

# 大規模洪水流の持つ三次元エネルギー分布と河道侵食・破堤の関係

## Study on the relationship between the three-dimensional energy distribution of excess floods and river channel damage

24N3100019G 佐藤 海輝 (河川工学研究室)  
Kaiki SATO / River Engineering Lab.

**Key Words :** excess flood, three-dimensional energy distribution, levee breach

### 1. 初めに

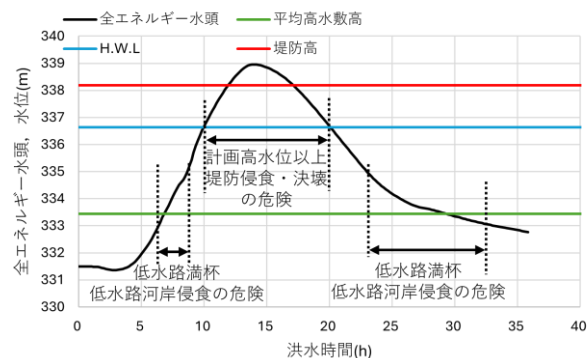
超過洪水において河道被災の規模や場所は水位や河道状況によって変化し、被災危険場所は低水路河岸、高水敷、堤防へと移り変わり、被災拡大につながるが多い。高水敷に少し水が乗った低水路満杯時は、高水敷に流れる流量に対して低水路に流れる流量が極めて多いため、低水路の蛇行線形や砂州の位置が低水路被災場所や規模と関係し、低水路河岸侵食の危険性が高い。水位がさらに上昇すると河岸侵食を受けた場所は高水敷洗掘へと発展する可能性がある。水位が計画高水位を超えるようになると、堤体浸透や侵食、越水が生じる可能性が高くなり、堤防決壊の危険性が高まる。

図-1は大河川千曲川（流域面積 $7163\text{km}^2$ ）と中小河川五十嵐川（流域面積 $337.3\text{km}^2$ ）における全エネルギー水頭のハイドログラフを示す。図-1より、千曲川と五十嵐川では、河川のスケールの違いにより洪水の立ち上がりの特性が異なり、増水期の低水路満杯時（高水敷水深 $1.5\text{m}$ まで）の継続時間に大きな差がある。河道の水位上昇に伴う低水路河岸、高水敷、堤防における一連の被災について、低水路線形や砂州の配置など河道特性と平水時からピーク時に至るまでの時間などの河道スケールが関係すると考えられ、現地被災データに照らして数値解析を用いて被災原因を定量的に検討することが重要となる。

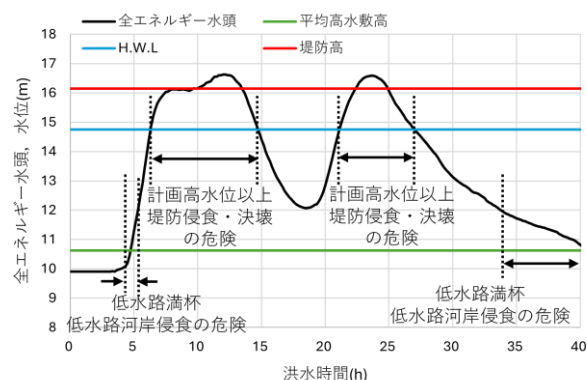
本研究では、河川のスケールが異なる2つの河川を対象に非静水圧準三次元洪水流・河床変動解析<sup>1)</sup>を行う。1つ目は令和元年東日本台風における千曲川、2つ目は平成23年7月新潟・福島豪雨における五十嵐川である。全エネルギー水頭の平面分布を求め、その絶対値や勾配から被災の原因を検討する。また、堤防浸透と侵食の評価には、堤防脆弱性指標と無次元流量に対する無次元河幅・水深<sup>2)</sup>の関係から検討し、さらに河川のスケールの違いが河道の一連の被災に与える影響を考察する。

### 2. 令和元年東日本台風における千曲川の被災

初めに、大河川である千曲川 $57.8\text{km}$ 左岸で発生した低水路河岸侵食と、 $57.4\text{km}$ 左岸で発生した堤防決壊（図-2）



(a) 千曲川



(b) 五十嵐川

図-1 全エネルギー水頭ハイドログラフ



図-2 千曲川堤防決壊<sup>3)</sup>

に関して検討する。

#### (1) 低水路河岸侵食被災の検討

図-3は低水路河岸侵食場所と堤防決壊地点周辺におけ

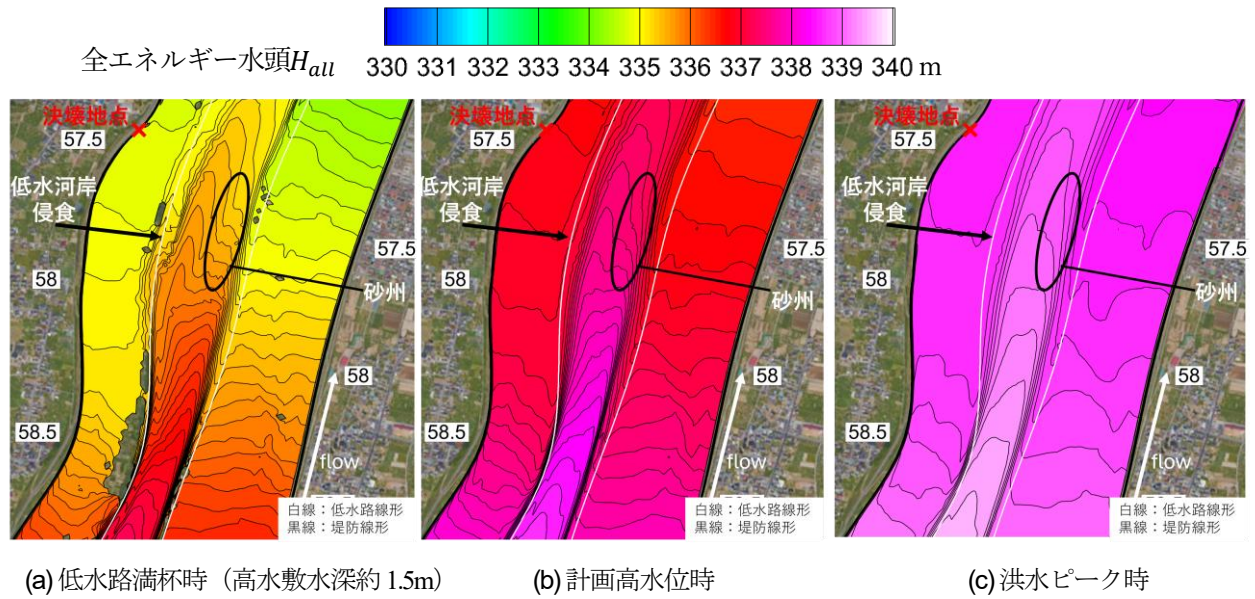


図-3 被災場所付近における全エネルギー水頭の平面分布

る，低水路満杯時（高水敷水深1.5m），計画高水位時，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．全エネルギー水頭は式(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式(2)で評価される<sup>3)</sup>．

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

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

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 $x, y, z$ 方向の流速， $p$ ：圧力， $\rho$ ：水の密度， $h$ ：水深， $g$ ：重力加速度， $z_s$ ：水面高， $z_b$ ：底面高である．

図-3より，低水路河岸侵食被災が生じた58km付近は，下流の砂州の影響で滞筋が蛇行しているため，全エネルギー水頭の尾根も低水路蛇行に伴い，右岸から左岸に移り，被災場所に向かっている．図-3(a,b)より，計画高水位時に比して低水路満杯時の等値線の間隔が密であり，全エネルギー水頭の縦断勾配が大きい．また，低水路と高水敷に流速差が生じることで，高水敷の遅い流れが低水路の速い流れに引っ張られ，低水路と高水敷の境界付近におけるせん断力が大きくなる．低水路満杯時の底面にはたらくせん断力は計画高水位時の3倍であった．

縦断エネルギー勾配が大きく，全エネルギー水頭の

尾根が被災場所に向かい，底面に働くせん断力が増大したことによって，低水路河岸侵食被災が生じたものと考えられる．エネルギー勾配が最も大きくなる低水路満杯時に低水路河岸侵食の危険性が最も高くなると考えられ，水位上昇に伴い，高水敷洗掘に発展する可能性が高い．

## (2) 堤防決壊被災の検討

千曲川の堤防決壊は70mに及び，越流時間は3時間，越流水深は約30cmであった．

浸透の観点から堤防決壊原因を検討する．図-4は本洪水で越水が生じた場所における堤防脆弱性指標を示す．堤防決壊地点の堤防脆弱性指標は，堤体漏水危険性が高い場所にプロットされた．しかし，その値は $10^{-2}$ に近く，裏法滑りの危険性もあったものと考えられる．つまり，洪水時の堤防は湿潤状態であり，堤体浸透も堤防決壊の要因の1つと考えられる．

侵食の観点から堤防決壊を検討する．図-5は無次元流量に対する無次元河幅・水深の関係を示している．無次元水深に着目すると，洪水ピーク時の一部で上限曲線式を上回っているが，洪水の多くの時間で上限曲線式を下回っている．一方，無次元河幅は増水期からピーク時まで常に上限曲線式を上回っている．つまり，堤防決壊地点は洪水流量に対して十分な川幅を有しており，洪水時に堤防侵食は，ほとんど生じていないものと考えられる．

最後に越流の観点から検討する．図-3より，水位上昇に伴い，縦断エネルギー勾配は小さくなる．これは下流部の狭窄部の影響で背水が生じ，決壊場所付近の水



面勾配が小さくなることでエネルギー勾配も小さくなったものと考えられる。一方で全エネルギー水頭の絶対値は水位上昇に伴い大きくなり、堤防決壊断面において、全エネルギー水頭の最大値は堤防高より70cmほど高く、全エネルギー水頭の最大値が堤防高を超えた時間は約3時間半であった。長時間大きなエネルギーを有した状態で流下、越流したことが決壊の要因の1つと考えられる。

以上より、千曲川の堤防決壊は堤防越流に堤体浸透の影響が加わったためと考えられる。

### 3. 平成23年7月新潟・福島豪雨における五十嵐川の被災

中小河川五十嵐川3.4km右岸で生じた堤防表法面侵食に関して検討を行う。

図-5より五十嵐川の無次元水深は増水期からピーク時まで常に上限曲線式を上回っている。無次元河幅に関しても洪水ピーク時には下限曲線式を下回っている。つまり、五十嵐川は洪水流量に対し、河積が十分ではなく、河床の洗掘や堤防侵食などの側方侵食が生じやすい河川である。五十嵐川は川幅が狭いため、洪水の立ち上がりが早く、平水時からピーク時までわずか2時間であった。図-1(b)より、低水路が満杯の時間が短く、洪水ピーク時が長いため、低水路河岸から徐々に被災していくのではなく、堤防侵食が生じたものと考えられる。

図-6は洪水時の全エネルギー水頭の平面分布を示す。堤防侵食被災が生じた場所は蛇行部外岸で水衝部である。そして、遠心力の影響で内岸と比べて水位が上昇し、越流が生じた。4.2~4.6kmの蛇行部では複断面的蛇行流れが発生したことにより、内岸側に最大流速が寄っていたが、河川改修によって設置された落差工によって、流れが整えられ、落差工下流では複断面的蛇行流れの影響が消失し、低水路外岸側に最大流速が生じた。そのため、蛇行部において外岸側の全エネルギー水頭が大きくなり、外岸低水路、高水敷、堤防で洗掘・侵食が生じた。一方、蛇行部内岸側は流速が低減されたため、平成16年洪水時のような内岸被災は生じなかった。これは河川改修の大きな効果である。

以上より、被災場所は水衝部であり、洪水流量に対して河積が小さい。そのため、河床洗掘や堤防侵食が生じやすい特徴を有しており、蛇行部外岸側の高水敷や堤防際の全エネルギー水頭が高まり、越流が生じたことで堤防表法面侵食被災が生じたものと考えられる。

### 4. 全エネルギー水頭と河道被災の関係

図-7,8は本論文で検討した千曲川と五十嵐川で生じた河道被災に加え、過去に著者らが行った平成16年7月新

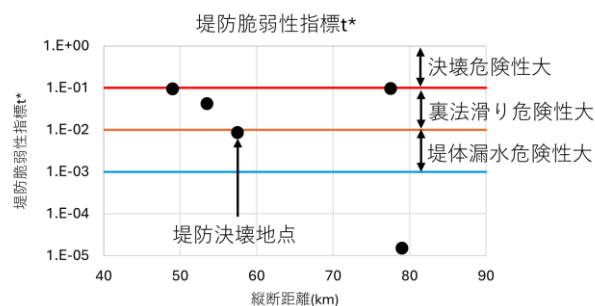


図-4 千曲川における堤防脆弱性指標

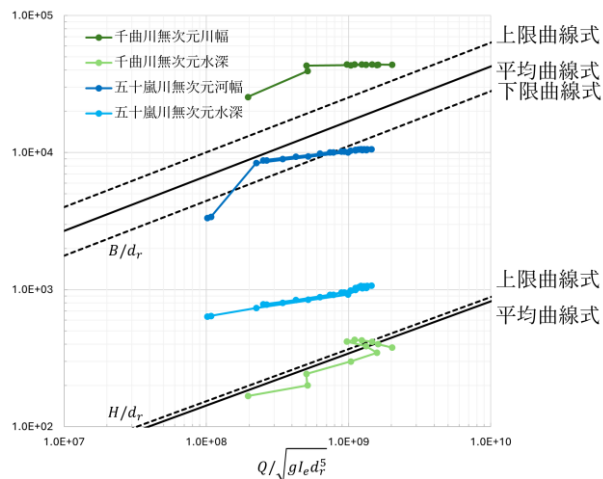


図-5 千曲川・五十嵐川における無次元流量に対する無次元河幅・無次元水深の関係

全エネルギー水頭  $H_{all}$

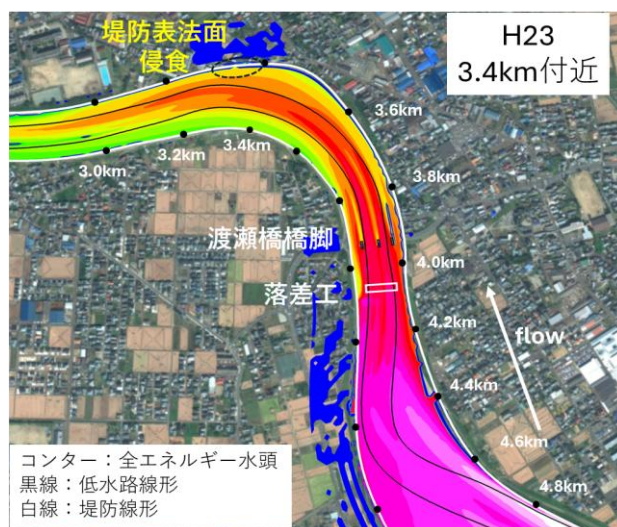
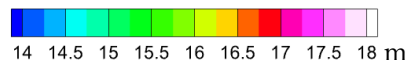


図-6 五十嵐川洪水ピーク時における全エネルギー水頭の平面分布

潟・福島豪雨での河道被災<sup>5)</sup>の縦断距離と全エネルギー水頭の堤防高からの超過高さの関係と低水路満杯時間・計画高水位を超えた時間と全エネルギー水頭の堤防高からの超過高さの関係を示す。表-1はその被災形態や特徴を示す。図-7、表-1より被災の形態は堤防決壊や

高水敷洗掘など様々であるが、全エネルギー水頭の最大値が堤防高より高くなるほど、縦断的な被災長が長くなる傾向があることがわかる。また、堤防蛇行や砂州の影響で滞筋が蛇行し、水衝部になっている場所で被災が多く生じている。この図と表から蛇行部において被災が集中し、洪水流の持つ全エネルギー水頭が河道被災に強い関係があることがわかる。

表-1、図-8より、低水路河岸侵食や高水敷洗掘、堤防侵食が生じた場所は、低水路満杯時間やH.W.L以上の時間が約8時間以上と非常に長い。図-1より、増水期の水位の立ち上がりが緩やかである千曲川は五十嵐川と比較して低水路満杯時間が長く、このような特性を持った河川で低水路河岸侵食被災が生じやすいと考えられる。一方、堤防決壊・侵食、高水敷洗掘が生じた場所は洪水継続時間が長いことや水位の立ち上がりが早く、長時間にわたり計画高水位を上回る河川において被災が生じやすいと考えられる。

超過洪水が頻発する河川では、低水路線形や砂州の配置や河道スケールを踏まえて、流速分布や非静水圧分布、河床変動などの洪水時に起こる現象を総合的に評価できる全エネルギー水頭の観点から、河道被災を検討することは重要である。さらに、図-7、8の図に他の河川における解析結果を蓄積し、洪水流の全エネルギー水頭と被災規模や時間スケールの関係をまとめること、そしてこのような図を用いて、超過洪水時に河道被災が生じやすい場所をあらかじめ予測することは河川管理上特に重要である。

## 5. まとめと課題

本研究で得られた結論を以下に示す。

千曲川の低水路河岸侵食被災が生じた場所は、高水敷に少し水が乗った低水路満杯時でエネルギー勾配が大きくなり、全エネルギー水頭の尾根が被災場所に向かい、底面に働くせん断力が増大したことによって被災が生じた。

千曲川の堤防決壊は、長時間全エネルギー水頭が高い状態で越流したことに加え、高水敷が冠水している時間が長く、堤体浸透が進んでいたことが原因である。

五十嵐川の堤防侵食被災が生じた場所は水衝部かつ、河積が十分ではなく洗掘・侵食が生じやすい場所であり、洪水時には蛇行部外岸側の全エネルギー水頭が高まり、越流が生じたことで、堤防侵食被災が生じた。

全エネルギー水頭の横断最大値が堤防高を超過するほど、被災の縦断長さが大きくなることを示した。超過洪水が頻発する近年では、砂州や低水路蛇行など河道の特徴を踏まえ、河道の持つ全エネルギー水頭分布と低水路河岸侵食、高水敷侵食、堤防決壊といった一

表-1 被災内容と被災場所

| 被災番号 | 被災内容    | 特徴             |
|------|---------|----------------|
| 1    | 決壊      | 低水路蛇行 越水       |
| 2    | 低水路河岸侵食 | 低水路蛇行          |
| 3    | 高水敷洗掘   | 堤防・低水路蛇行 外岸    |
| 4    | 高水敷洗掘   | 堤防・低水路蛇行 内岸    |
| 5    | 低水路河岸侵食 | 堤防・低水路蛇行 外岸    |
| 6    | 堤防侵食    | 堤防・低水路蛇行 内岸    |
| 7    | 堤防侵食    | 堤防・低水路蛇行 外岸 越水 |
| 8    | 決壊      | 堤防・低水路蛇行 内岸 越水 |

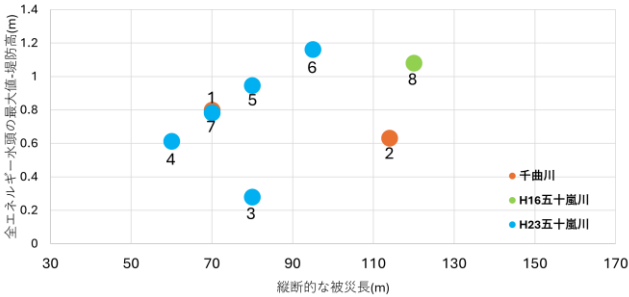


図-7 縦断的な被災長と全エネルギー水頭の横断最大値の堤防高からの超過高さの関係

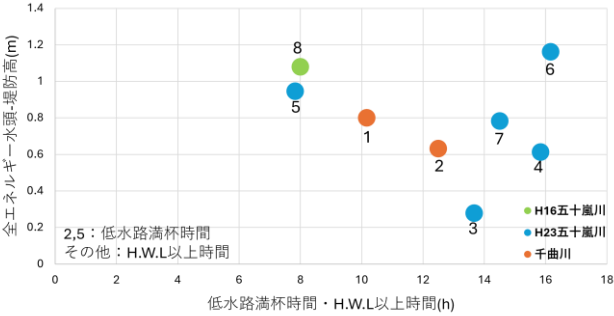


図-8 低水路満杯時間・計画高水位超過時間と全エネルギー水頭の横断最大値の堤防高からの超過高さの関係

連の河道被災の関係を川幅や水位及びその立ち上がり方など河道のスケールに応じた検討する必要がある。

## 参考文献

- 1) 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。
- 2) 福岡捷二：温暖化に対する河川の適応技術のあり方・治水と環境の調和した多自然川づくりの普遍化に向けて，土木学会論文集 F，Vol66，No4，pp471-489，2010。
- 3) 千曲川堤防調査委員会：千曲川堤防調査委員会報告書，2020。
- 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) 佐藤海輝，後藤岳久，岡田一平，福岡捷二：平成23年7月新潟・福島豪雨における五十嵐川の堤防・河道被災機構—平成16年7月新潟・福島豪雨と比較して—，河川技術論文集，第31巻，pp109-114，2025。