

田んぼダムの貯留及び流出抑制効果の評価モデルについて

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

1. はじめに

気候変動等の影響により国内外の様々な地域において水災害が頻発化している。こうした情勢を踏まえ我が国においては流域全体で各主体が治水に向けた取組を行う「流域治水」という考え方が浸透してきている。平成 30 年西日本豪雨や令和元年東日本台風など、大規模な災害の発生を踏まえ、令和 3 年には流域治水関連法として法整備が行われ、各地域、各主体の協力において、着実に治水のための取組は進められてきているところである。本報告では、数ある流域治水施策のうち、「田んぼダム」の取組について主に取り上げる。

歴史的には農地、特に水田地帯における雨水の貯留効果や流出抑制効果に関する各種水文学的な検討は非常に古くからなされており、初期に代表的なものとしては、1960 年代に豊国ら¹⁾により農業水文学的な観点から水田地帯における流出特性が指摘され、増本²⁾による水田貯留機能の評価など多くの既往研究が存在する。近年、水田地帯の現場における取組を元に、水理学的な手法を用いて田んぼダムの流出抑制機能の評価を行った吉川ら³⁾による先駆的な取組を皮切りに、道内では赤松ら⁴⁾による現地観測による田んぼダム効果の評価例があり、更に Suzuki ら⁵⁾により降雨を確率統計的に変化させた場合の流出抑制効果についての検討例、Osawa ら⁶⁾による生態系を活用した防災減災 (Eco-DRR) の取組例などが存在する。このように、田んぼダムの雨水を貯留する効果に関しては一定の知見が蓄積されており、農林水産省⁷⁾による手引き、北海道によるマニュアル⁸⁾などが発出され、実務レベルでの普及段階となっている状況である。

ここで、災害が頻発化する情勢と流域治水という取組が普及していく中で、田んぼダムについて雨水を貯留することの目的や主な関心事項が、単に堤内地において地先の内水氾濫を抑制するだけでなく、支川や本川における河道の水位を下げることに、という方向にシフトしているように見受けられる。そのような観点において、河川系・水工学系の既往の取組としては、原田ら⁹⁾による現地観測・評価事例が比較的初期に存在し、流域治水施策の進展に連動する形で、最近の例では鹿児島県¹⁰⁾による流出抑制の予測評価モデルの構築、水田域の地形特性に着目した成ら¹¹⁾の検討、渡邊ら¹²⁾による田んぼダム貯留効果の季節変化に関する検討、田安ら¹³⁾による営農期間中の田んぼダムにおける水位変動の詳細な観測事例など、各地域で精力的な研究及び活発な研究の議論がなされてきている。

以上のように、田んぼダムをはじめとする流域治水対策の効果に関する検討が進められているが、治水対策を明確に論じるためには知見がやや不足している状況であると言わざるを得ない。これは農地における現地特有の自然現象の不確定要素や、「田んぼダム」の「取組」という性質上、水理学的または工学的に定量化することが難しいことも原因の一つと考えられる。そうした状況の中、本研究では、将来的に本川や支川スケールで田んぼダムの貯留効果・流出抑制効果を見込むための評価手法の構築を最終的な目的としている。その第 1 段階として、数値解析モデルの検証のため中規模実験水路を用いた水理模型実験を

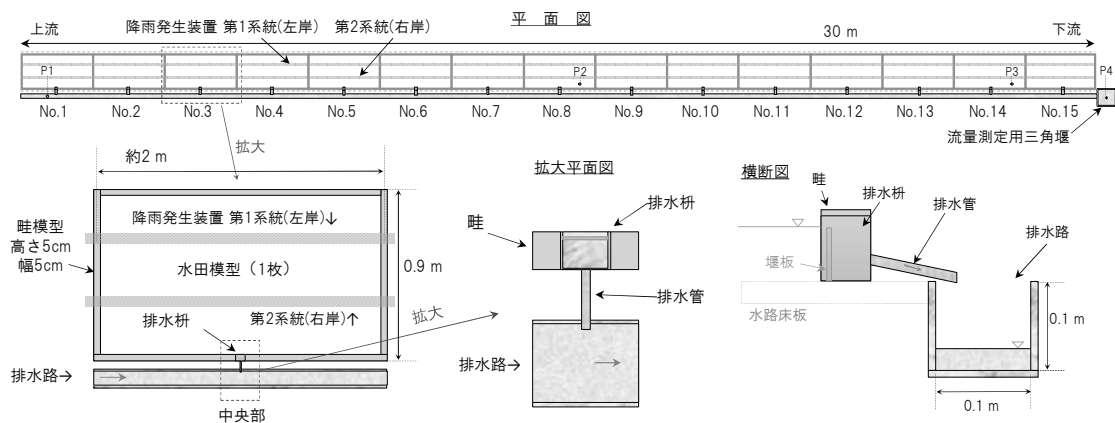


図-1 実験水路の諸元及び排水構部分の構造に関する模式図

実施し、実験結果と解析結果の比較を通じモデルの基本的な性能について検証した結果を報告する。ここで本稿では、水田が雨水を貯留する効果と、排水路等における流出量を抑制する効果の2点に着目して取りまとめを行っていることに留意されたい。

2. 手法

(1) 実験施設及び実験条件

実験には寒地土木研究所が保有する延長約 30 m、幅約 0.9 m の図-1 に示す実験水路を使用した。水路内には縮尺として現地の 1/10 程度を想定した水田模型を作製した。15 枚の水田模型は以降上流から順に No. 1～No. 15 と表記することとする。水田模型を設置した水路内は勾配 0 である。各水田模型を囲む畦模型は高さ 5cm、幅 5cm の角材で作成した。水路内部には、各水田模型に対して模擬的に降雨をもたらすことができる降雨発生装置として園芸用ホースを接続し水路上方に 2 系統設置した。降雨発生装置による雨水は図のように各水田模型から配水管を介して田面水位と排水構形状に応じて排水路への流出が発生する構造となるように設置及び固定した。15 枚の水田模型は直列で接続されており、水路内で降雨分布が存在する場合は流出の遅れなどを再現可能な構造としている。本稿では、初歩的な段階として水路の基本的な性能確認と数値解析モデルの検証を想定し、水路内全体で定常の降雨を模擬し供給することとした。

水路に併設された排水路の勾配は 1/100 とし上流端から 0.1 L/s の流量で給水を行った。排水路下流端は自由流出とし、その下流部に流量測定用の三角堰を設置した。図中の P1～P4 はピエゾ管を接続した圧力センサ (STS Sensor 社製、ATM. 1ST) を設置し圧力を計測することで各地点における水深を計測できる構造とした。P1 は排水路上流部、P2 は中央付近の水田模型 No. 8、P3 は下流付近の No. 14 に設置し、P4 は三角堰上流に接続し本地点での HQ 式を作成した上で流量推定が可能となるようにした。更に、図-1 のように圧力センサの他に 15 枚の各水田模型に簡易量水標を設置し、一定時間毎に目視で水位変動を計測可能な構造とした。排水構の内部には田面水位管理用を想定した通常堰板と田んぼダムを想定し、図-2 のように切り欠きを付与した V 字カット堰板の 2 種類を用意した。

ここで、本稿で作製した田んぼダムを想定可能な中規模実験模型の具体的な活用にあたり 2 点の留意事項を指摘しておく。1 点目は、①降雨発生装置による給水には多孔質材料

の園芸用ホースを使用しており、滲み出す雨滴は一定の大きさとなった時に自重により落下するもので、現地での降雨を必ずしも縮尺し模擬したものではないという点である。水理模型実験において雨滴の縮尺まで厳密に再現しつつ降雨の実験を行った関根ら¹⁴⁾の研究グループによる既往研究が存在する。また、流域模型内に発生する模擬降雨と細粒土砂の流出を大規模模型で再現した長谷川ら¹⁵⁾による取組が存在する。一方で、施設的な制約が存在する中で降雨発生を模擬する手段として統一された考えは未だ確立されていないように思われる。本稿では水田模型にもたらされる降雨量と水田模型内の水位上昇を再現するという目的に絞り、上記で説明したような施設を使用することとした。

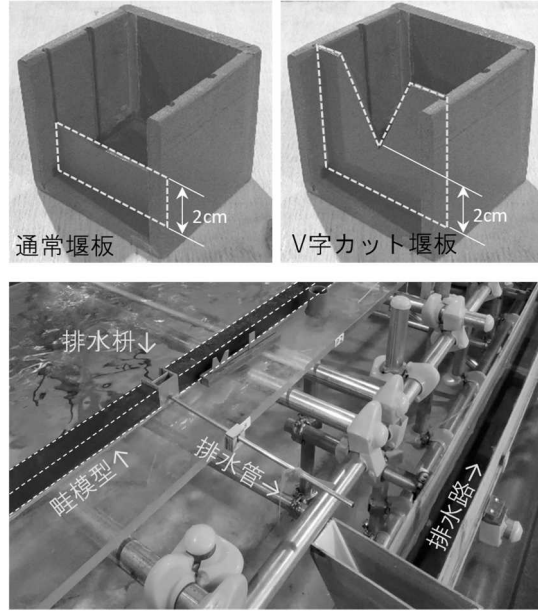


図-2 堰板模型及び排水柵模型設置状況写真

2点目は、②排水柵内部で通常堰板やV字カット堰板の堰部分を越流する水深が微小であるという点である。水理模型実験においては水の粘性の影響を極力排除するため、特に着目する箇所の水深は概ね3 cm以上確保することが望ましいとされるが、本稿では堰周辺の流況より寧ろ、複数の水田へもたらされた降雨と貯留量の変動に着目することに主眼を置き、上記の縮尺を採用したものである。

本装置を用い、実験では初期状態として1系統のみ給水を行い、水路内各水田模型の田面水位が概ね定常状態となったことを確認した上で、実験開始と同時に2系統目に給水を行い模擬降雨の雨量を増加させ各水田模型の貯留量を評価することとした。実験時間は短期的な降雨中の田んぼダム模型における降雨流入及び排出現象の評価を想定した1時間とした。

(2) 数値解析手法及び各計算条件

続いて、水田模型内の降雨発生及び排水路への流出を一連で再現するために本稿で構築した平面2次元モデルの概要について本節で述べる。連続式及び x, y 方向の運動方程式は以下の通りである。

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

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

但し、 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]で地盤高 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]の x, y 成分である。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、排水路部分を除く水田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。

基礎方程式系の離散化方法は岩佐ら¹⁶⁾の方法を基本とし、これを発展させた川池¹⁷⁾の方法に従った。即ち、時間項には前進差分、移流項にはドナーセルスキーム、底面摩擦項には陰的な形を用いた中央差分、その他の項には中央差分を適用した。変数は解析上よく行われるようにスタッガード配置とし、計算にはリーブフロッグ法を用いた。

次に、水田部分への貯留及び排水柵からの流出については、皆川ら¹⁸⁾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。

$$q_{po} = CA\sqrt{2gh_p}, \quad q_{pw} = CBh_p^{3/2}, \quad q_{pt} = \frac{8}{15}C \tan(\theta/2)\sqrt{2g}h_p^{5/2} \quad (3)$$

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 は三角堰に相当する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。解析上は田面水位に応じてオリフィスの式と堰の式のいずれか小さい方を切り替えながら流出量の算定を行った。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同量を加えるという簡易的な処理を行った。但し上記の堰の公式は実スケールを想定しており適用可能な寸法に制限があり、中規模実験模型の再現計算にあたってはそのまま適用できないことが想定された。そのため流出量が実測値と矛盾しないよう流量係数を調整することで再現することとした。

また、畦部分から水田部へ流下する際のように貯留された水が不連続となっている場合には、川池¹⁷⁾のモデル化を参考に、段落ち流れが発生すると想定した。すなわち、水田内の水位が畦部分の標高より低い場合に、畦部分の水深 h_a を用いて段落ち式 $M_a = \mu h_a \sqrt{gh_a}$ により流量フラックスを算定した。但し、 $\mu = (2/3)^{3/2}$ である。

初期条件としては、模型施設の平面形状に従って標高値を与えメッシュサイズは排水路の流下方向 x 、横断方向 y ともに 5 cm とした。計算時間間隔は解析上の数値安定性を考慮し $\Delta t = 0.0004$ s とした。境界条件としては、排水路の上流端から実験値と同様 0.1 L/s を供給し下流端境界条件は排水路下流端で自由流出条件とした。

計算領域の作成、初期条件及び境界条件の設定、解析結果のデータ出力及び可視化処理については iRIC Project¹⁹⁾による公開ソフトウェアである iRIC の GUI またはオープンソースソフトウェアである Paraview (kitware, Inc.) を使用し、コード作成にあたっては公開されている iRIC 開発者向けマニュアルを参考とした。実験で得られた降雨量を解析領域の水田模型部に降雨量として与え、水田模型部への貯留、排水柵部からの排出及び排水路への流入を再現し排水路末端での流出量の変化を分析した。

3. 結果及び考察

(1) 実験の結果及び考察

ここでは実験結果の概略について述べる。まず、一定の降雨条件を与えた際の水田群全体の傾向を把握するため、15 の水田模型で平均した水位変動量を示したのが図-3 である。

ここでは初期状態における水位を基準として示している。図より通常堰板と V 字カット堰板いずれも全体として上昇傾向が見られ、降雨中に田面水位が上昇し一定の水量を貯留していることが読み取れる。また、実験開始後 20～30 分の時間帯で一度上昇傾向が頭打ちになりやや減少した後、再度上昇するという類似の結果となった。30 分以降は継続して V 字カット堰板を使用した場合で水位変動量が大きく、より大きな貯留効果が得られたものと推察された。55 分時点での水位変動量は通常堰板で 0.93 mm、V 字カット堰板では 1.27 mm 程度であり、実験を実施した時間帯の範囲では通常堰板に比較し V 字カット堰板では 3 割ほど水位を上昇、すなわち実験領域にもたらされた降雨を貯留する効果を有することを確認できた。その他、各水田模型毎の水位上昇量等詳細については著者ら²⁰⁾による別報にて報告していることを付記しておく。

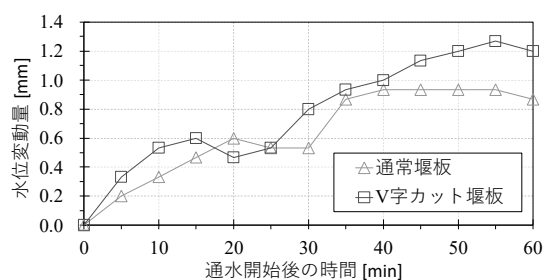


図-3 堰板のタイプ別の水位変動量の系列変化

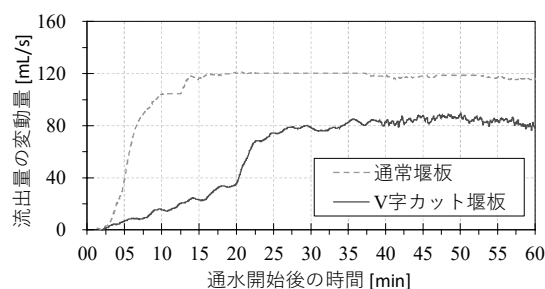


図-4 堰板の違いによる流出量の時系列変化

次に、各水田模型における貯留効果の違いを把握するために排水路への流出量について、P4 地点の水位から HQ 式で推定した流量の初期状態からの増分を時系列的に示したのが図-4 である。通常堰板が設置された場合では実験開始後 15 分程度で流出量が 120 mL/s 程度まで上昇しその後ほぼ一定の流出量となったのに対し、V 字カット堰板設置の場合は流出量の増加が抑制され 30 分程度まで緩やかに上昇した。その後は 80 mL/s 程度の流出量で一定に近い値となった。以上より、堰板の変更による流出抑制効果を実験的にも確認することができた。但し、本実験の結果は一定の降雨時間において得られたもので、雨量強度やハイレートグラフ形状によっては異なる結果が得られる可能性もあるため、引き続き注意深く様々な条件において検討を重ねる必要があると言える。

(2) 数値解析の結果及び考察

以降では前述の水理模型実験結果を模擬するための数値解析モデルによるシミュレーションの結果について述べる。実験と同様の境界条件を与えた場合の通常堰板、V 字カット堰板それぞれを模擬したケースにおいて時系列的に平面的な水位上昇量を色分けし表示した例を図-4 に示した。計算開始直後はいずれの場合も 0 であったものが時間の経過に伴い降雨の供給により水田模型内で水位上昇が発生していることが確認できる。ここで、前報²¹⁾においては水田領域内に僅かな水面勾配が発生し、水面に非物理的な振動が生じていたが、その原因は畦部分から水田内へ流下する流量フラックスが適切に算定されていないことが原因と考えられていた。上述のモデル化のように、畦から水田部へ流下する雨滴により発生するフラックスを適切に算定することにより、数値的に安定した結果が得られた

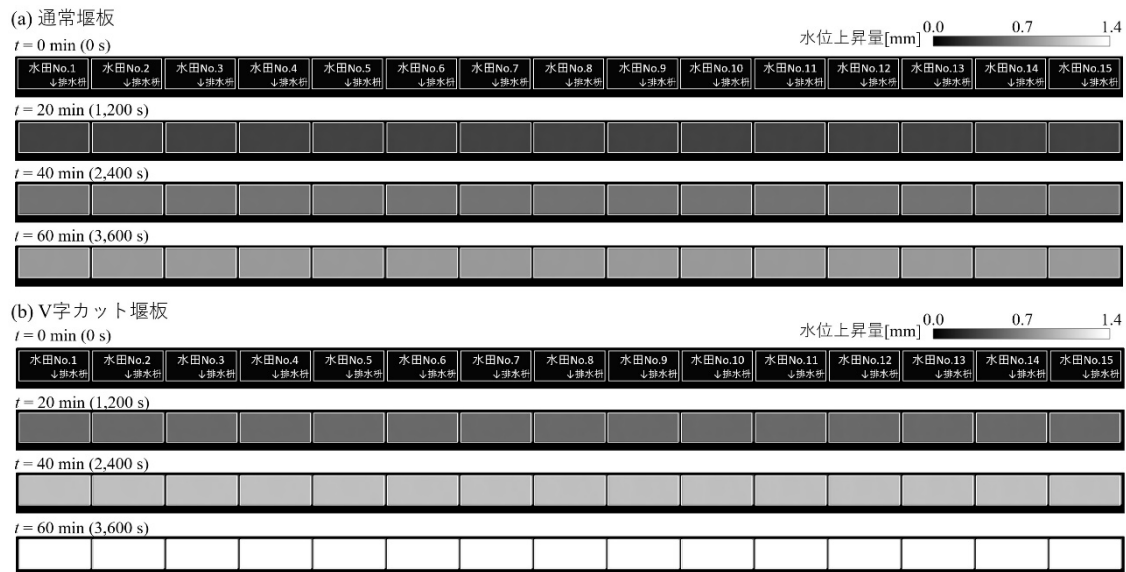


図-4 数値解析上得られた水位上昇量の時系列変化

ものと考えられる。全体的な傾向としては降雨から堰板毎に流出及び田面水位の維持すなわち貯留が概ね良好に再現できているものと考えられる。一方で図-2において通常堰板では0.4 mm～0.8 mm、V字カット堰板では1.2 mm～2.4 mm程度まで模型内で水位上昇量が発生し、かつ地点によりばらつきがあることを指摘していたが、解析上は全領域で一定の降雨量を供給しているため地点間のばらつきは殆ど見られなかった。この点については境界条件として与える時空間的な降雨量を反映することで改善される可能性はあるものの、実験中の正確な降雨量の把握が困難であることと、使用している降雨発生装置自体が有する実験条件の再現性と合わせて検証する必要があることから、引き続き今後の検討課題とする。

4. まとめ及び今後の課題

本稿では、田んぼダムに代表される流域治水のための雨水流出抑制対策の効果を評価するためのモデル構築のため、中規模模型実験による効果の把握及び数値解析モデルの基本的な性能確認を行った。得られた知見は以下の通りである。

- 模擬降雨装置及び中規模模型実験施設を製作し、模擬降雨装置による降雨発生状況、排水枡模型からの流出状況を確認した。
- 製作した実験模型により堰板形状の違いによる水田模型内の水位上昇量及び流出量の比較を行い、田んぼダムを想定した堰板の場合、流出量の抑制効果が見られることを実験的に確認することができた。
- 平面2次元の数値解析モデルを活用して水理模型実験の再現計算を行い、数値解析モデルの結果と実験結果との比較を行い再現性の確認を行った。今後こうした水理量の制御が可能な実験施設の活用による数値解析モデルの検証を行うことで更なる精度向上が期待できる。

以上のように、田んぼダムの貯留効果を把握可能な実験施設を作製したこと及びそれを

再現可能な数値解析モデルを構築したことで、実験結果により精度確認がなされた数値解析モデルを活用できるようになったのは一つの成果であると考えられる。

また、本稿では詳しく言及できなかったが、流域治水の推進にあたっては北海道における地域特性や水田が本来有する農業をはじめとした生産基盤としての機能を踏まえた取組の推進が肝要であろう。例えば中村²²⁾による石狩川流域内における水利用や水管理の実態の報告にあるように、地域事情や各施設管理者の実態を踏まえた、工学的手法のみによらない複合的な観点が求められる。

今後は開発した数値解析モデルによる様々な降雨パターンを想定した数値実験や、現地フィールドにおける観測データを用いた精度検証も合わせて行いながら、田んぼダム等の各種対策が有する貯留効果等を具体的に算定するための数値解析モデルとして開発を継続していく予定である。

謝辞：流域治水施策や田んぼダム等について、関係する各行政機関や研究機関等にはこれまで現地調査・ヒアリング調査等において調整及び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) 豊国永次，角屋睦：水田地帯における流出解析について，京大防災研究所年報，第9号，pp.631-636，1966.
- 2) 増本隆夫：水田の貯留機能評価と水資源の流域管理にみるパラダイム・シフト，水文・水資源学会誌，第11巻，第7号，pp.711-722，1998.
- 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.
- 5) Suzuki, Y., Nakamura, K. & Hama, T.: Peak discharge mitigation effects in different rainfall patterns at a paddy plot with a runoff control plate, Journal of Hydrology: Regional Studies, Vol.42, 101165, 2022.
- 6) Osawa, T., Nishida, T. & Oka, T.: Potential of mitigating floodwater damage to residential areas using paddy fields in water storage zones, International Journal of Disaster Risk Reduction, Vol.62, 102410, 2021.
- 7) 農林水産省 農村振興局 整備部：「田んぼダム」の手引き 令和4年4月，2022.
- 8) 北海道 空知総合振興局 調整課：田んぼダム実施マニュアル，2020.
- 9) 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.
- 10) 鹿兒島昂大，Kayum, S., 皆川朋子：白川水系黒川流域における田んぼダム導入による流出抑制効果の予測評価，土木学会論文集 B1(水工学)，Vol.78，No.2，pp.I_247-I_252，2022.
- 11) 成岱蔚，湧川勝己，川島幹雄，若松聡，渡邊昌夫，奥山泰河，中村大介，高山淳平，小高一宏：流域勾配が大きな小規模田んぼを活用した流出抑制機能向上方策に関する

る研究, 河川技術論文集, 第 28 巻, pp. 403-408, 2022.

- 12) 渡邊哲太, 萱場祐一: 水田における貯留可能能力及び流出係数の季節変化に関する基礎的研究, 令和 6 年度土木学会全国大会第 79 回年次学術講演会, II-127, 2024.
- 13) 田安正茂, 坂井響太, 西端宏明, 林泰正: 田んぼダムの営農期間中の水位変動に関する研究, 令和 6 年度土木学会全国大会第 79 回年次学術講演会, II-127, 2024.
- 14) 関根正人, 大前謙友, 松島貴之: 植生の根系が斜面の表面浸食に及ぼす影響に関する実験的研究, 水工学論文集, 第 52 巻, pp. 559-564, 2008.
- 15) 長谷川祐治, 竹林洋史, 藤田正治: 岩露出河川の土砂流出特性に関する流域模型を用いた実験的研究, 河川技術論文集, 第 21 巻, pp. 111-114, 2015.
- 16) 岩佐義朗, 井上和也, 水鳥雅文: 氾濫水の水理の数値解析法, 京都大学防災研究所年報, 第 23 号, B-2, pp. 305-317, 1980.
- 17) 川池健司: 都市における氾濫解析法とその耐水性評価への応用に関する研究, 京都大学学位論文, 122 p. 2001.
- 18) 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.
- 19) iRIC プロジェクト: <http://i-ric.org/ja/> (参照日: 2024/9/27).
- 20) 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.
- 21) 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.
- 22) 中村和正: 石狩川流域の水田における水利用の実態, 土木試験所月報, No. 412, pp. 27-40, 1987.