中小河川における氾濫流の戻り流れに対する堤内地の植生管理の影響に関する基礎的研究

飯村　耕介[1]・浅沼　信也[2]・杉山　健斗[3]・池田　裕一[4]

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

[2]岩手県庁（〒020-8570 岩手県盛岡市内丸10-1）
E-mail: s-asanuma@pref.iwate.jp

[3]矢作建設工業株式会社（〒468-0004 愛知県名古屋市東区葵3-19-7）
E-mail: ken_sugiyama.yhg@icloud.com

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

令和元年東日本台風における那珂川水系荒川では氾濫流が農業用水路と河道の合流点から河道側へ戻る流れが生じたが，堤内地側樹林帯により狭窄部となっていたため，流れが集中して対岸の決壊へ影響した可能性がある．本研究では水害激甚化の傾向にあって，河川周辺の植生管理の在り方を検討する手始めとして，植生により狭窄化した地点における氾濫流の戻り流れが，河道流や対岸へ向かう流れへ与える影響に関して模型実験で検討する．蛇行河道模型の下流側合流点の氾濫原側に植生模型を配置した実験により水深は河道内・氾濫原ともに増加傾向で，河道においては最大で 1.15 倍となった．氾濫流と合流直後の河道内の流速は，植生抵抗により植生と接する右岸側は植生なしの 2 割程度まで大きく低減するが，その対岸側で 1.2 倍となったことを確認した．

Key Words : *heavy rainfall, Typhoon Hagibis, vegetation, inundation flow, remerging flow*

1.　はじめに

令和元年東日本台風により，栃木県管理の中小河川において 13 河川 27 か所で決壊が発生した．一つの河川の複数箇所で決壊等が発生し，特に蛇行河川では決壊により氾濫した流れが堤内地から河道側に逆越流する地点やその対岸の堤防で連鎖的に決壊が生じているような様子も確認できた．那珂川水系荒川の藤田橋付近の決壊事例では，藤田橋下流の決壊における氾濫流が農業用水路と河道の合流点から河道側へ戻る流れが生じ，その対岸の堤防が決壊していたが，合流点の堤内地側には樹林帯があり，狭窄部となっていたため，流れが集中して河道へ戻った可能性が考えられる（図-1）[1]．

蛇行河道における洪水流については様々な研究が行われており，令和 2 年 7 月の球磨川水害では人吉・球磨盆地において大規模な浸水被害が発生し，特に球磨郡球磨村渡地区では氾濫流が蛇行する河川と一体的に流れる流下型氾濫の挙動であることを示し，複断面蛇行流れと類

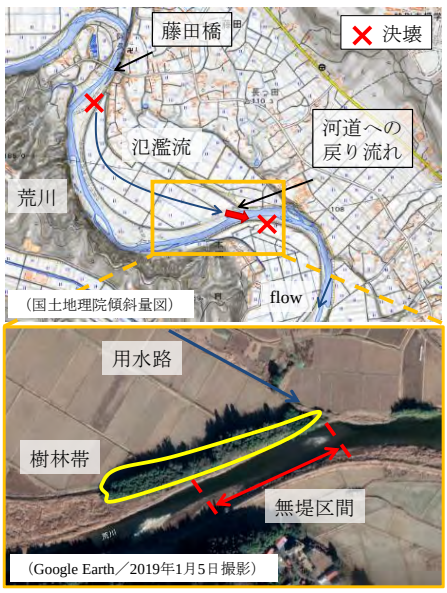


図-1　那珂川水系荒川藤田橋付近の概要

似の特徴を持つことが明らかにされた[2), 3)]．一方で，流下型氾濫流が河道と一体的ではなく，狭窄部から局所的に河道へと戻る流れとそれによる合流後の河道内流況に与える影響については不明な点が多い．

対象地域の河道に沿った堤内地には竹林と中心とした河道内樹林が戻り流れが発生した地点に繁茂していた（**図-1**）．堤防に沿った範囲に繁茂していたため水害防備林と考えられるが，このような樹林が洪水へ与える影響については多くの研究がなされており，岡部ら[4)]は伝統的水防竹林が築堤後に河道内に残留している吉野川を対象に，この竹林が洪水流へ与える影響について定量的に評価した．田中ら[5)]は令和元年東日本台風による荒川の河道内植生の破壊・流失や，洪水流への影響について明らかにした．一方，堤内地植生の影響については，長谷見ら[6)]は構え堀・屋敷林・水塚をモデル化した水理模型実験により，これらの氾濫流に対する水工学的機能について検討している．

本研究では，水害激甚化の傾向にあって，河川周辺の植生管理の在り方を検討する手始めとして，堤内地植生により狭窄化した地点における氾濫流の戻り流れが，河道流やその対岸へ向かう流れへ与える影響に関して水理模型実験により検討する．

2. 実験装置及び方法

(1) 実験水路の概要

令和元年東日本台風により被災した栃木県内の中小河川を対象に決壊による氾濫流流下と河道への戻り流れを再現した実験を実施し，合流後の河道内流況への影響について検討した．実験水路の概要を**図-2**に示す．実験に用いた開水路は全長 800 cm，水路幅 50 cm の透明な塩化ビニル製で，開水路内に蛇行河道の模型を設置して実施した．蛇行河道の作成については，sine-generated curve を用いて形状を決定し，栃木県内の被災箇所の中で用水路から河道へと逆越流した河川として，那珂川水系荒川の蛇行度 1.60 と，利根川水系永野川の蛇行度 1.19 を参考とし，開水路幅 50 cm で再現できる蛇行度として 1.2，1.35，1.5 の 3 ケースを設定して蛇行河道を実験水路内に再現した．蛇行水路の側壁は 1 mm 厚の塩ビ板を用いて作成し，低水路と氾濫原の比高差を再現するために堤内地側はモルタルを打設して 2 cm だけ底面の高さをかさ上げしている．開水路の谷線軸方向の水路勾配を 1/200 とし，蛇行河道の河道幅は 15 cm とした．流れの条件については水深スケールで縮尺がおよそ 1/100 となるように蛇行河道に 5000 cm³/s を流量として与え，定常流下で実験を実施した．

測定項目については水深をポイントゲージを用いて，蛇行河道の横断方向に 5 点，流下方向には蛇行の 1/8 波長おきを基本とし，詳細測定区間においては上流側・下流側に設けた決壊地点付近で 1/32 波長おきに測定断面を設けた．堤内地に関しては 5 cm 間隔で測定点を設けた．流速は電磁流速計（KENEK，VM-802H）の I 型プローブを用いて水深と同じポイントで，鉛直方向には 1 点法で測定した．

(2) 蛇行河道の決壊について

蛇行河道は 6 波長分を開水路内に作成し，上流側と下流側に直線部を設け，下流から 3 波長目を詳細測定区間として蛇行河道側壁を切り取って決壊を再現し，堤内地側への氾濫流を発生させた．下流側の決壊幅については 3 波長目の下流端から 1/8 波長分だけ上流側を起点として 15 cm の決壊幅を設けた．同様に上流側の決壊幅については 3 波長目の上流端から 1/8 波長分だけ下流側を起点として，決壊幅を 7.5 cm，15 cm，22.5 cm と 3 ケース設定して氾濫原への流入量を変化させて実験を実施した．蛇行河道の側壁と開水路の側壁は接しており，上流側決壊地点から氾濫原へと流入した流れは下流側の決壊地点

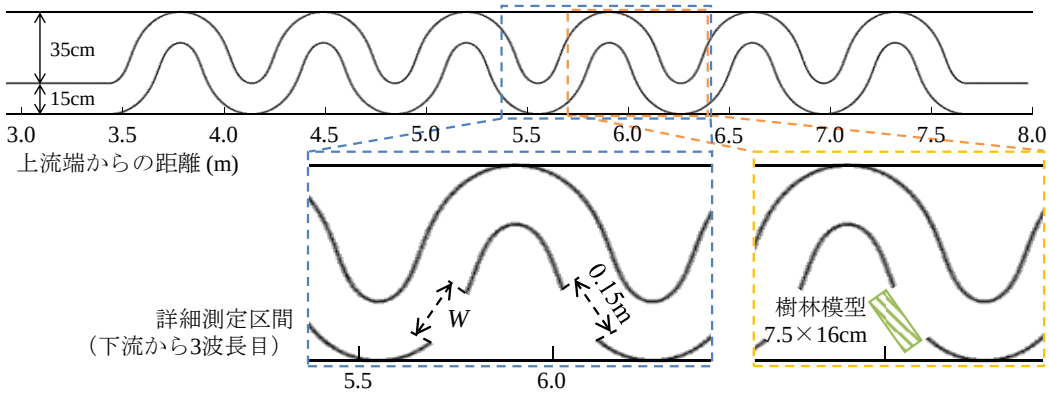


図-2 実験水路概要

からすべて河道へ戻る流れとなる．

(3) 堤内地の植生条件について

下流側の堤防に沿った堤内地側に存在する樹林帯が戻り流れと合流後の河道内流況に与える影響について着目し，樹林模型を配置した実験により検討した．主な対象地域である那珂川水系荒川の合流地点に繁茂していたのは竹林であり，既往研究[7]から植生密生度を 0.25 m^{-1} と，対象地域の密生度を簡易的に求めた 0.11 m^{-1} として設定したものと，竹林以外の河道内樹木として一般的なカワヤナギの密生度を既往研究[8]を参考に密生度 0.02 m^{-1} として 3 ケースの条件を設定して実験を実施した．樹木模型は円柱として再現し，2 mm のアクリル棒を用いた．密生度を 1/100 程度の縮尺で再現するため，それぞれのアクリル棒の設置間隔（円柱の中心間距離）を正方形配置として 0.9 cm，1.3 cm，3.2 cm として樹木模型の設置範囲内に設けた．実験条件について整理した一覧を**表-1** に示す．

3. 実験結果および考察

(1) 蛇行河道流れの安定性の確認

蛇行河道内の流れの状態を確認するために蛇行河道側壁を決壊させずに水を流し，水深と流速の平面的な分布について確認した．蛇行度 1.5（Case-1）における水深と流速の測定結果を**図-3** にそれぞれ示す．水深の測定結果に関して，内岸側で水深が小さく，外岸側で水深が大きくなっていることから，一般的な蛇行河道の水深の変化が見て取れる．また，下流側から 2 波長目から 4 波長目あたりは比較的安定した水深の変化を確認し，詳細測定区間を下流から 3 波長目に設けることとした．流速の測定結果に関しても，内岸側で流速が大きく，外岸側で流速が小さくなる蛇行流れの特徴を確認した．

(2) 平面流況に関する結果と考察

各ケースにおける詳細測定区間の水深コンターと平均流速ベクトルをまとめた平面流況を**図-4** にそれぞれ示す．縦軸と横軸はそれぞれ開水路幅と 1 波長分の縦断距離で除して無次元化している．蛇行河道の右岸側壁を除去して決壊を再現し，氾濫流を発生させることで，流れが蛇行河道と堤内地に分かれて流れるため，蛇行河道内の水深が決壊がない場合に比べて小さくなることが確認できた．一方，上流側決壊幅を大きくしても蛇行河道内の水深に大きな変化は見られなかった．また，堤内地の氾濫流の流況を見ると，上流側決壊幅が下流に対して狭い場合はほぼ直線的に堤内地を氾濫流が流下するのに対して，上流側の決壊幅が広くなると蛇行河道の方に寄った流れになることが確認できた．

表-1 堤外地植生に着目した数値解析条件

Case No.	蛇行度	上流側決壊幅 W (cm)	下流側決壊幅 (cm)	樹林密生度 (m^{-1})
Case-1-0	1.5	0	0	-
Case-1-1	1.5	7.5	15	-
Case-1-2	1.5	15	15	-
Case-1-2D	1.5	15	15	0.25
Case-1-2M	1.5	15	15	0.11
Case-1-2S	1.5	15	15	0.02
Case-1-3	1.5	22.5	15	-
Case-2-2	1.35	15	15	-
Case-3-2	1.2	15	15	-

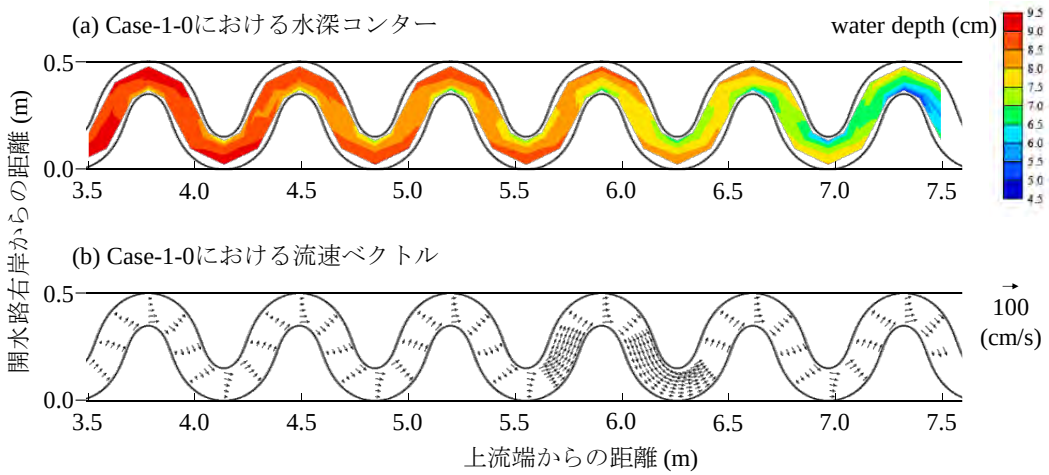


図-3 Case-1-0 における 2 次元平面流況

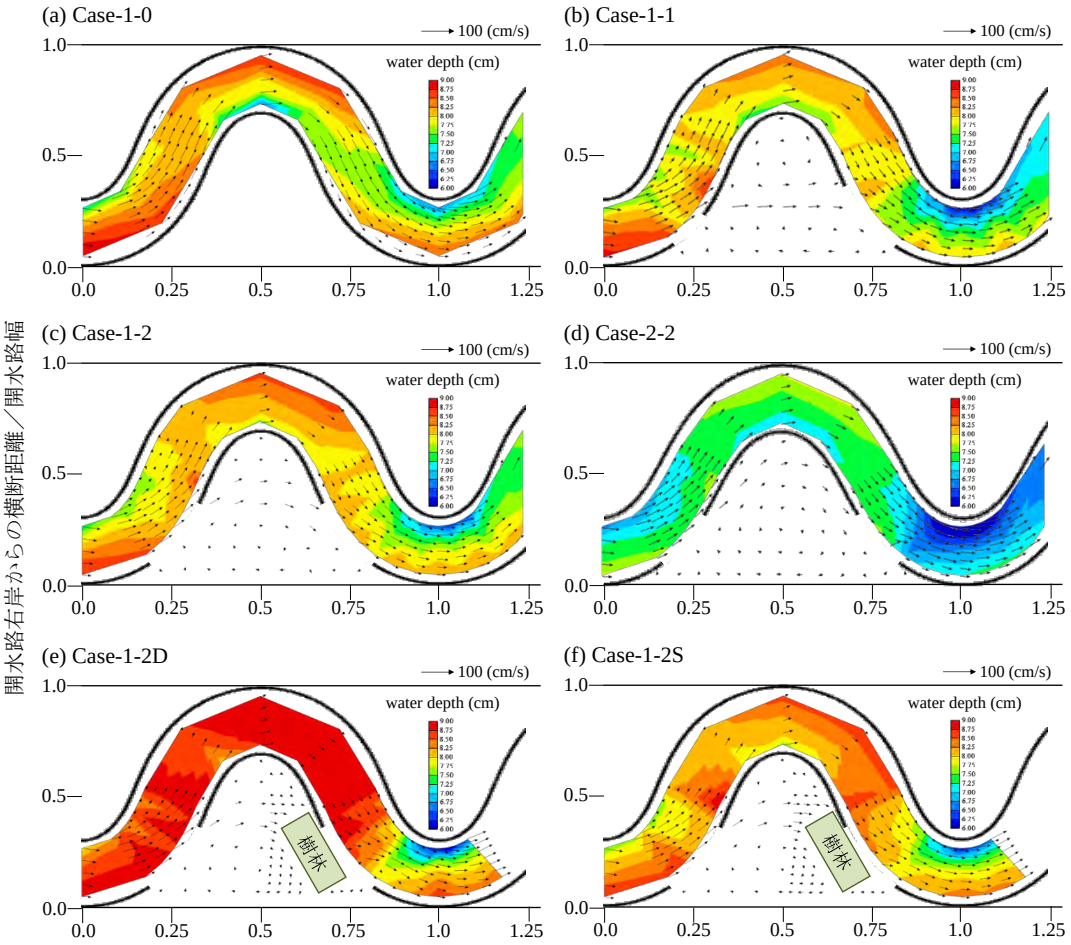


図-4　各 Case における平面流況

蛇行度を変化させた実験では，蛇行度が小さいケースではより蛇行河道内の水深が小さくなっているのを確認できた．図では軸を無次元化しているが，模型における蛇行河道 1 波長分の縦断距離は蛇行度 1.5（Case-1-2）と比較して蛇行度 1.35（Case-2-2）では 1.2 倍ほど長く，堤内地の面積も蛇行度 1.35 の方が大きい．これにより堤内地により多くの水を貯留できるため蛇行河道内の水深が小さくなる一方で，合流後の蛇行河道内の流速は蛇行度 1.5 のものよりも大きくなっていた．また堤内地流況については上流・下流の決壊幅が等しい Case-1-2 と同じように蛇行河道の方による流れが確認された．

樹林帯を設置した実験では，密生度の大きさに応じて Dense，Middle，Sparce の頭文字をとってケース名に付している．実験結果から，樹林帯が抵抗として氾濫流が堤内地から河道へと戻る流れを阻害するため，樹林帯を配置しないケース（Case-1-2）に比べて下流側決壊よりも上流側の蛇行河道内の水深が大きくなり，特に植生の密生度が大きくなる，つまり樹林帯の抵抗が大きくなるほどこの傾向が大きくなっている（Case-1-2D）．一方で，下流側決壊よりも下流の蛇行河道内では樹林帯を設置しないケースと水深に関してはそれほど大きな差は見られなかった．堤内地の流況に関してはこちらも樹林帯を配置しないケースと同様に上流・下流の決壊幅が等しい Case-1-2 と同じような流れが確認された．いずれの流れにおいても堤内地の右岸側に時計回りの渦が形成されているが，樹林帯を配置したケースでは樹林帯に阻害された流れが右岸を向いて流れるため，形成された渦の大きさが樹林帯を設置しないケースに比べて小さくなっている．

(3)　合流後の河道内流況への影響

氾濫流が河道に合流した後の対岸へ与える影響を確認するために，各ケースにおける蛇行河道の右岸と左岸の側壁に沿った流速を**図-5** にそれぞれ示す．上流側の決壊

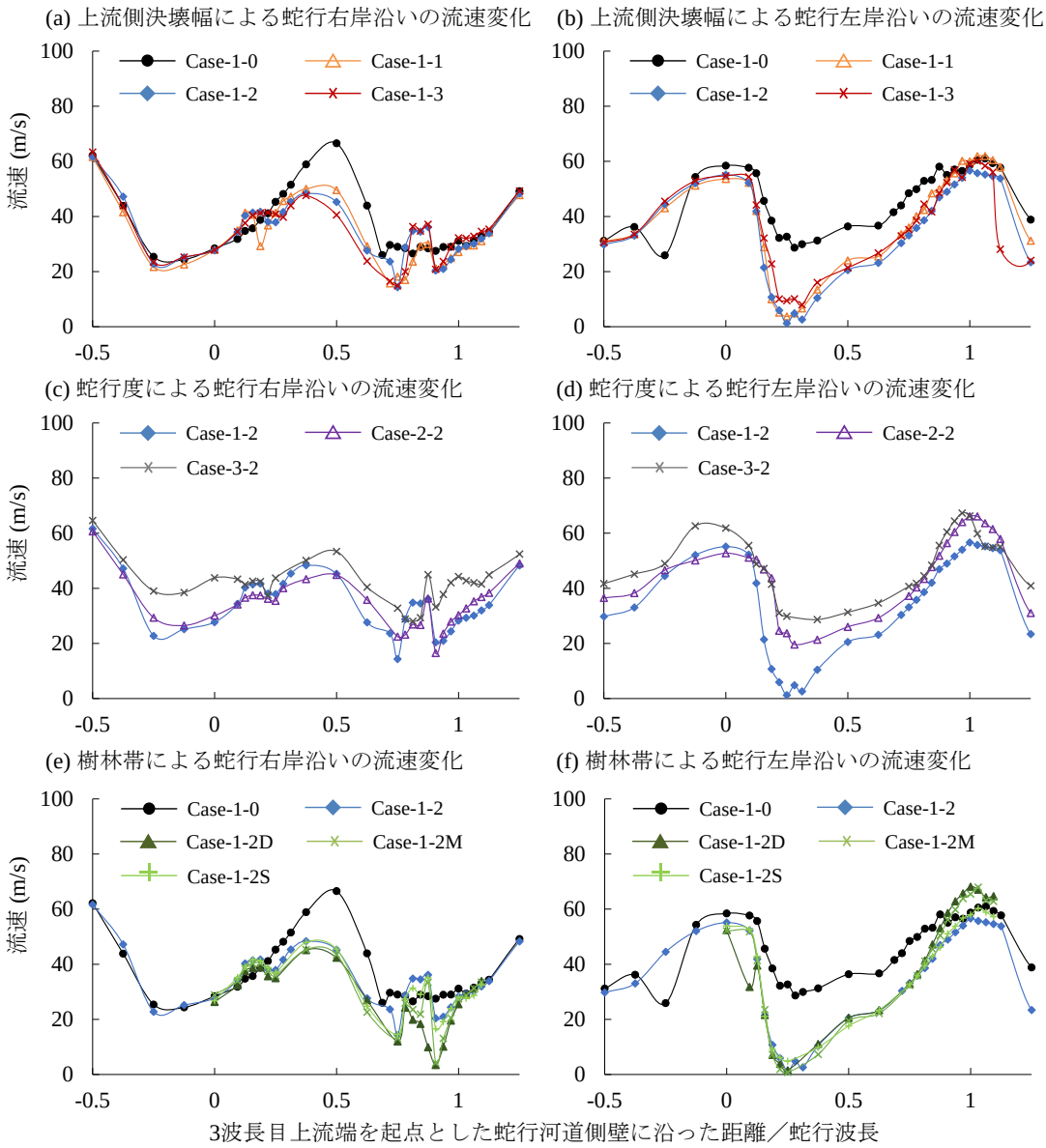


図-5　各 Case における蛇行河道の側壁に沿った流速

幅を変えた実験では，決壊に伴って蛇行河道と堤内地に流れが分かれるため，上流側決壊と下流側決壊の間（図の横軸の 0～1 の範囲）で流速についても低減することが確認できた一方で，上流側決壊幅の違いはあまり見られなかった．蛇行度を変化させた実験では，蛇行度が小さくなるほど氾濫する堤内地の面積が大きくなるため，氾濫流の規模が蛇行度が小さいほど大きく，下流側決壊地点から河道へと戻ろうとする流れも大きくなるため，蛇行度が小さくなるほど対岸の流速が大きくなる傾向が見られた．一方で，上流側決壊と下流側決壊の間の範囲の蛇行河道内の流速は，水深のときと同様に蛇行度が小さくなるほど流速が低減している．樹林帯を配置した実験では，樹林帯の抵抗により下流側決壊地点よりも上流側で水深が大きく増加したことにより，蛇行河道内の流速も減少していることが確認できた．一方で，樹林帯抵抗によって堰上げられた流れが下流側の決壊地点から河道へと合流するため，合流直後の対岸側（左岸側）の流速は樹林帯を配置しないケースと比較して増加する傾向にあり，それは植生抵抗が大きいほど，つまり密生度が大きくなるほど流速が大きくなっていた．植生を配置しないケースと比較し，合流後の左岸側での流速増加率として最大で 1.2 倍となったことを確認した．

4. おわりに

令和元年東日本台風により大きな被害を受けた栃木県内の中小河川における植生管理の在り方を検討するために，氾濫流の戻り流れに堤内地植生が与える影響を明らかにするために蛇行河道模型による水理模型実験を実施した．堤防に沿った樹林帯が存在することで，堤内地氾濫流の流れを阻害し蛇行河道内の水深を増加させることで，下流側決壊地点よりも上流側の流速をおさえることができる一方で，下流側決壊地点で氾濫流が合流した後の対岸側の流速が像だし，堤防浸食等の危険性が増すことを示した．

謝辞：本研究は，JSPS 科研費 21K04268 の助成を受けて実施されました．ここに記して謝意を示します．

REFERENCES

1) 飯村耕介，池田裕一：令和元年東日本台風による那珂川水系荒川の決壊事例とその考察，土木学会論文集 B1（水工学），第 76 巻，第 1 号，pp. 346-351，2020．[Iimura, K. and Ikeda, H.: Levee breach of Arakawa river in Nakagawa river system by Typhoon Hagibis in 2019, *Journal of Japan Society of Civil Engineers, Ser. B1 (Hydraulic Engineering)*, Vol. 76, No. 1, pp. 346-351, 2020.]
2) 福岡捷二，大串弘哉，加村大輔，平生昭二：複断面蛇行流路における洪水流の水理，土木学会論文集，第 579 号，pp. 83-92，1997. [Fukuoka, S., Ohgushi, H., Kamura, D. and Hirao, S.: Hydraulic characteristics of the flood flow in a compound meandering channel, *Journal of Japan Society of Civil Engineers*, No.579, pp. 83-92, 1997.]
3) 平川隆一，大本照憲：令和 2 年 7 月豪雨における球磨村渡地区の洪水氾濫特性，土木学会論文集 B1（水工学），第 78 巻，第 2 号，pp. 679-684，2022．[Hirakawa, R. and Ohmoto, T.: Characteristics of flood inundation in Watari area due to heavy rainfall in July 2020, *Journal of Japan Society of Civil Engineers, Ser. B1 (Hydraulic Engineering)*, Vol. 78, No. 2, pp. 679-684, 2022.]
4) 岡部健士，田村隆雄：吉野川河道内に残留した水防竹林の管理計画に関する数値解析的検討，水工学論文集，第 53 巻，pp. 625-630，2009. [Okabe, K. and Tamura, T.: Numerical estimation of efficiency of banboo grove management plan in the Yoshino river, *Annual journal of hydraulic engineering*, Vol. 53, pp. 625-630, 2009.]
5) 田中規夫，五十嵐善哉，末永博：令和元年東日本台風において荒川の熊谷砂礫州で発生した植生破壊と流木ダムの形成が最大水位と下流への流出ハイドログラフに与えた影響，土木学会論文集 B1（水工学），第 76 巻，第 1 号，pp. 243-252，2020．[Tanaka, N., Igarashi, Y. and Suenaga, H.: Effects of the tree destruction and debris dam for mation at the gravel-bed bars in Kumagaya in the Arakawa river on maximum water depth and flood hydrograph at flood event due to Typhoon Hagibis, *Journal of Japan Society of Civil Engineers Ser. B1* (*Hydraulic Engineering*), Vol. 76, Issue 1, pp. 243-252, 2020.]
6) 長谷見優，田中規夫：洪水氾濫常襲地帯に発達した水塚に併設された『構え堀』の水除け機能についての水理実験，土木学会論文集 B1（水工学），第 74 巻，第 4 号，pp. I_1285-I_1290，2018．[Hasemi, Y. and Tanaka, N.: Flume experiments on a flood guard moat, *Kamaebori*, around a protective mound and structure, *Mizuka*, in frequent flood occurrence area, *Journal of Japan Society of Civil Engineers Ser. B1* (*Hydraulic Engineering*), Vol. 74, Issue 4, pp. I_1285-I_1290, 2018.]
7) 前野詩朗，宮内洋介，森卓也：植生が旭川の洪水流に及ぼす影響の検討，水工学論文集，第 48 巻，pp. 757-762，2004. [Maeno, S., Miyauchi, Y. and Mori, T.: Effect of vegetation on flood flow in the Asahi river, *Annual journal of hydraulic engineering*, Vol. 48, pp. 757-762, 2004.]
8) 吉川正人，福嶋司：鬼怒川河辺におけるヤナギ群落の分布と形成様式，植物学会誌，第 16 巻，第 1 号，pp. 25-37，1999. [Yoshikawa, M. and Hukusima, T.: Distribution and developmental patterns of floodplain willow communities along the Kinu River, central Japan, *Vegetation Science*, Vol. 16, No. 1, pp. 25-37, 1999.]

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

EFFECTS OF VEGETATION MANAGEMENT ON THE REMERGING FLOW OF INUNDATION IN SMALL AND MEDIUM-SIZED RIVERS

Kosuke IIMURA, Shinya ASANUMA, Kento SUGIYAMA and Hirokazu IKEDA

Due to the heavy rain caused by Typhoon Hagibis in 2019, the levee breach occurred in the Arakawa River. The remerging flow of the inundation was affected by the inland vegetation. The remerging flood flow may have influenced the levee breach on the opposite bank. In this study, the influence of inland vegetation on inundation flow and remerging flow was investigated by hydraulic model experiments. Inland vegetation increased the water depth both in the river channel and inland, and the greater the density, the greater the water depth. The flow velocity on the opposite bankside increased due to the remerging flow of the inundation, and the rate of increase was 1.2 times.