

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

RUNOFF ANALYSIS IN A LOW-LYING BASIN AND RUNOFF PREDICTION AFTER PADDY FIELD CONSOLIDATION

長谷部正彦¹・鎌田清孝²

Masahiko HASEBE, Kiyotaka KAMATA

¹正会員 工博 宇都宮大学教授 大学院工学研究科 (〒321 宇都宮市石井町 2753)

²正会員 工修 仙台市役所 土木課 (〒980 仙台市国分町 3-7-1)

The concept of the diffusive tank model is that, as the water level of drainage channels changes very slowly due to a backwater effect in a low-lying drainage basin, the unsteady flow in the channel can be simplified to a non uniform flow.

This paper applies the diffusive tank model to runoff analysis in a low-lying drainage basin which is about 1.7km², and to investigate the hydrological characteristics of low-lying basin by runoff prediction after the paddy field consolidation. The results are summarized as follows;

- (1) The results of flood routing analysis by the diffusive tank model show a good coincidence with observed hydrographs.
- (2) After the paddy field consolidation of low-lying areas, the runoff prediction in future is performed.

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

1. はじめに

低平地の流出解析法として、早瀬らは水田を貯水池、水路の流れを不定流として扱うことにより内部現象も比較的良く説明しうる Dynamic Wave 法を採用した方法を提案している^{(1) (2)}。同時に、この低平地タンクモデル法を用いて、低平地における水田地帯の雨水流出解析を行ない、その結果、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よいことが明らかになったとしている^{(3) (4)}。

本研究の目的は、圃場整備事業が流域の流出特性に与える影響を明らかにするため、小貝川流域の今後実際に圃場整備事業が予定されている実流域（低平地流域）の圃場整備前の流出特性を検討し、更に、圃場整備後の将来における流出特性の変化を早瀬らによる低平地タンクモデル法を用いて検討することである。

2. 対象流域

(1) 土地利用状況

対象流域は、栃木県芳賀郡二宮町に位置する未圃場整備流域で、将来圃場整備事業の行われる予定地区である。流域面積が 1.7 (km²)・流域幅

約 0.6 (km)・下流方向約 2.8 (km) であることから対象流域は細長い形状を有しており、土地利用状況は水田が全面積の 73%、畑地が 15%、宅地が 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。具体的には、対象流域内に流入する水路としては、流域上部から下流へ流下する流入 A・B 及び流入①～⑤と、流域の横方向から流入する流入 C がある。流出については、流域内を流下する水はその殆どが穴川西部幹線に下流端で合流し流出 G として排出されるが、その過程の途中で流域外へと流出される流出 D・E・H 及び流出⑥・⑦が存在している（後に示す図 4 参照）。

(2) 水文現地観測

対象流域における降雨・流出観測は 3 回行われている。この降雨資料は 9 月 9 日から 10 日にかけて日本に接近した台風から発達した温帯低気圧によるものであり、総雨量は 55 mm に達している。流出資料の観測調査は、各流入水路、流出水路における水位及び流量について行われた。水路 A, B, C, E が流入水路であり、水路 D, E, F, G 流出水路である。水路 E については、水門操作により流入と流出に分けられている。9 月 9

日、10日の洪水の観測は、延べ26時間の観測が行われている。

最後に、本解析に用いる流出量は、総流出量から流域外から流入した水路流入量を差し引いた流量を用いる。

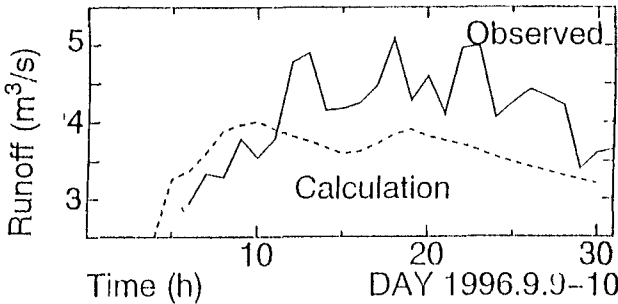


図-1 貯留関数法による解析結果

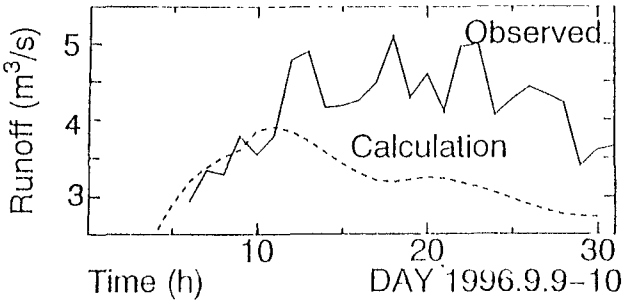


図-2 タンクモデルによる解析結果

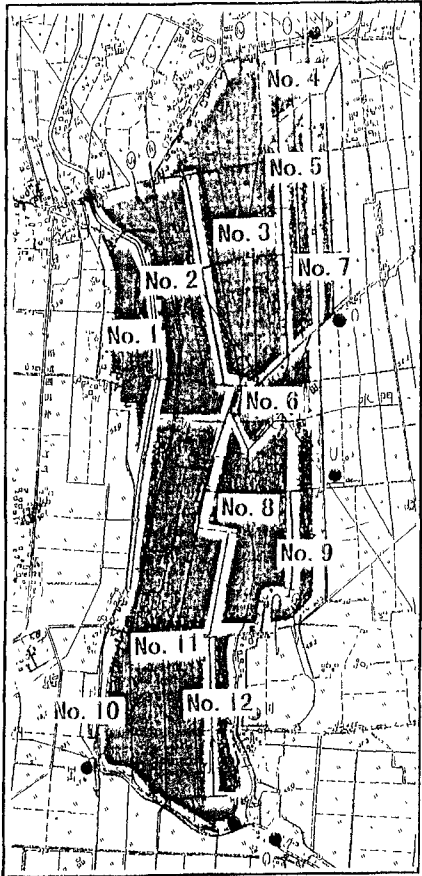


図-3 水田タンク形状図

3. 従来の方法による流出解析

従来の代表的な解析法である貯留関数法とタンクモデル法の解析結果を図1、2に示す。

貯留関数法による流出解析にあたっては、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、この基準に応じてパラメータ、 k 、 p の同定を試みた。貯留関数法は、一般的に山地河川等の解析法としては有用性を有しているが、本解析では、図1より実用的であるとは言い難い結果となった。また、タンクモデル法についても、タンクの数、径を変化させて、貯留関数法と同様な評価基準を用いて同定し、計算した。図2より、ピーク流出量や洪水低減部に相違があり、実用性は低いと言わざるを得ない。これらの流出解析の信頼性が少ない理由としては、対象流域の流域面積が小さいことと水田主体流域であることが考えられる。

4. 低平地タンクモデル

一般に低平地流域は緩勾配であって、貯留効果の卓越した流出特性を示すのが特徴的である。低平地流域は、基本的には遊水機能を持つ多数の水田区画とそれら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。この際、分合流点は全ていずれかの河道タンクに含まれる。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。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ものとする。

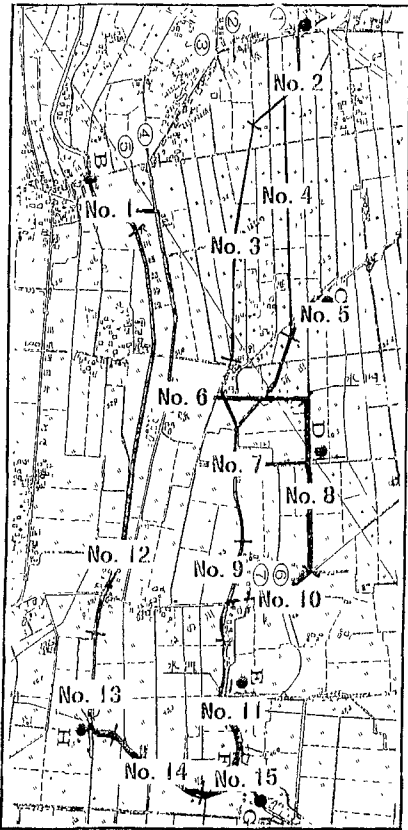


図-4 河道タンク形状図

(1) 河道タンク間の流れ

基礎式は以下である。

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

ここに、 $n, n+1$: 時点を表す添字、 H_j, W_j : 河道タンクの水位及び水面積、 Q_i, Q_j : 河道タンク j への流入量及び河道タンク j からの流出量で、下流方向への流れを正と約束、 Δt : 時間刻み、 r : 時点 $n, n+1$ の有効雨量。有効雨量は、厳密に言えば、損失雨量を考慮したものを用いるべきだが、本解析では、流域面積が小さいことや灌漑機能が働いていることにより有効降雨として観測降雨をそのまま用いた。河道タンク j, k 間の流量は、水面勾配と河床勾配の関係から、各タンク間の状況に応じて不等流または等流の式で計算する。

(2) 水田タンクからの流出

水田タンク i についての連続式は次式である。

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

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。なお、水位によって水面積の変動する池沼を水田タンクとするときには、上式の左辺の W を池沼面積とすればよい。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。

5. 低平地タンクモデルによる流出解析

(1) 対象流域のモデリング

低平地タンクモデルは流域内の河道及び水田を幾つかの河道タンクに分割し、タンク間の水の流れを連続式と運動式によって表す手法である。低平地タンクモデルを用いた流出解析を行なうにあたり、対象流域のモデリングを行なった。図3に水田タンク形状図を図4に河道タンク形状図を示す。その結果、河道タンク数が15、水田タンク数が12となった。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⁽³⁾⁽⁴⁾⁽⁵⁾から、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して、この様なモデルとした。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。

(2) 初期条件の設定

解析にあたって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。解析に用いたそれらの値を表1に示す。まず水田タンクについ

水田タンク数=12				
	面積(m)	セキ幅(m)	セキ敷高(m)	接続する河道タンクNo
1	120100	12.01	50.5	12
2	181300	18.13	53	6
3	298300	2.983	53	3
4	58330	5.833	55.3	2
5	89670	8.967	55.1	4
6	64330	6.433	50.5	7
7	41330	4.133	55.1	5
8	122300	12.23	50	9
9	87330	8.733	49	10
10	13670	1.367	48.2	13
11	418300	4.183	48.3	14
12	67330	6.733	48.5	11

河道タンク数=15				
	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	170	7.8	1/68	51.5
2	390	2.4	1/170	5308
3	870	2	1/348	51.5
4	890	1	1/198	5306
5	930	1	1/202	5306
6	1280	1.5	1/557	51.5
7	750	2	1/1500	49
8	620	1.5	1/365	49.2
9	550	2	1/367	48.5
10	320	1	1/640	47.5
11	580	2	1/1160	47
12	1650	7	1/678	49
13	500	6	1/5000	46.7
14	390	6.5	1/3900	46.6
15	290	6.5	1/1450	46.5

表ー1 モデルに用いた各諸元

てであるが、水田面積は二宮町の1万分の1地形図よりプラニメータにより算出し、水田からの流出を受け持つ堰幅は、1m/h aを目安とし、また接続する河道タンク底から堰までの高さである堰敷高は、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。次に、河道タンクについては、先のモデリングによりそれぞれの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。タンク勾配は先と同様の地形図より算出し、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。この解析手法では水理学的に流域内の雨水の流れを追跡するため、対象流域内の各河道における粗度係数が必要とされる。そ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、実際のそれより多少大きめの値を設定する。そこで解析では、現地の水路状況調査と水理公式集にて取り上げられているマンニングの粗度係数を基に各河道タンクを設定した。

(3) 解析結果

低平地タンクモデルを用いた圃場整備前の平成8年9月9日、10日の流出解析の一例を図5、6に示す。解析値と観測値とが良く類似した傾向を示しており、流出量に見られる精度の良さは水位にも見られる。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、家屋からの生活用水、流域外からの越流や浸透による影響などが考えられる。このように長時間かつ規模の大きい降雨に対する流出解析を行なう場合には、こういった影響をも解析値に加味する必要性が生じてくると思われるが、解析結果はより実際の挙動を示し、対象流域における流出予測手法としての実用性は高いと考えられる。

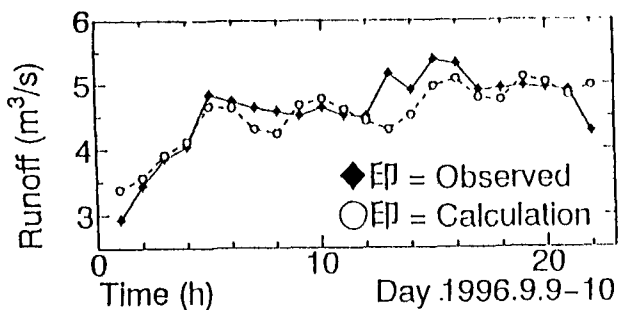


図-5 解析結果 (流出量)

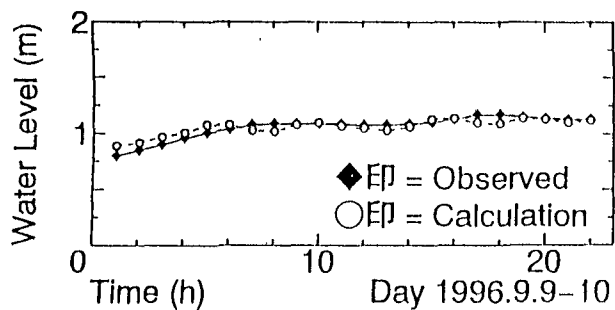


図-6 解析結果 (流出量)

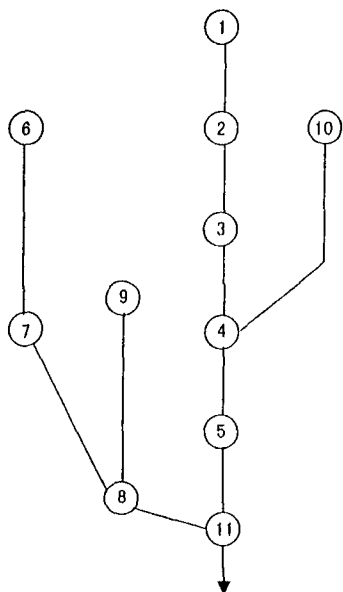


図-7 ケース1の河道タンク形状図

6. 圃場整備後の流出予測

流域内の水路形状及び排水路の変化が流出に与える影響を圃場整備事業が施工された後の流域モデルを想定し、そのモデルに対する流出量の予測を試みることにより検討を行う。

(1) 圃場整備後の流域モデルの想定

本研究における対象流域で圃場整備事業が施行された後の流域モデルとして、2つのケースを想定した。これらの河道タンク形状を図7、8に示す。この2つのケースは、圃場整備事業の施行状況を踏まえて想定を行なった。圃場整備事業では、一農区からの排水が迅速に行われる様に排水路が設置されることから、この2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なっている。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、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。一方、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。排水路断面形状についても、現在の各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、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図り全て長方形開水路 (フルーム型) とした。

(2) 流出予測

ここでは先のケース1、2について、平成8年9月9日、10日降雨について流出予測を行なった。その結果を図9に示す。これによるとケース1と2のハイドログラフは良く似た特性を示しているが、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、

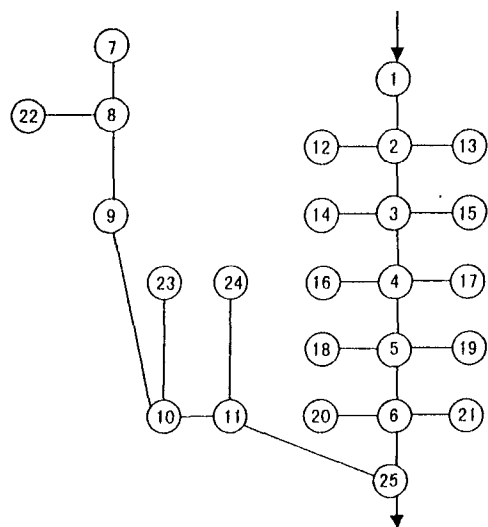


図-8 ケース2の河道タンク形状図

2つのケースにおける降雨流入の排水路面積の差異で、そ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。またこのハイドログラフの形状は、同日における流域内への流入量ハイドログラフ（流入水路B）と同様の特性を示しており、圃場整備後を想定したこれらのケースにおいても幹線水路は流域からの流出特性に大きく影響を及ぼすことが分かる。

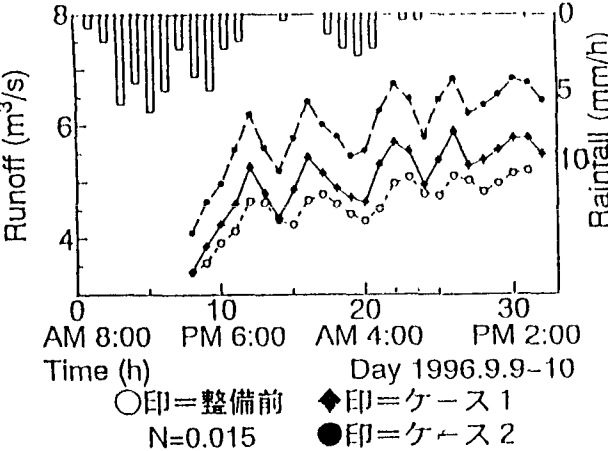


図-9 想定モデルによる流出予測

(3) 整備後の流出特性

ここではケース1, 2の流出特性の違いを対象流域に人工的に降雨と流入量を与えそれに対する流域の流出特性の違いを試みたものである。

a) 水路の断面形状が流出特性に及ぼす影響

流域からの流出量を算定する際に用いられる排水路そのもののパラメータは、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、水路粗度係数（マンニングの粗度係数）である。またタンク幅の変更に伴う流出特性の変化は水路水位に表れることが予想されるが、今回の2ケースについては実際的なタンク幅（水路幅）の値を設定したので、ここでは特別変更を加えることを見送った。従って対象流域内に整備される排水路の断面形状が流出特性に与える影響をマンニングの粗度係数により検討した。

平成8年9月9日、10日の観測降雨と観測流入量の粗度係数0.01~0.05まで変化させ、それぞれに対して流入量の予測を行った。対象流域からの流入量を表す最下流河道タンクにおける結果を図10（ケース1）に示す。これらの結果から言えることは、水路壁面の状態によって水路水位は大きく変化するということである。同河道タンクにおける水路水位は、粗度係数が0.01増加するにつれて約10cm程の増加が認められ、それと同時に水位の変化量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、どちらも粗度係数の違いによる流出量の変化は殆ど表れなかった。ただ若干、粗度係数の増加に伴いハイドログラフの形は鈍い形状を示すようである。

以上の要因としては、排水路壁面の粗度係数の

増加によって水路内を流れる水の速度に何らかの影響が及ぼされることが考えられる。粗度係数の増加に伴う水路内流速の変化を図11に示す。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みられ、その減少量も直線的なものでなく曲線的に減少する特性を示している。従って、流域から一定量の流出量がある場合には水路壁面摩擦が大きい様な排水路を流域内に設置することは、水路内流速が減少し、水路内水位にその影響が表れると思われる。

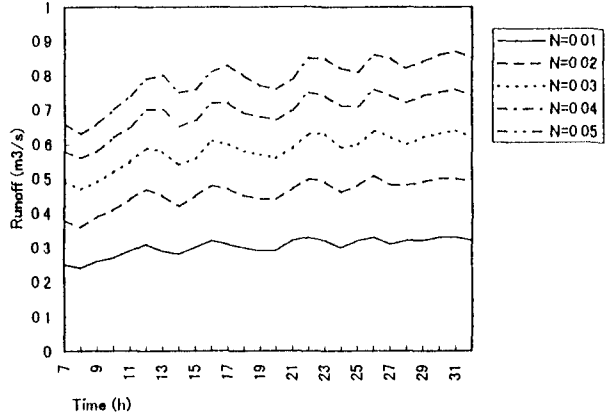
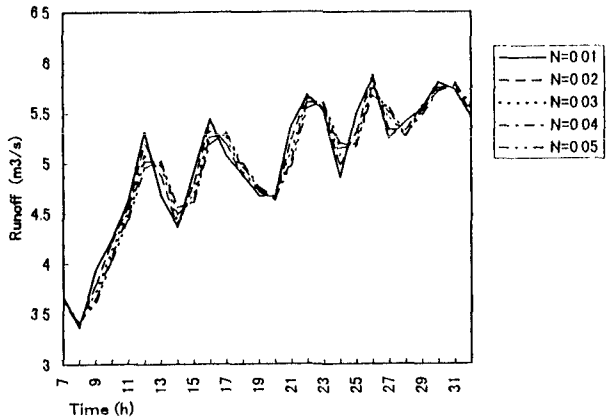


図-10 ケース1の流出量と水位

以上、この様に粗度係数の増加と流速の減少の関係は曲線的であり、粗度係数が0.03以上では流速に大きな影響を与えないことが分かる。従って、この結果から、洪水被害を避けるために圃場整備事業の水路整備計画では、できるだけ水路内の流速を抑えかつ水路が低水位を保つようにする必要があると考えられる。

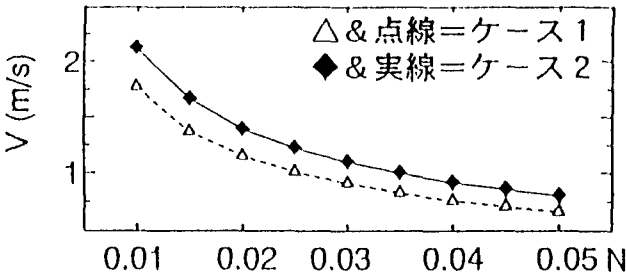


図-11 粗度係数と流速の関係

b) 排水路形状が流出特性に及ぼす影響

ここでは、2つのケースの一般的な流出特性の差を把握するために、ある人工降雨と流域内への流入量を入力し、それに対する流出量の予測を行った。具体的には、ケース1、2の両方に降雨強度1~10mm/hの10時間連続した降雨及び総量7m³/sの流入量を計算開始から終了まで与え、それぞれの降雨強度における流出量の予測を行った。また解析におけるマンニングの粗度係数は一定とし、中間的な値としてN=0.03とした。対象流域からの流出を表す最下流河道タンクにおける結果を図12に示す。これらの結果で注目する点は、2つのケースのハイドログラフの形状の違いである。流入量を一定にしたことにより、ハイドログラフには流域への降雨特性により排水路の形状の違い（水田の配置）によって大きく異なることが表れている。図よりピーク流出量に大きな違いがあるが、ケース2ではハイドログラフの初期の急激な立ち上がり、降雨終了後の流出量の速減の仕方である。このことは、降雨量の増加とともに流出量が急激に増加し、降雨終了後の流出量は迅速に減水することを示す。この傾向は降雨強度の増加に伴い強くなっていることが分かる。一方、ケース1では、降雨継続時間とともに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。これらの結果は、流域内の排水路形状、将来（実際には、この解析地点では1,2年後であるが）圃場整備事業により、新たに設置する排水路の位置によって流出特性が大きく変化することを示している。

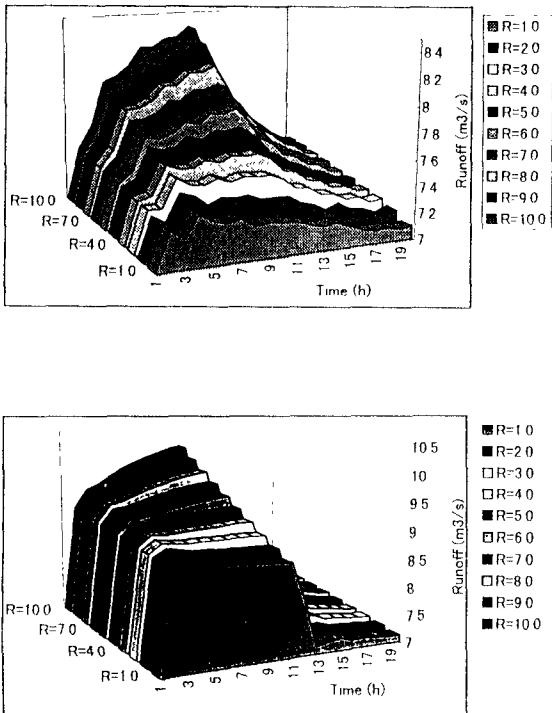


図-12 ケース1、2の流出予測

おわりに

今後、更に、洪水の事例を増やし研究を進めるとともに圃場整備された流域の流出解析をも検討して整備前後の流出特性を比較検討したい。最後に、洪水の現地観測での中央技術株式会社と論文作成においての宇都宮大学学生の高生光晴君に感謝の意を表します。

参考文献

1) 早瀬吉雄：流出解析手法（その13）、角屋睦、農業土木学会誌、49(3),pp225-234,1981.
2) 角屋睦、早瀬吉雄：流出解析手法（その14）、農業土木学会誌、49(4),pp321-332,1981.
3) 早瀬吉雄、角屋睦：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、角屋睦：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) 土木学会編：水理公式集、技報堂、1980.
7) 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年度修士論文。

(1997.9.30受付)