

低平水田地域における湛水構成成分の見える化 Visualization of floodwater sources in low-lying paddy field area

瀧川紀子*・田中丸治哉*・多田明夫*

*神戸大学大学院農学研究科 (〒657-8501 兵庫県神戸市灘区六甲台町 1-1)

TAKIGAWA Noriko*, TANAKAMARU Haruya*, TADA Akio*

*Graduate School of Agricultural Science, Kobe University (1-1 Rokkodai-cho, Nada-ku, Kobe, 657-8501)

(Received 4 December 2020, Accepted 22 February 2021)

Abstract

The study aims to quantify and visualize the floodwater sources by applying the existing inundation analysis model using topographically adjusted cells to the Shironego district, Niigata prefecture, which is a low-lying paddy field area. The floodwater sources were classified into three categories: (1) inundation due to rainwater in the own catchment, (2) inundation due to inflow from adjacent area, and (3) inundation due to reversed flow from river streams and drainage channels. The inundation analysis model was applied to the flood of 30-year return period and the floodwater sources were visualized. The results of visualization show that the floodwater sources change depending on the upstream and downstream of the study area and the presence and absence of drainage improvement. By showing the floodwater sources for each inundation site in the study area, the cause of inundation can be clarified and effective drainage measures can be examined.

Key words: low-lying paddy field area, flood runoff, inundation analysis, visualization of floodwater sources

要 旨

本研究は、低平水田地域である新潟県の白根郷地区に対して地形適合セルを用いた既存の内水氾濫解析モデルを適用し、湛水構成成分を定量化し可視化することを目的とする。湛水構成成分は、①自集水域雨水による湛水、②隣接地からの流入による湛水、③河川・排水路からの逆流による湛水、の3つに区分した。30年確率降雨による出水に対して内水氾濫モデルを適用し、湛水構成成分の見える化を実施したところ、流域の上下流や排水改善の有無によって湛水構成成分が変化することが示された。対象地区内の湛水発生箇所ごとに湛水構成成分を明らかにすることで、湛水発生の原因を明確にし、効果的な排水対策が検討できる。

キーワード: 低平水田地域、洪水流出、内水氾濫解析、湛水構成成分の可視化

1. はじめに

平成30年7月豪雨による西日本を中心とした浸水被害や、令和元年8月の前線に伴う大雨による九州での浸水被害、令和元年台風第19号による東日本を中心とした浸水被害など、近年、内水氾濫による浸水被害が立て続けに発生している。

内水氾濫対策としては、排水路や樋門の整備、ポンプ場の設置や増強などのハード整備や、内水ハザードマップの作成などのソフト対策などがあげられる。とくにハード整備を前提として、浸水被害を緩和するための効果的な治水対策を立案するためには、地区内の湛水が、河川や排水路から溢れたものなのか、他流域から移動してきたものなのか、といった湛水発生要因を明らかにする必要がある。

佐山ら(2013)は、河川流量から洪水氾濫までを流域一体で解析する降雨流出氾濫モデルを2011年のタイ洪水に適用し、洪水氾濫の時空間起源分析手法に基づいて、流出・氾濫水の時間起源、空間起源を明らかにしている。一方、吉川ら(2020)は、内水氾濫解析モデルにトレーサーサブモデルを導入した地目別流出成分可視化モデルを開発し、新潟県亀田郷流域の排水機場吐出量に占める農地、非農地の成分割合を示すとともに、水田湛水に含まれる非農地流出成分を可視化している。

筆者ら(2020a, 2020b)は、吉川ら(2011)の内水氾濫解析モデルを低平水田地域(新潟県白根郷)

に適用し、同モデルで地区内の河川・排水路水位と湛水区域が精度良く再現できることを示している。吉川ら（2020）の流出成分可視化では、流出成分を農地・非農地に分けているが、本研究では、白根郷地区における豪雨時の湛水構成成分（湛水発生要因ごとの成分）を①自集水域雨水による湛水、②隣接地からの流入による湛水、③河川・排水路からの逆流による湛水、の3つに区分し、先のモデルで任意地点について湛水構成成分毎のハイドログラフ表示を試みた。従来のように湛水位や排水路水位を推定するだけでは湛水発生要因の特定は難しいが、湛水構成成分の見える化により湛水発生要因の判断が容易になる。また、湛水発生要因を明らかにした上で湛水軽減に効果的な排水対策についても検討した。

2. 対象地区の概要

本研究で対象とする白根郷地区は、新潟市南区に位置し、地区の排水面積 7,506ha、農地面積 5,778ha の稲作経営を主体とした農業地帯である。地区内は極めて平坦な地形で、地盤標高 T.P. -1m~+6m の間に分布し、特に下流部は T.P. -1m~+2m と起伏が小さい。本地区は、信濃川と中ノ口川に囲まれた完全輪中地帯で、地区内の地盤高よりも河川水位が高い状態にある。小排水路から支線排水路、幹線排水路、地区内河川である鷲ノ木大通川、西大通川を経て、常時は白根排水機場から、洪水時には、白根排水機場、中部排水機場、萱場排水機場の3つの排水機場から中ノ口川に排水される。

3. 内水氾濫解析モデルの概要

本研究では、吉川ら（2011）、宮津ら（2012）が開発した内水氾濫解析モデルを使用した。このモデルは、①各土地利用からの流出量を計算する地目別流出モデル、②河川と幹線・支線排水路の流れを一次元不定流として計算する河川・排水路網モデル、③氾濫水の伝播を計算する氾濫流解析モデル、の3つのサブモデルから構成される。地形適合セルという任意多角形によって水田畦畔などの微細地形を巧く表現した空間分割を行うとともに、隣接セル間の水移動を追跡できるようにした点に特徴がある。以下では、湛水構成成分に直接関連する①と③を中心としてモデルの概要を示す。

3.1 セルと排水路との流出入

低平地は、水田、畑、宅地など、異なる流出形態を持つ土地利用から構成されていることから、このモデルでは土地利用別に流出計算の基本単位となる地形適合セルを設定する。セルごとの流出入量を以下に述べる運動方程式で計算し、これを貯留方程式（降水量、隣接セルないし排水路からの流入、セルからの流出を考慮した連続式）と組み合わせてセル内の水位変化を追跡している。

水田からの流出は排水マスと樋管を経て排水路に排除される。よって、樋管、排水マスの流出入量をそれぞれオリフィス、セキの公式を用いて計算し、排水能力の小さい方を水田流出入量としている。

$$|q_{PO}| = C_P A \sqrt{2g(|h_P - y_P|)} \quad (|q_{PO}| < |q_{DO}| \text{のときに採用}) \quad (1)$$

$$|q_{DO}| = C_D B (|h_D - y_D|)^{3/2} \quad (|q_{PO}| > |q_{DO}| \text{のときに採用}) \quad (2)$$

ここに、 $|q_{PO}|$ ：オリフィス式による流出入量 (m^3/s)、 C_P ：オリフィスの流量係数（無次元）、 A ：孔断面積 (m^2)、 h_P ：オリフィス下端を基準とした田面水位 (m)、 y_P ：オリフィス下端を基準とした排水路水位 (m) (y_P の最小値は0とする)、 $|q_{DO}|$ ：セキ公式による流出入量 (m^3/s)、 C_D ：セキの流量係数 ($\text{m}^{1/2}/\text{s}$)、 B ：セキ幅 (m)、 h_D ：排水マスのセキ板上端を基準とした田面水位 (m)、 y_D ：排水マスのセキ板上端を基準とした排水路水位 (m) (y_D の最小値は0とする) である。

田面水位・排水路水位が畦畔高を超えた場合は、畦畔からの越流量を以下のセキ公式で計算している。

$$|q_P| = E_P B_P h^{3/2} \quad (3)$$

ここに、 E_P ：流量係数 ($m^{1/2}/s$)、 B_P ：末端排水路延長 (m) (畦畔越流が生じる区間長に相当)、 h ：畦畔上端を基準とした越流水深 (m) である。

畑地、市街地の浸水位 (セル水位) に応じた流出入量 (q_F , q_C) は、畦畔を越流した場合の水田と同様に以下のセキの公式によって計算している。ただし畦畔は設定しない。

$$|q_F| = E_F B_F h^{3/2}, \quad |q_C| = E_C B_C h^{3/2} \quad (4)$$

ここに、 E_F , E_C ：流量係数 ($m^{1/2}/s$)、 B_F , B_C ：末端排水路延長 (m) (越流が生じる区間長に相当)、 h ：地盤高を基準とした越流水深 (m) であり、添字 F , C はそれぞれ畑地、市街地を示す。

3.2 当該・隣接セル間の流出入

氾濫流解析では、流出量算定モデルで求めた当該・隣接セル間の流出入量 q_{ADJ} (q_{PO} , q_{DO} のいずれか、 q_P , q_F , q_C の合計値) からセル水位を算出し、隣接セル間に水位差が発生する場合は、非線形項である移流項を除外した以下の運動方程式と連続式を基礎式として、セル間の氾濫水移動の計算を行い、任意時刻におけるセル水位を最終的に決定している。

$$\frac{\partial q_{ADJ}}{\partial t} + ghl \frac{\partial \eta}{\partial s} = - \frac{gn_K^2 |q_{ADJ}| q_{ADJ}}{h^{7/3} l} \quad (5)$$

$$\frac{\partial \eta}{\partial t} = \frac{1}{A_K} \left(\sum_{i=1}^m q_{ADJi} \right) \quad (6)$$

ここに、 q_{ADJ} ：当該・隣接セル間の流出入量 (m^3/s)、 η ：氾濫セル水位 (m)、 n_K ：セルの粗度係数 ($s/m^{1/3}$)、 h ：線分境界との越流水深 (m)、 A_K ：セル面積 (m^2)、 l ：セル辺長 (m)、 s ：隣接セルとの重心間距離 (m)、 m ：隣接セル数、 i ：セル番号である。

4. モデルの適用結果

4.1 モデルの適用方法と検討対象出水

白根郷地区に先の内水氾濫解析モデルを適用し、排水路各点の水位ハイドログラフ、セルごとの湛水深を計算した。モデルは 21,000 個の地形適合セルと 454 点の河川・排水路網の計算点から構成される。セキ、オリフィスの流量係数、流路と氾濫域の粗度係数、有効雨量、排水機場の流量境界条件の扱いについては、既報 (瀧川, 2020a) を参照されたい。検討対象出水は、平成 23 年 7 月 27 日～30 日出水と、平成 28 年 9 月 28 日～30 日出水、の 2 出水である。前者の出水では大きな湛水被害が生じている。

4.2 排水路水位、湛水区域の再現性

Fig.1 に万年橋地点、萱場排水機場地点における 2 出水の水位ハイドログラフを示す。2 出水ともピーク水位および水位波形は良好に再現できている。他の水位観測所地点についてもピーク水位、水位波形が概ね良好に再現できていた。

平成 23 年 7 月出水の湛水区域図を **Fig.2** に示す。実績の湛水区域図は、地元土地改良区が最大湛水深 30cm 以上の区域を目視で現地調査したものである。実績と計算の湛水区域を比較すると、下流部の湛

水区域は実績と計算がほぼ合致している。中・上流部の湛水区域は、湛水が生じている場所は概ね再現できているが、計算の方が実績よりも湛水区域がやや小さく見積もられている。水田域に限って実績と計算の湛水面積を比較すると、最大湛水深 30cm 以上の湛水面積は実績の 8 割程度であり、目視調査された実績湛水区域にはある程度の誤差が含まれることを考慮すれば湛水面積の再現結果は悪くはない。

5. 湛水構成成分の見える化

5.1 湛水構成成分の計算方法

湛水発生要因に応じ、①自集水域雨水による湛水、②隣接地からの流入による湛水、③河川・排水路からの逆流による湛水、の 3 成分に湛水を分けた。各湛水構成成分の内容と算定式を **Table 1** に示す。

Table 1 各湛水構成成分の内容と算定式

項目	内容	算定式
①自集水域雨水による湛水	当該セルの有効雨量	当該セルの有効雨量×流域面積
②隣接地からの流入による湛水	隣接セルから当該セルへの流入量	(5),(6)式により求められる量
③河川・排水路からの逆流による湛水	河川・排水路から当該セルへの流入量	(1),(2),(3),(4)式により求められる量

当該セルの湛水量に対する各成分の比率は、(7)式により求める。当該セルへの成分ごとの流入量は **Table 1** によって求めるが、当該セルから河川・排水路や隣接セルへの流出量に対しては、前時刻の成分割合をそのまま適用し、成分湛水量から成分ごとの流出量を差し引いた。初期湛水深は 0 とし、計算時間刻みは 1 秒である。このようにして、セルごとに成分分離された湛水量の時系列を計算した。

当該時刻の成分割合＝

$$\frac{\text{前時刻の成分湛水量} + \text{計算時間刻み内の成分流入量} - \text{成分流出量}}{\text{前時刻の湛水量} + \text{計算時間刻み内の流入量} - \text{流出量}} \quad (7)$$

5.2 検討対象出水と計算条件

検討対象出水は 30 年確率降雨による出水とし、草本の繁茂や土砂堆積が見られる地区内河川を現況のままとしたケースと、草本の伐採や堆積土砂の撤去など河川管理を適切に行って通水能を改善したケースの 2 ケースの計算を実施する。排水解析の計算条件を **Table 2** に示す。

Table 2 排水解析の計算条件

項目	内容
降雨	30 年確率 3 日連続雨量 268.3mm (中央主山型 24 時間モデル降雨を 3 日分連結, 2 日めに最大ピークを与えたもの, 主要排水施設設計時採用の降雨波形)
外水位	30 年確率外水位で一定 (主要排水施設設計時の外水位)
保留量	出水期間の排水機場排水量と雨量から水収支を考慮して求めた土地利用別の雨水保留量曲線に基づいて有効降雨を推定
基底流量	出水前期の排水機場排水量に基づいて求めた当地区の平均的な基底流量
排水施設	排水機場操作は排水機場管理規程に従う
計算ケース	Case 1 : 地区内河川現況ケース (地区内河川の粗度係数 $n=0.030\sim 0.060$) Case 2 : 地区内河川改善ケース (地区内河川の粗度係数を $n=0.030$ に改善)

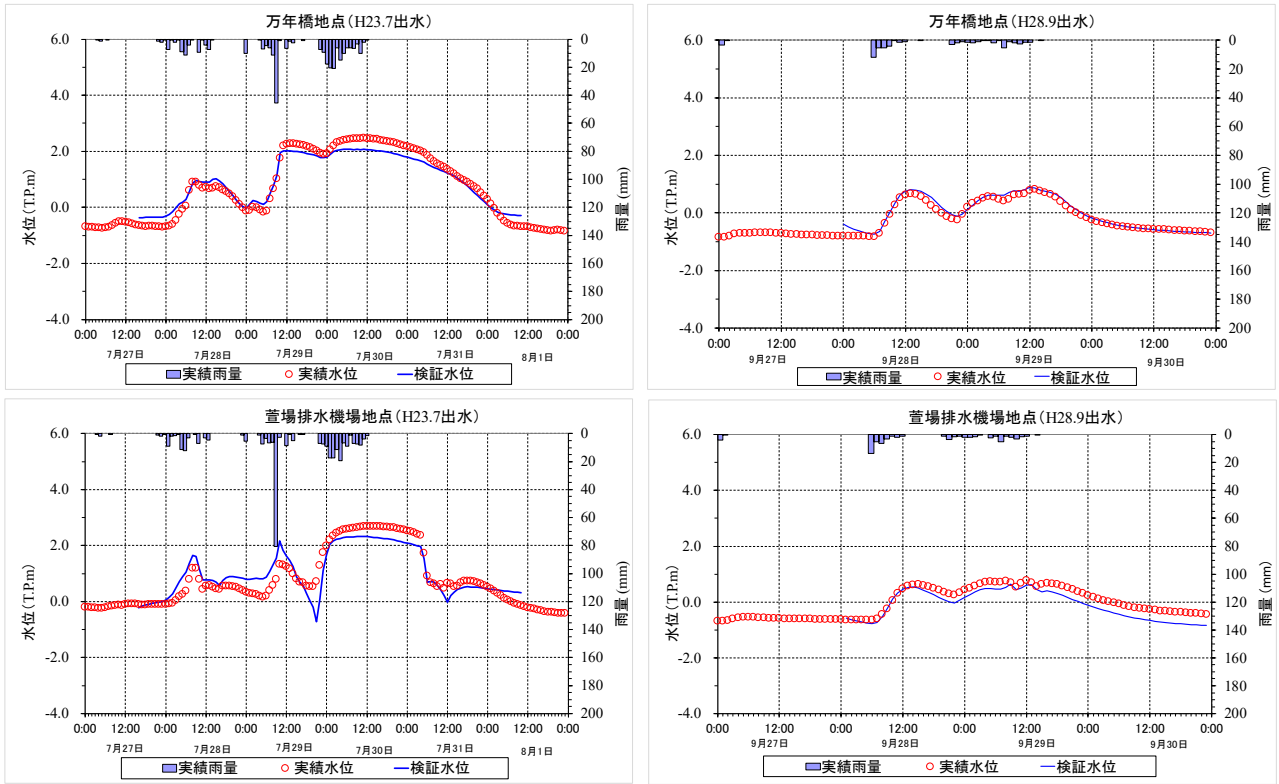


Fig.1 水位ハイドログラフの再現結果 (左：平成23年7月出水，右：平成28年9月出水)

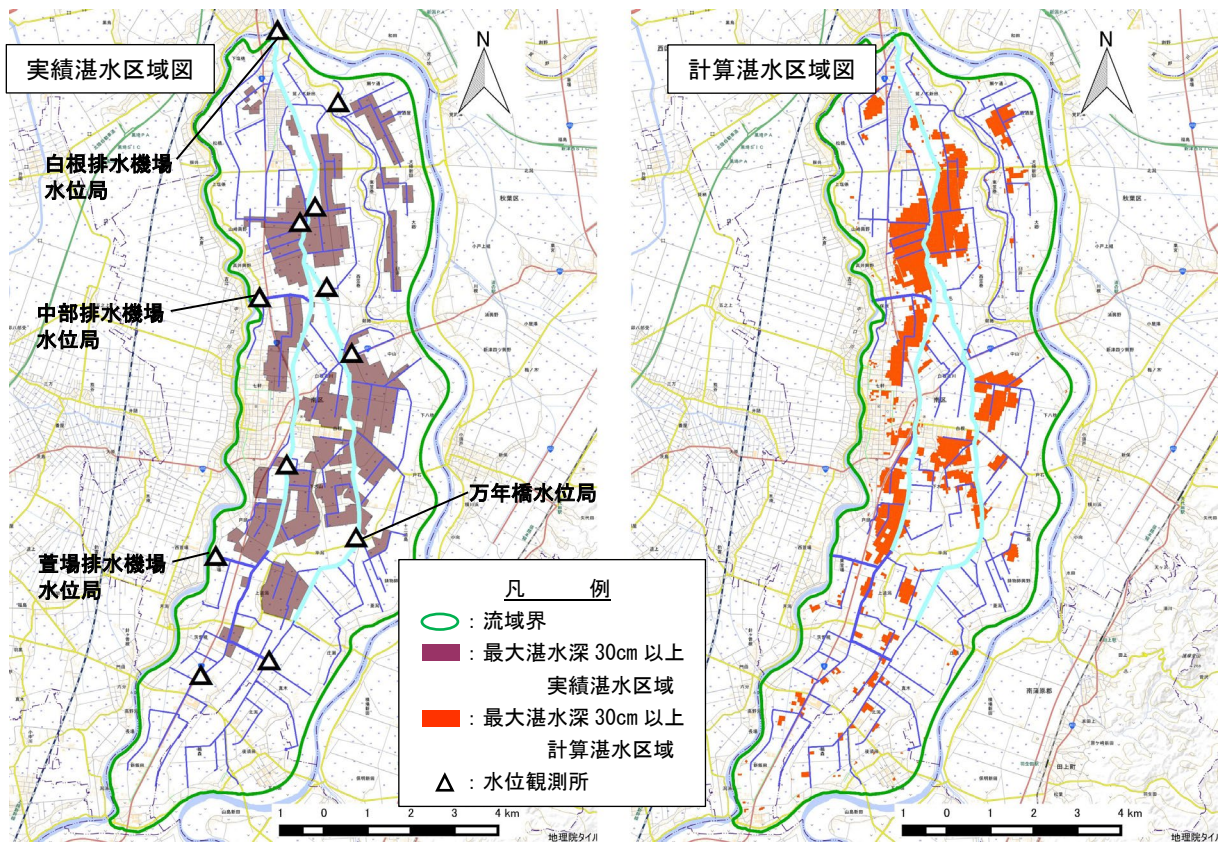


Fig.2 湛水区域図 (平成23年7月出水，左：実績，右：計算)

5.3 湛水構成成分の見える化の結果

Case 1 と Case 2 の湛水区域図を Fig.3 に示す. Case 1 では, 上中下流に 30cm 以上の湛水が発生している. Case 2 では, 地区内河川の管理で粗度を小さくしたところ上流の湛水は軽減したが, 下流部の湛水は逆に増加した. 上流, 下流の湛水域から抽出したセル (Fig.4) について湛水構成成分を検討した. なお, ここで抽出したセルの土地利用はいずれも水田である.

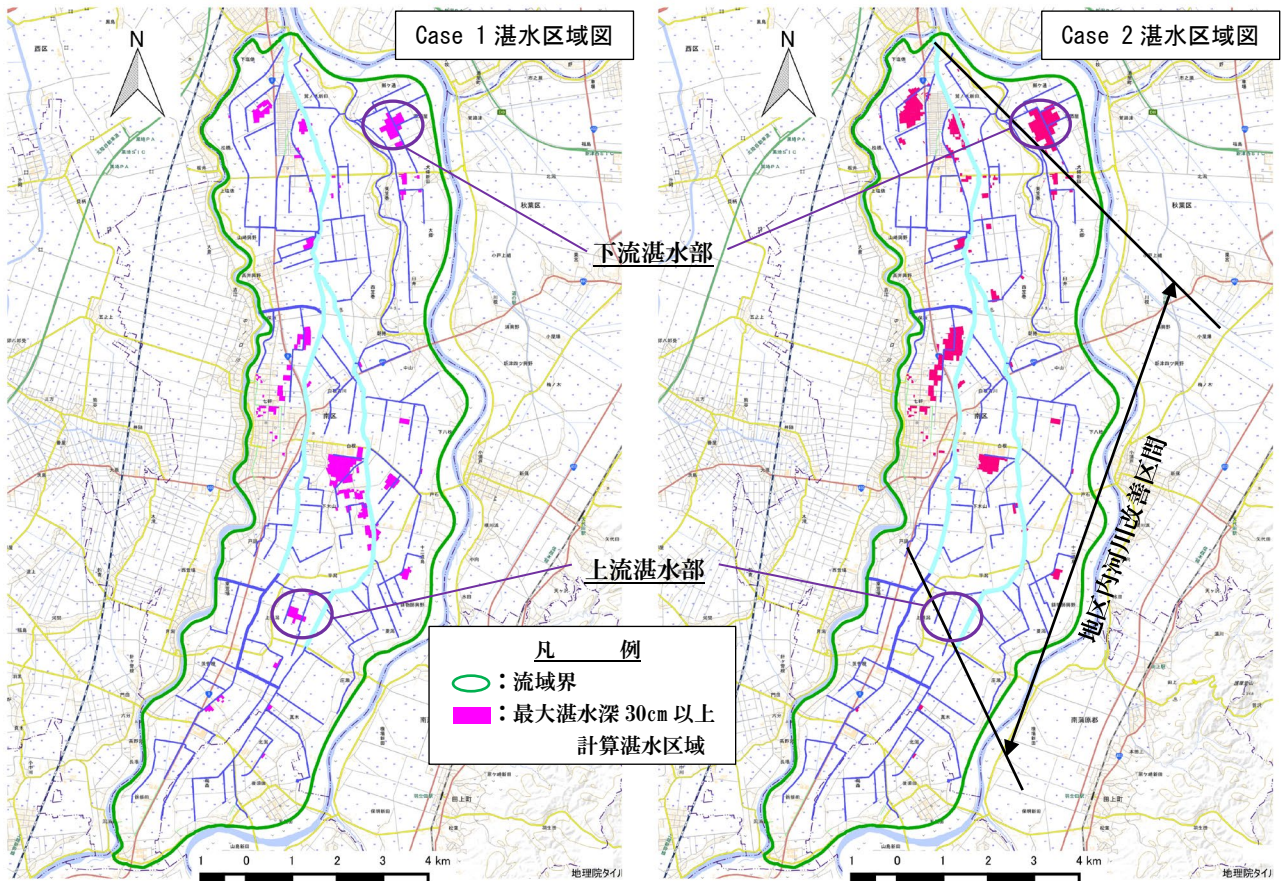


Fig.3 30年確率降雨に対する湛水区域図 (左: Case 1, 右: Case 2)

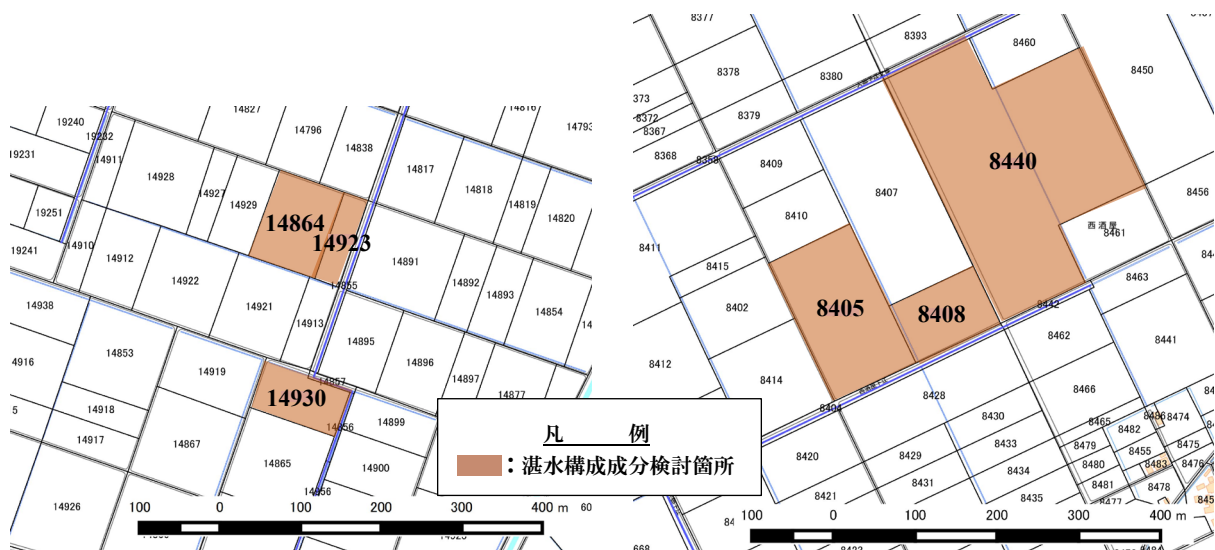


Fig.4 湛水構成成分の検討箇所 (左: 上流部, 右: 下流部)

5.3.1 上流部

上流部のセルにおける湛水構成成分を **Fig.5** に示す。セル標高は No.14930→14923→14864 の順で低くなる。隣接地からの排水は高標高部から低標高部に向かって移動するため、低標高部は隣接地からの流入による湛水の割合が大きくなる。一方、高標高部は隣接地からの流入が少ないため、自集水域雨水による湛水の割合が大きくなる。なお、水田セルの境界線上には畦畔があるが、実際の畦畔高は標準的な 30cm とは限らないため、湛水深が 30cm 以下でもセル間の水移動が生じている。

Case 1 と Case 2 を比較すると、Case 1 と比べて Case 2 の方が全般に湛水深が小さい。湛水深の減少に対しては、隣接地からの流入の減少が最も寄与しており、次に河川・排水路からの逆流の減少が寄与している。これは地区内河川の適切な管理で河川の通水能が増加すれば、隣接地への湛水移動量が減少するとともに、河川・排水路から水田への逆流も減少することを示している。

また、排水先排水路水位と浸水位のグラフを見ると、ピーク浸水位発生時刻付近の水位は、排水路水位、セル浸水位ともに Case 2 の方が低い。排水路水位の低下は 5cm 程度であるが、高標高部を除けばセル浸水位の低下は 10cm 程度であり、隣接地からの流入による湛水が減少したと考えられる。

5.3.2 下流部

下流部のセルにおける湛水構成成分を **Fig.6** に示す。セル標高は No.8440→8408→8405 の順で低くなる。下流部では河川・排水路からの逆流が生じていないが、隣接地からの流入を主因とした湛水が生じている。これは河川・排水路の水位上昇が比較的穏やかで、逆流が生じるほどの水位上昇に至っていないものの、水田との水位差が小さくなって水田排水が滞り湛水深が増加したためと考えられる。

Case 1 と Case 2 を比較すると、上流部とは逆に湛水深は Case 1 と比べて Case 2 の方が大きくなっている。これは、河川の通水能が増加すると上流域から下流域への流下量が増加するが、排水機場能力を超過する水量が下流側に迅速に流下して河川・排水路水位が上昇し、逆流には至らずとも水田からの排水量が減って湛水が生じやすくなり、隣接地からの湛水移動量が増大したと考えられる。

5.3.3 効果的な排水対策

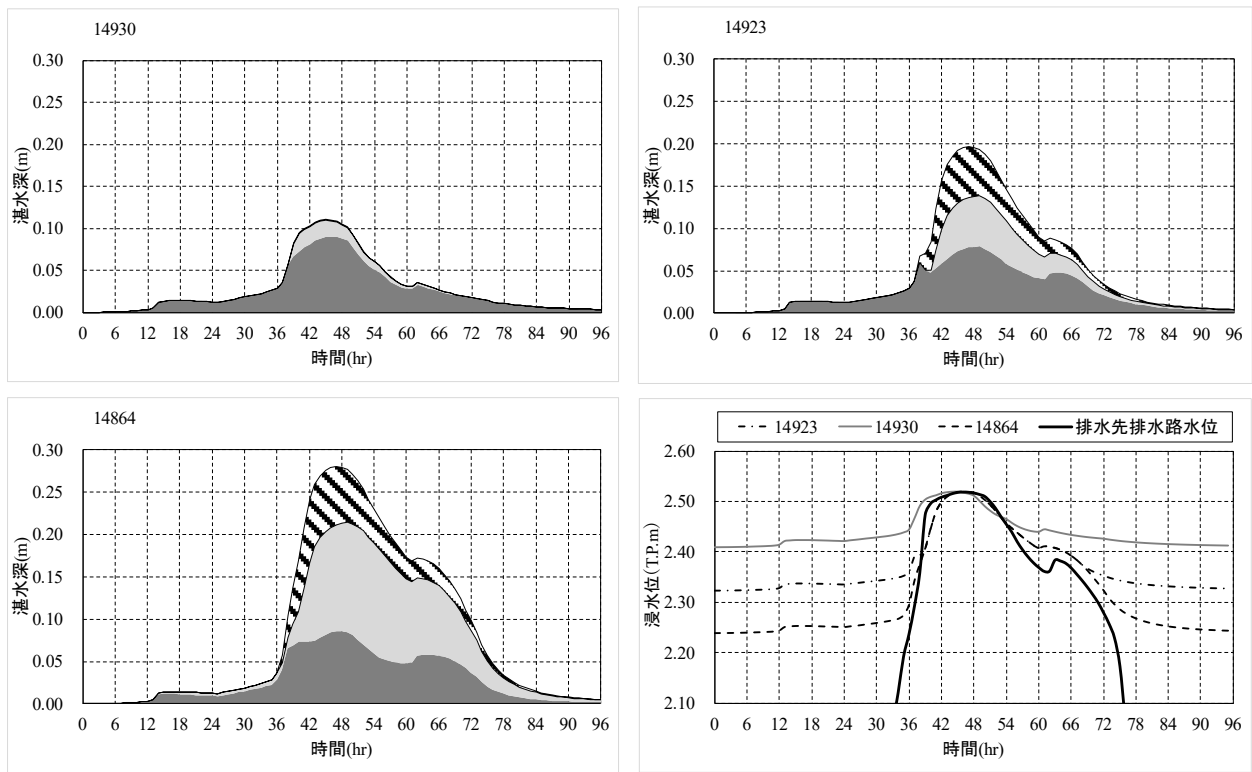
上・下流部のセルにおいて湛水構成成分の見える化を実施したところ、流域の上下流や排水改善の有無によって湛水構成成分が変化すること、同じ上流部、同じ下流部の比較的近いセル群においても、セルの平均標高の違いによって湛水深が異なり、湛水構成成分にも違いが生じることが示された。

内水氾濫解析モデルを利用した湛水構成成分の見える化によれば、豪雨時に湛水深が高くなり作物への被害が想定される箇所を特定するだけでなく、湛水構成成分を示すことで、湛水発生の原因をセルごとに明らかにすることが可能となる。

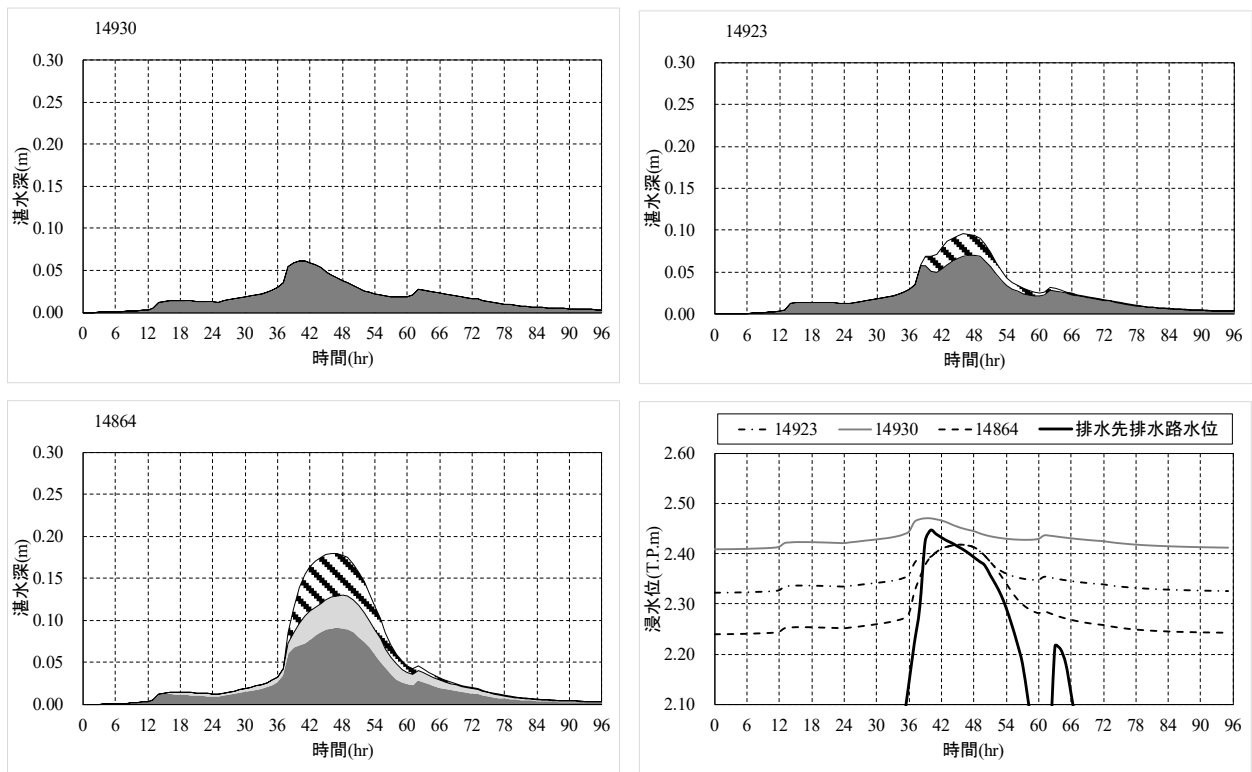
湛水構成成分の内、どれが卓越するかによって、また、流域の上流側か、下流側かによって湛水を軽減するための排水対策は異なる。河川・排水路から水田への逆流が生じる場合は、通水能を向上させて河川・排水路の水位を下げる対策がとくに効果的であるが、逆流に至らない場合でも河川・排水路の水位が上昇して水田との水位差が小さくなれば、水田からの排水が滞り湛水深は上昇しやすくなるから、河川・排水路の水位を下げることはやはり湛水軽減に効果的である。しかしながら、本研究の検討では下流側でこの効果が発現していない。河川・排水路の通水能の増強は下流側に迅速に水を集め、これが下流域の水位を上昇させるから、通水能の向上はかえって河川・排水路の水位を上昇させる。このため、下流域の湛水軽減を図るには、ポンプ排水量の増強の方が効果的であろう。

以上のことは、河川・排水路の整備や維持管理を行うに当たっては、流域全体への影響を慎重に考慮すべきことを示唆している。今後は、河川・排水路の拡幅やポンプ場の設置・増強なども含めた検討を実施して、流域全体で湛水を軽減できる方策を検討する必要がある。

【Case 1：地区内河川現況ケース】



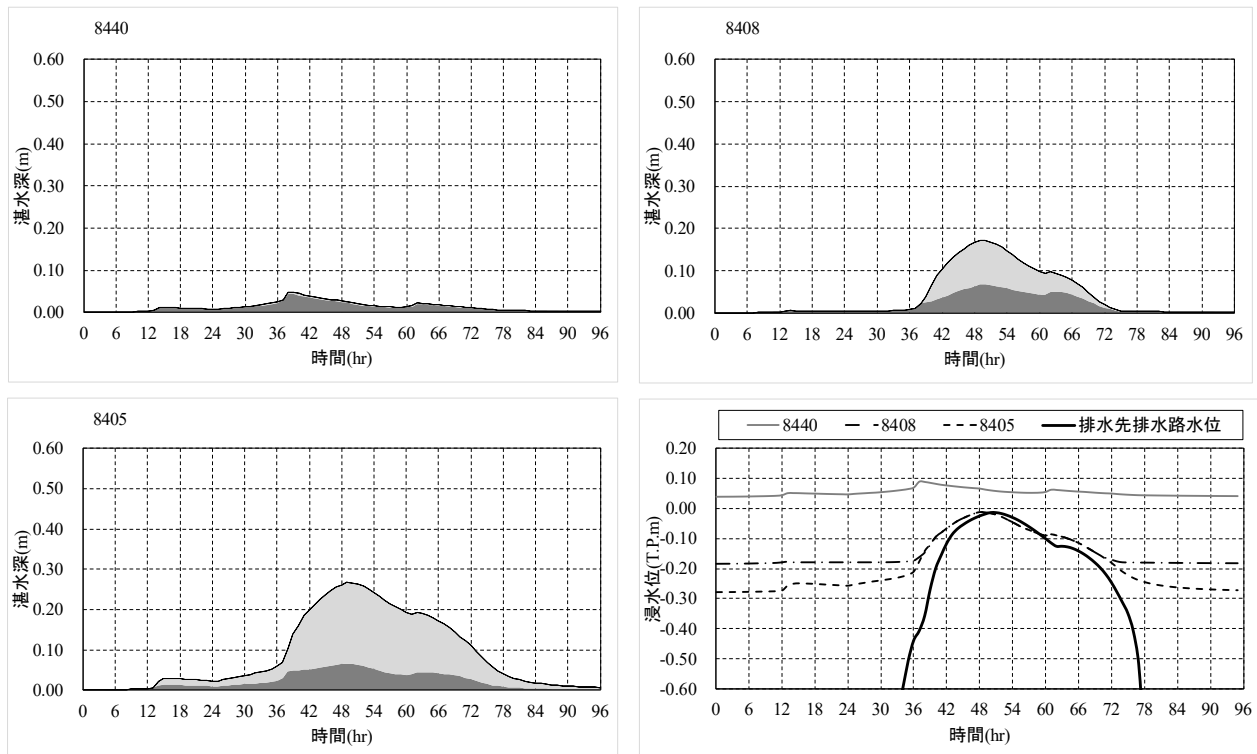
【Case 2：地区内河川改善ケース】



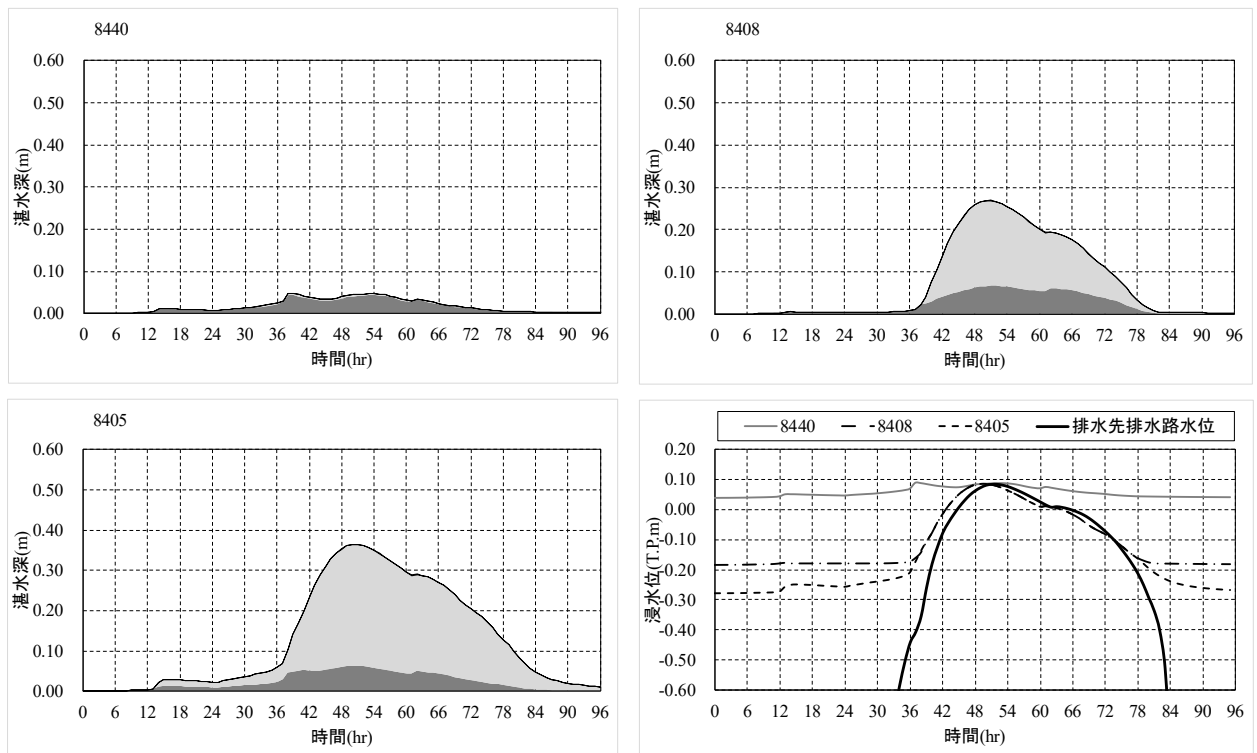
凡例 ■：自集水域雨水による湛水 ■：隣接地からの流入による湛水 ▨：河川・排水路からの逆流による湛水

Fig.5 上流部のセルにおける湛水構成成分（30年確率降雨）

【Case 1：地区内河川現況ケース】



【Case 2：地区内河川改善ケース】



凡例 ■：自集水域雨水による湛水 ■：隣接地からの流入による湛水 ▨：河川・排水路からの逆流による湛水

Fig.6 下流部のセルにおける湛水構成成分 (30年確率降雨)

6. おわりに

本研究では、吉川ら（2011）、宮津ら（2012）が開発した内水氾濫解析モデルを新潟県の白根郷地区に適用し、30年確率3日連続降雨を対象として、湛水構成成分を①自集水域雨水による湛水、②隣接地からの流入による湛水、③河川・排水路からの逆流による湛水、の3つに区分し、湛水構成成分の見える化を実施した。その結果、湛水発生要因が流域の上・下流によって異なることが示された。また、排水路の維持管理によって通水能を向上させた場合に上流域と下流域で生じる湛水深の変化とその変化の要因が示された。

具体的には、白根郷地区の上流側の湛水区域では、自集水域雨水による湛水、河川、排水路からの逆流、隣接地からの流入がそれぞれ湛水に寄与していることが示された。一方、同地区の下流側の湛水区域では、隣接地からの流入による湛水が明らかに卓越していることが示された。また、河川の通水能を向上させた場合は、上流域では河川・排水路水位、湛水深ともに低下し、湛水軽減に効果的な対策であったものの、下流域においては河川・排水路水位と湛水深がかえって大きくなること、湛水深増加の原因は隣接地からの流入の増加によることが示された。このため、下流域の湛水を防ぐためには、ポンプ排水量の増強の方が効果的と推察された。このように湛水構成成分の見える化は、湛水要因の特定とそれを踏まえた排水対策の選定に有効であることが分かった。

近年、雨の降り方の集中化、激甚化や都市化の進展等に伴い、浸水被害が多発している。これらの浸水被害への対応を図るため、ハード・ソフトを組み合わせた総合的かつ効率的な治水対策を実施する必要がある。そのためには、地区内の湛水が、河川や排水路から溢れた水によるものなのか、隣接地から移動してきた水によるものなのか、といった湛水構成成分を踏まえた治水対策の選定が重要となる。今後はこのモデルを利用して湛水構成成分から湛水発生要因を細かく分析し、河川・排水路の拡幅やポンプ場の設置・増強なども含めて対象地区の湛水軽減に効果的な対策について検討したい。

謝辞：本研究における解析は、白根郷信濃川下流地区のかんがい排水事業に関わる調査業務の一部として実施されたものである。本研究を実施するにあたり、新潟大学農学部・吉川夏樹准教授から内水氾濫解析モデルのプログラムをご提供いただくとともにご指導いただいた。また、農林水産省北陸農政局信濃川水系土地改良調査管理事務所から水文データを提供していただいた。サンスイコンサルタント株式会社からは内水氾濫解析モデルの適用に際して多大な協力を得た。ここに記して感謝の意を表します。

引用文献

- 佐山敬洋, 建部祐哉, 藤岡 奨, 牛山朋来, 田中茂信 (2013) : 大規模洪水氾濫の時空間起源分析に関する研究, 土木学会論文集 B1 (水工学), Vol.69, No.4, pp.I_463-I_468
- 瀧川紀子, 田中丸治哉, 多田明夫, 森田孝治, 宮島真理子 (2020) : 低平水田地域における内水氾濫解析モデルの検証—白根郷地区への適用結果—, 応用水文, No.31, pp.1-10
- 瀧川紀子, 田中丸治哉, 多田明夫 (2020) : 低平水田地域における内水氾濫解析モデルの適用比較, 土木学会論文集 B1 (水工学), Vol.76, No.2, pp.I_145-I_150
- 宮津 進, 吉川夏樹, 阿部 聡, 三沢眞一, 安田浩保 (2012) : 田んぼダムによる内水氾濫被害軽減効果の評価モデルの開発と適用, 農業農村工学会論文集, No.282, pp.15-24
- 吉川夏樹, 宮津 進, 安田浩保, 三沢眞一 (2011) : 低平農業地帯を対象とした内水氾濫解析モデルの開発, 土木学会論文集 B1 (水工学), Vol.67, No.4, pp.I_991-I_996
- 吉川夏樹, 高野陽平 (2020) : 地域排水における地目別流出成分可視化モデルの開発, 土木学会論文集 B1 (水工学), Vol.76, No.2, pp.I_781-I_786