

平成16年信濃川洪水による五十嵐川の内岸堤防, 内岸高水敷被災機構の検討

STUDY OF INNER LEVEE BREACH AND EROSION AT THE INNER FLOOD-
CHANNEL BED AT IKARASHI RIVER AGAINST FLOODING OF SHINANO RIVER IN
2004

佐藤海輝¹・後藤岳久²・酒井公生³・岡田一平⁴・福岡捷二⁵
Kaiki SATO, Takahisa GOTOH, Kimio SAKAI, Ippei OKADA and Shoji FUKUOKA

¹学生会員 中央大学大学院 理工学研究科 都市人間環境学専攻 博士課程前期課程
(〒112-8551 東京都文京区春日一丁目13-27)

²正会員 博士(工) 中央大学研究開発機構 機構准教授 (〒112-8551 東京都文京区春日一丁目13-27)

³新潟県 土木部 河川管理課 課長 (〒950-8570 新潟県新潟市中央区新光町4-1)

⁴新潟県 土木部 河川管理課 主査 (〒950-8570 新潟県新潟市中央区新光町4-1)

⁵フェロー Ph.D. 工博 中央大学研究開発機構 機構教授 (〒112-8551 東京都文京区春日一丁目13-27)

五十嵐川では平成16年7月新潟・福島豪雨によって、内岸側の堤防が決壊し、平成23年7月新潟・福島豪雨では内岸高水敷・低水護岸が洗掘被害を受けた。従来、河道の内岸側の被害はあまり着目されてこなかったが、近年の研究で低水路が蛇行している複断面河道では、洪水時に水位が高くなると最大流速が外岸側から内岸側へ移動し、二次流が逆転する流れが生じることが示され、このことが蛇行部内岸側の被災原因となっていることが報告されている。この知見を踏まえて五十嵐川で過去に内岸側で発生した河道被害と複断面的蛇行流れの発生との関係を調べることは、今後の河道と堤防設計を行う上で極めて重要である。

本論文では、平成16年7月新潟・福島豪雨での破堤と平成23年7月新潟・福島豪雨での内岸側高水敷の洗掘被害について、準三次元洪水流・河床変動解析を行い、複断面的蛇行流れがそれらの被災原因となり得るか考察する。

Key Words: compound meandering channel flow, Ikarashi river flood, inner levee breach, erosion on the inner flood-channel bed

1. 序論

五十嵐川は新潟県三条市を流れる信濃川一次支川であり、河道は複断面形で低水路が蛇行している河川である。五十嵐川では平成16年と平成23年に大規模な洪水が発生し、多くの被害をもたらした。平成16年7月新潟・福島豪雨は、堤防からの越流が約3時間続き、図-1に示すように蛇行部内岸側の堤防が約120mにわたって破堤し、破堤部の対岸には水防工法として堤防天端に40~50cmの土嚢が積まれたが(図-2)、それを越流するほどの大洪水であった。その後の平成23年7月新潟・福島豪雨では、下流の蛇行部内岸側の高水敷と低水護岸が大規模な洗掘被害を受けた。このように五十嵐川では、大規模洪水で河川の内岸側に被害が生じており、今後の気候変動

に伴う将来の流量増大に備える川づくりのためにも、これらの被災原因を明らかにすることが重要である。

複断面蛇行河道の水理現象について福岡³⁾は、広い高水敷を有する複断面蛇行河道では、相対水深(高水敷水深/低水路水深)がおおよそ0.3を超えると高水敷から遅い流れが大量に低水路河道に流入し、流れの混合が生じることで、洪水の最大流速が外岸側から内岸側へ移動し、湾曲二次流と逆向きの二次流が生じる複断面的蛇行流れを明らかにした。さらに、現地河川でも複断面的蛇行流れを検討している⁴⁾。後藤ら⁵⁾は、昭和56年8月石狩川洪水や令和2年7月球磨川洪水を対象として準三次元洪水流・河床変動解析を行い、その結果、洪水時に複断面的蛇行流れの発生は、相対水深が0.3より大きいことに加え、堤防線形と、低水路線形の位相差と、蛇行上流部の



図-1 平成16年7月新潟・福島豪雨時の内岸堤防破堤の様子¹⁾



図-2 平成16年7月新潟・福島豪雨時の破堤部対岸の水防活動の様子²⁾

高水敷の広さに強く依存することを示している。

五十嵐川の平成16年7月洪水における内岸側の破堤原因は越流による裏法面の侵食と結論付けられているが²⁾、前述のように、近年の新しい知見では、複断面的蛇行流れにおいては、高い水位時には河道内岸側の流速が増大し、破堤の原因になり得ることから、今一度、平成16年7月洪水の内岸側の破堤原因について検討することにした。加えて、平成23年洪水時に洗掘被害を受けた内岸高水敷については、平成16年洪水時にも被災を受けていた可能性があり、平成23年に被災を受けたこの付近についても複断面的蛇行流れと被災の関係を分析する。

2. 解析方法, 解析条件

図-3は本解析の対象領域を示している。検討区間は、五十嵐川の島潟水位観測所(7.7km)から、信濃川との合流点(0.0km)までとしている。平成16年7月洪水時の破堤点は3.3km左岸、平成23年7月洪水時に高水敷・低水護岸の被害箇所は1.1km右岸に位置している。解析の上流端境界条件は島潟で観測された水位ハイドログラフを与え、下流端は合流点で水位観測所がないことから、合流点より400m下流にある信濃川本川の荒町水位観測所の観測水位に対して河床勾配を考慮して与えた。解析は、非静水圧準三次元洪水流解析法(Q3D-FEBS⁶⁾)を用い、河床変動は非平衡流砂モデル⁷⁾を使用している。Q3D-FEBSの基礎式は式(1)~(5)で、水深積分した連続式(1)、水深積分した運動方程式(2)、水面、底面での運動方程式(3)と(4)、 x, y 方向流速の鉛直分布式(5)を流れの境界条件と河道条件について解くことで、流れの解析を行っている。

$$\frac{\partial \bar{h}}{\partial t} + \frac{\partial \bar{U}_i \bar{h}}{\partial x_j} = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial \bar{U}_i \bar{h}}{\partial t} + \frac{\partial \bar{U}_i \bar{U}_j \bar{h}}{\partial x_j} = -g \bar{h} \frac{\partial \bar{z}_s}{\partial x_i} - \frac{1}{\rho} \frac{\partial \bar{p}' \bar{h}}{\partial x_i} - \frac{\bar{p}'}{\rho} \frac{\partial \bar{z}_b}{\partial x_i} - \frac{\bar{\tau}_{bi}}{\rho} + \frac{1}{\rho} \frac{\partial \bar{h} \bar{T}_{ij}}{\partial x_j} \quad (2)$$



図-3 本解析の対象領域

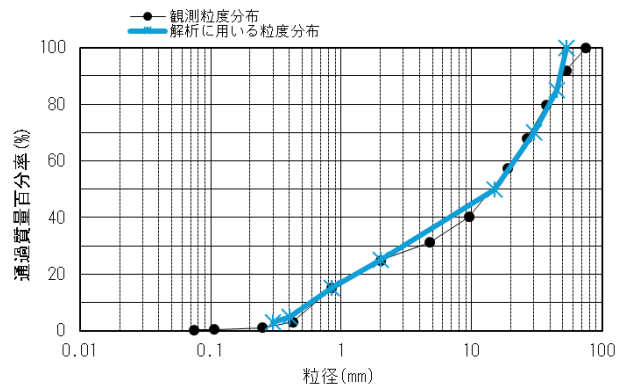


図-4 実測と解析に用いた粒度分布

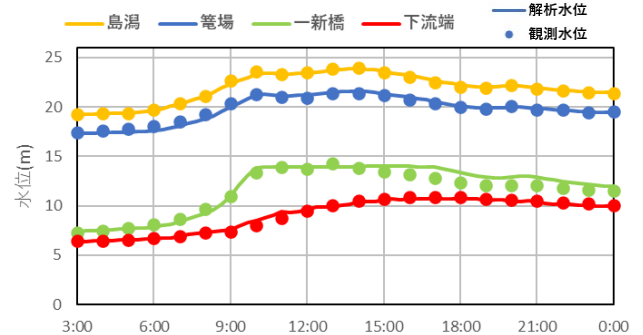


図-5 解析水位ハイドログラフと観測水位ハイドログラフ

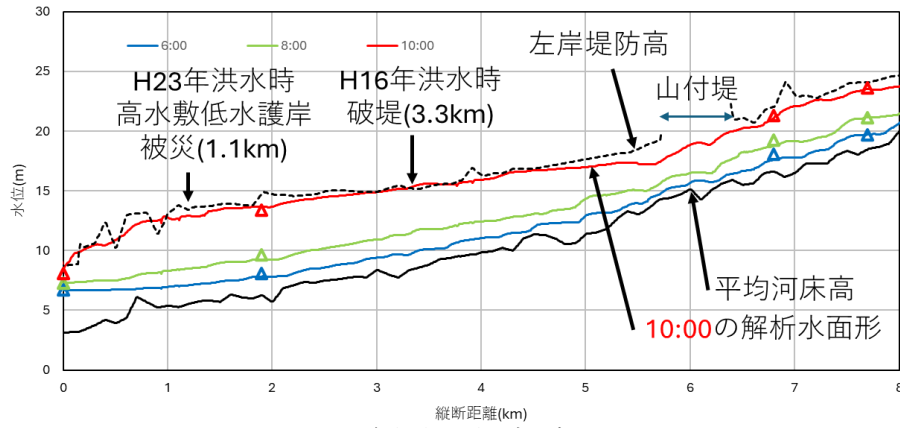
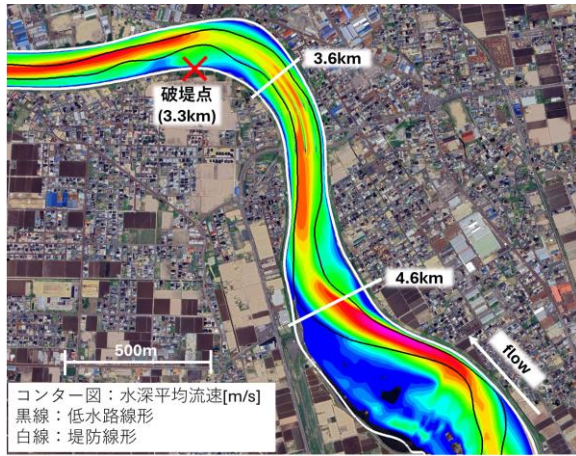
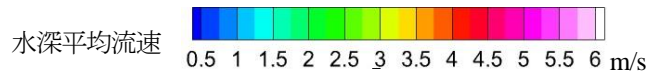
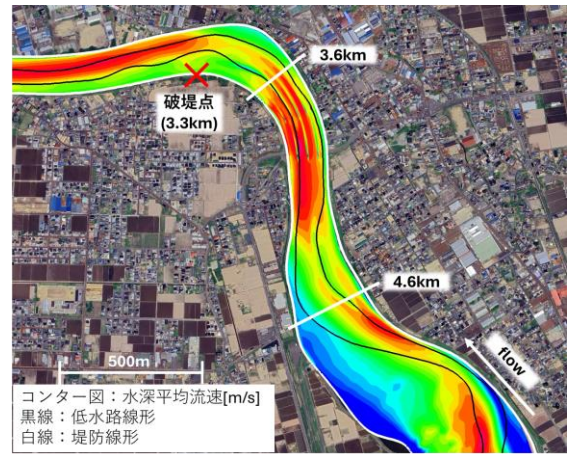


図-6 解析水面形の時間変化



(a) 7/13,9:00 (増水期)



(b) 7/13,11:00 (越水時)

図-7 破堤点周辺の堤防線形, 低水路線形, 水深平均流速分布

$$\frac{\partial \bar{u}_{si}}{\partial t} + \bar{u}_{si} \frac{\partial \bar{u}_{si}}{\partial x_j} = -g \frac{\partial \bar{z}_s}{\partial x_i} - \frac{1}{\rho h} \frac{\partial \bar{p}'}{\partial \eta} \bigg|_s \frac{\partial \bar{z}_s}{\partial x_i} + \frac{\bar{v}_{ts}}{\rho} \frac{\partial^2 \bar{u}_i}{\partial z^2} \bigg|_s \quad (3)$$

$$\frac{\partial \bar{u}_{bi}}{\partial t} + \bar{u}_{bi} \frac{\partial \bar{u}_{bi}}{\partial x_j} = -g \frac{\partial \bar{z}_s}{\partial x_i} - \frac{1}{\rho} \frac{\partial \bar{p}'_b}{\partial x_i} - \frac{1}{\rho h} \frac{\partial \bar{p}'}{\partial \eta} \bigg|_b \frac{\partial \bar{z}_b}{\partial x_i} + \frac{1}{\rho h} \frac{\partial \bar{\tau}_i}{\partial \eta} \bigg|_b \quad (4)$$

$$\bar{u}_i(\eta) = \Delta \bar{u}_i (12\eta^3 - 12\eta^2 + 1) - \delta \bar{u}_i (4\eta^3 - 3\eta^2) + \bar{U}_i \quad (5)$$

ここに、 $i, j: 1, 2$ (x, y 方向), t : 時間, h : 水深, g : 重力加速度, ρ : 水の密度, z_s : 水位, $\eta = (z_s - z)/h$, U_i : i 方向の水深平均流速, u_{si} : i 方向の水面流速, u_{bi} : i 方向の底面流速, $\Delta u_i = u_{si} - U_i$, $\delta u_i = u_{si} - u_{bi}$, p' : 圧力の非静水圧成分, p'_b : 底面圧力の非静水圧成分, ν_t : 渦動粘性係数, τ_i : i 方向のせん断応力, $T_{i,j}$: i 軸に垂直な面で j 方向に働く応力である。

破堤点の約500m上流や、高水敷洗掘場所の上流には橋脚が存在するため、1mの橋脚幅を2分割するサイズの格子を作成した。河床材料は図-4に示すように、平成12年に観測された粒度分布を基に与えた。洪水時には破

堤点对岸に40~50cmの高さの土嚢が積まれており、その部分の堤防高を高くして解析した。

3. 解析結果

(1) 観測水面形と解析水面形の比較と越流状況

図-5は各観測所における、観測水位と解析水位のハイドログラフを示す。図-6は観測水面形と解析水面形の時間変化を示す。解析は観測水面形の時間変化を解析水面形が満たすように行っている⁸⁾。図-5、図-6より、解析水面形は、観測水面形の時間変化をおおむね満たしていることから、解析結果は実際の流れ場と河床変動場を再現している。

平成16年7月洪水では13時に3.3km左岸で破堤が生じたと報告されている²⁾。本解析では10時から越流が開始しており、破堤が生じる13時まで約3時間越流が続いていたことが分かる。本解析では、越流水深は25cmほどであった。国土交通省は、平成27年以降の主な越水事例の約50%が越流時間3時間以内であり、越流時間が3時間以内かつ、越流水深が30cm以下の事例のうち50%が損

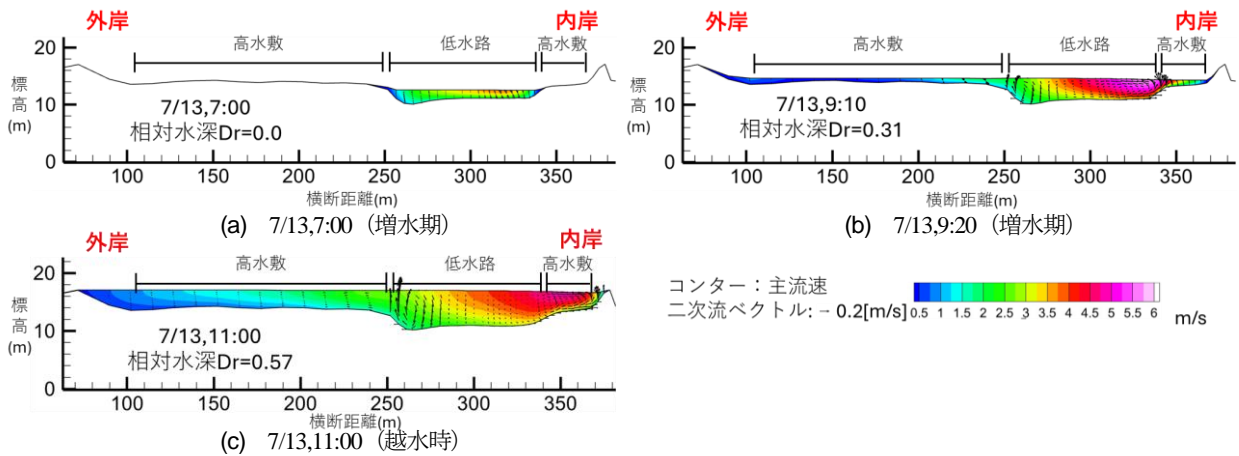


図-8 4.6km地点の主流速横断分布，二次流分布

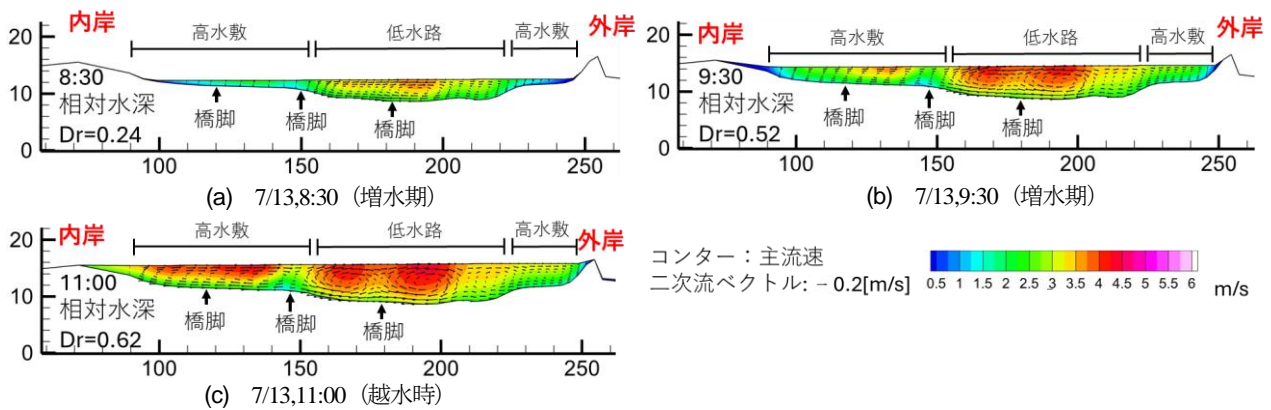


図-9 3.6km地点の主流速横断分布，二次流分布

傷，決壊していることから，越流に対する粘り強い河川堤防評価の目安は，「越流水深30cmに対して，越流時間3時間」としている⁹⁾。本解析における越流水深は25cmであり，国土交通省の目安より小さいが，越流時間は粘り強い河川堤防の目安となる3時間を超えており，このことは，土で作られた堤体が弱体化していた可能性を示している。これに加え，複断面的蛇行流れの発生により，内岸側の流速増大の影響が重なって破堤が生じた可能性も考えられ，以下で破堤点付近の流れ場を考察した。

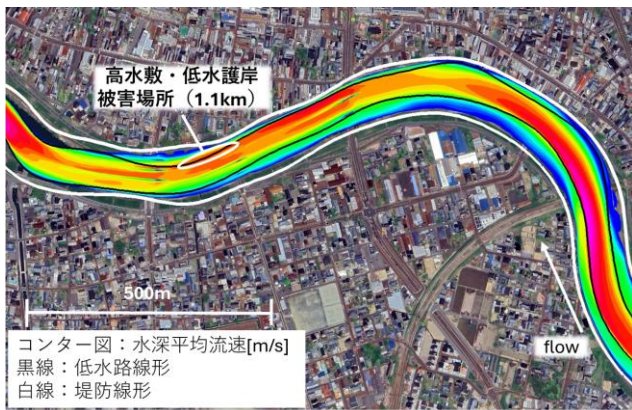
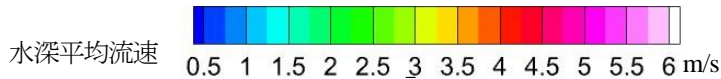
(2) 平成16年7月新潟・福島豪雨時における破堤点 (3.3km) 周辺の流れ場の解析結果

図-7(a)，(b)はそれぞれ増水期と越水時の堤防線形，低水路線形および水深平均流速の平面分布を示す。図-7より破堤点周辺は堤防線形と低水路線形に位相差が殆どなく，低水路と左右岸の堤防の蛇行度にもほとんど差が無いことから同心円的な線形をとっており，高水敷幅も小さい。また，破堤点の堤防高は周辺と比較し，若干低い場所であった²⁾。一方，上流の4.6kmの蛇行部では，堤防線形と低水路線形に位相差が $\varphi = \pi/5$ あり，低水路と左岸堤防の蛇行度が大きく違うことで，左岸側に

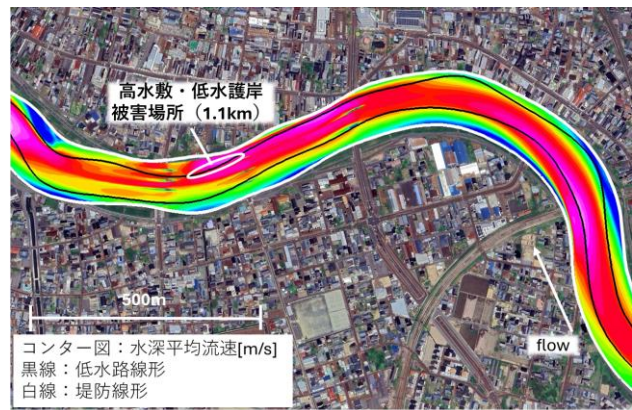
最大で約300mの高水敷幅を有している。

図-8，図-9は4.6kmと3.6km地点の増水期と越水時の主流速横断分布と主流に対して直行する流れである二次流の分布を示している。図-7，図-8より，4.6km地点は，水位上昇とともに，左岸高水敷から遅い流れが低水路内に流入し，流れが激しく混合することによって，内岸側に最大流速が移動する複断面的蛇行流れが生じている。そのため，最大流速の位置が内岸低水護岸付近から，内岸高水敷上へ移動している。図-7，図-9より，破堤点より約300m上流の3.6km地点では，4.6km地点の流れが流入することで，蛇行頂部まで複断面的蛇行流れのまま流下し，越水時の11時の時点で内岸側に最大流速が生じている。3.6km地点では内岸側に最大流速が複数個所で発生しているが，これは上流に橋脚の存在に起因するものであり，流速増大を助長している。

しかし，破堤点である3.3km地点は，図-7より増水期と越水時で最大流速が外岸側に発生し，通常の湾曲二次流が生じており，洪水流下全時間にわたって，単断面的蛇行流れとなっている。破堤点付近において複断面的蛇行流れに遷移しなかった理由は，前述のとおり，堤防線形と低水路線形の位相差が極めて小さく，低水路流れと高水敷流れが同心円的であり，また高水敷幅が狭いこ



(a) 7/13,9:00 (増水期)



(b) 7/13,11:00 (越水時)

図-10 1.1km周辺の堤防線形，低水路線形，水深平均流速分布

とで，高水敷から遅い流れが十分に流入せず，流れの混合効果が小さかったことにある。

(3) 平成23年7月新潟福島豪雨時に内岸洗掘被害を受けた地点 (1.1km) は平成16年の洪水時にどのような状況であったのか

五十嵐川1.1km付近の内岸高水敷・低水護岸が平成23年7月新潟・福島豪雨時に洗掘被害を受けた。平成16年7月洪水において1.1km付近の被災等の当時の状況を示す資料は見当たらないが，同様の被害が生じていた可能性がある。

図-10は1.1kmにおける低水路線形，堤防線形および水深平均流速の平面分布を示す。図-11は1.1kmにおける二次流分布と主流速の横断分布を示している。図-10，図-11より，1.1km地点周辺は3.3kmと比べ，堤防線形と低水路線形に位相差がある。1.1km地点では増水期の9時の段階で最大流速が内岸側に発生しているが，11時の越水時では最大流速の位置がさらに内岸側に寄っている。この段階では，二次流の逆転現象は見られていないが，水位が上昇するにつれて内岸側に最大流速が寄り，複断面的蛇行流れに近い現象が発生しており，さらに水位が上昇すれば，二次流が逆転した完全な複断面的蛇行流れになると考えられる。また，この断面では3.6km地点と同様に最大流速が複数箇所が発生している。上流の橋脚が影響しており，流速増大を助長しているものと考えられる。

図-12は平成23年7月新潟・福島豪雨時の高水敷・低水護岸の被災状況を示しており，図-13は河床変動量のコンター図を示している。平成23年7月新潟・福島豪雨時には図-12のように内岸側の低水護岸がめくりあがり，高水敷が洗掘され，みず道ができていた。解析結果より，流れは常に洪水中に内岸側に最大流速が寄っており，ピーク時には水深平均流速が約5m/sと速い流速が発生し

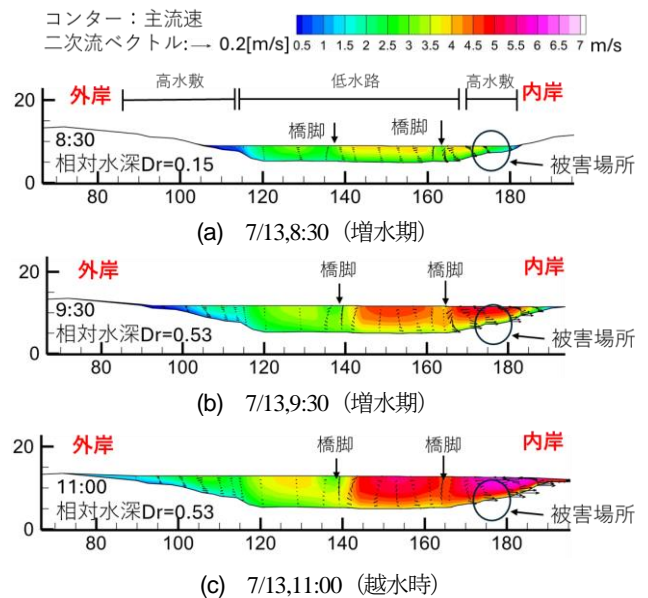


図-11 1.1km地点の主流速横断分布，二次流分布

ていた。河床変動の解析結果を示す図-13では1.1km内岸高水敷で洗掘が生じており，最大で1m以上洗掘を受けている。つまり，平成23年洪水時のような大規模な洗掘被害が平成16年洪水時にも発生していた可能性が高い。

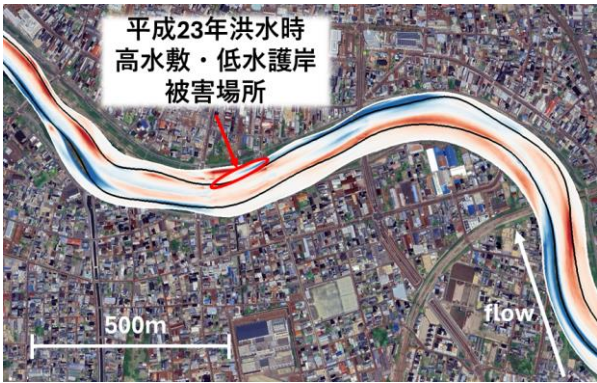
4. まとめ

本研究では，平成16年7月新潟・福島豪雨において，破堤した五十嵐川3.3km周辺と，平成23年7月新潟・福島豪雨時に洗掘被害を受けた1.1km周辺の洪水流と河床変動解析を行い，河道被災原因を分析した。以下に，主な得られた結論を示す。

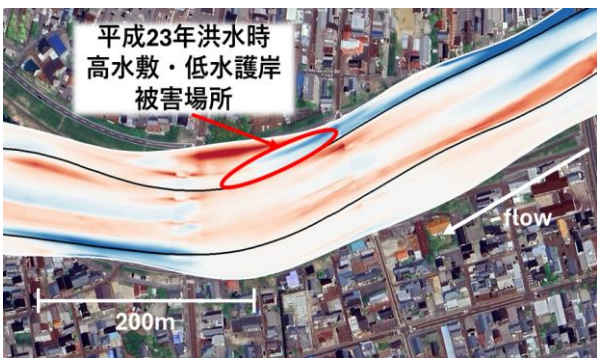
4.6km地点の蛇行部にて複断面的蛇行流れが生じ，その流れが3.6km地点に流入したことで破堤点直上流の蛇行頂部まで最大流速が内岸側に現れていた。しかし，



図-12 平成23年7月新潟・福島豪雨時の内岸高水敷・低水護岸洗掘被害状況¹⁰⁾



(a) 1.1km全体図



(b) 1.1km拡大図

図-13 1.1km地点における河床変動コンター図

3.3km地点ではその影響はなくなっており、単断面的蛇行流れのまま流下している。このため発生した破堤と複断面的蛇行流れとの関係は弱いものと考えられる。破堤の原因に関しては、堤防高が周辺と比較して低かったために²⁾その地点から越流したことに加え、堤防からの越流時間が3時間以上であり、堤体の弱体化も影響したと

考えられる。3.3km地点が複断面的蛇行流れに遷移しなかった理由として、堤防線形と低水路線形が同位相であり、球磨川の被災地点と比較して、高水敷幅が狭いため、高水敷から遅い流れがほとんど流入せず、流れの混合現象が弱かったためである。

一方、1.1km地点では、複断面的蛇行流れが生じ、水位上昇とともに最大流速の発生位置が内岸側に寄ったことで、高水敷が洗掘された。平成16年洪水時も平成23年洪水時のような洗掘被害を受けていた可能性があることが分かった。

五十嵐川全体を見れば堤防線形と低水路線形の間に位相差があり、且つ広い高水敷を有する場所が多数存在している。そのような区間では複断面的蛇行流れが生じており、内岸側の流速増大による破堤の危険性が高かったと思われる。このような特性を持つ五十嵐川では、河幅も大きくないことから、複断面的蛇行流れの発生の有無、堤防高や高水敷の縦断的な配置、橋脚や樹木群の影響等について十分考慮した河道計画、管理が必要である。

参考文献

- 1) 7.13新潟豪雨洪水災害調査委員会：第1回委員会配布資料，新潟県，2004.
- 2) 7.13新潟豪雨洪水災害調査委員会：報告書，新潟県，2005.
- 3) 福岡捷二：洪水の水理と河道の設計法，森北出版，2004.
- 4) 岡田将治，福岡捷二：複断面河道における洪水流特性と流砂量・河床変動の研究，土木学会論文集，No754，pp19-31，2004.
- 5) 後藤岳久，長谷部夏希，向田清峻，福岡捷二：蛇行する低水路を有する複断面河道における洪水流の流下機構と河道内被災の分析と対策—令和2年7月球磨川洪水を例として—，河川技術論文集，第29巻，pp341-346，2023.
- 6) 竹村吉晴，福岡捷二：波状跳水，完全跳水及びその減勢区間における境界面（水面・底面）上の流れの方程式を用いた非静水圧準三次元解析（Q3D-FEBS），土木学会論文集B1(水工学)，Vol75，No1，pp61-80，2019.
- 7) 長田健吾，福岡捷二：積礫河川の河床変動気候と表層積礫の凹凸分布に着目した二次元河床変動解析法，土木学会論文集B1(水工学)，Vol68，No1，1-20，2012
- 8) 福岡捷二：洪水流の水面形観測の意義と水面形に基づく河川の維持管理技術，河川技術論文集，第12巻，pp1-6，2006.
- 9) 国土交通省 国土技術政策総合研究所 河川研究部 河川研究室：粘り強い河川堤防の構造検討に係る技術資料，国土交通省，2022.
- 10) 平成23年7月新潟・福島豪雨対策委検討委員会：第2回平成23年7月新潟・福島豪雨対策検討委員会資料，新潟県，2011.

(2024. 4. 3受付)