

# 水田地帯の流出特性に関する一考察

福島 辰・田中 礼次郎<sup>※</sup>

Akira FUKUSHIMA and Reijiro TANAKA

## A Study on the Characteristics of Runoff in Paddy Field Area

### 1. ま え が き

農地、とくに水田地帯の排水計画において対象流域に降った雨水が流域内の排水路網をどのように流下し、流域下流端において時間的にどれだけ量が流出してくるかが常に問題となる。こうした問題にはこれまで単位図法、流出関数法、タンクモデル、特性曲線法、統計的モデル等いろいろの流出モデルを用いて流出解析が行なわれ検討されているが、流出現象が本質的に非線形性をもつため、現在なお未解明な問題が多く残されている。その一つに、各水田区画における流水抵抗、貯留効果といった水理学的問題、また緩こう配排水路網におけるその構成、地形的特性の評価法といった地形学的な問題があげられる。

本研究は、実用的見地から線形貯留の概念を用いた流出モデルを考え、水田地帯における流出現象に特有な貯留はらん効果を評価した単位図を用い簡便な流出解析法を検討するとともに、水田地帯の流出特性を明らかにしようとするものである。

### 2. 雨水流出のモデル化と流出解析法

まず、流域の地形的特性に応じ流域を単位流域に分割した後、水田地帯における雨水の流出過程を簡単なモデルで近似し、単位図を求める方法を以下に述べる。

i) 単位流域 地形的条件により水田流域は一般に複雑な排水路網を構成し、かつ緩こう配の排水路であり、通水能力の制約より各支川の合流点等で局所的なはらん現象を起しやすい。各水田区画における貯留効果に加えてこうしたたん水、はらん現象により、一層雨水の伝播波形の変形が助長される。実流域において観測できる流

出ハイドログラフは、そうした効果が総合化されたものである。したがって流出解析においては、貯留はらん現象が期待される地点を目安に、対象流域を適当に細分化し、各ブロックにおける流出量の時間的変化を評価した後、各ブロックのハイドログラフを合成するのが妥当であり、また排水路網の特性が加味できる。ここでは、分割された各ブロックにおいて、排水路長を一辺とする矩形流域に置換したものを単位流域と呼ぶことにする。

ii) 貯留効果を無視した場合の単位図 各水田区画の貯留効果、ならびに水田畦畔の欠口より流出が最末端水路の通水能に支配されないという条件のもとに、雨水の伝播を考える。いま流域内に一様な有効雨量  $r_e$  (mm/hr) が単位時間  $T_R$  (sec) 継続するものとする。また雨水は幹支線排水路を平均して、 $v_0$  (m/sec) の伝播速度で流下するものとする。この場合、単位流域の下流端における流出ハイドログラフは面内各点よりの雨水の伝播時間  $\tau (= l/v_0$ , ただし、 $l$ : 流下距離 (m)) のみの関数で表現されるが、単位時間  $T_R$  (sec) と流域最遠点よりの雨水の到達時間  $T_A$  (sec) との関係より、図-1に示すように3つのタイプに分類される。

一般に、流出ハイドログラフは、そのてい減部において指数関数的な減衰曲線を描くという経験的事実を考慮して、図中の点線のように修正する。この場合、時定数

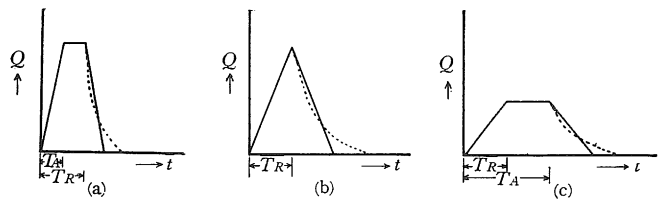


図-1 ハイドログラフの3つのパターン

※農業水利工学研究室

(もしくはてい減係数)  $k$  は総降水量と総流出量とが等しいことより、容易に算定できる。図-1に示す3つのタイプについてのピーク流量  $r_0$  (m<sup>3</sup>/sec), 時定数  $k$  (sec) は次式で与えられる。

$T_A \leq T_R$  のとき

$$r_0 = \frac{r_e A}{3.6} \dots\dots\dots(1), \quad k = \frac{T_A}{2} \dots\dots\dots(2)$$

$T_A > T_R$  のとき

$$r_0 = \frac{r_e B(v_0 T_R - 0.5B)}{3.6} \dots\dots\dots(3)$$

$$k = \frac{v_0 T_R^2 + B(T_A - 1.5T_R)}{2(v_0 T_R - 0.5B)} \dots\dots\dots(4)$$

ここに、 $r_e$ : 有効雨量 (mm/hr),  $A$ : 流域面積 (km<sup>2</sup>)  
 $T_A$ : 流域最遠点よりの雨水の到達時間 (=  $(L+0.5B)/v_0$ ),  $L$ : 排水路長 (m),  $B$ : 流域幅 (m) である。  
 したがって、 $T_A \leq T_R$  のときの流出ハイドログラフは次式で与えられる。

$0 \leq t \leq T_A$  のとき

$$Q(t) = \frac{r_0}{T_A} t \dots\dots\dots(5)$$

$T_A < t \leq T_R$  のとき

$$Q(t) = r_0 \dots\dots\dots(6)$$

$t > T_R$  のとき

$$Q(t) = r_0 \exp\left(-\frac{t-T_R}{k}\right) \dots\dots\dots(7)$$

また、 $T_A > T_R$  のときの流出ハイドログラフも同様な形式で与えられる。

単位雨量  $r_e$  (mm/hr), 単位時間  $T_R$  (sec) に対する単位図は、各単位流域より対象地点までの流下時間遅れを考慮し、各単位流域よりの流出ハイドログラフを合成することにより求められる。

iii) 貯留効果を考慮した場合の単位図 前述のように水田地帯は、一般に通水能力のきわめて小さい排水路網で構成され、とくに低平湿地では出水初期より貯留はらん現象がみられる。こうした場合の出水特性は非線形性が薄れ、雨水の流出過程は線形モデルより追跡しうる事が指摘されている。<sup>1)</sup>

ここでは、単位流域からの流出量が流域内の最末端排水路等における雨水の伝播時間と各水田区画における貯留効果、また排水路の通水能を超過するときにみられる貯留はらん効果の2つの作用素を受けるものとして、簡単な線形流出モデルを考え、単位図を求めてみる。

いま線形系の流出モデルを考える場合、雨水の伝播過程と水田区画、排水路等における貯留効果の評価は独立に扱える。まず、流域内より貯留はらん効果を受けな

い条件下での雨水の伝播過程はii) で考察したように、雨水の伝播速度  $v_0$  (m/sec) としたときの時間遅れ  $\tau$  のみの関数で表わされる。 $T_A < T_R$  の場合の単位流域下流端における流入量  $q(t)$  は次式で与えられる。なお単位雨量, 単位時間等は ii) と同じ値を用いる。

$0 \leq t \leq T_A$  のとき

$$q(t) = \frac{r_0}{T_A} t \dots\dots\dots(8)$$

$T_A < t \leq T_R$  のとき

$$q(t) = r_0 \dots\dots\dots(9)$$

$T_R < t \leq T_B$  のとき

$$q(t) = -\frac{r_0}{T_A}(t-T_R) + r_0 \dots\dots\dots(10)$$

$t > T_B$  のとき

$$q(t) = 0 \dots\dots\dots(11)$$

ここに、 $r_0$  はピーク流入量 (m<sup>3</sup>/sec) で (1) 式で与えられる。

$T_B = T_A + T_R$ ,  $T_A$ : 最遠点よりの到達時間 (sec),  $T_R$ : 降雨の単位時間 (sec) である。

(8)~(11) 式の関係を図示すると、図-2のようになる。

つぎに (8)~(11) 式で与えられる流入量に対し、流域内の貯留はらん効果を加味して、単位流域下流端よりの流出量を求める。雨水の流出系を線形、時間不変と仮定した場合、

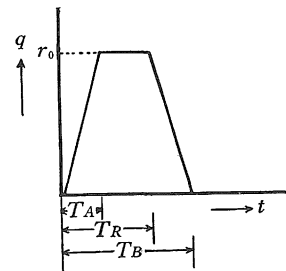


図-2 流入ハイドログラフ

場合、入力である流入量  $q(t)$  と出力である流出量  $Q(t)$  との間に次式が成立する。

$$Q(t) = \int_0^t q(\tau) h(t-\tau) d\tau \dots\dots\dots(12)$$

ここに、 $h(t)$  は単位インパルス応答、またはシステム関数である。

いま、流入量  $q(t)$  が次式で表わされる1個の線形貯水池効果を受けるものとする。

$$\frac{dS}{dt} = q - Q \dots\dots\dots(13) \quad S = KQ \dots\dots\dots(14)$$

ここに、 $S$ : 流域内の貯留量 (m<sup>3</sup>),  $K$ : 水田流域固有の時定数 (sec) である。

この場合の (12) 式中のシステム関数  $h(t)$  は次式で与えられることになる。

$$h(t) = \frac{1}{K} \exp\left(-\frac{t}{K}\right) \quad \dots\dots(15)$$

(12), (15) 式の関係を用いて, (8)~(11) 式で与えられる流入量  $q(t)$  に対する流出量  $Q(t)$  を求めると次式ようになる。

$0 < t \leq T_A$  のとき

$$Q(t) = \frac{r_0}{T_A} \left\{ t - K \left\{ 1 - \exp\left(-\frac{t}{K}\right) \right\} \right\} \quad \dots\dots(16)$$

$T_A < t \leq T_R$  のとき

$$Q(t) = r_0 \left\{ 1 - \exp\left(-\frac{t-T_A}{K}\right) \right\} + Q_{TA} \exp\left(-\frac{t-T_A}{K}\right) \quad \dots\dots(17)$$

$T_R < t \leq T_B$  のとき

$$Q(t) = -\frac{r_0}{T_A} (t - T_R) + r_0 \left( 1 + \frac{K}{T_A} \right) \cdot \left\{ 1 - \exp\left(-\frac{t-T_R}{K}\right) \right\} + Q_{TR} \exp\left(-\frac{t-T_R}{K}\right) \quad \dots\dots(18)$$

$t > T_B$  のとき

$$Q(t) = Q_{TB} \exp\left(-\frac{t-T_B}{K}\right) \quad \dots\dots(19)$$

ここに,  $Q_{TA}$ ,  $Q_{TR}$ ,  $Q_{TB}$  はそれぞれ  $t = T_A$ ,  $T_R$ ,  $T_B$  のときの流出量でおおの (16), (17), (18) 式より与えられる。

ピーク流出量  $Q_{max}(m^3/sec)$  は流入量  $q(t)$  の時間的特性より,  $T_R \leq t \leq T_B$  において発生する。したがって, その発生時刻  $t_P$ , ならびにピーク流出量  $Q_{max}$  は (18) 式の関係よりつきのように表わされる。

$$t_P = 2.303K \log \left\{ \exp\left(\frac{T_A}{K}\right) + \exp\left(\frac{T_R}{K}\right) - 1 \right\} \quad \dots\dots(20)$$

$$Q_{max} = -\frac{r_0}{T_A} (t_P - T_R) + r_0 \left( 1 + \frac{K}{T_A} \right) \cdot \left\{ 1 - \exp\left(-\frac{t_P - T_R}{K}\right) \right\} + Q_{TR} \exp\left(-\frac{t_P - T_R}{K}\right) \quad \dots\dots(21)$$

また,  $T_A > T_R$  の条件下での単位流域よりの流出量も, 同様にして求められる。

単位雨量  $r_e(mm/hr)$ , 単位時間  $T_R(sec)$  に対する対象地点における単位図は, 前項 ii) で述べたように各単位流域からの流出ハイドログラフを対象地点までの流下時間だけスライドした後, 加算して得られる。

iv) 幹線排水路における貯留はらん現象の評価 前

項 ii), iii) で単位流域ごとに流出ハイドログラフを算定し, 単位図を求める方法を示した。この単位図を実流域に適用するにあたっては, とくに豪雨による異常出水時には幹線排水路における通水能力の限界, また排水路

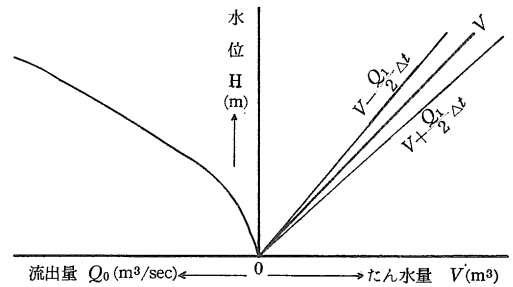


図-3 たん水量～流出量曲線

中に設けられた水門等の水利構造物や農道等の横断による通水断面の局所的狭窄などに起因する排水路よりのはらん現象が生起することに留意しなければならない。このように排水路の通水能力を超過する場合, 雨水流出の波形はさらに偏平化し, 長時間にわたるたん水状態を呈するが, そうしたはらんたん水現象の評価法として, 実用的には図-3に示すような物部の図式解法<sup>2)</sup>が応用できる。すなわち, 次式で表わされる連続式により, 流出量を求めることができる。

$$\left( V - \frac{Q_0}{2} \Delta t \right)_t + Q_1 \Delta t = \left( V + \frac{Q_0}{2} \Delta t \right)_{t+\Delta t} \quad \dots\dots(22)$$

ここに,  $V$ : たん水量 ( $m^3$ ),  $Q_1$ :  $\Delta t$  時間内の平均流入量 ( $m^3/sec$ ),  $Q_0$ : 対象地点よりの流出量 ( $m^3/sec$ )

### 3. 網場川における流出特性の検討

前述の方法を出雲平野を流下する斐伊川右岸の水田地帯における一排水河川域である網場川流域 (流域面積  $A = 3.63km^2$ ) に適用した例を述べる。

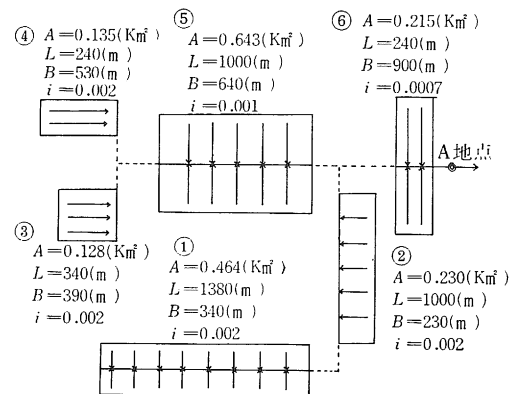


図-4 流域モデル

本河川は宍道湖に注いでいるが、かんがい期間中の排水は、湖水位が高いため機械排水に依存している。このため出水時における流域下流端の内水位はポンプ排水量の影響も加わり、複雑に変化する。本研究ではこうした機械排水による影響、また流域下流端における樋門操作による背水の影響が及ばない河口より3.2 km上流のA地点(集水面積：1.815 km<sup>2</sup>)における昭和40, 41年の観測

資料をもとに、水田地帯の流出特性を検討する。

i) 単位図の作成 流域の排水路網の特性より、流域をモデル化すると図-4を得る。2-ii, iii) の方法に

表-1 各 K 値に対する単位図 ( $r_e = 10\text{mm/hr}$ ,  $T_R = 3600\text{sec}$ )

時間 $t(\text{hr})$	貯留効果なし $m^3/\text{sec}$	貯留効果あり				
		$K = 1.8 \times 10^3$ $m^3/\text{sec}$	$K = 3.6 \times 10^3$ $m^3/\text{sec}$	$K = 10.8 \times 10^3$ $m^3/\text{sec}$	$K = 32.4 \times 10^3$ $m^3/\text{sec}$	$K = 97.2 \times 10^3$ $m^3/\text{sec}$
0.5	1.845	0.626	0.358	0.131	0.043	0.015
1.0	4.035	2.201	1.405	0.559	0.201	0.070
1.5	2.885	3.184	2.304	1.046	0.390	0.137
2.0	1.000	2.390	2.202	1.207	0.484	0.171
2.5	0.280	1.139	1.509	1.094	0.486	0.177
3.0	0.075	0.419	0.917	0.925	0.465	0.174
4.0	0.005	0.030	0.337	0.663	0.412	0.168
5.0		0.002	0.125	0.472	0.369	0.163
6.0			0.046	0.340	0.330	0.157
8.0			0.007	0.176	0.265	0.145
10.0				0.091	0.214	0.134
12.0				0.045	0.171	0.126
18.0				0.006	0.087	0.100
24.0					0.044	0.080
30.0					0.022	0.066
36.0					0.011	0.053
42.0					0.007	0.043
48.0						0.034
60.0						0.022
72.0						0.014

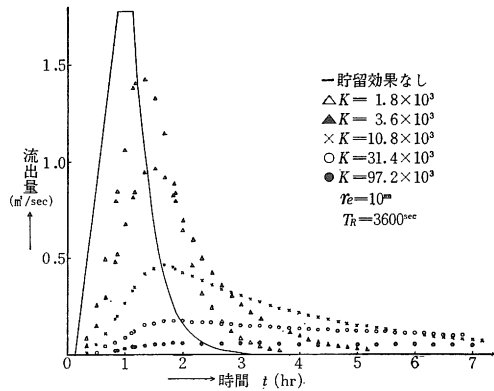


図-5 各 K 値に対する流出ハイドログラフ

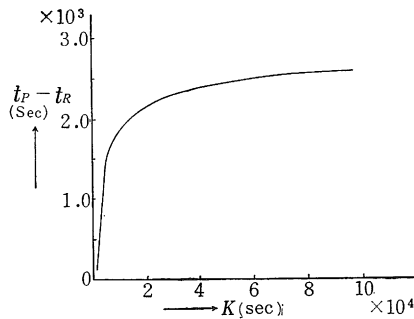


図-6  $K \sim t_P - t_R$  曲線

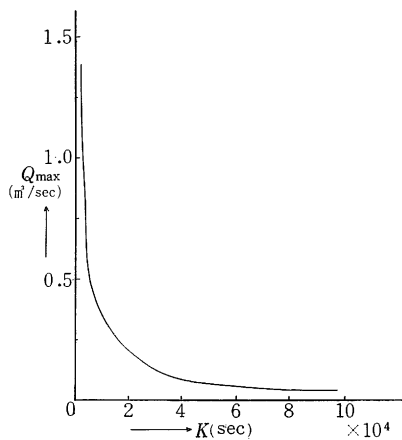


図-7  $K \sim Q_{\text{max}}$  曲線

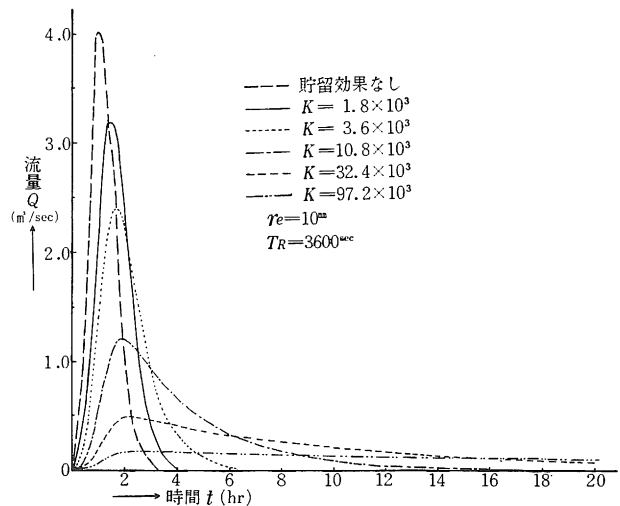


図-8 各 K 値に対する単位図

より、単位雨量  $r_e = 10 \text{ mm/hr}$ 、単位時間  $T_R = 3600 \text{ sec}$  とした場合の各単位流域の流出ハイドログラフ、ならびにA地点における単位図を計算する。この場合、排水路における雨水の伝播速度  $v_0$  は清野の研究<sup>3)</sup>を参考にして  $v_0 = 0.5 \text{ m/sec}$  とした。また、時定数  $K$  はピーク流量あるいはピーク流量発生時刻とは無関係で、流域固有の定数であるため、観測ハイドログラフと対比のうえ推定しなければならない。

図-5に単位流域No.⑤における流出ハイドログラフを前述のように貯留効果を考慮しない場合、また考慮した場合は時定数  $K = 1.8 \times 10^3, 3.6 \times 10^3, 10.8 \times 10^3, 32.4 \times 10^3, 97.2 \times 10^3 \text{ sec}$  について示す。また、(20), (21) 式の関係より得られる時定数  $K$  と  $(t_P - T_R)$  の関係、ならびに  $K$  とピーク流量  $Q_{\max}$  との関係を図-6, 図-7に示す。これらの図より流出ハイドログラフの形状が時定数  $K$  の値により著しく変化することが理解できる。

各単位流域よりの流出ハイドログラフを合成し、A地点における単位図(単位雨量  $r_e = 10 \text{ mm/hr}$ 、単位時間  $T_R = 3600 \text{ sec}$ )を求めた結果を表-1、ならびに図-8に示す。

単位図は単位流域No.⑤の流出に支配された形状になり、 $K$  と  $t_P, Q_{\max}$  の関係も図-6

表-2 降雨資料

case	年 月 日	総雨量	有効雨量
A	S.41.6.20	31.6	10.3
B	S.40.9.9~9.11	136.5	77.5

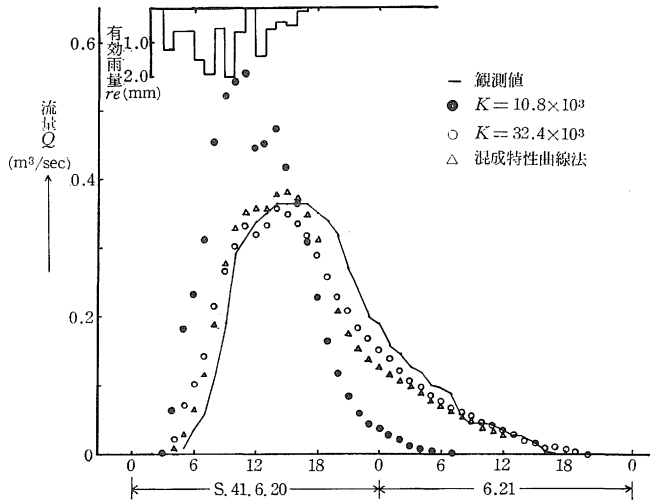


図-9 流出ハイドログラフ (case A)

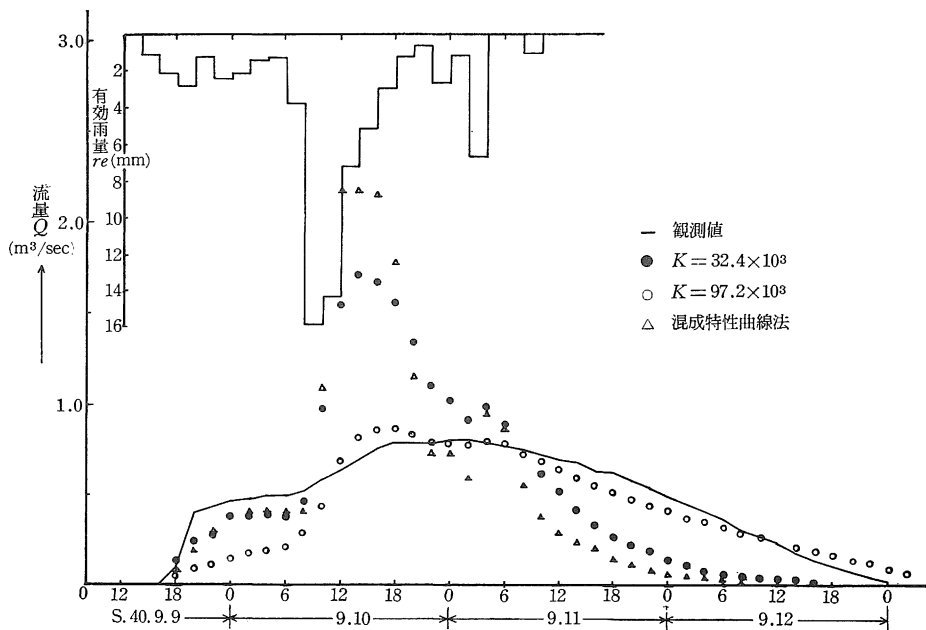


図-10 流出ハイドログラフ (case B)

、7に示す傾向がみられる。

ii) 単位図の適合性 表-2に示す降雨にもとづく流出観測ハイドログラフに対して、前述の方法で求めた単位図の適合性を検討する。なお、直接流出量は基底流量を一定とし、水平分離法により算定した。また、有効雨量は他の観測資料も考慮して、累加雨量～累加損失雨量の関係を用いて評価した。

得られた計算結果を図-9、10に示す。いずれの計算値も2-iv)で述べた幹線排水路の貯留効果は無視したものである。これは、A地点における排水路の通水能力を超過しないかぎり、この計算過程は省略しても大差ないと考えられることによる。

さて、観測値と計算値を比較すると、case A では  $K = 32.4 \times 10^3$  (sec) とした場合の単位図、また case B では  $K = 97.2 \times 10^3$  (sec) とした場合の単位図を用いた計算値がいずれも観測ハイドログラフのピーク流量の値ならびに減曲線部の特性とかなりよく適合している。

また、出水初期においては、図-10にみられるように  $K = 32.4 \times 10^3$  とした場合の単位図による計算値が、 $K = 97.2 \times 10^3$  とした場合の計算値より観測ハイドログラフにより近似した流出性状を示している。

以上の結果より、時定数  $K$  が降雨量により変化する傾向にあることが指摘される。しかし、出水規模に応じ適当な時定数が評価された場合、前述の貯留効果を加味した単位図法により、全般的にはかなりの精度で流出量が推定できるものと考えられる。

また、貯留はんらん効果は無視した場合の単位図は図-9、10に示す観測ハイドログラフにみられる流出性状より、水田地帯では適用しがたいといえる。

なお、水田区画より最末端水路への流出過程において通水能を考慮した混成特性曲線法による解析結果も図-9、10に併示してある。case A の場合はかなりよい適合性を示しているが、降雨量の大きい case B につい

ては、ピーク流量、ならびにその発生時刻とも観測値と著しい差異が認められる。こうした傾向より、混成特性曲線法には鈴木・西畑の研究<sup>7)</sup>で指摘されているような問題点を含んでいるといえる。

#### 4. 結 び

以上、水田地帯における雨水の流出系は田面、排水路網内の貯留はんらん現象が卓越し、線形的性状が発現しやすい特性をもつという観点より、線形貯留効果を加味した簡単な流出モデルを考え、これより単位図を求める方法を提示するとともに、実流域における本法の適合性を検討した。

その結果、田面、排水路等における貯留はんらん効果は無視した場合の単位図は水田地帯では適用しがたいことが示された。一方、貯留はんらん効果を考慮した場合の単位図法を用いれば、適当な時定数を評価することにより、かなりの精度で水田地帯の雨水追跡が可能となり、実用上、本法の有用性が認められた。

なお、単位図に含まれる時定数  $K$  が降雨量、したがって出水規模によって変化することが認められたが、これに対する物理的解釈については、その他の問題も含めて今後の課題としたい。

最後に、本研究にあたり有益な示唆を賜った京都大学防災研究所角屋睦教授に深謝の意を表します。

#### 参 考 文 献

1. 豊国永次：水理学・水文学における最近の進歩 土木学会関西支部 大阪 1967, p. 132~148
2. 本間 仁, 安芸皎一編：物部水理学 岩波書店 東京 1962, p. 633~634
3. 清野 保：農業土木研究 30 (4) : p. 201~209, 1962
4. 鈴木正勝・西畑勇夫：土木学会 論文報告集 163 : p. 29~37, 1969

#### Summary

This study aims to clarify the characteristics of runoff in a paddy field area which is affected by the effect of storage capacity and often troubled by inundation.

First, the method of estimation of unit hydrograph is proposed by adopting the conception of linear reservoir considered the storage capacity and the effect of flooding of the paddy field area in runoff process.

Next, the adaptability of the method is examined for the observed rainfall and runoff data.

As a result, the usefulness of the unit hydrograph method considered the effect of storage and flooding has been shown to the practical estimation of the runoff in the paddy field area by evaluating the optimum decay constant. Moreover, it has been clarified that the decay constant is tend to increase together with the magnitude of rainfall intensity or runoff.