水田の区画面積と水路網が田んぼダムの貯留特性に与える影響に関する基礎的実験

高林　優美[1]・池田　裕一[2]・飯村　耕介[3]

[1]学生会員　宇都宮大学大学院　地域創生科学研究科社会デザイン科学専攻
(〒321-8585 栃木県宇都宮市陽東 7-1-2)
E-mail:mc226295@s.utsunomiya-u.ac.jp

[2]正会員　宇都宮大学教授　地域デザイン科学部社会基盤デザイン学科
(〒321-8585 栃木県宇都宮市陽東 7-1-2)
E-mail:ikeda@cc.utsunomiya-u.ac.jp (Corresponding Author)

[3]正会員　宇都宮大学准教授　地域デザイン科学部社会基盤デザイン学科
(〒321-8585 栃木県宇都宮市陽東 7-1-2)
E-mail:k_iimura@cc.utsunomiya-u.ac.jp

近年，気候変動による水害の激甚化が課題となっており，河道だけでなく堤内地の整備も含めた流域治水による適応が提唱されている．田んぼダムは優れた治水要素として注目されており，その効果を適切に評価する手法が求められている．本研究は，水田の総面積だけでなく水路網の状況が貯留特性に与える影響を室内実験により検討した．実験では，面積の異なる 2 種類の田んぼ模型を使用し，水田の総面積及び流出量を等しくすることを条件に模型の配置パターンを変えて田んぼ及び水路部における水深の時間変化を測定した．その結果，水田の総面積が同じでも，水田の区画面積の違いや水路網の状態によって貯留特性は異なった．

***Key Words**: River Basin Disaster Resilience and Sustainability by All, rainwater storage, paddy field dam, paddy field partitioning, channel network*

1. はじめに

近年，気候変動による水害の激甚化・頻発化が課題となっており，もはや河道だけでなく，堤内地の整備をも含めた流域治水による適応が求められている．加えて高度成長期以降に集中的に整備された社会資本は，老朽化が急速に進んでおり，経済的な余裕も失われつつある．このような状況で既存施設の維持更新を図りながら，管理コストや手間をかけずに社会資本の効果を引き出すために，堤内地の自然環境の保全あるいは創生による解決策が求められている[1)]．この状況を踏まえ，日本では「流域治水」が提唱されるようになった[2)]．これは，気候変動による降雨量の増加に対応するため，流域のあらゆる関係者との協働により，流域全体で総合的かつ多層的に行う水災害対策である．特に水田を活用した雨水貯留いわゆる田んぼダムは，効果の確実性，施策の即効性・経済性が優れたものとして注目されている．

田んぼダムとは，水田に専用の排水装置を設置することにより水田の洪水緩和機能を高め，降雨時のピーク流出量を抑制し，雨水を一時的に水田へ貯留することで下流の農耕地や住宅地の洪水被害を軽減する目的で実施する施策である．田んぼダムの導入は比較的安価で，その施工期間も短いことが挙げられる．しかし，田んぼダムを導入する際には，田んぼダムの効果，農作物の収量や品質への影響，取組に必要な労力などの必要となる情報を農業者，地域住民，行政機関，土地改良区等の全ての関係各所で共有することが重要である[3)]．

また，田んぼダムは EbA（Ecosystem-based Adaptation）の代表的メニューでもある．これは，気候変動に対する適応戦略として，生物多様性や生態系サービスを活用することである[4)]．自然環境が有する多様な機能を積極的に

活用することで，緩和策と適応策の両方の効果が期待でき，地域の居住環境の向上や防災・減災等について，多様な効果が期待できるものとして注目されている．

以上のように，田んぼダムは優れた治水要素として注目されており，その効果を適切に評価する手法が求められている．田んぼダムの効果を評価するには，対象地域のすべての田んぼと水路の特性を詳細に調査して，水理学的に精密な解析モデルを構築している例[5]が見られる．ただし，それらは精密ではあるが詳細な調査を必要とするため，広域での解析には不向きといえる．実際にドローンを用いて水田上空を飛行させた例[6]がある．この調査より田んぼダムの重要なデータとなる畦畔高さを取得できたが，水路については地中または暗渠化したものがあるため，それらのデータ化には費用や時間を要するという課題が見られた．また，近年になって，簡便な調査をもとに広域的な評価を試みる例[7]も見られるようになったが，単純に水田面積を合計するようなモデル化にとどまっている．対象地域の水田全体の合計面積が同じでも，圃場整備の度合いに応じて，水田1枚当たりの面積は違っており，それに応じて水路網の複雑性も異なる．当然，その集合体としての貯留特性にも影響してくると考えるのが自然といえる．

そこで本研究では，水田の総面積だけでなく区画割の仕方と水路網の状況が貯留特性に与える影響を検討するために，まず区画割の実態を調査し，さらに水田圃場を模した室内実験を実施した．

2. 水田の区画面積の実態調査

(1) 調査範囲及び方法

調査対象地域の那須塩原市は，面積592.74km^2，人口116,375人（2023年8月1日現在），栃木県の北部に位置し，山間地と平野部を同程度含んでいる．水田の区画面積を算出するにあたり，市域を単純に分割・集計が容易な標準地域メッシュで区分した．標準地域メッシュは，緯度30秒，経度45秒で区切ったメッシュ（面積約1.291km^2）で，行政機関により様々なオープンデータが整備されている．水田が分布するメッシュを対象にGoogleマップの航空写真[8]を用いて田んぼの枚数をカウントした．そして国土数値情報の土地利用データ[9]のメッシュあたりの田んぼの面積データを用いて田んぼ1枚あたりの面積を算出した．

(2) 調査結果

図-1に調査対象地の水田写真の例を示す．(a)では水田の大きさや配置が均一である一方で，(b)では水田の大きさや配置にばらつきが見られる．このように地域によって水田の区画割の仕方や配置が異なることが分かる．



(a) 那須塩原市上大貫



(b) 那須塩原市箕輪

図-1 調査対象地の空中写真の例

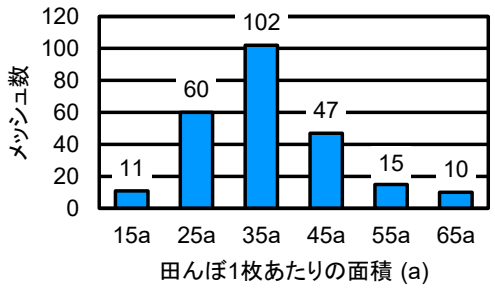


図-2 田んぼ1枚あたりの面積のヒストグラム

そして，**図-2**に田んぼ1枚あたりの面積のヒストグラムを示す．この図を見ると，田んぼ1枚あたりの面積が35aのメッシュが多数を占めている．面積のばらつきの幅としては，大きいものは2倍近い65a，小さいものは2分の1ほどの15aまで広がっている．この結果を元に，室内実験では4倍の面積比の田んぼ模型を作成することにする．

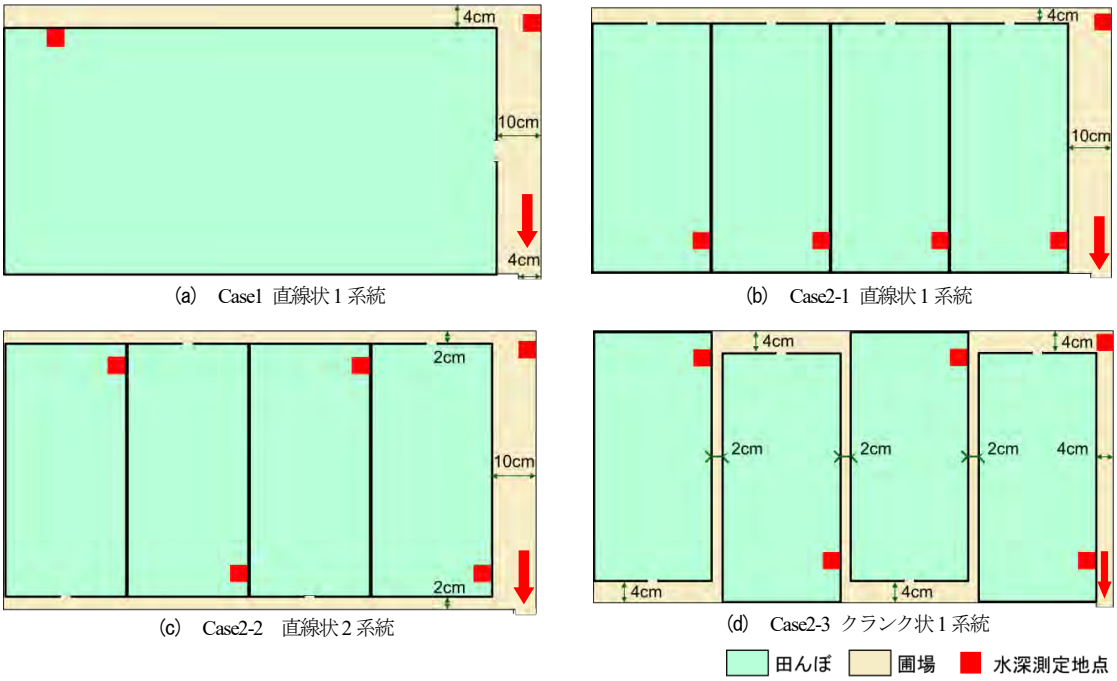


図-3 圃場模型内の田んぼ模型の配置

3. 実験装置及び方法

(1) 実験装置

実験は，幅48cm，奥行き98cm，高さ10cmの水槽を，1つの圃場に見立てて実施した（以下，「圃場模型」と呼ぶ）．圃場模型の中に大きさの異なる2種類の田んぼ模型を設置する．今回は，大きい方（以下，「田んぼ1」と呼ぶ）を1枚，小さい方（以下，「田んぼ2」と呼ぶ）を4枚設置することにした．このとき，田んぼ1，2の総面積を等しく設定した（表-1参照）．田んぼ1は内寸42cm×80cmで，これを圃場に1つ配置して主水路に直接排水した（図-3(a)参照）．田んぼ2は面積が田んぼ1の4分の1で，これを4つ作成することで総面積を同じにし，圃場には3通りの水路パターン（直線状1系統，直線状2系統，クランク状1系統）で配置するようにした（図-3(b)～(d)参照）．

田んぼ1流出口の幅は，試行錯誤の結果，4cmとした．田んぼ2の流出口の幅は，田んぼ1で水深4cmとなる流量（0.357 L/s）を田んぼ2の4枚それぞれに等分に流したときに，田んぼ1と同じ水深になるように調整し，結果として0.5cmとした．田んぼ模型から流出した水は，圃場模型との隙間（これを水路に模している）を流れて、幅4cmの圃場流出口から圃場模型の外に流出するようにした．ここで，田んぼ1と2の内寸の総面積は等しいが，田んぼ模型を厚さ1cmの塩ビ板で作成しているため，田んぼ2の場合，水路部分の面積が田んぼ1よりも小さくなっている．

表-1 模型の寸法 (内寸：cm)

模型種類	長辺 (cm)	短辺 (cm)	高さ (cm)	個数	面積 (cm^2)
圃場	98	48	10	1	4,704
田んぼ1	80	42	5	1	3,360
田んぼ2	42	20	5	4	3,360

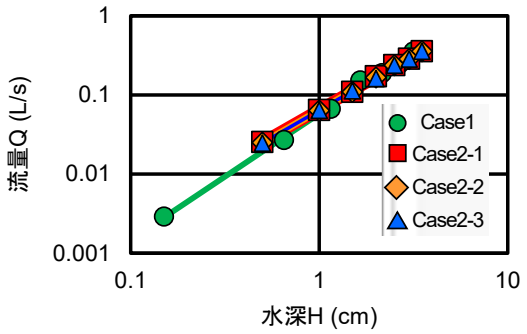
※田んぼ2の面積は4個の合計を示す

表-2 実験条件

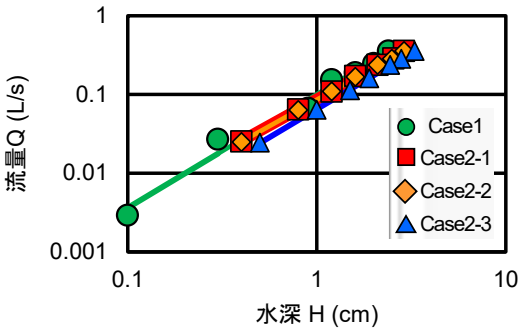
ケース名	田んぼ模型	配置系統	供給流量 (L/s)	供給時間 (分)
Case1	田んぼ1	直線状1系統	0.357	5
Case2-1	田んぼ2	直線状1系統	0.357	5
Case2-2	田んぼ2	直線状2系統	0.357	5
Case2-3	田んぼ2	クランク状1系統	0.357	5

(2) 実験方法

本研究では，それぞれの田んぼ模型に水を一定時間供給して，田んぼ及び圃場での貯留量を検討する．そのためには，各時刻での田んぼ及び圃場からの流出量を測定する必要がある．しかし，非定常状態での流量測定は難しいので，2段階の実験（定常実験，非定常実験）を実施することにした．



(a) 田んぼ模型



(b) 圃場模型

図-4 定常実験における水深と流量の関係

まず定常実験は，田んぼと圃場それぞれの水深と流出量の関係性を調べるものである．予めいくつかの水深を決めておいて，田んぼ内でそれぞれの水深となるような流量を定常状態で測定した．水深は，田んぼ及び圃場模型それぞれにメジャーを貼り付けて測定した．貼り付け位置は**図-3** に示す通りである．なお，Case2-1～3 では田んぼ 2 を 4 つ配置するため，田んぼの水深は 4 つの水深の平均値とした．そして流量はバケツとストップウォッチを使用し，単位時間あたりの流量を算出した．

次に非定常実験では，雨水として田んぼに一定流量を 5 分間供給した後に停止させ，供給開始時から 10 分間の水深変化を測定した．雨水の供給は，4 つのポンプで 4 カ所等分に合計で 0.357L/s の流量で行った．水深の時間変化の測定では，複数のビデオカメラをメジャーと正面になるように動画撮影し，実験後にその動画を再生して 5 秒間隔で水深を読むこととした．そして，定常実験で求めた水深と流量の関係式（後述）を用いて，各時刻の水深からその時刻の流量を算出した．

4. 実験結果及び考察

(1) 水深と流量の関係

図-4 に定常実験での各模型の水深と流量の関係を両対数グラフで示す．図中のプロットが定常実験で行った測定値で，ほぼ直線状に並んでいるのがわかる．そこで，実験結果をべき乗の式

$$Q = CH^{\alpha} \qquad (1)$$

で近似して，係数Cと指数αを求めた．ここに，Q：流量（L/s），H：有効水深（cm）である．有効水深とは，流量ゼロの状態でも表面張力の作用で田んぼ及び圃場の模型内に水が溜まるので，その水深（以下，「ゼロ水深」）を差し引いたものである．また，非定常実験において田んぼと圃場からの流出量が平衡状態となる現象を再現で

表-3 田んぼの水深と流量の関係式

ケース名	係数 C	指数 α	相関係数 R
Case1	0.0576	1.59	0.986
Case2-1	0.0650	1.36	0.996
Case2-2	0.0641	1.37	0.996
Case2-3	0.0640	1.37	0.996

表-4 圃場の水深と流量の関係式

ケース名	係数 C	指数 α	相関係数 R
Case1	0.101	1.44	0.991
Case2-1	0.0868	1.33	0.997
Case2-2	0.0858	1.34	0.997
Case2-3	0.0649	1.43	0.995

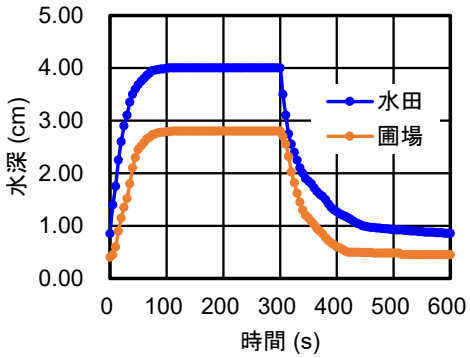


図-5 非定常実験での水深の時間変化の例 (Case1)

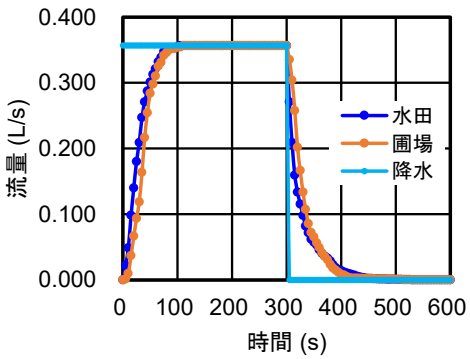
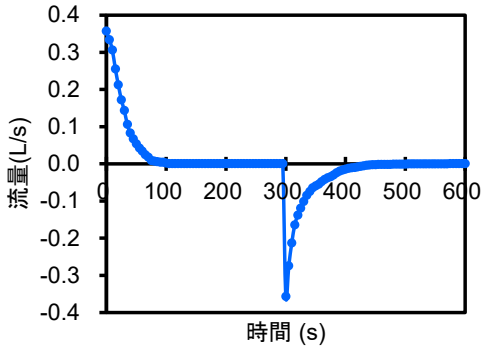
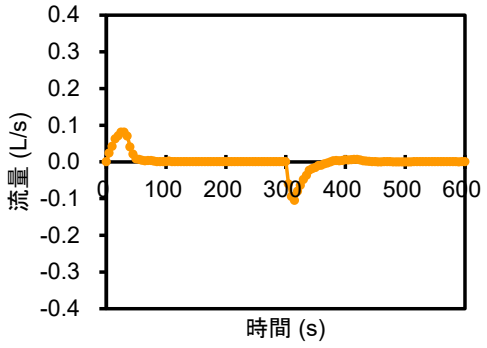


図-6 非定常実験での流出量の時間変化の例 (Case1)

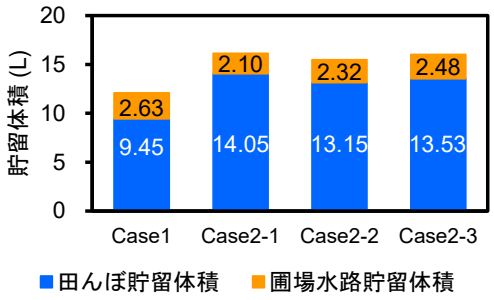


(a) 田んぼへの貯留流量の時間変化

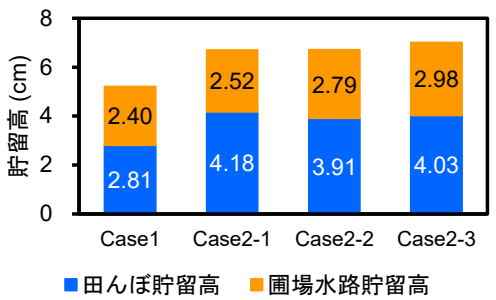


(b) 圃場水路への貯留流量の時間変化

図-7 非定常実験での貯留流量の時間変化の例 (Case1)



(a) 貯留体積



(b) 貯留高

図-8 最大貯留量の比較

きるように，最大水深での流量が供給流量 0.357L/s となるように条件を課した．その結果を**表-3**，**表-4** に示す．またその近似したグラフを**図-4** 中に直線として示す．各ケースの直線が実験結果をよく近似できているといえる．

(2) 流量の時間変化

図-5 は，非定常実験での Case 1 における水深の時間変化を示したものである．時刻ゼロの給水開始時の水深は，表面張力の影響でゼロではなく（ゼロ水深），給水とともに水深は増加し，およそ 100 秒から給水停止の 300 秒まで，田んぼ及び圃場の水深が一定すなわち平衡状態になっているのがわかる．この期間では，供給流量（Q_I）と田んぼ及び圃場からの流出量（それぞれQ_R，Q_F）が等しくて，田んぼ及び圃場における貯留量が最大になっていると考えられる．それは，今回測定された局所的な水深ではなく，流量を積分した体積として検討されるべきものである．

そこで，定常実験で求めた水深と流量の関係式(1)を用いて，水深の時間変化から流量の時間変化を求めることにする．ただし．この関係式はあくまで近似の関係であり，例えば．供給された全体積すなわち流入流量Q_Iを全時間で積分したものと流出流量Q_R，Q_Fのそれとは本来等しくなるべきだが，実際にはそうはならなかった．そこで，この 3 者の体積が保存されるように，各時刻のQ_R，Q_Fのそれぞれを補正した．具体的には，流量がゼロ及び最大値である場合は補正せず，その間の流量の補正量を近似的に 2 次関数で表して，その係数を体積保存されるように決めた．

図-6 は，そのようにして求めた Case1 の流量の時間変化を示したものである．給水時，田んぼからの流量の増加に遅れて圃場から水が流出していくのが分かる．この現象は残りの 3 ケースでも同様に見られた．この差を時間積分した分だけ，田んぼではない圃場の水路に水が貯留されることになる．

(3) 貯留量の比較

図-7 に Case1 の田んぼ及び圃場水路の貯留流量の時間変化を示す．田んぼへの貯留流量は$Q_I - Q_R$，圃場水路への貯留流量は$Q_R - Q_F$により求められる．これを見ると田んぼの貯留流量は降水開始時で最大値を示し，時間経過とともに減少した．一方で，圃場水路の貯留量は降雨開始時ではゼロだが，田んぼからの流出の増加とともに増加し，ある時刻でピークに達して減少した．これらの

現象は残りの3ケースでも同様に見られた．

この貯留流量を時間積分すると，各時刻での田んぼ及び圃場の貯留体積を求めることができる．その最大値が雨水の貯留能力を示す指標となる．図-8に4ケースの貯留体積及び貯留高のピーク値を示す．貯留高は田んぼ及び圃場水路それぞれの貯留体積をそれぞれの面積で除したものである．ただし，Case1,2の水田面積は等しいが，圃場水路面積は異なる（Case1は1,096cm^2，Case2は832 cm^2）．図-8(a)を見ると，まず，個々のケースについては，水路貯留量体積が田んぼの貯留体積に比べてある程度の分量を示しており，15～25%ほどになっている．つぎに4ケースを比較すると，田んぼの貯留量体積は，田んぼ1より田んぼ2のほうが大きく，田んぼ1の5割増し程度にもなっていた．総面積が同じにも関わらずこのような結果になったのは，最大水深での流出量を等しくして実験したが，それ以外のすべての水深で流量が同じではなかったことが挙げられる．あるいは体積が保存されるように流量の補正をしたことが影響した可能性もあり，今後精査する必要がある．水路貯留体積については，田んぼ2では田んぼ1よりも水路貯留量が5%以上減少した．これは田んぼ2が田んぼ1より畦畔面積が増加したために，水路面積が小さくなったからである．また，田んぼ2の3つの水路パターンで比較すると，クランク状1系統での水路貯留量が他の2パターンよりも7%増加した．つぎに図-8(b)を見ると，個々のケースについては，水路貯留量体積が田んぼの貯留体積に比べて相当の分量を示しており，60～80%ほどになっている．これは田んぼの面積に比べて水路面積のほうが小さいので，水路貯留高が相対的に大きくなる．この貯留高は田んぼと水路で除する面積が異なるので，比較には注意が必要だろう．つぎに4ケースを比較すると，貯留高は田んぼ1よりも田んぼ2のほうが大きく，水路パターンがより複雑なCase2-3が最も大きいことがわかる．

以上の結果から，水田の総面積が同じでも水田の区画割の仕方や水路網を変えることによって貯留特性が異なることが明らかになった．田んぼダムを効果的に導入するには，圃場整備が必要といわれることがある．圃場整備により水田及び圃場水路の貯留効果を向上させることができるのは確かである．また，田んぼダムのリモート化・スマート化を進めるにも，圃場整備が一つの前提になり得る．しかし，全国の整備済みの水田の割合は6割程度である[10]．田んぼダムの効果発現には施策の面的な広がりが重要であるため，整備済みの水田に加えて未整備圃場の水田への適用が不可欠である．実際，未整備圃場では水田1枚の面積は小さく，それだけでは貯留効果は小さいかもしれないが，水田の面積に合わせて排水孔の大きさを変化させて適切な排水量に調整することや[11]，水田貯留だけでなく複雑な水路網から河川等への排水にかかる時間を考慮すれば，未整備圃場であってもある程度の貯留効果は期待できると考えられる．

5. おわりに

本研究では，室内実験を実施して，大きな田面と単純な水路からなる圃場と，小さな田面と複雑な水路からなる圃場とで，貯留効果を比較することにした．

まずその前提を確認するため，那須塩原市について水田の区画面積の実態を調査したところ，平野部や山麓部など，地域によって水田の区画割の仕方や配置が異なり，区画面積のばらつきの幅が4倍ほどになることがわかった．

そこで，室内実験において，田んぼの区画割は4倍違うが総面積及び流出量は等しくなるようにし，水路部分の複雑さを変えて貯留量を比較した結果，水田の区画割が細かい方が田んぼの貯留量が大きい結果となった．また水路が複雑なほうが水路の貯留量が大きいことがわかった．これより，区画割が小さい未整備の圃場で整備を急がずとも，十分な貯留能力を発揮できることが示唆された．

今後は，田んぼ模型をさらに細分化して貯留量を比較し，田んぼダムを考慮した数値モデルの構築を行う予定である．

謝辞：この研究を実施するにあたり，本学の流域デザイン研究室に所属する髙橋凜太郎氏，古川雄大氏，渡辺康太氏には実験補助要員として多大なご協力を賜りました．ここに記して謝意を表します．

REFERENCES

1) 国土交通省：第5次社会資本整備重点計画, 2021 (https://www.mlit.go.jp/sogoseisaku/point/content/001406599.pdf, 2023年8月現在). [MLIT of Japan : The 5th Priority Plan for Social Infrastructure Development, 2021 (https://www.mlit.go.jp/sogoseisaku/point/content/001406599.pdf, Aug 2023).]
2) 国土交通省, 農林水産省, 文部科学省, 経済産業省：流域治水施策集 目的とそれぞれの役割, Ver2.0 水害対策編, 2023 (https://www.mlit.go.jp/river/pamphlet_jirei/kasen/gaiyou/panf/sesaku/pdf/r503_sesaku_01.pdf,, 2023年8月現在). [MLIT, MAFF, MEXT and MET of Japan : Collection of Measures for River Basin Disaster Resilience and Sustainability by All, Objectives and Roles of Each, Ver2.0 Flood damage countermeasures, 2023 (ht

tps://www.mlit.go.jp/river/pamphlet_jirei/kasen/gaiyou/panf/sesaku/pdf/r503_sesaku_01.pdf,, Aug 2023).]
3) 農林水産省 農村振興局:「田んぼダムの手引き」, 2022 年4 月, (https://www.maff.go.jp/j/nousin/mizu/kurasi_agwater/attach/pdf/ryuuiki_tisui-67.pdf, 2023 年 8 月現在). [MAFF of Japan : Guide for paddy field dam, 2022 (https://www.maff.go.jp/j/nousin/mizu/kurasi_agwater/attach/pdf/ryuuiki_tisui-67.pdf, Aug 2023).]
4) 環境省：生物多様性分野における気候変動への適応, 2016 (https://www.env.go.jp/nature/biodic/kikou_tekiou-pamph/tekiou_jp.pdf, 2023 年 8 月現在). [MOE of Japan : Adaptation to climate change in the field of biodiversity, 2016 (https://www.env.go.jp/nature/biodic/kikou_tekiou-pamph/tekiou_jp.pdf, Aug 2023).]
5) 吉川夏樹, 宮津進, 安田浩保, 三沢眞一：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 B1(水工学), Vol.67, No.4, pp.I_991-I_996, 2011. [Yoshikawa,N., Miyazu,s., Yasuda,h and Misawa,S. : Development of inundation analysis model for low-lying agricultural reservoir, Jour. JSCE, Ser. B1 (Hydraulic Engineering), Vol.67, No.4, pp.I_991-I_996,2011.]
6) 栃木県那須塩原市：令和４年度国民参加による気候変動情報収集・分析委託業務 報告書, 2023 年 3 月. [Nasushiobara City, Tochigi Pref., Japan : Consignment work report on climate change information collection and analysis by citizen participation, 2023.]
7) Chai,T., Touge,Y., Shi,K., and Kazama,S. : Evaluating potential flood mitigation effect of paddy field dam for Typhoon No.19 in 2019 in Naruse River Basin, Jour. JSCE, Ser.B1(Hydraulic Engineering), Vol.76, No.1, pp.295-303, 2020.
8) Google マップ (https://www.google.co.jp/maps/?hl=ja, 2023 年 8 月現在). [Google Maps (https://www.google.co.jp/maps/?hl=ja, Aug 2023).]
9) 国土交通省：国土数値情報 土地利用 3 次メッシュデータ, (https://nlftp.mlit.go.jp/ksj/gml/datalist/KsjTmplt-L03-a.html, 2023 年 8 月現在). [MLIT of Japan : Land Use 3rd Mesh Data, National Land Numerical Information (https://nlftp.mlit.go.jp/ksj/gml/datalist/KsjTmplt-L03-a.html, Aug 2023).]
10) 農林水産省 農村振興局：農業生産基盤の整備状況について, 2020 (https://www.maff.go.jp/j/council/seisaku/nousin/bukai/R0104/attach/pdf/siryou-8.pdf, 2023 年 8 月現在). [MAFF of Japan : On the maintenance situation of agricultural production infrastructure, 2020 (https://www.maff.go.jp/j/council/seisaku/nousin/bukai/R0104/attach/pdf/siryou-8.pdf, Aug 2023).]
11) 吉川夏樹, 宮津 進：田んぼダムの適切な排水量調整機構, 農業農村工学会誌, 89 巻 12 号, pp.933-937, 2021. [Yoshikawa,N. and Miyazu,S.: Proper Runoff Control Mechanism for "Paddy Field Dam", Water, Land and Environ. Eng., Vol.89, No.12, 2021.]

(Received June 19, 2023)
(Accepted August 21, 2023)

LABORATORY EXPERIMENT ON EFFECTS OF PADDY PARTITIONING AND CHANNEL NETWORK ON RAINWATER STORAGE

Yumi TAKABAYASHI, Hirokazu IKEDA and Kosuke IIMURA

In recent years, intensification of flood damage due to climate change has become a serious issue, and “River Basin Disaster Resilience and Sustainability by All” is now required to be adapted, by means of not only river channel development, but also landside area maintenance. paddy field dam is one of excellent flood control element, and a method to appropriately evaluate the effect is required. In the present study, laboratory experiment was conducted to examine the effect of not only the total area of paddy fields but also the condition of the channel network on the storage characteristics. In the experiment, two types of paddy field models with different areas were used, and the total paddy field area and runoff were equal. Then, we changed the layout pattern of the model and measured the time change of the water depth in the paddy field. As a result, even if the total area of the paddy field was the same, the overall storage characteristics differed depending on paddy field partitioning and the channel network.