

京都大学防災研究所 正会員 ○早瀬吉雄

同 上 正会員 角屋 睦

同 上 正会員 岡 太郎

まえがき

従来内水地といわれて来た水田主体流域においても近年都市化が急速に進展する傾向にあり、これに伴いはんらん湛水問題とその排除計画のありかたが大きな問題になってきている。これまで低平地の流出解析法として単位図法¹⁾、タンクモデル²⁾、kinematic wave 法³⁾が用いられてきているが、前2者は下流端流出量のハイドログラフを巨視的にとらえるだけで流出の内部現象を把握できないし、後者は低平地排水路の流れに及ぼす下流条件の影響を無視しているなど、いずれも都市化現象に伴う洪水流出形態の変化予測を論ずるには十分な方法とはいえない。ここでは、ポンプ排水が主体となる低平地を対象として内部現象を比較的説明しうる貯水池—dynamic wave法を採用し、雨水が水田から末端排水路—支線排水路—幹線排水路へと流下する場合、このモデルが実用上どのように単純化できるかを、数値計算によりサブシステムごとに逐次吟味を進め、全流域の雨水流出モデルの考え方について考察する。

1. 不定流計算について

開水路における不定流の式は、流量を Q 、水位を H 、断面積を A 、経深を R 、Manningの粗度係数を n 、時間を t 、距離を x とすると次式で表わされる。

$$\frac{\partial Q}{\partial t} + gA \frac{\partial H}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{Q^2}{A} \right) = -g \frac{n^2 |Q| |Q|}{AR^{4/3}} \quad (1) \quad \frac{\partial A}{\partial t} + \frac{\partial Q}{\partial x} = 0 \quad (2)$$

差分形式は、流量の連続性を精度よく近似するため連続式はLeap

Frog型とし、計算を安定に進めるため運動式はFriedrich型とした。

分合流計算では、図1に示すような計算格子をもちい、 Δt 時間後の水位 H' は(2)式より $i-1$ 、 $i+2$ 、 $j+1$ の所の $\Delta t/2$ 時間後の流量をそれぞれ $\bar{Q}_1$ 、 $\bar{Q}_2$ 、 $\bar{Q}_3$ とし水面巾を B_1 、 B_2 、 B_3 とすると次式で表わされる。

$$H' = H - \Delta t \left(\bar{Q}_2 + \bar{Q}_3 - \bar{Q}_1 \right) / \left(\Delta x_1 B_1 + \Delta x_2 B_2 + \Delta x_3 B_3 \right)$$

また Δt 時間後の流量 Q'_1 、 Q'_2 、 Q'_3 は、運動式が本川の2-1方向に、本川—支川の3-1方向にそれぞれ成り立ち、 $Q'_1 = Q'_2 + Q'_3$ より求めることができる。たとえば、2-1方向の運動式は、(1)式の第3項の $\frac{\partial}{\partial x} (Q^2/A)$ を $-\frac{2Q}{A} \frac{\partial A}{\partial t} - \frac{Q^2}{A^2} \frac{\partial A}{\partial x}$ として次式で近似的に表わされる。

$$\left[1 + \frac{gn^2 |Q_1| \Delta t}{A_1 R_1^{4/3}} \right] Q'_1 + \left[1 + \frac{gn^2 |Q_2| \Delta t}{A_2 R_2^{4/3}} \right] Q'_2 = Q_1 + Q_2 + 2 \left[\frac{Q_1}{A_1} (A'_1 - A_1) + \frac{Q_2}{A_2} (A'_2 - A_2) \right] + g(A_1 + A_2) (\bar{H}_k - \bar{H}_i) \frac{\Delta t}{\Delta x} + \left(\frac{Q_1}{A_1} \right)^2 + \left(\frac{Q_2}{A_2} \right)^2 (\bar{A}_2 - \bar{A}_1) \frac{\Delta t}{\Delta x}$$

2. 水田からの流出計算について

水田を1個の貯水池とし、欠口をむきとして末端排水路に開口していると考える。図2に示すように水田内の水位 h_1 は、降雨量を r_e 、水田面積を A_s 、欠口巾を B_s 、越流係数を C とすると、

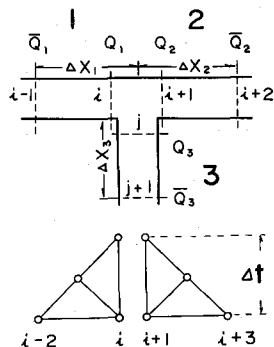


図1 分合流の計算格子

完全越流のとき

$$dh_1/dt = r_e - C' \cdot h_1^{3/2}, \quad C' = C \cdot B_s \sqrt{2g} / A_s.$$

もぐり越流のとき

$$dh_1/dt = r_e - C'' \cdot h_2 \sqrt{(h_1 - h_2)}, \quad C'' = 2.6 \cdot C'.$$

で表わされる。セキからの流出入は、point source の形で排水路に合流すると考える。もぐり越流の場合の流入点の水位 H_i は $4t/2$ だけ進んだ所の水位 H_{i+2} , H_{i-1} より $(H_{i+2} + H_{i-1}) / 2$ の値で表わされるものとし水田内の水位の計算式は非線型であるが、 $4t$ 時間の水位の変化量は微小であるので線型化しても誤差はほとんどない。

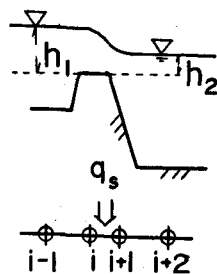


図2 セキの越流

3. 水田-末端排水路系における流出現象とモデル化

図3のように末端排水路に水田が10筆並んでいるモデルを考える。水路は矩形、勾配1/1000、粗度係数0.03、初期水位は下流端敷高0.6m、水田は50×50m、欠口巾30cm、敷高10cm、越流係数0.35とする。降雨は30mm/hrを2時間降らせ、降雨開始後、下流端で3mm/hの排水があるとする。排水路の通水能力は等流状態で流れうる最大流量を下流端支配面積で除してmm/hrの形で評価するものとする。

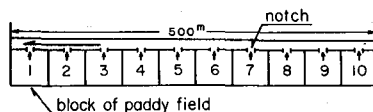


図3 末端排水路系のモデル

1) 水田の地形勾配による影響 排水路の通水能力が20

mm/h 地形勾配が0及び1/5000の場合の水田からの流出量を図4, 5に示す。前者では、上流側水田ほど早くもぐり越流に移行するのに対し、後者は逆で上流側水田は完全越流状態で下流側水田では逆流現象がおきている。一般に地形勾配が大きい程、下流側水田での流入量が多く、上下流の水田の湛水位の差を小さくするような流れ方をするといえる。

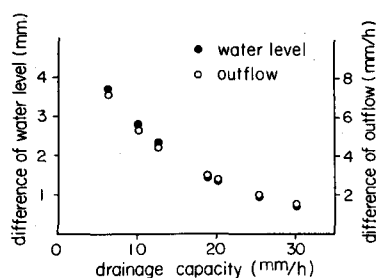


図6 通水能と流出現象の関係

2) 排水路通水能との関係

最下流端水田と最上流端水田の最大流出量及び最大湛水位の差を通水能との関係で図6, 7に示す。水田の地形勾配が0の場合(図6)通水能の増大に伴い流出量差及び水位差は小さくなるのに対

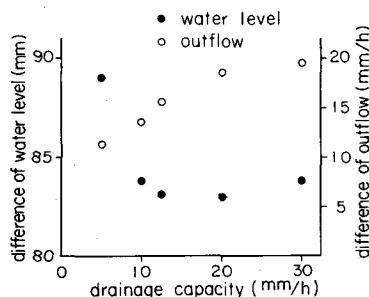


図7 通水能と流出現象の関係

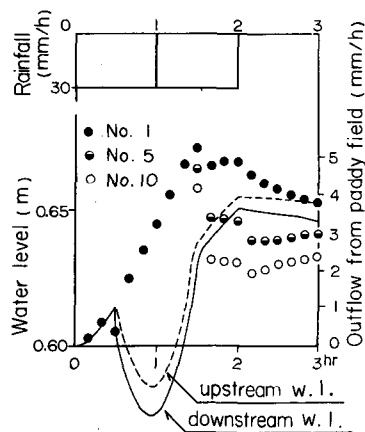


図4 水田からの流出量(水平)

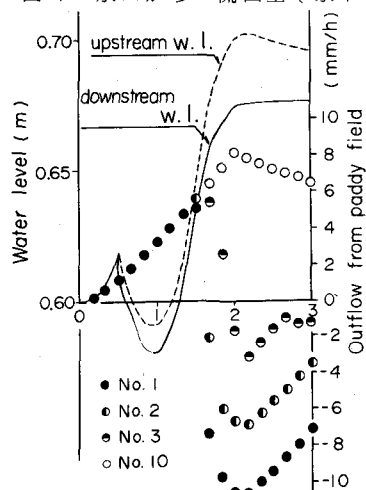


図5 水田からの流出量(1/5000)

し、地形勾配が1/5000の場合(図7)では流出量差は大きくなるが水位差は小さくなっている。

3) 水田-末端排水路系のモデル化 水田がらの越流計算を簡単にするため、水田10筆を2筆、1筆にまとめた場合の計算を行なった。図8に地形勾配1/5000、水路能力20mm/hの場合の下流端水位を示す。上下流水田の流出形態に差があるため1筆にまとめると(丸印)10筆の解の実線に比べて、1.4cmの差があり、全般的に水位の再現性が悪く、地形勾配が急になるほど誤差が大きい。2筆にまとめた場合(点線)地形勾配が1/1000以上では2mm程度の誤差があるが、1/2500以下では、ほとんど差がない。したがって、実用上2筆化モデルで十分とみてよい。

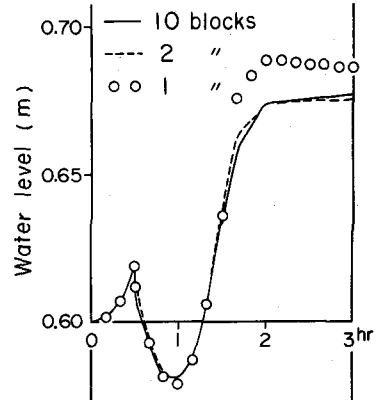


図8 末端排水路の下流端水位

なお、この場合、欠口巾は原水田の5倍にすることはいうまでもなく、また水田の湛水深、流出量はまとめられた水田のそれらの平均値を示している。

4. 支線排水路系における流出現象とモデル化

図9に示すように支線排水路に末端排水路が5本合流し、各末端排水路の両側に単純化された水田2筆が流入しているモデルを原型に採用する。支線排水路勾配を1/3000とし、初期水位を下流端敷高0.9mとするほかは降雨条件、排水条件等は前項と同じである。

1) 水田の地形勾配、排水路能力による影響 排水路の通水能力20mm/h、地形勾配が0及び末端、支線水路沿にともに1/5000の場合の各末端排水路から支線排水路への流入量を図10、11に示す。地形勾配が0の場合は、水田からの流出がもぐりに移行し始めると、末端排水路からの流出量は上流ほど少ないが、地形勾配が存在する場合は逆になり、雨量の増加に伴い、末端排水路に逆流するようになる。むしろ水田も逆流すなわちはらん貯留現象が生じる。なおこの場合においても水路能力の影響を検討したが、その傾向は前項の場合と同様、排水路能力が大きくなる程水面勾配がフラット化する効果があることがわかった。

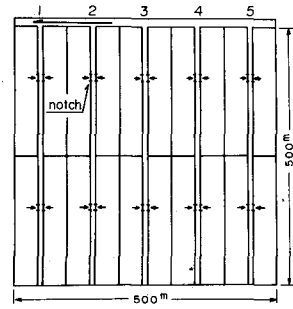


図9 支線排水路系のモデル

2) 支線排水路系のモデル化 低平地域に数多く存在する末端排水路には数筆~数十筆の水田が付帯しているのが実情であるが、これらを前述のような単純化モデルで扱った。しかし支線排水路の計算段階でさらに次のようにモデル化できないかを検討してみた。i) 末端排

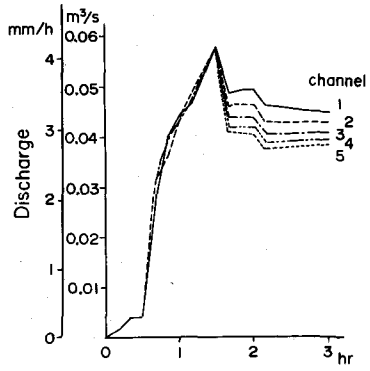


図10 末端水路の流出量(水平)

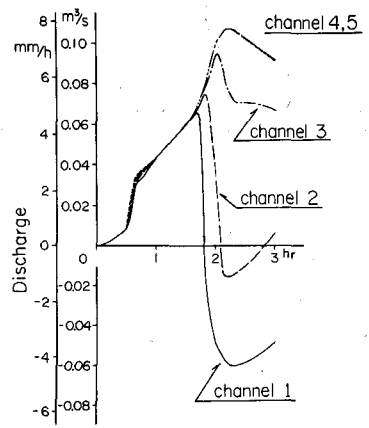
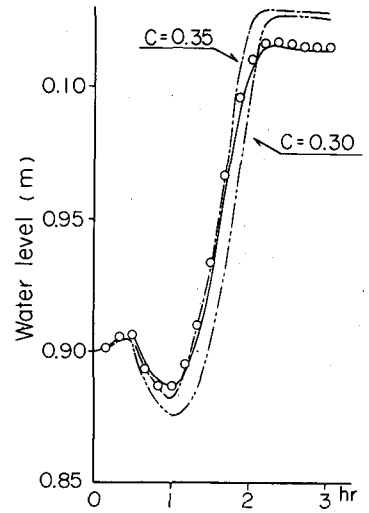
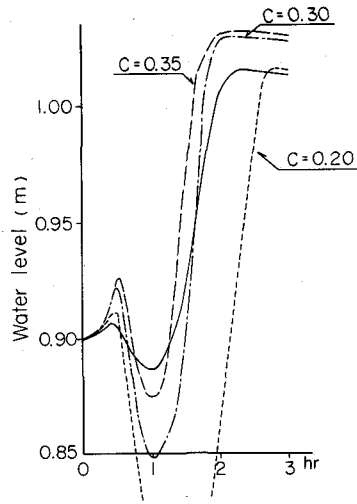


図11 末端水路の流出量(1/5000)

水路の支配域を1筆の水田におき換え、かつ支線排水路に開口した場合、このモデルは図12に示すように支線排水路の下流端水位で表わすと原型の解(実線)と比較して越流係数を0.35~0.20に変えても1.3~1.6cmの差があり合せることができない。ii) 末端排水路の流れ方向の水田を一筆にまとめるが、末端排水路を貯水池として連続式だけで解く場合、図13



に示すように下流端水位が最高 図12 支線水路の下流端水位時に1.4cmも差があり、越流係数を0.30に変えても合せることができない。iii) 水田を2筆にまとめ末端排水路のみを貯水池として連続式を解く場合、図13の白丸で示すように全般的によい結果を与えている。このことよりモデルiii)を支線排水路系のモデルとして採用する。

図13 支線水路の下流端水位

次に、支線排水路に末端排水路が数多く合流する場合、末端排水路の数をまとめて少なくする方が計算上有利であるのでこの点について検討した。図14に示すように末端排水路10本が、支線排水路に合流したモデルを原型として採用する。この場合、上述の結果より末端排水路の流れは連続式で解く。i) 末端排水路を5本にまとめた場合、このモデルでまとめた末端排水路の水面積を省略すると支線排水路の下流端の水位で検討すると原型と大きな差がある。それゆえまとめた末端排水路の水路巾を原型の水路巾の2倍にして計算すると図15の点線に示すようによく一致している。ii) 末端排水路を2本にまとめた場合、iii) 末端排水路を1本にまとめた場合、モデルii), iii)の結果をそれぞれ白丸、黒丸で示してあるが、10本の末端排水路を3mm程度の誤差を許容するならば、2本までにまとめることができる。この場合、末端排水路の水路巾を広げてもとのモデルの水面積を確保する必要がある。

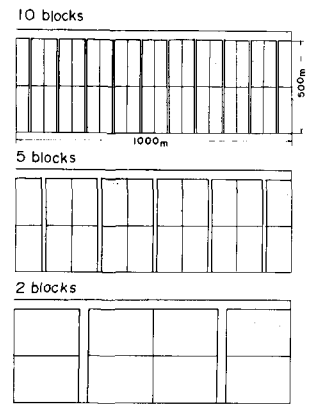


図14 末端排水路の省略

5. 幹線排水路系の流出現象とモデル化

1) 流出現象 図16に示すように幹線排水路-支線排水路-末端排水路-水田系のモデルについて検討する。ここでは前項で検討した結果を原型として採用している。つまり末端排水路を貯水池として連続式より解き、2本の末端排水路を水路巾を2倍にして

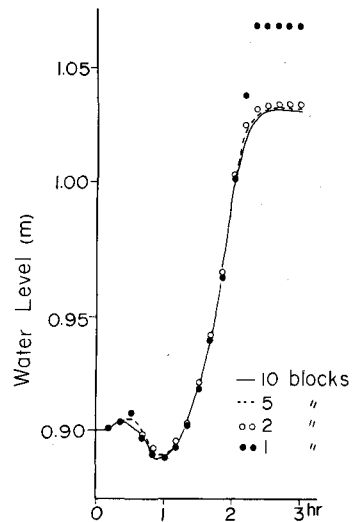


図15 支線水路の下流端水位

1本にまとめている。水田の地形勾配は、幹線、支線排水路に沿ってともに1/5000、通水能を20 mm/h、50 m×50 mの水田10筆を総括化水田1区画としている。60 mm/hの降雨を2時間降らせ、降雨開始30分後より3 mm/hの排水をする。2時間10分後の水田からの流出量を図17に示し、 $\uparrow$ の符号は逆流していることを示している。3本の支線排水路からの流出量を図18に示す。支線排水路1では、1時間10分以降、逆流現象がおきている。また支線排水路1、3の下流端の水位を図19の実線で示す。

2) 幹線排水路系のモデル化 広大な低平地の流出現象をシュミレートしようとする場合、上述の計算モデルがさらに単純化できるか否かを検討する。ここでは、一本の末端排水路の支配する水田を一区画の水田におき換え、これが支線排水路に開口しているモデルを考え、末端排水路の水面積を無視する。このモデルの計算結果を支線排水路1、3の下流端水位と比較したのが図19である。越流係数を0.35のときは、原型モデルの解（実線）に比べて、1 cm程度の誤差があるが、越流係数を0.30とすると図19の白丸で示すようにかなり改善できることがわかる。またこの場合、図16のブロック $b_1 \sim b_4$ をA、 $b_{87} \sim b_{90}$ をBとしてまとめた水田からの流出量をそれぞれ黒丸、白丸で図20に示し、原型モデルの $b_1 \sim b_4$ および $b_{87} \sim b_{90}$ の各水田の末端排水路の流量をそれぞれ実線、点線で示し比較してある。ここで、越流係数を0.35より0.30として合うのは、単純化モデルでは、末端排水路の水面積を無視しているためと思われるが、これをどのように推定すべきかに問題が残る。

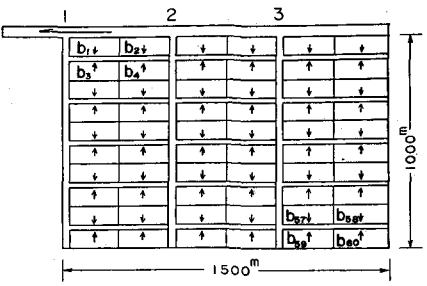


図16 幹線排水路系のモデル

2 HR 10 MIN.

-71.5	-50.6	-36.1	-10.9	18.7	20.4
-46.9	-25.2	-20.6	18.0	19.6	20.4
-25.0	-4.7	2.7	20.4	20.4	20.4
-4.5	20.2	20.0	20.4	20.4	20.4
20.1	20.4	20.4	20.4	20.4	20.4

UNIT: mm/hr

図17 幹線排水路系の流出現象

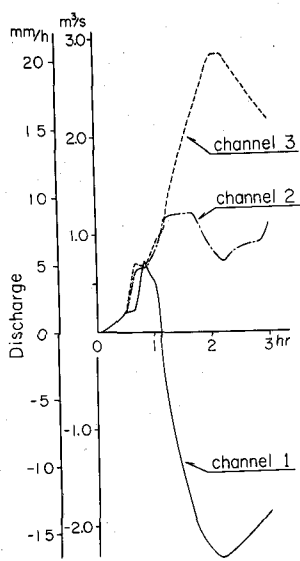


図18 支線排水路の流出量

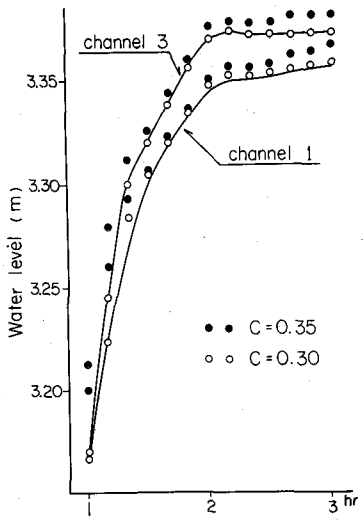


図19 支線水路の下流端水位

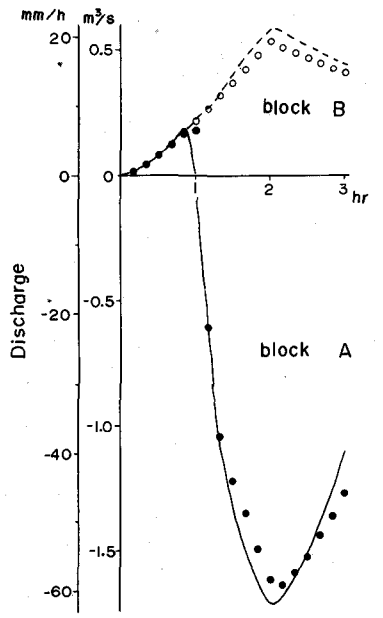


図20 最上下流部水田の流出量

そこで、水路の流れは非定常性の弱い流れであることを考慮して原型モデルの末端排水路の貯留効果を水面積でカバーすることを考える。すなわち末端排水路の水面積分を支線排水路に含めた場合について検討してみると、図21の結果が得られた。このような手法をとると越流係数を元の値の0.35としてもかなりの精度が得られることを同図が示している。

以上の検討の結果、いづれにしても幹線排水路－支線排水路－末端排水路－水田系は、幹線排水路－支線排水路－水田に単純化してよいことがわかる。

6. 補遺－自然排水方式をとる低平地の流出モデル

上述の検討は、ポンプ排水が主体となっている低平地を対象として進めたものであるが、中小河川に直接開口して自然排水形態をとっているような低平地では、外水位変化の影響を大きく受け流出現象も複雑になると考えられる。この問題については目下検討中であるので、その詳細は次回に譲るが、中間成果を一部述べると次のようになる。概してはんらん現象が徐々に進行する場合は前述の場合とほとんど大差はないが、外水位変化が急激すなわち非定常効果が大きくなると、極端な単純化は困難なようである。いま図16のモデルについて、幹線、支線、末端排水路ともに不定流計算を行なったものを厳密解、末端排水路を貯水池として扱ったものを単純化モデルとして検討した結果の一例を図22に示す。同図は幹線水路のNo2地点の流量ハイドログラフを示すが、この点では厳密解（実線）と単純化モデル（黒丸）の間に大差はみられず、したがってこれより上流ではかなりの単純化ができるとみてよいが、これより下流側では水位変化の非定常効果が大きいいためかなり問題が残ることがわかった。

あとがき

本研究では、低平地水田地帯の流出モデルを水理学的観点より検討を進め、ポンプ排水が主体となる低平地では、水路－1階級下級水路－水田系、すなわち2次の河道網系としてモデル化できることを示した。これによりポンプ排水地域の内水解析の単純化に有用な手掛りが得られたと考えている。しかし一方自然排水地域を対象とすると、なお多くの検討すべき問題が残されているので、これについては今後さらに検討を進めるつもりである。

参考文献

- 1) 農林省農地局：流出機構調査報告書 昭39. 3
- 2) 鈴木正勝、西畑勇夫：低平地における内水流出解析に関する一研究 土木学会論文集 Ⅵ163 1969
- 3) 任田新治：木曾三川下流地域の排水計画に関する研究 昭和36. 8

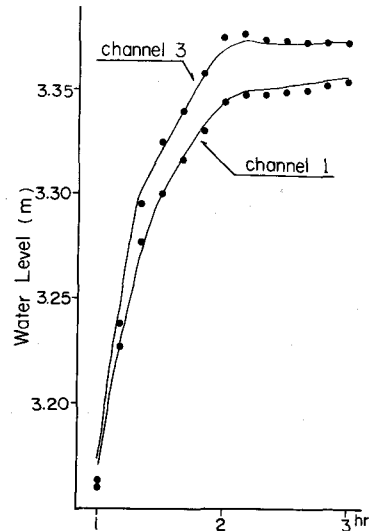


図21 支線水路の下流端水位

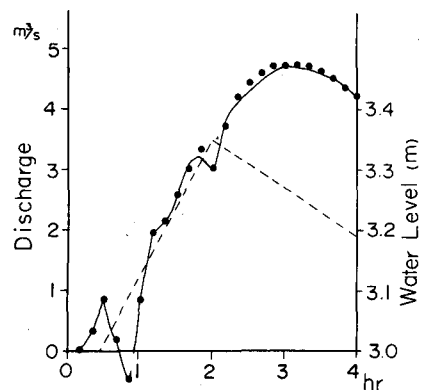


図22 幹線水路のNo2地点の流量