

(35) 農業用溜池周辺からの流出機構と水収支

九州大学 工学部 ○安永 武英
 神野 健二
 河村 明

1. はじめに

近年、都市の成長にともない都市周辺地域への宅地化が既存の農業地域にまで及ぶようになった。地域の農業の重要な水資源となっている農業用溜池において、宅地化が溜池の流域にまで及ぶと、流域の土地状態の改変によって溜池の貯水状況や流域の流出形態等に大きな変化が生じることが予想される。この変化を予測するためには、現在の溜池流域の流出機構を明らかにすることが重要である。そこで本研究では、住宅地と農地とが混在している都市近郊地域で、自然流域をもつ農業用溜池をとりあげ、その周辺流域の水収支と降雨流出機構について検討を行った。

2. 現地状況

現地平面図を図-1に示す。農業用溜池の流域は植物が繁茂した自然状態流域である。地質状況は谷部に崖錐性堆積層、流域北部と南部に古生層、流域中央部に風化の激しい石英はん岩がそれぞれ分布している。溜池の流域面積は約86000m²であり、このうち溜池の面積は流域面積の約10%程度を占める。現地の観測データとして、溜池の水位変動と池水面からの蒸発量および流域内の降雨量が自記記録された。

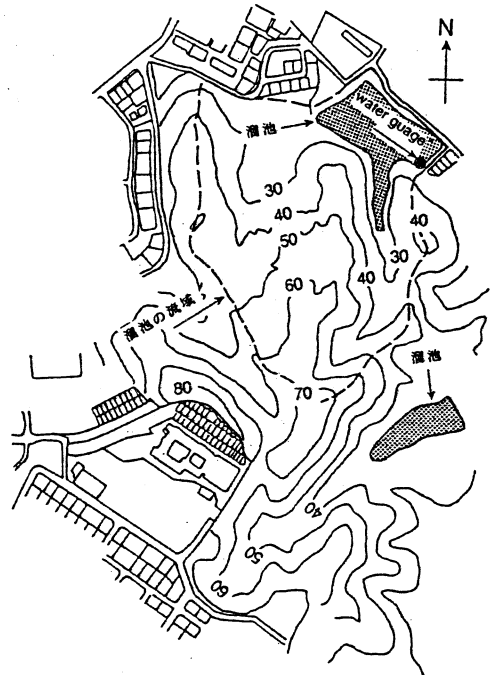


図-1 現地図(標高m)

3. 解析手法

1) 水収支式 溜池における水収支に関する式を次式のように仮定する。

$$q_{in} = \frac{A_0}{(A_{CAT} - A_0)} \left(\frac{dh}{dt} - R + E \right) \quad (1)$$

ここで、 q_{in} :溜池を除いた流域部分における流出高(mm/20min), A_0 :溜池面積(m²), A_{CAT} :流域面積(m²), dh/dt :池水位変化率(mm/20min), R :降雨量(mm/20min), E :水面蒸発量(mm/20min)である。

2) 水面蒸発量の推定¹⁾ 水面蒸発量に関しては、観測データに欠測があるため蒸発量の観測データと当日の気象台のデータ(気温、風速、相対湿度)とで回帰分析を行い、欠測値を推定し(1)式の水面蒸発量Eに適用する。回帰式は関数形として空気力学的方法に基づいたTrabertの式:

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

を参考に以下のようにして定めた。ここにE:蒸発速度(mm/day), e:空気中蒸気圧(mb), e_w :水面温度に相当する最大蒸気圧(mb), t:気温(°C), v:風速(m/s), C:定数, $U = 100 \times e/e_w$:相対湿度である。

気温の関数である最大蒸気圧 e_w と相対湿度から蒸気圧eが求まるので、当日の気象台のデータ(気温、風速、相対湿度)より蒸発量の推定が可能となる。Trabertの式を参考にして、水面蒸発量の推定に適用する回帰式の関数形を次式のようにおく。

$$E = C \{ (e_w - e)(1 + 0.0036t)v^{1/2} \}^a \quad (2')$$

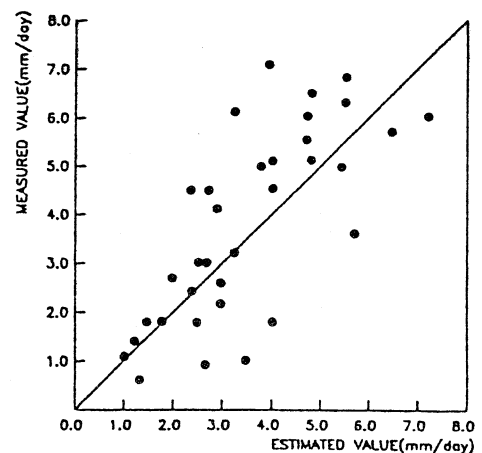


図-2 水面蒸発量の推定結果

(2')式の常用対数をとると、 $\log_{10} E = \log_{10} C + a \log_{10} \{(e_w - e)(1 + 0.0036t)v^{1/2}\}$ となる。ここで、 $Y = \log_{10} E$ 、 $X = \log_{10} \{(e_w - e)(1 + 0.0036t)v^{1/2}\}$ とおき $Y = \log_{10} C + aX$ として回帰分析した結果 $C = 0.222$ 、 $a = 0.913$ となり、(3)式が得られる。同式が(2)式のTrabertの式に似た結果となることから、(3)式を回帰式として適用する。

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

水面蒸発量の回帰式(3)式から得られる推定値と観測値との関係は図-2となり、相関係数は0.735である。

3) タンクモデルの適用^{2), 3)} 流域の降雨流出解析モデルとして図-3に示すタンクモデルを適用した。通常タンクモデルは日単位・時間単位の流出解析に用いられる手法であるが、今回は小流域での降雨流出解析のため単位時間を20分とした。各タンクについてタンク水深 $h_1 \sim h_4$ (mm)、流出孔の係数 $a_{1u} \sim a_4$ 、浸透孔の係数 $b_1 \sim b_3$ の合計12個のパラメータをタンクモデルの未知パラメータとし、流出孔の高さ $c_{1u} \sim c_4$ (mm)は既知パラメータとして文献3)を参考に図中のような仮定値を用いた。各タンクの連続の式を次に示す。

第1段タンク： $dh_1/dt = f_1(t) = r(t) - q_{1u}(t)Y_e(h_1, c_{1u}) - q_{11}(t)Y_e(h_1, c_{11}) - i_1(t)$ (4.1)

第2段タンク： $dh_2/dt = f_2(t) = i_1(t) - q_2(t)Y_e(h_2, c_2) - i_2(t)$ (4.2)

第3段タンク： $dh_3/dt = f_3(t) = i_2(t) - q_3(t)Y_e(h_3, c_3) - i_3(t)$ (4.3)

第4段タンク： $dh_4/dt = f_4(t) = i_3(t) - q_4(t)$ (4.4)

上式において、 q_i は流出高で $q_i(t) = a_i(h_i - c_i)$ (mm)である。 i_i は浸透高で $i_i(t) = b_i h_i$ (mm)である。また、 Y_e はHeaviside関数(ステップ関数)で、

$$Y_e(x, \xi) = 1/\pi \times \{\tan^{-1}(x - \xi)/\epsilon + \pi/2\} \quad (0 < \epsilon \ll 1)$$
 と表される。

ϵ の値は十分小さな値 $\epsilon = 10^{-6}$ (mm)を与えた。

今回本報でHeaviside関数を導入することにより、流出孔の高さと水深との関係の場合分けが不要となり、カルマンフィルターの適用が容易となった。

4) カルマンフィルターによるパラメータ同定 タンクモデルの12個の未知パラメータ同定にカルマンフィルターによる手法を適用する。観測データは20分間隔のタイムステップで求められる。システム状態量(未知パラメータ)はこの観測量が得られる時点毎に逐次同定されていく。

(a) システム状態量 $h_1 = X_1(t)$ $h_2 = X_2(t)$ $h_3 = X_3(t)$ $h_4 = X_4(t)$
 $a_{1u} = X_5(t)$ $a_{11} = X_6(t)$ $a_2 = X_7(t)$ $a_3 = X_8(t)$ $a_4 = X_9(t)$
 $b_1 = X_{10}(t)$ $b_2 = X_{11}(t)$ $b_3 = X_{12}(t)$

(b) システム方程式 システム状態量の時間的変化がシステム方程式となり
 $dX_1/dt = f_1(t) + u_1(t)$ $dX_2/dt = f_2(t) + u_2(t)$ $dX_3/dt = f_3(t) + u_3(t)$
 $dX_4/dt = f_4(t) + u_4(t)$ $dX_{5-12}/dt = f_{5-12}(t) + u_{5-12}(t) = 0$ となる。 $u_i(t)$ はシステム雑音である。

(c) 観測方程式 タンクモデルによる計算で求められる流出高 $q_{c.in}$ とすると観測方程式は
 $q_{c.in}(t) = q_{1u}(t)Y_e(h_1, c_{1u}) + q_{11}(t)Y_e(h_1, c_{11}) + q_2(t)Y_e(h_2, c_2) + q_3(t)Y_e(h_3, c_3) + q_4(t) + w(t)$ となる。

観測値から求められる流出高 $q_{i.n}$ が観測雑音 $w(t)$ を含んだ観測情報となる。

4. 解析結果および考察

表-1 流域の流出率

観測データから代表的な降雨4ケースをとり解析した。各ケースの解析期間における降雨量、流出高、流出率を表-1に示す。溜池

		CASE1	CASE2	CASE3	CASE4
解析期間		5/17~5/19	6/14~6/16	6/28~6/30	7/ 1~7/ 3
降雨量(mm)		88.5	182.5	109.0	154.5
流出高(mm)	溜池を含む場合	26.8	62.3	23.2	86.8
	溜池を除く場合	17.7	44.6	9.7	75.7
流出率	溜池を含む場合	0.30	0.34	0.21	0.56
	溜池を除く場合	0.20	0.24	0.09	0.49

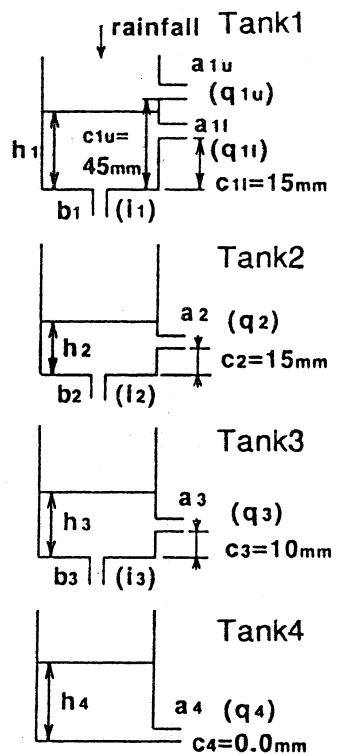


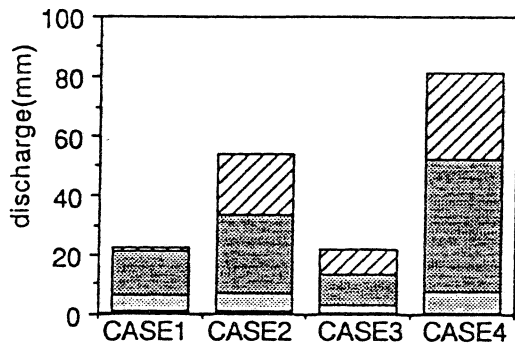
図-3 タンクモデル

面積が流域面積の約10%を占めるため、流出率については、計算の際に溜池を流域に含む場合と除く場合とを考えた。流出率の値は各ケースによってばらつきがあるが平均値は溜池を含む場合0.36, 除く場合0.26である。このように流出率が小さい原因として、現地の森林植生による樹冠遮断の影響や表土層が保水性の高い落葉腐食土であることの影響などが考えられる。

次に表-2に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。はじめにパラメータの初期値は流域の大きさとデータのタイムステップを考慮して仮定した。システム雑音、観測雑音などのようなフィルター理論に必要な諸量については、最終パラメータによる計算結果のハイドログラフが観測ハイドログラフに近づくように試行錯誤的に求めた。このとき初期パラメータ値も修正を加え、再度初期値とした。

表-2 タンクモデルパラメータの同定結果

パラメータ	CASE1	CASE2	CASE3	CASE4
h ₁	0.0	0.0	0.0	5.0
	-0.1	0.0	5.0	1.2
h ₂	0.0	0.0	0.0	15.0
	11.5	5.8	15.1	18.7
h ₃	10.0	10.0	10.0	40.0
	57.7	55.1	45.7	72.8
h ₄	40.0	40.0	40.0	40.0
	35.1	44.6	17.8	29.0
a _{1u}	0.20	0.18	0.20	0.20
	0.13	0.22	0.076	0.043
a _{1l}	0.10	0.090	0.10	0.10
	0.045	0.053	0.012	0.045
a ₂	0.020	0.018	0.020	0.020
	0.0094	0.021	0.0030	0.017
a ₃	0.0020	0.0018	0.0020	0.0020
	0.0012	0.0014	0.00037	0.0010
a ₄	0.00020	0.00018	0.00020	0.00020
	0.00013	0.00017	0.000071	0.00010
b ₁	0.10	0.09	0.10	0.10
	0.082	0.094	0.051	0.055
b ₂	0.020	0.018	0.020	0.020
	0.016	0.025	0.010	0.013
b ₃	0.0020	0.0018	0.0020	0.0020
	0.0013	0.0018	0.00073	0.0010



Tank	CASE1	CASE2	CASE3	CASE4
Tank1	1.1	20.7	8.4	29.2
Tank2	14.7	26.3	10.5	44.5
Tank3	5.2	5.7	2.5	6.9
Tank4	1.5	1.4	0.6	0.6
Total	22.5	54.1	22.0	81.2

図-4 流出高のタンク別成分

タンクモデルの逐次同定パラメータによる流出解析で、解析期間内における各タンク別の流出高の総量を図-4に示す。CASE1は降雨強度の小さい雨が長時間降ったもので、最も速い流出を表すTank1の流出高の割合が小さい。CASE2とCASE4は降雨量、降雨強度とも大きな雨で、Tank1とTank2の流出高の割合が大きい。最も遅い流出を表すTank4の流出高は全てのケースで同程度の値となっている。

地下水流出量を検討するため無降雨期間における溜池の水位変動を図-5に示す。同図より、ほぼ日中は溜池からの蒸発による水位低下があるが夜間では蒸発が小さいため水位は一定していることがわかる。溜池からの漏水量が小さいと仮定してこれを無視すると、地下水流出量は蒸発量と水位変化の差となる。したがって、水面の変化が少ない夜間においては、地下水流出量と溜池からの蒸発量とが釣り合っているものと考えられる。溜池への流入量の概略値を推定するため、農業取水のない3, 4, 10月の無降雨期間内における13日間のデータから溜池を除いた流域の地下水流出高の平均値を求めると0.077 (mm/day)となった。またタンク

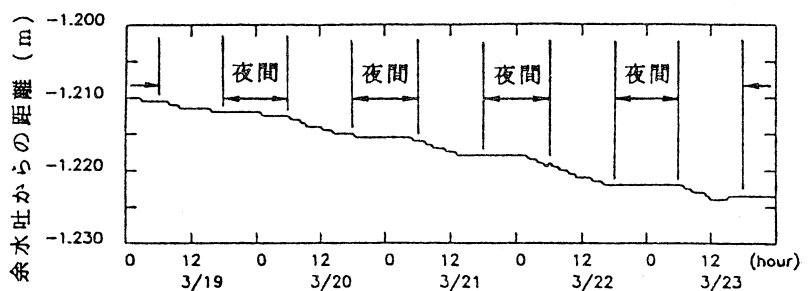


図-5 溜池の水位変動 (1991年3月19~23日)

モデルにおいて最も遅い流出成分を表すTank4からの流出高は平均値が0.34(mm/day)であり、上述の地下水流出高と比べ大きい。このことから、漏水量を無視しているため定性的なことは言えないが、Tank4の流出は地下水流出と地下水流出に近い中間流出を表すものであるということが考えられる。

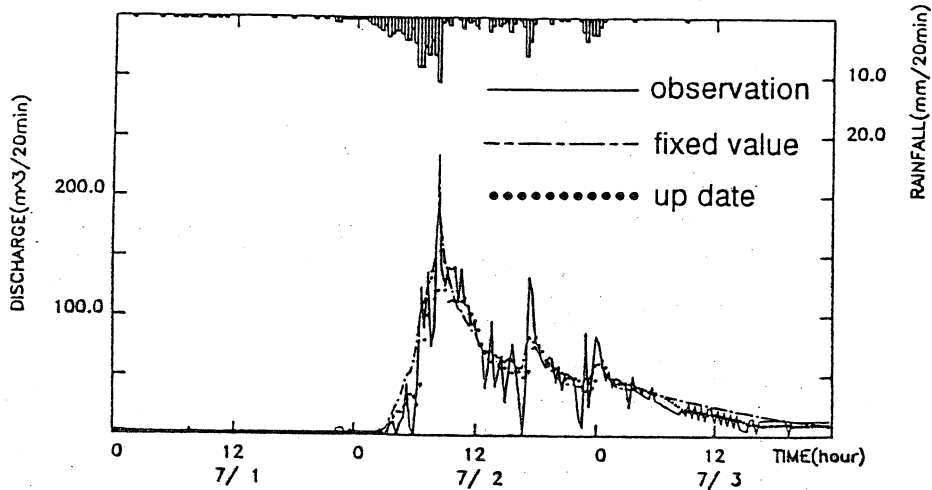


図-6 (a) 流出解析例(CASE4)

解析例としてCASE4の解析結果を図-6に示す。図-6 (a)において実線は(1)式より求めた観測ハイドログラフ、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。図-6 (b)に逐次同定パラメータが実時間で変動する様子を示す。流出孔、浸透孔のパラメータは降雨状況によって上段タンクのものほど大きく変動した。直接流出に影響をおよぼす表層土壌の水分特性は降雨経過ともなって変化する。このためパラメータも一定とならないと考えられる。

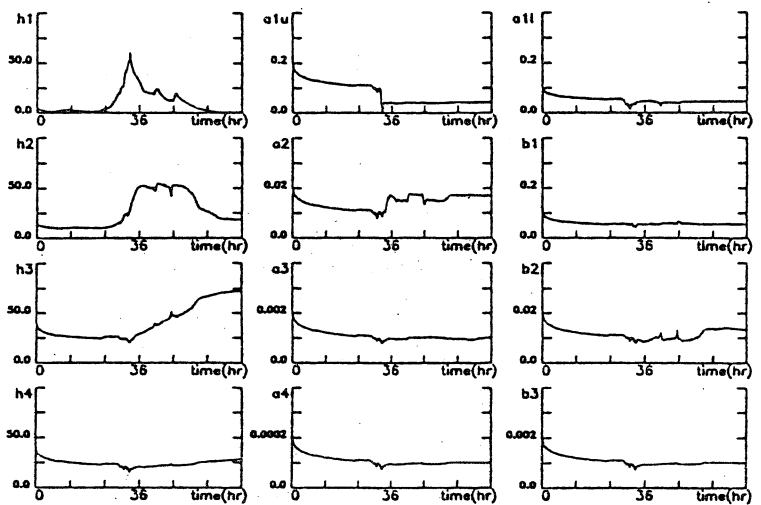


図-6 (b) パラメータ同定(CASE4)

5. おわりに

以上の検討により次のような知見が得られた。

- (1) 現地流域の流出率は約30%程度と小さい。これは現地森林植生と表土層の高い保水性の影響の効果と考えられる。
- (2) 本降雨流出解析で降雨量、降雨強度の大きな雨の場合、速い流出成分の割合が大きかった。
- (3) 従来、試行錯誤的に求めていたタンクモデルパラメータをカルマンフィルターによって求め、逐次パラメータによる流出高の実時間予測を計算した。なおカルマンフィルターの定式化の過程で、システム方程式と観測方程式にHeaviside関数を導入し、タンクモデルの不等式の場合分けを不要にし計算を簡素化した。

最後に本研究に御支援戴きました住宅・都市整備公団 松本淳一氏、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) 農業土木学会編：農業土木ハンドブック, 1969
- 2) 菅原正巳著：流出解析法, 共立出版, 1972
- 3) 建設省水文研究会編：流出計算例題集2, 昭和50年8月

キーワード：タンクモデル, カルマンフィルター, 流出解析, 水面蒸発, 水収支