

水運用計画における予測問題とタンクモデル†

小橋 知子^{††} 吉村 猛^{††}

上水道系統において効果的な水運用を行うためには、ダム放流量を制御し渇水期に備え得る限りダム貯水池に貯水する一方、安定給水を確保し需要をすべて満たさなければならない。したがってダム流入量および水需要量の今後の変動を的確に予測することが重要である。本論文では、台風などによる出水時のダム流入量時間単位予測モデルとして改良型タンクモデル、水需要量日単位予測モデルとして洗濯タンクモデルを提案し、それぞれのモデルの有効性を検証したので報告する。ダム上流流域の降雨量をダム流入量に変換する改良型タンクモデルでは、予測を開始する前にあらかじめ実績値変動に追従するように各タンク貯留高を調整してから予測対象時点の各タンク貯留高を設定する。そのため応答性がよく、タンク構造パラメータを調整しなくても精度の高い予測値が得られ、平均誤差率は従来モデルの1/5以下に改善された。また洗濯タンクモデルは、当日の天候と過去数日間の天候履歴との組合せが当日の水需要に与える影響を、家庭における洗濯の行動のしかたと結びつけて考慮することにより予測値を補正するタンクモデルである。このモデルを導入し、当日の天候だけでなく天候履歴の影響も考慮した結果、従来のモデルと比較して平均誤差率は10%改善され、とくに1年中で最も水需要の多い夏季の急激な水需要量変動に対する追従性が向上した。

1. まえがき

上水道系統においては、慢性化しつつある水不足に対処するため、限られた水資源を最大限有効に利用しかつ安定給水を確保することを目的とした水運用計画の作成が重要になってきている。効果的な水運用を行うためには、降雨量からダムへの流入量の変動を的確に予測し、放流量を制御することにより、渇水期に備えダム貯水池にできる限り貯水する一方、水需要を正確に把握し、各需要家の需要を満たす適正な水量・水圧の配分をしなければならない。したがって、ダム流入量予測および水需要予測の予測精度を向上させることは、有効な水運用計画を作成する上で重要な課題のひとつである。

ダム流入量予測における雨量-ダム流入量変換モデルとしては、河川流出解析の各種流出モデル(タンクモデル^{1),2)}、貯留関数法³⁾、GMDH⁴⁾などを適用することができる。これらのモデルのなかにおいて、菅原によるタンクモデルは、簡単な構造にもかかわらず複雑な現象を的確に表しており数々の実績がある¹⁾。そこで、筆者らは台風などによる洪水時のダム流入量時間単位予測にタンクモデルを適用した。ところが、あるケースによく適合するようにパラメータを調整してタンク構造を設定しても、別のケースに対しては必ず

しも予測精度がよくないという問題が生じた。この問題を解決する方法としては本論文では改良型タンクモデルを提案する。このモデルでは、予測開始時点直前までの実績データをもとに、実績値変動に追従するように一時点ごとにタンクの貯留高が調整されるため、洪水のたびにパラメータの再調整をしなくても予測精度が低下することはない点が特徴である。

一方、水需要量予測については既にGMDHの適用⁵⁾や水需要に影響を与える要因について要因分析を行い予測アルゴリズムを組み立てる方法⁶⁾などが報告されている。日単位の水需要量はほぼ周期的に変動するので、過去の実績値変動と当日の天気予報(天候・気温)などの不規則変動成分に関する情報とから、当日の水需要量を予測することが可能である。従来報告されている方法ではいずれも、天候に関する不規則変動の要因として当日の天候あるいは前日からの天候変化しか考慮していない。しかし、現実には水需要は当日の天候および過去数日間の天候履歴の影響をうける。このことは、家庭用配水量のうち約30%も占める洗濯用水が当日の天候だけでなく天候履歴の影響も受けることから理解できる。すなわち、水需要は、家庭において雨天が続くと洗濯物がたまり、天候が回復するといっせいに洗濯するという行動と結びつけて考えることができる。本論文では、天候および天候履歴による洗濯の行動のしかたの変化に対応して予測値を補正する洗濯タンクモデルを提案する。

以下、2章ではダム流入量予測モデルとして改良型タンクモデル、3章では水需要量予測モデルとして洗

† Prediction Problems in Water Supply Planning and Tank Models by TOMOKO OBASHI and TAKESHI YOSHIMURA (Application System Research Lab., C&C Systems Labs. Nippon Electric Co., Ltd.).

†† 日本電気(株) C&C システム研究所応用システム研究部

溜タンクモデルを提案し、それぞれのモデルの有効性を示す。

2. ダム流入量予測と改良型タンクモデル

2.1 ダム流入量予測問題

ダム流入量予測は、日単位予測と時間単位予測とにわけられる。前者では、ダム上流流域の日雨量から日平均ダム流入量を予測する問題である。年に1,2度の洪水時を除けば1年の大部分の期間ダム流入量の変化はゆるやかであるので、通常の場合ダム流入量予測は日単位予測で十分である。ところが、洪水時においてはダム流入量の変動は急激であるので、日単位予測では不十分であり、時間雨量から時間平均ダム流入量を予測する必要がある。台風や前線性の大雨の場合には、現在までの降雨量と今後予想される降雨量とから今後のダム流入量変動・ピークの時刻・半減期を予測することが、水の有効利用および洪水対策上重要である。ここでは洪水時におけるダム流入量時間単位予測問題について考える。

2.2 タンクモデル

タンクモデルは、流域に降った雨が河川へ流出する機構を、流域の各帯水層に対応づけられた数段のタンクで表現した流出モデルである。雨を1段めタンクに入力すると、一部は各段タンクの側面につけられた流出孔より流出し、一部は底面につけられた浸透孔を通過して順次1段下のタンクへの入力となる。このとき

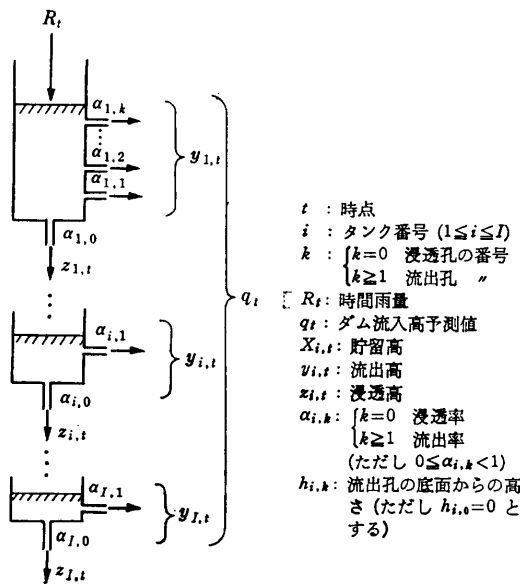


図1 タンクモデル
Fig. 1 Tank model.

全タンクからの流出の和が河川への流出量に対応する。

図1に示すタンクモデルを用いてダム流入量を時間単位で予測する場合を考える。ここで計算はすべて時系列で行い、タンクからの流出高や浸透高の単位は雨量と同じ mm/hr、貯留高の単位は mm とし、タンクの断面積は単位面積とする。

t 時点においてタンク i からの流出高 $y_{i,t}$ および浸透高 $z_{i,t}$ は、貯留高 $X_{i,t}$ のすぐ下の流出孔の番号を $K_{i,t}$ としたとき

$$y_{i,t} = \begin{cases} 0 & (K_{i,t} = 0) \\ \sum_{k=1}^{K_{i,t}} \alpha_{i,k} \cdot (X_{i,t} - h_{i,k}) & (K_{i,t} \geq 1) \end{cases} \quad (1)$$

$$z_{i,t} = \alpha_{i,0} \cdot X_{i,t} \quad (2)$$

ただし $h_{i,K_{i,t}} \leq X_{i,t} < h_{i,K_{i,t}+1}$

である。また貯留高は $t \geq 2$ のとき

$$X_{i,t} = X_{i,t-1} - y_{i,t-1} - z_{i,t-1} + x_{i,t} \quad (3)$$

ここで

$$x_{i,t} = \begin{cases} R_t & (i=1) \\ z_{i-1,t-1} & (2 \leq i \leq I) \end{cases}$$

である。なお $X_{i,1}$ ($i=1, 2, \dots, I$) は与えられるものとする。このときダム流入高予測値 q_t は全タンクからの流出高の和より

$$q_t = \sum_{i=1}^I y_{i,t} \quad (4)$$

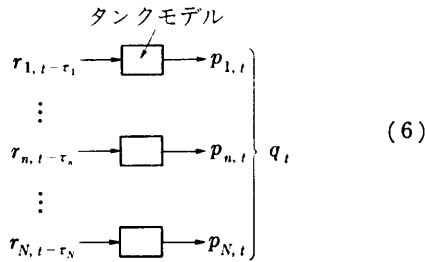
として出力される。

(3)式のようにタンクモデルでは浸透孔を通過するたびに時間遅れが与えられるため、下の段のタンクからの流出ほど雨から時間的に遅れ変動が平坦化される。したがってタンクの段数をふやせばふやすほどより安定した流出成分まで含めた出力を得ることができ。しかしながら、ダム流入量時間単位予測で対象とする洪水は1~2日で終わってしまう現象であるから、タンクは3段あれば十分であると考えられる。ここでは(4)式において4段め以下のタンクからの流出高は洪水期間中一定と考え、定数 c で置き換える。

$$q_t = \sum_{i=1}^3 y_{i,t} + c \quad (5)$$

また流域内にいくつかの雨量観測地点があるとき、(3)式では各地点雨量を合成して流域雨量を求め1段めタンクに入力しているが、流域の一部にのみ大雨が降った場合、流域雨量にすると平均化され大雨の影響が現れず出力も大した洪水にならない場合がある。大雨のあった地点からは大きな洪水が出てダム流入量に

もその影響が出るはずであるから、本論文では各地点ごとの雨量を別々にタンクモデルに入力し、出力を合成して予測値を算出する方法をとる。このとき、各地点ごとに雨が流出しダムへ流入しはじめるまでに要する時間が異なると考えられるから、時間遅れも考慮する。すなわち時点 t における地点 n ($n=1, 2, \dots, N$) の雨量を $r_{n,t}$ 、地点 n の時間遅れを $\tau_{n,j}$ 段めタンクの番号を $l_{n,j}$ と書くことにすれば



ここで $q_t = \sum_{n=1}^N p_{n,t} \cdot w_n / \sum_{n=1}^N w_n$ (w_n : 重み)

$$p_{n,t} = \sum_{j=1}^3 y_{l_{n,j},t} + c$$

より予測値を求める。ただし各段タンクにおいて

$$X_{l_{n,j},t} = X_{l_{n,j},t-1} - y_{l_{n,j},t-1} - z_{l_{n,j},t-1} + x_{l_{n,j},t} \quad (7)$$

ここで

$$y_{l_{n,j},t} = \begin{cases} 0 & (K_{l_{n,j},t} = 0) \\ K_{l_{n,j},t} & \\ \sum_{k=1}^K \alpha_{l_{n,j},t} \cdot (X_{l_{n,j},t} - h_{l_{n,j},t}) & (K_{l_{n,j},t} \geq 1) \end{cases} \quad (8)$$

$$z_{l_{n,j},t} = \alpha_{l_{n,j},0} \cdot X_{l_{n,j},t} \quad (9)$$

$$x_{l_{n,j},t} = \begin{cases} r_{n,t-\tau_n} & (j=1) \\ z_{l_{n,j-1},t-1} & (j=2, 3) \end{cases} \quad (10)$$

である。

2.3 改良型タンクモデル

タンクモデルは種々の雨に対して複雑に反応し、現実によく適合した予測値を出力することができるが、パラメトリックモデルであるため、過去の実績データをもとにタンク構造を決定するパラメータ（流出孔の数、位置および流出率、浸透率）の値をあらかじめ設定しておかなければならない。ところが各パラメータが出力に与える影響は非線形でかつ互いに関連し合っているため、パラメータ値を一意に決定することはむずかしい。たとえばある台風のケースによく適合するようにパラメータ値を設定しておいても、別の台風のケースには適さない場合がある。このような場合には後者のケースの実績値変動にも適合するようにパラ

メータ値を再調整しなければならない。しかし台風が接近中あるいは通過中の場合には、時々刻々更新される台風情報と最新のダム流入量データとから、迅速に今後のダム流入量変動を予測しなければならない。そのためどんなケースに対してもパラメータ調整なしで大過ない予測ができるモデルが必要である。以下では、予測誤差の要因を考察し、その結果を反映させた改良型タンクモデルを提案する。

(8), (9)式のように各タンクからの流出高および浸透高は、パラメータ値を固定したとき各タンクの貯留高になっている。

$$y_{l_{n,j},t} = f(X_{l_{n,j},t}) \quad (11)$$

$$z_{l_{n,j},t} = g(X_{l_{n,j},t}) \quad (12)$$

ここで1段めタンクからの流出高 $y_{l_{n,1},t}$ ($n=1, 2, \dots, N$) は降雨直後に流出する成分に対応し、3段のタンクのうち雨の影響を最も敏感にうけるから、予測誤差の多くは $y_{l_{n,1},t}$ に起因すると考えられる。そこで改良型タンクモデルでは、予測期間直前までの一定期間について一時点ごとに、雨量をダム流入高に変換した計算値と実績値とを比較し、誤差がある閾値をこえると次の時点の1段めタンクの貯留高を調整することにより出力を改善する。この結果、予測開始時点 t_p における貯留高は的確に設定され、(6)式より応答性がよく精度の高い予測値が得られる。

$t=1, 2, \dots, t_p-1$ なる各時点 t において、計算値を q_t 、実績値を Q_t とするとき、誤差率 ε_t は

$$\varepsilon_t = (E_t / Q_t) \cdot 100 \quad (13)$$

ここで

$$E_t \triangleq q_t - Q_t$$

である。改良型タンクモデルでは、 ε_t が $\pm \varepsilon_0\%$ を超えると、地点 n についての誤差 $e_{n,t}$ を最上段タンクの貯留高の誤差 $\delta_{n,t}$ に換算し、 $t+1$ 時点における最上段タンクの貯留高を $\delta_{n,t}$ だけ補正する。ただし(6)式より

$$\sum_{n=1}^N e_{n,t} \cdot w_n / \sum_{n=1}^N w_n = E_t \quad (14)$$

である。以下その補正方法について述べる。

(i) $\varepsilon_t > \varepsilon_0$ のとき

t 時点において、地点 n の流出高が正である最上段タンク l_{n,J_t} の貯留高が $\delta_{n,t}$ だけ大きすぎたと考えられるので、 $X_{l_{n,J_t},t+1}$ を(7)式と比較して $\delta_{n,t}$ だけ引き下げる。

$$X_{l_{n,J_t},t+1} = X_{l_{n,J_t},t} - y_{l_{n,J_t},t} - z_{l_{n,J_t},t} - x_{l_{n,J_t},t} - \delta_{n,t} \quad (15)$$

(15)式で $\delta_{n,t}$ は

$$e_{n,t} = f(X_{l_n, j_t, t}) - f(X_{l_n, j_t, t - \delta_{n,t}}) \quad (16)$$

より求まる. なお l_n, j_t ($n=1, 2, \dots, N$) 以外のタンクの貯留高については(7)式をそのまま適用するが, $\delta_{n,t}$ が大きすぎて $X_{l_n, j_t, t+1}$ が負になってしまうときは $X_{l_n, j_t, t+1} = 0$ とし, 残りは順次1段下のタンクの貯留高から差し引くことにする.

(ii) $\varepsilon_t < -\varepsilon_0$ のとき

t 時点において, 地点 n の貯留高が正である最上段タンク l_n, j'_t について

$$X_{l_n, j'_t, t+1} = X_{l_n, j'_t, t} - y_{l_n, j'_t, t} - z_{l_n, j'_t, t} + x_{l_n, j'_t, t} + \delta'_{n,t} \quad (17)$$

とする. (17)式で $\delta'_{n,t}$ は

$$e_{n,t} = f(X_{l_n, j'_t, t}) - f(X_{l_n, j'_t, t + \delta'_{n,t}}) \quad (18)$$

より求まる. また l_n, j'_t ($n=1, 2, \dots, N$) 以外のタンクについては(7)式が適用される.

(iii) (i), (ii)以外のとき

タンク貯留高の調整は行われず全タンクについて(7)式が適用される.

以上のように改良型タンクモデルでは, 予測期間以前の実績値変動に基づきタンク貯留高の調整を繰り返した結果, 予測開始時点の各タンク貯留高が設定され, (6)式より予測値が出力される. そのため実績値の変動が急激であるような場合にも追従性がよく予測精度が低下することはなく, したがってパラメータ調整は不要である.

2.4 シミュレーション実験

台風や前線性の大雨による洪水時データ, 8 ケースに対して, 同一のタンク構造をもつ改良型タンクモデルと従来のタンクモデルとを適用してダム流入量を予測するシミュレーション実験を行い, 両者の実験結果を比較した. 実験に用いた雨量およびダム流入量実績データは, 雨の降りをはじめ 10 時間以上前からダム流入量がピークの半減期を過ぎるまで全体で 3~7 日間測定されている. また雨量観測地点は, ダム地点を含め 6 地点である.

図2に示すタンク構造をもつ場合の実験結果の比較を表1および図3に示す. ここでは六つの雨量観測地点におけるタンク構造はすべて同一とし, データに欠損のある地点の重みを 0, その他の地点の重みを 1 とした. また時間遅れについては地図および地点雨量とダム流入量とのピークのずれから推定した. なお改良型タンクモデルにおいては $\varepsilon_0 = 5$ に選んだので, 誤

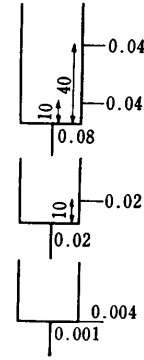
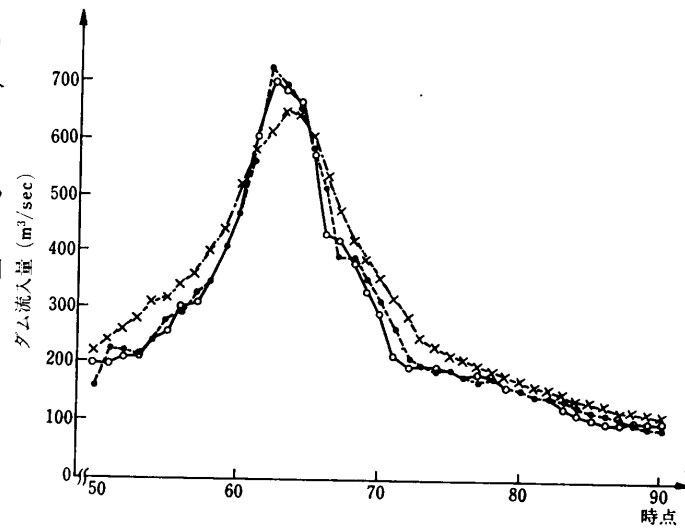


図2 タンク構造

Fig. 2 Tank model for the simulation.



○—○ 実績値
●—● 改良型タンクモデルによる予測値
×—× 従来のタンクモデルによる予測値

図3 シミュレーション実験結果例
Fig. 3 Tracking behavior of predicted value with actual water inflow to the dam.

表1 シミュレーション実験結果 (平均誤差率)
Table 1 Average error rate for the simulation of the prediction of water inflow to the dam.

モデル データ	改良型タンクモデル (%)	従来のタンクモデル (%)
a	7.15	30.63
b	4.70	21.94
c	8.46	35.28
d	5.66	45.30
e	4.95	20.47
f	7.23	40.56
g	6.18	33.53
h	5.60	29.93

差率が $\pm 5\%$ を超えた場合タンク貯留高の調整が行われている。

改良型タンクモデルを適用した場合、 $1 \leq i \leq t_2 - 1$ の間の実績値と計算値との比較によりタンク貯留高の調整が行われ、 t_2 時点のダム流入高の予測値が出力される。その結果、図3のように実績値変動によく追従した予測値が得られ、平均誤差率は表1に示すとおり従来のタンクモデルの $1/5$ から $1/7$ となった。従来のタンクモデルを適用する場合、予測精度を向上させるためには試算を繰り返しパラメータ調整を行う必要がある。一方、改良型タンクモデルを適用すれば、いずれのケースに対してもパラメータ調整なしに実際に十分耐えうる予測結果が得られた。したがって緊急を要する洪水時にも、迅速に有効なダム流入量予測結果を提供することができる。

3. 水需要量予測と洗濯タンクモデル

3.1 水需要量予測問題

浄水場から各需要家への安定給水を確保するためには、的確な水需要量予測に基づいた水量および水圧の適正配分が行われなければならない。本章では、予測対象日の日付（季節・曜日・祝日や連休の区別）および天気予報（天候・気温）と過去の実績需要量変動とから、対象とする配水系における1日当りの総需要量または総配水量を予測する問題を考える。

3.2 予測式

日単位の水需要量変動は、傾向変動・季節変動・週間変動および不規則変動から成り、不規則変動分を除去すればほぼ周期的に変動する。したがって過去の実績値より不規則変動分を除去した修正実績値の変動より推定される予測値に、特殊日（祝日・連休など）・天候・気温など不規則変動要因の影響を考慮した補正を加えることにより、予測対象日の水需要量を予測することができる。

そこでまず予測対象日 i 日の前日までの過去 10 週間にわたり修正実績値の週間変動を分析し、 i 日と同一曜日の曜日比率 r_i を求め、過去 1 週間の修正実績値の平均値 \bar{x}_i に r_i を乗じて予測基本需要量 \hat{x}_i を推定する。

$$\hat{x}_i = \bar{x}_i \cdot r_i \quad (19)$$

次に \hat{x}_i に不規則変動分に対応する補正を加え、予測値 x_i を求める。

$$x_i = \hat{x}_i \cdot F(s_i, \lambda) + G(W_i, g(u_i), \mu) + H(T_i, \nu) \quad (20)$$

ここで

$$F(s_i, \lambda): \text{特殊日要因補正項} (=1 - \lambda s_i)$$

ただし

$$\begin{cases} s_i: \text{特殊日の種類 (祝日・連休・年末年始・お盆)} \\ \lambda: \text{特殊日要因パラメータ} \end{cases}$$

$$G(W_i, g(u_i), \mu): \text{天候要因補正項}$$

ただし

$$\begin{cases} W_i: \text{天候 (午前の天候)} \\ g(u_i): \text{天候履歴 } u_i \text{ の関数} \\ \mu: \text{天候要因パラメータ} \end{cases}$$

$$H(T_i, \nu): \text{気温要因補正項}$$

ただし

$$\begin{cases} T_i: \text{気温 (最高気温)} \\ \nu: \text{気温要因パラメータ} \end{cases}$$

とするロジスティック曲線で、夏季とその他の季節とは区別して考える。

なお要因パラメータ λ, μ, ν は最小 2 乗法により設定されるものとする。

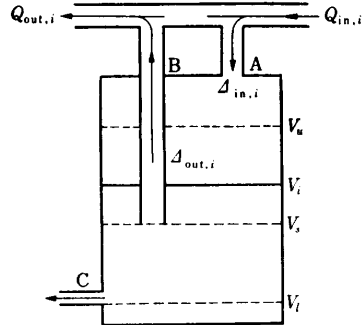
(20) 式における最大の特徴は、天候要因として予測対象日の天候のほか前日までの天候履歴を考慮している点である。天候要因による水需要量の変化が、家庭における洗濯の行動のしかたと対応づけられることに着目し、予測対象日当日の天候と過去数日間の天候履歴との組合せにより予測値の補正を行う洗濯タンクモデルを提案する。

3.3 洗濯タンクモデル

天候要因による水需要量の変化の定性的な傾向を調べると、以下のような点から水需要が当日の天候だけでなく過去数日間の天候履歴の影響をうけることがわかる。

- ① 雨天日は晴天日と比べ需要量が減少するが、晴天日の後では 4 日、曇天日の後では 2 日以上雨天日が続くと、減少の割合が小さくなる。
- ② 雨天日の後の晴天日には需要量が増加する。また雨天日の後の曇天日には晴天日の後の曇天日に比べ需要量の減少の割合が小さい。
- ③ 晴天日が 3 日以上続くとわずかながら需要量が減少する。

一方、家庭における洗濯の行動のしかたも水需要と同様に天候と天候履歴との組合せにより変化する。たとえば雨天日には洗濯を控えるので洗濯用水の使用量は減少するが、天候が回復すると洗濯物がたまっているため洗濯用水の使用量は増加する。また何日も雨天



- $Q_{in,i}$: 天候要因補正前の予測値
 $Q_{out,i}$: 天候要因補正後の予測値
 V_u : 雨が続いていても洗濯するレベル
 V_s : 雨がやんだらたまった洗濯をするレベル
 V_i : 晴天続きで洗濯が減少するレベル
 V_i : 当日の水位

図 4 洗濯タンクモデル

Fig. 4 Washing water tank model.

日が続くと洗濯物がたまり、たとえ雨が降っていても洗濯をするため洗濯用水の使用量はあまり減少しない。逆に晴天日が長く続くとたまっていった洗濯物もだんだん減り、洗濯用水の使用量もわずかながら減少する。

以上のように、天候要因による水需要量の変化と、家庭における洗濯の行動のしかたあるいは洗濯用水の使われ方とは対応づけて考えることができる。洗濯タンクモデルは、天候要因による洗濯用水の変化量から水需要量の変化量を推定し、天候要因による予測値の補正を行うタンクモデルである。

図 4 に示す洗濯タンクモデルでは、晴天以外の悪天候の日には、水需要量の減少分を洗濯用水の減少で代表させ、タンク内にためておくことにより予測値を減少させ、天候が回復するとタンク内より水が汲み上げられ、悪天候のためたまった洗濯をするために使われる洗濯用水の分だけ予測値を増加させる。すなわち i 日について、天候要因による補正をする前の予測値 $Q_{in,i}$ を洗濯タンクモデルに入力すると、悪天候の日には需要量が減少することが予想されるので、洗濯用水の減少分として $Q_{in,i}$ の一部 $\Delta_{in,i}$ が A よりタンク内にとりこまれる。この結果悪天候が続くとタンクの水位は上昇するが、雨天が続いた後の晴天日のような場合には、天候の回復による洗濯用水の増加分 $\Delta_{out,i}$ だけ B より水が汲み上げられ、天候要因による補正後の予測値 $Q_{out,i}$ が出力される。ここで B より水が汲み上げられ始めるレベルとして V_u, V_s が設定されている。晴天日または曇天日には V_s 、雨天日には V_u を、当日のタンク水位 V_i が超えていれば、水が汲み上げられ予測値を増加させる。すなわち悪天候が続き

洗濯物がたまったとき、 V_s は雨が止んだら洗濯するレベル、 V_u は天候が回復するまで待ち切れず雨天でも洗濯し始めるレベルである。また洗濯タンクモデルでは、晴天日で洗濯物がたまっていないときつまり水位が V_s 以下のときには、C よりわずかながら水が流出し、晴天続きで水位が低下し V_i 以下になると、A より水が補充され晴天日でも予測値を減少させる。

以上より洗濯タンクモデルにおいて

$$\begin{aligned} Q_{out,i} &= Q_{in,i} - \Delta_{in,i} + \Delta_{out,i} \\ &= Q_{in,i} + G(W_i, V_i, \mu) \end{aligned} \quad (21)$$

ここで

$$\begin{aligned} G(W_i, V_i, \mu) &= -\Delta_{in,i} + \Delta_{out,i} \\ V_i &= g(u_i) \end{aligned}$$

であり、出力 $Q_{out,i}$ は当日の天候 W_i と、天候履歴より決まるタンク水位 V_i とにより、入力 $Q_{in,i}$ を補正した予測値である。

以下に予測対象日 i の天候 W_i とタンク水位 V_i との組合せによる予測値の補正のしかたについて述べる。ただし $W_i=1$ のとき晴天、 $W_i=2$ のとき曇天、 $W_i=3$ のとき雨天、 $W_i=4$ のとき雪天とする。

(1) $W_i=1$ のとき

(a) $V_i > V_s$ のとき

悪天候が続いたため洗濯物がたまっている状態に対応する。そのため B より洗濯用水の増加分だけ水が汲み上げられ、予測値を増加させタンク水位を低下させる。

$$G(1, V_i, \mu) = \mu_1 \cdot Q_{in,i} \quad (22)$$

$$V_{i+1} = V_i - \mu_1 \cdot W \cdot Q_{in,i} \quad (23)$$

ここで

μ_1 : 晴天日洗濯パラメータ

W : 重みパラメータ

なお W は、天候要因による需要量の減少分の蓄積としてタンク内にためられている水のうち、天候履歴の影響をうける成分を抽出する目的で導入する。

(b) $V_i \leq V_i \leq V_s$ のとき

通常の洗濯だけが行われる。このとき C より水をわずかながら流出させる。

$$G(1, V_i, \mu) = 0 \quad (24)$$

$$V_{i+1} = V_i \cdot (1 - \mu_2) \quad (25)$$

ここで μ_2 : 晴天日流出パラメータ

(c) $V_i < V_s$ のとき

長く晴天が続いた場合に対応する。このとき A より水を補充し予測値を削減する。

$$G(1, V_i, \mu) = -\mu_3 \cdot Q_{in,i} \quad (26)$$

$$V_{i+1} = V_i + \mu_3 \cdot Q_{in,i} \quad (27)$$

ここで μ_3 : 晴天日削減パラメータ

(2) $W_i = 2$ のとき

(a) $V_i \leq V_s$ のとき

曇天のため洗濯を控えるので、予測値を削減しタンクに貯水しておく。

$$G(2, V_i, \mu) = -\mu_4 \cdot Q_{in,i} \quad (28)$$

$$V_{i+1} = V_i + \mu_4 \cdot Q_{in,i} \quad (29)$$

ここで μ_4 : 曇天日削減パラメータ

(b) $V_i > V_s$ のとき

悪天候が続き洗濯物がたまっているので、曇天であっても洗濯用水の減少量は少なく、(a)に比べ予測値の削減の割合を小さくする。

$$G(2, V_i, \mu) = -(\mu_4 + \mu_5) \cdot Q_{in,i} \quad (30)$$

$$V_{i+1} = V_i + (\mu_4 - \mu_5 \cdot W) \cdot Q_{in,i} \quad (31)$$

ここで μ_5 : 曇天日洗濯パラメータ

(3) $W_i = 3$ のとき

(a) $V_i \leq V_w$ のとき

雨天のため洗濯用水の使用量が減少することが予想されるので、予測値を削減しタンクに貯水しておく。

$$G(3, V_i, \mu) = -\mu_6 \cdot Q_{in,i} \quad (32)$$

$$V_{i+1} = V_i + \mu_6 \cdot Q_{in,i} \quad (33)$$

ここで μ_6 : 雨天日削減パラメータ

(b) $V_i > V_w$ のとき

悪天候があまり長く続いたため洗濯物がたまり、雨天日であっても止むなく洗濯をする状態に対応する。そのため予測値の削減の割合を(a)に比べ小さくする。

$$G(3, V_i, \mu) = (-\mu_6 + \mu_7) \cdot Q_{in,i} \quad (34)$$

$$V_{i+1} = V_i + (\mu_6 - \mu_7 \cdot W) \cdot Q_{in,i} \quad (35)$$

ここで μ_7 : 雨天日洗濯パラメータ

(4) $W_i = 4$ のとき

V_i にかかわらず予測値を削減しタンクに貯水しておく。

$$G(4, V_i, \mu) = -\mu_8 \cdot Q_{in,i} \quad (36)$$

$$V_{i+1} = V_i + \mu_8 \cdot Q_{in,i} \quad (37)$$

ここで μ_8 : 雪天日削減パラメータ

3.4 シミュレーション実験

当日の日付および天気予報と、前日までの実績需要量変動とから当日の水需要量を予測するシミュレーション実験を、5年間分の実績データ(天候・気温・水需要量)に基づいて行った。ここでは天気予報が的中した場合を想定して、天候および気温については当日の実績値をそのまま用いた。

表2 シミュレーション実験結果(平均誤差率)
Table 2 Average error rate for the simulation of the water demand prediction.

	洗濯タンクモデルを導入しないとき(%)	洗濯タンクモデルを導入したとき(%)
5年間の平均	2.28	2.05
6月の平均	2.54	2.09
7月の平均	2.52	2.15
8月の平均	2.20	1.80

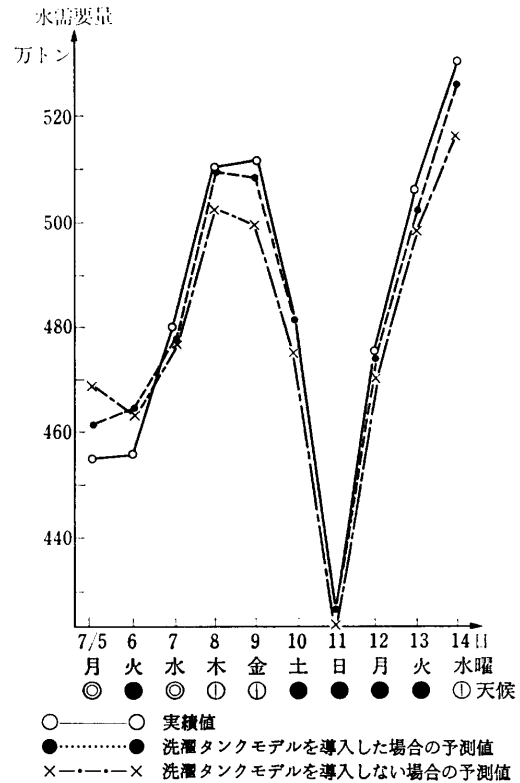


図5 シミュレーション実験結果例
Fig. 5 Tracking behavior of predicted values with actual water demand.

表2および図5に、洗濯タンクモデルを導入しない場合と導入した場合との実験結果の比較例を示す。前者では天候要因として当日の天候だけを考慮する。すなわち当日の天候が晴天ならば(24)式、曇天ならば(28)式、雨天ならば(32)式、雪天ならば(36)式を適用して天候要因による予測値の補正を行う。表2のように洗濯タンクモデルを導入したことにより5年間を通じて平均誤差率は約10%改善された。とくに6~8月においては平均誤差率は15~18%改善され、洗濯タンクモデルを導入した効果がよくあらわれている。これは、洗濯タンクモデルを導入した場合、当日の天候だけでなく過去数日間の天候履歴の水需要に与える

影響も考慮しているため、図5のように雨天の後天候が回復した場合の水需要量の急激な増加にも予測値がよく追従するからである。夏季は1年中で水需要量が最も多く、しかも変動が激しいので、この変動によく追従した予測を行い、水需要量を的確に把握しなければならない。したがって洗濯タンクモデルの導入により夏季の予測精度を向上したことは大きな意味をもつ。

4. むすび

効果的な水運用を行う上で基本となるダム流入量予測と水需要量予測とについて、それぞれ改良型タンクモデル、洗濯タンクモデルを提案し、モデルの有効性をシミュレーション実験により検証した。

今後は、改良型タンクモデルを洪水時のみならず平常時のダム流入量日単位予測にも適用することを検討したい。また洗濯以外の行動、たとえば行楽や帰省による人の移動の水需要に与える影響も考慮したタンクモデルを水需要量予測に適用したい。

謝辞 最後に、本研究を進めるにあたり有益なご指

導、ご意見をいただいた当社 C&C システム研究所 三上徹所長代理、竹谷誠研究課長、情処第一公共システム事業部斎藤誠課長、加藤晴彦主任、山戸昭三氏に心より感謝する。

参 考 文 献

- 1) 菅原正巳：流出解析法，p. 258，共立出版，東京 (1972)。
- 2) 菅原正巳：続・流出解析法，p. 265，共立出版，東京 (1979)。
- 3) 高橋 裕：河川水文学，p. 215，共立出版，東京 (1978)。
- 4) Ikeda, S. et al.: Sequential GMDH Algorithm and Its application to River Flow Prediction, *IEEE SMC*, Vol. 6, No. 7, pp. 473-479 (1976)。
- 5) 斎藤 肅他：水需要のモデリングと予測，計測自動制御学会論文集，Vol. 17, No. 5, pp. 537-543 (1981)。
- 6) 上田 隆他：上水道システム運用技法，日立評論，Vol. 59, No. 8, pp. 631-636 (1977)。

(昭和57年9月27日受付)

(昭和57年12月6日採録)