

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

Change in the Runoff Process into an Irrigation Pond due to Land Alteration

安永武英*・神野健二**・河村明***

By Takehide YASUNAGA, Kenji JINNO and Akira KAWAMURA

Irrigation ponds in urbanizing areas are nowadays seriously suffering the change in their runoff nature due to land alteration. It is reported in this study that the rapid response, high runoff discharge and reduced base flow into an irrigation pond result from land alteration.

The parameters in the tank model used for the runoff prediction are estimated and compared in the original and altered conditions. It is found that the parameters are significantly changed after the alteration. Specifically, the parameter describing the horizontal discharge from the lower hole in the first tank close to the ground surface becomes one order larger compared to that in the original condition.

Keywords: Irrigation pond, Land alteration, Tank model, Extended Kalman filter

1. はじめに

近年、都市化の進展に伴い、都市部近郊の農地、林地においては、宅地化等の開発が進んでいる。例えば本研究で扱う地区のように、農業用溜池の流域において開発が行われ、流域の植生被覆の除去や宅地造成に伴う表層土の輻圧により土壌浸透能の低下が生じると、溜池への流出形態に急激な変化が生じるものと予想される。この場合、開発によって集水流域の状況が変化しても溜池が農業用水として開発前と同様の必要な貯水量を確保できるかどうかは農業用水利用上の重要な問題になると考えられる。そこで本研究では自然林地状態の流域を持つ農業用溜池周辺において宅地開発が行われている事例をとりあげ、流出解析手法としてタンクモデルを用いることにより、開発前と開発中の期間における代表的な降雨に関して洪水流出解析を行うことにより、宅地開発による溜池流域の流出機構の変化について検討を行っている。

2. 現地状況

開発前の現地平面図を図-1に示す。破線は解析対象としていて、上側溜池の流域を示している。溜池の流域面積は約86000m²である。開発前、溜池流域は植生被覆の自然林地状態であったが、1991年2月に始まった流域の宅地開発により、現在同流域のおよそ75%の部分の土地が改変された。残りの25%の部分は自然

* 学生員 九州大学大学院 工学研究科 水工土木学専攻
(〒812 福岡市東区箱崎6-10-1)

** 正会員 工博 九州大学教授 工学部 水工土木学科

*** 正会員 工博 九州大学助手 工学部 水工土木学科

状態の林地と溜池である。溜池面積は流域面積の約10%程度を占める。

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。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ている。

3. 解析手法

3. 1 水収支式¹⁾ 溜池の水収支に関する式を次のように仮定する。

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

q_{in} : 溜池を除いた流域部分の流出高(mm/20or10min), A_p : 溜池面積(m²), A_{CAT} : 流域面積(m²), dh/dt : 池水位変化率(mm/20or10min), R : 降雨量(mm/20or10min), E : 水面蒸発量(mm/20or10min)である。

3. 2 水面蒸発量の推定^{1), 2)} 水面蒸発量に関しては、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)とで回帰分析を行い推定し、(1)式の水面蒸発量Eに適用する。回帰式は空気力学的方法に基づいたTrabertの式、

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

を参考にして以下のようにして定めた。ここにE: 蒸発速度(mm/day), e: 空气中蒸気圧(mb), e_w : 水面温度に相当する最大蒸気圧(mb), t: 平均気温(°C), v: 風速(m/s), C: 定数である。気温の関数である最大蒸気圧 e_w と相対湿度Uから蒸気圧 e が $e = U \times e_w / 100$ より求まるので、当日の气象台のデータ(平均気温、風速、相対湿度)より式(2)を用いて蒸発量の推定が可能となる。本研究では、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。

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

(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. 3 タンクモデルの適用^{1), 3), 4)} 流域の降雨流出解析モデルとして図-3に示す4段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開発前については20分、開発中については20分または10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。また本研究では、流出孔の高さ $c_{1u} \sim c_4$ (mm) は既知パラメータとして取扱い、文献4)より仮定して図中に示している。開発前の値は上に、開発中の値を下の括弧内に示す。開発中では表土層付近の輾圧により土壤浸透能の減少が予想されるため、Tank1の流出孔の高さ c_{11} を小さく仮定した。

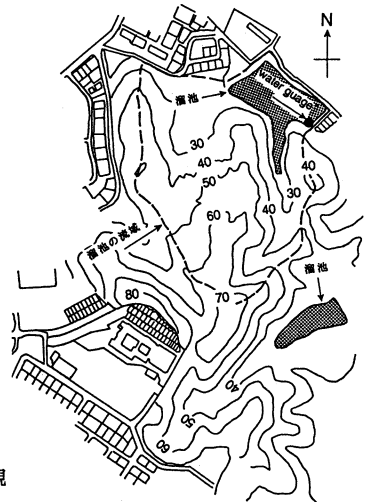


図-1 開発前現地平面図(m)

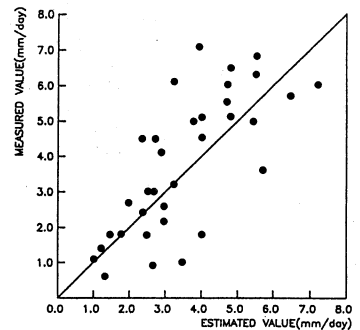


図-2 水面蒸発量の推定結果

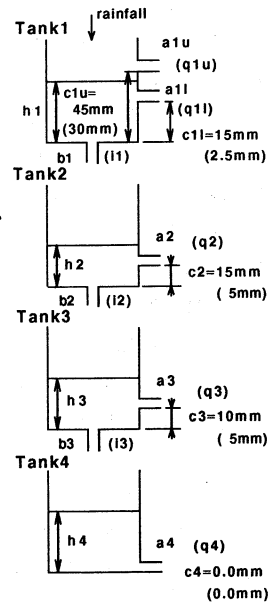


図-3 タンクモデル

次に各タンクの連続の式を示す。

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

$$\text{第2段タンク: } dh_2/dt=f_2(t)=i_1(t)-q_2(t)Y_\epsilon(h_2, c_2)-i_2(t) \quad (4.2)$$

$$\text{第3段タンク: } dh_3/dt=f_3(t)=i_2(t)-q_3(t)Y_\epsilon(h_3, c_3)-i_3(t) \quad (4.3)$$

$$\text{第4段タンク: } dh_4/dt=f_4(t)=i_3(t)-q_4(t) \quad (4.4)$$

上式において、 q_i は流出高で $q_i(t)=a_i(h_j-c_i)$ (mm)である。 i_j は浸透高で $i_j(t)=b_j h_j$ (mm)である。また、 Y_ϵ はHeaviside関数(ステップ関数)で $Y_\epsilon(x, \xi)=1/\pi \times \{\tan^{-1}(x - \xi)/\epsilon + \pi/2\}$ ($0 < \epsilon < 1$)と表される。

ここで 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。

3. 4 拡張カルマンフィルターによるパラメータ同定^{1), 5)} タンクモデルの12個の未知パラメータ同定に拡張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分または10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。

$$\begin{aligned} \text{(a) システム状態量} \quad & h_1 = X_1(t) \quad h_2 = X_2(t) \quad h_3 = X_3(t) \quad h_4 = X_4(t) \quad a_{1u} = X_5(t) \\ & a_{11} = X_6(t) \quad a_2 = X_7(t) \quad a_3 = X_8(t) \quad a_4 = X_9(t) \quad b_1 = X_{10}(t) \quad b_2 = X_{11}(t) \quad b_3 = X_{12}(t) \end{aligned} \quad (5.1)$$

(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

$$\begin{aligned} dX_1/dt &= f_1(t) + u_1(t) & dX_2/dt &= f_2(t) + u_2(t) & dX_3/dt &= f_3(t) + u_3(t) \\ dX_4/dt &= f_4(t) + u_4(t) & dX_j(t)/dt &= f_j(t) + u_j(t) = 0 \quad (j=5, 6, \dots, 12) \end{aligned} \quad (5.2)$$

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に観測雑音 $w(t)$ を加えたものが、カルマンフィルターの観測方程式となり、

$$q_{in}(t) = q_{1u}(t)Y_\epsilon(h_1, c_{1u}) + q_{11}(t)Y_\epsilon(h_1, c_{11}) + q_2(t)Y_\epsilon(h_2, c_2) + q_3(t)Y_\epsilon(h_3, c_3) + q_4(t) + w(t) \quad (5.3)$$

となる。すなわち式(1)より計算される観測量となる。

4. 解析結果および考察

観測データから開発前4ケース、開発中4ケースの代表的な降雨について検討を行った。各ケースの解析期間における総降雨量、総流出高、流出率を表-1に示す。溜池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。解析データの降雨量は開発中の方が解析前よりも小さいが、流出量は大きくなっている。流出率は各ケースによってばらつきが

表-1 流域の流出量および流出率

開発前 (1990年)					
	CASE1	CASE2	CASE3	CASE4	
解析期間	5/17~5/19	6/14~6/16	6/28~6/30	7/1~7/3	
総降雨量(mm)	88.5	182.5	109.0	154.5	
総流出高(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

開発中 (1991年)					
	CASE5	CASE6	CASE7	CASE8	
解析期間	7/25~7/27	7/28~7/30	8/9~8/11	9/13~9/15	
総降雨量(mm)	51.0	79.0	94.0	46.0	
総流出高(mm)	溜池を含む場合	43.3	67.2	67.1	22.9
	溜池を除く場合	42.4	65.6	63.4	20.1
流出率	溜池を含む場合	0.85	0.85	0.71	0.50
	溜池を除く場合	0.83	0.83	0.67	0.44

あるが開発前が約0.2~0.3に対し、開発中は約0.7~0.8である。このような開発による流出率の増加の原因として、開発前の現地は植物、落葉腐植土によって被覆され、樹冠遮断や多孔質土壌の効果により表土層付近は高保水性であったのが、開発により流域面積の75%の部分が除去・輾圧され、表土層の浸透能が減少したため直接流出成分が増加したことの影響が考えられる。

上述の降雨の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が、開発中における解析では、現地の10分または20分の降雨量データが得られなかったため、現地から約4.5km 離れている気象台のデ

ータを代用して解析している。表-2に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、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適当に仮定した。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。なお本解析においては、各システム雑音の標準偏差は各パラメータの開発前においては2.0%、開発中においては1.5%また、観測雑音の標準偏差は開発前においては2.0%、開発中においては3.0%とした。同表において開発前と開発中との最終パラメータを比較すると開発によってTank1の流出孔の係数 a_{11} が増加していることがわかる。なお、解析単位時間は20分である。

表-2 タンクモデルパラメータの同定結果 (上段: 初期値, 下段: 最終同定値)

		開発前				開発中			
パラメータ		CASE1	CASE2	CASE3	CASE4	CASE6	CASE7	CASE8	
h_1	初期	0.0	0.0	0.0	5.0	0.0	0.0	0.0	
	最終	-0.1	0.0	5.0	1.2	0.0	1.5	-0.1	
h_2	初期	0.0	0.0	0.0	15.0	10.0	0.0	0.0	
	最終	11.5	5.8	15.1	18.7	4.3	10.1	5.2	
h_3	初期	10.0	10.0	10.0	40.0	20.0	10.0	10.0	
	最終	57.7	55.1	45.7	72.8	22.3	12.3	15.0	
h_4	初期	40.0	40.0	40.0	40.0	40.0	40.0	40.0	
	最終	35.1	44.6	17.8	29.0	73.0	84.9	66.2	
a_{1u}	初期	0.20	0.18	0.20	0.20	0.10	0.10	0.10	
	最終	0.13	0.22	0.076	0.043	0.19	0.22	0.17	
a_{11}	初期	0.10	0.090	0.10	0.10	0.07	0.07	0.04	
	最終	0.045	0.053	0.012	0.045	0.22	0.23	0.087	
a_2	初期	0.020	0.018	0.020	0.020	0.014	0.014	0.008	
	最終	0.0094	0.021	0.0030	0.017	0.028	0.021	0.013	
a_3	初期	0.0020	0.0018	0.0020	0.0020	0.0014	0.0014	0.0008	
	最終	0.0012	0.0014	0.00037	0.0010	0.0025	0.0031	0.0013	
a_4	初期	0.00020	0.00018	0.00020	0.00020	0.00014	0.00014	0.00008	
	最終	0.00013	0.00017	0.000071	0.00010	0.00025	0.00031	0.00013	
b_1	初期	0.10	0.09	0.10	0.10	0.028	0.028	0.016	
	最終	0.082	0.094	0.051	0.055	0.049	0.074	0.024	
b_2	初期	0.020	0.018	0.020	0.020	0.0028	0.0028	0.0016	
	最終	0.016	0.025	0.010	0.013	0.0053	0.0064	0.0027	
b_3	初期	0.0020	0.0018	0.0020	0.0020	0.00028	0.00028	0.00016	
	最終	0.0013	0.0018	0.00073	0.0010	0.00053	0.00062	0.00027	

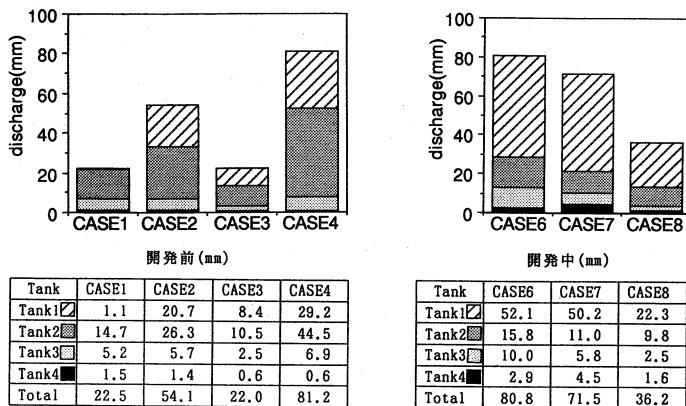


図-4 流出高の各タンク別成分

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。開発前、開発中ともTank1, Tank2からの速い流出成分が大きいが、開発中では開発前に比べTank1からの流出の割合が特に大きくなっている。このことから開発中の場合、土地改変地域において雨水の多くは地下へと浸透せず地表流、浅い地中流⁶⁾となって速やかに溜池に流出することが分かる。

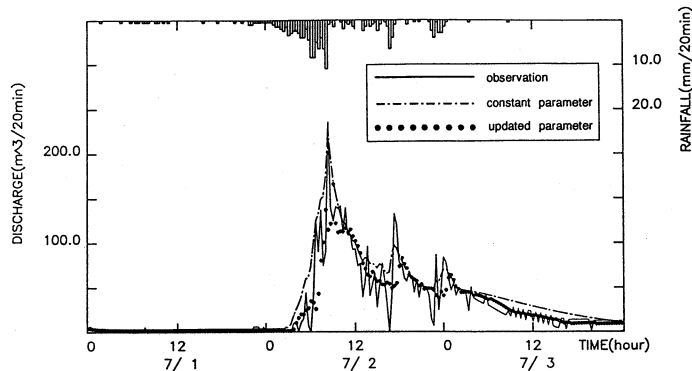


図-5 (a) 開発前の流出解析例 (CASE4・解析単位時間20分)

開発前の解析例として CASE4の解析結果を

図-5 に示す。図-5 (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-5 (b)にCASE4でタンク水深および孔係数のパラメータが実時間で変動する様子を示している。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。表層土壤の水分状態は流出に大きく影響を及ぼし、かつ降雨経過にともなって変化するので、パラメータ a_{1u} , a_{11} , a_2 も変動していると考えられる。

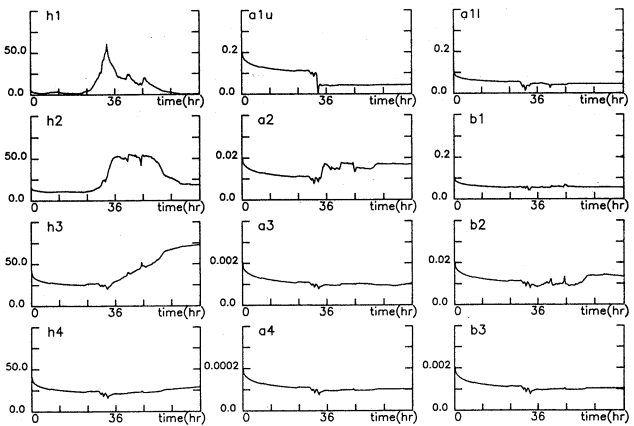


図-5 (b) タンク水深, 流出孔係数, 浸透孔係数の変化 (CASE4)

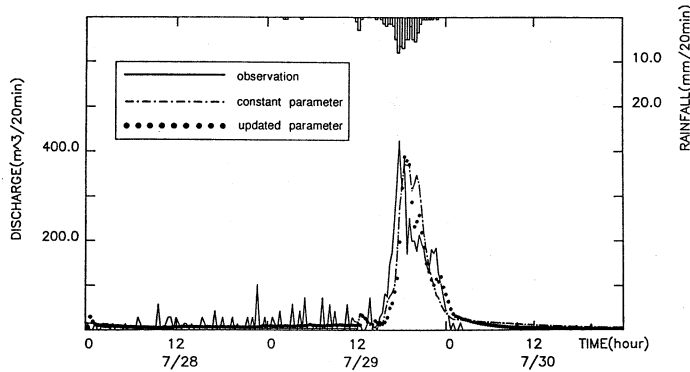


図-6 (a) 開発中の流出解析例 (CASE6・解析単位時間20分)

開発中の解析例として CASE6の解析結果を図-6 に示す。同ケースにおいて、降雨前に観測ハイドログラフにみられる変動は、池の水面が風により振動したために生じたものと考えられる。図-6 (a) では解析単位時間を20分とした。しかし、開発によって流域の降雨到達時間が減少したために予測ハイドログラフの立ち上がり部の遅れがみられた。そこで解析単位時間を10分として改めて計算を行った結果を図-6 (b)に示す。この場合、立ち上がり部の遅れがかなり改善されている。本対象流域は流域面積が小さく、かつ開発が行われ流出の速度が速くなっているため、ハイドログラフの立ち上がり部を精度よく予測するためにはさらに単位時間を小さくすることも必要と考えられる。

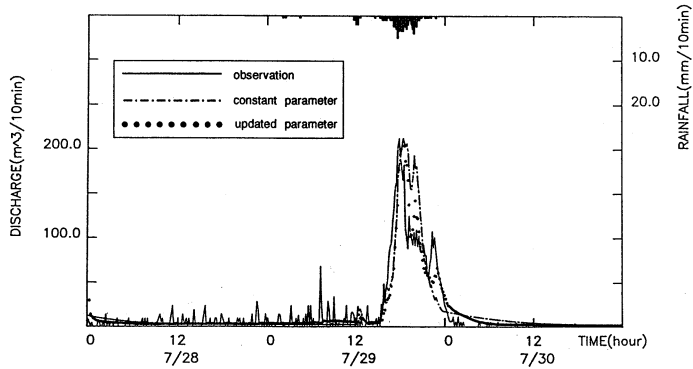


図-6 (b) 開発中の流出解析例 (CASE6・解析単位時間10分)

次に土地改変によるハイドログラフの変化を比較するために、CASE6と同じ降雨を開発前のCASE4のタンクモデルの側方流出孔の高さと最終パラメータ値に固定して解析することによって得られるハイドログラフをCASE6の観測値とともに図-7に示す。同図より開発前のパラメータで計算した結果(破線)とCASE6の観測ハイドログラフ(実線)とを比較すると、開発によって、①溜池への流出量およびピーク流量が大きくなった：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：などの特徴が確認された。

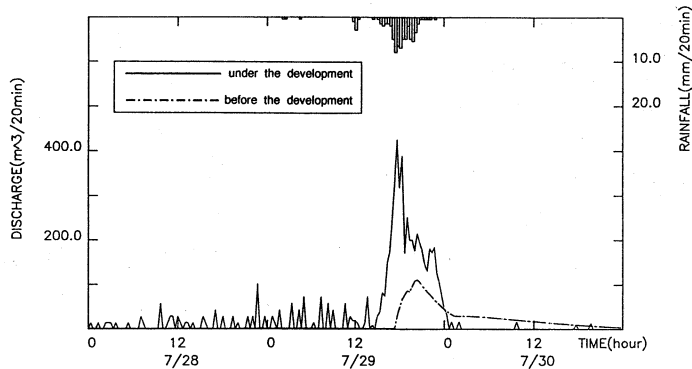


図-7 流域の開発による流出形態の変化の推定 (CASE6・解析単位時間20分)

5. おわりに

農業用溜池流域において、開発前と開発中とで流出解析をおこなった結果、次のような変化が確認された。

- (1) 流域の75%が改変された結果、流出率が開発前では約30%程度であったものが約70%程度まで増加した。
- (2) 開発により流出量とピーク流量の増加、降雨到達時間の減少、急激なハイドログラフの逓減がみられた。これらの結果は、開発による Tank1の下側の側方流出孔における係数 a_{11} の増加、高さ c_{11} の減少といったタンクモデルのパラメータの変化にも対応している。

謝辞

最後に本研究にご支援戴きました住宅・都市整備公団の方々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：農業用溜池周辺からの流出機構と水収支，水文・水資源学会1991年研究発表会要旨集，pp198~201
- 2) 農業土木学会編：農業土木ハンドブック，1969
- 3) 菅原正巳著：流出解析法，共立出版，1972
- 4) 建設省水文研究会編：流出計算例題集2，昭和50年8月
- 5) Athans, M.: Suboptimal State Estimation for Continuous-Time Nonlinear Systems from Discrete Noisy Measurements, Ieee Transactions on Automatic Control, Vol.AC-13, No.5, pp504~514 1968
- 6) M. J. カークビー (日野幹雄ほか共訳)：新しい水文学，朝倉出版，1979