

田んぼダムの貯留及び流出抑制効果に関する 可視化ツールの開発について —数値解析モデルの実スケールへの適用例—

国立研究開発法人土木研究所寒地土木研究所 寒地河川チーム ○阿部 孝章
国立研究開発法人土木研究所寒地土木研究所 水利基盤チーム 越山 直子
国立研究開発法人土木研究所寒地土木研究所 寒地河川チーム 堀田 伸之

流域治水における様々な取組の中で田んぼダムのような堤内地の対策効果に対して注目が集まっている。本稿では過年度に開発した数値解析モデルについて、模型実験との比較を通じた精度検証を踏まえ、実スケールの対象に適用し、貯留効果や流出抑制効果について検討を行った内容及び解析結果の可視化方法についても合わせて検討を行ったものを報告する。本モデルの結果を踏まえた効果的な流域治水の推進が期待される。

キーワード：田んぼダム、数値解析、貯留効果、流出抑制効果

1. はじめに

流域治水の取り組みとして、治水事業の他に堤内地においても各種対策が全国で積極的に進められてきている。本稿ではこのうち「田んぼダム」の取り組みを主な対象とする。既報¹⁾で既に指摘した通り、田んぼダムの取り組みに関してその治水効果にも注目が集まっている。田んぼダムの効果を数値解析的に評価した既往研究としては吉川ら²⁾や赤穂ら³⁾によるものなどが存在し、現地観測を基にした検討としては赤松ら⁴⁾や原田ら⁵⁾のものが存在する。一方で、治水効果を評価すると同時に営農の観点から水田内の水管理状況をも踏まえた評価事例は極めて少ない。写真-1に示したのは道内のある穀倉地帯の空撮写真であるが、このように農地の土地利用状況は水田を始め様々である。仮に出水が発生した際に隣接する畑地において僅かでも農地が浸水すれば作物の生育に大きな影響を及ぼすことも想定される。水稻も例外ではなく、

浸水や湛水継続時間の程度によっては収量に影響が生じかねない。そのため、田んぼダムによる治水効果を確実に発揮させるには、治水効果とともにそうした営農に対する影響を丁寧に説明しつつ、田んぼダムの取組について営農者の賛同を得ることが大きな鍵となる。

本稿では、流域治水対策としての田んぼダムの効果について、営農の観点を踏まえることを想定し地先状況を主眼に置いた検討を行う。前報¹⁾で紹介した寒地土木研究所が保有する中規模模型実験水路における田んぼダムに関する水理模型実験と、その再現検証結果を踏まえ、本モデルを実物大スケールの水田群を対象に適用した場合の効果に関する可視化方法の検討について報告するものである。

2. 検討手法

(1) 田んぼダムの効果に関する水理模型実験

実験には寒地土木研究所が河川実験棟に保有する延長約30 m、幅約1 mの中規模実験水路を使用した。実験水路の諸元や模型実験の詳細、田んぼダム群を模型上で再現するにあたっての仮定等については著者らの既報¹⁾にて報告済みであるので、本稿では概略を示すに留める。図-1概要図のような田んぼダムの取組を想定した水田群の模型を水路内に作製した。本稿で使用した模型の特色の1点目として、水田群模型の右岸側の畦畔模型内部には排水柵模型を設置し、排水柵模型内の堰板形状は通常の水管理状況（田んぼダム未実施の場合）を想定した通常堰板と、田んぼダムの取組を想定した複数種の特徴形状の堰板に置換することが可能である。なお本稿においては流出抑制効果を得るために比較的良好に用いられるV



写真-1 道内における穀倉地帯の概況

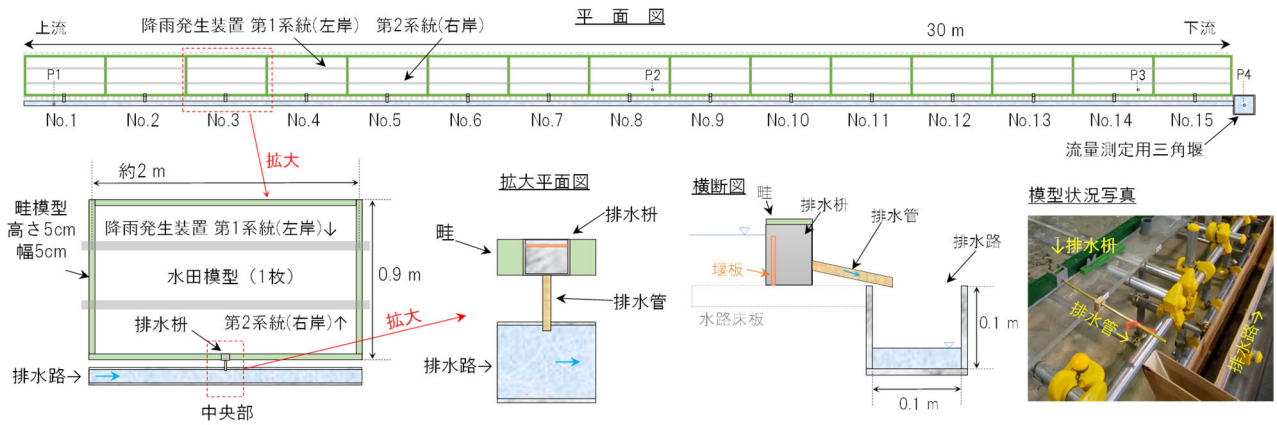


図-1 実験水路の諸元及び排水柵部分の構造¹⁾

字カット堰板形状を検討に使用している。また2点目として、水路上方に園芸用散水ホースの装置を吊した降雨発生装置を設置しており、ホースにポンプから給水することにより実験内の境界条件として降雨をもたらすことが可能となっている。水田群模型内及び併設した排水路模型内に水位計を設置しており、時間的な水位変動状況を計測することで田んぼダムを想定したモデルの貯留状況や流出抑制状況を計測することが可能である。

(2) 数値解析手法及び各種解析条件

平面2次元の数値解析モデルについても既報¹⁾にて詳述済みである。ここでは概略のみ示すこととすると、平面2次元の浅水方程式をベースとした不定流計算モデルを使用しており、解析に使用した連続式は

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial M}{\partial x} + \frac{\partial N}{\partial y} = r \quad (1)$$

運動方程式は

$$\frac{\partial M}{\partial t} + \frac{\partial (uM)}{\partial x} + \frac{\partial (vM)}{\partial y} = -gh \frac{\partial H}{\partial x} - \frac{\tau_{bx}}{\rho_T} \quad (2)$$

$$\frac{\partial N}{\partial t} + \frac{\partial (uN)}{\partial x} + \frac{\partial (vN)}{\partial y} = -gh \frac{\partial H}{\partial y} - \frac{\tau_{by}}{\rho_T} \quad (3)$$

である。ここで、 h は水深[m]、 u, v はそれぞれ x, y 方向の流速[m/s]、 M, N はそれぞれ x, y 方向の流量フラックス[m²/s]であり $M = uh, N = vh$ 、 H は水位[m]で固定床高 z [m]を用いて $H = h + z$ 、 τ_{bx}, τ_{by} はそれぞれ底面における剪断応力[N/m²] x, y 成分である。なお水田群模型全体として勾配は0である。連続式右辺の r は領域内にもたらされた降雨量[m/s]であり水田群模型の存在する領域内においてソース項として考慮することとした。

次に、排水柵を介した水田部分から排水路への流出のモデル化の方法について述べる。まず、模型実験の排水柵模型については、通常のNo.1～15までである水田に付属

する排水柵部について、堰板形状毎、概ね5 mm毎に水田群模型部分で所定の水位に調整した際に対応した排出量を計測しておき、HQ式を作成し、これを数値解析モデルに組み込んで排出量を算定することとした。この工夫により流量係数をパラメータとして実験値に合わせて調整するなどの処理が不要となった。

また実スケールの数値解析にあたっては、皆川ら⁷⁾による既往研究を参考に以下のように考慮することとした。流出孔（オリフィス；orifice）に規定される流出量（ q_{po} ）または、通常堰板（weir）ないしはV字カット堰板（triangular weir）の堰幅により流出量（それぞれ q_{pw}, q_{pt} ）が規定されると考え、以下のような式により算定を行った。

$$q_{po} = CA \sqrt{2gh_p} \quad (4)$$

$$q_{pw} = CBh_p^{3/2} \quad (5)$$

$$q_{pt} = \frac{8}{15} C \tan(\theta/2) \sqrt{2g} h_p^{5/2} \quad (6)$$

ここで C は流量係数、 A は流出孔の断面積[m²]、 h_p はオリフィス孔中心を基準とした水深または堰の越流水深[m]、 B は堰幅[m]、 θ は三角堰の開口部の頂角である。いずれも排水は配水管を介し自由流出するものと想定した。

田面水位は排水柵が含まれる計算メッシュに隣接するメッシュを検査メッシュとして水位を参照し、各条件から検査メッシュにおいて q_p をメッシュ面積 A_m で除して連続式の右辺から差し引き（ $-q_p/A_m$ ）、同時に排水管出口位置に属するメッシュでは等量を加えるという簡易的な処理を行った。

数値解析領域に関し、実験水路の再現計算にあたっては実験水路諸元を固定床（地形）情報として付与することとした。実スケールの計算にあたっては国土地理院HPで公開されている基盤地図情報の5 m解像度の地形デ

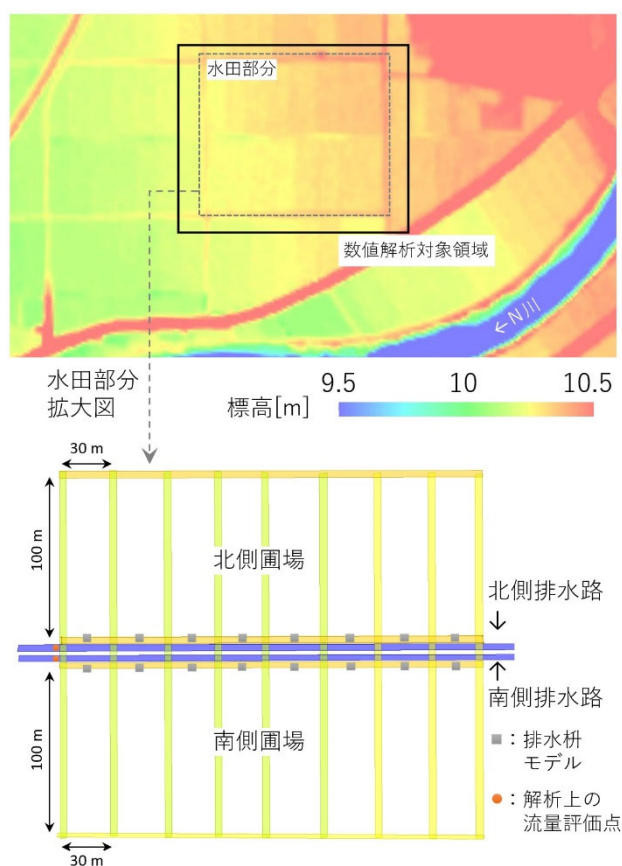


図-2 解析領域の位置図及び水田部分の概要図

ータ（図-2）を使用した。畦畔及び排水路部分は地形データを加工して標高を付与することとした。灰色四角部分に排水柵が設置されているものと仮定し実験水路の再現計算と同様の方法で検査メッシュ、排水管出口部分メッシュを設定した。橙丸印部分で北側排水路及び南側排水路それぞれの流量評価点を設けた。

本稿におけるメッシュ（解析格子）の生成、初期条件及び境界条件の設定、解析結果の出力及び可視化処理にはiRIC Project[®]による公開ソフトウェアであるiRICソフトウェアまたは数値流体解析で比較的使用されることが多い可視化用オープンソースソフトウェアParaviewを使用することとした。平面2次元不定流計算モデルのコード作成及びiRICソフトウェア上で動作させるための入出力部の移植にあたってはiRIC Projectホームページにて公開されている開発者向けマニュアルを参考にすることとした。

3. 結果及び考察

以下では水理模型実験結果と数値解析モデルによるその再現性の検証、同モデルを実スケールに適用した場合の結果について順に述べる。

(1) 水理模型実験を活用したモデルの再現性検証

既報¹⁾では排水柵周辺の流況や水田群模型内部におけ

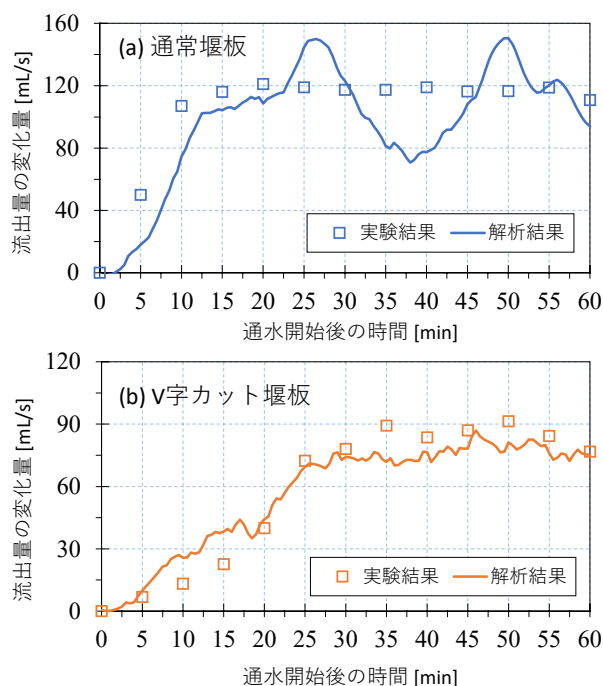


図-3 排水量の時間変化に関する実験及び数値解析結果の比較
(a)通常堰板、(b)V字カット堰板

る貯留された水による水位上昇量についての検討を行ってきた。これらの結果は既報を参照願うとしてここでは排水柵模型から流出する水量を比較する。模型製作上は通常の田面水位管理用の堰板（以降、通常堰板と表記）、田んぼダムを想定したV字カットの堰板（V字カット堰板）、通常堰板に加えて穴あきタイプの堰板を追加する機能分離型（穴あきタイプ堰板）を用意していたが、穴あきタイプ堰板は今回使用した実験施設では貯留機能の発現にばらつきがみられたため、本稿では通常堰板とV字カット堰板の比較を行う。

図-3(a)に示したのは通常堰板の実験を行った場合の流出量の時間変化及び対応する数値解析結果である。四角印が実験における流出量、実線が数値解析結果上得られた排水量である。実験においては実験開始後直ちに排水量が増加し、概ね15分経過後は120 mL/sで頭打ちのまま流出が継続した。数値解析結果を見ると実験結果よりやや遅れながらも流出量が増加し、100 mL/s前後で上昇が落ち着いた後、20分経過後以降更に増加し、40分にかけて減少の後再び上昇に転じる上下変動を繰り返す結果となった。別途数値解析結果における流況を確認したところ、下流端境界部において数値的不安定となった格子が見られ、水位の振動に影響を受ける形で上下変動が生じることが分かった。この点についてはモデルの改良の余地があるが、量的には120 mL/s前後であり一定の再現性を有していることが分かる。

続いて図-3(b)に示したのはV字カット堰板使用時の結果である。実験においては(a)通常堰板の場合よりも緩やかに上昇が継続し、概ね30分後以降は80～90 mL/s前後の

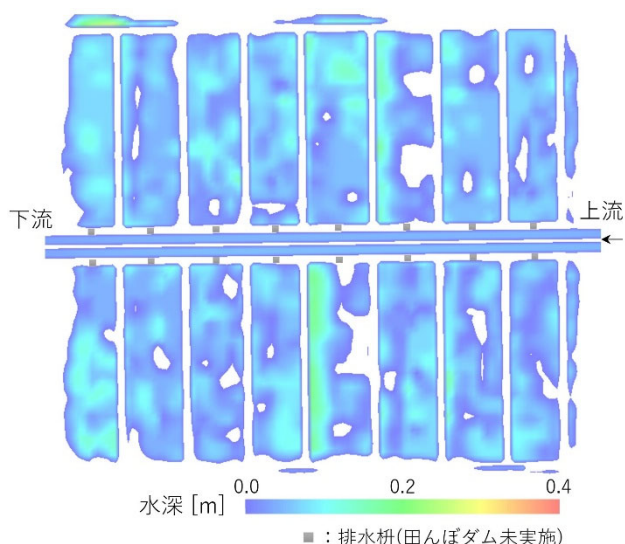


図4 北側、南側共に通常の水田とし、定常降雨20 mm/hを3時間与えた場合の貯留状況

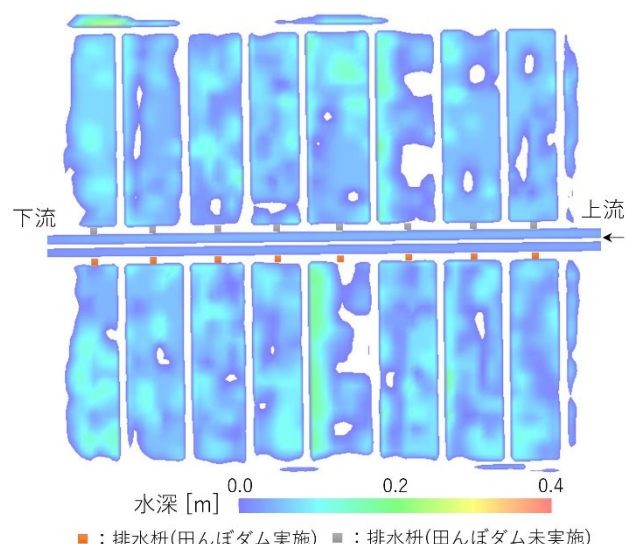


図5 北側を通常の水田、南側を田んぼダムとし、定常降雨20 mm/hを3時間与えた場合の貯留状況

流出量が実験終了時まで継続した。数値解析結果においては、概略的には実験値を良く説明できており、上昇時の増加率や30分経過後頭打ちとなった後の定常的な流出も良好に再現されていると言える。以上の結果より、本稿で紹介する数値解析モデルにより、田んぼダム対応の堰板に変更した場合の排水量の時間的な変化も良好に再現できることが分かった。田んぼダムの数値解析的評価は、出水イベント中の効果の発揮状況の観測例が不足していたり、田んぼダムの取組が人為的な取組であることなどから再現性の検証を行うことが比較的難しいと言えるが、本稿のように補足的に水理模型実験の結果を活用することで現地適用時の信頼性の向上を図ることが可能である。本稿において田んぼダムに関する中規模模型実験水路における実験の再現検証を実施できたことは一つの成果であると考えられる。

(2) 実スケール水田群への適用例

続いて同モデルを実スケールの水田群に適用した場合の結果について述べる。図4に示したのは水田内の初期湛水深を0 mとし、対象とした領域全体に20 mm/hの定常降雨を3時間与えた場合の水田内及び排水路部分への貯留状況である。図中上部が北の方角である。北側の8枚の水田群と南側8枚の水田群には含まれる形で2系統の排水路が流下している。この時、いずれの水田も排水枡からは通常堰板から流出するものとしている。北側水田群と南側水田群、そして2系統の排水路の流況はほぼ同様に水深も同程度であった。一方で使用した地形データに含まれる不陸の影響で水田内の湛水深は一様ではない。0.2~0.3 m程度の不陸があることで水田内の湛水深にもばらつきが生じていることが分かる。しかし全体的な傾向としては、排水路を挟んで同程度の貯留状況であることが図から読み取ることができる。なお、本稿で示す解

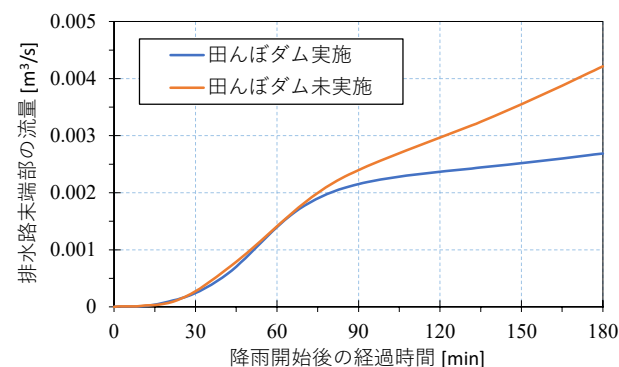


図6 20 mm/h降雨時の2系統の排水路末端部における流量の時間変化の比較

析結果は、全て任意時点で出力及び可視化することが可能であり、時間的に変化する水田内への貯留状況を把握することが可能である。

次にこの解析領域に対して北側の水田群は通常堰板、南側の水田群は田んぼダム対応のV字カット堰板として解析を行った場合の貯留状況を図5に示した。湛水深の比較結果からは図4の場合と殆ど変化は見られない。別途細部を確認したところ南側水田群の方が僅かに湛水深が大きくなっていることが確認されたが、貯留量としては小さいものと推察される。その一方で、排水路の水深は北側と南側でやや異なる結果となっており、北側の通常の水田群からの流出がある排水路で水深が大きくなっていることが分かった。これは南側の水田群で田んぼダム対応の堰板に交換したことにより排水が抑制されたためと考えられる。

図6に示したのは2系統の各排水路末端部における流量の比較である。計算開始後は同程度の速度で流出量が増加していくが、降雨開始後概ね70分以降は傾向が異なり田んぼダム側の南排水路では流出が抑制されて

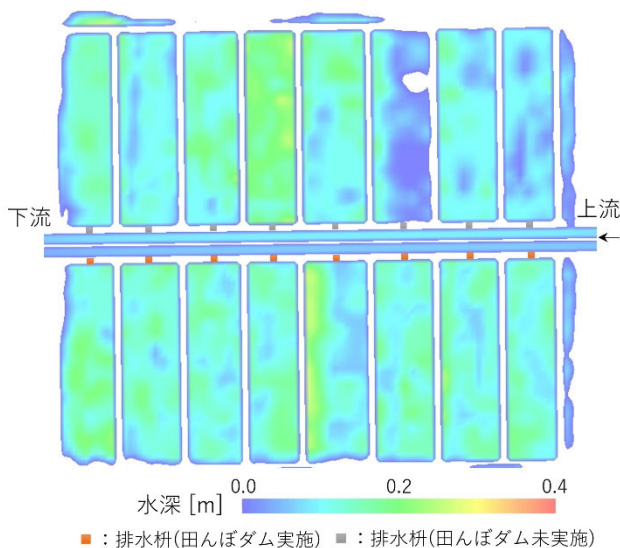


図-7 北側を通常の水田、南側を田んぼダムとし、定常降雨40 mm/hを3時間与えた場合の貯留状況

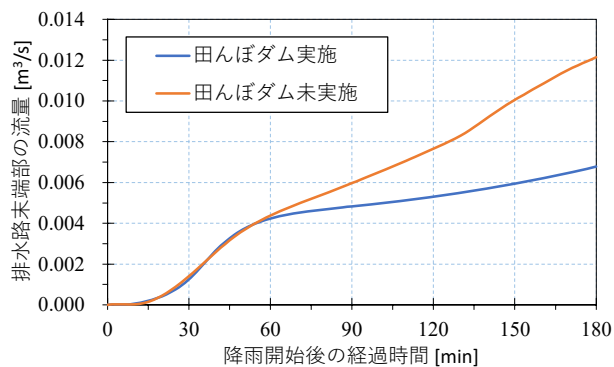


図-8 40 mm/h降雨時の2系統の排水路末端部における流量の時間変化の比較

いる。田んぼダムによる流出抑制効果が得られたものと考えられる。解析は3時間までとしているが、更に解析を継続した場合は更に差が拡大し、田んぼダム実施によって更に大きな流出抑制効果が得られる可能性がある。このように、本モデルを活用することにより先述の平面的な貯留状況の時間変化に関する可視化結果と合わせて、ある観測点における流出抑制効果の時間変化をも同時に可視化し評価することが可能である。本稿では示さないが、平面2次元の解析領域内の任意の点において同様の流量変化の評価を行うことが可能である。本モデルの実際の活用の際には近傍の水路や支川等、関心がある地点において流出抑制効果の評価を実施するなどの活用方法が考えられる。

続いて、同じ解析領域に対して雨量を40 mm/hに増加させたケースについて述べる。図-7に示したのは水田内及び排水路内の貯留状況である。これまでのケースと異なるのは、水田内、排水路ともに降雨の増加により貯留量が増加している点である。北側、南側ともに雨水の貯留により湛水深が増加している。排水路内においては北

側で水深が上昇しており、南側より顕著であった。先述の図-4と同様、北側の通常堰板の水田群の場合には湛水深の増加により各排水柵から大きな流出が発生しているが、南側の田んぼダム水田群からの流出は一定程度抑制されていることが推察された。図-8に示したのは排水路下流における流出量の時間変化の比較である。北側排水路ではほぼ一定の速度で排水量が増加しているが、南側では概ね1時間後からは排水が抑制され、増加の度合いが緩やかになっている。

本稿における検討においては、国土地理院による基盤地図情報の5 m解像度の地形データを使用しているが田んぼダムの効果を評価するにあたり水田内の流況を精緻に解く場合には、不陸の程度について留意が必要である。この点について既往研究⁹⁾では計算負荷の軽減のために1つの非構造格子で1つの水田を記述し、格子内で標高を平均化して付与するといった手段が取られることもある。冒頭でも触れたように田んぼダムの取組は水田内で行われるものであり、通常は日常的にきめ細かな水管理（水位の管理）が行われている中で、作物への影響を可能な限り抑制することが求められる。数cm～10数cmの水位の違いで作物への影響が異なることも十分に考えられるため、本稿で対象としているような地先スケールで具体的な田んぼダムの効果を評価する場合には、高解像度地形情報により評価を行うことが望ましいであろう。どのような地形情報を用いて田んぼダムの効果を評価するかについては、着目する対象のスケールに応じ個別かつ適切に判断する必要があるものと考えられる。

以上の結果、本数値解析モデルを実スケールに適用した場合においても、水理模型実験の再現検証の場合と同様に、水田部の周縁付近に排水柵、近傍の排水路箇所に排出メッシュを設定することにより、田んぼダムの取組として堰板を変更したことによる貯留及び流出抑制の効果を評価できる可能性が確認された。今後は対象領域を拡大したり、流域特性の異なる水田群に適用したり、現地圃場において実測データが存在する場合には現地計測データに基づく再現検証を元に、当該地先の田んぼダム効果の評価を行うことが望ましいであろう。これは、既往研究により漏水量⁹⁾が水田からの流出に無視できない程度の影響を与えることが指摘されていることや、減水深が一定の値（例えば15 mm/日¹⁰⁾）を持つことから、水田への貯留を評価するにあたっては留意すべき事項であると考えられる。

4. まとめ及び今後の課題

本稿では流域治水対策のうち田んぼダムの取組を主な対象とし、地域における合意形成支援として田んぼダムの貯留及び流出抑制効果に関する実験及び数値解析、加えて実スケールの水田群に適用した場合の具体的な流出抑制効果の可視化方法について検討を行った。これまで

一般向けの導入として説明されてきた田んぼダムの効果は定性的なものも多くあり、その定量的な治水効果はあまり明らかとはなっていなかったが、こうした数値解析モデルの活用は定量的な評価を可能とするための第一歩になるものと考えられる。

本来、水田は営農のための空間であり田んぼダムの取組はリスクとなる可能性がある。数値解析的な予測を用いれば水田内の湛水深やその継続時間、流況等も容易に評価することが可能である。田んぼダムの取組の推進にあたっては治水に対するメリットと営農に対するデメリットの双方を示し、その治水のための意義や効果を丁寧に説明することが肝要であり、説明を行う側にもそうした複合的な観点が求められる。本稿で構築したようなモデルがその一助となることが期待される。

謝辞：本研究の遂行にあたり、流域治水対策としての田んぼダムの取り組みに関して、これまで関係する各行政機関、研究機関、地域の方々には現地調査、ヒアリング調査、意見交換等多くのご協力を頂きました。ここに記して謝意を表します。

参考文献

- 1) 阿部孝章, 越山直子, 大串弘哉: 田んぼダムの貯留効果に関する水理模型実験及びその数値解析モデルの構築, 寒地土木研究所月報, 第 848 号, pp.2-9, 2023.
- 2) 阿部孝章, 越山直子, 大串弘哉: 一定降雨時を想定した田んぼダムの貯留効果に関する中規模模型実験について, 令和 5 年度土木学会全国大会, 第 78 回年次学術講演会講演概要集, II-139, 2023.
- 3) 吉川夏樹, 長尾直樹, 三沢眞一: 水田耕区における落水量調整板のピーク流出抑制機能の評価, 農業土木学会論文集, No.77, Vol.3, pp.263-271, 2009.
- 4) 赤穂良輔, 宅野智紀, 松井大生, 前野詩朗: 流域治水に向けた田んぼダムの効率的解析法の提案と現地適用, 土木学会論文集, Vol.80, No.16, 23-16073, 2024.
- 5) 赤松洋児, 山本忠男: 田んぼダムによる洪水緩和機能の評価. 第 61 回農業農村工学会北海道支部研究発表会講演集, pp.36-39, 2012.
- 6) 原田守博, 大森美喜夫, 森富雄, 藤澤悟: 水田貯留による雨水の流出抑制効果とその強化方策に関する現地実験, 水工学論文集, 第 52 巻, pp.469-474, 2008.
- 7) 皆川裕樹, 宮津進: 模擬豪雨を活用した特徴の異なる田んぼダム器具の機能評価, 農業農村工学会論文集, No.314, Vol.90-1, pp.I_157-I_165, 2022.
- 8) iRIC プロジェクト: <http://i-ric.org/ja/> (参照日: 2025/1/9).
- 9) 吉川夏樹, 宮津進, 小出英幸, 三沢眞一, 安田浩保: 未圃場整備地区における「田んぼダム」の洪水緩和機能の評価, 河川技術論文集, Vol.16, pp.507-512, 2010.
- 10) 小泉慶雄, 大野菜穂子, 蔵本修一, 宮津進, 吉川弘: 既設水田排水マス用の機能分離型落水量調整装置の開発, 農業農村工学会誌, Vol.89, No.8, pp.581-584, 2021.