

河川氾濫による農地土壌流亡の発生条件推定に向けた水理実験

寒地土木研究所 寒地河川チーム ○神原 柚乃
島田 友典
堀田 伸之

平成28年8月の北海道豪雨では、河川氾濫により農地土壌が大量に流亡し、復旧に多大な期間と費用を要した。これを受け、北海道開発局と寒地土木研究所において、農地の水害リスク評価手法の開発に着手した。本研究では、その一環として、土壌流亡の発生条件を明らかにするため室内水理実験を実施した。流量を段階的に増加させた結果、土壌流亡が顕著に発生し始めた水理条件を把握することができた。

キーワード：土壌流亡、河川氾濫、水理実験

1. はじめに

平成28年8月の北海道豪雨では、北海道内各地で河川氾濫が発生し、国内有数の農業地帯である十勝地方を中心に農地への被害が甚大であった¹⁾。この被害状況について、図-1に平成28年度の一般資産等水害被害額の割合(復旧費用含む)²⁾を示す。北海道では、農業被害の割合が全国平均より高く、住宅被害とほぼ同規模であることが分かる。

なかでも、激しい氾濫流が農地へ流入した場合、農作物の浸水被害に加え、農地土壌が多量に流亡する「土壌流亡」(図-2)が発生する。土壌流亡が発生した農地の復旧には、土砂搬入や土壌改良を行う必要があり、浸水が解消した後もすぐには営農を再開できず、営農再開までに多大な期間と費用を要する³⁾。

ところが、治水施設の整備による経済的便益や費用対効果を計測することを目的とした現行の治水経済調査手法では、農作物や農地の浸水被害は考慮されるものの、土壌流亡による長期的損失は十分に考慮されていない⁴⁾。

こうした課題を踏まえ、「北海道地方における流域治水のあり方検討会」では、市街地(家屋)の治水対策に加え、農地などの生産空間(主として農業・漁業に係る生産の場)の維持を目的とし、農地の水害リスクに対する脆弱性評価の重要性を提言している⁵⁾。

そうした中、農業分野ではこれまでに降雨や地表面流によって発生する土壌流亡に関する研究が進められてきた。例えば、大澤ら⁶⁾は、沖縄地方の農地を対象として土壌侵食の現地観測を行い、経験モデルであるUSLE(Universal Soil Loss Equation)と、土砂侵食機構を組み込んだ物理モデルであるWEPP(Water Erosion Prediction Project)を適用し、モデルの予測精度を検証した。その結果、

USLEよりもWEPPの精度が高いこと、また、いずれのモデルも大きな降水量が長期間継続する出水イベントでは侵食量を過大評価することを示した。

一方で、河川氾濫に伴い氾濫流が農地へ流入した際の土壌流亡に関する研究事例は少ない。例えば、大久保ら⁷⁾は平成28年の北海道豪雨、川邊ら⁸⁾は平成27年の関東・東北豪雨における土壌流亡被害についてまとめているが、局所的な事例報告が中心である。さらに、小林ら⁹⁾は、平成28年北海道豪雨を受けて農業被害に伴う波及被害額の算定手法を検討しているが、具体的な水害リスク評価手法の提案には至っておらず追加の検討が必要である。

そこで、北海道開発局と寒地土木研究所では、農地の水害リスク評価手法の開発に着手した。本研究は、その一環として土壌流亡の発生条件を明らかにするために実施した室内水理実験の結果について報告する。

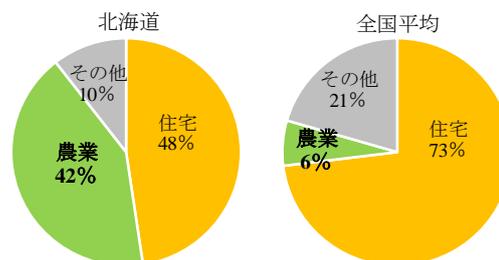


図-1 平成28年度一般資産等水害被害額の割合



図-2 土壌流亡被害を受けた畑

表-1 実験に使用した農地土壌の種類

ケース	土壌種類	元の土地利用	平均粒径(mm)	土粒子密度(g/cm ³)	有機態炭素含有量(%)	(参考) 包括的土壌分類第1次試案 ¹⁰⁾ における分類名
1	細粒分混じり礫質砂	牧草地	0.076	2.530	2.5	礫質還元型グライ低地土
2	シルト・粘土	水田	0.019	2.589	2.3	細粒質表層灰色グライ低地土
3	泥炭	不明(現在は遊水地)	0.018	1.982	15.3	典型高位泥炭土
4	火山灰質砂質土	畑地	0.245	2.606	1.3	粗粒質普通灰色低地土

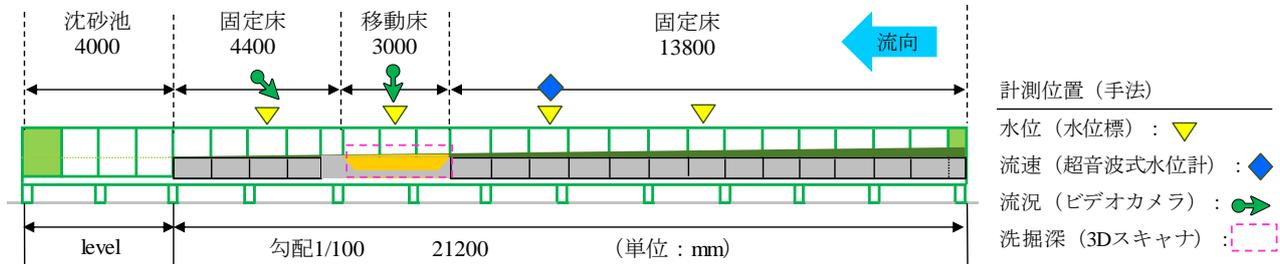


図-3 実験水路諸元と計測位置・手法

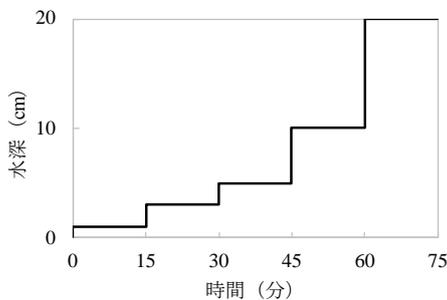


図-4 通水条件



図-5 実験に使用した農地土壌の写真

2. 実験方法

(1) 実験水路および通水条件

実験は、寒地土木研究所が保有する実験水路を用いて実施した。図-3に実験水路諸元を示す。水路は全長21.2 m、幅1.0mの直線開水路で、水路中流部に土壌を敷設した移動床区間を設けた。固定床区間と移動床区間の境界には、局所的な洗掘を防止するため、勾配1:1程度の緩傾斜を施した。また、固定床部と移動床部の粗度が概ね同等となるように、固定床部に5mm 砂利とアサノ3号珪砂を貼り付けて粗度付けを行った。

通水は、水路上流端からの通水により実施した。図-4に通水条件を示す。通水流量は全5段階（目安水深：1・3・5・10・20 cm）設定した。各段階の流量による通水時間は15分間とし、15分経過後に通水を一時停止して水路内の侵食状況を計測した後、次の流量で再度通水するという手順を繰り返した。

(2) 土壌条件

実験には、北海道内のかつて農地として利用されていた箇所から採取した4種類の土壌を用いた。表-1、図-5に実験に使用した土壌の種類と写真を示す。土壌は自然

含水比の状態水路の移動床区間に30cm厚で敷設した。土壌の敷設は、土壌診断の方法¹¹⁾を参考に、一般的な圃場の硬度として適当とされている山中式標準型土壌硬度計の貫入硬度15 mm程度となるように締め固めを行った。

(3) 計測項目

各ケースにおいて水深、流速、流況、洗掘深を測定した。図-3に計測位置と手法を示す。ただし、流速については、水深1cm・3cm相当の通水時には超音波流速計が利用困難なため、トレーサー追跡による表面流速観測を併用した。

3. 実験結果

(1) 土壌の侵食状況

図-6に各ケースにおける土壌の侵食状況を示す。ケース1（牧草地の細粒分混じり礫質砂）、ケース2（水田のシルト・粘土）、ケース4（畑地の火山灰質土壌）では、概ね同じ傾向が見られ、低流量条件下（水深1~5 cm相当）において表層の一部がわずかに削られたが、明瞭な侵食はほとんどみられなかった。しかし、水深約10 cm相当

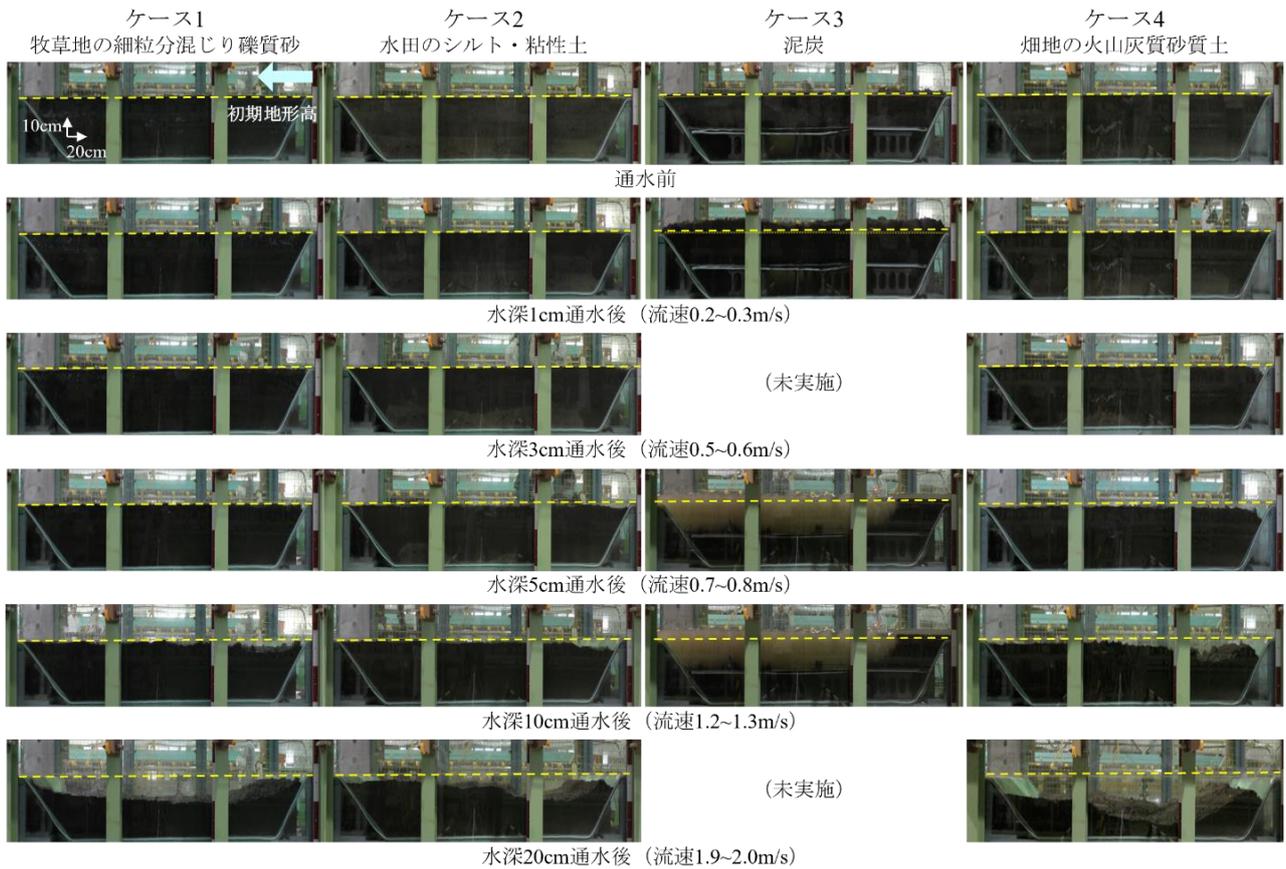


図-6 土壌の侵食状況 (縦横縮尺比 1:2)

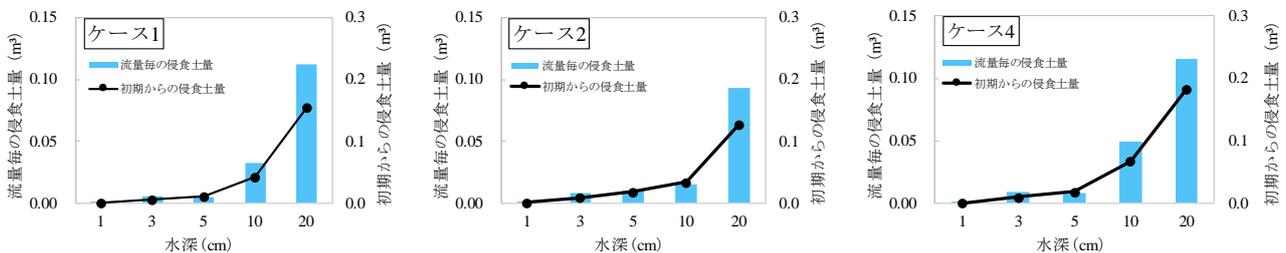


図-7 侵食土量

の流量に達するとまとまった量の土壌が侵食され始め、水深20cm相当の通水で顕著に侵食された。

ケース1 (牧草地の細粒分混じり礫質砂) では、水深1cm相当の通水では、表面に突出していた土のみが掃流され侵食が停止した。水深3cm相当の通水では、表層の細粒分が流され続け、表層が粗粒化した。水深5・10cm相当の通水では、表層の砂礫も掃流された。水深20cm相当の通水では、移動床全域で急速に侵食が進んだ。

ケース2 (水田のシルト・粘土) では、水深1・3cm相当の通水では、表層の細粒分がさらさらと掃流され続けた。また、移動床内部の空気が抜けて、気泡とともに細粒分が吸い出される様子が確認できた。水深5・10cm相当の通水では、表面の砂礫が動き、それに伴い周囲の細粒分が抜けて浮遊砂となり濁りがひどくなった。水深20cm相当の通水では、移動床上流部で急速に侵食が進んだ。

ケース4 (畑地の火山灰質土壌) では、水深1cm相当の通水では、表層の砂がさらさらと掃流され続けた。水深3cm相当の通水では、軽石も流され始めた。水深5cm相当の通水では、移動床全域で河床が少しずつ下がり始めた。水深10cm相当の通水では、急速に侵食が進んだ。水深20cm相当の通水では、侵食がさらに進み、二次流が発達し、砂が巻き上げられて浮遊砂として流出した。

一方、ケース3 (泥炭) では、他のケースとは全く異なる現象が観察された。泥炭は膨潤性が非常に高く¹²⁾、水深1cm相当の通水では、流入した水が全て浸透し、移動床部が水分を含んで膨れ上がった。一方、その後、膨れ上がった部分を除去して、水深5cm相当の通水を実施すると、表層が剥離し、その下に流水が潜り込んで泥炭全体が浮き上がり、ほとんど全ての土壌がすぐに流出した。これは、泥炭土は比重が1前後と非常に軽く、水に浮きやすかったことが要因と考えられる。なお、水深

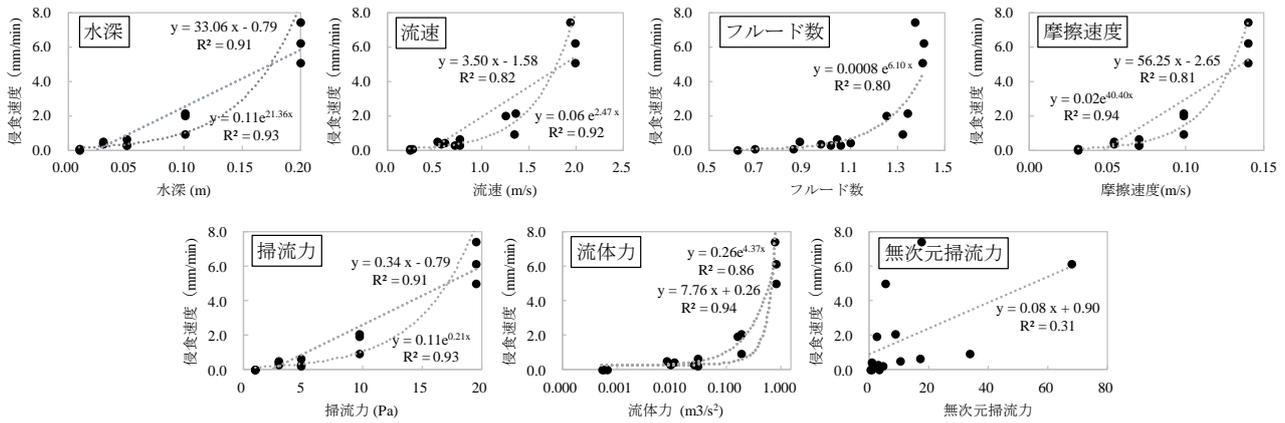


図-8 水理量と侵食速度の相関

3cm相当の通水は、1cm同様ほとんど全ての流入水が浸透すると考えられたため、また水深20cm相当の通水は、水深10cm相当の通水で土壌が全流出したため実施しなかった。これらのことから、以降の検討においてはケース3（泥炭）を除くこととした。

(2) 侵食土量の計測結果

図-7に各段階における通水終了後の侵食土量を示す。侵食土量は、3D スキャナによって計測した通水前後の地形高の差分から算出した。なお、移動床区間の上下流端付近は局所洗掘や跳水の影響を受けやすいため、移動床区間中央部1.0 mに限定して分析を行った。ケース1・2・4において、侵食土量に若干の差はあるものの、全体的な増減傾向には共通性がみられた。水深1~5cm相当の通水まで侵食土量はごくわずかであったが、水深10cm相当の通水で侵食土量が増加し、水深20cm相当の通水で最大となっている。

これらの結果から、農地土壌は、微小な水理条件においても徐々に侵食されるが、ある水理条件を境に侵食速度が急増することが確認された。これは、粘着性土に特有の、土粒子間の凝集により侵食に一定の耐性を持つものの、一旦表層が破壊されると一気に侵食が進む性質によるものと考えられる¹³⁾。

このように、土壌流亡の「発生下限値」（非粘着性の砂礫という限界掃流力に相当する値）を厳密に求めることは困難であるが、土壌流亡の被害の拡大に寄与する“閾値”は存在することが示唆された。本実験の条件下では、粘性土・砂質土系の農地土壌において、水深10 cm（流速1.2~1.3m/s）相当の水理条件がその閾値に該当すると考えられた。また、泥炭は他の土壌に比べ著しく侵食に脆弱であることが確認された。

4. 考察

(1) 水理量と侵食速度の相関

土壌流亡の発生条件となる水理量の指標を明らかにするため、得られた実験データをもとに水理量と侵食速度の相関を調べた。図-8に侵食速度（単位時間・単位面積あたりの侵食土量）と各種水理量との相関関係を示す。これらの結果から、水深、流速、流体力といった基本的な水理量と侵食速度には正の相関関係が認められ、それぞれ決定係数 R^2 が0.9以上と高い値を示した。一方で、無次元掃流力との間には明確な相関がみられなかった。

このことから、水深・流速など河川現場でも比較的把握しやすい基本的な水理量の指標を、土壌流亡の発生条件を表す指標とできる可能性が示された。

なお、高流量時には移動床区間上流端で局所的な洗掘が発生し、水路内に跳水が生じた。この影響により、水深・流速の代表値（固定床上流区間で計測）と、実際に移動床部に作用した水深・流速に乖離がある可能性がある。そこで、移動床中央部の平均河床高と、実測した水面勾配から連続式を用いて水深・流速の補正を行った。補正の結果、水深10 cm相当の通水時の代表流速は約1.3 m/sから約0.9 m/sと約7割に減少したが、補正の有無によって全体的な相関の傾向に大きな違いはなかったため、本文中では補正前の代表値をそのまま使用している。

(2) 従来の掃流砂・浮遊砂量式の適用検討

前節において、無次元掃流力と侵食速度の相関がないことが示された。そこで、本節では、実験で得られた侵食土量と、従来の掃流砂・浮遊砂量式による算出結果を比較し、適用可能性についてを検討を行った。まず、非粘着質砂礫の掃流砂量を表す代表的な式であるMPM（Meyer-Peter and Müller）式¹⁴⁾、芦田・道上式¹⁵⁾を用い、本実験条件における掃流砂量を算出した。算出した掃流砂量に空隙率（0.4と仮定）を考慮した結果、図-9に示すように、観測された侵食土量を1オーダー以上に上回る値が得られた。次に、非粘着質砂礫の浮遊砂量を表す板倉の式¹⁶⁾を用いて浮遊砂量を算出した。算出した浮遊砂量に空隙率（0.4と仮定）を考慮した結果、図-10に示すように、掃流砂量ほどではないがこちらも観測値に比べて算出値が過大な結果となった。以上より、従来の掃流

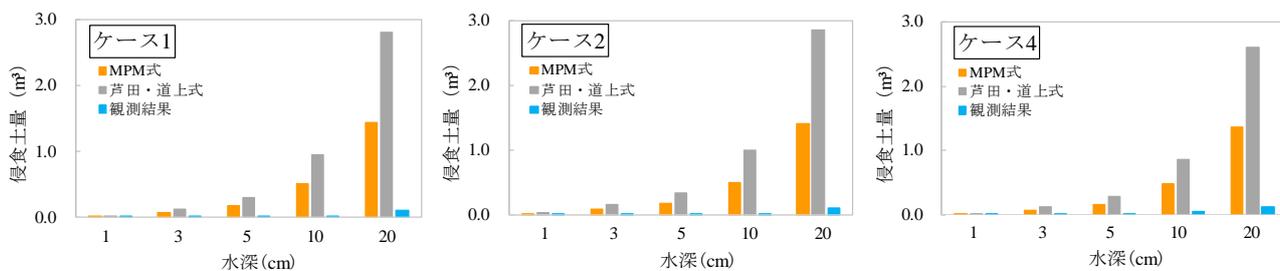


図-9 掃流砂量式による算出結果

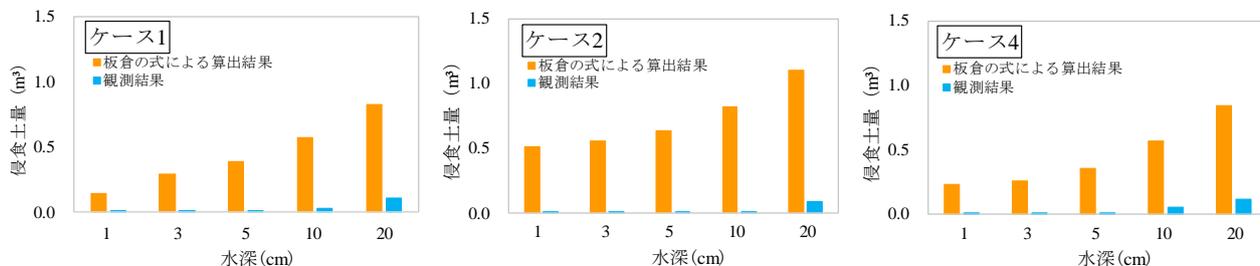


図-10 浮遊砂量式による算出結果

砂・浮遊砂量敷を農地土壌流亡にそのまま適用することが困難であることが示された。

これは、前述した粘着性土の特性に加え、農地土壌はその凝集力や有機物の影響により団粒構造をとることが多く⁷⁾、同じ粒径の一般的な土砂に比べて流されづらいためと考えられる。すなわち、農地土壌の流亡現象は従来の土砂輸送モデルでは再現困難であり、厳密な侵食土砂量を算出するためには、粘着性や団粒構造の影響を考慮した新たなモデルの構築が必要であることを示している。しかし、本研究の目的のように、土壌流亡の被害が拡大する条件を明らかにするという実務的観点からは、前述した基本的な水理量に基づいた土壌流亡開始の“閾値”を示すというアプローチが有用であると考えられる。

5. まとめ

本研究では、河川氾濫による土壌流亡の発生条件を明らかにするため、水理実験を実施し、以下の知見を得た。

・土壌流亡発生の水理条件

侵食発生下限値（砂礫でいう限界掃流力に相当する値）は極めて小さく特定することは難しい。しかし、本実験の条件下では、粘性土・砂質土系の農地土壌において、水深10 cm（流速1.2~1.3m/s）相当の水理条件がまとまった量の侵食が発生し始める条件となることが示唆された。また、泥炭は他の土壌種類と比べて著しく侵食に脆弱であることが確認された。

・水理量と侵食速度の相関

水深、流速、流体力といった基本的な水理量と侵食速度の間には正の相関関係が認められ、それぞれ決定係数 R^2 が0.9以上と高い値を示した。農地土壌に従来の掃流

砂・浮遊砂量式を適用することは困難である一方で、これらの基本的な水理量を土壌流亡の発生条件を表す指標とできる可能性が示唆された。

これらの成果は、農地の水害リスク評価における土壌流亡の発生条件の把握や、将来的な評価指標の提案に向けた基礎的知見となり得るであろう。

一方で、本研究は限定的な規模・条件下での室内実験であるため、今後は、実大規模での屋外実験結果¹⁸⁾との整合性を検証する必要がある。

あわせて、現地調査や被災事例の分析といった実地データも活用されることで、より現場実態に即した被害評価が可能となり、ひいては北海道における生産空間の維持に資するものと期待される。

謝辞：本検討に際しては、北海道開発局建設部河川計画課および河川工事課との連携のもと実施しました。また、実験の実施にあたり、帯広開発建設部治水課および帯広河川事務所にご協力いただきました。さらに、実験に使用した農地土壌は、池田河川事務所・豊頃町役場、岩見沢河川事務所、江別河川事務所、千歳川河川事務所ならびに建設業者各位よりご提供いただきました。この場を借りて厚く御礼申し上げます。

参考文献

- 1) 土木学会：2016年8月北海道豪雨災害調査団報告書、2017.
- 2) 国土交通省：水害統計調査、https://www.mlit.go.jp/river/toukei_chousa/kasen/suigaitoukei/（参照日：2025.11.14）
- 3) 三條肇、中津敬太、菅原央、南部雄二：台風被災からの農地災害復旧と農業生産性回復への取組み、水土の知、vol.87、No.9、pp.48-49、2019.
- 4) 国土交通省：治水経済調査マニュアル（案）、2024
- 5) 北海道地方における流域治水のあり方検討会：北海道地

- 方における流域治水のあり方, 2025.
- 6) 大澤和敏、酒井一人、田中忠次、吉永安俊：降雨毎の侵食予測における USLE および WEPP の検証、農業土木学会論文集、No.232、pp.43-50、2004.
 - 7) 大久保天、立石信次、山口健、桑原淳、辻修、宗岡寿美、木村賢人、山崎由理：農地・農業用施設の被害について、寒地土木研究所月報、vol.771、pp.41-47、2017.
 - 8) 川邊翔平、安瀬地一作、中田達：「平成 27 年 9 月関東・東北豪雨」に係る鬼怒川洪水による農地・農業水利施設の被害状況報告、農業農村工学会誌、vol.84、No.4、pp.279-282、2016.
 - 9) 小林彩佳、君沢竜也、平出渉、吉田隆年、千葉学、佐々木博文、岡部博一：洪水による農業被害に伴う波及被害額の算定手法の検討、河川技術論文集、vol.25、pp.19-24、2019.
 - 10) 小原洋、大倉利明、高田裕介、神山和則、前島勇治、浜崎忠雄：包括的土壌分類 第 1 次試案、農業環境技術研究所報告、vol.29、pp.1-73、2011.
 - 11) 青森県：健康な土づくり技術マニュアル、2008.
 - 12) 藤村善安：泥炭地湿原における地下水位変動と地表高変動、湿地研究、vol.8、pp.169-175、2018.
 - 13) 吉川秀夫：流砂の水理学、丸善出版、1985.
 - 14) Meter-Peter, E., Muller, R.: Formulas for Bed-Load transport, IAHSR, report on the second meeting, vol.3, pp.39-64, 1948.
 - 15) 芦田和男、道上正規：移動床流れの抵抗と掃流砂量に関する基礎的研究、土木学会論文報告集、No.206、pp.59-69、1972.
 - 16) 板倉忠興：河川における乱流拡散現象に関する研究、土木試験所報告、第 83 号、1984.
 - 17) 農林水産省：農地土壌をめぐる事情、2024.
 - 18) 神原柚乃、島田友典、前田俊一、堀田伸之：河川氾濫による農地土壌流亡の現象解明に向けた事例分析と水理実験、河川技術論文集、vol.31、pp.289-294、2025.