E[x(0)] &= \bar{x}(0) \\ E[n(k) - \bar{n}(k)][n(j) - \bar{n}(j)] &= Q(k)\delta(k-j) \\ E[Z(k) - \bar{Z}(k)][Z(j) - \bar{Z}(j)] &= R(k)\delta(k-j) \\ E[x(0) - \bar{x}(0)][x(0) - \bar{x}(0)] &= P(0) \end{aligned} \quad (12)$$

4.1 非線形フィルタリング

最適線形推定値を与えるカルマン・フィルタを非線形システムに応用した拡張カルマン・フィルタ⁽¹⁰⁾について考察する。観測値 $y(k)$ から状態量 $x(k)$ を漸化的に推定するアルゴリズムは、以下のようになる。

$$\hat{x}(k) = \tilde{x}(k) + K(k) \{ y(k) - \{ h[\tilde{x}(k)] + \bar{Z}(k) \} \} \quad k=1, 2, \dots, N \quad (14)$$

$$\begin{aligned} \tilde{x}(k+1) &= f[\hat{x}(k)] + B\bar{n}(k+1) \\ P(k) &= [I - K(k)H'(k)]M(k) \\ M(k+1) &= J(k)P(k)J'(k) + BQ(k+1)B' \end{aligned} \quad (15)$$

ここで、

$$\begin{aligned} K(k) &= [H'(k)P(k)H(k) + R(k)]^{-1}P(k)H(k) \\ H(k) &= H[\tilde{x}(k)] = \left[\frac{\partial h[x(k)]}{\partial x(k)} \right]_{x(k)=\tilde{x}(k)} \\ J(k) &= J[\hat{x}(k)] = \left[\frac{\partial f^i[x(k)]}{\partial x^j(k)} \right]_{x(k)=\hat{x}(k)} \end{aligned} \quad (16)$$

である。

4.2 非線形スムージング

連続システムに対する Bryson & Frazier の最尤推定の考え⁽¹⁷⁾を離散システムに用いて、次の関数 J を設定する。

$$\begin{aligned} J &= \|x(0) - \bar{x}(0)\|_{P^{-1}(0)}^2 + \sum_{k=1}^N \|n(k) - \bar{n}(k)\|_{Q^{-1}(k)}^2 \\ &+ \sum_{k=1}^N \frac{|Z(k) - \bar{Z}(k)|^2}{R(k)} \end{aligned} \quad (17)$$

目的は、拘束条件(10)、(11)式のもとで、 J を最小にするパラメータ $x(0)$ 、 $n(k)$ 、 $Z(k)$ を求めることである。ここで、ラグランジュ乗数 $\xi(k)$ 、 $P(k)$ を導入し、最小値をとる必要条件を用いれば、次の2点境界値問題に帰着する。

差分方程式：

$$\begin{aligned} x^{(n)}(k) &= f[x^{(n)}(k-1)] + Bn^{(n)}(k), k=1, 2, \dots, N \\ y(k) &= h[x^{(n)}(k)] + Z^{(n)}(k) \\ \xi^{(n)}(k) &= \frac{Z^{(n)}(k) - \bar{Z}(k)}{R(k)} \\ P^{(n)}(k) &= \left[\frac{\partial f^i[x^{(n)}(k)]}{\partial x^j(k)} \right]' P^{(n)}(k+1) + a \xi^{(n)}(k) \\ &\left[\frac{\partial h[x^{(n)}(k)]}{\partial x^j(k)} \right] + b \xi^{(n)}(k+1) \left[\frac{\partial h[x^{(n)}(k)]}{\partial x^i(k)} \right] \end{aligned} \quad (18)$$

境界条件：

$$\left. \begin{aligned} \underline{x}(0) : \text{given} \\ \underline{P}^{(n)}(N) = \alpha \xi^{(n)}(N) \left[\frac{\partial h[\underline{x}^{(n)}(N)]}{\partial \underline{x}_j(N)} \right] \end{aligned} \right\} \quad (19)$$

ここで、右肩の(n)は、繰り返し計算回数を表わす。関数 J を最小にするパラメータ $\underline{x}(0)$, $\underline{n}(k)$, $Z(k)$ は、勾配法を用い、収束条件

$$\Delta J^{(n)} = J^{(n-1)} - J^{(n)} < \epsilon, \quad \epsilon > 0 \quad (20)$$

が満足されるまで逐次近似することによって求められる。(19)

4.3 非線形フィルタリングとスムージングの併用

先に述べた非線形フィルタリングは、計算時間が短い
が、時刻 k が大きくなるにつれて推定誤差が大きくなる
可能性がある。そこで、非線形フィルタリングで求めた
推定値を、非線形スムージングによって修正する方法に
ついて考察する。アルゴリズムは、Friedland &
Bernstein の考えに基づき、以下の予測式と修正式より
構成される。

予測式：

$$\begin{aligned} \hat{\underline{x}}(k) = \hat{\underline{x}}(k-1) + \underline{K}(k) \{ y(k) - [h[\hat{\underline{x}}(k-1)] + \bar{Z}(k)] \} \\ k = 1, 2, \dots, N \end{aligned}$$

以下、(15), (16)式と等しい。

修正式：

$$\hat{\underline{x}}_0(N) = \hat{\underline{x}}(N) + \underline{\lambda}(N) \quad (21)$$

ここで、

$$\underline{\lambda}(N) = \underline{S}(N) \underline{\lambda}(0)$$

$$\underline{S}(N) = \prod_{k=1}^N [I - \underline{K}(k) \underline{H}(k)] \underline{J}(k) \quad (22)$$

修正された $\hat{\underline{x}}_0(N)$ に基づき、 $\{ \underline{P}(N) = 0, \underline{x}(N) = \hat{\underline{x}}_0(N) \} \rightarrow$

$\{ \underline{P}(N-1), \hat{\underline{x}}(N-1) \}; \dots; \{ \underline{P}(0), \hat{\underline{x}}(0) \}$ と逆向きに
求め、次の初期条件が満足されるまで計算を繰り返す。

$$\{ J'(0) \underline{P}(0) - \underline{\theta}[\hat{\underline{x}}(0)] \} < \epsilon \quad (23)$$

ここで、

$$\underline{\theta}[\hat{\underline{x}}(0)] = \frac{\partial \log p[\underline{x}(0)]}{\partial \underline{x}(0)} \quad (24)$$

である。

理解しやすくするために、以上の三つの状態推定法を
時間軸に関して比較してみる。推定問題は、一般に、推
定時刻と測定データの時間の関係により、図2のように
予測、フィルタリング、スムージングの三つに分類され
る。

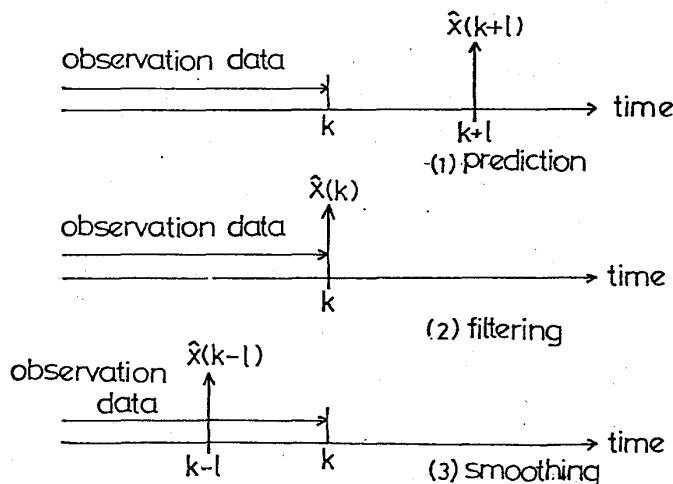


図2 推定問題の分類

5. 流域の貯留高と浸透高の推定結果と考察

日々、流域から琵琶湖へ流出する水量は、琵琶湖の水
収支より算定できるが、この流出量を予測したい場合に
は、流域に貯えられている貯水量、いかえると流域貯
留高を推定することが重要になってくる。ここでは、4
で述べた非線形状態推定法のうち、非線形フィルタリ
ングと非線形スムージングの推定精度を中心に比較してみ
たい。計算は、比較的積雪の多い昭和46年1月から3
月までについて実行した。

5.1 流域貯留高の推定

流域貯留高の観測は困難であるから、推定値の精度を
比較するには、観測されている出力 $y(k)$ の推定値 $\hat{y}(k)$ と
算定値 $y_0(k)$ の差を基準にとらざるを得ない。いま、出力
推定誤差 $y_e(k)$ を次式で定義する。

$$y_e(k) = \hat{y}(k) - y_0(k) \quad (25)$$

ここで、

$$\hat{y}(k) = \hat{a} f_i[\hat{\underline{x}}(k)] + \hat{b} f_i[\hat{\underline{x}}(k-1)] + r_1(k) + v(k) \dots \dots \dots (26)$$

当然、 $y_e(k)$ が小さいほど良い推定法といえる。一ヶ月単位で計算した出力推定誤差を比較すると図3のようになる。これは、計算初期の46年1月の結果であり、非線形スムージングによる状態推定の方が、出力を精度良く推定できることがわかる。1ヶ月間の出力推定誤差の平均値と分散は、非線形フィルタリングが1.4 mmと47.4 mm²、非線形スムージングが0.6 mmと34.1 mm²となる。水位や放流高の観測精度から考えて、非線形スムージングの出力推定精度は、ほぼ、満足できる結果ではないかと思われる。琵琶湖流域の流出特性を一つのタンクモデルで表わし、流域の平均的な流域貯留高を非線形状態推定法によって推定した。出力推定誤差の計算結果によると、非線形スムージングが優れており、たとえば、46年1月の湖面で平均0.6 mmの出力算定誤差は、流域に換算して平均0.1 mmの算定誤差に匹敵する。出力推定誤差と同時に46年1月の流域貯留高の推定結果を示すと図4のようになる。タンクモデルの3段目、4段目で初期値が大きく異なっている。これは、非線形スムージングでは、流域貯留高の初期値 $x(0)$ が逐次改善されるのに対し、非線形フィルタリングでは、一度設定された初期値が二度と改善されないからである。

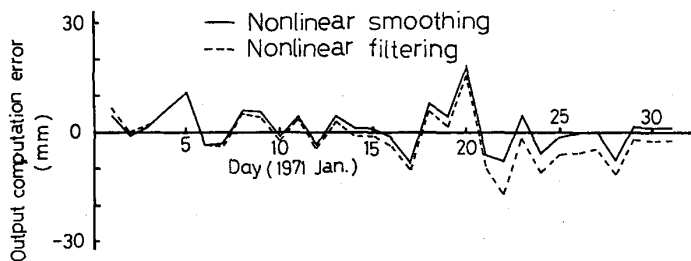


図3 出力推定誤差

5.2 流域浸透高の推定

流域内部の水の下方への移動量を直接観測することは流域貯留高と同様に困難である。浸透度は、土性や土壌水分、降雨強度などによって異なるが、^⑥現実の広い流域全体について調査することは不可能である。ここでは、浸透高は、貯留高に比例するというタンクモデルの考え方にに基づき、流域全体の浸透高 $g(k)$ を推定した。

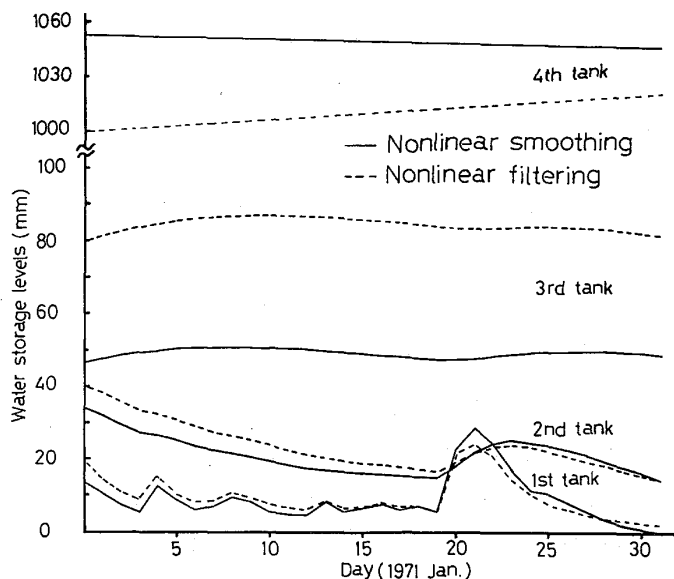


図4 琵琶湖流域貯留高

$$g(k) = V x(k) \tag{27}$$

ここで、

$$g(k) = [g_1(k), g_2(k), g_3(k)]' \tag{28}$$

$$V = \begin{bmatrix} \beta_1 & 0 & 0 \\ 0 & \beta_2 & 0 \\ 0 & 0 & \beta_3 \end{bmatrix}, \quad x(k) = \begin{bmatrix} x_1(k) \\ x_2(k) \\ x_3(k) \end{bmatrix}$$

であり、 β_i ($i=1, 2, 3$)は、タンクモデルの浸透パラメータを表わしている。流域貯留高の推定値を用いて、流域浸透高を推定した結果の一例を示したのが図5

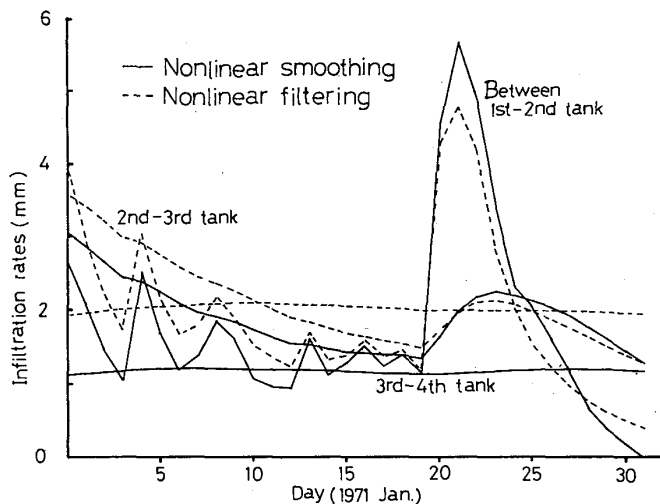


図5 琵琶湖流域浸透高

である。タンクモデルの1段目と2段目の間の浸透高は、1段目の貯留高に比例し、大きく変動している。2-3段目間、3-4段目間、と下方になるにつれて変動は小さくなっている。

6. むすび

陸地において、ほぼ一つの閉じた水循環を構成しているとみなせる琵琶湖流域の水循環システムは、降水量を入力、琵琶湖の水位差と放流高を出力とした非線形離散形動的システムとして記述できる。冬期の水循環においては、積雪や融雪の影響が大きくなり、入力算定も、相当詳細にやらなければ、各水循環プロセス水量の推定に無視できない誤差を生じる。ここでは、降水量や気温、積雪高などの入力に比べて、より精度良く算定できる出力の観測データを用い、水循環システム内部の観測できない流域貯留高を非線形フィルタリングと非線形スージングにより推定し、比較した。非線形フィルタリングによる推定法は、初期値を推定できないという欠点を有するが、計算時間は非常に短いという長所を持つ。これに対し、非線形スージングによる推定法は、計算時間が長いという欠点を有するが、初期値や入力算定誤差を逐次改善していくことができるという長所を持つ。日々の流域の水循環プロセスの水量を推定する問題に限って言えば、計算時間の長短は、それほど問題にはならないであろう。また、タンクモデルによれば、流域内部の水の下方への移動量である流域浸透高も、流域貯留高の推定値を用いて推定することができた。このようにして、水文学や土木工学などにおけるプロセス単位毎の推定では、精度良く求めることの難しい広い流域の貯留高や浸透高を、比較的観測精度の良い水位や放流高のデータに基づいて推定することができた。ここでは、非線形フィルタリングと非線形スージングによる推定結果について比較したが、これら両者を併用した推定法も含めた考察を、近々、発表する予定である。

最後に、この研究は、昭和55年度文部省環境科学特別研究「琵琶湖流域の水循環のモデル化と貯留高推定」の一環として行なわれ、また計算は、福山大学MELCOM-COSMO 500を用いたことを付記しておく。

参考文献

- (1) 菅原正己, “琵琶湖低水流量解析” 琵琶湖調×125, No.373, PP. 1-121, 1972
- (2) 菅原正己, “流出解析法” 共立出版, 1972
- (3) R.A.Rao and R.L.Kashyap, “Stochastic Modeling of River Flow” IEEE Trans. Aut. Con., AC-19, PP.874-881, 1974
- (4) L.V.Tavares, “Watershed Runoff Simulation: A Comparative Study on Main Methods” Computer Simulation of Water Resources Systems, North-Holland/American Elsevier, PP.179-197, 1975
- (5) S.Ikeda, M.Ochiai and Y.Sawaragi, “Sequential GMDH Algorithm and Its Application to River Flow Prediction” IEEE Trans. Sys. Man, and Cyb., SMC-6, PP.473-479, 1976
- (6) 川畑幸夫, “水文気象学” 地人書館, 1961
- (7) H.Item, “A Model for the Water Regime of a Deciduous Forest” J. of Hydrology, Vol.21, PP.201-210, 1974
- (8) L.Wartena, “Basic Difficulties in Predicting Evaporation” J. of Hydrology, Vol.23, PP.159-177, 1974
- (9) S.T.Chu, “Infiltration During an Unsteady Rain” Water Resou. Research, Vol.14, PP.461-466, 1978
- (10) R.E.Smith and J.Y.Parlange, “A Parameter-Efficient Hydrologic Infiltration Model” Water Resou. Research, Vol.14, PP.533-538, 1978
- (11) 清水光, “琵琶湖流域の水循環に関するシステム理論的研究” 学位論文, 大阪大学基礎工学部, 1977
- (12) 日野幹雄, 石川和秀, “河川流量の長期および短期予測について” 土木学会論文報告集, 第238号, PP.59-70, 1975
- (13) N.Duong, C.B.Winn and G.R.Johnson, “Modern Control Concepts in Hydrology” IEEE Trans. Sys, Man, and Cyb, SMC-5, PP.46-53, 1975
- (14) DE.Overton and M.E.Meadows, “Stormwater Modeling” Academic Press, 1970
- (15) J.C.Rodda, “Facets of Hydrology” John Willey & Sons, 1976
- (16) A.H.Jazwinski, “Stochastic Process and

Filtering Theory" Academic Press, 1970

- (17) A.E.Bryson and M.Frazier, "Smoothing for Linear and Nonlinear Dynamical Systems" U.S.Air Force Tech.Rept. ASD-TDR-63-119, PP.353-364, 1963
- (18) 清水光, 久保和夫, 有本卓, "琵琶湖流域の水の循環に関するシステム理論的考察" 計測自動制御学会論文集, Vol.3, PP.200-206, 1977
- (19) B.Friedland and I.Bernstein, "Estimation of the State of a Nonlinear Process in the Presence of Nongaussian Noise and Disturbances" J. of the Franklin Inst., Vol.281, PP455-480, 1966