

宅地開発にともなう農業用溜池流域の流出特性の変化について

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

1. はじめに

流域の降雨流出形態は、土地の利用方法の変化にともない変動する。本報は、流域の宅地開発によって土地の被覆条件が従来の森林の腐植土層から土地造成により輾圧土層へと変化した小規模流域の事例を取り上げ、どのように流出形態が変化したかをタンクモデルの流出解析により示したものである。

2. 対象流域の概要

現地平面図を図-1に示す。同図中の破線内が、解析対象流域であり農業用溜池の流域となっている。流域面積 約86000m²で、このうち溜池は流域面積の約10%を占める。宅地開発により同流域の約75%が土地改変された。

3. 解析手法

3.1 水収支式 溜池の水収支に関する式を次のように仮定する

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

ここで q_{in} :溜池を除いた流域の流出高(mm/20min), A_p :溜池面積(m²), A_{CAT} :流域面積(m²), dh/dt :溜池の水位変化率(mm/20min), R :降雨量(mm/20min), E :水面蒸発量(mm/20min)である。水面蒸発量 E は蒸発量の観測データと当日の气象台のデータ(平均気温、風速、相対湿度)で重回帰分析を行い回帰式からの推定値を適用した。¹⁾

3.2 タンクモデルの適用²⁾ 流域の降雨流出解析モデルとして図-2に示す直列4段タンクモデルを適用した。解析単位時間は小規模流域であることを考慮して20分とした。各タンクについてタンク水深 $h_1 \sim h_4$ (mm), 側方流出孔の係数 $a_{1u} \sim a_4$, 下方浸透孔の係数 $b_1 \sim b_3$ 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た。流出孔の高さ $c_{1u} \sim c_4$ (mm)は文献³⁾より値を仮定し、既知パラメータとした。同図中に $c_{1u} \sim c_4$ の値を開発前の値を上、開発中の値を下の括弧内に示す。開発中のTank1の流出孔高さ c_{11} は表層の輾圧により、土壌浸透能の低下による降雨到達時間の減少が予想されるため、低く仮定した。次にタンクの連続の式を示す。

$$\text{TANK1: } dh_1/dt = f_1(t) = r(t) - q_{1u}(t) Y_{\epsilon}(h_1, c_{1u}) - q_{11}(t) Y_{\epsilon}(h_1, c_{11}) - i_1(t) \quad (2.1)$$

$$\text{TANK2: } dh_2/dt = f_2(t) = i_1(t) - q_2(t) Y_{\epsilon}(h_2, c_2) - i_2(t) \quad (2.2)$$

$$\text{TANK3: } dh_3/dt = f_3(t) = i_2(t) - q_3(t) Y_{\epsilon}(h_3, c_3) - i_3(t) \quad (2.3)$$

$$\text{TANK4: } dh_4/dt = f_4(t) = i_3(t) - q_4(t) \quad (2.4)$$

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_j は浸透高で $i_j(t) = b_j h_j$ (mm)である。

このタンクモデルの12個の未知パラメータは拡張カルマンフィルターによって逐次同定される。20分毎に(1)式より流出高の観測データが得られ、同時に1ステップ先のシステム状態量(未知パラメータ)が逐次同定され、タンクモデルの計算より流出高予測値が求まる。この予測流出高に観測雑音 $w(t)$ を加えたものが、次式のカルマンフィルターの観測方程式となり、これがすなわち式(1)より計算される観測量と等価になる。

$$q_{in}(t) = q_{1u}(t) Y_{\epsilon}(h_1, c_{1u}) + q_{11}(t) Y_{\epsilon}(h_1, c_{11}) + q_2(t) Y_{\epsilon}(h_2, c_2) + q_3(t) Y_{\epsilon}(h_3, c_3) + q_4(t) + w(t) \quad (3)$$

上式において、 Y_{ϵ} はHeaviside関数で $Y_{\epsilon}(x, \xi) = 1/\pi \times \{ \tan^{-1}(x - \xi)/\epsilon + \pi/2 \}$ ($0 < \epsilon \ll 1$)と表される。 ϵ には十分小さな値 $\epsilon = 10^{-6}$ (mm)を与えた。このようなHeaviside関数の導入により、流出孔高さタンク水深との場合分けの必要がなくなり、拡張カルマンフィルターを適用したパラメータ同定計算を簡易化した。

4. 解析結果および考察

4.1 流出率の変化 開発前4ケース、開発中4ケースの代表的な降雨の観測データについて解析を行った。表-1に解析期間における降雨量、流出高、流出率を示す。溜池が流域の約10%もの大きさであるた



図-1 現地平面図(m)

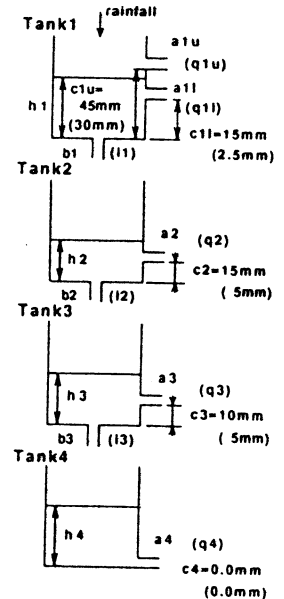


図-2 タンクモデル

め、流出率を溜池を流域から除いた場合と、溜池を流域に含んだ場合との2種類求めた。流出率は各ケースによってばらつきがみられるが、開発前約0.2~0.3に対し、開発中は約0.7~0.8に増加している。

表-1 流域の流出高および流出率

開発前(1990年)	CASE1	CASE2	CASE3	CASE4	開発中(1991年)	CASE5	CASE6	CASE7	CASE8		
解析期間	5/17~5/19	6/14~6/16	6/28~6/30	7/1~7/3	解析期間	7/25~7/27	7/28~7/30	8/9~8/11	9/13~9/15		
降雨量(mm)	88.5	182.5	109.0	154.5	降雨量(mm)	51.0	79.0	94.0	46.0		
流出高(mm)	溜池含む	26.8	62.3	23.2	86.8	流出高(mm)	溜池含む	43.3	67.2	67.1	22.9
	溜池除く	17.7	44.6	9.7	75.7		溜池除く	42.4	65.6	63.4	20.1
流出率	溜池含む	0.30	0.34	0.21	0.56	流出率	溜池含む	0.85	0.85	0.71	0.50
	溜池除く	0.20	0.24	0.09	0.49		溜池除く	0.93	0.83	0.67	0.44

4.2 流出解析結果 上述の降雨各ケースに対してタンクモデルパラメータの実時間予測を行った。流出解析例としてCASE4とCASE6の解析結果を図-3に示す。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。最終同定パラメータについて、CASE4, CASE6の両者を比較すると、開発中のTank1の側方流出孔係数 a_{1u}, a_{1l} が開発前の同係数に比べ約1オーダー増加しており、他のケースについても同様の傾向がみられた。

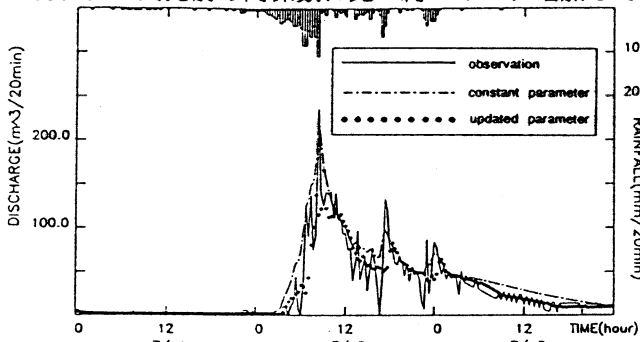


図-3(a) 開発前の流出解析例(CASE4)

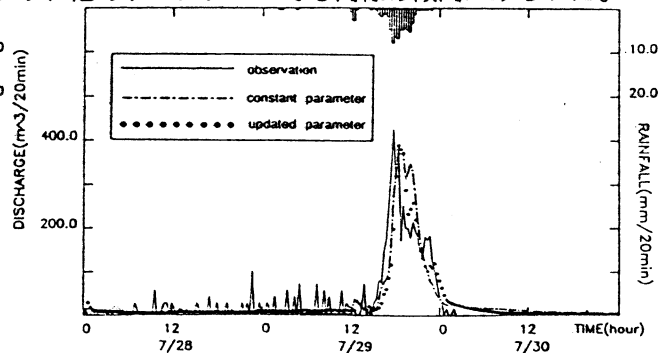
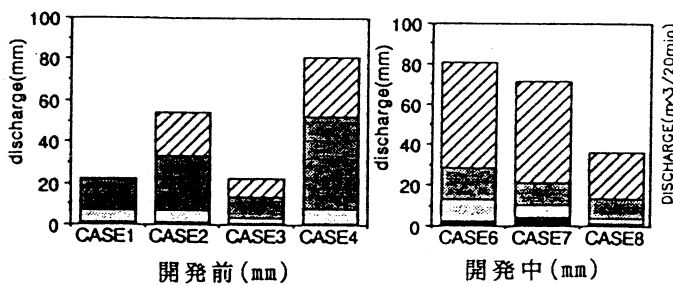


図-3(b) 開発中の流出解析例(CASE6)

図-4に各タンク別の流出高を示す。これはパラメータの逐次同定値から算出される実時間予測流出高を、タンクモデルで各タンクからの流出高別に分けて解析期間中加えていったものである。開発前、開発中ともTank1, Tank2からの流出の成分が大きく、とくに開発中では開発前に比べTank1からの流出が大きい。このことから土地改変によって雨水の多くが地中へ貯留・浸透せずに速やかに溜池に流出していると考えられる。

図-5に土地改変によるハイドログラフの変化をみるために、開発中のCASE6の降雨についてタンクモデルの側方流出孔高さ最終パラメータ値を開発前のCASE4の値に固定し計算して求めたハイドログラフ(破線)をCASE6の観測値(実線)とともに示す。同図より開発によって、①溜池への流出量およびピーク流量が著しく増加した：②ハイドログラフの立ち上がり部分が速くなり降雨到達時間が小さくなった：③ハイドログラフの逓減部が急激になった：といった流域の流出形態の変化が確認された。



凡例 Tank1(斜線) Tank2(横線) Tank3(縦線) Tank4(黒)

図-4 流出高の各タンク別成分

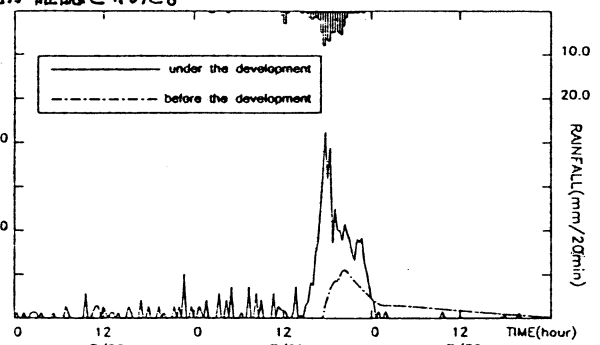


図-5 流域の開発による流出形態の変化の推定

5. おわりに

開発による流域の流出特性変化をタンクモデルによるパラメータの変化で示した。Tank1の側方流出孔の係数 a_{1l} の増加と高さ c_{1l} の低下は、流出量の増加や降雨到達時間の減少といった現象に対応したものと見える。謝辞 本研究にご支援戴きました住宅・都市整備公団の方々と九大工学部大石秀人技官に御礼申し上げます。

参考文献 1)安永武英・神野健二・河村明:宅地開発にともなう農業用溜池への流入量の変化について, 第36回水理講演会 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