

低平地における水田流出解析と圃場整備 による流出変化の予測について

長谷部正彦¹・鎌田清孝²・葛生光晴³

¹正会員 工博 宇都宮大学大学院教授 工学研究科 (〒321-0912 宇都宮市石井町 2753)

²正会員 工修 仙台市役所 土木課 (〒980-0803 仙台市国分町 3-7-1)

³学生会員 宇都宮大学大学院 工学研究科 (〒321-0912 宇都宮市石井町 2753)

低平地の流出解析として角屋・早瀬らは、水田を貯水池、水路の流れを等流あるいは不等流として扱うことによって内部現象も比較的良く説明しうる Dynamic Wave 法を採用した低平地タンクモデル法を提案している。この手法により水田地帯を含む低平地流域の雨水流出解析を行い、その結果、流域内の水理学的現象を良く表現するモデルとしている。栃木県東部から茨城県南西部へ南北に流下しその後、利根川へ流入している小貝川流域では、近年多発している洪水の一要因としては、近年急速に進められてきている水田圃場整備事業の影響が考えられる。そこで本研究は、将来圃場整備事業を対象予定とされている試験流域に低平地タンクモデル法による低平地における水田流出解析を行い、更に水田圃場整備後の流出予測と若干の水理学的特性を調べる。

Key Words : diffusive tank model, paddy field consolidation, runoff analysis, runoff prediction, low-lying area

1. はじめに

水田地帯を含む低平地流域の流出解析には、山地流域と同様に貯留関数法やタンクモデル法などが用いられたが、これらの方法では下流端流出量のハイドログラフを巨視的に捉えるだけで流出の内部現象を把握できないとし、早瀬・角屋は水田を貯水池、水路の流れを等流又は不等流として扱うことによって内部現象を比較的好く説明しうる低平地タンクモデル法を提案している^{1), 2), 3)}。

同時に、この手法により低平地における水田地帯の雨水流出解析を行った結果、流域内の水理学的現象をよく表現するモデルであること、また適用条件としても非定常性の強弱に応じて若干の工夫をすれば実用上、排水路-1階級下排水路-貯水池系、すなわち2次の河道網系として単純化して良いことを明らかにしている^{4), 5)}。

栃木県東部から茨城県南西部へ南北に流下しその後、利根川へ流入している小貝川流域では、近年多発している洪水の一要因は単に降雨規模によるものばかりでなく、他の要因として近年急速に進められてきている水田圃場整備事業の影響が考えられる。

本論文は、水工学論文集(第42巻)の研究内容¹⁰⁾に、その後、解析例を増やし、更に再計算及び再整理を行い、内容をより詳細に論じたものである。

本研究の目的は、水田圃場整備事業を対象予定としている試験流域に低平地タンクモデル法を適用して流出解析を行うこと、更に水田圃場整備後の流出予測と予想しうる若干の水理学的特性を調べることである。

2. 水田圃場整備事業前後による水文特性の定性的変化

(1) 圃場整備前後の水文資料による解析

本解析を始める前に水田圃場整備が河川の降雨-流出系に与える影響を圃場整備事業前後の水文資料解析により考察する。小貝川流域の黒子観測所の1958年から1982年までの24年間の中で比流量の大きい10個の一雨洪水資料を用いて水田圃場整備流域前後の流出率(総流量と総降水量の比)、ピーク流出量および洪水到達時間の経年変化を調べた。その結果を図-1, 2, 3に、また小貝川流域における圃場整備事業の推移状況をも図-4に示す^{6), 7)}。なお、図中のA, Bは、同一年の比流量の大きい2つの洪水の場合である。これらの図から、1975年頃を境に、総降水量の変化が少ないのに拘らず(減少傾向にあるが)流出率は増加傾向にあり、ピーク流出量も増加し、洪水到達時間

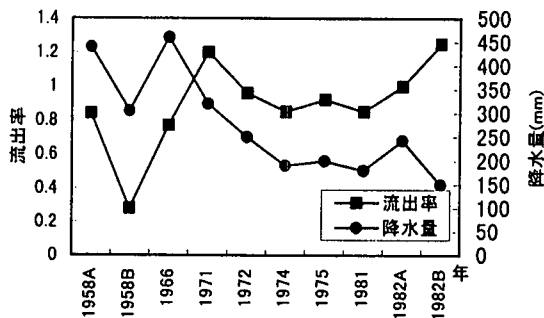


図-1 流出率と降水量の経年変化

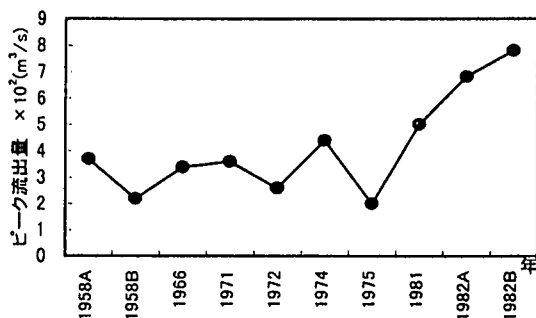


図-2 ピーク流出量の経年変化

も短縮傾向にあることが推察される。以上のことから圃場整備事業が開始されて以来、降雨に対する流出の応答が早くなり、ピーク流量の増加および洪水到達時間の短縮といった傾向が続いていることを指摘することができる。

(2) 水田圃場整備前後における水田の湛水深の変化

未圃場整備内の試験流域（後に述べる）の水田とこの流域内の水田の湛水深を現地調査した。調査は、試験流域上流部の未整備水田A、中流部未整備水田C、下流部未整備水田Bと試験流域の上流部に位置する整備済水田において、平地部の流出（初期損失）を知るために水田の湛水深と稲の生育の状況を調べた。湛水深は、水田 10 面(枚)程度の湛水深を測定し平均値をとった。その結果を図-5 に示す。図によると田植え後の深水時期である 6 月には、約 7cm の湛水深で、圃場整備前後の変化はない。7 月の間断灌漑時期に入ると未整備水田の湛水深は、1-3cm であるが、整備済水田では、5-6 cm の湛水深を保っている。更に 8 月の深水時期に入っても未整備水田の湛水深は 0-2 cm であるが、整備済水田では、3-5 cm である。なお、9 月 2 日以降の調査では、未整備及び整備済水田とも湛水深は 0 であった。一般に圃場整備が完了すると用排水系統が完全に分離されるとともに、用排水路の形状もコンクリートとなり、用水路敷高は田面以上となる。これに対して未整備水田では、水路形状がすべて用排水兼用（土水路）となっており、水路敷高も田面以下となっているため、水門および堰等で水面を堰上げするか、水田間の水の移動となるなど、水路事情が複雑なために図のような結果となったと思われる⁸⁾。

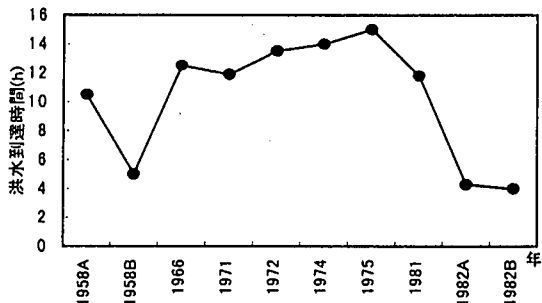


図-3 洪水到達時間の経年変化

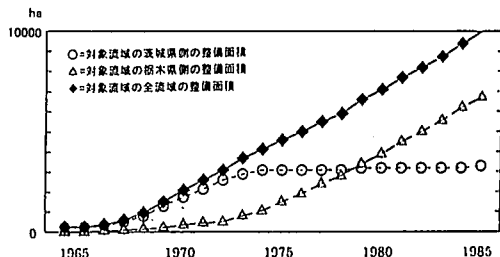


図-4 流域内圃場整備面積推移

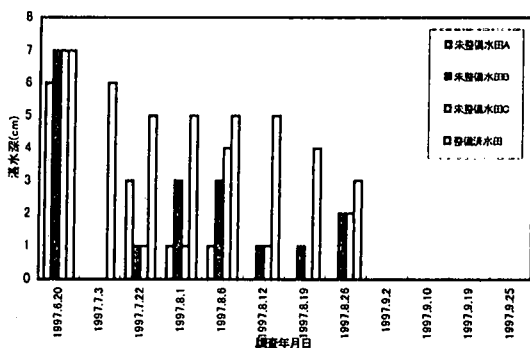


図-5 湛水深調査結果

3. 対象試験流域の概況

対象試験流域は、現地観測の調査結果により決定された流域で、栃木県二宮町に位置する未圃場整備地域で、平成 10 年度頃から圃場整備事業の予定流域である。この

試験流域は利根川水系の小貝川とこの支川である五行川との中間に位置し、流域面積は 1.71km²、流域幅約 0.6km、下流方向約 2.8km の細長い形状を有して

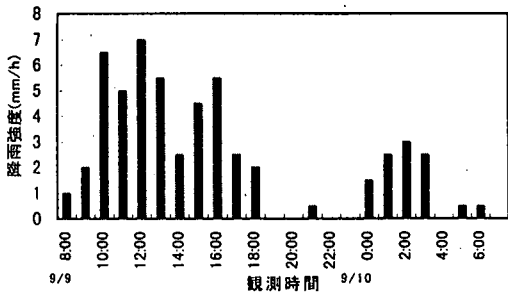


図-6a 降雨強度

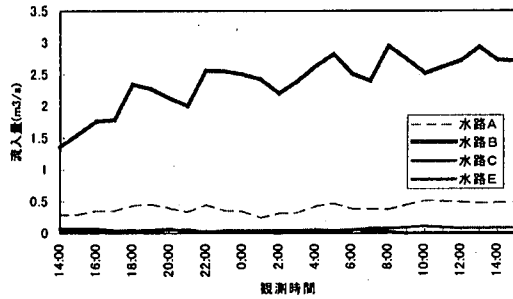


図-6b 流入水路流量

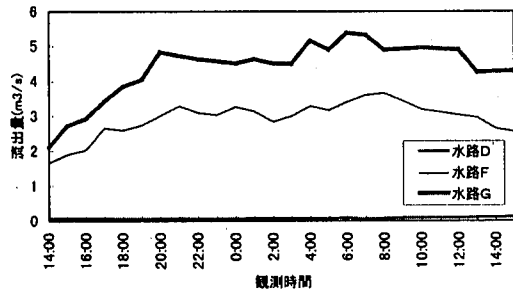


図-6c 流出水路流量

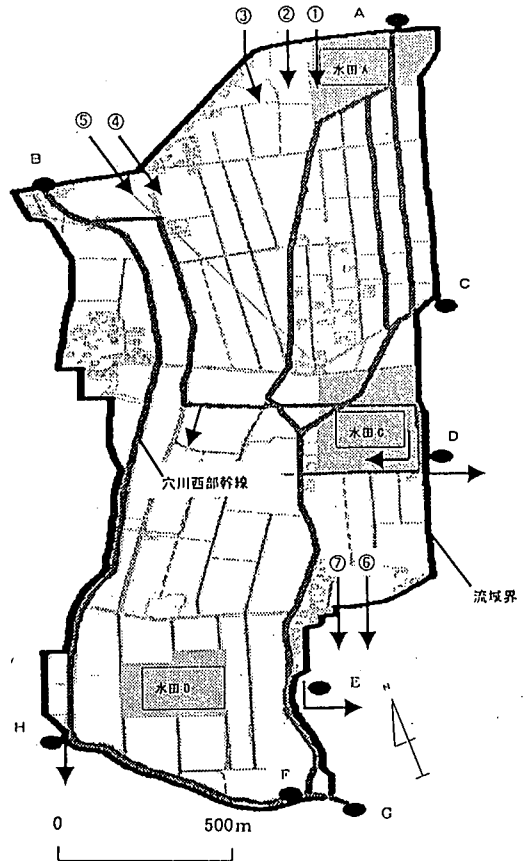


図-7 試験流域概要図

いる。土地利用状況は、水田が全面積の73%、畑地15%、宅地10%、その他2%で典型的な水田主体とした低平地流域である。流出特性を大きく左右する水路形状は、流域西部を北から南へ流下する六川西部幹線と一部のライニングされた水路以外は、殆どが植生によって壁面を覆われた自然排水路となっており、実際に大きく機能する水路数も限られている。

4. 試験流域での現地観測

試験流域における降雨量、流量(水位)の測定は、1996年7、8、9、月の3回行われた(現在も観測を行っているが、本論文には主に9月の観測例を示す)。9月9日の降雨観測は、降雨降り始めの午前8時から翌10日の降雨終了の午前6時までである。流量観測(流速、水位の測定)は、水位の変動が始まる(この間わずかな変

動がみられたが非常に小さい)9日の14時から降雨の影響がなくなる翌日の15時までで連続して延べ26時間の観測を行った。なお、降雨と流出の遅れ時間は、約6時間であるが、この理由としては、降水量分布の代表性と水田による貯留効果によるものと考えられる。この観測結果の降雨量を図-6a、流入・流出量を図-6b、cに示す。この洪水は、台風から発達した温帯低気圧によるものであり、総降雨量は約55mmに達している。流量(水位)の観測は、以下に示す様な各流入水路、流出水路において行われた。この試験流域の概要図を図-7に示す。水路A、B、C、Eが流入水路であり、水路D、F、G、Hが流出水路である。ただし、水路Eは、水門操作により流入と流出に分けられている。具体的に示す対象流域内に流入する水路は、流域上部から下流へ流下する流入水路A、B及び流入観測点①から⑤と流域の横方向から流入する流入水路C、Eである。流出は、流域内を流下する水の大部分が六川西部幹線の下流端で合流し流出

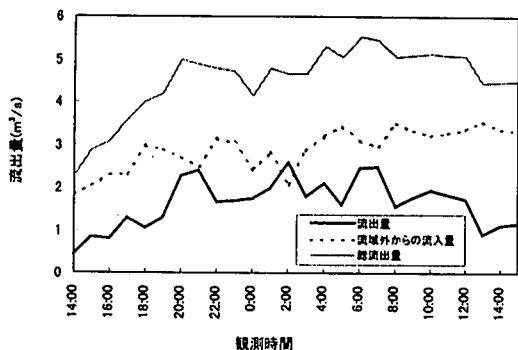


図-8 水収支

Gとして排出されるが、その途中で流域外へと流出される流出水路D, F, H及び流出観測点⑥, ⑦である。図-6b, cによれば、流入水路では、流量は細かな増加と減少を繰り返しつつも漸次増加傾向にあり(水路A, B), 水路C, Eの流量は少なく変動も少ない。流出水路では、緩やかな増加の後減少傾向を示している。なお、水路Hは、前2回の洪水で測定をしたが、この洪水では流量が大きいため分流入れなかったで測定しなかった。

水収支として試験流域からの総流出量、流域外から流入した水路流入量、総流出量より流域外からの水路流入量を差し引いた流量(出力)を図-8に示す。流量の精度として降雨時、無降雨時に観測を5回行い、流入水路、流出水路で水位(H) - 流量曲線(Q)の作成と基底流量の検討を行なった。観測ごとに、H-Q曲線に乗っており、ほぼ満足な結果を得た。また、この観測で推定されたH-Q曲線に、今回の洪水例で測定した水位、流量をプロットすると、この曲線に乗っていることにより洪水時にも適用できることを確かめた。

5. 貯留関数法とタンクモデル法による流出解析

まず、代表的な流出解析法である貯留関数法とタンクモデル法により解析を試みる。なお、ここでは入力として降雨のみを考慮した流出解析なので、この降雨量に対応する出力としては、図-8に示した総流出量より流域外からの流量を差し引いた流量を用いる。

(1) 貯留関数法

貯留関数法は、以下の式で表される。

$$\frac{dS}{dt} = fr - q \quad (1)$$

$$S = kq^p$$

ここに、S; 貯留量、f; 流出率、r; 観測降雨量、q; 流出量、p, k; パラメータ。

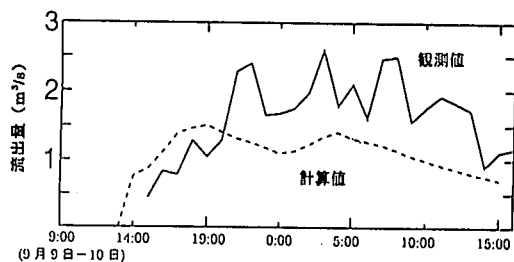


図-9 貯留関数法による解析結果

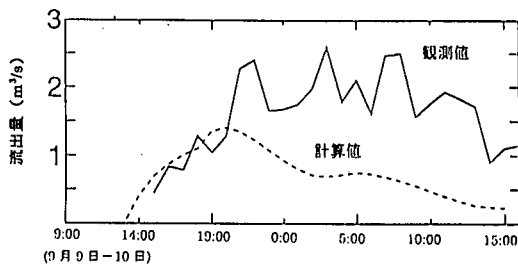


図-10 タンクモデル法による解析結果

表-1 貯留関数のパラメータk, p

	7月5日	8月5日	9月9-10日
kの値	80	60	15
pの値	0.3	0.9	0.9
誤差の最小値	0.104	0.072	0.245

貯留関数法による流出解析の結果を図-9に示す。この図より、この対象流域の流出ハイドログラフの再現性は良くない。と言うのは、式(1)のパラメータk, pを決める場合に、貯留量と流出量との関係は、一般に一価の関係になるのだが、今回の解析ではこの関係が得られなかった。なお、本解析では、流量の計算値と観測値の差の2乗が最小になるような評価基準を選んでk, pを決定した。パラメータk, pと誤差の最小値を表-1に示す。なお、参考として、他の2洪水例のパラメータも示す。

(2) タンクモデル法

タンクモデル法による流出解析の結果を図-10に示す。このモデルは、オリフィス型の3段直列で、このパラメータ(流出孔4(上段のタンクの流出孔2), 浸透孔3, 孔口高4)の同定は貯留関数法の場合と同じ評価基準を用い、試行錯誤で求めた。この結果、流出の初期には観測値と計算値とがほぼ一致しているが、ピーク流出量や流出ハイドログラフ全体(逓減部)に相違があり、再現性は低いと言わざるを得ない。

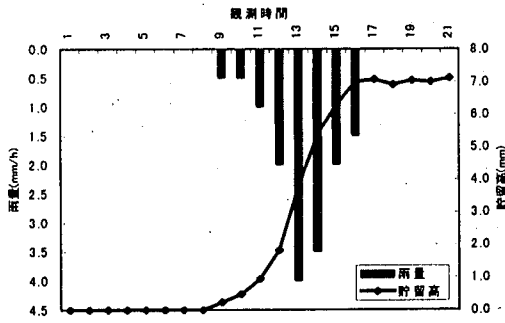
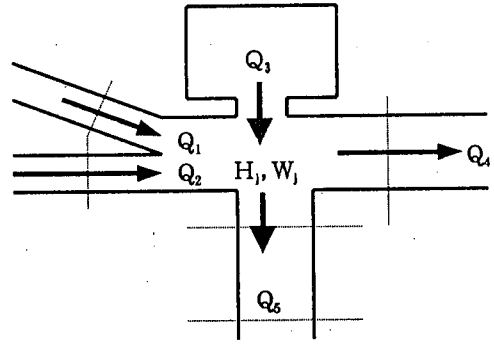
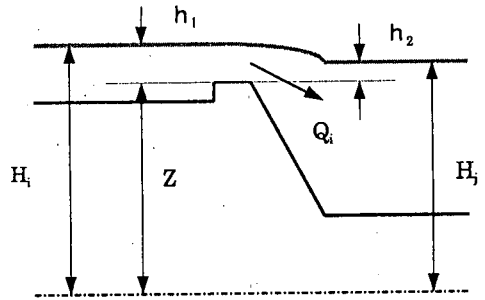


図-11 降雨-貯留量の関係



$$(Q_i = Q_1 + Q_2 + Q_3, Q_j = Q_4 + Q_5 \text{ の場合})$$

図-12a 河道タンク基本図



$$(H_1 \geq H_2 \text{ の場合})$$

図-12b 水田タンク基本図

(3) 試験流域に適用した2つの流出解析の問題点

試験流域での流出特性を良く表現する解析手法について模索を重ねてきたが、二つの手法に関しては、対象流域の流出特性を良く表したのではなく、流出予測としての実用性の評価は低いと言わざるを得ない。この理由としては、これらの流出解析法では入力となる降雨量によって流出が左右されるのに対し、本試験流域で扱う水田を含む低平地流出解析では、流出量は降雨に直接に対応しないためと考えられる。例えば、本解析とは異なるがこの同一流域の他洪水例(1997年6月の洪水)において、式(1)により求めた貯留量の時間の変化を図-11に示す。この図より、降雨が止んでも貯留量が減少していないことが分かる。このことから、この流域では貯留効果が大いことが分かる。また、出力として用いた流入・流出の差し引き流量の信頼性にも問題があると考えられるが、今後検討する余地があると思われる。なお、両解析を比較して解析結果の流出ボリュームがわずかに異なるのは、貯留関数法では、入力降雨を流出率1.1(本解析例の総出力量と総観測雨量の比を求めた)として有効降雨($f \cdot r$)を用い、タンクモデル法では、観測降雨をそのまま用いたためである。ここで流出率が1以上になった理由としては、洪水直前の初期流量が大きかったためと考えられる。

以上の理由から、本対象流域の水田を含む低平地流域の流出解析には、これらの解析方法が適していないことが分かった。そこで本研究では、この試験流域の流出解析として、連続の式と運動の式の両方を用いる早瀬・角屋による低平地タンクモデル法(Diffusive tank model)を適用する。

本的には遊水機能を持つ多数の水田区画とそれらとを連結する多数の排水路網で構成されている。水路を幾つかの区間に分割してそれぞれを一つの貯水池とみなし、これを河道タンクとする(図-12a)。図に示す様に、分合流点は全ていずれかの河道タンクに含まれるものとする。また同一水路に付随する水田区画群は適当に大区画の貯水池に取りまとめ、これを水田タンクとする(図-12b)。水田タンクは、越流堰によって河道タンクと結ばれている。河道タンク間の流れは、不等流の式ないしはそれを簡略化した式で扱う。

a) 河道タンク間の流れの基礎式

河道タンクjについての連続式は次式である。

$$\frac{W_j^{n+1} + W_j^n}{2} \cdot \frac{H_j^{n+1} - H_j^n}{\Delta t} = \frac{\sum_i (Q_i^{n+1} + Q_i^n) - \sum_j (Q_j^{n+1} + Q_j^n)}{2} + W_j^n \cdot r \quad (2)$$

6. 低平地タンクモデル法^{1) -5)}

(1) 低平地タンクモデルの基本的な考え方²⁾

一般に低平地流域は緩勾配であって、貯留効果を卓越した流出特性を示すのが特徴である。低平地流域は、基

ここに、 $n, n+1$: 時点を表す添字、 H_j, W_j : 河道タンク j の水位及び水面積、 $\Sigma Q_i, \Sigma Q_j$: 河道タンク j への流入する総和及び河道タンク j からの流出する総和で、下流方向への流れを正と約束、 Δt : 時間刻み、 r : 時点 $n, n+1$ 間の有効雨量。また、河道タンク j, k 間の流量は、水面勾配 F と河床勾配 s の関係から不等流または等流の式で表現する。

不等流 : ($F < s$)

$$Q_j = \frac{A_j R_j^{\frac{2}{3}}}{N_j} \cdot \frac{H_j - H_k}{\sqrt{X_j} \sqrt{|H_j - H_k|}} = G_j \cdot \frac{F_j}{\sqrt{|F_j|}}$$

$$G_j = \frac{A_j R_j^{\frac{2}{3}}}{N_j}, F_j = \frac{H_j - H_k}{X_j}$$

(2a)

等流 : ($F \geq s$)

$$Q_j = \frac{A_j R_j^{\frac{2}{3}}}{N_j} \cdot \sqrt{s_j} = G_j \cdot \sqrt{s_j}$$

(2b)

ここに、 A_j, R_j : 河道タンク j の水位 H_j における流水断面積及び径深、 X_j, N_j, s_j : 河道タンク j, k 間の距離、河道タンク j の粗度係数及び河床勾配。

b) 水田タンクからの流出の基礎式

水田タンクの i についての連続式は次式である。

$$W \cdot \frac{H_i^{n+1} - H_i^n}{\Delta t} = W \cdot r - \frac{Q_i^{n+1} - Q_i^n}{2}$$

(3)

ここに、 W : 水田タンクの面積、 r : 時点 $n, n+1$ 間の有効降雨強度、 H_i, Q_i : 水田タンク水位及び流出量。水田タンク i から河道タンク j への流出量の推定には堰の公式を用いる。

i) 潜り越流 : ($h_2/h_1 \geq 2/3$)

$$Q_i = C_2 \cdot B \cdot h_2 \cdot \frac{H_i - H_j}{\sqrt{|H_i - H_j|}}$$

(3a)

ii) 完全越流 : ($h_2/h_1 < 2/3$)

$$Q_i = C_1 \cdot B \cdot h_1^{\frac{3}{2}} \cdot \frac{H_i - H_j}{\sqrt{|H_i - H_j|}}$$

(3b)

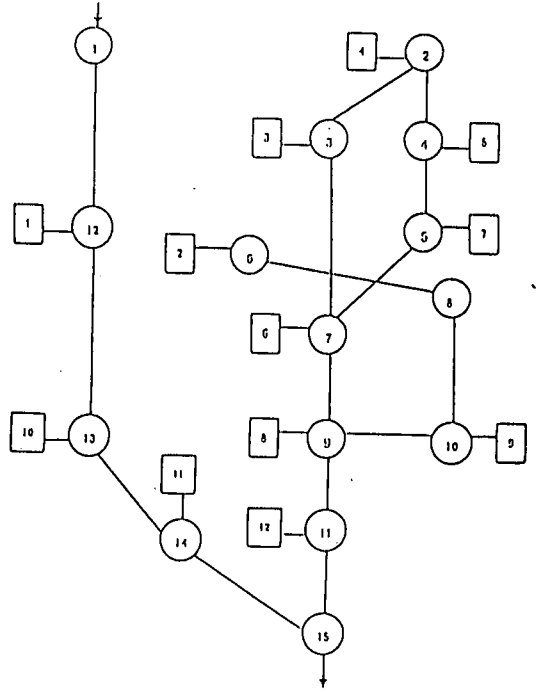
ここに、 B : 堰幅、 H_j : 接続する河道タンク水位、 C_1, C_2 は流量係数で、単位は $m \cdot sec$ である。 h は、堰高を Z とすると、

$$h_1 = H_H - Z, H_H = \max(H_i, H_j)$$

$$h_2 = H_L - Z, H_L = \min(H_i, H_j)$$

(3c)

となる。



□ = 水田タンク
○ = 河道タンク

図-13 試験流域の流域モデル

c) 流域モデルへの適用条件

流域の地形・形状・広狭によっても多少異なるが、通常は全流域を2次の河道網系、すなわち幹線及び支線排水路水路とし、その両側に長方形の斜面または水田区画が付随するものとして、流域モデルを作成する。低平地タンクモデルを適用すべき流域モデルの設定は以下のようになる。

- ① 水路を幾つかの区間に分割し、それぞれの区間を1個の河道タンクとする。
- ② 水路合流点には1個の河道タンクを設ける。上流河道タンクとの境界は、現実の末端排水路(流域モデル上では水田タンクに含まれる)の最下流側流入点と水路合流点との中央付近とする。
- ③ 幹線水路では、合流点タンク間に0または1個、支線水路では合流タンクの上流側に1または2個の河道タンクを設け、その片側または両側に1個の水田タンクまたは斜面が付随するモデルが良いが、水田欠口標高差が大きくなりすぎる場合には、更に細分割して河道タンク及び水田タンク数を多くする。
- ④ 水路の最上流・最下流で、計算条件として水位を与える場合には、その地点にも河道タンクを追加する。

(2) 試験流域の整備前の低平地流出解析

解析は、5. において行った流出解析と同様に、1996年7月、8月及び9月の洪水例である（本文には、9月の洪水例を示す）。解析に入る前に、試験流域の流域モデルの設定と初期値について述べる。

a) 試験流域の流域モデルの設定

先に述べた6. (1). c) に従って試験流域の流域モデルの設定を行う。低平地タンクモデルでは流域内の主排水路と支線排水路による2次の河道網で十分な精度が得られるというこれまでの報告^{4), 5)} から、流域のモデリングでは、穴川西部幹線を主排水路、水田内を流下し水田からの排水に大きく寄与している水路を支線排水路とする。また各水田タンクはいずれかの河道タンクに接した形を取り、水田からの流出はそれぞれの河道タンクに流入するものとする。この結果、河道タンク数は15、水田タンク数は12となる。河道タンク及び水田タンクを含めた試験流域の流域モデルの設定した結果を図-13に示す。図に示されている上の矢印は、前節の④より流域外の実測水位を初期条件とした最上流の河道タンクを示し、図の下の矢印は、最下流の水位を計算条件として与えた河道タンクを示す。なお、試験流域の水田タンクと河道タンクの原型の形状図は文献^{9), 10)} を参照された。

b) 圃場整備前の流域モデルの初期値

解析には流域内の水田及び河道に関する物理的な諸元の入力が必要となる。まず水田タンクについては、水田面積は二宮町の1万分の1地形図からプランメータを用い、水田からの流出を受け持つ堰幅は、文献^{4), 9)} を参考にして1m/haとする。接続する河道タンク底から堰までの高さの堰敷高は、それぞれの水田タンクにおける平均田面標高に水田の平均的な貯留水の高さ（観測結果）を加えて設定した。河道タンクは、先のモデリングにより各タンク長が決定され、タンク幅は現地調査結果を基に設定した。タンク勾配は地形図より算出し、各河道タンクの中心点であるタンク代表点標高は地図から読み取った地面標高から平均的な水深を差し引いた値を用いた。この解析では水理学的に流域内の雨水の流れを追跡するため流域内の各河道における粗度係数が必要とされる。この値の設定に際する注意点として低平地タンクモデルでは現実の流れを集約した形（流域内の各水路壁面は、自然水路、コンクリート水路およびその中間的な水路壁面といった多様な壁面をもっている）で扱うため、本解析では現地の水路状況調査と水理公式集¹¹⁾ による Manningの粗度係数を基に設定した。解析に用いた初期値を表-2に示す。

表-2 タンク諸元

水田タンク数=12				
タンク NO	面積(m ²)	堰幅(m)	堰敷高 (cm)	接続する河道タンク NO
1	120,100	12.010	50.5	12
2	181,300	18.130	53.0	6
3	298,300	2.983	53.0	3
4	58,330	5.833	55.3	2
5	89,670	8.967	55.1	4
6	64,330	6.433	50.5	7
7	41,330	4.133	55.1	5
8	122,300	12.230	50.0	9
9	87,330	8.733	49.0	10
10	13,670	1.367	48.2	13
11	41,830	4.183	48.3	14
12	67,330	6.733	48.5	11

河道タンク数=15					
タンク NO	タンク長(m)	タンク幅(m)	タンク勾配	タンク代表点標高(m)	粗度係数
1	170	7.8	1/68	51.5	0.05
2	390	2.4	1/170	53.8	0.10
3	870	2.0	1/348	51.5	0.10
4	890	1.0	1/198	53.6	0.10
5	930	1.0	1/202	53.6	0.10
6	1,280	1.5	1/557	51.5	0.07
7	750	2.0	1/1500	49.0	0.10
8	620	1.5	1/365	49.2	0.07
9	550	2.0	1/367	48.5	0.10
10	320	1.0	1/640	47.5	0.07
11	580	2.0	1/1160	47.0	0.10
12	1,650	7.0	1/678	49.0	0.05
13	500	6.0	1/5000	46.7	0.05
14	390	6.5	1/3900	46.6	0.05
15	290	6.5	1/1450	46.5	0.05

析の結果を述べる。8月の降雨は典型的な夕立であり、また9月の降雨は台風である。この両降雨に比較すると7月の降雨は梅雨前線の降雨であり総降雨量も13mmと少ないのどこでは紙面の都合上もあるので解析結果を省略した。(7月の解析結果も両洪水の結果と同じような結論を得ている。解析結果の詳細は文献⁹⁾ を参照)。なお、解析に用いた出力は図-8に示した総流出量である。また、流量及び水位は、最下流地点のG点の測定値である(図-7参照)。

【1996年8月5日】の解析例

流量と水位の解析結果を図-14a, bに示す。観測流出量を見ると、観測開始1時間後から流出量の大きな増加が始まっている。この日は午後5時のみに降雨強度2.0mm/hの降雨があり、また流域からの流出は午後6時に開始している。同日は30分毎に観測が実施されたので解析では計算ステップを1800秒とし、図における時間の1目盛は30分とする。流出解析の結果、解析流出量と観測流出量は、ほぼ一致しているが初期における計算値と観測値には違いがある。この理由として、推察の域であるのだが、観測流出量は観測水位と流速から求められたものであり、また観測水位には大きな変動が見られていないことから、観測流出量に流速の観測方法(6割水深・1

(3) 解析結果と考察

対象流域の未圃場整備の8月と9月の2洪水の流出解

点法)の影響が表れているものと考えられる。つまり、変動のばらつきが大きい初め2回の観測流速の平均値をとったために流速が小さめに計算されて、計算値と観測地に違いがでたと推察される。一方、図-14bに示される観測水位と解析水位では解析初期においても良く一致している。

【1996年9月9日】の解析例

前の洪水例と同様に流量と水位の解析結果を図-15a, bに示す。この洪水は8月の洪水とは対照的に、台風(温帯低気圧)によって約23時間にわたった降雨があり、延べ26時間に及ぶ観測が行われた。従って観測流出量は降雨の有無に関連して、細かな増加と減少を繰り返している。解析結果としては、流量及び水位とも解析値と観測値とが良く類似した傾向を示している。ただ流出量について若干観測値が解析値を上回っているが、これは対象流域内にある水田用ポンプによって汲み上げられた地下水の排水・家屋からの生活排水・流域外からの越流や浸透による影響などが考えられる。

以上により、本解析では、前出5.の流入・流出の差し引き量を出力として行った流出解析に比べ、総流出量を出力とした低平地タンクモデル法が、流出の再現性が良く表して、結果として本流域における流出予測手法としての実用性は高いことが分かった。貯留関数法、タンクモデル法等の流出解析法は、入力となる降雨量から流域という変換場を経て出力である流量に変化する。また、降雨に対する流出の応答が一般に線形で扱える場合(流出量を流出成分に分離する場合もあるが)でもある。このことから、前出5.の流出解析では差し引き流量を用いた。一方、低平地タンクモデルは、水路に対する流入・流出量の連続性を重視する方法である。本論文では、対象流量の違いによって異なる流出解析法により検討したが、流域内の水収支が正確に掌握されるならば、貯留関数等の手法も再現性は高くなると思われるが、このことは、水田流出解析例を増やすなどして検討していかなければならない。

7. 圃場整備事業の施工状況

圃場整備事業は、農村の区画・農道・用排水路などの外的形質を整備すると共に用排水条件、土質条件などの内的性質とも併せて整備改善する。従って、圃場整備事業に伴う流出特性の変化を把握するためには、同事業が、どのような規定のもとに行われているのかを知る必要性が生じてくる。ここでは、流出特性に影響を及ぼす要因の農地区画形状と水路形状を取り上げ、それぞれの施工状況について簡単に述べる¹⁵⁾。

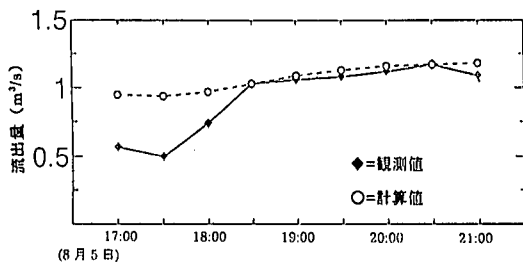


図-14a 解析結果(流出量)

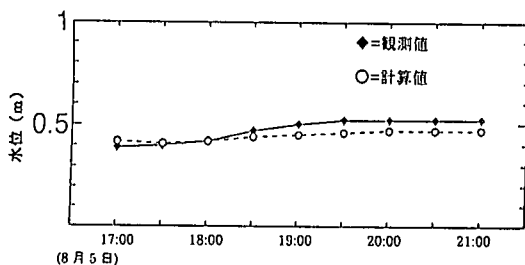


図-14b 解析結果(水位)

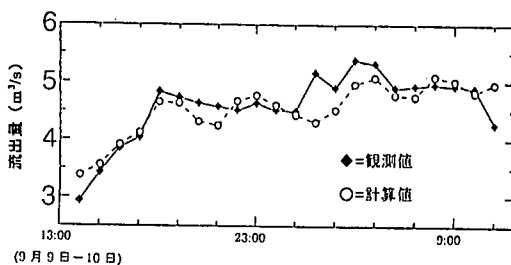


図 15-a 解析結果(流出量)

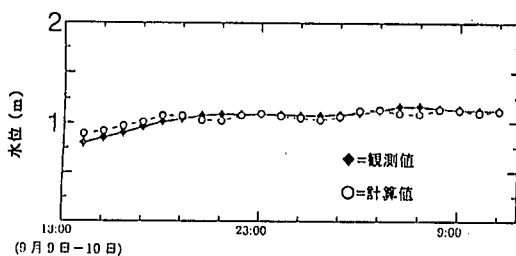


図-15b 解析結果(水位)

(1) 農地区画形状

圃場整備事業によって整備される代表的な整備法式を図-16に示す。この方式は、水路が整然と配置され、長方形の区画がそれに囲まれて並んでいる。図に示したのは一農区で、一般に農区は2つの圃区から成っており、また圃区は複数の耕区によって構成されている。耕区とは圃場整備の地区内で一律に標準として造ろうとする区

画で、標準区画ともいう。周囲は原則として畦畔・小排水路・小用水路・農道に囲まれている。地形的には、傾斜が1/300以下の土地は、ほぼ平坦で区画の長辺をどの方向にとっても良い。しかし1/300以上になると、水田は水平にするので、水田の耕区の長辺は等高線方向にとる。また排水面では、水田は土地生産性・労働生産性どちらの点からも排水の良いことが条件となり、特に大型機械が作業するときには地下水位が低いことが要求される。圃区とは、周囲を農道・水路・防風林の様な固定施設に囲まれた区画で、通常10枚の連続した耕区より成る。圃区の短辺は耕区の長辺に、圃区の長辺は連絡道の間隔と一致し、この長辺の長さが小排水路の延長となる。なお、平均的な圃区の面積は、3ha～9haの範囲となる。この様に圃場整備事業は、圃場(耕区)からの排水性を向上させるべく、耕区及び圃区の形状に沿った排水路の設置が行われており、すなわち、これは一農区を基本として用排水路を整備することである。

(2) 水路形状

圃場整備流域内における水路は、用水路と排水路を分割して整備を行うことを原則とする。これは、近年におけるきめ細かな水管理や水田の高度利用を考慮して各耕区における自由な用排水操作を行うためである。

a) 用水路計画

用水路の計画に当たっては、将来の土地利用計画に立脚し、その土地利用計画が実施できる圃場条件を想定した上で、各栽培様式別に水稻の生育段階・気象条件・栽培作業に対応し、任意でかつ適正な水管理が実施できる様に計画を行う。

b) 水路断面形状と排水路断面

水路断面の大きさは計画用水量を基にした排水量と設計流速によって決められる。断面の形としては台形断面が多く使用され、支線排水路は地下排水の役割も期待されるので、なるべく平水位を耕作面の0.6～1.0m以下に保つのが良く、従って水路幅に比べて深い水深を有する。また水路の側斜面勾配は経済的にいえば急なものほど良いが、土質による制約もあるのでそれらを総合的に考慮して決定する。排水路の断面は、農地の潰れを少なくするためや、地下排水の役目を果たさせるために幅員に比べて深い断面を採用し、ある一定の勾配と通水断面積に対して最大の径深を与える。つまり最大の流速や流量が得られる水理上有利な断面を採用する場合が多い。

c) 排水路構造と排水路の設置

排水路の構造は一般の水路工と同じ様に、大別すると素堀り水路とライニング水路の2種類に分けられ、更にライニング水路はライニング型とフルーム型に分けられる。排水路の場合はその性質上、支線排水路に地下排水の役目も同時に期待するため素堀りとするが、それ以外

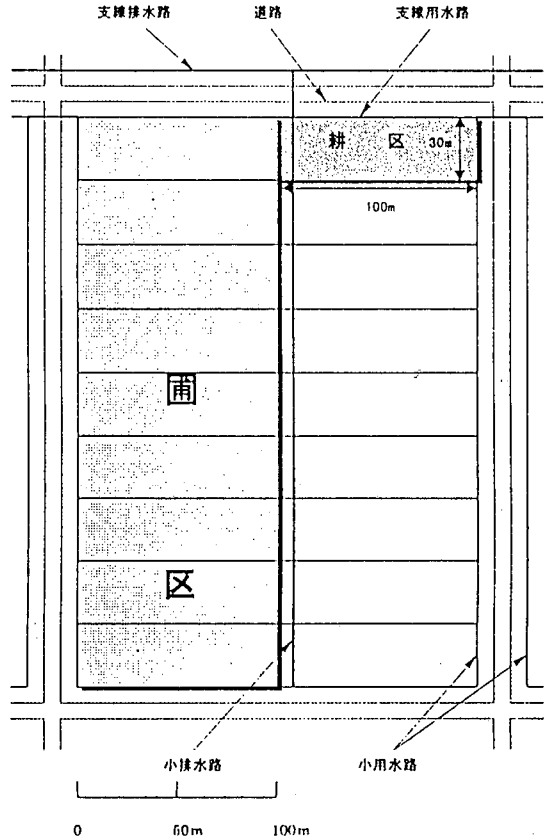


図-16 圃場整備方式(一農区モデル)

外の支線・幹線排水路はライニング水路とする。幹線排水路は地区内の排水が自然排水によって行われる場合には、幹線排水路の位置をなるべく低位部に設ける。また、全てを機械排水で行ったり、一部を自然排水と組み合わせる場合に行う場合には、排水機の設計の都合により地区内を幾つかのブロックに分割してそれぞれに幹線排水路を設ける。支線排水路の設置は、幹線排水路と共に一つの排水路組織として総合的に決められる。つまり地区の農地の形状や地形あるいは排水管理などを考慮して最適な配置が決められる。

8. 水田圃場整備後の流出予測と水田流出特性

(1) 圃場整備後の流域モデルの想定

試験流域で圃場整備事業が施工された後の流域モデルとして前節7.を踏まえて2つのケースを想定する。これらの流域モデルを図-17a, bに示す。ここでの圃場モデルは、流域内の主排水路と支線排水路とが2次の河道網で十分な精度が得られるということを考慮して、穴川西

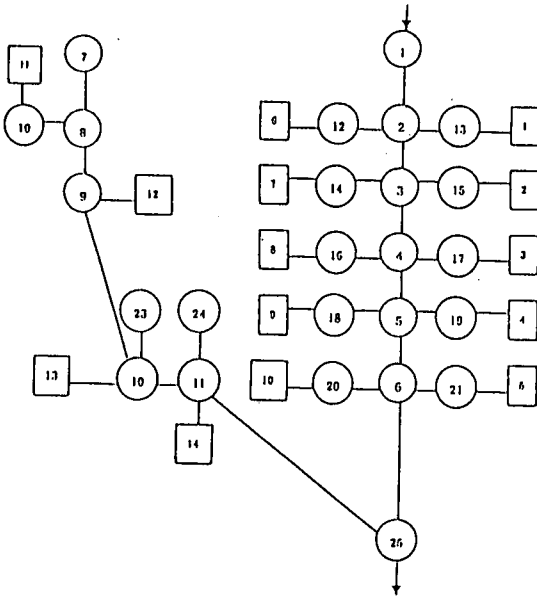


図-17a 流域モデル(ケース1)

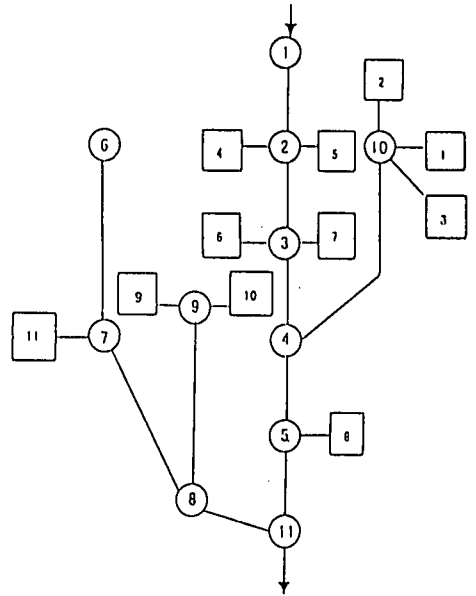


図-17b 流域モデル(ケース2)

部幹線を主排水路、水田内を流下し水田からの排水に大きく寄与している水路を支線排水路とする。また各水田タンクはいずれかの河道タンクに接し、水田からの流出はそれぞれの河道タンクに流入するものとする。圃場整備事業では、一農区からの排水が迅速に行われるように排水路が設置されることから、この2つのケースでは水田タンクの平均面積を、一農区の平均面積である約6~9haの範囲に設定し、それぞれの水田タンクは、圃場整備によって設置される水路断面を想定した排水路に接したものとする。ケース1とケース2の大きな違いは流域内の排水路形状の違いである。すなわちケース1では、主に流下方向に対して直角に新たな排水路が設置され、まず一農区からの排水をこれらの排水路が受け持ち、その後幹線排水路に集められ流域から流出する構造となっている。これに対しケース2は、流下方向に沿って新たな排水路が設置されており、短区間ごとに排水を集めることなく流域下流まで連続する形状となっている。また排水路断面形状についても7.を参考にしながら、整備前の水路幅及び用水路計画を考慮して新たな排水路幅を決定した。水路壁面は全てライニング壁面 ($n=0.015$)、水路断面の型は計算の簡便をはかり全て長方形開水路(フルーム型)とした。ケース1及びケース2の水田タンクと河道タンクの詳しい諸元を表-3と表-4に示す。なお、この試験流域での水田圃場整備事業は、1998年4月から着工され、4~5年計画で完成する予定である。この整備計画にあたっては、水田整備が河川(小貝川流域)の流出特性(洪水到達時間、ピーク流出量等)にいかなる影響を及ぼすかを検討して行っている状況である。

(2) 圃場整備後の流出量予測

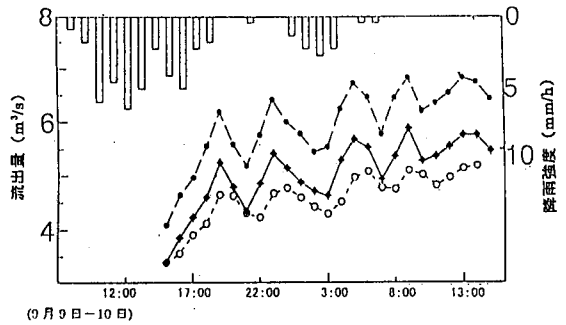
ケース1, 2について、1996年9月の洪水の流出予測例を述べる。入力降雨としては、過去の豊富な降雨・流出資料より有効降雨を求める必要があるのだが、ここでは、流域面積が小さいことと観測データが少ないことにより有効降雨として観測降雨そのものを用いた。また、降雨と流出の遅れ時間を流出の始まる時間(水位の変化)までの6時間とした。なお、6時間とした根拠はないが、ただ整備後にどれ位の遅れ時間(おそらく短くなると思われるか)になるのか未知なので、現状の遅れ時間を設定した。その結果を図-18に示す。図よりケース1と2のハイドログラフは相似で良く似た形を示しているが、流出量は全体的にケース2がケース1を上回っている。この理由として考えられるのは、2つのケースにおける降雨流入面積の差違であると考えられる^{1,2)}、新たに設けた各々の排水路面積はケース1が8940 m²、ケース2が22250 m²となっており、また水田タンクの総面積もケース1が約1.105 km²、ケース2が約1.443 km²である。この面積の違いは、ケース1に比べてケース2の方が、新たに設定した排水路数が少ないことによる幹線排水路を想定したためである。これらのモデルの設定は、実際の試験流域の土地利用状況を参考にしている。この結果が流出量の増加として表れているものと考えられる。ハイドログラフの形は、同日における流域内への流量ハイドログラフと相似な形を示しており、圃場整備後を想定したこれらの2ケースとも、幹線水路が流出特性に大きく影響を及ぼしていることが判る。その結果、整備後の流出量が整備前より多い。

表-3 タンク諸元(ケース 1)

水田タンク数=14				
タンク NO	面積(m ²)	堰幅(m)	堰敷高(cm)	接続する河道タンク NO
1	69,000	6.900	54.5	13
2	69,000	6.900	53.4	15
3	83,500	8.350	52.3	17
4	91,500	9.150	51.5	19
5	87,500	8.750	49.7	21
6	68,000	6.800	54.5	12
7	97,500	9.750	53.4	14
8	76,000	7.600	52.3	16
9	74,500	7.450	51.5	18
10	98,500	9.850	49.7	20
11	70,500	7.050	52.8	22
12	38,500	3.850	50.0	9
13	83,500	8.350	48.3	10
14	100,000	10.000	47.8	11
河道タンク数=25				
タンク NO	タンク長 (m)	タンク幅 (m)	タンク勾配	タンク代表点 標高(m)
1	200	5.0	1/308	54.0
2	300	5.0	1/254	52.7
3	400	5.0	1/409	51.4
4	450	5.0	1/450	50.3
5	400	5.0	1/248	49.5
6	950	5.0	1/400	47.7
7	200	10.0	1/300	52.5
8	450	10.0	1/300	51.0
9	820	10.0	1/588	48.5
10	900	10.0	1/176	46.8
11	200	10.0	1/533	46.3
12	370	2.0	1/1233	53.0
13	250	2.0	1/833	53.0
14	330	2.0	1/660	51.9
15	300	2.0	1/600	51.9
16	250	2.0	1/500	50.8
17	300	2.0	1/600	50.8
18	300	2.0	1/600	50.0
19	320	2.0	1/640	50.0
20	390	2.0	1/780	48.2
21	350	2.0	1/700	48.2
22	160	2.0	1/533	51.3
23	510	2.0	1/726	47.5
24	640	2.0	1/533	47.5
25	150	10.0	1/750	46.0

表-4 タンク諸元(ケース 2)

水田タンク数=11				
タンク NO	面積(m ²)	堰幅(m)	堰敷高(cm)	接続する河道タンク NO
1	710,000	7.100	55.5	10
2	122,400	12.24	55.5	10
3	940,000	9.400	55.5	10
4	154,000	15.40	53.5	2
5	130,000	13.00	53.5	2
6	104,400	10.44	50.5	3
7	121,800	12.18	50.5	3
8	910,000	9.100	48.2	5
9	139,800	13.98	55.0	9
10	294,600	29.46	55.0	9
11	120,100	12.01	51.5	7
河道タンク数=11				
タンク NO	タンク長 (m)	タンク幅 (m)	タンク勾配	タンク代表点 標高(m)
1	200	670	1/335	54.0
2	940	850	1/283	52.0
3	760	480	1/320	49.0
4	660	380	1/475	47.5
5	560	380	1/422	46.7
6	200	1210	1/303	54.0
7	2020	1160	1/331	50.0
8	300	250	1/500	46.5
9	2250	2400	1/343	53.5
10	2200	2300	1/383	53.5
11	100	100	1/500	46.0



◆=ケース 1 ●=ケース 2
○=整備前 n=0.015
図-18 流出予測結果

(3) 整備後の予想される水田流出特性

a) 水路の粗度係数が流量・水位に及ぼす影響

低平地タンクモデルにおいて、流域からの流出量を算定する際に用いられる排水路の水量は、河道タンクのタンク長（水路長）、タンク幅（水路幅）、代表点標高、水路の粗度係数（マンニングの粗度係数）である。タンク長と代表点標高は、各々のケースについては決まっており、これらを変えることは新たなケースを想定することを意味するので本解析では変化させない。またタンク幅の変更に伴う流出特性の変化は水路の水位に表れるが、今回の2つのケースについては実際的なタンク幅の値を設定したので、ここではタンク幅も変化させない。従って、本解析では対象流域内に整備される排水路の断面形状が水田流出特性に与える影響を調べるために、マンニングの粗度係数を取り上げる。具体的には、1996年9月

の洪水について粗度係数を 0.01~0.05 まで変化させ、それに対応して流出量及び水位の変化を調べた。対象流域の最下流河道タンクにおける結果を図-19a, b に示す。この結果、水路壁面の状態によって水路水位は大きく変化している。すなわち粗度係数が 0.01 増加するに伴い水位が約 10cm 程度の増加が認められ、また粗度係数が増すにつれて水位の変化も大きくなる傾向を示している。しかし流出量については、図よりケース 2 はケース 1 を大きく上回っているが、両ケースとも粗度係数の違いに

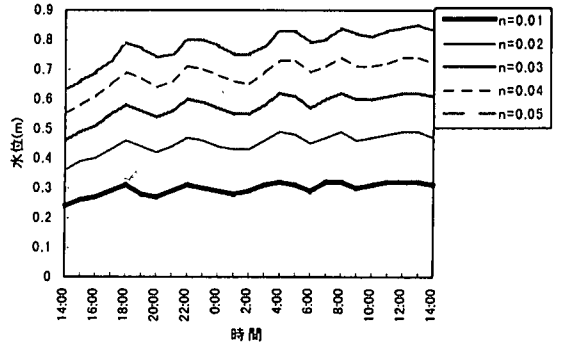
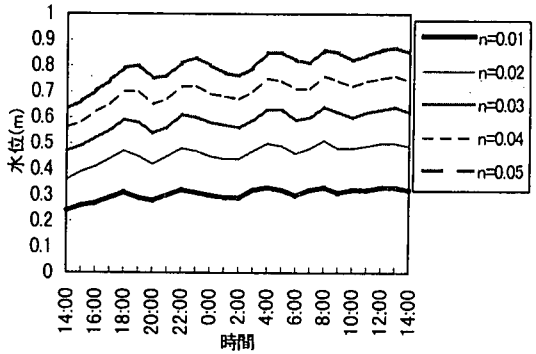
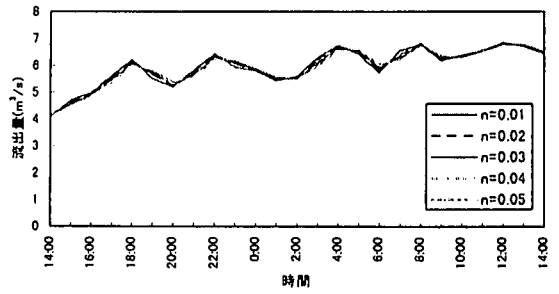
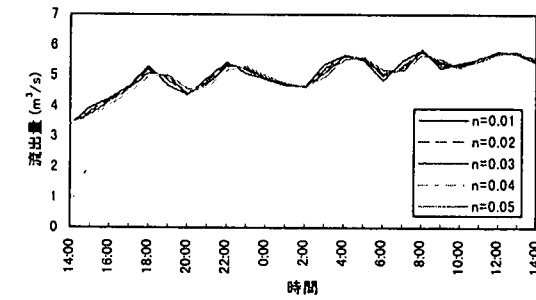


図-19a 解析結果(ケース1)

図-19b 解析結果(ケース2)

よる流出量の変化は少ない。ただ若干粗度係数の増加に伴い、流出のハイドログラフの形状が鈍い形状を示している。粗度係数の増加によって、水路内を流れる流速に何らかの影響が及ぼしていることが考えられる。そこで、粗度係数の増加に伴う水路内流速の変化を図-20に示す。なお、流速は、ピーク流出量を示した時の流出量と水位から ($Q=A \cdot V$) 算定した。図より粗度係数の増加に伴い流速が減少していく傾向が見られ、その減少量も直線的ではなく、曲線的である。従って、水路壁面摩擦が大きい排水路を流域内に設置することが、この様に水路内流速を減少させることにより、水路内水位にその影響を及ぼし、このような結果が表れたと思われる。また図-21に同ケース・同時刻における粗度係数と水路水位の関係を示す。これによると、ケース2の流出量が大いにも拘らず水位は、ケース1よりも低くなっている。また水位増加の割合もほぼ一致しており、その増加傾向も曲線的である。

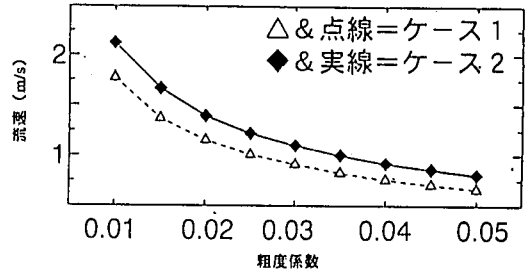


図-20 粗度係数と水路流速の関係

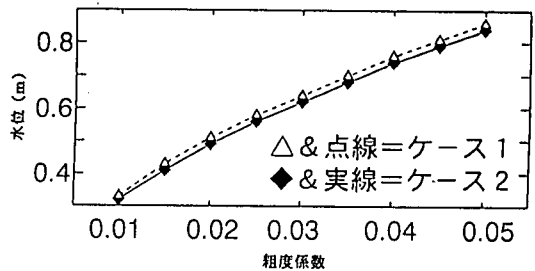


図-21 粗度係数と水路水位の関係

以上、本解析から流域内に存在する排水路におけるマンギングの粗度係数の増加は、水路内流速に大きく影響をおよぼすことが判る。治水的立場から言えば、水路内の流速をできるだけ抑えかつ排水位が低水位を保つために、水路整備では大きな壁面摩擦と水路幅を有した水路を用いると効果的であると思われる。

b) 排水路の配置網が流出の応答特性に及ぼす影響

次に、2つのケースにおける流出特性の違いを調べるために、仮想降雨を入力し、流出量の応答特性の変化を

調べた。具体的には、両ケースに降雨強度 1~10 mm/h の、10時間連続した仮想降雨を降らす。初期流量(基底流量)は、二宮地点の小貝川の基底流量を考慮して $7 \text{ m}^3/\text{s}$ とする。各々の降雨強度に対する流出量の予測を行った。

なお、マンニングの粗度係数の値は一定とし、平均的な値として $n=0.03$ を採用した。最下流河道タンクでの流出を表す結果を図-22a, b に示す。これらの図から、両ケースとも降雨強度の違いにより、流出ハイドログラフの違い、すなわち応答特性が大きく異なっていることが判る。次に、両ケースのハイドログラフの形状に着目すると、ケース2では、流出量の急激な立ち上がりと降雨終了後の低減部での流出量の急激な減少を示している。このことは、流域への降雨は迅速に排水されることを示している。一方、ケース1では、流出量は漸次増加を続け、降雨終了後も緩やかに減少している。例えば、両図の中で、降雨強度 1mm/h の時に、ケース2では、ピーク流量までの洪水到達時間が約5時間で、ピーク流量は約 $7.3\text{m}^3/\text{s}$ であり、ケース1では、洪水到達時間が約3時間で、ピーク流量は約 $9\text{m}^3/\text{s}$ である。これらの結果から流域内の排水路の配置網によって流域からの流出の流出特性が変化したものと考えられる。すなわちピーク流出量及び洪水到達時間が変化することを示している。そこで降雨強度の増加に伴うこれらの結果の要因について、最下流の河道タンクにおける時点 $T=10(\text{h})$ の水路流速、水路水位と降雨強度との関係を調べた。その結果を図-23a, b に示す。両図よりケース2の流速がケース1を約 $0.2(\text{m/s})$ 程上回っており、この違いはオーダーから見ても小さいとは言いがたい。それに対し、ケース1では、ケース2より流出量が小さいにも拘らず水位は $2\sim 3(\text{cm})$ 程大きい。これらのことから、両ケースとも流速及び水位の増加率は、降雨強度の増加と比例的な関係にある。

以上の結果から、ケース1と2における流出ハイドログラフの違いの要因は、排水路の配置網の違いによる流速の変化にあると考えられる。またケース2の様に、流域の流下方向へ向かって連続的に水田が連なり、かつ水田からの排水を受け持つ排水路が直線的な形状を有している様な場合には、水路内を流れる流出水の流速は増加し、それが流域からの流出量の増大に大きく寄与している。以上より、圃場整備事業を上流部にもつ河川流域に新たに排水路を整備する際には、特に降雨規模の大きい洪水の場合については河川への影響を考慮する必要があると考えられる。

9. おわりに

本研究では水田圃場整備事業によって、その流域に及ぼされる種々の変化の要素と、それに伴って引き起こされる流出量の変化を把握することを目的とした。その結果、低平地タンクモデル法を用いて圃場整備後の排水路の配置網、粗度係数、農地の区画形状等とその流域の流

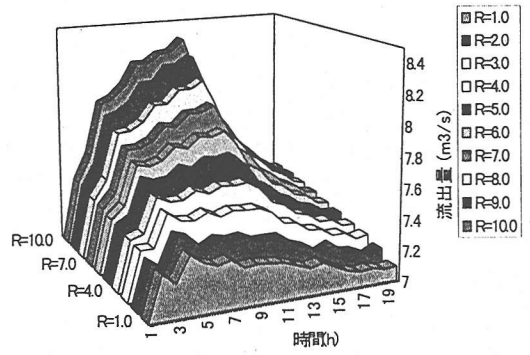


図-22a 流出予測結果(ケース1)

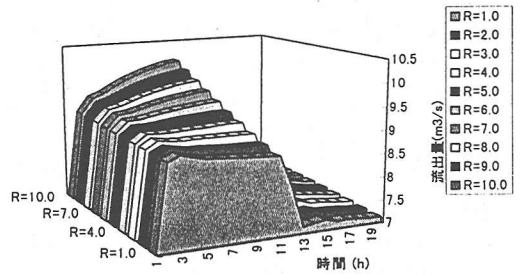


図-22b 流出予測結果(ケース2)

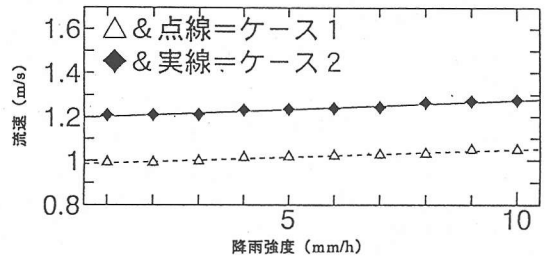


図-23a 降雨強度と水路流速の関係

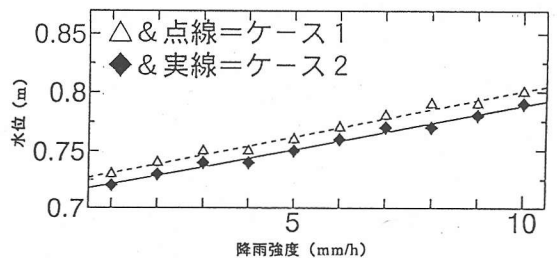


図-23b 降雨強度と水路水位の関係

出特性と降雨に対する流出特性との関連性のある程度定量的に評価することができた。今後の課題としては、圃場整備完了後流域の用排水路の粗度係数、それらの水路に付属している排水管等の工作物等を現地調査し、より詳しい圃場整備による流出特性の変化を把握したい。最後に、洪水の現地観測にあたり中央技術株式会社関友春及び助川純一郎の両氏の多大な努力に感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 早瀬吉雄, 角屋陸: 流出解析手法 (その 13), 農業土木学会誌, 49 (3), pp. 225-234, 1981.
- 2) 角屋陸, 早瀬吉雄: 流出解析法 (その 14), 農業土木学会誌, 49 (4), pp. 321-332, 1981.
- 3) 早瀬吉雄, 角屋陸: 低平地タンクモデルとその基礎的特性, 農業土木学会論文集, No. 165, pp. 75-84, 1993.
- 4) 早瀬吉雄, 角屋陸: 低平地タンクモデルの適応性, 農業土木学会論文集, No. 165, pp. 85-91, 1993.
- 5) 早瀬吉雄: 複雑な排水組織をもつ広域水田地帯の流出解析, 農業土木学会論文集, No. 165, pp. 93-99, 1993.
- 6) 長谷部正彦, 田中仁, 須賀堯三, 苅田利一, 田辺陸: 農地圃場整備が河川の流出機構に与える影響について, 水理講演会論文集, pp. 139-143, 1986.
- 7) 苅田利一, 田辺陸, 長谷部正彦: 農地圃場整備を含む土地利用変化が河川の流出特性に与える影響について, 水理講演

会論文集, pp. 1-4, 1987.

- 8) 助川純一郎, 関友春他: 圃場整備前水田における湛水深の変化と流出率について, 第 25 回関東支部技術研究発表会講演概要集, pp. 248-249, 1998.
- 9) 鎌田清孝: 圃場整備事業対象流域における流出解析手法の評価と整備後における流出解析について, 平成 8 年度宇都宮大学前期課程修士論文, 1996.
- 10) 長谷部正彦, 鎌田清孝: 圃場整備対象流域の流出解析と整備後の流出予測について, 水工学論文集, 第 42 巻, 1998.
- 11) 土木学会編: 水理公式集, 技報堂, 1980.
- 12) 葛生光晴, 鎌田清孝, 長谷部正彦: 圃場整備事業が流出特性に与える影響に関する研究, 第 25 回関東支部技術研究発表会講演概要集, pp. 266-267, 1998.
- 13) 富士岡義一, 手島三二: 低平水田地帯の排水合理化に関する研究 (1), 農業土木論文集, No. 20, pp. 13-17, 1967.
- 14) 八幡敏雄, 西口猛, 浪瀬信義, 田中宏平, 藤川武信, 長一智男, 山本茂, 佐野文彦: 農地工学, 朝倉書店, 1975.
- 15) 農林水産土木ハンドブック編集委員会: 設計, 施工のための農林水産土木ハンドブック, 美朽社, 1976.

(1998. 4. 27 受付)

RUNOFF ANALYSIS IN A LOW-LYING DRAINAGE BASIN AND RUNOFF CHARACTERISTICS FROM A PADDY FIELD DUE TO AGRICULTURAL REFINEMENT.

Masahiko HASEBE, Kiyotaka KAMATA and Mitsuharu KUZUU

The diffusive tank model is a quasi-hydraulic model concentration on the continuity relationship among the storage, the inflow and outflow and deals with a flood wave motion as the diffusion wave. As the water level of drainage channels changes very slowly due to a back water effect in a low-lying drainage basin, the unsteady flow in the channel can be simplified to a non-uniform flow.

In this paper, runoff analysis by this diffusive tank model in a low-lying drainage area where is about 1.7 km² is carried out. And, after the agricultural refinement of this drainage basin, runoff discharge will be estimated and runoff characteristics from paddies in this field is investigated.