

## 農業用溜池周辺流域からの流出機構と水収支

九州大学工学部 学生員 ○安永武英  
九州大学工学部 正 員 神野健二  
九州大学工学部 正 員 河村 明  
住宅・都市整備公団 松本淳一

## 1. はじめに

本研究ではある農業用溜池において降雨時の流域から池への流出形態を把握するため、流出機構をタンクモデルでモデル化し流出解析を行った。

## 2. 現地の状況

対象流域は、現地下端に農業用溜池をもち、古生層と石英はん岩地質の山林である。現地の平面図を図-1に示す。溜池の面積は水位によって変動するが約10000 $\text{m}^2$ であり、流域集水面積は約86000 $\text{m}^2$ である。現地では、池の水位変動と池水面からの蒸発量および降雨量とが自記記録されている。

## 3. 解析手法

1) 水収支式 池における水収支式は次式で表され、観測値データから20分間隔で池への流出量が求められる。

$$q_{i,n} = \frac{A_0}{A_{cat}} \left( \frac{dh}{dt} + E \right) \quad (1)$$

ここに $A_0$ :溜池面積( $\text{m}^2$ ),  $A_{cat}$ :流域面積( $\text{m}^2$ ),  $E$ :水面蒸発量( $\text{mm}/20\text{min}$ )

$dh/dt$ :池水位変化率( $\text{mm}/20\text{min}$ ),  $q_{i,n}$ :流出量( $\text{mm}/20\text{min}$ )

上式において水面蒸発量 $E$ に関しては、現地の欠測を補うために蒸発量の観測データと当日の気象データ(気温、風速、相対湿度)を用いて回帰分析によって求めた推定値を使う。空気力学的方法に基づいたTraubertの式を回帰式の関数形として用いた。

$$E = C(e_w - e)(1 + 0.0036t)v^{1/2} \quad (2)$$

ここに $E$ :蒸発速度( $\text{mm}/\text{day}$ ),  $e$ :空气中蒸気圧( $\text{mb}$ ),  $e_w$ :水面温度に相当する最大

蒸気圧( $\text{mb}$ ),  $t$ :気温( $^{\circ}\text{C}$ ),  $v$ :風速( $\text{m}/\text{sec}$ ),  $C$ :定数, 相対湿度  $U = 100 \times e/e_w$   
両辺の常用対数をとって回帰分析した結果は次式ようになる。

$$E = 0.222 \{ (e_w - e)(1 + 0.0036t)v^{1/2} \}^{0.913} \quad (3)$$

このとき観測値と推定値との相関係数は0.735であった。

2) タンクモデルの適用 対象流域の降雨流出解析モデルとして図-2のようなタンクモデルを用いる。各タンクの連続の式を以下に示す。

第1段タンク  $r(t) - q_{1u}(t)Y_e(h_1, c_{1u}) - q_{11}(t)Y_e(h_1, c_{11}) - i_1(t) = \frac{dh_1}{dt} \quad (4.1)$

第2段タンク  $i_1(t) - q_2(t)Y_e(h_2, c_2) - i_2(t) = \frac{dh_2}{dt} \quad (4.2)$

第3段タンク  $i_2(t) - q_3(t)Y_e(h_3, c_3) - i_3(t) = \frac{dh_3}{dt} \quad (4.3)$

第4段タンク  $i_3 - q_4(t) = \frac{dh_4}{dt} \quad (4.4)$  なお $Y_e(x, \xi)$ は、Heaviside関数である。

$$Y_e(x, \xi) = \frac{1}{\pi} \left\{ \tan^{-1} \frac{x - \xi}{\varepsilon} + \frac{\pi}{2} \right\} \quad (4.5)$$

ここで $\varepsilon$ は $10^{-6}\text{mm}$ とした。初期水深 $h_1 \sim h_4$ 、流出孔の係数 $a_{1u}, a_{11}, a_2 \sim a_4$ 、浸透孔の係数 $b_1 \sim b_3$ 、合計12個のパラメータをタンクモデルの未知定数とする。 $q_i$ は各流出孔からの流出量で、タンクモデルによる計算で求められる流出量 $q_{o,n}$ とすると

$$q_{o,n} = q_{1u}Y_e(h_1, c_{1u}) + q_{11}Y_e(h_1, c_{11}) + q_2Y_e(h_2, c_2) + q_3Y_e(h_3, c_3) + q_4Y_e(h_4, c_4) \text{ である。}$$

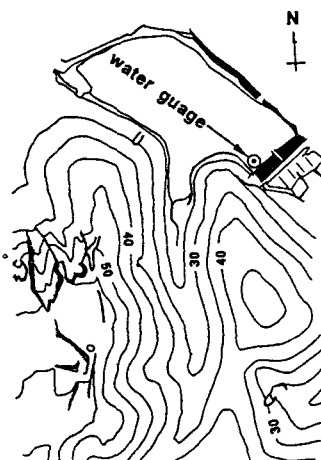


図-1 現地図(標高m)

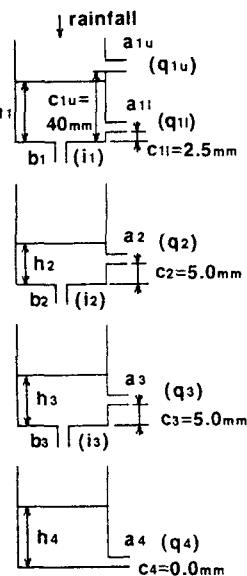


図-2 タンクモデル

流出孔までの高さ $c_{10}$ ,  $c_{11}$ ,  $c_2 \sim c_4$ の値は予め一定値がとられる。これら未知パラメータの最適値をカルマンフィルターによるパラメータ逐次同定によって求める。12個の未知パラメータがカルマンフィルターのシステム状態量であり、観測値から求めた流出量 $q_{1n}$ が観測雑音を含んだ観測情報となる。

#### 4. 流出解析結果

表-1 解析降雨

|       | 期間        | 降雨量(mm) |
|-------|-----------|---------|
| CASE1 | 5/17~5/19 | 88.5    |
| CASE2 | 6/14~6/16 | 182.5   |
| CASE3 | 6/28~6/30 | 109.0   |
| CASE4 | 7/1~7/3   | 154.5   |

観測データの中から代表的な4ケースの降雨(表-1)

について、解析を行った。

カルマンフィルターによるタ

ンクモデルパラメータの同定結果を表-2に示す。同表中においてカルマンフィルターの初期パラメータ値を上段に計算後の最終パラメータ値を下段に示す。パラメータの初期値は流域の大きさでデータのタイムステップを考慮して適当に仮定したあと同定中にパラメータの変動が小さくなるような値を試行錯誤的に求めた。

解析例としてケース4の結果を図-3に示す。

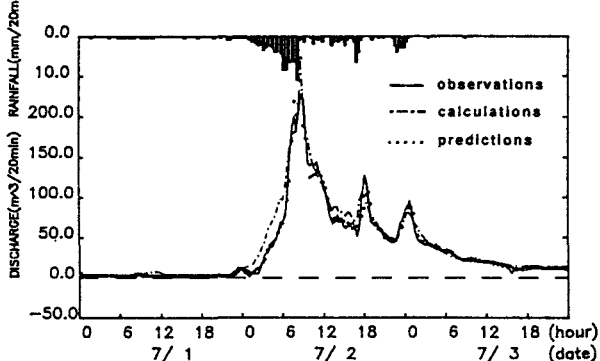


図-3 流出解析例(CASE4)

同図で一点鎖線は最終パラメータを用いたときの計算値、点線は逐次同定パラメータを用いたときの実時間予測値である。計算流出量と観測流出量との誤差の全期間における標準偏差は10.35(mm/20min)、実時間予測値と観測流出量

との誤差の標準偏差は7.63(mm/20min)であった。タンクモデルのカルマンフィルターによる実時間予測値が特に観測ハイドログラフに近い結果となったと言える。最終パラメータを用いたとき、各タンクからの流出量と全流出量に占める割合を図-4に示す。同図より第1・第2タンクからの流出量が多いことから、降雨時では土壌表面からの池への流出が著しいと考えられる。

#### 5. 結び

タンクモデルのパラメータ同定においてカルマンフィルターによる逐次パラメータ同定を行うため、各タンクの連続の式にHeaviside関数を導入することによりカルマンフィルターの定式化を容易に行った。解析結果でケースごとにタンクの孔のパラメータが異なったのは、降雨履歴に関係した土壌の湿潤さや降雨形態の影響があるものと考えられる。最後に本研究にご支援戴きましたサンコーコンサルタンツ(株)山田雅也氏に謝意を表します。

#### <参考文献>

- 1) 菅原正巳著: 流出解析法, 共立出版, 1972
- 2) 建設省水文研究会編: 流出計算例題集 2 昭和50年8月
- 3) 農業土木学会編: 農業土木ハンドブック, 1969

表-2 パラメータ同定結果

| PARAMETER  | CASE1   | CASE2   | CASE3   | CASE4   | MEAN    |
|------------|---------|---------|---------|---------|---------|
| $h_1$ (mm) | 0.0     | 0.0     | 0.0     | 0.95    | —       |
|            | 0.0     | 0.0     | 0.95    | 1.18    | —       |
| $h_2$ (mm) | 0.0     | 0.0     | 0.0     | 8.6     | —       |
|            | 4.5     | 0.0     | 6.6     | 14.0    | —       |
| $h_3$ (mm) | 10.0    | 10.0    | 5.0     | 37.4    | —       |
|            | 43.9    | 108.9   | 37.4    | 80.3    | —       |
| $h_4$ (mm) | 50.0    | 50.0    | 40.0    | 39.1    | —       |
|            | 50.1    | 52.3    | 39.1    | 38.9    | —       |
| $a_{10}$   | 0.27    | 0.35    | 0.15    | 0.15    | —       |
|            | 0.28    | 0.43    | 0.15    | 0.070   | 0.23    |
| $a_{11}$   | 0.16    | 0.060   | 0.072   | 0.060   | —       |
|            | 0.19    | 0.072   | 0.072   | 0.051   | 0.096   |
| $a_2$      | 0.0079  | 0.020   | 0.0033  | 0.012   | —       |
|            | 0.0088  | 0.029   | 0.0034  | 0.010   | 0.013   |
| $a_3$      | 0.0012  | 0.0010  | 0.00050 | 0.0009  | —       |
|            | 0.0010  | 0.00040 | 0.00044 | 0.00056 | 0.00060 |
| $a_4$      | 0.00082 | 0.00050 | 0.00020 | 0.00023 | —       |
|            | 0.00074 | 0.00052 | 0.00020 | 0.00014 | 0.00040 |
| $b_1$      | 0.49    | 0.35    | 0.21    | 0.08    | —       |
|            | 0.60    | 0.68    | 0.21    | 0.060   | 0.39    |
| $b_2$      | 0.020   | 0.045   | 0.012   | 0.025   | —       |
|            | 0.020   | 0.049   | 0.013   | 0.015   | 0.024   |
| $b_3$      | 0.0027  | 0.00090 | 0.00077 | 0.00046 | —       |
|            | 0.0028  | 0.0011  | 0.00079 | 0.00029 | 0.0012  |

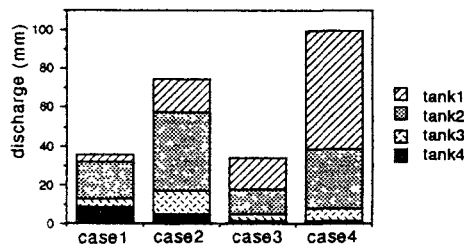


図-4 タンク別流出成分