

①技術研究 開発テーマ名	田園型拠点都市に特有の内水被害の予測技術開発と軽減策の立案	
②研究代表者		
氏名	所属・役職	
安田浩保	新潟大学災害復興科学研究所・准教授	
③共同研究者		
氏名	所属・役職	
吉川夏樹	新潟大学農学部・准教授	
④背景・課題		
<p>新潟市は、国内屈指の水田地帯と稠密な都市部から混成されている我が国で唯一の田園型拠点都市である。河川を含む高密度な水路網や広大な低平地のため、構造的な弱点である外水に対して磐石な社会基盤の整備が進められてきた。その一方で、現在でも発生頻度が高いうえ、今後の気候と社会構造の変化によりますます頻発することが予想される内水に対しては依然として脆弱なままであると言わざるを得ない。</p> <p>内水による浸水被害は、現象進展が非常に緩慢かつ低水深であることが要因となり、確立の域に達している外水氾濫の予測技術の単純流用では実用で求められる計算精度は確保できない。そのうえ、内水の予測計算は外水のそれと比べると、水深や継続時間の計算精度に対して厳しい要求が課せられるため、高密度・高精度な地形形状の数値情報の導入が不可欠である。近年、レーザプロファイラが導入されて地形情報の取得負担は大幅に軽減された。しかし、このような数値地形情報を簡便かつ有効に同種の予測計算に活用する方法は見出されていないのが現状である。</p>		
⑤技術研究開発の目的		
<p>前述の内水解析における2つの課題解決により、その被害ポテンシャルの評価技術は飛躍的に向上することが期待できるが、被害ポテンシャルが高い状態に変わりはない。申請者らは、水田地帯からの流出に遅延対策を施すことで治水機能の部分的な負担が可能という田園型拠点都市に独特の軽減策の技術的な検討を先導的に行ってきた。その結果、既存治水施設の治水機能を補完するだけの効果を発揮することが実証されつつある。本研究では、内水氾濫の予測技術の開発だけにとどまらず、田園型拠点都市ゆえの水田と都市との治水上の相補性に着目した内水氾濫の軽減案を提示する。具体的には、次の3つの要素研究を実施することで目標実現を目指す。まず、(1)内水氾濫などの低水深かつ挙動が緩慢な浸水現象に対応した予測計算法の開発、(2) 内水氾濫の予測計算に最適となるようにレーザプロファイラデータの特性を最大限に利用した計算格子の自動生成技術の開発を行う。次に、(3) 開発した予測技術を援用した水田を治水補完機能を(信濃川下流域)に導入した場合の内水氾濫の被害ポテンシャルの評価と軽減策の立案を行う。</p>		

⑥技術研究開発の内容・成果

1.内水氾濫解析モデルの開発

1.1 既往の研究

これまで内水氾濫現象を扱った研究の多く（例えば、戸田ら、川池ら、相良ら）は、都市域を解析対象の氾濫原としており、氾濫水は下水道を通じて系外へと排出されることを想定している。一方、農業主体の低平流域においては、下水道が整備されていない場合が多く、氾濫原を構成する農地や市街地からの流出水は、末端排水路を経由して支線・幹線排水路に流入する。この場合、排水路の溢水およびそれに伴う浸水現象の表現には、流出特性の異なる土地利用属性毎の横流入量の把握が重要となる。

こうした特徴をもつ低平農業地帯の内水氾濫現象を扱った研究として、早瀬・角屋による低平地タンクモデルがある。このモデルでは、低平水田地帯が遊水機能を持つ多数の水田群とそれらを連絡する排水路網で構成されていることに着目し、解析領域を水田タンクと河道タンクによって表現する。前者と後者を越流堰によって連結し、両者の水収支を逐次計算することで流出機構の単純化に成功している。しかし、水田タンクは10haほどの水田区画群の集合体として表現されているため、水田タンク内の地形形状を忠実に再現できないだけでなく、隣接する水田タンク間の水移動が考慮されていないため、浸水範囲および浸水継続時間の厳密な算定は困難である。

1.2 開発したモデルの全体構成

解析モデルは、図 1に示すとおり、各土地利用からの流出量を計算する流出入量算定モジュール、排水路の流れを計算する一次元不定流モジュールおよび氾濫水の平面的な伝播を計算する氾濫流モジュールの3つから構成することにした。

解析対象領域は排水区域および計算点を配置するセルの2つのレベルで分割することにした。ここで、排水区域とは、一次元不定流モジュールにおける任意の距離で分割された河川および幹線・支線排水路網の各メッシュに横流入量として流入する区域を示す。一方、セルとは、溢水後の氾濫水の空間的な伝播を表現するために分割した格子である。本研究では、安田らに依って提案されている、氾濫水の伝播に影響を与える道路等の線状構造物、標高差、土地利用属性に基づいて各セルの形状を任意多角形で表現する「地形適合型セル」を採用することにした。

地形適合セルは土地利用属性ごとに設定されており、水田、畑地（転作田を含む）、市街地（集落等の住区を含む）の3分類とした。それぞれのセルから排水路への流出および排水路の水位上昇によるセルへの氾濫水の流入は、各セル内に仮定した末端排水路を通じて発生する。各モジュールにおける計算方法の詳細を以下に示す。

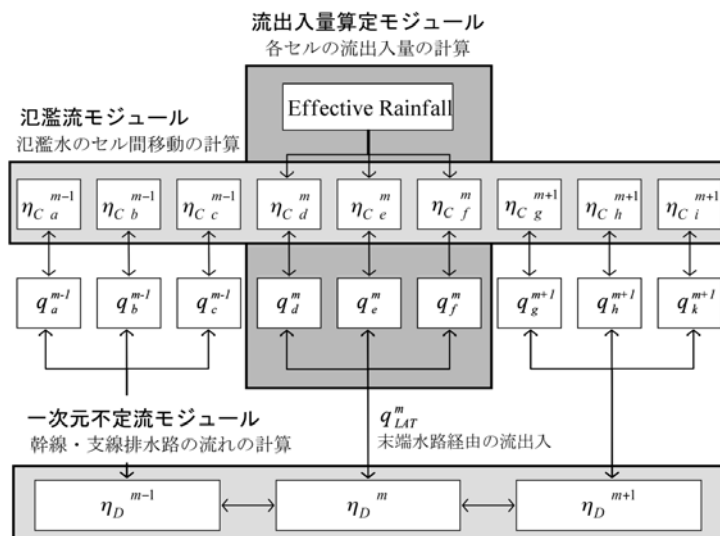


図 1 モデルのフレームワーク

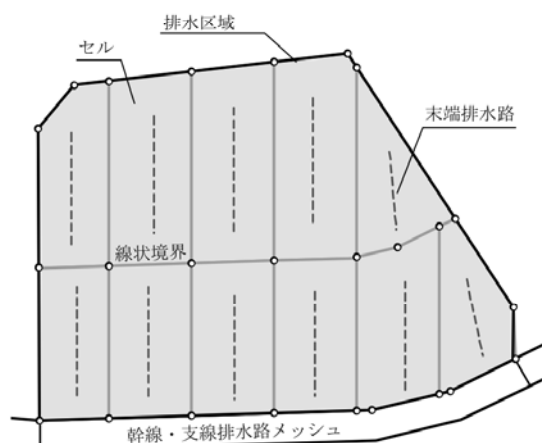


図 2 解析対象領域のモデル概念

1.3 水路網の解析法

流域内の河川および幹線・支線レベルの全排水路網を任意の距離でメッシュに分割した。流れの計算には、運動の式と連続の式からなる一次元不定流解析を採用した。

1.4 セルと水路網の間での流入出量の算定

各セルからの流出水は、セル水位に応じてセル内に仮定した末端排水路を通じて排水区域に接続する幹線・支線排水路メッシュに流入する。末端排水路の水位は、接続先の排水路メッシュの水位と一致すると仮定した。通常、末端排水路—支線排水路間には、ゲート等の通水に障害となる施設はなく、排水区域を十分に小さく設定すれば、水位の伝播に要する時間は短いと考えられるためである。したがって、流出先排水路メッシュの水位が上昇した場合、末端排水路の水位と各セルの水位を比較して、前者が後者を上回る場合は、セル内に溢水が流入する。すなわち、末端排水路は、セル内の雨水の流入出を制御するインターフェイスとして機能し、接続先排水路への横流入量は正の値も負の値もとりに得る。

1.5 氾濫水の平面流動の解析法

氾濫流モジュールでは、流入出量算定モジュールにおけるセル—排水路間の流入出の結果求められたセル水位に基づき、隣接セル間の水位差からセル間の氾濫水移動の計算を行い、任意の時間ステップにおけるセル水位を最終的に決定する。

1.5.1 地形適合セルの特徴

内水氾濫解析の中心モジュールのひとつとなる平面的な流況解析は、平面2次元の浅水流問題として扱うのがもっとも合理的であろう。岩佐らによりはじめて氾濫流況の平面2次元の数値解析が行われた。その後、市街地などの複雑な形状の境界適合の必要性が指摘されるようになり、福岡らは一般座標に基づく解析方法を提案した。構造格子型の一般座標では境界適合の自由度は必ずしも高くないうえ、格子構成の負担は複雑になるほど大きくなる。この問題の解消とさらに自由度の高い境界適合のために川池らや秋山らは非構造型格子を導入した解析法を提案している。安田らは格子分割の基本的な考え方を非構造型としながら、土地利用や地形形状に合わせて能動的な格子分割を行う地形適合セルを提案し、計算の効率化と精度維持の両立に成功している。

こうした各手法の特徴を踏まえ、本研究の対象領域である低平農業地帯の地形特性への適合性および計算効率における優位性が高い安田らによる地形の記述方法を採用した。この方法は、道路などの線状構造物や地盤標高の変化を考慮した任意多角形による自由なセル形状の設定が可能な点に

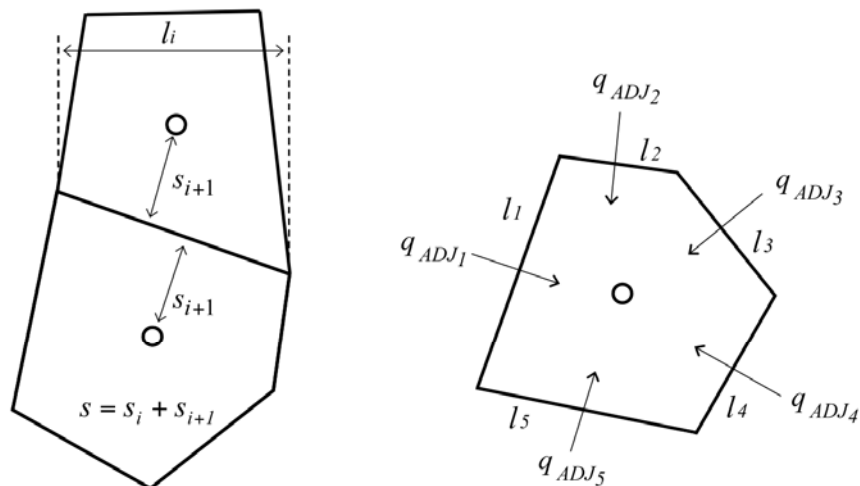


図 3 地形適合セルの運動の式と連続の式の変数の定義位置

大きな特徴がある。集落などの氾濫水伝播に影響を与える構造物が密集する箇所や地形勾配が相対的に大きな箇所において、計算点配置密度を高く、均平が保障されている水田区画（あるいは水田圃区）などで低く設定できる。水田区画内に同標高の計算点を多数配置する従来デカルト座標に基づく手法と比較して、計算点数が大幅に減少し、計算効率性の向上につながる。

各セルの標高情報は、セル内の平均標高に加えてセルを構成する線分にも標高値を個別に与える。このため、従来のデカルト座標に基づいた手法では、計算格子の解像度を高く設定しない限り考慮しづらかった線状構造物による流動への影響を、線分境界によって反映させることができる。こうした特徴は、特に道路等の構造物を除いて起伏に乏しい低平水田地帯を対象とする場合に有効な手法であるといえる。

1.5.2 支配方程式

低平地域における内水氾濫に由来する氾濫流の挙動は緩慢である。こうした特性と計算負荷軽減の観点から、氾濫流の計算には、非線形項である移流項を除外した運動の式と任意で多角形に適合するように拡張された連続の式を基礎式として用いる。

2. 開発モデルによる白根郷地区の内水プロセスの解明

2.1 対象地域の概要

対象地は図に示した新潟県新潟市南区白根郷地区である。本地区は新潟市の南部に位置し、東側の信濃川、西側の中ノ口川に囲まれた東西約4-5km、南北約19km（流域面積 7,460ha）の完全低平輪中地帯である。主な土地利用は、水田 60%、市街地・集落 30%、畑地・転作田 10%である。輪中地帯の本地区では自然排水が困難であるため、排水は全量が機械で行われている。平常時は地区最下流の白根排水機場のみが排水を担い、洪水時には白根排水機場に加え、2ヶ所の洪水時排水機場（中部排水機場、萱場排水機場）と3ヶ所の中間排水機場（笠巻排水機場、高井排水機場、白井排水機場）が連携して信濃川と中ノ口川に排水を行う。なお、各排水機場のポンプ運転は運転基準に則り、事前排水等の操作は土地改良区職員が手動で行なっている。本地区は3日間連続の30年確率雨量を想定した排水計画が立てられているが、現状の排水体制では近年多発している短期集中型降雨に対応できない場合があり、浸水被害が発生している。本地区では、洋ナシ、ブドウなどの果樹や大豆の栽培が盛んであるが、これらは湛水に弱く、一度の湛水で甚大な経済的損失をもたらす。こうしたことから、都市域に加え農業地帯の浸水被害軽減を図るため、2009年に田んぼダムが導入された。

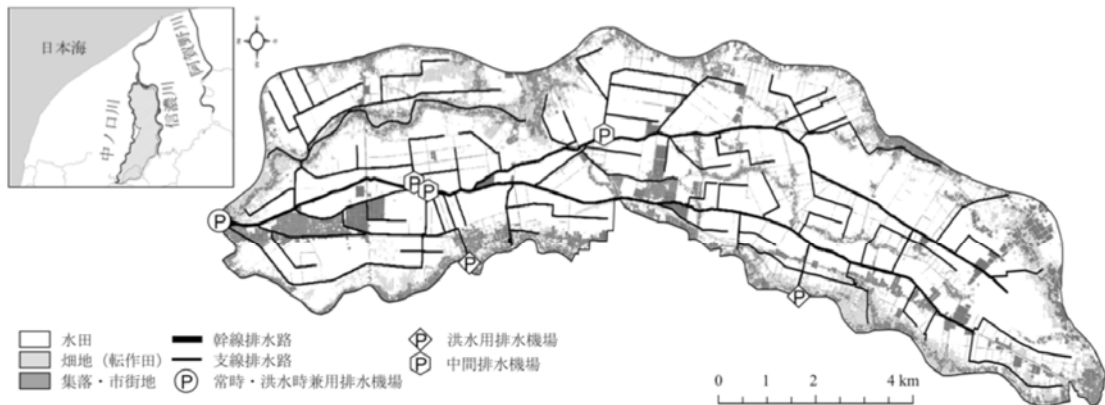


図 4 新潟市白根郷の概略図

上記までに開発された内水氾濫解析モデルに基づき白根郷地区のモデル化を行った。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量算定モデル、(2)排水路網の流れを計算する河川・排水路網流れの解析モデル、(3)氾濫水の伝播を計算する氾濫流解析モデルの3つのサブモデルで構成される。地目別流出量解析モデルのアウトプットは、排水路網流れの解析モデルにおける横流入量としてのインプットとなり、排水路水位を算出する。河川・排水路網流れの解析モデルにおける河川・排水路流量が通水可能量を超える場合の溢水量が、氾濫流解析のインプットとなり、氾濫流解析モデルにおいて、氾濫原の水位を決定する。各土地利用からの流出量は、この氾濫原水位から算出する。このように、それぞれのサ45モデルの計算結果である水位が互いの境界条件もしくは計算条件となる。本モデルは、各土地利用からの流出量を忠実に再現できるうえ、「地形適合セル」の導入によって、低平地の地形的特徴を効果的かつ効率的に表現できる点に基本的特徴がある。

2.3 流域のモデル化

セル・幹線・支線排水路間の流出入を支配する各排水路メッシュに対応した排水区域は、管轄土地改良区から提供された排水系統図に基づいて作成した。

各排水区域内のセルの規模・形状は、土地利用属性、道路等の線状構造物、地盤標高によって決定した。各セルの作成には、オルソ化空中写真、地盤標高の取得には、国土交通省により整備されたレーザープロファイラデータ(水平解像度5m,鉛直方向精度0.1m)をそれぞれ利用した。なお、一般道については、セルの線分境界によって表現したが、一部の幅員の大きい道路は市街地セルとして扱った。この領域を矩形格子で表現した場合に比べて大幅にセル数を削減しながら、合理的な地形記述に成功している。

地形適合セルによる計算には、セルの重心点、平均地盤標高、線分標高、隣接関係等の構造化された情報が必要となるが、この作業には多大なる労力を要するため、これが本手法の普及の支障となっていた。筆者らは、昨年度までに自動処理アルゴリズムを開発して、この作業を半自動化することに成功し、大幅な効率化を実現している。

2.4 計算条件

妥当性検証に用いた降雨イベントは、2011年7月28日-7月30日に発生した平成23年7月新潟・福島豪雨(総雨量351mm,時間最大雨量56mm)である。地区内の7カ所の雨量観測所で観測された雨量から、ティーセン法を用いて面積平均雨量を求めた。ただし、各土地利用からの流出量の妥当

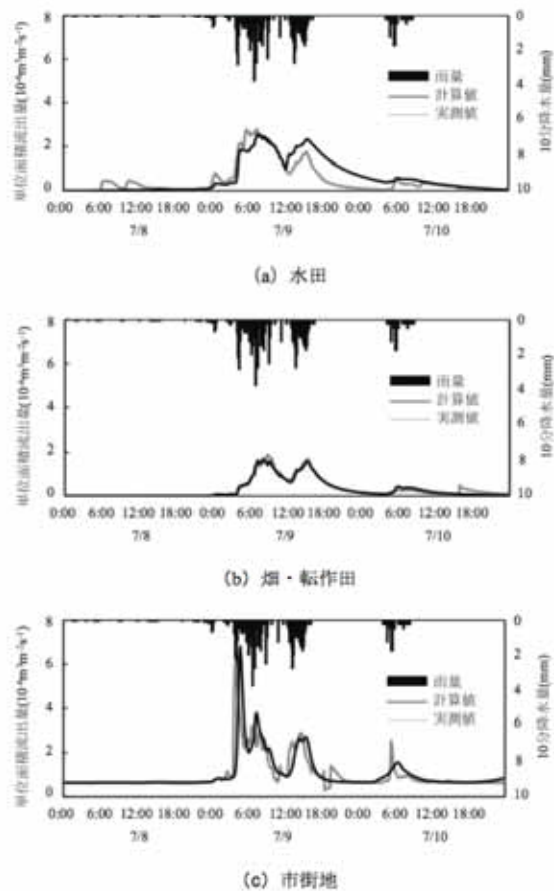


図 5 各土地利用属性からの流出量と幹線排水路水位の実測値と計算値の比較

性検証については、今回の洪水時のデータが存在しないため、筆者らの現地観測期間で最大の日雨量を記録した2009年7月8日-7月10日（総雨量115mm，時間最大降水量26mm）の実測水位データを用いた。

平成23年7月新潟・福島豪雨の際には、信濃川・中ノ口川に接続する排水機場の排水規制が実施されたため、土地改良区の指示によって以下の臨時排水措置が採られた。

再現計算には、当時の排水機場の運転状況およびセキ板を設置した水田位置を把握し、これらを反映させた。なお、計算の時間差分間隔は1sとし、氾濫流解析モデルにおける土地利用属性ごとのセルの粗度係数は、水田を0.043，畑地を0.025，市街地を0.010とした。

2.5 計算結果

図 5に各土地利用属性からの流出量の計算値と実測値を比較した結果を示す。また、図 6に再現計算による最大浸水域と土地改良区の職員の日視による浸水実績調査結果の比較結果を示す。ただし、調査は農地を対象に行われたため、浸水域の比較は農地に限定されていることに注意が必要であるものの、計算による流出量および浸水範囲は、概ね良好に再現されていると言える。

3. 内水被害の軽減プロセスと河川に対する田んぼダムの影響

3.1 内水被害の軽減プロセス

図 7と8に田んぼダムの設置の有無による浸水域の差異および排水システムの応答の差異を示した。これらの図面から、まず、田んぼダムの設置は浸水深の低下や浸水域の縮小に寄与するだけの水田からの流出の遅延が期待できることが明らかとなった。このような効果が得られるのは、田んぼダ

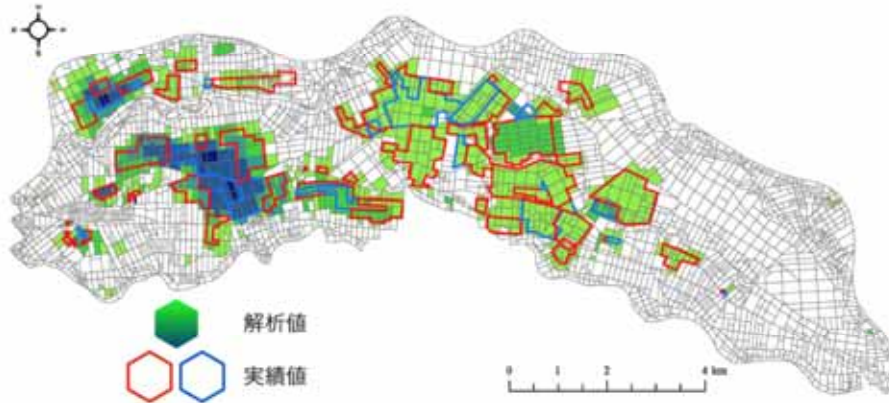


図 6 白根郷地区における新潟福島豪雨時の内水氾濫の再現計算の結果

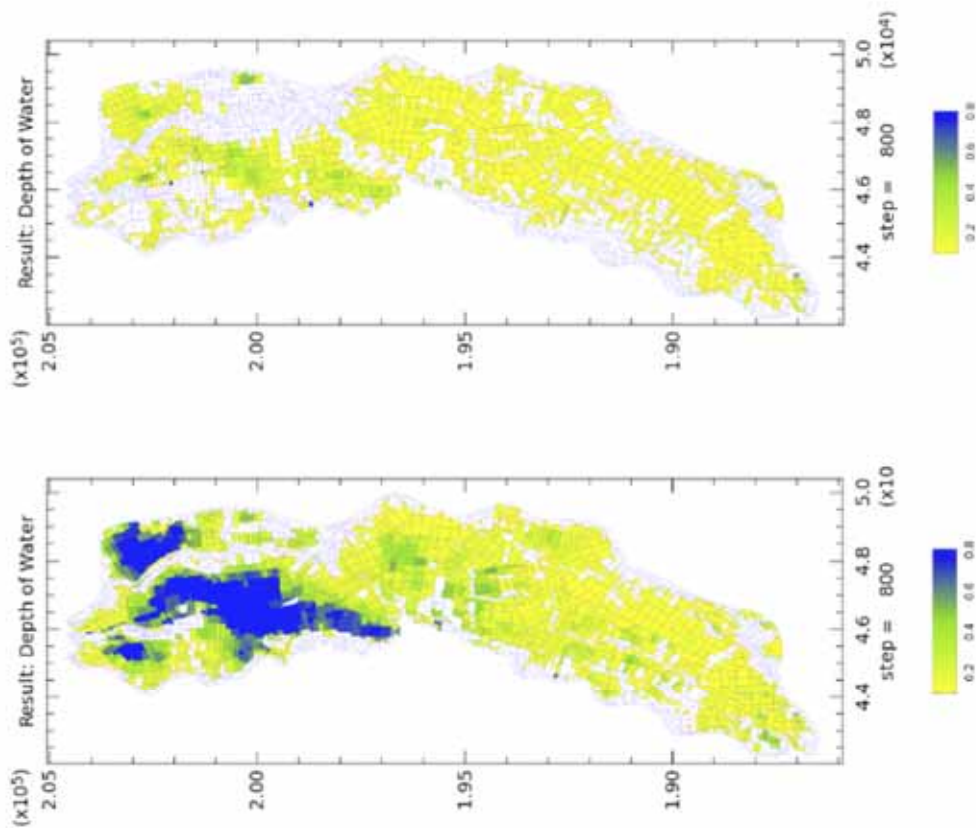


図 7 田んぼダムの設置の有無による浸水深の差異

ムの設置に伴って流出が遅延されるため、設置流域全体の排水機能が健全性が維持される。逆説的には、内水氾濫の発生は排水系統の機能不全が最大の原因であると言える。田んぼダムの設置は、水田が有する貯水機能を最大限まで発揮させ、その結果、設置流域の全体で浸水を均等に分担することになると換言されよう。

これらの効果により、超過洪水時で排水機が停止している状態においてさえも水田および住宅地などの浸水被害を大幅に低下できる。ただし、田んぼダムの機能を最大化させるためには、圃場整備が行われていることが望ましいが、過去の研究から設置率が40%を上回るようになると効果が明瞭となる。

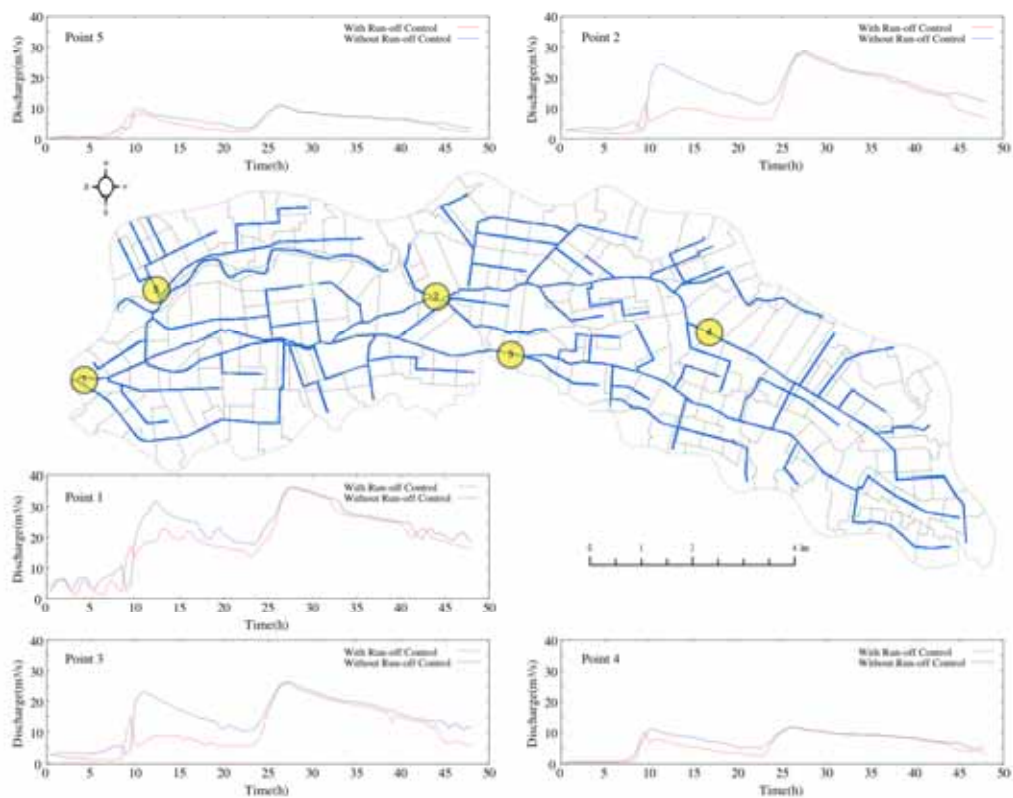


図 8 田んぼダムの設置の有無による排水システムの応答の差異

3.2 内水被害の軽減プロセス

これまで田んぼダムの河川に対する影響については考察されていなかった。図 11から分かる通り、田んぼダム流域から河川への流出は田んぼダムの設置の有無にかかわらず排水機場が境界条件となることがほとんどであるため、河川に対する負担に大きな変化は生じないことがわかる。

⑦今後の課題・展望

本助成において開発された内水現象の解析技術や地形情報の加工技術は、対象流域の構造的な脆弱性の一つである内水問題にアプローチをしたもので、今後の発展が期待できる。また、この研究を通し、平成23年度に解析対象とした白根地区の根本的な水害脆弱性の解決のためには、取り囲む信濃川と中ノ口川の2河川までを包括的に取込んだ解析に必要性が浮き彫りになってきた。当該流域の浸水被害のためには研究の継続が必要なことが示唆された。