

# 電力ダム操作のための実時間確率出水予測モデルの実用化

## THE DEVELOPMENT OF A PRACTICAL REAL-TIME STOCHASTIC FLOOD PREDICTION MODEL FOR DAM OPERATION

白木 亨\*・中村 幾雄\*\*・岩永 建夫\*\*\*

By Tohru SHIRAKI, Ikuo NAKAMURA and Tateo IWANAGA

Using stochastic state space techniques, the authors developed a practical real-time stochastic flood prediction method for dam operation. Here we consider the series tanks model and the storage function model as the candidate for run-off model. In order to select a suitable stochastic model, predicted results are evaluated by a measure which is taken notice of accuracy in the rising part of a flood. The procedure of model set-up adopted here is applied for two dam basins : Tonoyama dam basin ( $294 \text{ km}^2$ ) and Tsunokawa dam basin ( $724 \text{ km}^2$ ). It is shown, by using the historical data, that the proposed method is practical and useful. The developed models are going to be utilized for real dam operation in near future.

*Keywords : flood runoff, real-time prediction, stochastic model*

### 1. まえがき

電力ダムは、平常時には河川の流水を貯留、取水するとともに発電落差の確保という役割を果たしている。一方、ダム上流域での降雨によりダムへの流入量が増加していくと、発電に利用されない余剰の水を下流に放流する必要が生じる。これが出水時のダム操作で、その際は湛水池周辺および下流の災害防止を図ることがダム管理者の責務となっている。

電力ダムの操作方法は、その運用目的、規模によって異なるが、河川管理者の承認を得た「ダム操作規程」により各ダムごとに定められている。操作の特徴としては、治水ダムでは洪水のピークカットを行うのに対し、電力ダムではピークカットは行わず、流入量が洪水量（ダム下流で被害が生じない最大流量で、当該ダム操作規程に定められている）に達するまでに予備放流水位に低下させ、その後は放流量を流入量に等しくすることが挙げられる。

一連のダム操作で重要なポイントは2点に絞られる。

まず第1はダムへの流入量が発電使用水量を上回り、貯留によってダム水位が上昇してゆく状況の下で、適切なタイミングでゲートからの初期放流を行うことである。第2は適切なタイミングで予備放流を開始し、流入量が洪水量に達するまでに安全にダム水位を予備放流水位に下げることである。初期放流操作等にあたっては、事前措置として関係機関への通知通報あるいはダム下流河川内の警報サイレンおよび河川パトロールによる危害防止措置等を行うことが義務づけられている。これらを適切に行うためには要員への連絡等含めて相当時間先（1～5時間程度）の出水の見通しを得ることが必要となる。また、予備放流操作にあたっても下流に急激な水位上昇をさせないようにして所定の時期までにダム水位を低下させることになっており、そのためにも出水予測が必要になる。

電力ダムの操作に従来から用いられている出水予測の方法としては、ダムが運用を開始して以降相当期間に蓄積された雨量・流量データを比較・対照し、その中から単純な相関関係を見出し、テーブル化して予測している例が多い。これらは各ダム操作員の経験に基づくもので、理論的な裏付けに乏しく適用範囲、精度ともに限られたものである。このため運用にあたっては操作員個人の技量にたよるところが大きい。

\* 正会員 関西電力(株) 建設部次長  
(〒530 大阪市北区中之島3-3-22)

\*\* 正会員 関西電力(株) ダム保安課長(同上)  
\*\*\* 正会員 関西電力(株) 建設部課長(同上)

一方、流出解析の分野では Sherman の単位図法に始まってタンクモデル、貯留関数法、雨水流法等種々のモデルが提案されており、一部電力ダムでも実用例がある<sup>1)</sup>。近年これらのモデルに対し、適応制御理論の1つであるカルマンフィルターの利用について基礎的な研究がなされ予測精度の大幅な向上が望めるようになつた<sup>2)</sup>。

著者らは、これらの成果を踏まえ、予測精度の向上および実用化を目的とし、実時間確率予測モデルの開発に取り組んできた。本論文では一連の研究成果をまとめてここに報告する。

## 2. 実時間確率予測モデルの概要

本研究では、ダム操作を支援する実用的な予測モデルを作成することを目的としている。したがって、予測モデルの作成にあたっては、若干物理的な厳密さを犠牲にしても実用的であることおよび予測精度が良好であることを念頭に考慮した。ここでは、実用的解析手法として広く用いられている貯留関数法とタンクモデルを対象とした。

### (1) 確率予測モデル

洪水流出の予測は降雨予測と洪水流出モデルによって行われるが、一般には予測流量と観測流量とは異なる。この差はモデルの不完全さと、降雨流量観測の誤差に起因する。したがって流出モデルを決定論的に扱うより、それらの誤差を補償する雑音を導入して確率モデルを構成する方が合理的であろう。この考えに基づいて高樟らは洪水流出を実時間で確率的に予測していく方法を検討している<sup>3)~8)</sup>。

以下に貯留関数法、タンクモデルの確率予測モデルの概要を示す。なお、両モデルとも実用時の簡便さを考慮に入れ対象流域を单一流域として取り扱う集中型モデルとした。さらに、貯留関数法を用いたモデルでは直接流出のみでなく、全流出成分を予測の対象とした。

この2つの予測モデルのどちらを選択するかについては、各流域で両者を用いたモデルを作成し、その精度を比較することにより決定した。

#### a) 貯留関数法を用いた確率予測モデル

貯留関数法の基礎方程式は運動方程式と連続の式より構成され以下のように示すことができる。

$$S = Kq^p \quad (1)$$

$$\frac{dS}{dt} = r_e - q \quad (2)$$

ここに、

$S$ ：流域貯留量 (mm)

$q$ ：流出高 (mm/h)

$r_e$ ：有効雨量強度 (mm/h)

$$R < R_{sa} \text{ のとき } r_e = f_1 \cdot r$$

$$R \geq R_{sa} \text{ のとき } r_e = r$$

$R$ ：累加雨量 (mm)

$R_{sa}$ ：飽和雨量 (mm)

$f_1$ ：一次流出率

$r$ ：降雨強度 (mm/h)

$K, P$ ：定数

流域貯留量  $S$  が求まれば式(1)より流出高  $q$  が求まり、以下の式を用いて流量に変換される。

$$Q = \frac{1}{3.6} qA \quad (3)$$

ここに、

$Q$ ：流量 (m<sup>3</sup>/s)

$A$ ：流域面積 (km<sup>2</sup>)

この基礎方程式に基づき、状態変量を貯留量  $S$ 、観測変量を流出高  $Q$  として以下のシステム方程式を構成した。

- 状態方程式

$$S_{i+1} = F(S_i) + \delta_i \quad (4)$$

ここに、

$S_i$ ：時刻  $i$  の流域貯留高

$\delta_i$ ：時刻  $i$  の状態雑音

$F(S_i)$ ：式(1)を式(2)に代入した貯留高  $S$  に関する微分方程式を  $S_i$  を初期値としてルンゲ・クッター法を用いて計算した時刻  $i+1$  の貯留高

- 観測方程式

$$q_i = \left( \frac{S_i}{K} \right)^{1/p} + \varepsilon_i \quad (5)$$

ここに、

$q_i$ ：時刻  $i$  の流出高

$\varepsilon_i$ ：観測雑音

ここで、式(5)の観測方程式は非線形であるため、線形化を図る。線形化の方法はいくつかあるが、ここでは簡単のため、 $S_i = \hat{S}_i + \Delta S_i$  として  $\hat{S}_i$  の近傍で Taylor 展開して線形化を図った。ここで  $\hat{S}_i$  は  $S_i$  の事前推定量である。

$$q_i(\hat{S}_i + \Delta S_i) = q_i(\hat{S}_i) + \frac{\partial q_i}{\partial \hat{S}_i} \Delta S_i + O(\Delta^2) + \varepsilon_i$$

$$= \frac{\partial q_i}{\partial \hat{S}_i} \hat{S}_i + q_i(\hat{S}_i) - \frac{\partial q_i}{\partial \hat{S}_i} \hat{S}_i + O(\Delta^2) + \varepsilon_i \quad (6)$$

ここに、

$$H_i = \frac{\partial q_i}{\partial \hat{S}_i} = \frac{1}{KP} \left( \frac{\hat{S}_i}{K} \right)^{(1-p)/p} \quad (7)$$

$$C_i = q_i(\hat{S}_i) - \frac{\partial q_i}{\partial \hat{S}_i} \hat{S}_i \quad (8)$$

とおき、2次以上の高次の項を無視すると

$$q_i = H_i S_i + C_i + \varepsilon_i \quad (9)$$

を得る。

したがって式(5)は式(9)のように線形化され、式(4)の状態式と組み合わせて確率予測モデルとして用いた。

なお、状態雑音  $\delta_i$  は状態量と白色雑音の積とし、白色雑音の分散値は 5 % の 2 乗とした。観測雑音  $\varepsilon_i$  は流出高と白色雑音の積とし、白色雑音の分散値は 1 % の 2 乗とした。白色雑音の分散値はいくつかの出水で分散値を変え予測精度を検討した結果決定した。

### b) タンクモデルを用いた確率予測モデル

三段直列型タンクモデルの状態方程式と観測方程式は次式のとおりである。

#### ・状態方程式

$$x_{t+1} = A_t x_t + B_t + G_t U_t \quad \dots \dots \dots (10)$$

#### ・観測方程式

$$y_t = C_t x_t + D_t + W_t \quad \dots \dots \dots (11)$$

ここに、各変数は図-1を参照して以下のとおりである。

$$x_t = \begin{pmatrix} x_1^t \\ x_2^t \\ x_3^t \end{pmatrix} \quad \dots \dots \dots (12)$$

$$y_t = y_{11}^t + y_{12}^t + y_{21}^t + y_{31}^t \quad \dots \dots \dots (13)$$

$$A_t = \begin{bmatrix} 1 - \alpha_{11} - \alpha_{12} - \beta_1 & 0 & 0 \\ \beta_1 (1 - \alpha_{21} - \beta_2) & 1 - \alpha_{21} - \beta_2 & 0 \\ \beta_1 \beta_2 (1 - \alpha_{31} - \beta_3) & \beta_2 (1 - \alpha_{31} - \beta_3) & 1 - \alpha_{31} - \beta_3 \end{bmatrix} \quad \dots \dots \dots (14)$$

$$B_t = \begin{pmatrix} r_{t+1} + \alpha_{11} h_{11} + \alpha_{12} h_{12} \\ \alpha_{21} h_{21} \\ 0 \end{pmatrix} \quad \dots \dots \dots (15)$$

$$C_t = \lfloor \alpha_{11} + \alpha_{12} + \beta_1 (\alpha_{21} + \beta_2 \alpha_{31}) \rfloor | \alpha_{21} + \beta_2 \alpha_{31} | \alpha_{31} \rfloor \quad \dots \dots \dots (16)$$

$$D_t = -(\alpha_{11} h_{11} + \alpha_{12} h_{12} + \alpha_{21} h_{21}) \quad \dots \dots \dots (17)$$

ここに、 $r_{t+1}$  は時刻  $t$  から時刻  $t+1$  までの降雨量、 $\alpha$ 、 $\beta$  はそれぞれタンク側方、底部の流出孔の大きさ、 $x$  はタンク貯留高、 $y$  はタンク側方よりの流出高を示す。

また、 $U_t$ 、 $W_t$  はそれぞれ時刻  $t$  の状態雑音、観測雑音であり、 $G_t$  は状態雑音の配分行列である。

なお、状態雑音、観測雑音は貯留関数法モデルと同様に状態量、流出高に依存するものとし、状態雑音の共分散は雨量の 15 % の 2 乗、予測流出高の 10 % の 2 乗、観測流出高の 10 % の 2 乗より最大値を選び、観測雑音の共分散は観測流出高の 3 % の 2 乗とした。さらに、配分行列  $G_t$  は対角行列とし、1 段目のタンクに対応する対角項は雨と 1 段目タンクよりの計算流出高の和と雨と計算総流出高の和の比とし、2 段目より下段について各タンクよりの計算流出高と雨と計算総流出高の和の比とした。

出水の確率予測では、時々刻々の入出力の観測値を用

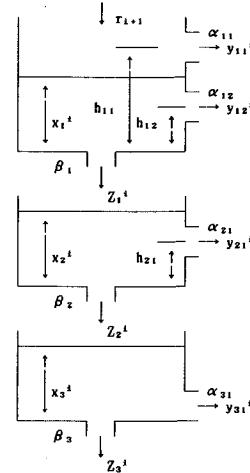


図-1 三段タンクモデルの変数

いて状態をフィルタリングし、その状態推定値と入力(予測)値を用いて、将来の状態および出力(流量)の確率分布(予測値とその共分散)を求めることがなる<sup>3),4)</sup>。

### (2) 降雨の取扱い

流域内の状態の推移は貯留関数法を用いた予測モデルでは式(4)、タンクモデルを用いた予測モデルでは式(10)で表わされる。これらのシステムへの入力である降雨  $r$  も実は観測誤差をもつ不確定な変量と考えるべきであろう。しかしながら、観測された降雨は誤差を含まないとして扱われる場合がほとんどである。これは現状では降雨観測(あるいは面積雨量推定)の誤差評価が難しいことと、入力評価をそのように確率的に扱う流出解析法が、解析の煩雑さもあってあまり考慮されてこなかったことに起因している。

本研究でも観測降雨は誤差を含まないとする。流域内には通常複数の雨量観測点があり、これらの観測雨量を用いてシステムへの入力となる雨量を設定することとなる。本研究ではこの入力雨量  $r$  を以下のようにして設定した。

$$r(t) = \sum_{i=1}^n \alpha_i r_i (t - t_{Li}) \quad \dots \dots \dots (18)$$

ここに、 $n$  は流域内の雨量観測点数を示し、 $\alpha_i$  は観測点  $i$  の重み(ここでは雨量倍率とよぶ)、 $r_i$  は観測点  $i$  の観測雨量、 $t_{Li}$  は観測点  $i$  の貯留関数法でいう遅滞時間に相当する(ここでは時間遅れとよぶ)。予測時間(リードタイム)がここに示した時間遅れより長くなると降雨予測が必要となる。

式(18)中の雨量倍率、時間遅れは定数の最適化により決定されるが、リードタイムが 1 時間のときは観測雨量のみを用いて予測が行えるようにするために、時間遅れが 1 時間以上になるように最適化時に制約を与えた。

リードタイムが2, 3, 4, 5時間と長くなり時間遅れを上まわると降雨予測が必要となる。本研究では降雨の予測として現時点より前  $t_r$  時間の平均雨量が今後も降りつづくとしてこの  $t_r$  を最適化手法により求めた。ただし、この  $t_r$  は各雨量観測点ごとに求めず流域内一定とした。

洪水の流出予測に適用可能な降雨の短時間予測手法は開発途上にあるが、たとえば過去3時間の面積平均時間雨量を平均し、それを定数倍して今後数時間の予測降雨とする方法が報告されており<sup>9), 10)</sup>、本研究の方法もほぼこの方法と同様である。

### 3. 評価の方法とモデル決定の手順

#### (1) 評価の方法

貯留関数法、タンクモデルの2つの流出解析手法を用いた確率予測モデルを導入したが、このいずれのモデルが各流域に適したモデルとなるかについて客観的な評価が必要となる。

誤差の評価には出水の全体像をとらえて、予測流量と観測流量との差をみる流量収支の誤差、

##### i) 流量収支誤差 ( $E_0$ )

$$E_0 = \frac{|\sum Q_{oi} - \sum Q_{ci}|}{\sum Q_{oi}} \quad (19)$$

あるいは当該時間内の平均的な誤差、

##### ii) 平均誤差 ( $E_A$ )

$$E_A = \frac{1}{N} \sum \frac{|Q_{oi} - Q_{ci}|}{Q_{oi}} \quad (20)$$

がある。ここに、 $Q_{oi}$  は時刻  $i$  の観測流量、 $Q_{ci}$  は時刻  $i$  の予測流量、 $N$  は出水の全データ数を示す。

しかし、これらのみでは図-2に示すように一義的な評価を行うことができない。一方ダム操作への支援という目的からすると出水の立ち上がり部は操作の難易度が

高いため、出水予測の精度に対する重要度を高く評価すべきと考えられる。そこで前出の2つの誤差のほかに出水を分割して基底誤差、立ち上がり誤差、中間誤差の3つの誤差を設定した。

##### iii) 基底誤差 ( $E_{A1}$ )

$$E_{A1} = \frac{1}{N_1} \sum \frac{|Q_{oi} - Q_{ci}|}{Q_{oi}} \quad (21)$$

##### iv) 立ち上がり誤差 ( $E_{A2}$ )

$$E_{A2} = \frac{1}{N_2} \sum \frac{|Q_{oi} - Q_{ci}|}{Q_{oi}} \quad (22)$$

##### v) 中間誤差 ( $E_{A3}$ )

$$E_{A3} = \frac{1}{N_3} \sum \frac{|Q_{oi} - Q_{ci}|}{Q_{oi}} \quad (23)$$

ここに、 $N_1$ 、 $N_2$ 、 $N_3$  は各誤差の算定に用いたデータ数であり、その合計は全データ数  $N$  となる。

さらに、これら誤差の重要度を考慮して重みをつけ、その重みつき線形和で示される誤差を評価誤差とした。

##### vi) 評価誤差 ( $E_J$ )

$$E_J = 0.25 E_{A1} + 0.45 E_{A2} + 0.30 E_{A3} \quad (24)$$

ここで設定した誤差の重みの妥当性については実運用してゆく中で確認する予定である。

したがって予測の結果は合計6個の誤差で示されるが、基本的にはモデルの優劣の評価は評価誤差で行った。

#### (2) モデル決定の手順

モデルの決定は貯留関数法とタンクモデルを用いた2つの確率予測モデルの作成とその検証に大別される。後述する角川ダム流域を例にとり図-3にモデル決定の手順を示す。

まず、対象とする流域の出水資料を収集し、図-3中に示した分類基準に従って分類した。基本的には資料の2/3をモデル作成に用い、残り1/3をモデルの検証に用

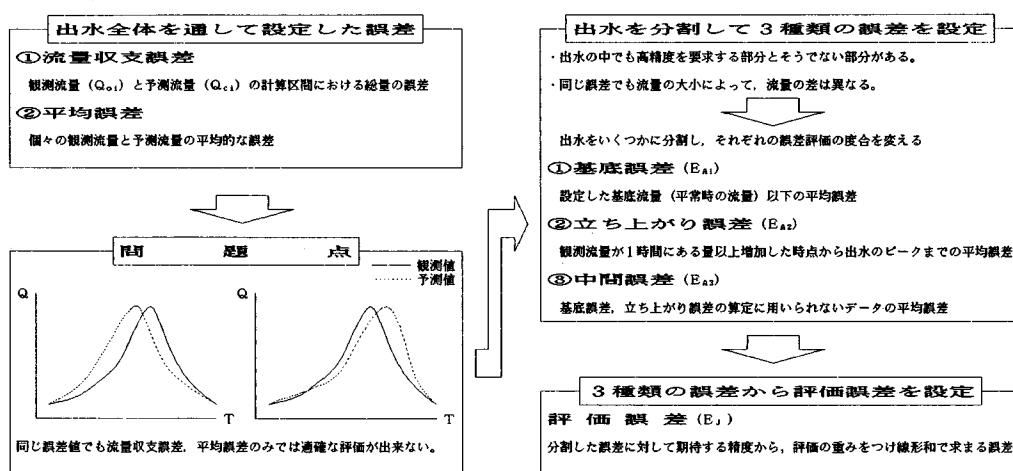


図-2 予測結果を評価するための誤差の設定

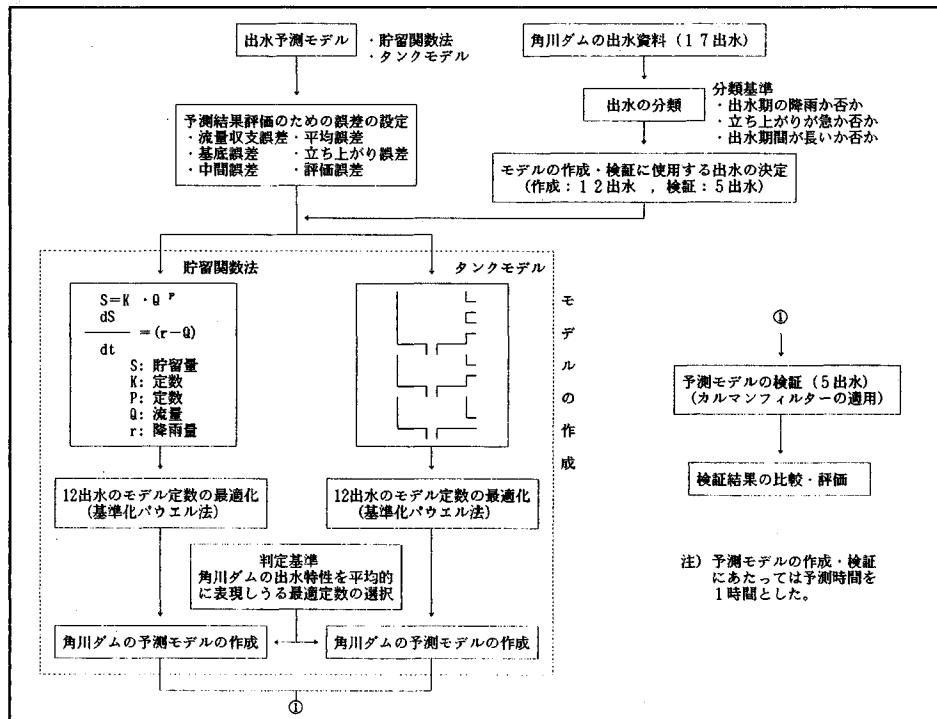


図-3 モデル決定の手順

いた。このとき分類基準によって分類された出水資料がモデルの作成、検証の両方に偏ることなく含まれるように配慮した。

次にモデルの作成に用いる全出水について貯留関数法、タンクモデルの両者について定数の同定を行った。

なお、定数の同定には基準化パウエル法<sup>11)</sup>を用いた。この結果、両予測モデルともモデル作成に用いた出水数だけモデル定数が求まることとなる。これらの定数より対象とする流域の流出特性を最も平均的に表現し得る定数を選択することにより予測モデルの作成とした。具体的には各出水で得られた最適定数をモデルの作成に用いた残りの出水に適用し、(1)で示した評価誤差の平均値が最も小さくなる定数を選択することにより予測モデルの作成とした。したがってこの段階では貯留関数法、タンクモデルの予測モデルがおのおの1個作成されることとなる。

このようにして作成された2つの予測モデルを検証出水に適用し、モデルの予測精度を検証した。その結果より、評価誤差の平均値が小さな値となる予測モデルを選択することによりモデルの決定とした。

なお、ここで示したモデル決定は、予測時間を1時間として行った。予測時間が1時間のときは2.(3)の降雨の取扱いで示したように降雨の予測は行わず、観測雨量のみを用いて予測が行える。

#### 4. 予測モデルの決定例

ダム操作を行ううえで重要度の高い殿山ダム、角川ダムにおけるモデル決定の例を示す。なお、決定の手順にも示したようにここに示すモデルの決定例の予測時間は1時間である。

##### (1) 殿山ダム流域の予測モデル

###### a) 流域の概要

殿山ダムは日置川上流に位置し、294 km<sup>2</sup> の流域面積

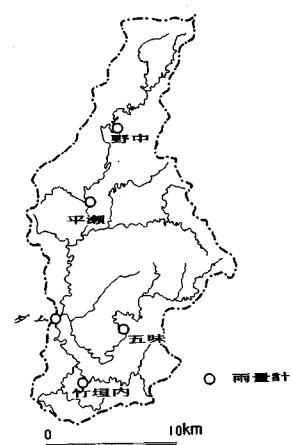


図-4 殿山ダム流域と雨量観測所

をもつ。このダムは図-4に示すように日置川、将军川、前ノ川の三川合流部にあり、流域内にダム地点も含め5か所の雨量観測所を設置している。

### b) 予測モデルの決定および予測の精度

昭和52年より昭和55年までの19出水を用いて、モデルの決定を行った。図-3の手順に従って作成された貯留関数法、タンクモデルの定数は、表-1に示すところである。殿山ダムのタンクモデルの一段目の側方流出孔の数は個数を変化させ予測精度の検討を行った結果2個とした。なお、19出水のうち13出水をモデルの作成に、6出水をモデルの検証に用いた。

このモデル定数を検証出水に適用した結果、評価誤差の平均値は貯留関数法で9.1%，タンクモデルで15.3%となり貯留関数法を用いたモデルに決定した。

表-1 殿山ダムのモデル定数

貯留関数法		タンクモデル		
K	63.0	$\alpha_{11}$	0.0294	
P	0.379	$\alpha_{12}$	0.0182	
f <sub>1</sub>	0.377	$\beta_1$	0.0456	
R <sub>ss</sub>	29.0	$\alpha_{21}$	0.0093	
雨量倍率	殿山	0.0001	$\beta_2$	0.000035
	五味	0.118	$\alpha_{31}$	0.000006
	野中	0.241	$\beta_3$	0.000015
	竹垣内	0.242	$h_{11}$	38.2
	平瀬	0.357	$h_{12}$	9.85
時間遅れ	殿山	1.60	$h_{21}$	22.7
	五味	1.06	$h_{31}$	0.000000
	野中	3.39		
	竹垣内	2.49		
	平瀬	1.23		
時間	殿山	2.55		
	五味	2.56		
	野中	3.46		
	竹垣内	1.08		
	平瀬	1.99		

表-2 殿山ダムの1時間予測の精度

単位：%

	出水番号	流量収支	平均	基底	立ち上がり	中間	評価
作	5206	2.9	8.7	7.5	13.1	8.8	10.4
	5209	0.2	4.6	2.6	8.8	3.8	5.8
	5305A	0.4	9.8	10.3	4.5	8.4	9.6
	5305B	0.4	3.1	—	4.0	2.7	3.5
	5310	3.6	8.6	8.0	20.3	5.9	12.9
	5403	2.1	7.2	6.3	10.1	5.9	7.9
成	5406	0.02	5.2	9.7	10.1	3.2	8.0
	5407	2.1	3.9	—	7.0	2.8	5.3
	5410	1.2	8.5	12.3	9.6	6.6	9.4
	5503	1.3	8.1	19.6	14.3	3.9	12.5
	5505A	5.2	12.6	14.7	18.4	8.2	14.4
	5505C	1.0	4.4	—	9.0	3.8	6.9
検	5510	6.5	9.0	5.3	19.4	7.1	12.2
	5308B	1.3	8.9	11.5	10.4	6.7	9.6
	5404	1.6	6.8	5.9	12.3	4.9	8.5
	5504	0.01	3.6	—	3.1	3.9	3.4
	5505B	0.4	5.8	8.7	6.5	5.4	6.7
	5507A	2.6	6.6	—	15.4	5.3	11.4
証	5509	2.7	11.9	11.8	19.3	11.3	15.0
	平均	1.9	7.2	9.6	11.4	5.7	9.1

注) — は基底流量以下データが存在しないことを示す。

表-2にはここに示した貯留関数法モデルを全19出水に適用した結果を誤差の一覧表にして示す。なお、殿山ダム流域では基底誤差の算定に用いる基底流量は15m<sup>3</sup>/sとし、立ち上がり誤差の算定は観測流量が1時間に10m<sup>3</sup>/s増加した時点よりピーク流量までとした。

このモデルを用いた予測結果の例を観測流量と比較して図-5に示す。なお、図中には予測値の±1σの誤差範囲を網かけして示している。これは予測結果の精度の目安としたもので、誤差範囲が±1σでよいかどうかについては、実運用でのダム操作への影響を把握したうえでさらに検討する必要がある。

### (2) 角川ダム流域の予測モデル

#### a) 流域の概要

角川ダムは神通川上流に位置し、724 km<sup>2</sup>の流域面積をもつ。図-6に示すように、この流域内にダム地点も含めて6か所の雨量観測所を設置している。

#### b) 予測モデルの決定および予測の精度

昭和49年より昭和55年までの17出水を用いて、モ

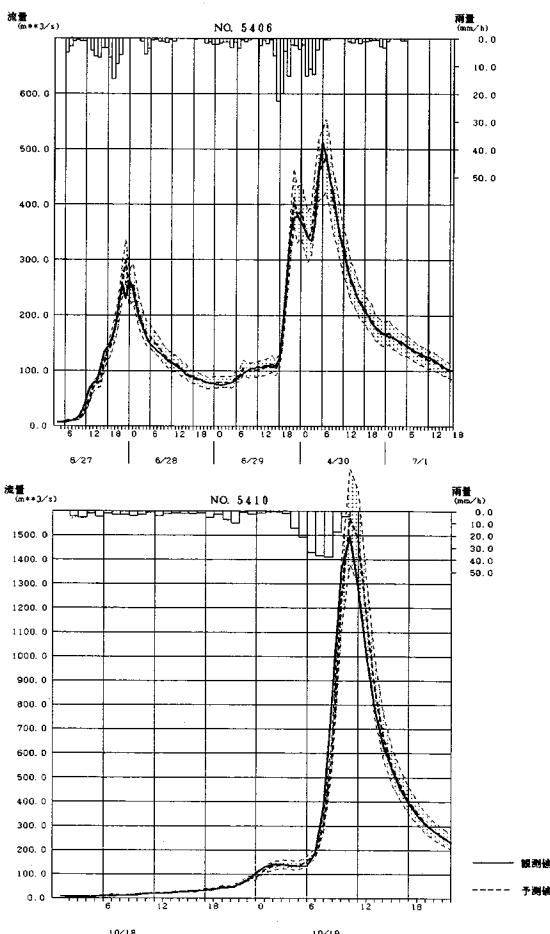


図-5 殿山ダムの1時間予測結果例

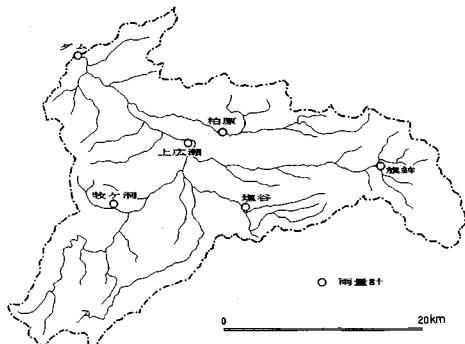


図-6 角川ダム流域と雨量観測所

モデルの決定を行った。なお、図-6に示した雨量観測所のうち、塩屋、柏原は雨量計の設置が比較的新しく雨量データが揃わないため、雨量観測点としてモデル定数の決定には考慮に入れなかった。図-3の手順に従って作成された貯留関数法、タンクモデルの定数は表-3に示すとおりである。なおタンクモデルの一段目の側方流出孔の数は殿山ダムと同様に個数を変化させ予測精度の検討を行った結果3個とした。表-3に示した貯留関数法のモデル定数において、ダム地点より最も遠方にある旗鉾の時間遅れが牧ヶ洞、上広瀬の時間遅れより短くなっている。この流域ではダム地点以外の観測所ではほぼ一様な降雨になることが多く、地点名と時間遅れ・雨量倍率が厳密に対応しているわけではなく、必ずしも不合理ではない。このような結果を回避するためには定数の最適化時に不等式制約を与えることが考えられるが、計算時間が多大となり実用的でないため、ここでは不等式制約を与えずに定数の最適化を行った。

このモデル定数を検証出水に適用した結果、評価誤差の平均値は貯留関数法を用いたモデルで10.0%、タンクモデルを用いたモデルで11.7%となった。この結果より、角川ダム流域の予測モデルとして貯留関数法を用

表-3 角川ダムのモデル定数  
貯留関数法

K	46.6
P	0.449
f <sub>i</sub>	0.727
R <sub>ss</sub>	110.0
雨量倍率	
角川	0.121
牧ヶ洞	0.424
上広瀬	0.137
旗鉾	0.274
時間遅れ	
角川	1.00
牧ヶ洞	2.88
上広瀬	2.99
旗鉾	1.00
時間	

$\alpha_{11}$	0.0395
$\alpha_{12}$	0.0164
$\alpha_{13}$	0.0151
$\beta_1$	0.0385
$\alpha_{21}$	0.0265
$\beta_2$	0.0279
$\alpha_{31}$	0.0004
$\beta_3$	0.0091
$h_{11}$	28.9
$h_{12}$	16.9
$h_{13}$	0.000014
$h_{21}$	4.93
$h_{31}$	0.0131

表-4 角川ダムの1時間予測の精度

単位: %

	出水番号	流量収支	平均	基底	立上がり	中間	評価
作	4908	2.8	9.4	4.4	26.3	4.4	14.2
	4909	0.5	6.4	—	7.7	4.9	6.6
	5109	0.5	4.9	4.8	8.4	3.6	6.1
	5211	1.1	8.6	12.4	8.7	5.8	8.7
	5306	0.04	3.7	13.8	8.9	2.5	8.2
	5310	2.2	9.8	24.6	7.2	7.8	11.7
	5406	0.9	5.2	3.7	9.2	4.6	6.4
	5410	3.3	8.0	6.8	6.7	8.6	7.3
成	5506	1.8	5.9	—	7.7	5.5	6.9
	5507B	0.9	4.2	—	7.0	3.2	5.5
	5507C	0.7	4.8	—	7.5	3.9	6.1
	5508	2.8	11.3	5.8	14.6	11.5	11.5
	5008	2.4	13.5	18.4	9.3	9.4	11.6
検	5104	3.1	8.5	—	13.3	6.5	10.6
	5409	1.0	4.2	—	16.3	3.3	11.1
	5507A	0.8	6.6	—	8.4	5.9	7.4
	5509	0.7	6.2	—	11.8	5.5	9.3
平	均	1.5	7.1	10.5	10.5	5.7	8.8

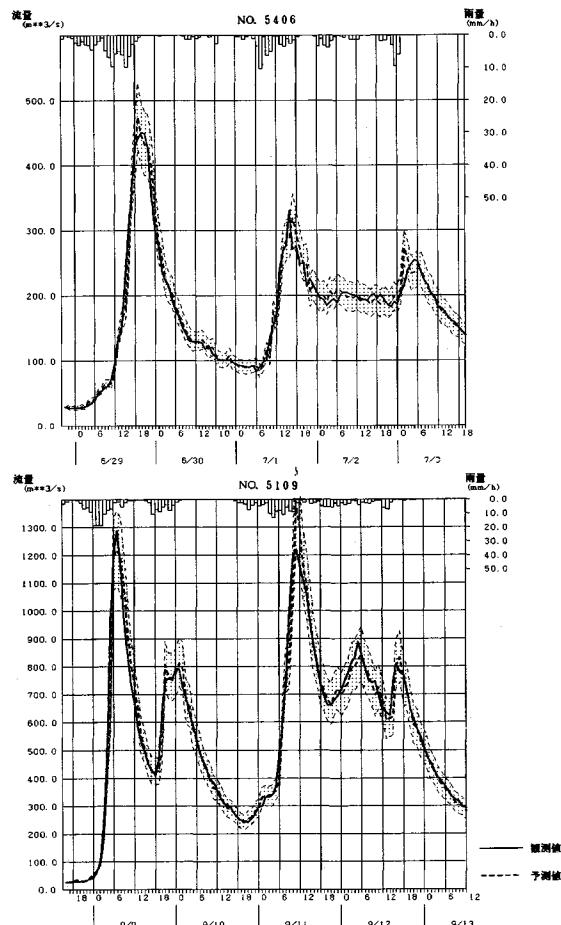


図-7 角川ダムの1時間予測結果例

いたモデルに決定した。表一4にはこのモデルを全17出水に適用した結果を誤差の一覧表にして示す。なお、角川ダム流域では基底誤差の算定に用いる基底流量は $30 \text{ m}^3/\text{s}$ とし、立ち上がり誤差の算定は観測流量が1時間に $10 \text{ m}^3/\text{s}$ 増加した時点よりピーク流量までとした。

このモデルを用いた予測結果の例を観測流量と比較して図-7に示す。

## 5. 降雨予測精度が出水予測精度に与える影響

2.(3)の降雨の取扱いでも示したように予測時間が長くなり、時間遅れを上回ると降雨予測が必要となる。本研究ではこの雨量を過去 $t_r$ 時間の平均雨量が今後も降りつづくとして予測に必要となる降雨を簡便に予測している。この $t_r$ 時間を最適化により求めた結果、殿山ダムでは2.5時間、角川ダムでは4.0時間となった。この $t_r$ 時間の平均雨量を用いることにより予測した降雨を用いて殿山ダムで3時間、5時間の予測を行った。なお、ここでは毎正時のデータを扱っているため、状態量のフィルタリング間隔は1時間とした。

その結果を評価誤差の一覧表にして表-5に示す。また、角川ダムについては表-6に示す。なお、表には降雨予測の影響を調べるために予測時点では本来未知となる降雨に対して、降雨予測を行わずに実降雨を用いて予測した誤差（予測時点では未知である降雨を用いているため本当の予測にはなっていない）についても併せて示した。

図-8には殿山ダムの予測結果例（予測時間3時間）を予測降雨を用いた場合と実降雨を用いた場合を比較して示し、図-9には角川ダムの予測結果例を示す。

予測の結果を殿山ダム、角川ダムについてそれぞれ要約すると以下のとおりである。

### a) 殿山ダム

予測時間3時間のケースでは予測降雨を用いた場合の評価誤差の平均は19.3%，実降雨を用いた場合のそれは14.0%と差は5%程度である。予測時間が5時間になると予測降雨を用いた場合の評価誤差の平均が34.5%に対し、実降雨を用いた場合のそれは16.8%となり、その差は17%強となる。殿山ダムでは後述する角川ダムに比べると3時間予測においてすでに予測降雨を用いた場合と実降雨を用いた場合で比較的大きな評価誤差の差が生じている。これはモデル定数の時間遅れをみると、雨量観測点のなかで雨量倍率の大きい平瀬、竹垣内において、3時間予測ですでに降雨の予測が必要となり本研究で用いた降雨予測手法による予測降雨と実降雨に差が生じたことによる。したがって、予測時間が5時間になるとさらに両者の差は大きくなってくる。

### b) 角川ダム

予測時間3時間のケースでは予測降雨を用いた場合の評価誤差の平均は16.0%，実降雨を用いた場合のそれは15.4%と差は0.6%程度である。しかし、予測時間が5時間になると予測降雨を用いた場合の評価誤差の平均が25.7%に対し、実降雨を用いた場合のそれは18.3%となり、その差は7%強となる。モデル定数をみると牧ヶ洞と上広瀬の時間遅れが3時間程度あり、3時間予測ではこの2地点についてはほとんど予測降雨を用いていない。さらに両地点の雨量倍率の合計が0.55程度

表-5 殿山ダムの予測精度（予測時間：3, 5時間）

単位：%

出水番号	予測時間：3時間		予測時間：5時間	
	予測降雨	実降雨	予測降雨	実降雨
5206	22.2	12.6	47.7	12.8
5209	12.5	10.5	17.0	12.7
5305A	13.2	11.5	23.5	15.8
5305B	9.8	6.4	18.2	7.9
5310	28.0	25.3	38.1	25.1
5403	13.6	11.8	27.3	13.2
5406	20.1	16.1	28.7	18.5
5407	12.2	13.3	23.9	17.3
5410	17.3	14.6	32.7	14.3
5503	18.3	17.0	32.3	21.2
5505A	40.6	18.2	72.3	20.5
5505C	16.6	12.7	30.8	15.0
5510	34.6	19.0	66.9	27.0
5308B	18.3	14.3	33.0	18.0
5404	19.7	14.9	45.9	23.9
5504	8.3	5.4	16.1	5.5
5505B	6.7	9.9	25.1	9.5
5507A	27.5	18.3	38.2	19.2
5509	27.7	14.0	38.5	21.1
平均	19.3	14.0	34.5	16.8

表-6 角川ダムの予測精度（予測時間：3, 5時間）

単位：%

出水番号	予測時間：3時間		予測時間：5時間	
	予測降雨	実降雨	予測降雨	実降雨
4908	22.5	20.3	45.9	30.5
4909	16.0	12.3	27.5	13.5
5109	12.5	11.3	26.5	15.0
5211	18.5	16.3	28.2	19.7
5306	16.7	17.0	18.4	15.8
5310	20.6	23.9	20.2	24.9
5406	11.2	19.4	18.7	12.1
5410	11.2	12.6	21.0	14.4
5506	12.3	11.7	21.7	9.8
5507B	5.2	8.3	10.3	10.5
5507C	12.1	13.1	16.1	14.7
5508	21.2	20.5	27.0	24.6
5008	20.2	18.6	31.5	23.2
5104	20.1	19.0	29.8	23.8
5409	26.2	20.9	43.6	24.1
5507A	13.1	14.0	23.3	16.8
5509	13.1	13.4	26.5	17.4
平均	16.0	15.4	25.7	18.3

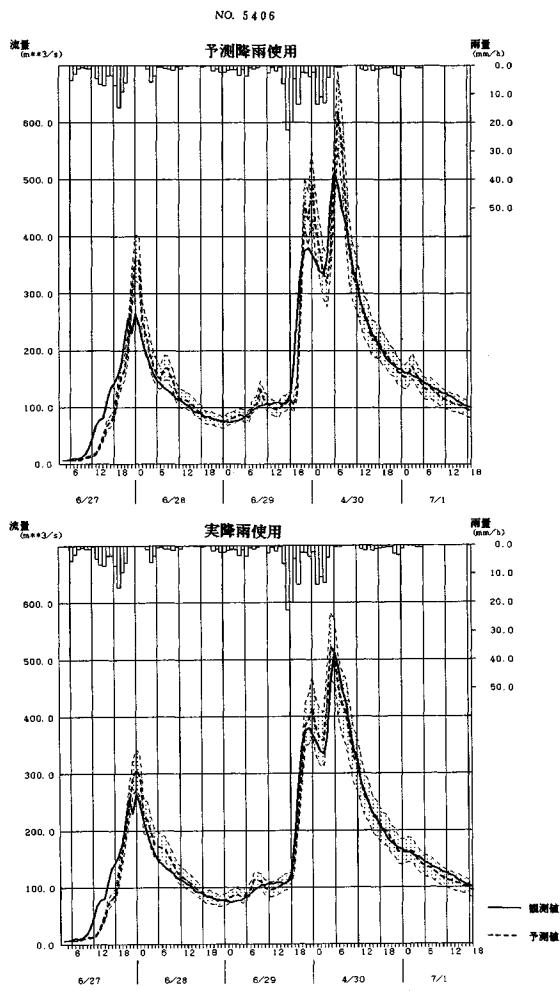


図-8 殿山ダムの3時間予測結果例

ある。したがって、予測降雨を用いた影響が5時間予測ほど大きく生じなかつたと考えられる。

殿山ダムと角川ダムで予測時間が3時間において予測降雨を用いた場合と実降雨を用いた場合の誤差の生じ方の違いは流域面積の広さの違いがモデル定数に反映している結果であると考えられる。

さらに、実降雨を用いて予測時間が精度に与える影響を調べるために、1時間予測と実降雨を用いた3時間、5時間予測の結果を評価誤差の平均で比較した。殿山ダムにおける1時間予測の評価誤差の平均は表-2より9.1%であり、3時間、5時間予測の実降雨を用いた値は表-5よりそれぞれ14.0、16.8%である。このように予測時間が長くなるにつれ予測精度が低下しているのは、使用している貯留関数法モデルが現象を十分に表現しきれていないことにより、予測時間が長くなるにつれ誤差が累積したことによると考えられる。

角川ダムにおいても同様の比較をすると1時間予測の

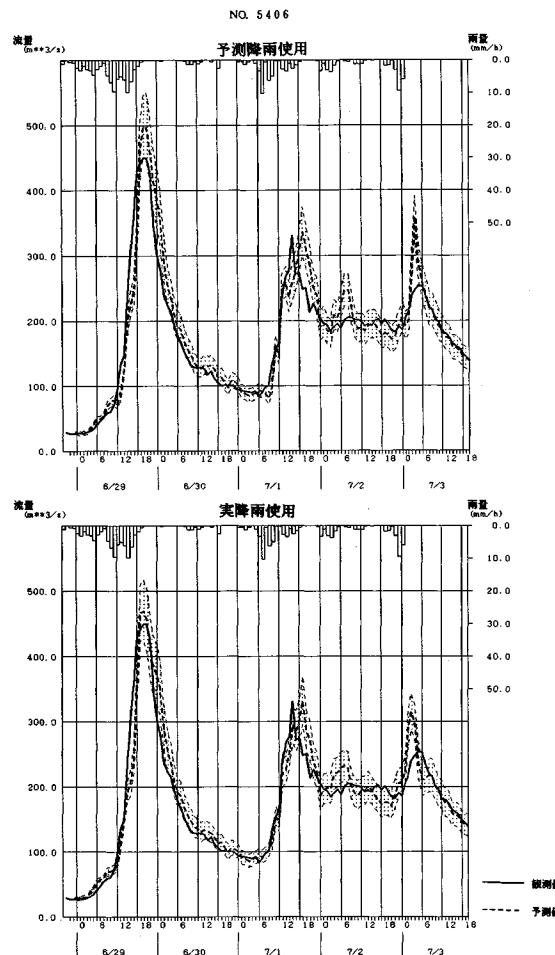


図-9 角川ダムの3時間予測結果例

評価誤差の平均は8.8%であり、3時間予測、5時間予測の実降雨を用いた値はそれぞれ15.4、18.3%であり、殿山ダムと同様の傾向になっている。

## 6. 結 論

本論文では実用的な実時間確率出水予測モデルの開発を目的とした研究の成果を取りまとめて示した。本文中に示した評価の方法、モデル決定の手順に従って、殿山、角川ダム流域においてモデルの開発を行った。その結果、両ダム流域とも貯留関数法を用いた予測モデルの精度が、タンクモデルを用いた予測モデルの精度を上回った。したがって、両流域とも貯留関数法を用いた予測モデルを用いることとした。

今回開発した出水予測モデルについて要約すると以下のとおりとなる。

(1) 両流域の予測モデルの1時間予測の精度を本研究で設定した評価誤差でみると、殿山ダム流域の19出

水の平均値は 9.1 % となり、角川ダム流域の 17 出水の平均値は 8.8 % となった。両流域とも誤差 10 % 以下の予測精度が得られ、短時間先のダム操作に十分利用可能である。

(2) さらに、簡便な降雨予測を行った 3, 5 時間予測の評価誤差は、殿山ダム流域の 19 出水平均でそれぞれ 19.3 %, 34.5 % となり、角川ダム流域の 17 出水の平均値ではそれぞれ 16.0 %, 25.7 % となった。これらの誤差については 3 時間以上の予測の利用目的が、主に出水の全体像の把握あるいは要員確保・体制確立要否の判断に限られることを考慮すると十分利用可能と考えられる。

以上の結果より、予測モデルとして十分実用的なものを開発することができた。ここで開発したモデルはパソコンレベルの計算機で十分利用可能であるため、今後ダム管理所に設置されている操作卓に導入し、リアルタイムに出水予測を行い、より安全かつ合理的なダム操作を行うために利用していく予定である。なお、予測は 5 時間先まで行い、1 時間先までは 10 分刻み、2 時間より 5 時間先までは 1 時間刻みに操作卓に表示し、予測値の更新は 10 分ごとに行う計画である。

以上の結果を踏まえ、今後ここで示した手法を他流域に適用し、各ダム流域における予測モデルの開発を進める予定である。

**謝 辞**：本研究を遂行するにあたり、京都大学工学部 高棹琢馬教授に有益なるご意見、ご教示を賜った。ここに記して深甚なる感謝の意を表する。さらに（株）新日本技術コンサルタント 陳 活雄水工部長、（株）ユニック 西田寿夫数値解析研究室長、当社支店支社の関係者に多大な協力を得たことを付記し感謝の意を表す

る。

#### 参考文献

- 1) 緒方芳二・是石俊文・落合正治：上椎葉ダムにおける洪水予測について、電力土木, No. 158, pp. 20~33, 1979.
- 2) 日野幹雄：水文流出系予測へのカルマン・フィルター理論の適用、土木学会論文報告集, No. 221, pp. 39~47, 1974.
- 3) 高棹琢馬・椎葉充晴：流出システムのフィルタリングと予測、第 16 回自然災害科学総合シンポジウム論文集, pp. 133~136, 1979.
- 4) 高棹琢馬・椎葉充晴：流出システムのフィルタリングと予測（第 2 報）、第 17 回自然災害科学総合シンポジウム論文集, pp. 213~216, 1980.
- 5) 高棹琢馬・椎葉充晴・宝 鑿：貯留モデルによる実時間流出予測に関する基礎的研究、京都大学防災研究所年報, 第 25 号, B-2, pp. 245~267, 1982.
- 6) 高棹琢馬・椎葉充晴・宝 鑿：洪水流出の確率予測におけるモデルと手法、第 19 回自然災害科学総合シンポジウム講演要旨集, pp. 63~66, 1982.
- 7) 高棹琢馬・椎葉充晴・宝 鑿：複合流域における洪水流出の確率予測手法、京都大学防災研究所年報, 第 25 号, B-2, pp. 181~196, 1983.
- 8) Takara, K., Shiiiba, M. and Takasao, T. : A stochastic method of real-time flood prediction in a basin consisting of several sub-basins, Journal of Hydro-science and Hydraulic Engineering, J. S. C. E, Vol. 1, No. 2, 1983.
- 9) 高棹琢馬・永末博幸：淀川水系における洪水の予知、予報について、第 19 回自然災害科学総合シンポジウム講演要旨集, pp. 47~50, 1982.
- 10) 木下武雄：洪水予報の最近の技術—利根川洪水予報の例、第 19 回自然災害科学総合シンポジウム講演要旨集, pp. 51~54, 1982.
- 11) 角屋 瞳・永井明博：流出解析手法（その 12）、農業土木学会誌, 第 48 集, 第 12 号, pp. 51~59, 1980.

(1988. 6. 15・受付)