

低平農地における雨水流出のパラメトリックモデル

福 島 晨[※]

Akira FUKUSHIMA

Parametric Model of Runoff in Low-lying Agricultural Lands

1. ま え が き

本研究は低平農地における出水特性を把握するため、田面、排水路等の水理ならびに地形条件を加味した2つのパラメーターを有する非線形の流出モデルを提示し、そのパラメトリックモデルによる雨水流出の解析法を検討しようとするものである。低平農地における雨水流出現象は山地のそれとは対照的である。すなわち、山地における雨水流出は山腹斜面域の地被状態等に左右された表面流、あるいは中間流の *kinematic wave* のじょう乱伝播過程として扱えるのに対し、低平農地の場合そのほとんどの地域が水田で占められ、こうした地域における雨水の流出過程は田面ならびに一般に緩こう配、かつ通水能の小さい排水路網等の地形特性に顕著な影響を受け、出水初期より田面、排水路網内の貯留はらん現象を生起しやすい特性をもつ。したがって低平農地における出水形態は *kinematic wave* 法では十分説明しがたく、また実流域において、その流出性状の把握も容易ではない。

実際に両地域に単位図法を適用した場合、降雨規模により、単位図の形状が変化するという点は共通しているとはいえ、山地域の単位図は降雨強度が大きいほど最大流量は大きく、かつピークが早くあらわれるのに対し、水田を主体とする低平農地の場合、降雨強度が大きいほど、最大流量は逆に小さくなり、かつピークの発現は遅くなり、きわめて緩慢な減形状を示す。しかし、たん水域への雨水の流入流出過程、あるいは、流域下流域における排水樋門の操作、機械排水等の下流端条件に支配される雨水の流出過程はより複雑な水理現象となり、単位図法により、その一般的な特性の論議はしがたくなる。

ここでは、水理的な取扱いによらず、パラメトリッ

クな手法により、そのような非線形効果を考慮し、実用的な流出解析法を検討することを目的とする。

なお、本研究は昭和46年度文部省科学研究費奨励研究の援助を受けて行なった研究成果の一部である。

2. 試験流域における2, 3の出水特性

低平農地、水田流域を対象とする雨水流出に関する最近の研究のうち、任田¹⁾の雨水流出能の概念を導入した混成特性曲線法は、鈴木ら²⁾が指摘しているように、田面の水深の変化を重視し、排水路に出た雨水に対するたん水による影響を考慮していないため、たん水領域に対しては適用しがたい。しかし、はらん計算を導入することにより、その適用範囲は拡張できることが指摘されている³⁾。また、鈴木ら²⁾は田面、排水路網内の貯留現象、ならびに流域下流部にみられる背水現象をタンクモデルで説明しようと試みているが、未解明な問題が残っている。

筆者も先に、貯留はらん現象が顕著でない降雨規模に対しては、混成特性曲線法により雨水流追跡が可能であることを指摘した⁴⁾。この場合、排水路の流れは次式で表わされる運動、ならびに連続の方程式より求められる等流特性曲線法で追跡されている。

$$A = K_1 Q^P \quad \dots\dots\dots (1)$$

$$\frac{\partial A}{\partial t} + \frac{\partial Q}{\partial x} = q \quad \dots\dots\dots (2)$$

ここに、 A : 流水断面積 (m^2)、 Q : 流量 (m^3/sec)、 t : 時間 (sec)、 x : 距離 (m)、 q : 横からの単位長さあたりの流入量 (m^2/sec)、 $p = 3 / (2z + 3)$ 、 $K_1 = (n / \sqrt{\sin \theta}) \cdot K_2^{2/3}$ 、 n : Manning の粗度係数、 z : 径深 R を $R = K_2 A^z$ とおいた場合の常数、 $\sin \theta$: 流路こう配である。

いま、(1)式の関係がどのような水深範囲で成立するかを、網場川流域で得られた水位流量観測資料につい

※ 農業水利工学研究室

て、若干、考察してみる。網場川流域は出雲平野を流下する斐伊川右岸に位置し、その集水面積は 3.63km^2 、流路延長約 5.6km 、河床こう配はほぼ $1/1,500$ の低平な水田主体流域である。本排水路は宍道湖に注いでいるが、かんがい期間中は宍道湖水位が高いため、その排水は機械排水に依存している。ここで、検討しようとする以下の水位、流量資料は、流域下流端における機械排水等による背水の影響がおよばない河口より約 3.2km 上流のA

地点(集水面積： 1.85km^2)における昭和40、41年の観測資料である。なお、後述の解析に用いる雨量は当流域より約 2km 西部にある島根県農事試験場出東分場で得られた観測資料である。

さて、まずA地点で得られた水位流量資料を整理すると、図-1のような流水断面積と流量との関係が得られた。ただし、流水断面積、流量とも出水前のそれぞれの初期値 A_0 (m^2)、 Q_0 (m^3/sec) を差し引いた値を A 、 Q としてある。なお、A地点の流路断面は現在、改修工事が完了し、その断面は拡張されたが、本資料を得た当時は改修前で、幅 2.1m 、深さ約 1.2m の長方形断面であった。また、かんがい期間中、水路内に水草、藻が繁殖し、疎通能力が低減しやすい排水路である。

図-1より、流水断面積 A と流量 Q との関係は両対数紙上で、 A の増加とともに、直線の変化より曲線の変化に移行している。したがって、(1)式の K_1 、 p あるいは K_2 、 z が水深に応じて変化し、常数とはなり得ないことを示す。あるいは、(1)式が近似的に成立するとしても、水深範囲を限定して、適用しなければならないことを意味している。すなわち、A地点での流路の場合、水路幅を B 、水深を H としたとき、 H/B の値が約 0.35 を境界にして、別の常数を用いた(1)式で近似しなければならないといえる。

つぎに、A地点よりの流出量と流域内の貯留量との関

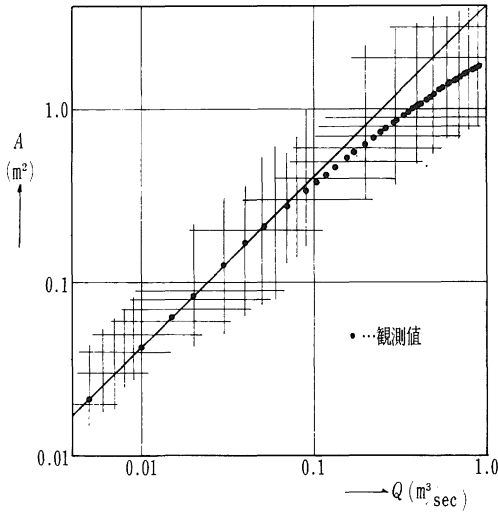


図-1 A ~ Q の関係

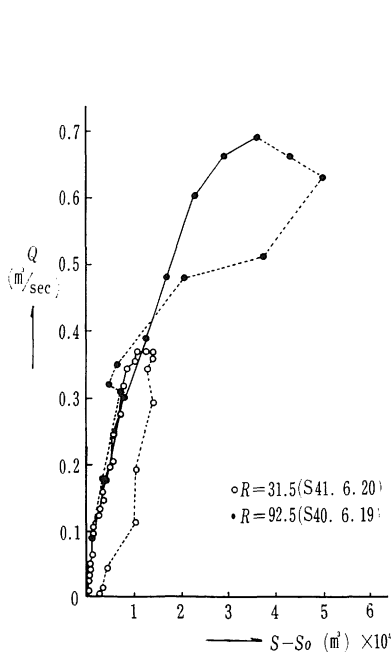


図-2 a) $Q \sim (S - S_0)$ の関係

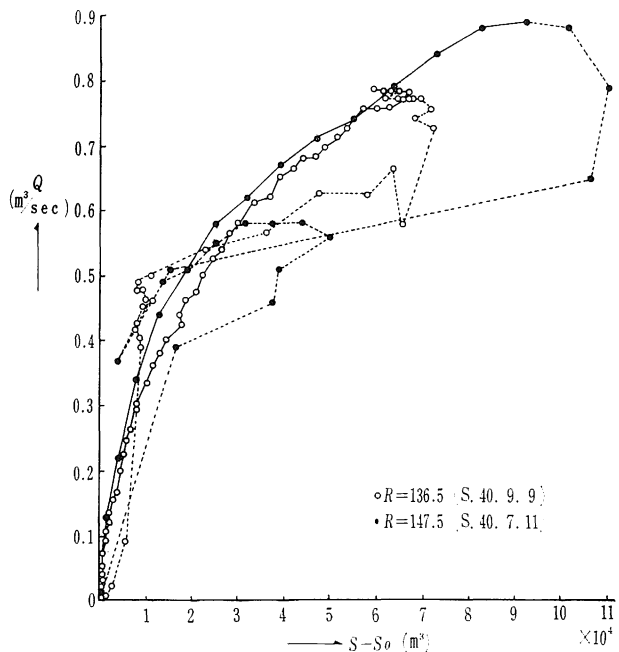


図-2 b) $Q \sim (S - S_0)$ の関係

係を次式で表わされる線形貯留方程式を用いて検討する。

$$\frac{dS}{dt} = I - Q \dots\dots\dots (3) \quad S = KQ \dots\dots\dots (4)$$

ここに、 S ：流域内の貯留量 (m^3)、 t ：時間 (sec)、 Q ：流出量 (m^3/sec)、 I ：流入量 ($= \alpha r_e A$)、 α ：係数 ($= 0.2778$)、 r_e ：有効雨量 (mm/hr)、 A ：流域面積 (km^2)、 K ：流域固有の時定数 (sec) である。

図-2は Q と $(S-S_0)$ との関係をもつて4例について調べた結果である。ここに、 S_0 は初期貯留量 (m^3) である。また Q は直接流出量で示してある。図中の点線部は流出量が増大する期間、実線部は流出量のてい減期間についての観測値である。実際の雨水の伝播過程は遅れと変形の現象を伴うため、流入量 I による貯留量 S の変化が瞬間的に流出量 Q の変化となつてあらわれない。したがつて、流入量 I により S が増大する期間、すなわちピーク流量発生時までは図-2 a)、b) の点線で示されるように、 Q と $(S-S_0)$ との関係は不明確である。ここに、適当な遅れ時間 t_{lag} を考慮して、検討しなければならないといえる。一方、降雨終了後、雨水のじょう乱が流域末端部に伝播したと思われるピーク流量発生以後の Q と $(S-S_0)$ の関係はいずれの出水に対しても、ほぼ同一の変化がみられる。すなわち Q と $(S-S_0)$ の値が約 10^4 (m^3) 以下の場合にはほぼ直線的

な関係にあり、 $(S-S_0)$ の値がそれ以上になると、ある曲線的な関係で表示されることが指摘できる。したがつて降雨規模の小さい昭和41年6月20日のような出水に対しては(4)式の関係が十分成立し、線形流出モデルによる雨水追跡の可能性を示すものといえ、また出水規模が大きくなるにつれ、 Q と $(S-S_0)$ の直線的な関係はくずれ、いわゆる非線形効果が卓越する流出特性を示すことになるといえる。図-3 a)、b) は流水断面積と貯留量との関係を図示したものである。 Q と $(S-S_0)$ との関係と同様に、両者は出水規模に応じたある一義的な関係にあるといえる。

3. 雨水流出のモデル化とその解析法

低平農地における雨水の伝播過程における遅れと変形の現象をある数式モデルで置換した場合、そのモデルの評価基準として、つぎのような方法が考えられる⁵⁾すなわち、雨水の短期間流出、つまりこの水流出を対象とした場合、流出モデルがピーク流量およびその生起時刻の計算値 Q_{pc} 、 t_{pc} と観測値または実際のピーク流量 Q_{p0} 、および生起時刻 t_{p0} の差の絶対値を最小にするような変換オペレータをもたねばならないという評価基準の設定である。

先に提示した線形流出モデル⁴⁾においては、(3)式の流入量 I を直接、有効雨量 r_e で与えず、雨水が平均伝

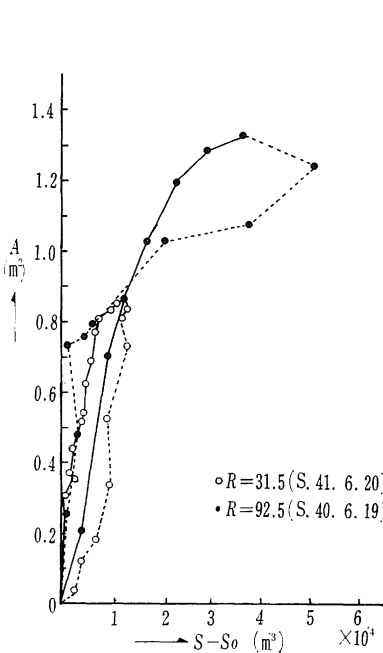


図-3 a) $A \sim (S-S_0)$ の関係

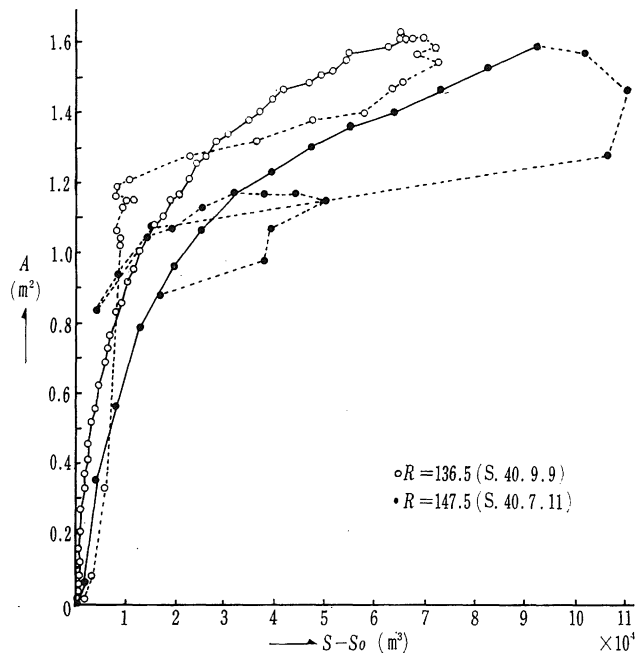


図-3 b) $A \sim (S-S_0)$ の関係

播速度 c で流下するものとして、伝播距離に相当する遅れの時間を考慮して評価し、ついでそのようにして得られた流入量が(3)、(4)式で表わされる1コの線形貯水池効果を受けるものとして流出量を算定した。その場合、(4)式に含まれる時定数 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、線形時間不変の仮定に限界があることが指摘された。したがって、そのような単位図法を適用するには、出水規模に応じ、適当な時定数 K を与えて計算される単位図を用いて、流出ハイドログラフを推定することになる。ここで、 K の値は水文観測資料からある程度推定されるが、流域内のどのような条件をもとに K の値を評価すべきかについて、その基準を表示しがたいという難点がある。

本研究では、この難点を修正するため、次式で表わされる連続、ならびに貯留方程式を用いた非線形の流出モデルを提示し、その解析法を検討する。

$$\frac{dS}{dt} = q - Q \quad \dots\dots(5)$$

$$Q = Q_c \left\{ 1 - \exp\left(-\frac{S - S_0}{S_0}\right) \right\} \dots\dots(6)$$

ここに、 S ：流域内の貯留量 (m^3)、 q ：流入量 (m^3/sec)、 Q ：流出量 (m^3/sec)、 $Q_c = Q_{max} - Q_0$ 、 Q_{max} ：最大通水能 (m^3/sec)、 Q_0 ：初期水位 H_0 (m) に対応する通水能 (m^3/sec)、 S_0 ：初期貯留量 (m^3)、 t ：時間 (sec) である。

まず、地形特性により、流域を適当な単位流域に分割する。単位流域の定量的な設定基準については検討を要するが、ここでは雨水の流出過程において、貯留はらん現象を生起しうる地点、たとえば各排水路支川等の合流点を目安に対象流域を分割し、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みなすことにする。

(5)式の連続方程式において、流入量 q は前述の線形モデル⁴⁾で用いた手法で与えられるものとする。すなわち、有効雨量 r_e に対して、雨水が平均伝播速度 c (m/sec) で流下するものとし、その遅れ時間 τ (l/c 、ただし、 l ：流下距離 (m)) を考慮して、単位流域下流端における流入量 $q(t)$ を求める。

たとえば、流域内に一樣な有効雨量 r_e (mm/hr) が単位時間 T_R (sec) 継続するものとする。 T_A を単位流域最遠点よりの雨水の到達時間としたとき、 $T_A < T_R$ の条件下での単位流域末端部における流入量 $q(t)$ は次式で与えられる。

$$0 \leq t \leq T_A \text{ のとき}$$

$$q(t) = \frac{q_0}{T_A} t \quad \dots\dots(7)$$

$T_A < t \leq T_R$ のとき

$$q(t) = q_0 \quad \dots\dots(8)$$

$T_R < t \leq T_B$ のとき

$$q(t) = -\frac{q_0}{T_A}(t - T_R) + q_0 \quad \dots\dots(9)$$

ここに、 $q_0 = r_e A / 3.6$ (m^3/sec)、 A ：単位流域の集水面積 (km^2)、 $T_B = T_A + T_R$ (sec) である。

また、図-4のような連続降雨に対する流入量ハイドログラフは $0AB\dots\dots G$ で与えられる。したがって、 $t_j < t < t_{j+1}$ における流入量 $q(t)$ は一般的に次式で与えられる。

$$q(t) = \frac{\Delta q_0}{T_A}(t - t_j) + q_{0(j)} \quad \dots\dots(11)$$

ここに、 $\Delta q_0 = q_{0(j+1)} - q_{0(j)}$ (m^3/sec)、 $q_{0(j)} = r_{e(j)} A / 3.6$ (m^3/sec)、 $r_{e(j)}$ ： j 番目の有効雨量 (mm/hr)、 t ：時間 (sec) である。

つぎに、流出量 $Q(t)$ を推定するにあたり、前述の試験流域で得られた流域内貯留量、流出量、ならびに流水断面積等の関係を考慮し、(4)式で与えられる線形貯留方程式の代りに、(6)式を導入する。(6)式は図-5に示すような排水路における出水時の直接流出量が、流域内貯留量 S の一価の指数関数で表わされ、かつ、i) 出水前の初期水位 H_0 に対応する流域内貯留量 S_0 、および ii) 初期水位 H_0 、最大水位 H_{max} に対応するそれぞれの通水能を Q_0 、 Q_{max} としたとき $Q_c = Q_{max} - Q_0$ で与えられる通水能 Q_c の2つのパラメーターによって、流出量が影響されるという非線形の貯留方程式

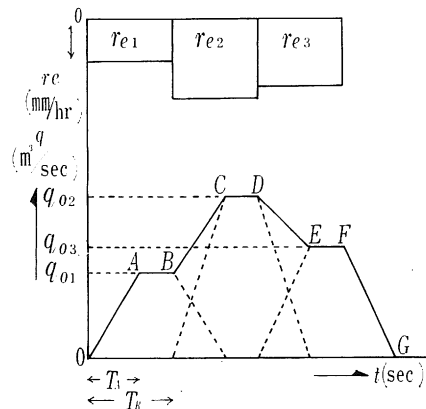


図-4 流入ハイドログラフ

である。図-6は(6)式において、 $Q_c = 0.9m^3/sec$ 、 $S_0 = 2.0, 2.5, 3.0 \times 10^4 m^3$ としたときの Q と $(S-S_0)$ の関係を図示したものである。なお、図中には、図-2 b) に示した観測値が併示してある。計算値と観測値を比較すると、排水路の初期条件に応じた Q_c 、ならびに S_0 を与えれば、(6)式によりかなりの精度で Q と $(S-S_0)$ の関係を近似しうるといえる。

また、(4)式の S を $(S-S_0)$ で置換した式と(6)式とからつぎの関係式を得る。

$$K = \frac{S-S_0}{Q_c \left\{ 1 - \exp\left(-\frac{S-S_0}{S_0}\right) \right\}} \quad \dots\dots(12)$$

種々の Q_c, S_0 に対する $K \sim (S-S_0)$ の関係を図-7に示す。図-7より、(4)式の代りに(6)式を用いた場合の特性がうかがえる。すなわち、 $(S-S_0)$ の変化に対し Q_c の大きい排水路ほど K の変化は緩慢になり、 Q_c の小さい排水路ほど急激に K が増大する。一方 Q_c を一定にしたとき S_0 の値が大きいほど K の変化が大きいが、 S の増加とともに S_0 の効果は次第に薄れる傾向にあり、また Q_c が小さいほど S_0 の差異が

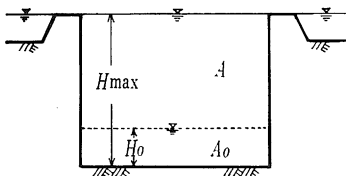


図-5 排水路断面

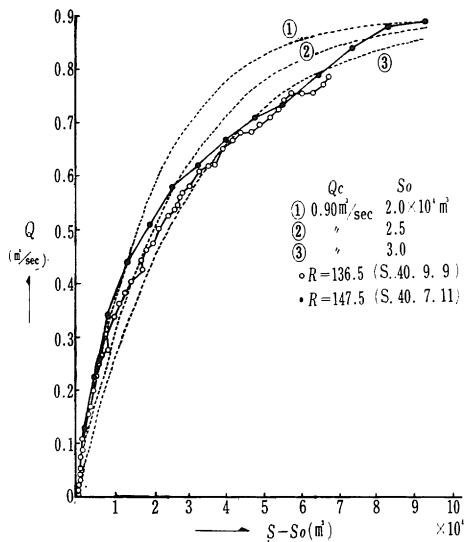


図-6 $Q \sim (S-S_0)$ の近似式の適合性

K に顕著な影響をもたらす等の特性が指摘できる。

このような特性をもつ(6)式、ならびに連続の方程式(5)式とから次式を得る。

$$\frac{dX}{dt} + \frac{q-Q_c}{S_0} X = -\frac{Q_c}{S_0} X^2 \quad \dots\dots(13)$$

ここに、 $X = \exp\{-(S-S_0)/S_0\}$ である。

(11)式で表わされる流入条件を与えることにより、(13)式の解が得られ、さらに(6)式を用い、流出量 $Q(t)$ が次式のように求められる。

i) $\Delta q_0 > 0, q_{0(j)} \geq 0$ のとき

$$Q(t) = Q_c \cdot \left[1 - \frac{(Q_c - Q_j) \exp\{-\alpha_1(t - \tau_1)^2\}}{\beta_1(Q_c - Q_j)\Phi(T_1) + Q_c \exp\{-\alpha_1(t_j - \tau_1)^2\}} \right] \quad \dots\dots(14)$$

ii) $\Delta q_0 = 0, q_{0(j)} > 0$ のとき

$$Q(t) = Q_c \cdot \left[1 - \frac{\beta_2}{1 - \left(1 - \frac{\beta_2 Q_c}{Q_c - Q_j}\right) \exp\{-\alpha_2(t - t_j)\}} \right] \quad \dots\dots(15)$$

iii) $\Delta q_0 < 0, q_{0(j)} > 0$ のとき

$$Q(t) = Q_c \cdot \left[1 - \frac{(Q_c - Q_j) \exp\{-\alpha_1(t - \tau_1)^2\}}{\beta_1(Q_c - Q_j)\Phi(T_2) + Q_c \exp\{-\alpha_1(t_j - \tau_1)^2\}} \right] \quad \dots\dots(16)$$

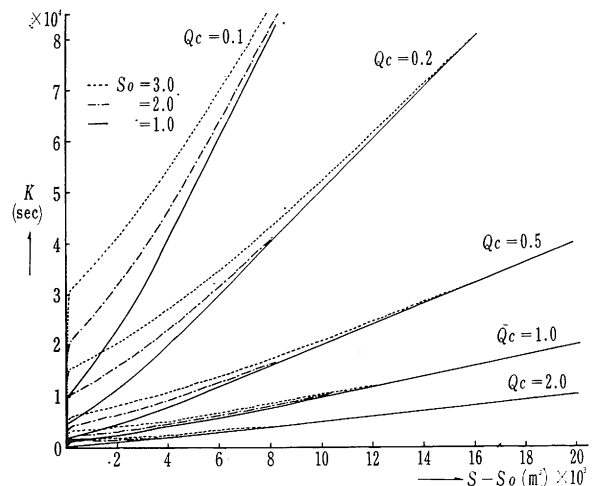


図-7 $K \sim (S-S_0)$ の関係

iv) $\Delta q_0 = 0, q_{0(j)} = 0$ のとき

$$Q(t) = Q_c \left[1 - \frac{1}{1 + \frac{Q_j}{Q_c - Q_j} \exp\{-\alpha_3(t-t_j)\}} \right] \quad \dots\dots(17)$$

ここに、 $\alpha_1 = \frac{\Delta q_0}{2T_A S_0}, \tau_1 = (Q_c - q_{0(j)}) \frac{T_A}{\Delta q_0} + t_j,$

$$\beta_1 = Q_c \left(\frac{2T_A}{|\Delta q_0| \cdot S_0} \right)^{\frac{1}{2}}, \phi(T_1) = \int_{T_j}^T \exp(-T^2) dT,$$

$$T = \sqrt{\alpha_1}(t - \tau_1), T_j = \sqrt{\alpha_1}(t_j - \tau_1),$$

$$\alpha_2 = \frac{Q_c - q_{0(j)}}{S_0}$$

$$\beta_2 = \frac{Q_c - q_{0(j)}}{Q_c}, \phi(T_2) = \int_{T_j}^T \exp(T^2) dT,$$

$$\alpha_3 = \frac{Q_c}{S_0}$$

$Q_j: t = t_j$ のときの流出量である。

なお、貯留量 $(S - S_0)$ については次式で与えられる。

i) $\Delta q_0 > 0, q_{0(j)} \geq 0$ のとき

$$S - S_0 = S_0$$

$$\cdot \ln \left\{ \frac{\beta_1(Q_c - Q_j) \phi(T_1) + Q_c \exp\{-\alpha_1(t_j - \tau_1)^2\}}{(Q_c - Q_j) \exp\{-\alpha_1(t - \tau_1)^2\}} \right\}$$

$\dots\dots(18)$

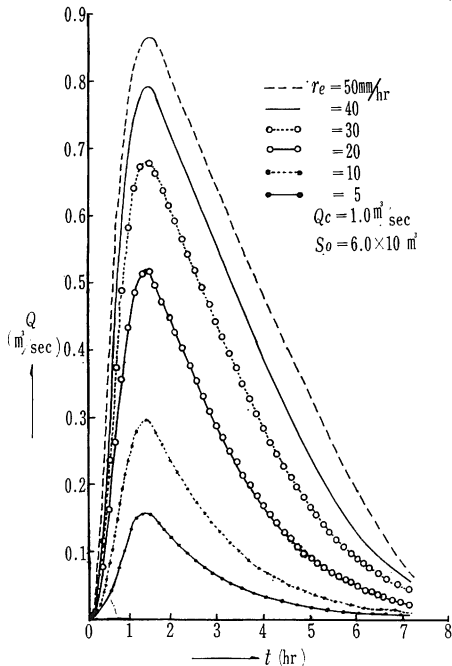


図-10 降雨強度による流出ハイドログラフの変化

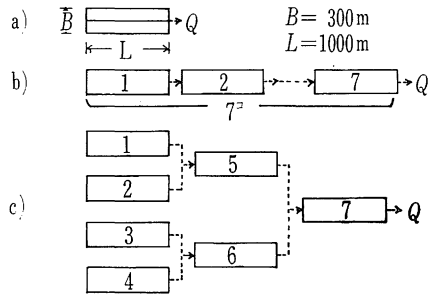


図-8 モデル流域

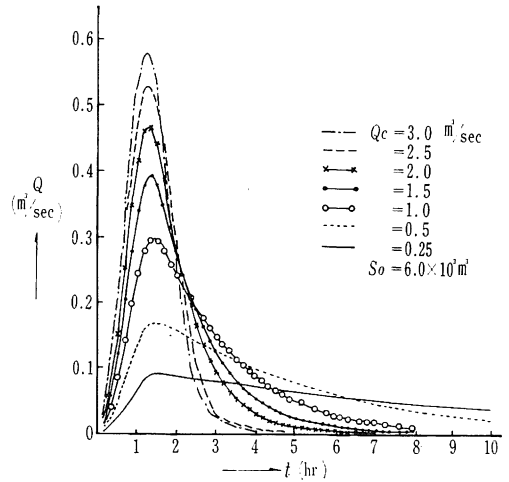


図-9 通水能による流出ハイドログラフの変化

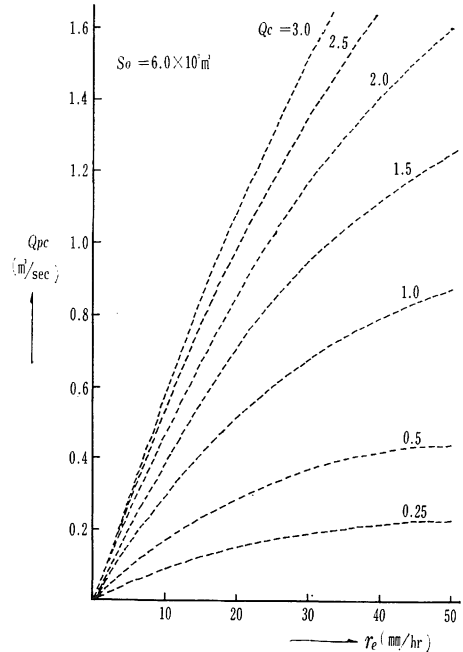


図-11 $r_e \sim Q_{pc}$ の関係

ii) $\Delta q_0 = 0, q_{0(j)} > 0$ のとき

$$S - S_0 = S_0 \ln \left[\frac{1}{\beta_2} - \frac{1}{\beta_2} \left(1 - \frac{\beta_2 Q_c}{Q_c - Q_j} \right) \cdot \exp \{ -\alpha_2 (t - t_j) \} \right] \dots \dots (19)$$

iii) $\Delta q_0 < 0, q_{0(j)} > 0$ のとき

$$S - S_0 = S_0 \cdot \ln \left\{ \frac{\beta_1 (Q_c - Q_j) \Phi(T_2) + Q_c \exp \{ -\alpha_1 (t_j - \tau_1)^2 \}}{(Q_c - Q_j) \exp \{ -\alpha_1 (t - \tau_1)^2 \}} \right\} \dots \dots (20)$$

iv) $\Delta q_0 = 0, q_{0(j)} = 0$ のとき

$$S - S_0 = S_0 \ln \left[1 + \frac{Q_j}{Q_c - Q_j} \exp \{ -\alpha_3 (t - t_j) \} \right] \dots \dots (21)$$

本流出モデルによる流出解析は以上のように、まず流域を単位流域に分割し、それぞれの単位流域について2つのパラメーター Q_c, S_0 の値を定める。つぎに雨水流の平均伝播速度 c を仮定し、有効雨量 $r_{e(1)}, r_{e(2)} \dots r_{e(n)}$ に対して遅れ時間を考慮した流入量 $q(t)$ 、および $\Delta q_0(t)$ を計算する。そして、これらの数値条件ならびに(14)~(17)式を用い、単位流域の構成に応じ上流から逐次、雨水流の流入流出過程が追跡できる。

なお、(14)、(18)式に含まれる $\Phi(T_1)$ 、および(16)、(20)式に含まれる $\Phi(T_2)$ の値は Simpson 式を用い

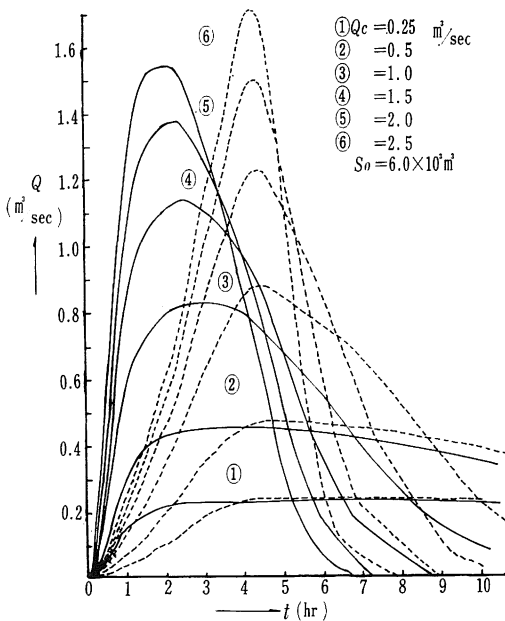


図-12 流出ハイドログラフにおよぼす降雨分布の影響

た数値積分法により容易に所要の精度で得ることができるといえる。

4. 本流出モデルによる流出解析

前述の雨水流出モデルについて、その出水特性と適用結果について検討する。

4.1 本流出モデルによる雨水流出の数値計算例

図-8に示すような3種のモデル流域について、本流出解析法を適用し、その数値計算によって得られる出水特性を検討する。まず、図-8a)に示すような幅300m、長さ1000mの区画からの出水特性について述べる。

図-9は排水路通水能による流出ハイドログラフの変化を $r_e = 10 \text{ mm/hr}$ 、 $T_R = 3600 \text{ sec}$ 、 $S_0 = 6.0 \times 10^3 \text{ m}^3$ の場合について示したものである。ピーク流量の生起時刻 t_{pc} については、わずかな差異しか認められないが、ピーク流量 Q_{pc} ならびに流出ハイドログラフの形状は、通水能により顕著な変化がみられる。図-10は降雨強度による流出ハイドログラフの変化を $Q_c = 1.0 \text{ m}^3/\text{sec}$ 、 $S_0 = 6.0 \times 10^3 \text{ m}^3$ の場合について示したものである。図-9の場合と同様、ピーク流量の生起時刻 t_{pc} については顕著な変動はみられない。また、降雨強度 r_e とピーク流量 Q_{pc} との関係は図-11より、その特性が指摘できる。すなわち、 r_e の値が増加するにつれ、 Q_{pc} はある曲線的な増加を示し、かつ Q_c の大きさによりその変化率が著しく異なる。また、 Q_{pc} におよぼす S_0 の影響については図-7で指摘したように、 Q_c の値が小さいほど、その影響度、ならびに影響時間が増大する傾向にある。

図-12は、降雨分布が流出ハイドログラフにおよぼす影響についての一例を示したものである。同図の実線で示した流出ハイドログラフは $r_e = 30, 20, 10, 5 \text{ mm/hr}$ 、

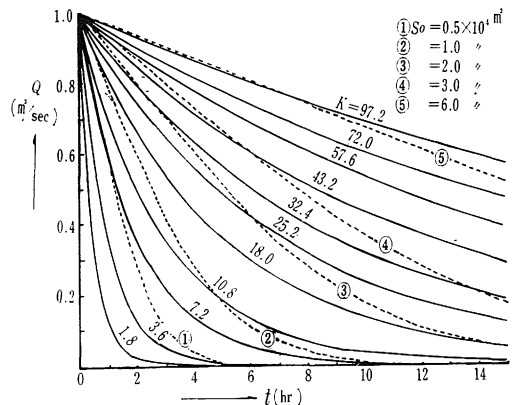


図-13 流出ハイドログラフのてい減特性

点線で示したものは $r_e = 5, 10, 20, 30 \text{ mm/hr}$ の連続降雨に対する計算値で、それぞれ $Q_c = 0.25, 0.5, 1.0, 1.5, 2.0, 2.5 \text{ m}^3/\text{sec}$ の場合についての結果を示す。なお、この計算値は $S_0 = 6.0 \times 10^3 \text{ m}^3$, $T_R = 3600 \text{ sec}$ としたものである。同図より図-9~11でみられた流出ハイドログラフの非線形性とくに、 Q_{pc} , t_{pc} の非線形特性が一層、明確に反映されていることが指摘できる。

図-13は(17)式で与えられる流出ハイドログラフのてい減曲線、ならびに(3), (4)式から求められる線形流出モデルにおける流量てい減曲線

$$Q = Q_j \exp(-t/K) \quad \dots\dots(22)$$

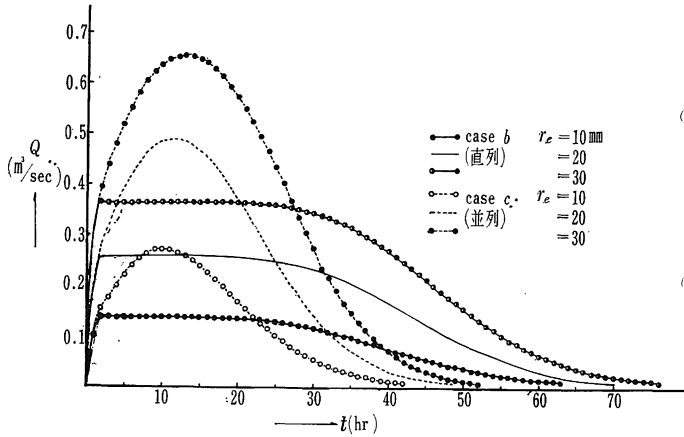


図-14 単位流域の構成による流出ハイドログラフの変化

との比較を $Q_c = 1.5 \text{ m}^3/\text{sec}$, $Q_j = 1.0 \text{ m}^3/\text{sec}$ の場合について示したものである。同図において点線で示す曲線は(17)式、実線で示すものは(22)式から得られる計算値である。図-13において、初期のてい減特性がほぼ同様な傾向を示すような(17), (22)式のパラメーター S_0 , K を与えて計算されるてい減曲線を比較すると、(17)式による計算値が、より急速なてい減曲線を描くことが指摘できる。これは図-7に示す関係から指摘されたように、(17)式で示されるてい減曲線は、貯留量 S の減少とともに、(22)式の K の値を漸次減少させる効果をもつことによる特性を示すものである。

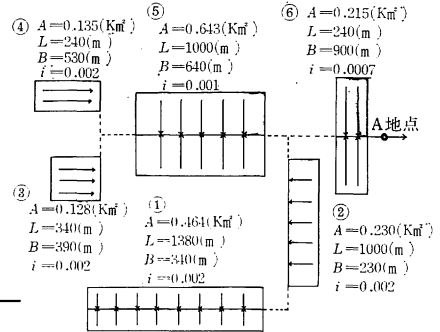


図-15 流域モデル

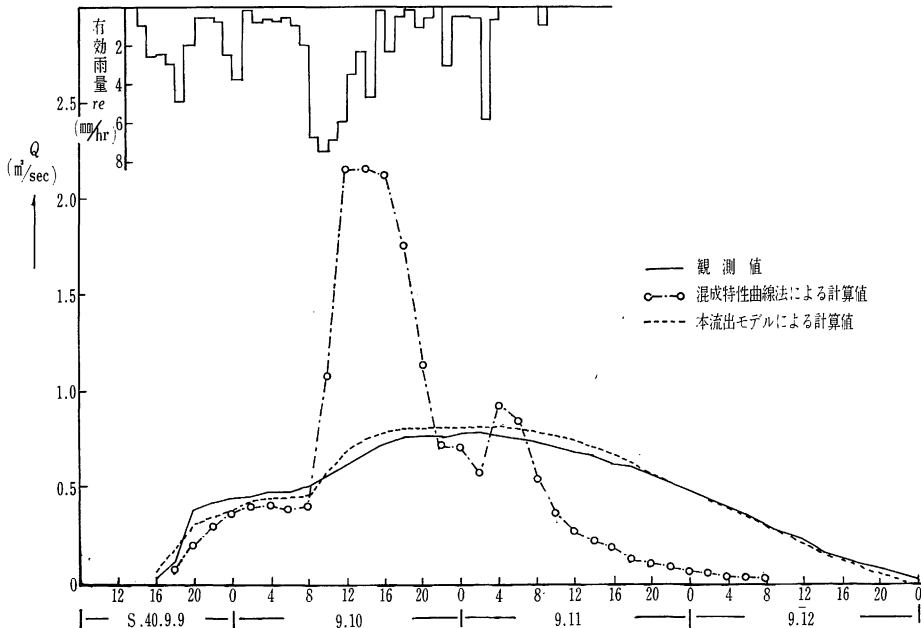


図-16 流出ハイドログラフ

つぎに、単位流域の構成状態の差異による流出ハイドログラフの変化についての1例を図-14に示す。同図で実線で示す曲線は図-8 b) に示すように7コの単位流域が直列に連なったモデル流域、また点線で示す曲線は、図-8 c) に示すモデル流域におけるそれぞれ流域末端部の流出ハイドログラフを示す。なお、両モデル流域とも各単位流域の大きさは図-8 a) に示すものと同一である。また、いずれの単位流域も $Q_c = 1.0 m^3/sec$, $S_0 = 1.8 \times 10^4 m^3$, $T_R = 3600 sec$ とした場合の計算値である。計算例は S_0 の値が比較的大きいため、いずれもピーク流出部は偏平化し、ゆるやかなてい減曲線を示しているが、単位流域の構成状態による流出ハイドログラフへの影響が明確に認められ、かつ re の大きいほど Q_{pc} , t_{pc} に顕著な差異が認められる。

4.2 網場川流域への適用例

本流出モデルにより、前述のような出水特性が評価できることを考慮し、以下本流出解析法を網場川流域に適用した結果を示す。

排水路網の特性により、本流域を図-15のような6コの単位流域に分割した。

図-16は昭和40年9月9～11日の総雨量 $136.5 mm$ に対する出水時における流出ハイドログラフの観測値と計算値の比較を示したものである。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。

本流出解析法を適用するにあたり、2つのパラメーター Q_c , S_0 の評価がポイントになるが、個々の単位流域における代表的な排水路断面の選定、ならびに出水前の初水位の適確な推定によりそれらの値が与えられるものとする。

図-16に示す計算値は図-15に示す単位流域に対し、それぞれ $Q_c = 0.4, 0.9, 0.1, 0.1, 0.8, 1.0 m^3/sec$, $S_0 = 23.46, 11.50, 6.36, 6.63, 32.00, 10.80 \times 10^3 m^3$ とした場合のものである。

さて、観測値と計算値とを比較すると、出水期間の全域にわたり、両者はかなりの精度で一致しているといえる。たとえば、ピーク流出量についてみると、観測値 $Q_{p0} = 0.787 m^3/sec$ に対し、計算値 $Q_{pc} = 0.810 m^3/sec$ である。パラメーター Q_c , S_0 の値を修正することにより、観測値により近似した計算値を得ることが可能であるが、直接流出量、ならびに有効雨量の推定誤差等の影響を考慮すると、前記のパラメーターの値を用いた計算結果はピーク流量、その生起時刻、ならびにてい減特性は観測値とかなりよい適合性を示しているといえ

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-16に併示してある。出水初期においては、かなりの適合性がみられるが、累加雨量の増大につれピーク流量、ならびにその生起時刻とも観測値と著しい差異が認められ、前述のように降雨量が大きく、田面、排水路等の貯留はらん効果が卓越する出水に対しては、混成特性曲線法の適用は問題点を含むことになるといえる。

5. 結 び

本研究ではまず、水田を主体とする低平農地における雨水流跡の一方法として、通水能 Q_c ならびに流域の初期貯留量 S_0 の2つのパラメーターを有する雨水流出のパラメトリックモデル、およびその解析法を提示した。ついで、本流出解析法を適用した場合、上記2つのパラメーター Q_c , S_0 に加え、降雨強度、降雨分布ならびに排水路網の構成状態が流出ハイドログラフにどのような影響をおよぼすかを若干の数値計算について示した。また、ここに提示したパラメトリックモデルの諸特性を考慮し、実流域に本法を適用した1例を示した。その結果、パラメーター Q_c , S_0 の適切な値を用いることにより、任田の提示した混成特性曲線法では追跡し難いような出水規模に対しても、本流出解析法の有用性を示すことができた。実流域における本法の適応性については、流域下流端における機械排水等の下流端条件が、雨水流出過程に複雑に影響する場合も含めて、なお一層の検討を要するが、先に提示した線形流出モデルにおける時定数 K の評価法の難点は、非線形効果を加味した本流出解析法により修正しうることが示されたものと思われる。

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甚の謝意を表するとともに、計算・図面作成に御協力頂いた本学の堀江昭彦事務官、大北和子事務官、ならびに本学院生の龍田哲安君に厚く感謝する次第である。

なお、本研究では島根大学計算機センターのFACOM 270-20 を使用したことを付記しておく。

参 考 文 献

1. 任田新治：木曾三川下流地域の排水計画に関する研究，1961
2. 鈴木正勝・西畑勇夫：土木学会論文報告集 **163**：29～37，1969
3. 豊国永次・角屋睦：京大防災研年報 **9**：631～636，1966

4. 福島県・田中礼次郎：島大農研報 4：140～145，
1970
5. 山内二郎・森口繁一・一松信：電子計算機のための
数値計算法 I 培風館 東京 1965，76～77

Summary

In studying the mechanism of runoff processes in low-lying agricultural lands, it is an important problem to express mathematically the phenomenon of hydrologic transformation and time lag from rainfall to discharge induced to the effect of storage and inundation.

This paper described such a runoff phenomenon being apt to occur the remarkable flooding. The outline of the study was as follows:

(1) The parametric model of rain-water flow in such an agricultural area was proposed and the method of runoff analysis was discussed about the mathematical model having two parameters which expressed the conveyance of drainage channel and the initial water storage in the basin.

(2) After the characteristics of the runoff were described in the model basin applying the method, the adaptability of the runoff model was examined on the observed runoff data and its usefulness was made clear.