

# 田んぼダムによる濁の水質改善に関する研究

吉川夏樹 客員研究員／新潟大学農学部准教授 高野陽平・伊藤沙英美・劉海生／新潟大学農学部

## 1. 緒論

### 1.1. はじめに

近年の我が国の河川・湖沼等の水域では、流域内の人口増加や都市化に伴う人口の集中および産業の急激な拡大などにより、水域へ流入する汚濁負荷量の増加が進んでいる。こうした負荷源への対応の遅れや、流入する汚濁負荷量が水域の持つ自浄能力を超えることによって水質汚濁や富栄養化といった問題が発生している。国土交通省（2006）によると、発生源別の汚濁負荷量は、産業系である生活排水や工業排水、畜産排水といった点源負荷量は減少傾向にあるものの、農地、山林、市街地から排水される面源負荷量への対策が遅れており、全負荷量に対する面源負荷量の占める割合が増加していることが指摘されている。

農業を主体とした流域においては、肥料成分の流入による富栄養化や農地を起源とした土砂の水域における堆積が顕在化している。こうした問題に対して、清浄な河川水や下水の高度処理水を利用した「浄化水導入」や、河床・湖底に堆積した底泥を除去する「浚渫」、流水から直接汚濁負荷を取り除く施設を設置する「直接浄化」が実施されている（国土交通省，2014）。しかし、これらの対症療法的対策の実施は、浄化水導入によるポンプ運転コストや浚渫コストの増大を招き、自治体の財政的負担となっている。

水田農業の卓越する新潟平野では、とりわけ水田耕作に伴う土砂流入が問題となっている。水田の土砂は富栄養化の原因物質の窒素やリンとともに流出する。とりわけリンは土壌粒子に吸着した懸濁態リンとして流出する割合が高いため、栄養塩の輸送は懸濁物質の輸送と密接に関わることが示唆されている（神山ら，2009）。水田からの土砂流出に伴う肥料分の流出は、資源の枯渇の懸念や需要の増大によるリン酸肥料の価格高騰といった影響も加わり、農家の経済的損失となる。また、排水路に堆積した土砂を取り除く泥浚い作業は、農家の高齢化、人口減少と相まって過大な肉体的負担となっている。こうした背景から、負担が小さく効果的な対策が求められている。

水田からの土砂流出は、灌漑期間の中でもとりわけ代かき後の落水時に増大することが報告されている（笹田ら，2004）ため、この時期の流出対策が効果的である。原田ら（2005）は水尻付近の流速の低下によって、山田ら（2006）は代かき後の落水開始時間の延長によ

って水田からの土砂流出量を削減できることを報告している。本研究では、こうした条件を創出できる土砂流出対策の一案として、田んぼダムの流出抑制機構に着目した。

### 1.2. 田んぼダムの概要

田んぼダムとは水田の流出孔を人為的に縮小させ、雨水を一時的に水田に貯留し、洪水時のピーク流出量をカットすることで下流域の浸水被害を軽減する取組である。近年、局所的豪雨の発生頻度は増加傾向にあり、都市化により下水道の排除能力を超える雨水流出が生じている。ダム建設や河川整備といった大規模な洪水対策は、長期にわたる施工期間と莫大な費用を必要とするため、大きな進展は期待できない。こうした中、低コストで即効性のある田んぼダムが全国的に注目されている。その効果は吉川ら（2011）、宮津ら（2012）によって検証されており、大雨時に大きな浸水被害抑制効果があることが示されている。しかし、田んぼダム実施地区と効果発現地区は必ずしも一致しないため、取組農家自身に大きなメリットがなく、これが取組普及の足枷になっている。

田んぼダムの副次的機能として「土砂流出抑制」の機能を定量的に評価することによって、国土保全的な役割に加えて、水環境保全や農家の取組へのインセンティブ付与に繋がることを期待できる。

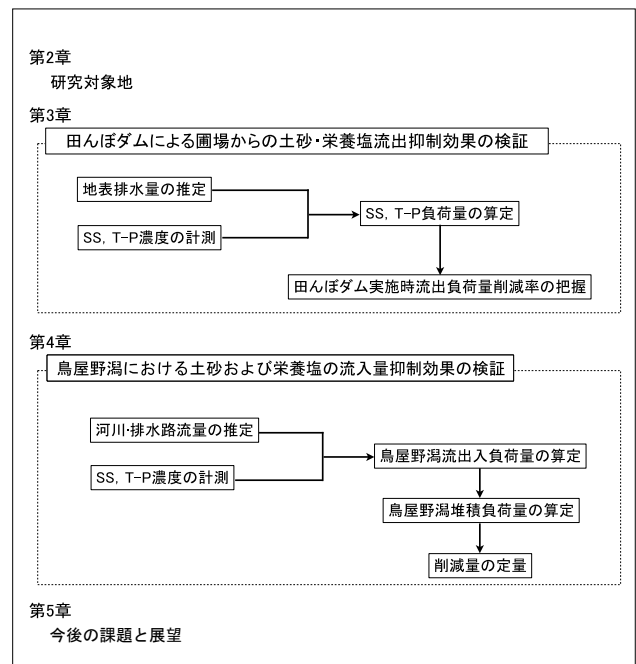


図 1.1 研究の全体構成

### 1. 3. 研究目的

本研究では、現地圃場において落水試験を実施し、田んぼダム実施の有無による土砂および栄養塩の流出抑制効果を検証するとともに、圃場排水が流入する水域における田んぼダムによる流出抑制効果を検証することを目的とする。

### 1. 4. 研究の全体構成

研究の全体構成を図 1.1 に示す。第 2 章 (2. 研究対象地) では、本研究の対象地である亀田郷の概要と研究概要について示す。第 3 章 (3. 田んぼダムによる圃場からの土砂・栄養塩流出抑制効果の検証) では、現地落水試験の結果から、田んぼダム実施の有無による流出負荷量を比較し、田んぼダム実施時の土砂流出量の削減率について示す。第 4 章 (4. 鳥屋野潟における土砂および栄養塩の流入量抑制効果の検証) では、亀田郷内の圃場排水が集中する鳥屋野潟の土砂堆積量を把握し、田んぼダムが亀田郷全域で実施された場合の鳥屋野潟の土砂流入削減量を推定する。第 5 章 (5. 今後の課題と展望) では、第 3 章、第 4 章で得られた結果を整理する。

## 2. 研究対象地

本研究では、2012 年度より試験的に田んぼダムの取り組みを実施している新潟県新潟市の亀田郷地区を対象に、田んぼダムによる土砂流出抑制効果を検証した。本章では亀田郷の地区概要と実施した調査・研究概要を示す。

### 2. 1. 研究対象地の概要

#### 2. 1. 1. 亀田郷の概要

本研究の対象地である亀田郷は、新潟市の中央部に位置する田園地帯である。信濃川と阿賀野川そして両河川を連絡する小阿賀野川に囲まれた完全輪中地帯である。流域面積は 9,623ha、農地面積は 5,185ha、うち 4,170ha を水田が占める (亀田郷土地改良区, 2015)。

北西部の地盤標高が最も低い地区に水面積約 140ha の鳥屋野潟がある。鳥屋野潟の北側には新潟市の中心地が広がり、南側はかつて水田が広がっていたが、近年開発が進み、サッカー場や野球場のほか大規模文化施設が集中する。

亀田郷は面積の約 3 分の 2 が海拔 0m 以下で、かつて「芦沼」と呼ばれ、「地図にない湖」と表現されるほどの常習的湛水地帯であった。大雨時の洪水はもちろん海水の逆流など、常に自然の驚異にさらされるため、亀田郷の歴史は水との闘いと表現されるほどであった (全国疎水名鑑, 2015)。

食糧確保を目的に、1941 年から国営土地改良事業として基幹排水路、大規模排水機場の建設が着手された。1948 年、東洋一と謳われた栗ノ木排水機場 (排水量

40 m<sup>3</sup>/s) の完成によって、地区排水能力は飛躍的に向上し、郷内ほとんどの水田が乾田化された (水土の礎, 2015)。しかし、1968 年の新潟地震により栗ノ木排水機場が甚大な被害を受け、原位置での復旧が不可能になったため、鳥屋野潟の西側に親松排水機場 (最大排水量 60 m<sup>3</sup>/s) が新設され、その後の地区排水を担ってきた。現在は、2009 年に完工した更新工事を経て排水運転が続けられている。

流域内の揚排水は全て機場によって、人為的に管理されている。灌漑期間中の農業用水は舞潟揚水機場から信濃川の河川水を、両川揚水機場と二本木排水機場から小阿賀野川の河川水を、沢海揚水機場から阿賀野川の河川水を揚水している。二本木排水機場は、洪水時に排水運転に切り替わる。

亀田郷は鳥屋野潟を底にしたすり鉢状の地形をしているため、ほとんどの雨水、排水は鳥屋野潟に集まり、親松排水路を経て、親松排水機場で信濃川に排水される。大雨時は親松排水機場に加えて隣接する国土交通省管轄の鳥屋野潟排水機場 (最大排水量 40 m<sup>3</sup>/s) が稼働するほか、本所排水機場、蔵岡排水機場、二本木排水機場によって、阿賀野川、小阿賀野川に排水する、多極分散型の排水体制が採られている (図 2.1)。

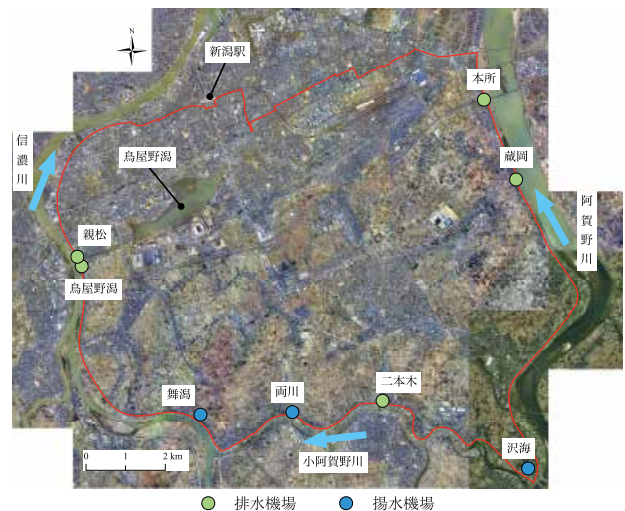


図 2.1 亀田郷全域と揚排水機場位置

#### 2. 1. 2. 鳥屋野潟の概要

鳥屋野潟は亀田郷北西部に位置する天然湖沼である。潟面積は約 158ha、平均水深は約 1m 程度であり、湖沼内水の滞留時間は約 1.6 日である (越山ら, 2002)。潟内の水位は人為的に管理されており、常に T.P. (東京湾の平均潮位) - 2.0 ~ -2.5m の範囲に維持されている。

潟北側からは新潟市の中心市街地からの生活排水、南側の水田地帯からは農業排水などが流入するため、高度成長期以降、水質悪化が顕在化した。1971 年に鳥屋野



図 2.2 鳥屋野潟流入流出水路



写真 2.1 大形工区の垂直設置型調整板用の排水マス

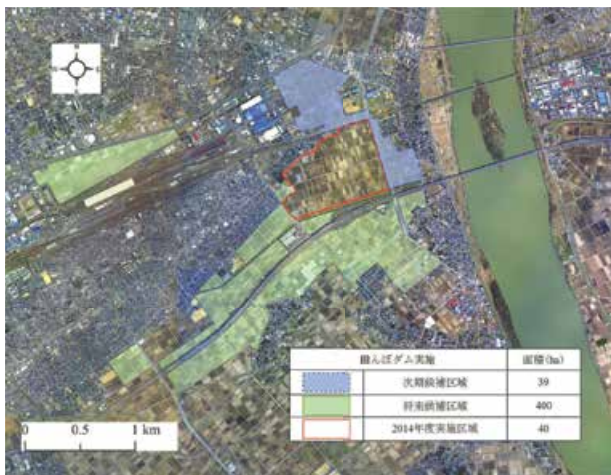


図 2.3 田んぼダム実施概要図

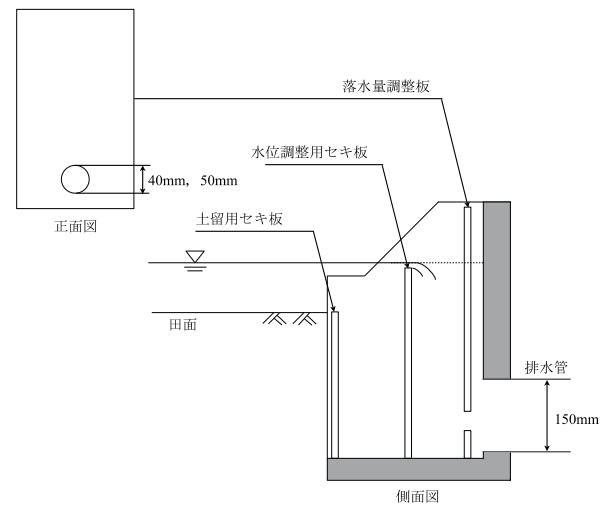


図 2.5 排水マスの構造



図 2.4 大形工区から鳥屋野潟への排水流入経路

潟の環境基準は湖沼B類型に指定された（国土交通省北陸地方整備局，2012）。

鳥屋野潟に接続する主な幹線河川・排水路は栗ノ木川と新堀排水路であり、これらから約8割の農業排水が潟に流入する（図2.2）。とりわけ、灌漑期間に圃場由来の土砂を含んだ濁水が流入し、土砂が堆積する。このため1977年から鳥屋野潟浄化事業として、中干し時期や非灌漑期間に河川水を導入して汚濁物質濃度を希釈する浄化用水事業や、浚渫作業を行われており、水質および治水安全度の維持が図られている（環境省，2007）。こうした事業により水質は改善しつつあるものの、自治体の経常的な財政負担となっている。

### 2.1.3. 実証試験地区の概要

#### (1) 大形工区の概要

本地区は亀田郷最東部の阿賀野川沿いに位置し、地区北部は市街地と隣接している。農地転用による宅地化が進んでおり、宅地からの排水増加に加えて、近年頻発する局所的豪雨により、浸水被害が発生する地区である。浸水被害の軽減を図るため、2012年に新潟市下水道部が「田んぼダム」の導入を開始した。本地区の水田は20aが標準区画面積である。基盤整備が未実施であったため、新潟市下水道計画課によって漏水対策のための溝畔の補強、田んぼダム用の落水量調整板設置のためのコンクリート製排水マスの設置が実施された。

2012年度は、本地区の4haの圃場で試験的に田んぼダムの取組が導入され、2013年度より取組面積を40haに拡大し、今後さらに39haが導入予定とされている（図2.3）。また、本地区の排水は図2.4に示す通り、本所排水路、栗ノ木川を経由し、鳥屋野潟へ流入する。

#### (2) 排水マスおよび落水量調整板の仕様

大形工区の排水マスにはセキ板を設置するための垂直な3つの溝があり（写真2.1）、水田側から土留用セキ板、水位調整用セキ板、落水量調整板を設置する。排水管内径が150mm、落水量調整板に設けられたオリフィスの孔径は40mmあるいは50mmである（図2.5）。この孔径とした理由は以下のとおりである。

通常の設計手続きでは、30年確率降雨イベントの降雨があった場合、畦畔越流が生じないことや、ピーク流出量の約70%をカットすることといった条件を満たした上で、田んぼダムの効果を最大化する孔径を決定するため、水田区画面積毎に孔径を設定する。しかし、本地区の圃場面積は20aであり、基盤整備済みの水田と比較して小さいため、上記条件を満たす孔径を選択すると、30mm程度となる。ゴミ詰まり回避のためには最小でも40mm以上の孔径が必要と考え、本地区では最低限の孔径を選択した。

### 3. 田んぼダムによる圃場からの土砂・栄養塩流出抑制効果の検証

#### 3.1. はじめに

水田からの土砂流出は、①水尻付近の流速の低下による洗掘の抑制（原田ら，2005）、②落水開始時間の延長による浮遊土砂の沈降（山田ら，2006）によって抑制できることが報告されている。田んぼダムの実施によって、上記の2条件を創出できるため、土砂流出抑制の効果が期待できると考えた。そこで、効果の検証を目的に試験区域内に落水量調整板を設置した田んぼダム実施水田と、落水量調整板を設置しない通常管理水田を設けて調査を行った。

対象としたのは、灌漑期間中最大の落水イベントである、代かき後の落水（以下、代かき落水）のほか、中干し前の水切りを目的とした落水（以下、中干し落水）、水田から雨水が排水される降雨時である。

#### 3.2. 現地落水調査

##### 3.2.1. 調査方法

###### (1) 調査圃場

調査圃場として、2014年度田んぼダム実施地区内の北西側（区域1）に4圃場（①-④圃場）、区域1から南西約250m（区域2）に4圃場（⑤-⑧圃場）、計8圃場を設けた（図3.1）。区域1は圃場の南側で、区域2は圃場の北側で排水路に接している。2区域を設定したのは、落水時にその風向によって流出に影響を与える可能性を考慮したためである。清水ら（2006）によって、浮遊土砂の生産には風による水面の乱れが影響することが報告されている。

上記圃場のうち、①④⑤⑥圃場は落水量調整板を設置する「田んぼダム実施水田」とし、②③⑦⑧圃場は落水量調整板を設置しない「通常管理水田」とした。試験水田の水田面積と落水量調整板の有無を表3.1に示す。

対象の各圃場にはコンクリート製の排水マスが2013年度の田んぼダム事業の一環として設置された。排水マスの規格は全て同じであり、①-④圃場では40mm、⑤-⑧圃場では50mmのオリフィスが落水量調整板に設置されている。

大形工区内の圃場土の土性は、沈降試験の結果、砂分8%、シルト分60.2%、粘土分31.2%であった。また、圃場土の含水比は48.7%であった（図3.2）。これらの値を調査圃場土の代表値とした。

###### (2) 水位・雨量・田面流速の観測

落水中の圃場内水深変化を測定するため、各圃場の排水マス付近に水位センサー（センシズ社製の圧力検知式センサー（HM910））を設置し（写真3.1、図3.3）、データロガー（ヒオキ社製データロガー（LR5042））によって10分間隔で記録した。観測した水位データから圃場

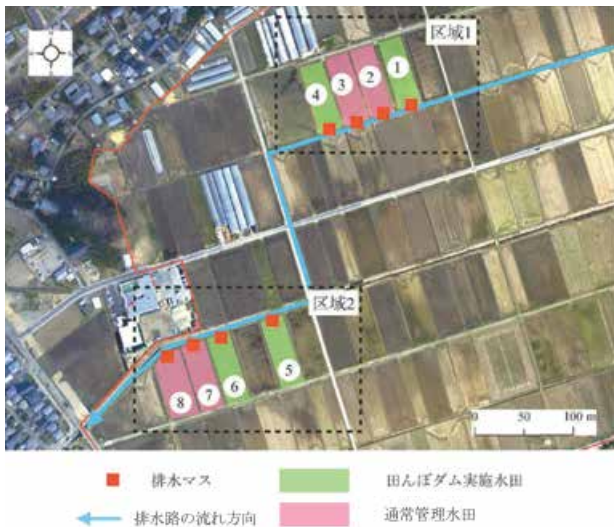


図 3.1 調査対象圃場と排水マスの位置

表 3.1 田面積と調整板設置の有無

現地調査日	4/27				4/28			
圃場No.	①	②	③	④	⑤	⑥	⑦	⑧
面積[m <sup>2</sup> ]	1853	1922	1947	1922	1922	1852	1811	1926
落水量調整板	有	無	無	有	有	有	無	無

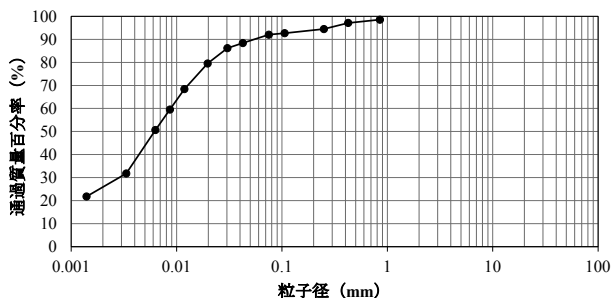


図 3.2 大形工区内圃場土の粒径加積曲線 (廣島, 2014 を引用, 加工)

の地表排水量を求めた。

田んぼダム実施水田と通常管理水田の落水直後の流速を比較するため、落水開始1分以内に排水マス付近で電磁流速計(ケネック株式会社製電磁流速計(LP30))を用いて、流速を観測した。

降水量は、試験区域内に設置した転倒マス雨量計(Davis Instrument社製Rain collector II)で観測し、データロガー(ヒオキ社製パルスロガー3639)で、10分間隔で記録した。

代かき落水調査では現地圃場内の風向風速を計測するため、プロペラ風向風速計(Young社製風向風速センサー(KDC-S4))を地上2mの高さに設置し、データロガー(KADEC社製(KADEC-UN KAZE))によって10分間隔で記録した(写真3.2)。

### (3) 落水調査時の落水方法

代かき落水調査は2014年4月27日および28日に実施した。調査期間中の降水はなかった。落水開始は全ての調査圃場で代かき終了24時間後に統一した(写真3.3)。落水は、排水マスの田面水深調整用セキ板を取り外して行った(写真3.4)。対象地区の農家は、田植えに備えて田面水を全て落水させないことから、用水取水口付近の田面の一部が露出した時点で落水終了とした。

中干し落水は、現地の慣行で2回実施されるため、調査は2014年6月10日と7月6日の2回実施した。両日とも調査期間中の降水はなかった。本調査は、③④⑤⑦圃場で実施し、このうち③⑦圃場を田んぼダムあり、④⑤圃場を田んぼダムなしとした。代かき落水調査と同様に、田面水深調整用セキ板を取り外して落水し、田面が半分以上露出した時点で落水終了とした。

### (4) 降雨時の排水調査

降雨時の排水調査は2014年10月13-14日に実施した。台風19号の接近に伴い、強い降雨が見込まれたが、工区内に設置した雨量計の観測降雨量は24時間雨量で53.2mmであった。そのため、排水マスから落水調査時のような大きな排水量はなかった。

### 3.2.2. 採水方法と採水時間間隔

代かき落水調査、中干し落水調査では、排水マスから流出する田面水を一度バケツで受け、よく混合した後、500mlボトルに移した。採水間隔は0分(落水開始直後)、開始5分までは1分間隔、開始10分後、20分後、40分後、1時間後、その後1時間間隔とした。降雨時の採水は1回のみであった。

### 3.2.3. 採水試料の分析

採水した圃場水50mlを炉乾した孔径1 $\mu$ mのガラス繊維ろ紙(Whatman製GF/B)を使用して吸引ろ過した(写真3.5)。ろ過前後のろ紙重量を測定し、その差から懸濁物質濃度(以下、SS濃度)を定量した。T-P濃度はJISによるペルオキシ二硫酸カリウムによる分解後、モリブデン青法によって定量した(写真3.6)。また、圃場排水中の各濃度から水田に取水されていた灌漑用水中の濃度を差引き、これに表面排水量を乗じて流出負荷量を求めた。

### 3.3. 代かき落水調査の結果と考察

#### 3.3.1. 風向風速観測の結果

調査1日目(4月27日)の落水時は主に西よりの風、調査2日目(4月28日)の落水時は、北よりの風が卓越した(図3.4)。

調査実施時の風速の経時変化を図3.5に示した。両日とも風速は昼間に強く、夜間は弱まる傾向があった。4



写真 3.1 設置した水位計



写真 3.3 代かき前 (左)、代かき後 (右)

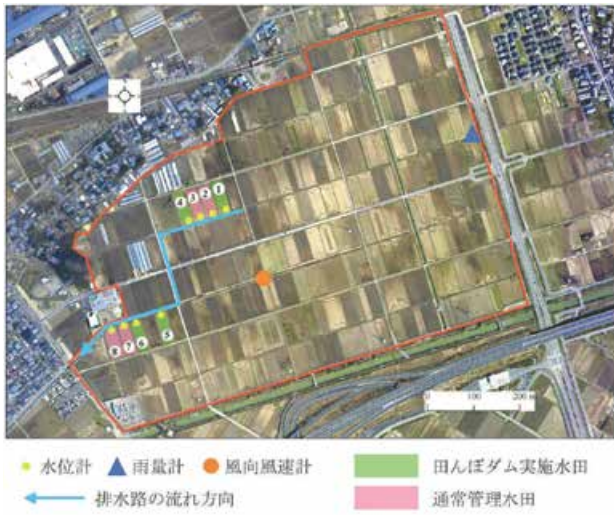


図 3.3 調査圃場および水位計等の設置箇所



写真 3.4 流出の様子  
(田んぼダムなし (左) と田んぼダムあり (右))



写真 3.2 設置した風向風速計



写真 3.5 SS 濃度の測定



写真 3.6 T-P 濃度測定のための試料調製作業

月 27 日の落水時平均風速は 3.2m/s であり、4 月 28 日の落水時平均風速は 3.7m/s であった。廣島 (2014) の先行研究で行った室内風速攪乱試験の結果では、大形工区の圃場土は、風速 5 m/s 以下で巻き上がりが無いことが報告されている。本調査時の風速では風波による圃場土の巻き上がりは小さいと考えた。

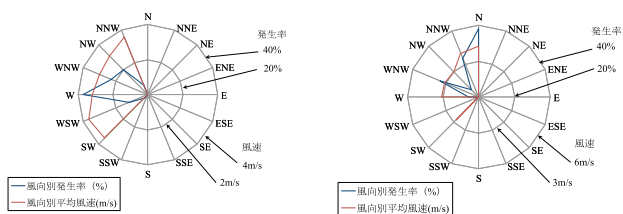


図 3.4 風向別発生率および風向別平均風速, 4/27 (左)、4/28 (右)

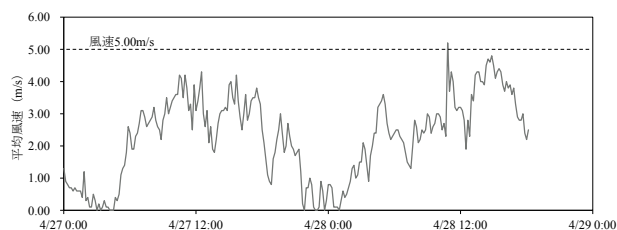


図 3.5 調査圃場付近の風速の経時変化

### 3.3.2. 落水時流速観測の結果

落水時の通常管理水田の排水マス付近の平均流速は 0.26m/s、田んぼダム実施水田の平均流速は 0.03m/s であった。田んぼダム実施水田は、通常管理水田の流速を例外なく下回った (図 3.6)。田んぼダムを実施によって、排水マス付近の流速が約 90% 低下することが示された。

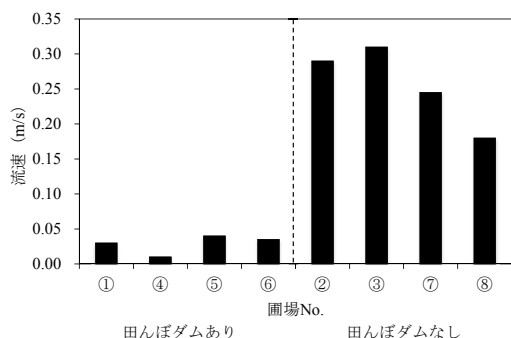


図 3.6 排水マス付近の流速の違い 田んぼダム実施水田 (左)、通常管理水田 (右)

### 3.3.3. 圃場流出負荷量の計算

#### (1) 地表排水量の計算

地表排水量は観測水位データをもとに、水田流出量算定モデルを用いて推定した。本モデルは、流出孔モジュールと田面水モジュールで構成されている (図 3.7)。流出孔モジュールでは、流出孔の孔径と田面水位をもとに、セキの公式 (4.1)、オリフィスの公式 (4.2) から流出

量を算定する。田面水モジュールでは、流出孔モジュールで算出した流出量から経時的な田面水深の変化を逐次計算する。

$$Q = C_D B H^{\frac{3}{2}} \quad (4.1)$$

$$Q = C_P A \sqrt{2gh} \quad (4.2)$$

ここに、 $C_D$ :セキの流量係数、 $B$ :セキ幅、 $H$ :セキ越流水深、 $C_P$ :オリフィスの流量係数、 $A$ :オリフィス孔断面積、 $g$ :重力加速度、 $h$ :水面からオリフィス中心までの高さである。流量係数は実測流出量と適合するように決定した。

本研究の対象試験区では、排水マスにより田面水の排水が行われているため、流出の規定要因は、田面水深低下過程でオリフィスからセキに替わる。流出孔は田面より低い位置に設置されているため、排水マスの水位がオリフィスの上縁部を超えない場合はセキとして、超えた場合はオリフィスとして扱った。

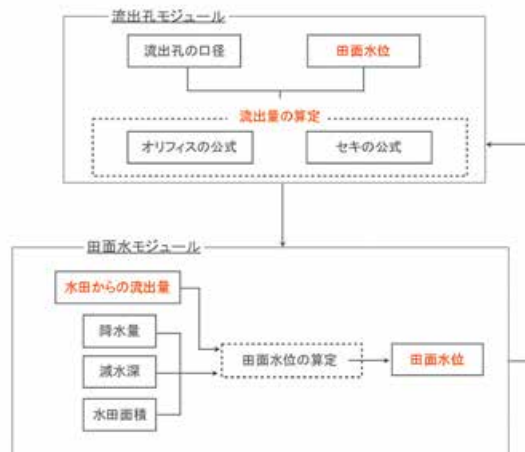


図 3.7 水田流出量算定モデルの概要

#### (2) 地表排水量継続時間と地表排水量の結果

通常管理水田の落水継続時間は平均 55 ± 9 分、田んぼダム実施水田では平均 255 ± 89 分であった。落水調査終了時の田面水の水位減少高は、通常管理水田で平均 27 ± 3 mm、田んぼダム実施水田で平均 23 ± 9 mm であった (表 3.2)。

表 3.2 代かき落水時における各水田の落水継続時間と水位減少高

田んぼダム	実施				非実施			
圃場No.	①	②	③	④	⑤	⑥	⑦	⑧
落水継続時間 [min]	300	240	360	120	60	60	40	60
水位減少 [mm]	22	17	38	14	31	27	24	27

モデルによって得られた田面水深の経時変化は、水位計による観測値を概ね再現した (図 3.8, 図 3.9)。落水開始から終了までの総排水量を算出した結果、圃場ごとにばらつきが見られ、最も小さい水田で 22 m<sup>3</sup>、最も大き

い水田で64 m<sup>3</sup>であった。これは初期湛水量の違いによるものである。

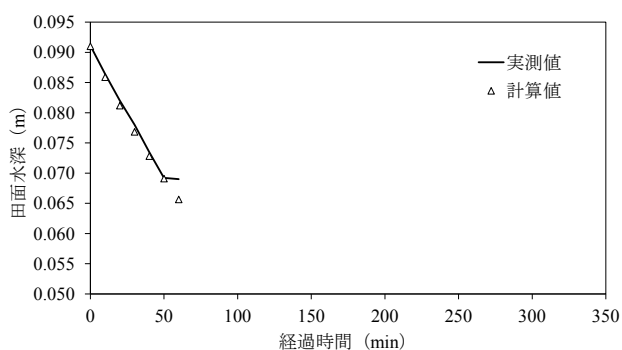


図 3.8 通常管理水田の田面水深の実測値と計算値の比較

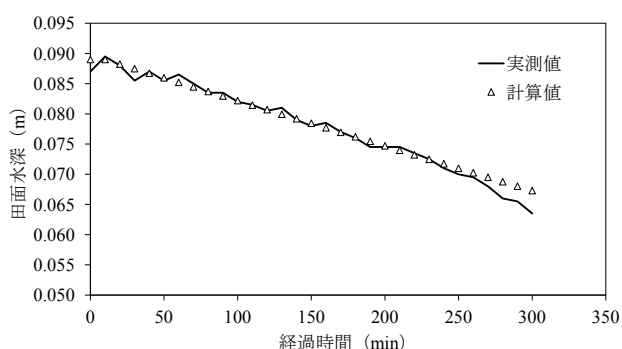


図 3.9 田んぼダム実施水田の田面水深の実測値と計算値の比較

### (3) SS の濃度および流出負荷量

落水開始直後の SS 濃度は、通常管理水田で平均 1,690 ± 857 mg/l、田んぼダム実施水田で平均 508 ± 226mg/l であった。開始 5 分後の濃度は、通常管理水田で平均 153 ± 76mg/l、田んぼダム実施水田で平均 57 ± 8 mg/l であった。それ以降は落水終了まで一定に推移した (図 3.10, 図 3.11)。田んぼダム実施の有無にかかわらず、落水開始直後にファーストフラッシュとして多量の土砂が流出し、短時間で急激に減少した。落水開始時の田面水の急激な流速発生によって、排水マス付近の表土が剥離して流出したことが原因である。一方、田んぼダム実施水田の落水開始直後の平均 SS 濃度は、通常管理水田の 30% 程度であったが、これは田んぼダムの実施によって排水マス付近の流速が低下し、洗掘による土砂流出を抑制したためであると考えられる。

落水開始直後の流出負荷量は、通常管理水田で平均 33.7 ± 19.1g/s であり、田んぼダム実施水田で平均 1.30 ± 0.65g/s であった。通常管理水田、田んぼダム実施水田ともにファーストフラッシュ後短時間で急激に減少し、その後、緩やかに減少した (図 3.12, 図 3.13)。落水終了時の流出負荷量は、通常管理水田で平均 2.67 ± 1.65g/s、田んぼダム実施水田で平均 0.08 ± 0.05g/s であった。落水開始から終了までの総流出負荷量は通常管

理水田で平均 8.30 ± 2.67kg、田んぼダム実施水田で平均 1.59 ± 1.01kg であった (図 3.14)。しかし、各圃場の初期湛水深が異なるため、総排水量にばらつきがあった。同一条件下の比較のため、排水量が最も少ない⑥圃場に排水量を合わせ、22 m<sup>3</sup>までの流出負荷量を比較した (図 3.15)。その結果、通常管理水田の流出負荷量は平均 5.03 ± 1.26kg であり、田んぼダム実施水田の流出負荷量は平均 1.03 ± 0.32kg であった。welch の t 検定の結果、有意水準 5% で両者に差があった (図 3.16)。

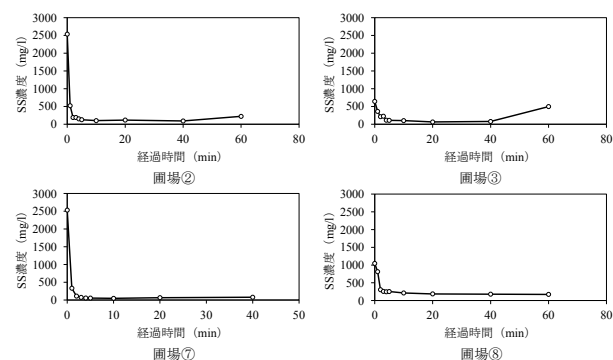


図 3.10 流出 SS 濃度の時間変化 (通常管理水田)

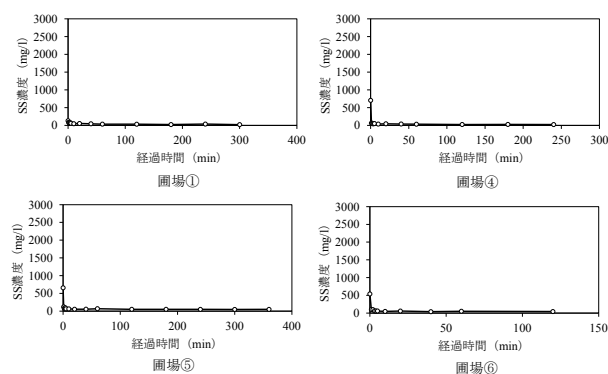


図 3.11 流出 SS 濃度の時間変化 (田んぼダム実施水田)

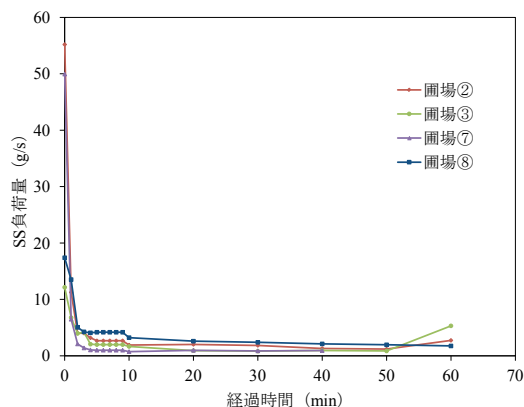


図 3.12 SS 流出負荷量の時間変化 (通常管理水田)



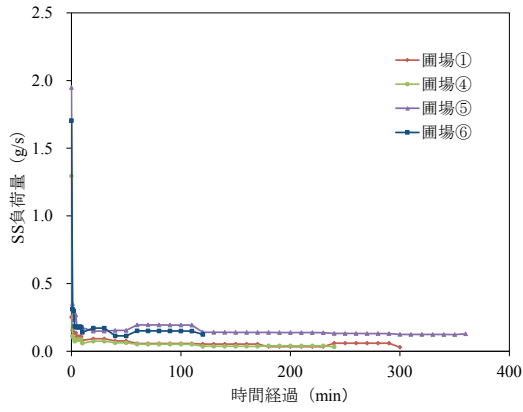


図 3.13 SS 流出負荷量の時間変化 (田んぼダム実施水田)

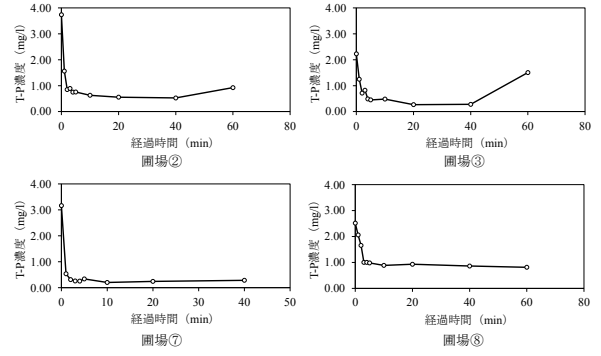


図 3.17 流出 T-P 濃度の時間変化 (通常管理水田)

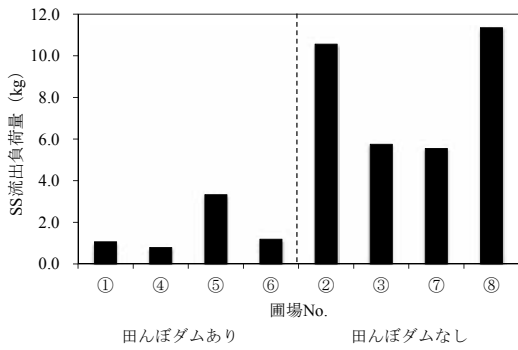


図 3.14 SS 総流出負荷量 田んぼダム実施水田 (左)、通常管理水田 (右)

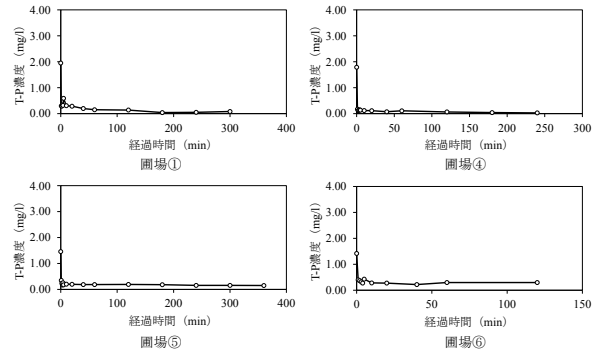


図 3.18 流出 T-P 濃度の時間変化 (田んぼダム実施水田)

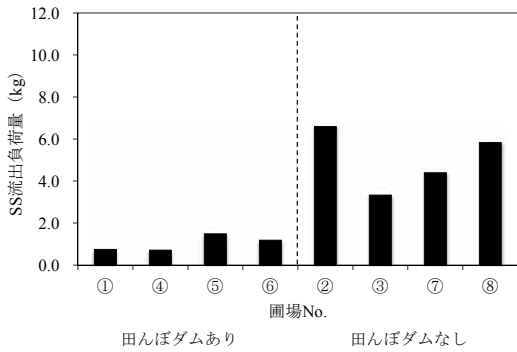


図 3.15 排水量 22 m³ までの SS 流出負荷量 田んぼダム実施水田 (左)、通常管理水田 (右)

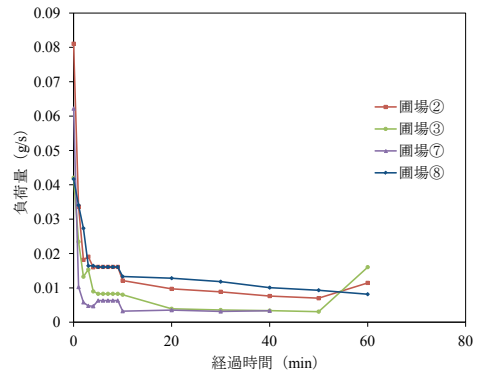


図 3.19 T-P 流出負荷量の時間変化 (通常管理水田)

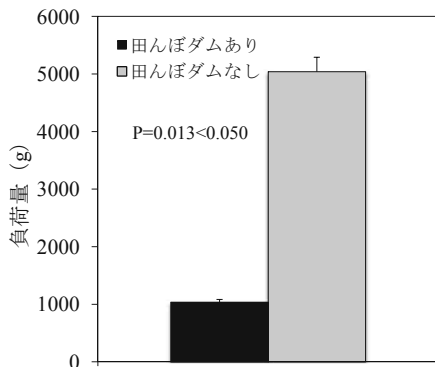


図 3.16 落水調整板の有無による排水量 22 m³ までの SS 負荷量の比較

#### (4) T-P の濃度および流出負荷量

落水開始直後の T-P 濃度は、通常管理水田で平均  $2.91 \pm 0.56\text{mg/l}$ 、田んぼダム実施水田で平均  $1.65 \pm 0.22\text{mg/l}$  であり、落水開始 5 分後までに急速に減少した。両者とも、落水開始直後に T-P 濃度は高いが、短時間で急速に減少し、その後落水終了までほぼ一定に推移した (図 3.17, 図 3.18)。

落水開始直後の流出負荷量は、通常管理水田で平均  $0.06 \pm 0.02\text{g/s}$ 、田んぼダム実施水田で平均  $3.97 \times 10^{-3} \pm 0.45 \times 10^{-3}\text{g/s}$  であった。田んぼダム実施の有無によらず、SS 同様に短時間で急速に減少し、その後は緩やかに減少した (図 3.19, 図 3.20)。落水終了時の流出負荷量は、通常管理水田で平均  $0.01 \pm 0.005\text{g/s}$ 、田んぼダム実施水田で平均  $0.34 \times 10^{-3} \pm 0.32 \times 10^{-3}\text{g/s}$  であった。総流出負荷量は、通常管理水田で  $31.7 \pm 14.2\text{g}$ 、田んぼダム実施水田で平均  $5.61 \pm 3.08\text{g}$  であった (図 3.21)。排水量 22 m<sup>3</sup> までの流出負荷量を求めた結果、通常管理水田で平均  $16.4 \pm 5.39\text{g}$ 、田んぼダム実施水田で平均  $4.01 \pm 1.63\text{g}$  であった (図 3.22)。welch の t 検定の結果、有意水準 5% で両者に差があった (図 3.23)。

### 3. 4. 中干し落水調査の結果と考察

本調査では③、④圃場の初期湛水量が少なく、地表排水の採水が困難であったため、⑤、⑦圃場のみで採水した。以下に各項目の結果を示す。

#### 3. 4. 1. 落水継続時間と地表排水量

代かき落水と同様に、通常管理水田と田んぼダム実施水田では落水継続時間に違いがあり、通常管理水田は平均  $270 \pm 90$  分、田んぼダム実施水田は平均  $555 \pm 255$  分であった。落水終了時の田面水深の減少高は、通常管理水田で  $55 \pm 17\text{mm}$ 、田んぼダム実施水田で平均  $45 \pm 6\text{mm}$  であった。地表排水量は、初期湛水量の違いから、圃場ごとに排水量にばらつきがあった (表 3.3)。

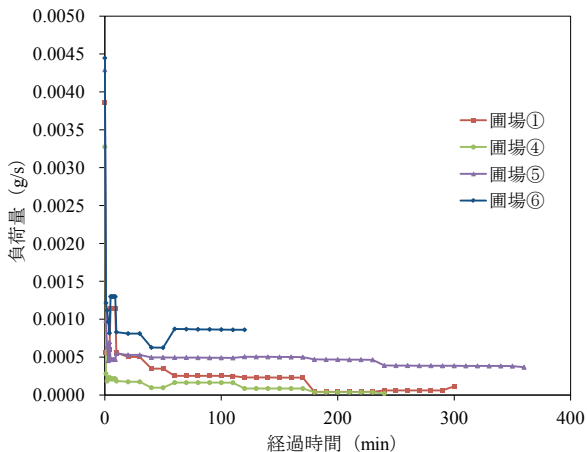


図 3.20 T-P 流出負荷量の時間変化 (田んぼダム実施水田)

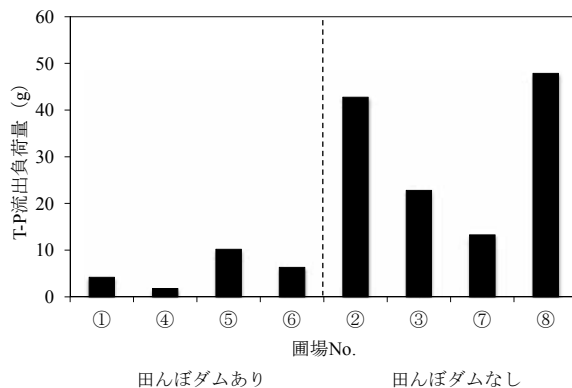


図 3.21 T-P 総流出負荷量 田んぼダム実施水田 (左)、通常管理水田 (右)

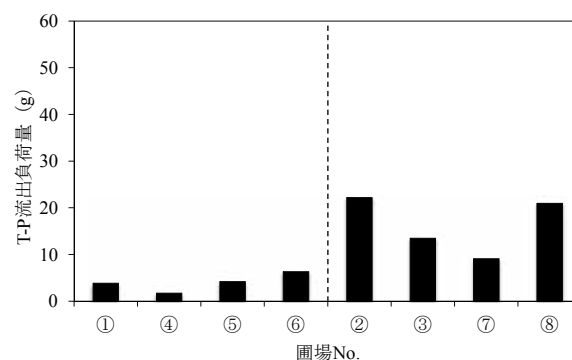


図 3.22 排水量 22 m<sup>3</sup> までの T-P 流出負荷量 田んぼダム実施水田 (右)、通常管理水田 (左)

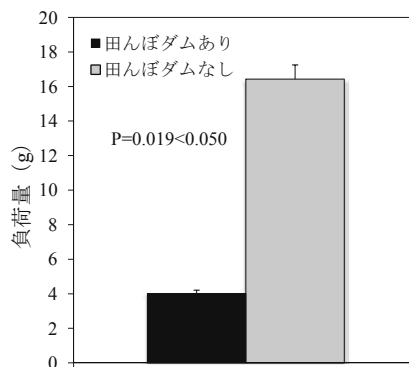


図 3.23 落水量調整板の有無による排水量 22 m<sup>3</sup> までの T-P 流出負荷量の比較

表 3.3 中干し落水時における圃場ごとの排水量の違い

現地試験日	6/12		7/6	
圃場No.	⑤	⑦	⑤	⑦
排水量 [m <sup>3</sup> ]	38	109	101	58
調整板	有	無	有	無

### 3. 4. 2. SS の濃度および流出負荷量

1 回目の調査 (2014/ 6/12) の結果を示す。落水開始直後 SS の濃度は、通常管理水田で 5,414mg/l、田んぼダム実施水田で 5,798mg/l であった。両者の落水開始直後の SS 濃度に差はなかったが、通常管理水田では最小値 (6 mg/l) に達するまで 10 分を要した一方、田んぼダム実施水田では 3 分で最小値 (4 mg/l) に達した (図 3.24)。また、落水途中に急激な濃度上昇が示されたが、これは剥離した表土の流出が原因と考えられる。

通常管理水田では、落水開始直後の流出負荷量は 104g/s、落水終了時は 0.05g/s であった。田んぼダム実施水田では、落水開始直後の流出負荷量は 17.6g/s、落水終了時は  $1.26 \times 10^{-3}$ g/s であった。両者ともに短時間で急速に減少し、その後濃度の上昇に伴って負荷量も上昇したが、緩やかに減少する傾向が示された (図 3.25)。通常管理水田の総流出負荷量は 7.43kg で、田んぼダム実施水田では 1.53kg であった。

2 回目の調査 (2014/ 7/ 6) の結果を示す。落水開始直後の濃度は、通常管理水田で 734mg/l、田んぼダム実施水田で 27mg/l であった。通常管理水田では開始 1 時間後に最低濃度 (22mg/l) となり、その後、緩やかに上昇した。田んぼダム実施水田では、落水開始 5 分までに急速な減少を示したが、その後緩やかに上昇し、落水終了時には急激に上昇した。中干し前の落水とは違い、圃場を乾かすことを目的とするため、完全に田面水を落とす。急激な SS 濃度低下後、緩やかな濃度上昇に転じるのは、田面水量の減少に伴う表土の連行であると考えられる。

通常管理水田では、落水開始直後の SS 流出負荷量は 4.69g/s であり、落水終了時は 0.10g/s であった。田んぼダム実施水田では、落水開始直後の SS 流出負荷量は 0.08g/s、落水終了時には 0.01g/s であった。1 回目の調査と同様に、両者ともに短時間で急速に減少し、その後緩やかに減少する傾向が見られた。総流出負荷量を比較すると、通常管理水田で 3.85kg、田んぼダム実施水田で 0.52kg であった。

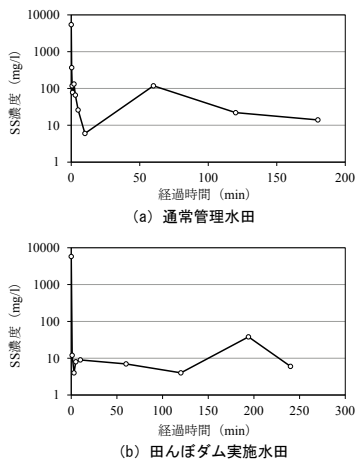


図 3.24 流出 SS 濃度の時間変化 (中干し落水調査 1 回目)

1 回目 2 回目の調査の SS 総流出負荷量の平均は、通常管理水田で 5.63kg、田んぼダム実施水田で 1.02kg であった (図 3.26)。中干し落水時に田んぼダムを実施することで、SS の流出量を約 82% 削減することが確認された。

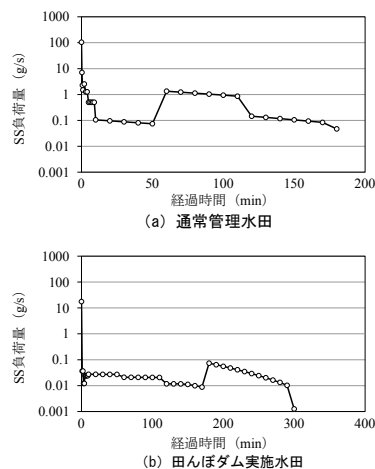


図 3.25 SS 流出負荷量の時間変化 (中干し落水調査 1 回目)

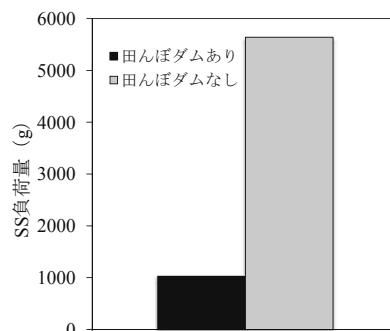


図 3.26 調整板の有無による SS 負荷量の比較

### 3. 4. 3. T-P の濃度および流出負荷量

1 回目の調査の結果を示す。落水開始直後の T-P 濃度は両者ともに、約 1.00mg/l であった。通常管理水田では、最低濃度 (0.12mg/l) に達するまでに 10 分を要したが、田んぼダム実施水田では、1 分程度であった。また、通常管理水田では落水途中に表土の剥離によるものと考えられる濃度の上昇が確認されたが、その後は両者ともに落水終了までほぼ一定に推移した (図 3.27)。

落水開始直後の T-P 流出負荷量は、通常管理水田で 0.02g/s、田んぼダム実施水田で  $2.90 \times 10^{-3}$ g/s であった。SS 同様に、短時間で急速な減少を示し、その後緩やかに減少した (図 3.28)。また、通常管理水田では T-P 濃度上昇に伴う負荷量の上昇が確認された。落水終了時の流出負荷量は、通常管理水田で  $0.67 \times 10^{-3}$ g/s、田んぼダム実施水田で  $0.10 \times 10^{-3}$ g/s であった。総 T-P 流出負荷量は、通常管理水田で 23.3g、田んぼダム実施水田で 6.39g であった。

2 回目の調査の結果を示す。落水開始直後の濃度は、

通常管理水田で 1.54mg/l、田んぼダム実施水田で 0.11mg/l であった。両者ともに落水開始 5 分まで減少したが、その後は時間の経過に伴い上昇した。落水終了に近づくにつれ田面水深が低下し、表土を連行したことが原因と考える。

落水開始直後の流出負荷量は、通常管理水田で 0.01g/s、田んぼダム実施水田で  $0.34 \times 10^{-3}$ g/s であった。通常管理水田では、SS 同様に短時間で急激に負荷量が減少し、その後は緩やかに減少する流出傾向を示した。田んぼダム実施水田においても短時間で急激に減少したが、T-P 濃度の上昇に伴い負荷量も増加し、その後緩やかな減少に転じた。T-P 総流出負荷量は通常管理水田で 16.6g、田んぼダム実施水田で 6.49g であった。

1 回目と 2 回目の調査結果から、中干し落水調査では、通常管理水田で平均 20g、田んぼダム実施水田では平均 6g の流出があった (図 3.29)。田んぼダムを実施することで、T-P の流出を約 68% 削減することが明らかとなった。

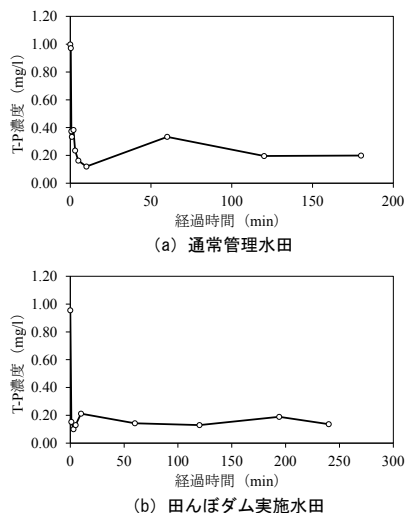


図 3.27 流出 T-P 濃度の時間変化 (中干し落水調査 1 回目)

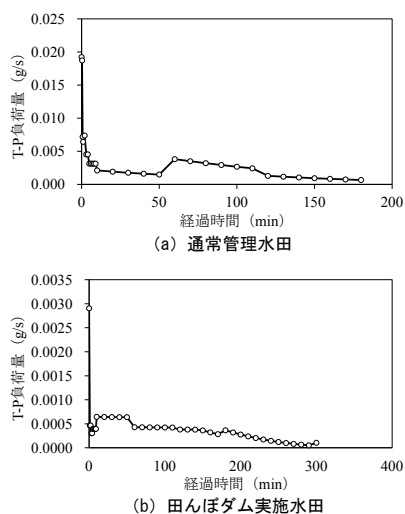


図 3.28 T-P 流出負荷量の時間変化 (中干し落水試験 1 回目)

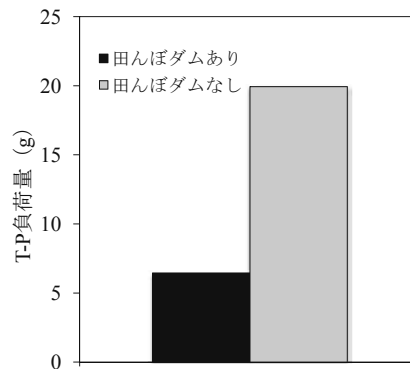


図 3.29 落水量調整板の有無による T-P 流出負荷量の比較

### 3. 5. 降雨時排水調査

本調査では各圃場 1 回のみ採水であったため、負荷量の経時変化は捉えられなかった。そのため、濃度のみを比較した。降雨時の圃場排水中の SS、T-P 濃度からは田んぼダム実施、非実施の違いは確認されなかった (図 3.30)。

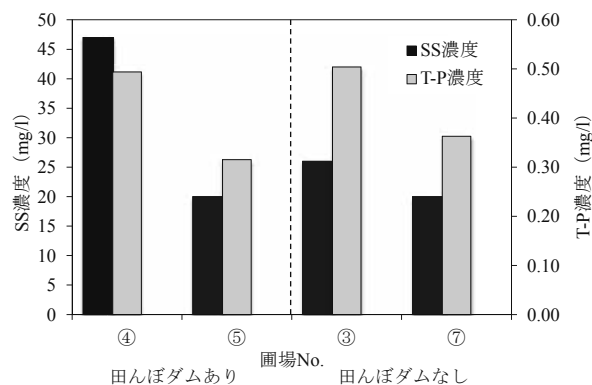


図 3.30 降雨時圃場排水中の各種濃度 田んぼダム実施水田 (左)、通常管理水田 (右)

### 3. 6. 現地落水調査のまとめ

田んぼダムの実施によって、代かき落水時に、SS、T-P の流出負荷量がそれぞれ約 80%、約 76%、中干し落水時に、それぞれ約 82%、約 68% 低減した。また、降雨時は濃度のみを比較であったが、田んぼダム実施時、非実施時で傾向は示されなかった。こうした結果から、とりわけ落水イベント時期に田んぼダムの土砂流出抑制効果が発現することが明らかになった。

SS、T-P はどの落水イベントにおいても、落水直後に濃度が高く、短時間で急速に低下し、その後は一定に推移する傾向が確認された。落水開始時の急激な流速増加が、排水マス付近の洗掘、表土の剥離を引き起こす原因と考えられる。代かき落水調査時の通常管理水田では、落水開始後最初の 10 分間に、SS 総流出量の 43%、T-P 総流出量の 30% が流出した。これに対し、田んぼダム実施水田では総流出量に対して SS、T-P ともに 10% 程度であった。これは落水量調整板の設置が排水マス付近の流速増加を抑制したためであると考えられる。

代かき落水調査時と中干し落水調査時に観測したSS濃度とT-P濃度の相関関係を示した(図3.31)。SS濃度-T-P濃度の関係は、強い相関があることが確認された。神山(2009)は、リンの流出は土壌流亡に伴う懸濁態による流出の寄与が大きいことを報告しており、この結果は、土粒子に強く吸着したリンが懸濁態リンとして流出したことに起因すると考える。

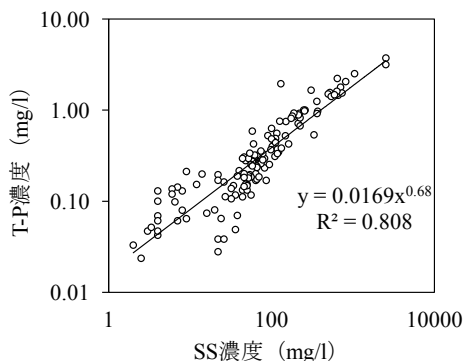


図 3.31 SS と T-P の相関

### 3.7. 第3章のまとめ

本調査では、仮説の一つとした流出時間の延長による浮遊土砂の沈降については検証できなかった。しかし、水尻付近の流速の低下による土砂流出抑制効果を検証し、その効果を明らかにした。本調査時のように風速による外的影響がない場合、田んぼダムを実施することで土粒子や、それに伴うリンの流出を抑制することが明らかとなった。

次章では本結果を踏まえ、田んぼダムによる土砂流出抑制効果が圃場排水の流入先水域の土砂堆積および水質に与える影響を検討する。

## 4. 鳥屋野潟における土砂および栄養塩の流入量抑制効果の検証

### 4.1. はじめに

ここでは、亀田郷全域の水田で田んぼダムを実施した場合を想定し、鳥屋野潟における土砂堆積およびリン蓄積の抑制効果を評価した。

### 4.2. 調査内容

#### 4.2.1. 観測対象河川・水路の概要

##### (1) 栗ノ木川

1級河川栗ノ木川は、全長約6,855mで亀田郷東側の水田地帯の排水を集め、鳥屋野潟に流入する。流域面積は約4,950haであり、うち水田面積は約2,520haである(図4.1の排水区域番号④に該当)。栗ノ木川流域の面積は亀田郷面積の約50%を占め、多くの主要排水路が流入するため、生活排水のほか、灌漑期間には水田地帯から発生する多量の土砂を含んだ濁水が鳥屋野潟に流入し、水質悪化が問題となっている。

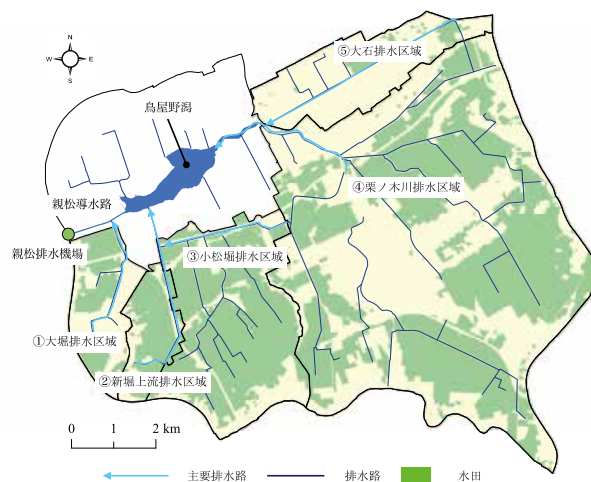


図 4.1 亀田郷の河川・排水路の排水区域

##### (2) 大石排水路

大石排水路は栗ノ木川に接続する排水路であり、全長約5,260mである。流域面積は約720haである(図4.1に示す排水区域⑤番に該当)。農地は流域面積の約10%程度であり、市街地からの家庭排水、工業排水が卓越する。大石排水路の排水区域内の水田は、一部栗ノ木川の排水を竹尾揚水機場で揚水し、用水として再利用している。このため、他の排水路と比較して水質悪化が顕著である。灌漑期間には、濁水が栗ノ木川に流入する様子が見られる。

##### (3) 新堀排水路および小松堀排水路

新堀排水路は鳥屋野潟に直接流入する全長約4,500mの幹線排水路である。流域面積は約1,670ha、うち水田面積は約1,200haである(図4.1の排水区域番号②、③に該当)。鳥屋野潟流入部の上流約960mで小松堀排水路(流域面積約1,350haうち水田面積約970ha、水路延長約3,270m)(図4.1の排水区域番号③に該当)が合流する。小松堀排水路の流域面積が新堀排水路の流域の80%を占め、流量の寄与率は小松堀排水路の方が大きいため、小松堀排水路を観測対象とした。一方、新堀排水路上流の流域面積(約320ha)に対する水田面積(約230ha)割合は約70%と大きいため、小松堀排水路との合流地点より上流の新堀排水路も負荷量算定の対象とした(図4.1の排水区域番号②に該当)。

##### (4) 親松導水路および大堀排水路

親松導水路は鳥屋野潟流出部から親松排水機場を結ぶ全長約1,260mの水路である。亀田郷内の雨水・排水のほぼ全量が親松導水路を経て親松排水機場から信濃川へ排水される。

潟流出部の下流350mで鳥屋野潟を bypass しない大堀排水路(全長約3,390m)が合流する(図4.1の排水区域①番に該当)。大堀排水路の流域面積は約470haであり、うち水田面積は約200haである。

## 4.2.2. 調査方法

### (1) 採水方法および採水間隔

鳥屋野潟流入側の主要な河川・排水路である栗ノ木川・小松堀排水路と流出側水路である親松導水路で採水した。栗ノ木川と親松導水路には自動採水器を設置し、小松堀排水路では、週数回程度の頻度で直接 500ml ボトルに採水した（写真 4.1, 図 4.2）。自動採水器の採水間隔は、代かき時期および降雨時は 30 分から 2 時間間隔で、それ以外は 4 時間から 24 時間間隔とした。採水期間は 2014 年 4 月 18 日—9 月 30 日までである。



写真 4.1 自動採水器

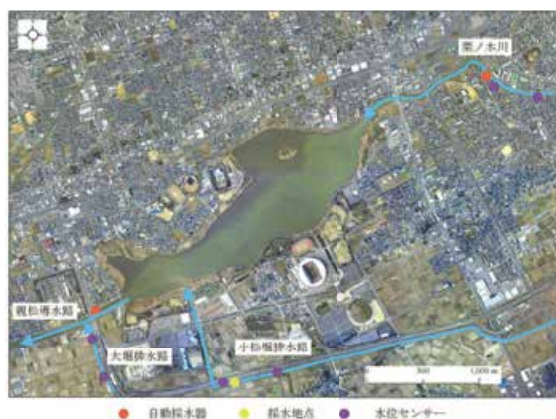


図 4.2 採水地点および水位センサー設置地点

### (2) 水質分析方法

SS および T-P 濃度は、水田排水の分析と同じ方法で測定した。（3.2.3 節を参照）

### (3) 水位観測

河川・排水路の流量の把握を目的に水位センサー（センシズ社製圧力検知式センサー（HM910））を設置し、データロガー（ヒオキ社製データロガー（LR5042））により 10 分間隔で記録した。設置地点は、採水地点付近の栗ノ木川下流部、小松堀排水路下流部、大堀排水路下流部である（図 4.2）。水位センサーは 340 – 500m 離して 2 箇所ずつ設置した。2 地点間の観測水位データから水面勾配を算定し、マンニング式（4.1）によって流量を推定した。

$$Q = A \frac{1}{n} R^{\frac{2}{3}} i^{\frac{1}{2}} \quad (4.1)$$

ここに、 $Q$ ：推定流量、 $A$ ：流積、 $n$ ：粗度係数、 $R$ ：径深、 $i$ ：水面勾配である。

観測期間は 2014 年 4 月 18 日—2015 年 1 月 6 日までとした。

### (4) 測量調査

水位計の観測記録から水面勾配を求めるため、水位計間距離と標高差の測量を行った。

### (5) 河川水・圃場排水中の粒度分布の測定

鳥屋野潟流出流入河川・排水路の河川水および圃場排水中の粒度分布をレーザー回折式粒度分布測定装置（島津製作所製（SALD-2300））によって測定した。測定した試料は、代かき時期の 4 月 30 日に採水した河川水および 4 月 27・28 日に採水した圃場排水である。河川水は見た目の濁度が小さく、測定できない可能性があったため、10 倍に濃縮した。

### (6) 揚排水機場データの取得

鳥屋野潟からの流出量は、親松排水機場、鳥屋野潟排水機場の稼働データを用いた。また、河川・水路の推定 Manning 流量の検証を目的に、亀田郷土地改良区管轄の揚排水機場稼働データを用いた。親松排水機場のデータは新潟県新潟地域振興局、鳥屋野潟排水機場のデータは新潟県土木部、揚排水機場のデータは亀田郷土地改良区に依頼し提供を受けた。

## 4.3. 鳥屋野潟流出流入負荷量の観測結果

鳥屋野潟の流出流入負荷量は、排水中の各濃度に河川・排水路流量を乗じて求めた。以下に各項目の結果を河川・水路ごとに記す。なお、代かき落水時期、中干し落水時期は農家によってばらつきがあるが、本研究では、亀田郷用水計画（亀田郷土地改良区，2014）に基づき落水時期を推定した。

### 4.3.1. 濃度の経時変化

#### (1) SS 濃度

代かき時期、中干し落水期間、大雨時を除く通常灌漑期間の SS 濃度は、鳥屋野潟流入側の栗ノ木川で平均  $24 \pm 8 \text{ mg/l}$ 、小松堀排水路で平均  $28 \pm 7 \text{ mg/l}$ 、流出側の親松導水路では平均  $45 \pm 21 \text{ mg/l}$  であった（図 4.3）。親松導水路の濃度が栗ノ木側、小松堀排水路の濃度を上回った。

代かき時期（4 月 25 日—5 月 6 日）は、栗ノ木川で平均  $62 \pm 33 \text{ mg/l}$ 、小松堀排水路で平均  $78 \pm 28 \text{ mg/l}$ 、親松導水路で平均  $52 \pm 14 \text{ mg/l}$  で（図 4.4）、流入側水

路の濃度が流出側水路の濃度を上回る結果となった。栗ノ木川、小松堀排水路の濃度上昇は、代かき落水による水田からの土砂流出量の増加に起因するものと考えられる。一方、親松導水路では流入側と比較して濃度の上昇幅は小さく、鳥屋野潟からの流出は、時期によらず一定濃度となる傾向が示された。

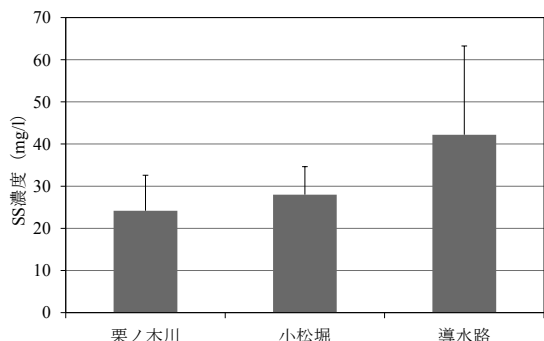


図 4.3 通常灌漑期の SS 濃度の平均値

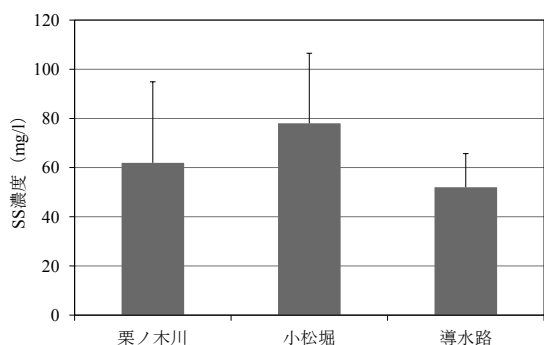


図 4.4 代かき時期の SS 濃度の平均値

2014年7月9日に発生した大雨時（最大24時間雨量160.6mm）の濃度は、栗ノ木川で平均175±121mg/l、小松堀排水路で平均160±169mg/l、親松導水路で平均103±48mg/lであった（図4.5）。栗ノ木川では通常灌漑期間の約6.7倍、小松堀排水路では約7.6倍で、通常灌漑期間と比較して大きく上昇した。大雨時の圃場排水のSS濃度が大きく上昇していないことから、農地からの土砂流入というより、河床や水路底に堆積した土砂が流速の増加に伴って攪乱・運搬された結果であると考えられる。

灌漑期間を通じて、栗ノ木川と小松堀排水路では代かき時期に濃度が上昇し、代かきの終了後に低下、通常灌漑期間の変動は小さかった（図4.6、図4.7）。ただし、日雨量20mmを超える降水時は、濃度が上昇した。親松導水路では、降雨時の濃度上昇は確認されたが、無降雨時は、落水イベントにかかわらず灌漑期間を通じて流入河川ほどの変動はなかった（図4.8）。

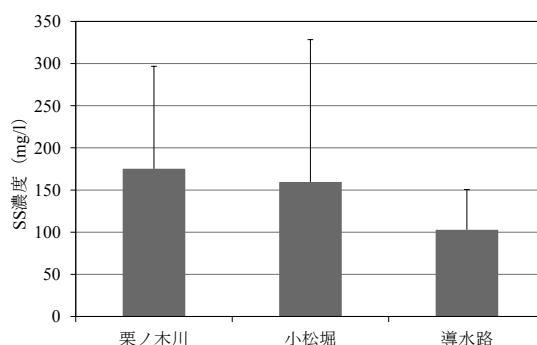


図 4.5 7月9日大雨時の SS 濃度の平均値

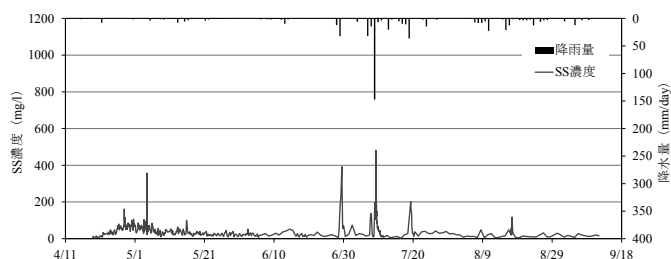


図 4.6 栗ノ木川の SS 濃度経時変化

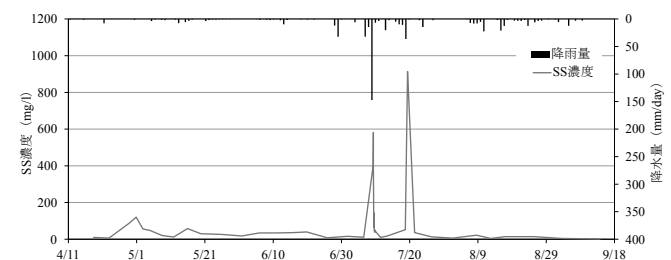


図 4.7 小松堀排水路の SS 濃度経時変化

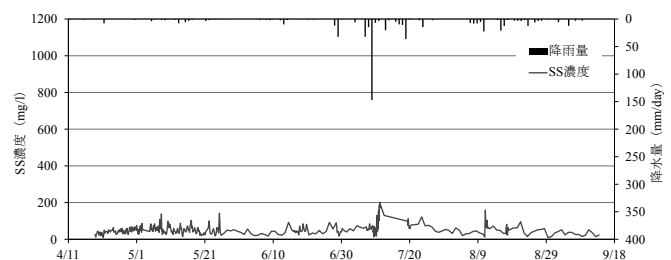


図 4.8 親松導水路の SS 濃度経時変化

## (2) T-P 濃度

代かき時期、中干し落水期間、大雨時を除く通常灌漑期間の T-P 濃度は、栗ノ木川で平均  $0.43 \pm 0.10 \text{mg/l}$ 、小松堀排水路で平均  $0.44 \pm 0.09 \text{mg/l}$ 、親松導水路で平均  $0.52 \pm 0.20 \text{mg/l}$  であった（図4.9）。SS濃度と同様に、親松導水路の濃度が栗ノ木側、小松堀排水路の濃度を上回った。

代かき期間の T-P 濃度は、栗ノ木川で平均  $0.63 \pm 0.20 \text{mg/l}$ 、小松堀排水路で平均  $0.79 \pm 0.20 \text{mg/l}$ 、親松導水路では平均  $0.58 \pm 0.11 \text{mg/l}$  であった（図4.10）。鳥屋野潟流入側河川・水路では代かき期間の濃度上昇が

あったが、親松導水路では大きな変動はなかった。また、鳥屋野潟流入河川・水路の T-P 濃度は、鳥屋野潟流出側水路より高い結果となった。7月9日に発生した大雨時の T-P 濃度は、栗ノ木川で平均  $1.74 \pm 0.82\text{mg/l}$ 、小松堀排水路で平均  $1.57 \pm 1.15\text{mg/l}$ 、親松導水路で平均  $1.11 \pm 0.45\text{mg/l}$  であった (図 4.11)。大雨時は著しい濃度上昇が確認され、鳥屋野潟流出側より流入側の濃度上昇が大きかった。

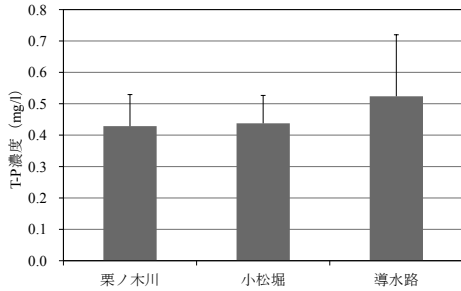


図 4.9 通常灌漑期の T-P 濃度の平均値

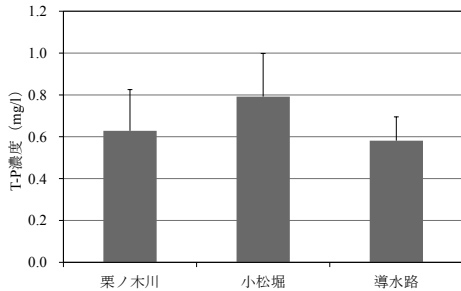


図 4.10 代掻き期間の T-P 濃度の平均値

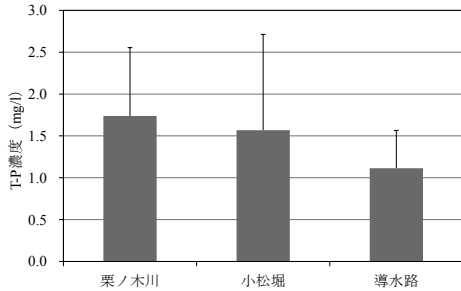
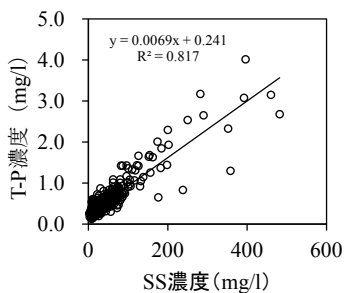
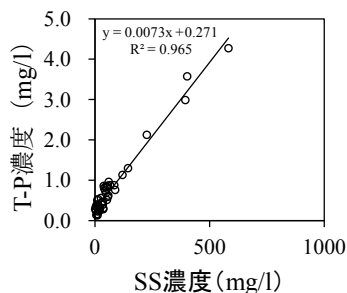


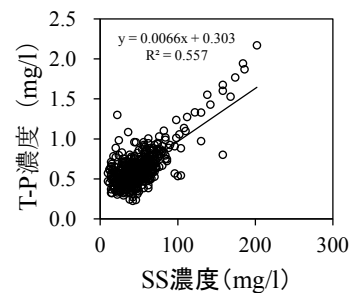
図 4.11 7月9日大雨時の T-P 濃度の平均値



(a) 栗ノ木川



(b) 小松堀排水路



(c) 親松導水路

図 4.15 河川水中の SS 濃度と T-P 濃度の相関

以上の結果から、T-P 濃度は、灌漑期間を通して、栗ノ木川、小松堀排水路では代掻き期間および大雨時に上昇する傾向があったが (図 4.12, 図 4.13)、親松導水路では大雨時にのみ濃度上昇があり、それ以外は約  $0.50\text{mg/l}$ - $1.00\text{mg/l}$  の間で変動した (図 4.14)。

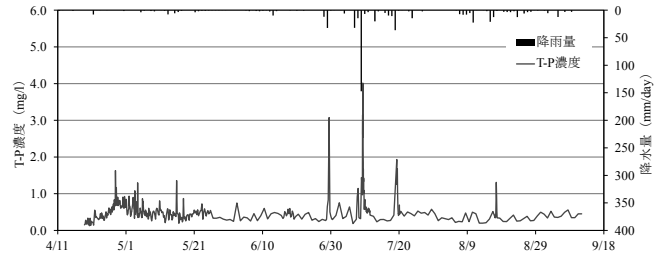


図 4.12 栗ノ木川の T-P 濃度経時変化

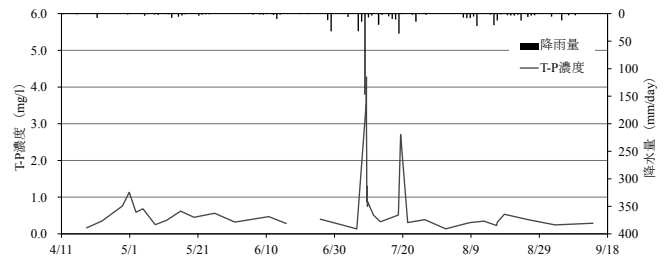


図 4.13 小松堀排水路の T-P 濃度経時変化

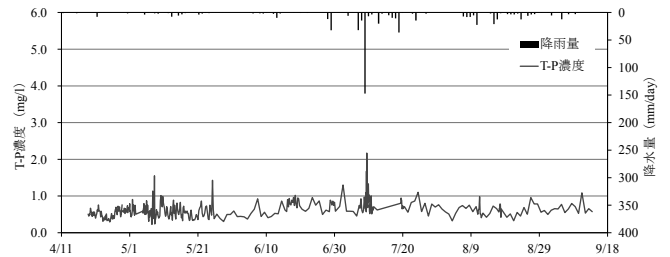


図 4.14 親松導水路の T-P 濃度経時変化



### (3) SS 濃度と T-P 濃度の関係

各水路における SS 濃度と T-P 濃度は、全ての試料で比較的強い正の相関があった (図 4.15)。本研究の対象地では、河川水中のリンは土粒子と強く吸着する懸濁態リン (山本ら, 2003) の割合が高く、土粒子に吸着しにくい溶存態リンの割合が低いと考えられる。第 3 章で示した通り、水田から流出する SS と T-P の濃度にも相関があり、亀田郷流域は水田面積割合が約 43% と高いことから、鳥屋野潟流入河川水中に含まれる SS、T-P は農地からの土砂流出に由来する成分が多く含まれることが示唆される。

### 4.3.2. 鳥屋野潟流出入河川・水路の流量の推定

鳥屋野潟へ流入する河川・水路の流量は、全流入量に対する寄与率が高い栗ノ木川および小松堀排水路の流量を観測した。一方、鳥屋野潟流出側の流量は、親松排水機場の排水量から鳥屋野潟を経ずに親松導水路に直接流入する大堀排水路の流量を差し引いて求めた。亀田郷内の用排水は全て機場により人為的に管理されているため、これに、降水量と蒸発散量を考慮すれば、潟の水収支は一致するはずである。こうした考えのもと、各排水路での連続流量を把握した後、流量観測を実施しなかった水路の流量配分割合を求めるため、亀田郷の全排水路を再現する次元不定流モデルを構築し、鳥屋野潟への寄与率を決定した。

### (1) 次元不定流モデルの概要

各土地利用からの流出量を計算する「流出入量算定モデル」、排水路の流れを計算する「次元不定流モデル」2つのサブモデルで構成した。亀田郷内の河川・排水路の流れを再現するため、排水路網および排水区域を作成した (図 4.16)。各河川・排水路を約 50-400m の計算メッシュに分割し、排水区域は各水路メッシュに対応するように作成した。なお、鳥屋野潟は水面勾配を考慮するため、水路として扱った。

### (2) モデルの適用

亀田郷では、舞潟揚水機場、両川揚水機場、沼海揚水機場、二本木揚水機場の 4 機場で農業用水を取水し、大雨時以外は親松排水機場で全量を排水する。本モデルでは、揚排水量データを入力値として与え、河川および水路の流れの計算を行った。ただし、地下浸透量や蒸発散量は、降雨のない一定期間を参照期間として、全揚水機場の揚水量の合計から親松排水機場の排水量を差し引き、これを損失量とした。

本モデルは排水の計算を行う目的で構築されたため、用水路の流れは計算しない。そこで、揚水機場の各揚水量を各機場の受益水田に取水量として均等配分し、損失量を差し引いた量を圃場排水量とみなし、これを横流入量として 1 次元不定流モデルの水路メッシュに与えた。

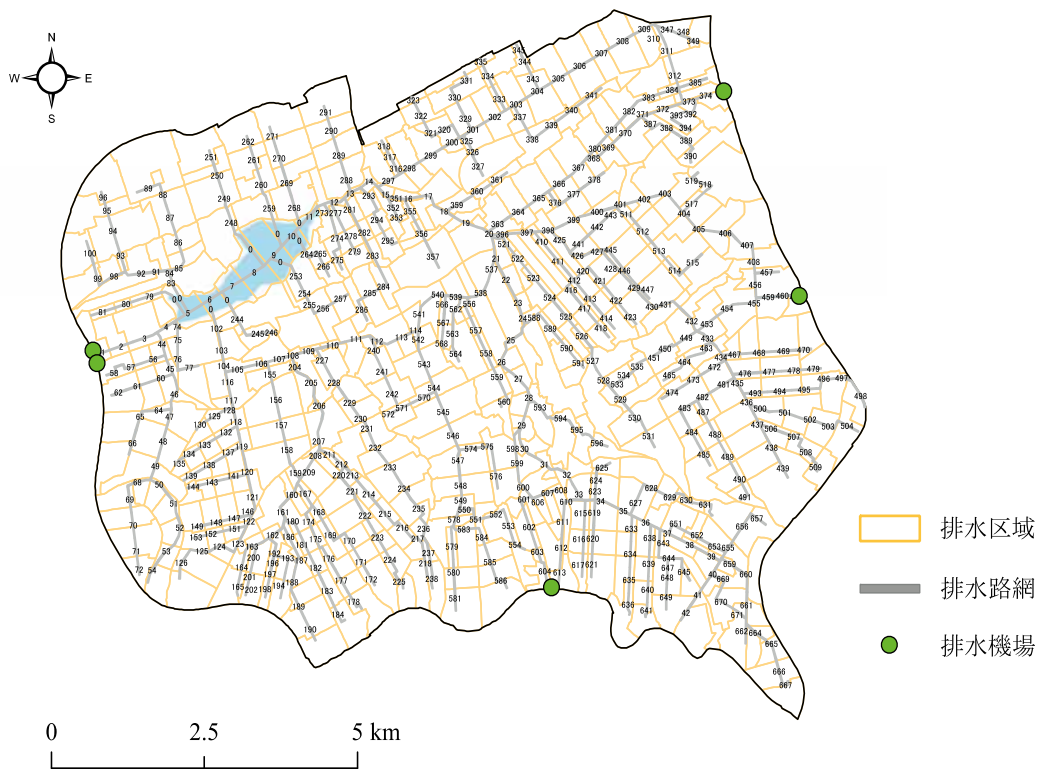


図 4.16 作成した排水路網および排水区域

### (3) 計算結果

各観測地点の水位の変動を計算した結果、実測値と計算値は概ね一致した。親松排水機場の排水量を100%として、各河川・水路の流量配分割合を計算すると、栗ノ木川で平均60%、小松堀排水路で平均23%、大堀排水路で平均5%となり、これらの合計は88%であった。残りの12%がその他の小排水路の流量である。

各河川・水路の流量の経時変化を図4.17、4.19に示す。流量が負の値であるのは逆流を表す。各河川・水路ともに7月9日の大雨時に流量が一時的に著しく上昇し、中干し期間である6月下旬に流量が小さくなる傾向があった。また、小松堀排水路および大堀排水路では舞潟揚水機場が間断運転する8月に流量が小さくなった。

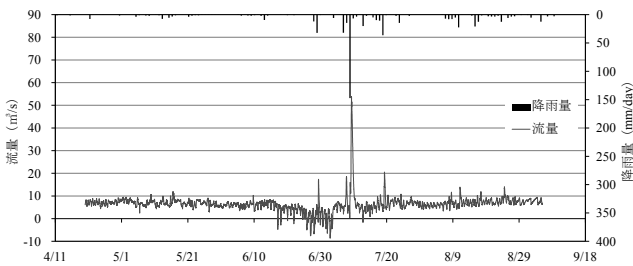


図 4.17 灌漑期間中の栗ノ木川流量の経時変化

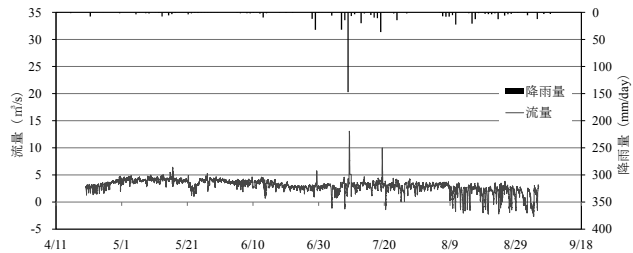


図 4.18 灌漑期間中の小松堀排水路流量の経時変化

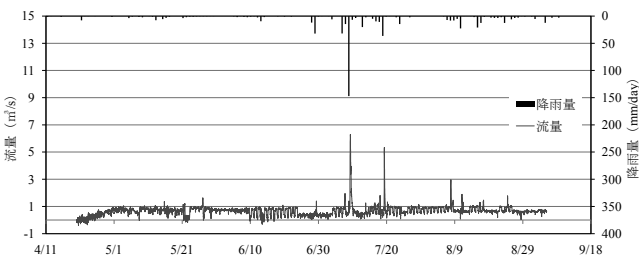


図 4.19 灌漑期間中の大堀排水路流量の経時変化

### (4) 水位センサーを設置していない水路の流量の推定

水位センサーを設置していない大石排水路および新堀排水路上流の流量は、各水路の接続先河川・水路である栗ノ木川および小松堀排水路の流量に流量配分割合を乗じて推定した。大石排水路は栗ノ木川系統であるため栗ノ木川の連続流量に、新堀排水路上流は同じ新堀排水路系統である小松堀排水路の連続流量に配分割合を乗じた。推定流量の計算式(4.2)を以下に示す。

$$Q_e = p \times Q \quad (4.2)$$

ここに、 $Q_e$ : 推定流量、 $p$ : 流量配分割合、 $Q$ : 連続観測河川・排水路流量である。

計算の結果、栗ノ木川の流量を100%とした場合、大石排水路の流量配分割合は8%、小松堀排水路の流量を100%とした場合、新堀排水路上流の流量配分割合は22%であった。

鳥屋野潟流入流出量の推定結果を図4.20に示す。鳥屋野潟の流入量と流出量は概ね一致したことから、水収支の妥当性が示された。

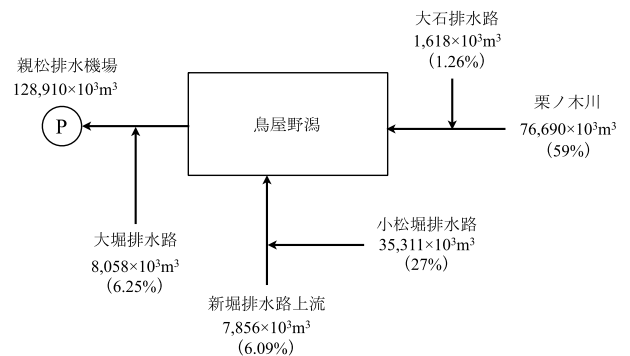


図 4.20 灌漑期間中の鳥屋野潟における水収支の概念図 (カッコ内の数字は親松排水機場の排水量を100%とした場合の流量配分割合)

### 4.3.3. 出流入負荷量および土砂堆積量の推定

#### (1) LQ式の作成

採水試料を取得した栗ノ木川、小松堀排水路、親松排水路以外の水路の負荷量は、流量と物質負荷量の関係を表す式であるLQ式によって計算した。LQ式の作成には2014年度の実測流量データとSS、T-P濃度データの外、先行研究(水田, 2010)で収集した2002-2010年の実測流量データと各濃度データを使用した。本研究で作成したLQ式の関数型は以下のとおりである(4.3)。

$$L = a \times Q^b \quad (4.3)$$

ここに、 $L$ : 負荷量、 $a$ 、 $b$ : 係数、 $Q$ : 推定流量である。係数 $a$ 、 $b$ は過去の実測負荷量と流量のデータを用いて、最小二乗法によって求めた。水路ごとのLQ式を表4.1に示す。

表 4.1 各排水路のLQ式

水路	SS	T-P
小松堀排水路	$L=14.18 \times Q^{2.43}$	$L=0.06 \times Q^{2.59}$
大石排水路	$L=26.35 \times Q^{1.53}$	$L=0.20 \times Q^{0.72}$
新堀排水路上流	$L=18.16 \times Q^{2.12}$	$L=0.15 \times Q^{1.61}$

## (2) 負荷量の算定方法

通常灌漑期はLQ式で、LQ式では表現ができない物質濃度の上昇がある代かき時期と大雨時は、以下の方法で負荷量を算定した。

大石排水路の代かき時期の負荷量は、大石排水区域の水田面積割合が小さいことから、代かき落水による負荷量の上昇がほとんどないと仮定し、通常灌漑期同様にLQ式を用いて負荷量を算出した。

大石排水路の大雨時の負荷量は、栗ノ木川の通常灌漑期の平均負荷量と、LQ式から算出した大石排水路の通常灌漑期の平均負荷量の割合を栗ノ木川の大雨時の負荷量に乗じて算出した。

新堀排水路上流の代かき時期の負荷量は、小松堀排水路の代かき時期の負荷量に、小松堀排水路の通常灌漑期の平均負荷量とLQ式から算出した新堀排水路上流の通常灌漑期の平均負荷量の割合を乗じて算出した。

大雨時の新堀排水路上流の負荷量は、小松堀排水路の大雨時の負荷量に通常灌漑期の割合を乗じ算出した。

## (3) 負荷量および堆積量の算定結果

栗ノ木川、大石排水路、小松堀排水路、新堀排水路上流のSS負荷量の合計値である全鳥屋野流入負荷量と全流出負荷量である親松導水路の負荷量の経時変化を図4.21に示す。

流入側の負荷量は、代かき時期（4月26日）から田植え時期（5月6日）にかけて増加した。また、7月9日の大雨時には一時的に負荷量が著しく増加し、約8,000g/sに達した。通常灌漑期は大きな変動はないが、中干し時期である6月後半に低下する傾向が示された。代かき時期には負荷量が大きく増加した。これは、代かき落水による土砂流入量の増大が原因であることが考えられる。代かき落水に起因する鳥屋野流入負荷量を抽出するため、代かき時期の負荷量から通常灌漑期の平均負荷量を差し引いた結果、この時期の負荷増加量は約 $637 \times 10^3\text{kg}$ となった。

T-P負荷量の結果を図4.22に示す。流入側T-P負荷量はSS同様に代かき時期に増加した。また、7月9日の大雨時に一時的に著しく負荷量が増大し、約80g/sに達した。通常灌漑期はほぼ一定に推移し、中干し時期に低下するといったSS同様の傾向があった。代かき落水に起因する鳥屋野流入量を計算した結果、4,092kgとなった。

これらのSSおよびT-P負荷量を亀田郷流域の全水田面積4,170haからの流出負荷量と考えると、平均的な区画面積20a当りSS約31kg、T-P約235gが代かき期から田植え期にかけて流出したと計算できる。代かき落水調査の結果は、代かき落水時に20aの通常管理水田の流出量はSSで8kg、T-Pで32gであったため、鳥屋野への流入負荷量が大幅に上回った。この原因と

して、調査対象圃場の大形工区では、代かき時の湛水量が比較的少ないことが考えられる。

流入側と流出側を比較すると、代かき時期以外の、通常灌漑期および大雨時には両者に大きな差はなかったが、代かき時期前後に注目すると、本田用水を導入し始める4月24日から田植え作業が本格化する5月4日までの期間は流入側が流出側負荷量を大きく上回った。この時期の流入と流出の差はSSで $481 \times 10^3\text{kg}$ 、T-Pで5,416kgであり、一時的にこの量が鳥屋野潟に堆積したと考えられる。

鳥屋野潟流入側の負荷量は本田用水を導入した4月24日以降上昇があったが、鳥屋野潟流出側でも負荷量の上昇が確認された。流出側では流入側と比べ、約2日遅れて負荷量が増加する結果となった。鳥屋野潟の灌漑期間の平均滞留時間は1.6日（越山ら、2000）であるため、鳥屋野潟流出側の負荷量の上昇の遅れは、鳥屋野潟の滞留時間によるものである。また、7月9日の大雨時でも流出側の負荷量の上昇は流入側と比べ遅れが確認されたが、その遅れは約3時間であり代かき時期と比較して短かった。親松排水機場の排水量の増大によって、鳥屋野潟内の滞留時間が短縮した事が考えられる。

各河川・水路の灌漑期間中のSS、T-P総負荷量の算定結果を元に、鳥屋野潟の物質収支の概念図を図4.23、図4.24に整理した。鳥屋野潟へのSS総流入負荷量は約 $5,991 \times 10^3\text{kg}$ 、潟からの総流出SS負荷量は $5,716 \times 10^3\text{kg}$ となり、これらの差として鳥屋野潟内のSS堆積量約 $275 \times 10^3\text{kg}$ が求められた。同様に、総流入T-P負荷量約 $81 \times 10^3\text{kg}$ と総流出T-P負荷量約 $74 \times 10^3\text{kg}$ から、T-P堆積量は約6,495kgであった。

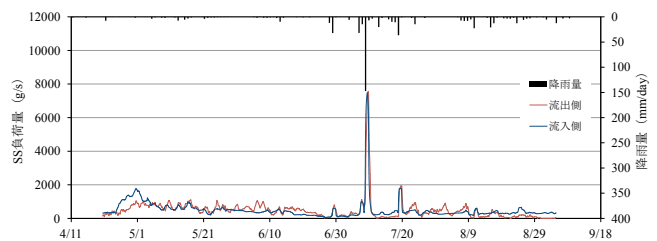


図 4.21 鳥屋野潟流出・流入 SS 負荷量の経時変化

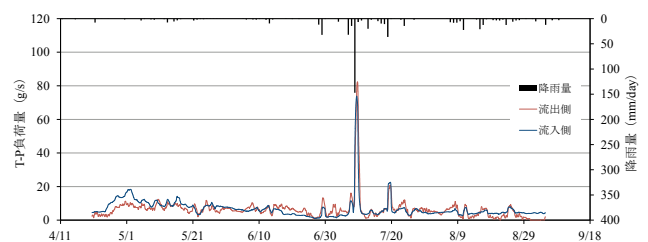


図 4.22 鳥屋野潟流出・流入 T-P 負荷量の経時変化

#### (4) 鳥屋野濁土砂堆積の仮説

代かき時期に多量の土砂が鳥屋野濁に流入し、その一部が堆積する可能性が示された。代かき時期の土砂堆積の機構として、鳥屋野濁流入後の流速が低下に起因すると考えた。代かきは攪拌によって水田土壌の多量の浮遊土砂を生産するが、比較的短期間に落水するため、排水中の土粒子の粒径は多様である。河川・水路は比較的流速が大きいため、ほとんどの土粒子は輸送されるが、鳥屋野濁に流入し流速が低下すると、大粒径の土粒子は沈降・堆積し、少粒径の粒子はそのまま流出すると考えた。

こうした仮説を立証するため、鳥屋野濁流入側河川である栗ノ木川と、鳥屋野濁流出側水路である親松導水路の河川水、および通常管理水田の排水中の懸濁物質の粒度分布を測定した(図 4.25)。

各試料のメディアン径(通過質量百分率 50% 粒径)を比較すると、栗ノ木川で  $7.73 \mu\text{m}$ 、親松導水路で  $4.27 \mu\text{m}$ 、圃場排水で  $6.21 \mu\text{m}$  であった。栗ノ木川と圃場排水のメディアン径は同程度であったのに対し、親松導水路のメディアン径は栗ノ木川、圃場排水のメディアン径よりも小さかった。鳥屋野濁流入側水路の河川水および圃場排水には比較的大粒径の土粒子が含まれ、鳥屋野濁流出側水路には小粒径となること示されたことから、仮説の正しさが示唆された。

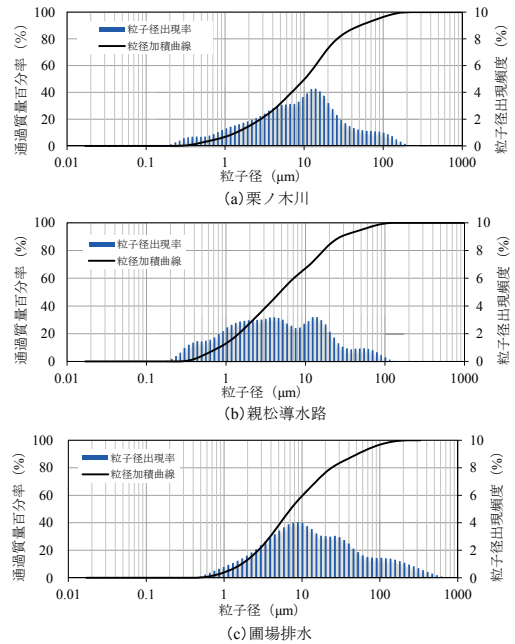


図 4.25 代かき時期における河川水、圃場排水中懸濁物質の粒度分布

#### 4. 4. 田んぼダムによる鳥屋野濁の土砂および T-P 堆積抑制効果の推定

水田から流出した土砂は、その全てが鳥屋野濁に輸送されるとは限らず、一部は末端排水路、幹線排水路、栗ノ木川に堆積する。そのため、本来なら土砂輸送や河床変動のメカニズムを再現するモデルを構築して鳥屋野濁の堆積抑制効果を評価する必要がある。こうした解析は次年度に譲るとして、ここでは、本研究で得られた結果に基づき概算を行う。

第 3 章で述べた現地落水調査結果から、落水イベント時に田んぼダム実施によって、SS で 81%、T-P で 72% の流出抑制効果が期待できることが示された。ここでは、亀田郷全域で、田んぼダムを実施した場合、鳥屋野濁への物質流入量および堆積量の抑制効果について検討した。

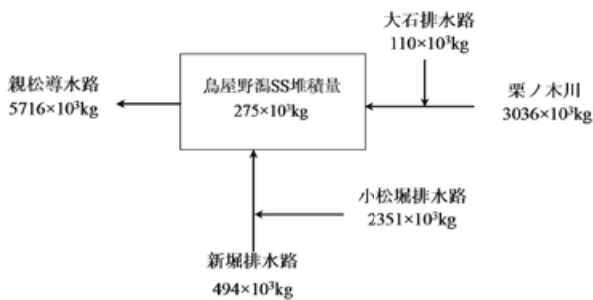


図 4.23 鳥屋野濁の SS 流出入量

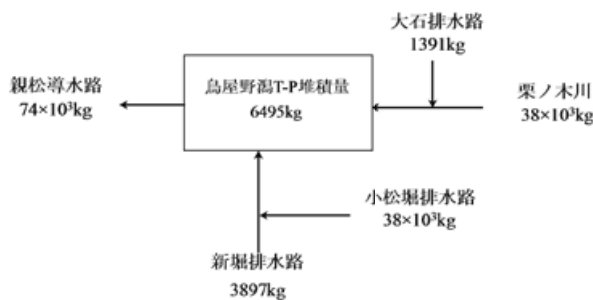


図 4.24 鳥屋野濁の T-P 流出入量

##### 4. 4. 1. SS 流入抑制量の推定

代かき時期の水田由来の鳥屋野濁 SS 流入負荷量は約  $637 \times 10^3\text{kg}$  であった。亀田郷全域で田んぼダムを実施した場合、SS 負荷量の 81% 削減できると仮定すると、鳥屋野濁流入量は  $516 \times 10^3\text{kg}$  減少する。2014 年度の浚渫土砂量の実績は約  $1000 \text{m}^3$  であり、重量に換算すると  $1205 \times 10^3\text{kg}$  である。SS 流入抑制量が  $516 \times 10^3\text{kg}$  であるため、これは浚渫量の約 40% の土砂量に相当する。

##### 4. 4. 2. T-P 削減量の推定

代かき時期の水田由来の鳥屋野濁への総 T-P 流入量は  $4,902\text{kg}$  であるため、72% 削減すると仮定すると、亀田郷全域で田んぼダムを実施すると抑制量は、 $3,530\text{kg}$  となる。

#### 4.5. 第4章のまとめ

本章では鳥屋野潟の流出流入河川・排水路のSS、T-P濃度と流量を把握し、流出流入負荷量を算定した。また、それらの結果から堆積量を把握し、鳥屋野潟の物質収支の実態を把握した。亀田郷全域で田んぼダムを実施した場合を想定し、鳥屋野潟のSSおよびT-P流入負荷量の縮減量を2014年度観測値から推量した。結果として、落水イベント時に浚渫土砂量(2014年度実績)の約40%相当を縮減し、また、リンの流入量抑制にも効果があるため、水質悪化・富栄養化対策の可能性が示唆された。

#### 5. 今後の課題と展望

本研究では、風速による外的影響が小さければ、落水イベント時において田んぼダムを実施した場合に、SSおよびT-P流出負荷量を縮減することができることが示された。しかし、通常灌漑期間や、大雨時の試料が少ないことから、今後も連続観測を継続し、田んぼダムの有無による土砂流出量の比較する必要がある。

また、試験圃場で行った代かき落水の調査では、20a区画の圃場からのSS流出量は平均8kgであったのに対し、この時期の鳥屋野潟へのSS流入量は20aに換算すると32kgであった。本研究の結果から、これらの違いが生じた理由は不明である。

圃場から流出した土砂は、その全量が湖沼に堆積するのではなく、湖沼到達前に河川や排水路内に堆積する可能性がある。また、田んぼダムを実施した場合、鳥屋野潟に流入する土砂のうち、どの程度が通過して親松導水路に流出するのか十分な検討ができなかった。今後、土砂輸送に関するメカニズムを解明するため、更に河川水中の懸濁物質の粒度分析試験等を実施し、堆積土砂の土性を把握するなど、堆積機構を明らかにしたうえで、土砂輸送および河床変動を再現するモデルを構築し、シミュレーションによって田んぼダムの土砂流出抑制効果を評価したいと考える。

なお、本研究および新潟市農村整備課、下水道計画課の受託研究の一環で、亀田郷全域における田んぼダムの水害抑制効果を定量するためのシミュレーションモデルを構築した。田んぼダムを全域で実施した場合を想定してシミュレーションした結果、鳥屋野潟の水位低下に効果があることが明らかになった。

平成10年8月4日(総降水量254mm、時間最大降水量97.0mm)の降雨イベントを適用すると、田んぼダムを実施しない場合、鳥屋野潟の水位は最高でT.P.-0.525mまで上昇したが、田んぼダムを全域で実施した場合は、T.P.-0.684mであった。実施しない場合と比較して、鳥屋野潟水位が約16cm低下した。

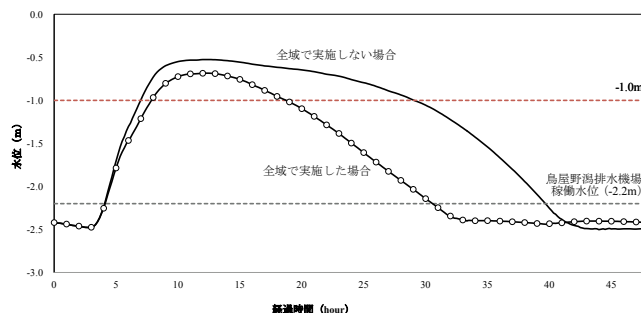


図 5.1 田んぼダム実施による鳥屋野潟水位への影響 (平成10年8月4日降雨イベント)

平成26年7月9日の降雨(総降水量154mm、時間最大降水量36.4mm)では、田んぼダムの実施、不実施それぞれで、最高水位はT.P.-1.26m、-1.57mとなり、鳥屋野潟水位を32cm低下させる効果があった。

田んぼダムにはこうした水害抑制の効果があるが、田んぼダム実施にかかる農家へのメリットが明確でないため、これが普及の障害となっていた。水田からの土砂流出抑制効果を明らかにし、農家にとっても恩恵がある取り組みであることを示すことによって、今後の田んぼダムの取組拡大が期待できると考える。

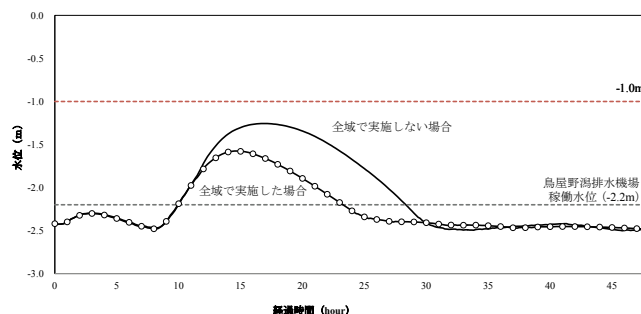


図 5.2 田んぼダム実施による鳥屋野潟水位への影響 (平成26年7月9日降雨イベント)

## 参考文献

- 原田久富美・小林ひとみ・進藤勇人（2005）代かき直後の強制落水に伴う重粘土水田からの懸濁物質の排出とその抑制. 東北農業研究, 58, pp43-44.
- 廣島英（2014）田んぼダムの土砂流出抑制機能の検証. 新潟大学卒業論文
- 亀田郷土地改良区（2015）「亀田郷の概要」  
<http://www.kamedagou.jp/kmd/gaiyou.html>.
- 神山和則（2009）土壌浸食ポテンシャルの広域評価とリンの流出. 土・水研究会資料, 26, 41-47.
- 環境省（2007）『『環境用水の導入』事例集 ～魅力ある身近な水環境づくりにむけて～』  
<http://www.env.go.jp/water/junkan/case2/pdf/00cover.pdf>.
- 国土交通省（水管理・国土保全局河川環境課）（2014）「全国一級河川の水質現況」  
[http://www.mlit.go.jp/river/toukei\\_chousa/kankyo/kankyoy/suisitu/pdf/h25\\_suisitu/02\\_syousai.pdf](http://www.mlit.go.jp/river/toukei_chousa/kankyo/kankyoy/suisitu/pdf/h25_suisitu/02_syousai.pdf).
- 国土交通省北陸地方整備局（2012）「信濃川水系河川整備計画骨子」  
<http://www.hrr.mlit.go.jp/shinage/shinano-plan/plan/pdf/kosshi.pdf>.
- 国土交通省・農林水産省・環境省（2006）「湖沼水質のための流域対策の基本的考え方～非特定汚染源からの負荷対策～」  
[http://www.mlit.go.jp/river/shishin\\_guideline/kankyo/kosyo/main.pdf](http://www.mlit.go.jp/river/shishin_guideline/kankyo/kosyo/main.pdf).
- 越山直子・三沢眞一・豊田勝（2002）都市化農業地域を集水域とする湖沼の水質モデル. 農業土木学会論文集, 70(6), pp675-681.
- 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, 282, pp479-488.
- 水田優佑（2010）農業主体流域における排出負荷源別水質推定モデルの精査. 新潟大学卒業論文
- 笹田康子・石原暁・岡井隆（2004）水田からの汚濁負荷の流出特性. 香川環境保健研究所月報, 3, pp49-57.
- 清水智・松井宏之（2007）水田からの土壌流出に水稲・風が与える影響について. 農業農村工学会全国大会講演要旨集, P-22, pp1010-1011.
- 農業農村整備情報総合センター（2005）「水土の礎」  
<http://suido-ishizue.jp>.
- 山田佳裕・井桁明文・中島沙知・三戸勇吾・小笠原貴子・和田彩香・大野智彦・上田篤史・兵藤不二夫・今田美穂・谷内茂雄・陀安一郎・福原昭一・田中拓也・和田英太郎（2006）しろかき期の強制落水による懸濁物 窒素とリンの流出—圃場における流出実験—. 陸水学雑誌, 67, pp105-112.
- 山本浩一・二村貴幸・坂野章・日下部隆昭・末次忠司・横山勝英（2003）濁時計による懸濁態栄養塩負荷推定に関する研究. 河川技術論文集, 9号, pp515-520.
- 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, Vol67(4), pp.991-996.
- 全国疎水名鑑（2015）「亀田郷『新潟県』」  
<https://www.inakajin.or.jp/portals/0/resource/sosui/niigata/a/320/>.