

平成23年7月新潟・福島豪雨における五十嵐川 の堤防・河道被害機構

-平成16年7月新潟・福島豪雨と比較して-

THE IKARASHI RIVER LEVEE AND CHANNEL DAMAGE MECHANISM IN
THE HEAVY RAINFALL IN NIIGATA AND FUKUSHIMA IN JULY 2011
-COMPARED WITH THE HEAVY RAINFALL IN NIIGATA AND FUKUSHIMA
IN JULY 2004-

佐藤海輝¹・後藤岳久²・岡田一平³・福岡捷二⁴
Kaiki SATO, Takahisa GOTOH, 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 主査 (〒950-8570 新潟県新潟市中央区新光町4-1)

⁴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)

五十嵐川は平成16年と平成23年に大規模な洪水が発生し、内岸堤防の破堤・内岸高水敷の洗掘・堤防侵食等の河道被害が生じた。従来は河道の内岸側の被害はあまり着目されていなかったが、複断面的蛇行流れの発生により内岸流速が増大することが明らかになっている¹⁾。これにより、水位が上昇した洪水ピーク時には蛇行部内岸側のエネルギーが高まることが考えられる。大洪水が起きやすく、洪水被害が多い五十嵐川において、被害機構を明らかにすることは、今後の河川整備の観点から極めて重要である。

本論文では平成23年7月新潟・福島豪雨を対象に準三次元洪水流・河床変動解析を行い、平成16年洪水時と流れ場・河床変動場を比較することで河川改修の効果を踏まえて被害機構を明らかにする。また、解析で得られた流速や圧力から全エネルギー水頭を算出し、その場所の持つ全エネルギー水頭と被害の規模の関係性について検討する。

Key Words: *excess flood, energy distribution, erosion on the flood-channel bed, erosion on the levee, compound meandering channel flow*

1. 序論

五十嵐川は信濃川の一次支川であり、平成16年と平成23年に大規模な洪水が発生した。平成16年7月新潟・福島豪雨では五十嵐川3.3km~3.4kmで内岸堤防が破堤し、甚大な被害をもたらした。平成16年洪水の被害を受けて、築堤や堤防高の引き上げ等の河川改修が実施された。その後、平成23年7月新潟・福島豪雨が発生した。平成23年洪水は平成16年洪水より洪水規模が大きいものの、破堤は生じなかった。しかし、図-1に示すように、本洪水では高水敷洗掘被害や堤防侵食被害などの河道被害が多地点で発生している。大規模な洪水が発生しやすく、河

道被害が多い五十嵐川において、過去の洪水被害の機構を明らかにすることは、今後の河川管理、特に中小河川の管理を行う上で極めて重要である。

平成16年7月新潟・福島豪雨における破堤の原因について、著者ら²⁾は破堤箇所の堤防高が縦断的に低くなっており、その結果、越流が生じ、越流時間が長時間であったため、破堤が生じたことを示した。

本研究では平成23年7月新潟・福島豪雨を対象に洪水流・河床変動解析を行い、洪水時の流速分布や全エネルギー水頭³⁾の平面分布などを算出する。得られた解析結果と平成16年7月新潟・福島豪雨時の解析結果と比較し、河川改修の効果を踏まえ、大洪水による河道の被害機構を明らかにすることと、全エネルギー水頭と河道被災の



(a)内岸高水敷・低水護岸洗掘(1.1km内岸)



(b)外岸堤防表法面侵食(3.4km外岸)

図-1 平成23年7月新潟・福島豪雨時の河道被害の様子²⁾一部加筆

関係について考察することを目的としている。

2. 解析手法・解析条件

図-2は解析区間を示す。解析上流端は竈場水位観測所(6.8km)から信濃川との合流点(0.0km)までである。流れの解析は非静水圧準三次元洪水解析法(Q3D-FEBS法⁵⁾)を用い、河床変動解析は非平衡流砂モデル^{6,7)}を用いた。

解析の上流端には竈場水位観測所の観測水位ハイドログラフを与え、下流端の合流点では水位観測が行われていないため、信濃川本川の蒲原大堰と荒町で観測された水位ハイドログラフを線形補完して与えた。河床材料の粒度分布は平成23年洪水直後に計測された粒度分布を与えた。

平成16年洪水の解析においては、土嚢が積まれた場所はその高さに応じて堤防高を高く設定し、堤防が存在せず溢水が生じていた区間を考慮するため浸水域まで解析メッシュを作成し、解析している。河床材料の粒度分布は平成16年洪水前に計測された粒度分布を与えた³⁾。

3. 平成23年7月洪水における被害機構の分析

(1) 解析水面形と観測水面形の比較

図-3は各観測所における平成23年7月洪水時の解析・観測水位ハイドログラフを示す。図-4は平成23年7月洪水時の解析・観測水面形の時間変化と洪水ピーク時における全エネルギー水頭の縦断図を示す。図-3,4より、解析水面形の時間変化が観測水面形の時間変化をおおむね満たしており、解析は洪水を十分再現している。

図-3より、平成23年洪水は二山の波形を有しており、それぞれのピーク時には3.4km外岸で越流が生じている。

ここで、図-4の黄色の実線で示す全エネルギー水頭は、式(2)で定義され、式(1)で評価される局所的なエネルギー水頭 H を底面から水面まで水深積分した値である⁴⁾。



図-2 対象領域

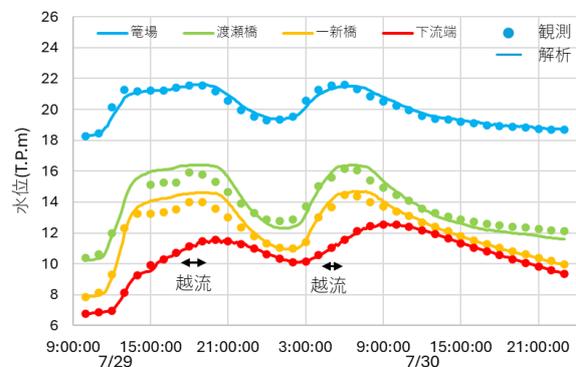


図-3 平成23年洪水時の観測・解析水位ハイドログラフ

$$H(x, y, z, t) = \frac{u^2(x, y, z, t) + v^2(x, y, z, t) + w^2(x, y, z, t)}{2g} + \frac{p(x, y, z, t)}{\rho g} + z \quad (1)$$

$$H_{all} = \frac{1}{h(x, y, t)} \int_{z_b}^{z_s} H(x, y, z, t) dz \quad (2)$$

ここに、 H : 局所的なエネルギー水頭、 H_{all} : 全エネルギー水頭、 u, v, w : それぞれ x, y, z 方向の局所的な流速、 p : 圧力、 ρ : 水の密度、 h : 水深、 g : 重力加速度、 z : 基準からの高さ、 z_s : 水位、 z_b : 河床高である。

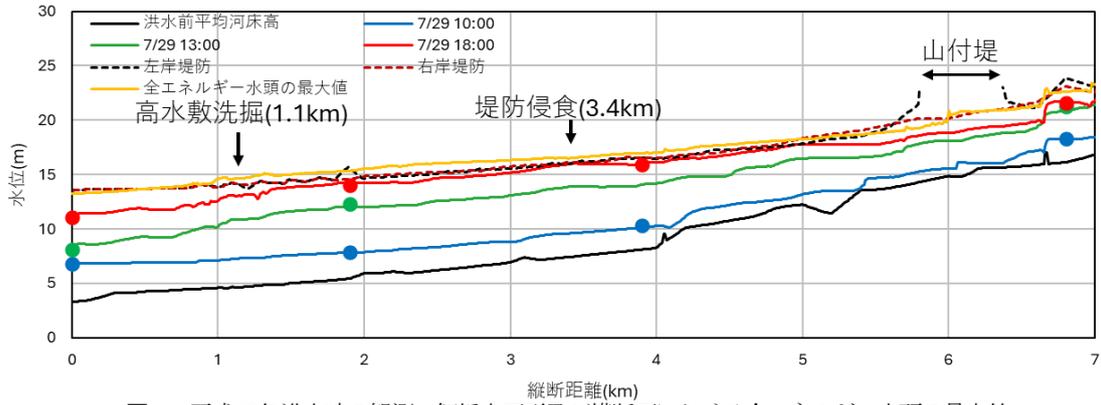


図-4 平成23年洪水時の観測・解析水面形及び横断面における全エネルギー水頭の最大値

水深平均流速 0.5 1 1.5 2 2.5 3 3.5 4 4.5 5 5.5 6 m/s

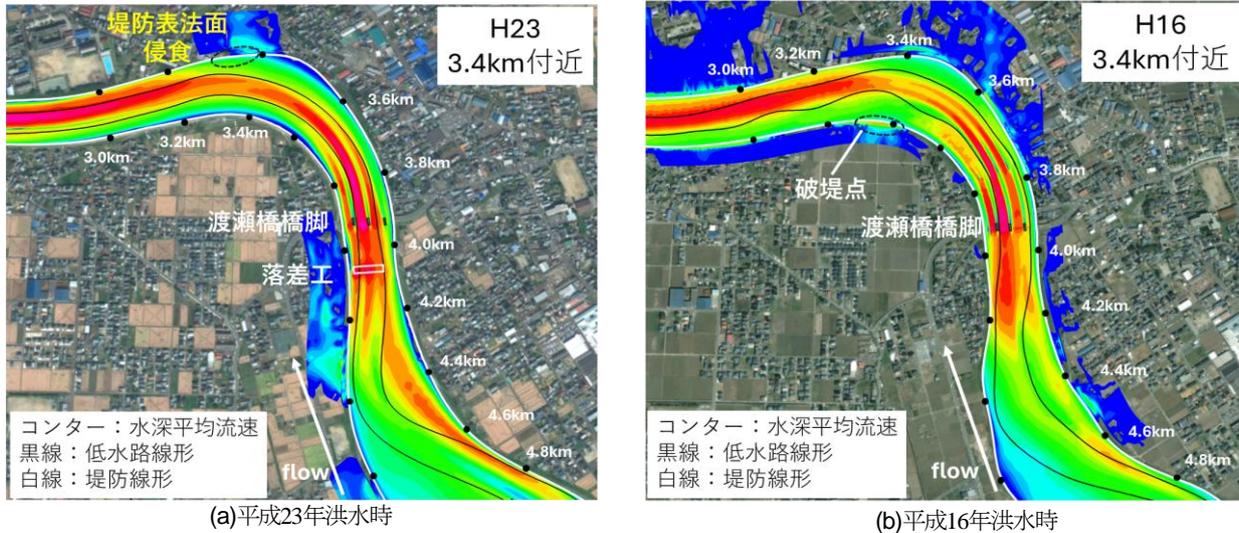


図-5 3.4km周辺における洪水ピーク時の水深平均流速の平面分布

(2) 堤防表法面侵食被害が発生した蛇行部(3.4km)における流れ場、河床変動場

平成16年洪水では3.3km内岸で破堤が生じた。その後の河川改修により、平成23年洪水時の3.4km周辺の蛇行部は、左右岸の堤防高が引き上げられ、4.0km付近には落差工が設置された。河川改修によって流下能力が向上したため、平成16年洪水時に越流破堤した蛇行部内岸側では、平成23年洪水時には越流が生じず、平成16年洪水時と比較して外岸側の越流箇所が減少した。しかし、図-1(b)に示すように3.4km外岸では堤防天端付近の表法面侵食被害が生じた。以下では、この被災機構について考察する。

図-5は平成23年および16年洪水時の3.4km周辺における水深平均流速の平面分布を示し、図-6は平成23年洪水ピーク時の全エネルギー水頭の平面分布を示し、図-7は平成23年洪水前後の河床変動コンターを示す。図-5(a)より、3.4km右岸は蛇行部外岸であり水衝部である。洪水時には遠心力の影響で外岸側の水位が上昇し、越流が生じた。越流時間は、洪水第1ピークで110分、第2ピークで60分であり、合計で約3時間であった。図-6より侵食が生じた3.4kmの外岸に向かって全エネルギー水頭が高

くなっている。図-7より、堤防侵食被害が生じた3.4km周辺では、蛇行部外岸における低水路や高水敷、堤防際が洗掘されている。このように、3.4km右岸は水衝部であるため、右岸側に流れが集中しており、そこに越流が生じたことによって、さらに流れが集中ようになった。これにより、右岸側の全エネルギー水頭が高まり、これが長時間続いたため、堤防天端付近の表法面侵食被害が発生したものと考えられる。

次に平成23年洪水と16年洪水の流れ場を比較することで、河川改修の影響について考察する。図-5(a),(b)より、平成16年と平成23年洪水時ともに、4.4km~4.6kmの蛇行部において複断面的蛇行流れが生じ、主流が内岸側に寄っている。その影響により、平成16年洪水時では4.0km~4.2kmで最大流速が左岸側に寄り、その下流で内岸流速が増大している。しかし、平成23年洪水時には落差工が設置されていたことにより、4.0km~4.2kmの最大流速の発生位置が左岸から河道中央へ変化したことで、下流の内岸流速が低減され、3.4km内岸の全エネルギー水頭も低くなっている。河川改修により堤防高が高くなり、越流が生じなかったことに加えて、落差工設置により内岸側の流速・全エネルギー水頭が低減されたことで、

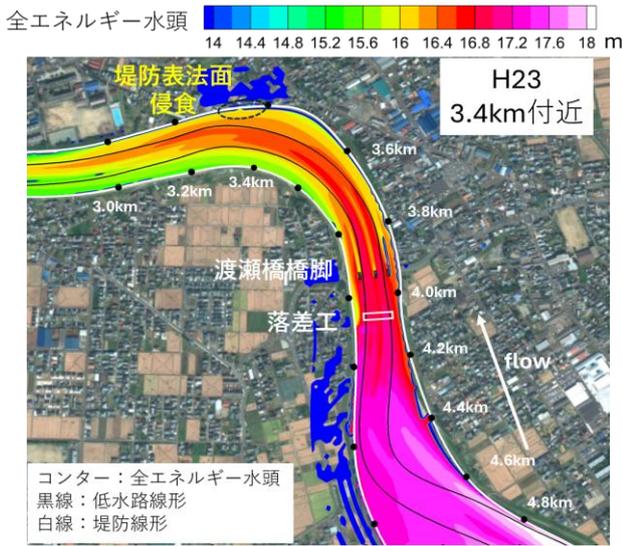


図-6 3.4km周辺における平成23年洪水ピーク時の全エネルギー水頭の平面分布

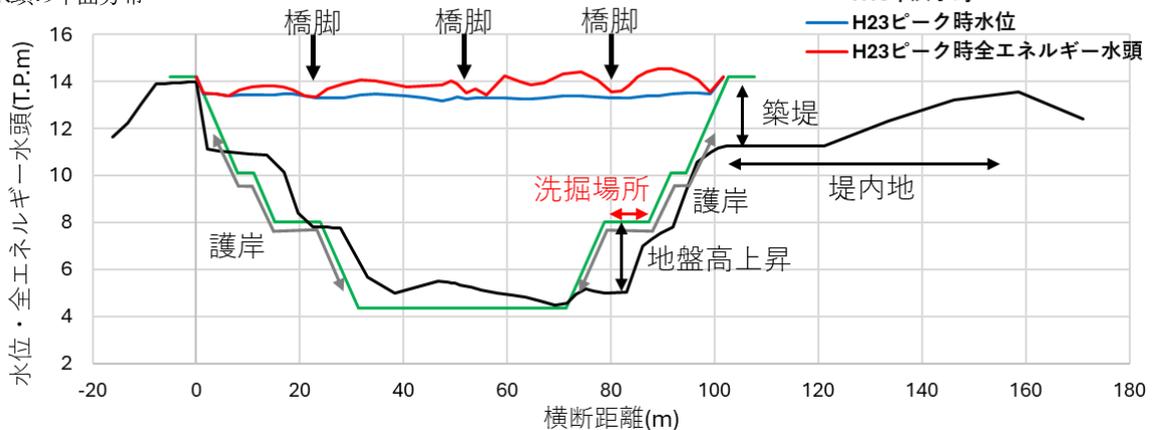


図-8 1.1km断面における河川改修前後の横断面，平成23年洪水ピーク時水位・全エネルギー水頭

平成23年洪水時は3.4km内岸側では河道被害が生じなかったものと考えられる。

(3) 内岸高水敷・低水護岸洗掘被害が生じた蛇行部 (1.1km)における流れ場，河床変動場の検討

平成23年洪水時の1.1km内岸では図-1(a)に示すように、内岸高水敷・低水護岸が洗掘被害を受けた。図-8は1.1km断面における河川改修前後の横断面図と平成23年洪水時のピーク時水位，ピーク時における全エネルギー水頭を示す。図-8より，平成16年洪水時の1.1km右岸は堤防が存在しなかったため溢水氾濫が生じ，堤内地で浸水深0m~1.5mの被害を受けた。その後の河川改修により，築堤や高水敷の造成，護岸の設置が実施された。平成23年洪水時は越流が生じなかったものの，平成16年洪水時と比較して高い水位と洪水エネルギーで洪水流が河道内を流下するようになった。以下では被災機構を分析する。

図-9は平成23年洪水時における1.1km周辺の水深平均流速の平面分布を示し，図-10は河床変動コンター図を示す。図-9より1.1km周辺は複断面的蛇行流れの影響により，増水期の早い時間から内岸側に主流速が寄り，高水敷・低水護岸が被災した場所で高流速が生じ，洪水

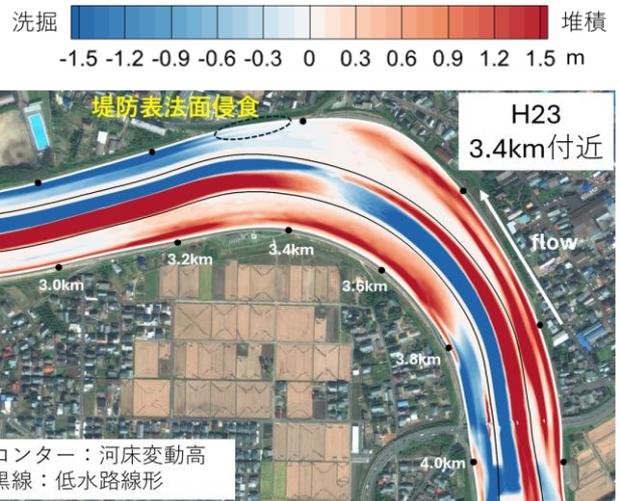


図-7 3.4km周辺における洪水前後の河床変動コンター

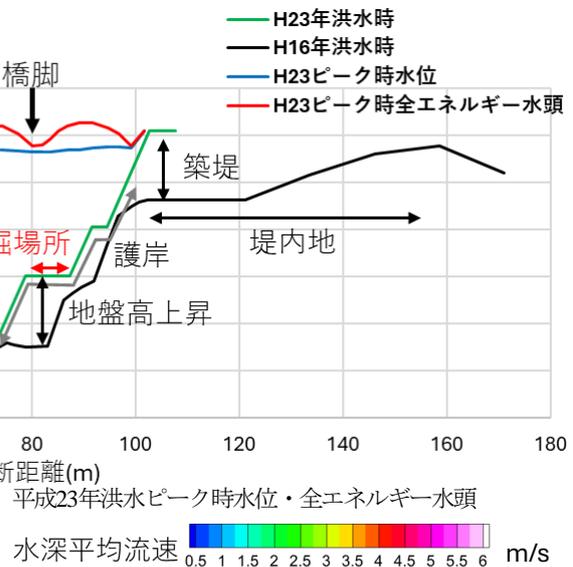


図-9 1.1km周辺におけるピーク時の水深平均流速の平面分布

ピーク時では約5m/sの流速が内岸高水敷上で生じており，図-10より，高水敷・低水護岸洗掘被害が生じた内岸高水敷上では洗掘(図-1(a))が生じている。

図-11(a)は1.1km周辺における平成23年洪水ピーク時の全エネルギー水頭の平面分布を示す。図-8，図-11(a)より，平成23年洪水時は複断面的蛇行流れにより内岸側

に高流速が発生していることで、全エネルギー水頭は内岸側が高く、その最大値は堤防高を約30cm上回っている。高水敷洗掘被害場所に高流速が流れ、全エネルギー水頭の高い状態が長時間続いたことで、高水敷・低水護岸が洗掘被害を受けたものと考えられる。

次に平成16年洪水時と平成23年洪水時の全エネルギー水頭の平面分布を比較し、河川改修の効果を検討する。図-11(b)は1.1km周辺における改修前の平成16年洪水ピーク時における全エネルギー水頭の平面分布を示す。図-11(a),(b)より、改修前の平成16年洪水時から内岸の被災場所における全エネルギー水頭は高い状況であった。平成23年洪水時には、さらに全エネルギー水頭が高まったことによって内岸高水敷で洗掘被災が生じたものと考えられる。五十嵐川下流区間は河道幅が狭いこともあって高水敷洗掘のみならず、堤防侵食・破堤の危険性も高かったものと考えられる。

4. 全エネルギー水頭と洪水被災の関係性の考察

気候変動により、洪水外力が増大している近年では、計画高水位を超え、堤防天端高さを超える洪水が頻繁に起こっている。計画高水位を超える洪水では流速が増大することにより、エネルギー水頭面が非常に大きくなり、洪水流の持つ破壊ポテンシャルが大きくなる⁴⁸⁾。福岡は⁴⁸⁾、超過洪水はエネルギー勾配で流れ、大きな破壊ポテンシャルを有していることから、エネルギーの観点から堤防被災を検討することと、三次元エネルギー分布を考慮した河道と堤防の一体設計法の必要性を論じている。本論文では堤防高を基準とし、全エネルギー水頭の堤防高から超過した高さに着目し、これと縦断的な被災長さとの関係について分析を行う。

五十嵐川は平成16年と平成23年洪水時に多くの地点で河道被害が生じ、その規模は大小さまざまであった。図-12は、委員会資料や著者らが航空写真をもとに特定した被災場所における被災の縦断長さ、被災のポテンシャルと考えられる全エネルギー水頭の横断最大値の関係を示す。表-1はその被災内容と被災場所を示す。表-1より、高水敷洗掘や堤防侵食被害を受けた場所の多くが蛇行部内岸・外岸に位置している。図-4、図-12より、五十嵐川の多くの区間で全エネルギー水頭が堤防高を超えており、被災が起こった場所のほとんどが、全エネルギー水頭の横断最大値が堤防天端高より高い。蛇行部で主流の発生位置が内岸もしくは外岸側で生じるため、主流の位置が高水敷・堤防に近づく。このため堤防際の全エネルギー水頭が増大し、蛇行部での高水敷洗掘や堤防侵食被害が多かったものと考えられる。

被災長と全エネルギー水頭の関係は、被災の縦断長さ

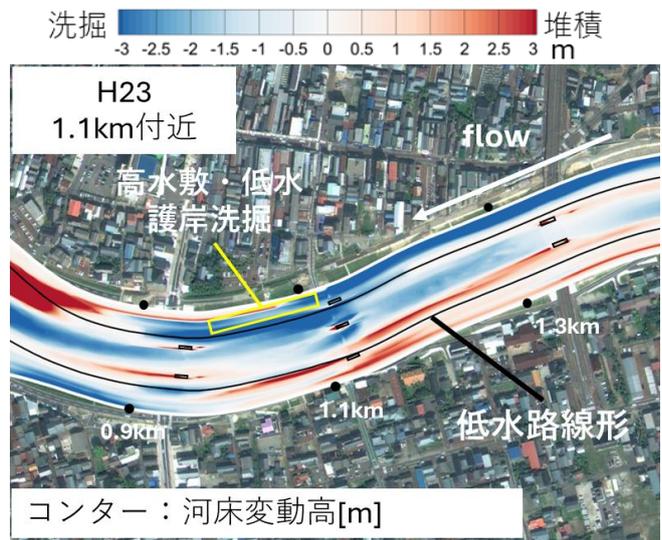
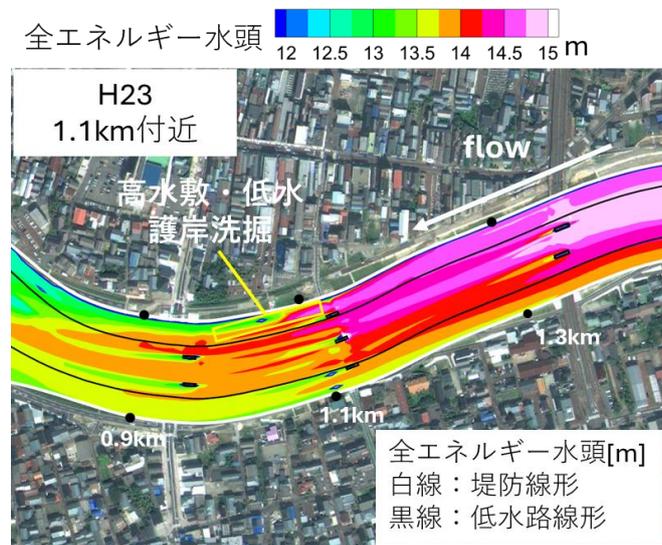
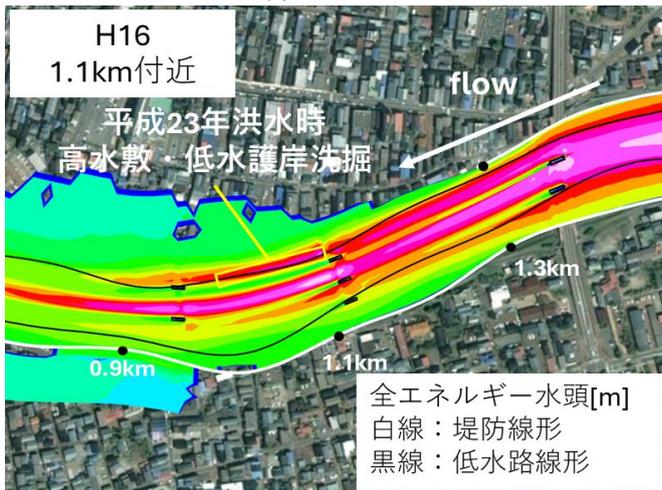


図-10 1.1km周辺における洪水前後の河床変動コンター図



(a)平成23年洪水時



(b)平成16年洪水時

図-11 1.1km周辺における全エネルギー水頭の平面分布

が大きくなるほど全エネルギー水頭の最大値が大きくなる傾向がみられる。図-12における⑧は外岸高水敷や低水河岸が洗掘されたことに加え、高水護岸上の覆土が流出した。堤防護岸により、堤防侵食や破堤の被害は免れ

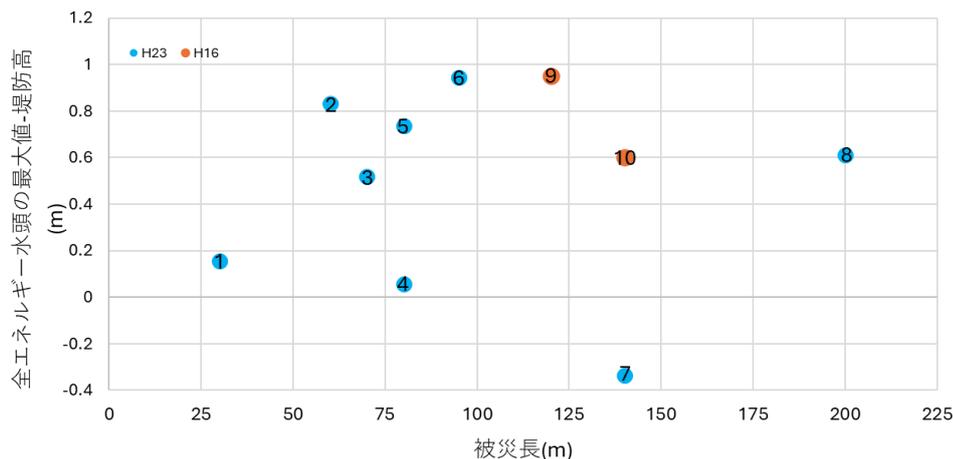


図-12 平成16年・23年洪水時における被災長と全エネルギーの堤防高からの超過高さの関係

たが、その分被災延長が200mと増大したと考えられる。

超過洪水が多く発生する近年では全エネルギー水頭と堤防高の大小関係に着目し、堤防の危険箇所を推定することは非常に重要であり、高水敷の配置、高水敷幅や護岸の設置の検討など河川計画・管理を行う上で重要な指標になると考えられる。

5. 結論と課題

本研究では平成23年7月新潟・福島豪雨において、洪水流・河床変動解析を行い、高水敷洗掘被害や堤防侵食被害の機構について平成16年洪水の被害と比較して検討を行った。以下に得られた結論を示す。

3.4km地点の蛇行部外岸側は、水衝部で流れが集中し、全エネルギー水頭が高まったことに加え、越流が生じたことにより、3.4km外岸の堤防天端付近で侵食被害が生じた。河川改修により、平成23年洪水時は落差工が設置されたため、最大流速の位置が左岸から河道中央へ変化し、下流の内岸側の流速と全エネルギー水頭が低減された。堤防高の引き上げと河川改修により、蛇行部内岸の全エネルギー水頭が低減したため平成16年洪水時に破堤が生じた3.3km内岸では河道被害が生じなかった。

1.1km内岸では全エネルギー水頭が上昇し、その横断最大値は堤防天端高を超えていた。また、1.1km右岸高水敷を造成したため、平成16年洪水時より地盤が高くなった。被災が生じた場所は平成16年洪水時から全エネルギー水頭が高く、平成23年洪水時はさらに全エネルギー水頭が高まったため、高水敷・低水護岸洗掘被害が生じたものと考えられ、堤防侵食や破堤の危険性も高かったものと考えられる。

平成16年と23年洪水時に河道被災が起こった場所は全エネルギー水頭が堤防高を超えている場所が多く、被災長が大きいほど全エネルギー水頭の堤防高からの超過高さが大きい傾向がみられる。超過洪水が発生する近年の河川管理では、全エネルギー水頭と堤防高の関係性につ

いて検討することが重要である。

しかし、現在は五十嵐川のみ被災と全エネルギー水頭の関係性の検討であるため、今後、他の河川についても縦断的な被災長と全エネルギー水頭の関係性を検討し、その際、被災が生じていない区間についても比較分析や、河床変動によるエネルギーの変化を検討することが今後の課題である。

表-1 被災場所と被災内容

番号	被災内容	場所
①	高水敷洗掘	蛇行部外岸
②	高水敷洗掘	蛇行部内岸 (1.1km)
③	堤防侵食	蛇行部外岸 (3.4km)
④	高水敷洗掘	蛇行部外岸
⑤	高水敷洗掘	蛇行部外岸
⑥	堤防侵食	蛇行部内岸
⑦	高水敷洗掘	河道直線部
⑧	高水敷洗掘 堤防覆土流出	蛇行部外岸
⑨	破堤	蛇行部内岸
⑩	高水敷洗掘	河道直線部

参考文献

- 1) 福岡捷二：洪水の水利と河道の設計法，森北出版，2004.
- 2) 平成23年7月新潟・福島豪雨対策検討委員会：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.
- 3) 佐藤海輝，後藤岳久，酒井公生，岡田一平，福岡捷二：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，河川技術論文集，第30巻，pp95-100,2024.
- 4) 福岡捷二，加藤宏季：超過洪水流の時空間三次元エネルギー分布に基づく河道計画・設計法，河川技術論文集，第30巻，pp411-416,2024.
- 5) 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.
- 6) 長田健吾，福岡捷二：石礫河川の河床変動機構と表層石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.
- 7) 後藤岳久，後藤勝洋，加藤宏季，福岡捷二：大規模洪水時における砂州の発達に伴う洪水流の三次元エネルギー分布の変化に基づく河川構造物の被災機構，第12回河川堤防技術シンポジウム論文集，pp33-36
- 8) 福岡捷二：超過洪水時の三次元エネルギー分布に基づく河道・堤防の一体設計の考え方，河川技術論文集，第29巻，pp209-214,2023.

(2025. 4. 3受付)