

2026年6月19日

2026年度河川技術シンポジウム

S1-2：洪水流の水理、河川構造物・局所流・局所洗掘

堤防決壊・侵食及び高水敷・低水路河岸侵食 に与える洪水流の全エネルギー水頭分布について

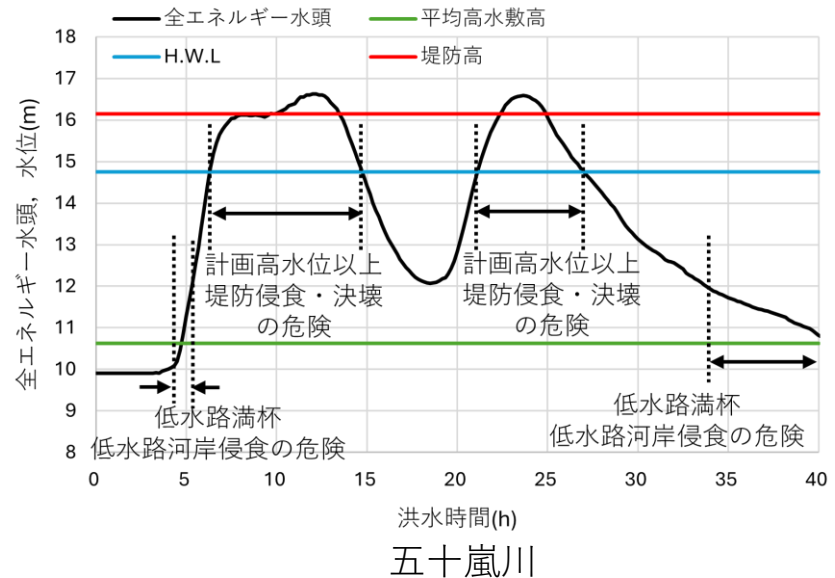
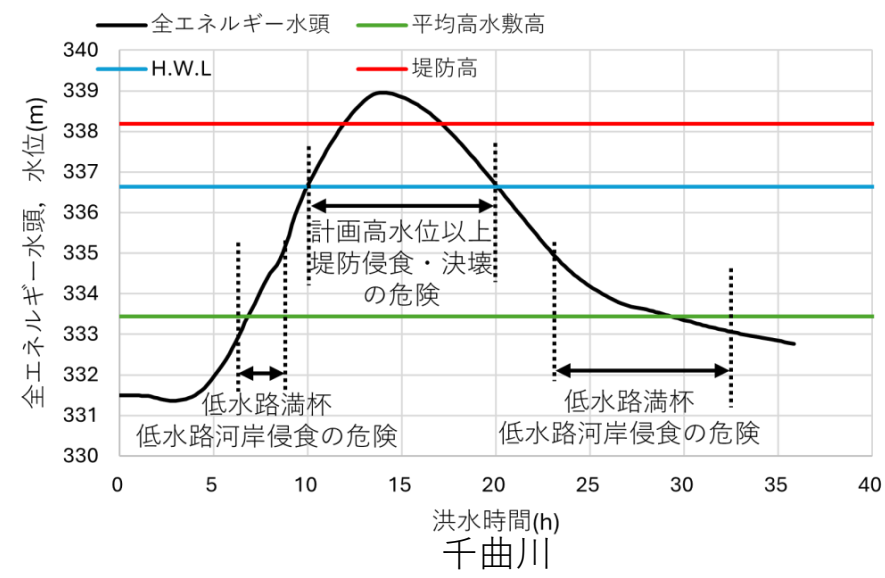
東京都水道局 佐藤 海輝
(執筆当時：中央大学大学院)

日本各地で発生する大規模洪水は水位や河道状況により被災危険場所が変化し、**低水路河岸**，**高水敷**，**堤防へと移り変わる**ことが一般的である。

大河川と中小河川では洪水の増水・減水時の挙動が異なることから、生じやすい被災形態が異なることが考えられる。

低水路線形や砂州などの河道特性や平水時からピーク時に至るまでの時間や計画高水位を超えている時間など時間スケールが被災に大きく関係している。

	千曲川	五十嵐川
流域面積	7163km ²	337km ²
川幅	900~1000m(長野盆地)	90~150m(下流部)



全エネルギー水頭のハイドログラフ

低水路河岸，高水敷，堤防の一連の被災にいて，河道特性や河道スケールに伴う時間スケールを踏まえ，定量的に被災を検討することは極めて重要である．

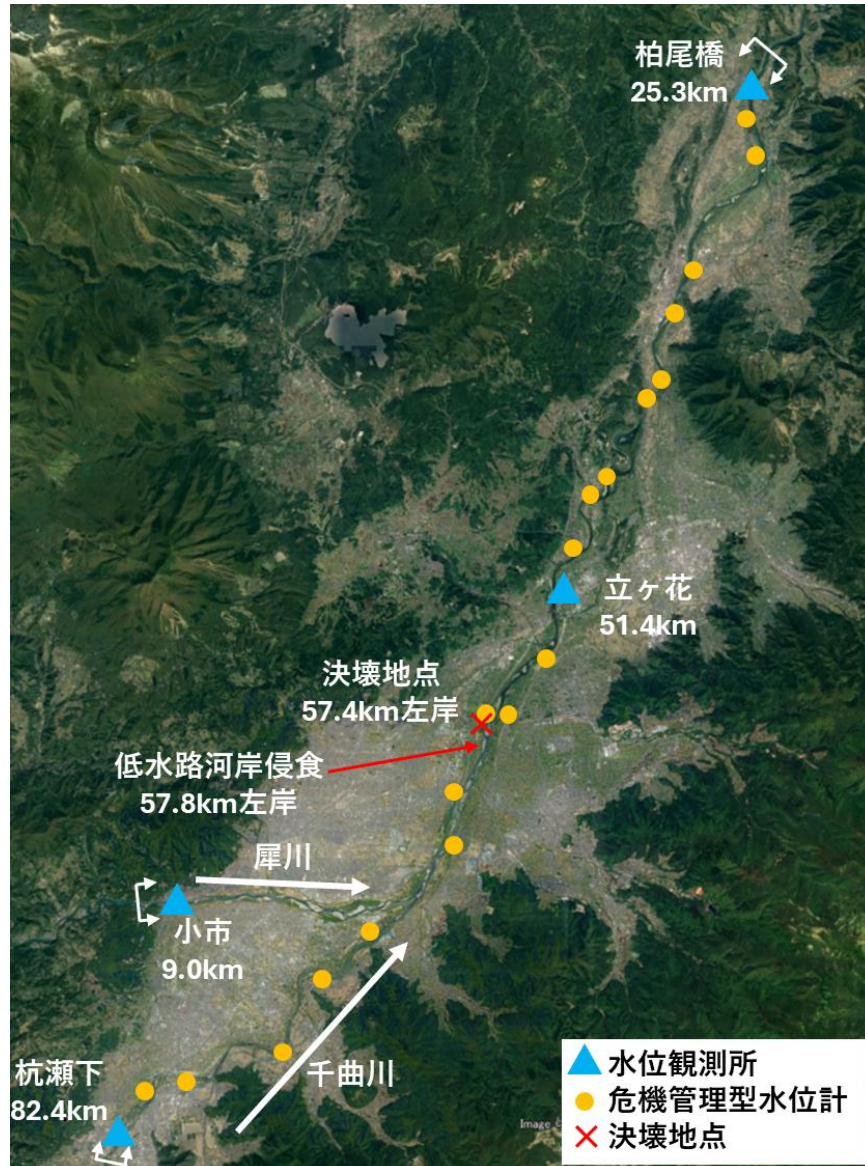


本研究では河道スケールの異なる千曲川と五十嵐川を対象に準三次元洪水流・河床変動解析(Q3D-FEBS)を実施する．令和元年洪水時の千曲川と平成23年7月新潟・福島豪雨時の時空間三次元エネルギー分布を算出する．

得られたデータから，低水路満杯時はエネルギー勾配や底面に働くせん断力に着目し，低水路河岸侵食原因を検討する．

また，堤防決壊地点では，河道特性や洪水時の全エネルギー水頭の絶対値と堤防高の関係から決壊原因を検討する．

最後に千曲川と五十嵐川の河道被災と全エネルギー水頭の関係を検討する．



解析領域



低水路河岸侵食の様子¹⁾(57.8km)



堤防決壊地点の様子¹⁾(57.4km)

1) 千曲川堤防調査委員会：千曲川堤防調査委員会報告書，2020.

- ◆水深積分連続式： $\bar{h}$ $\frac{\partial \bar{h}}{\partial t} + \frac{\partial \bar{U}_i \bar{h}}{\partial x_j} = 0$
- ◆水深積分運動方程式： $\bar{U}_i$ $\frac{\partial \bar{U}_i \bar{h}}{\partial t} + \frac{\partial \bar{U}_i \bar{U}_j \bar{h}}{\partial x_j} = -g \bar{h} \frac{\partial \bar{z}_s}{\partial x_i} - \frac{1}{\rho} \frac{\partial \bar{P}'' \bar{h}}{\partial x_i} - \frac{\bar{p}_b''}{\rho} \frac{\partial z_b}{\partial x_i} - \frac{\hat{\tau}_{bi}}{\rho} + \frac{1}{\rho} \frac{\partial \bar{h} \bar{T}_{ij}}{\partial x_j}$
- ◆水面の運動方程式： $\bar{u}_{si}$ $\frac{\partial \bar{u}_{si}}{\partial t} + \bar{u}_{si} \frac{\partial \bar{u}_{si}}{\partial x_j} = -g \frac{\partial \bar{z}_s}{\partial x_i} - \frac{1}{\rho \bar{h}} \frac{\partial \bar{z}_s}{\partial x_i} \frac{\partial \bar{p}''}{\partial \eta} \bigg|_s + \frac{\bar{v}_{ts}}{\rho} \frac{\partial^2 \bar{u}_i}{\partial z^2} \bigg|_s$
- ◆底面の運動方程式： $\bar{u}_{bi}$ $\frac{\partial \bar{u}_{bi}}{\partial t} + \bar{u}_{bj} \frac{\partial \bar{u}_{bi}}{\partial x_j} = -g \frac{\partial \bar{z}_s}{\partial x_i} - \frac{1}{\rho} \frac{\partial \bar{p}_b''}{\partial x_i} - \frac{1}{\rho \bar{h}} \frac{\partial z_b}{\partial x_i} \frac{\partial \bar{p}''}{\partial \eta} \bigg|_b + \frac{1}{\rho \bar{h}} \frac{\partial \bar{\tau}_i}{\partial \eta} \bigg|_b$
- ◆流速鉛直分布 $\bar{u}_i(\eta) = \Delta \bar{u}_i (12\eta^3 - 12\eta^2 + 1) - \delta \bar{u}_i (4\eta^3 - 3\eta^2) + \bar{U}_i$
 $\Delta \bar{u}_i = \bar{u}_{si} - \bar{U}_i, \delta \bar{u}_i = \bar{u}_{si} - \bar{u}_{bi}, \eta = (\bar{z}_s - z) / \bar{h}$

- ◆河床の斜面に沿う方向の単位幅掃流砂量 | $\hat{q}_{bik}$
 $\hat{q}_{bik} = \bar{V}_{bk} \hat{u}_{pik}$
 $\left[\begin{array}{l} \bar{V}_{bk} \mid \text{単位面積当たりの流砂体積} \\ \hat{u}_{pik} \mid \text{河床に沿う方向の砂粒子の平均移動速度} \end{array} \right]$
- ◆掃流砂の連続式
$$\frac{\partial \bar{V}_{bk}}{\partial t} + \frac{\partial \hat{q}_{bjk}}{\partial x_j} = (\bar{P}_k - \bar{D}_k - \bar{q}_{suk} + \bar{q}_{sdk})$$

河床からの離脱量

浮遊砂から掃流砂への遷移量

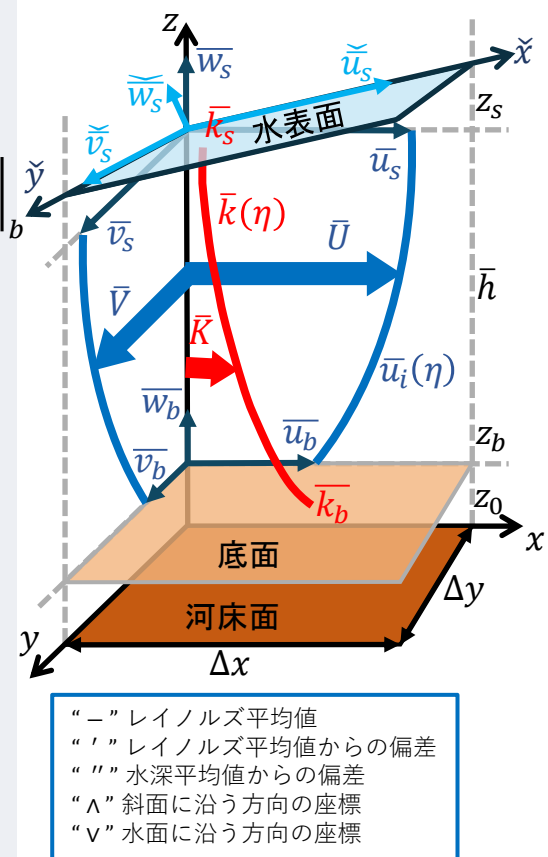
河床への堆積量

掃流砂から浮遊砂への遷移量

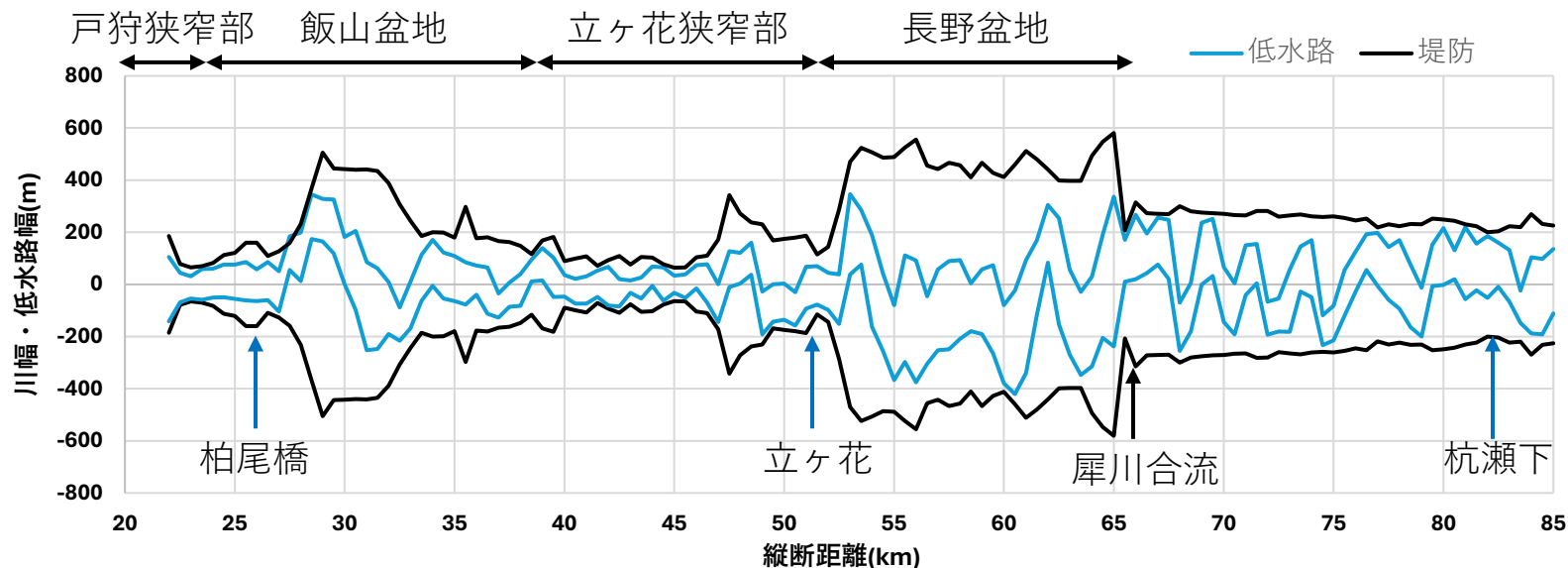
$\left[\bar{V}_{bk} \mid \text{単位面積当たりの流砂体積} \right]$

- ◆粒子の運動方程式
$$A_3(\rho_s + \rho C_M) d_k^3 \frac{d\hat{u}_{pik}}{dt}$$
$$= 0.5 A_2 C_D \rho d_k^2 (\widehat{\bar{u}_i(z)} - \widehat{u_{pik}}) \left| \widehat{\bar{u}_i(z)} - \widehat{u_{pik}} \right| - A_3(\rho_s - \rho) g_i d_k^3$$

Q3D-FEBS（非静水压準三次元洪水解析）の枠組み

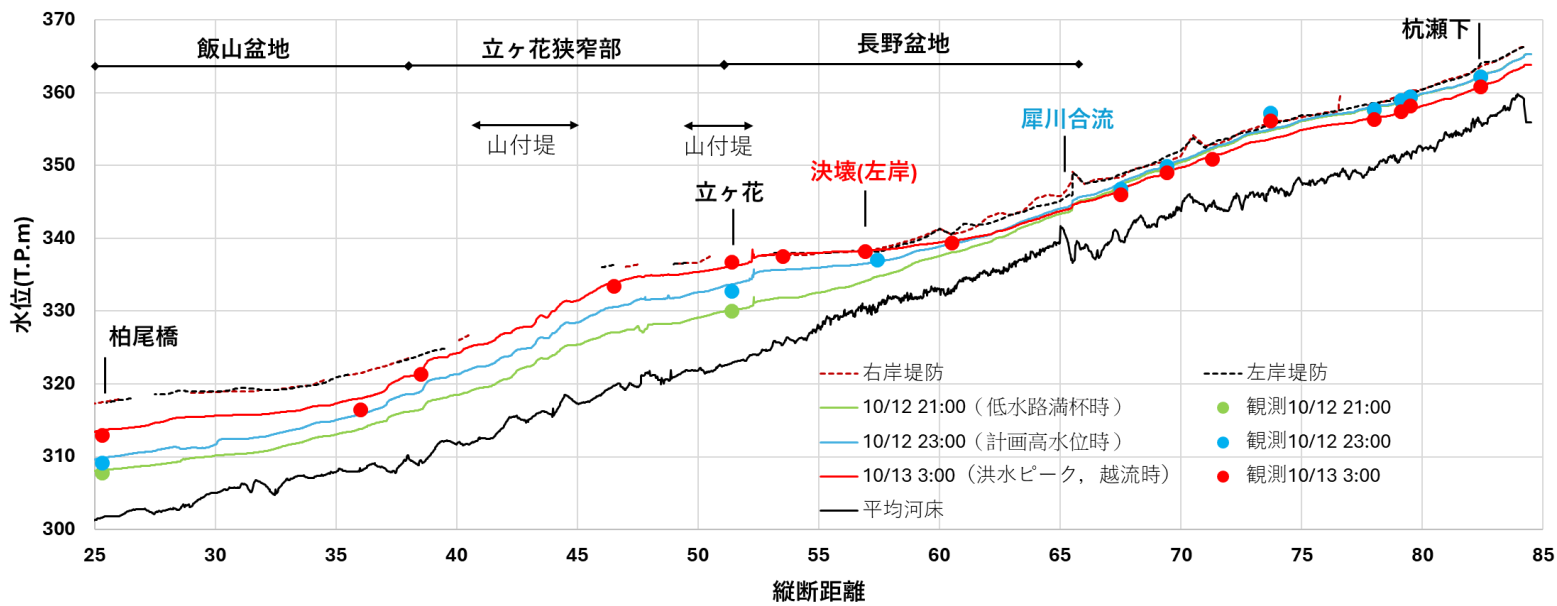


平面二次元解析の枠組みで、流速鉛直分布を仮定し、準三次元解析を行う。

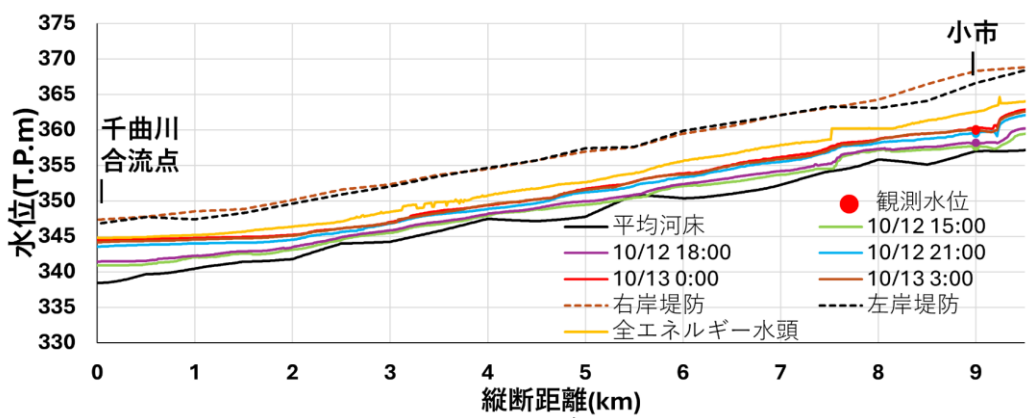


- ・ 千曲川は川幅の増減が激しい河川である.
- ・ 犀川合流前の川幅は約500m
- ・ 犀川合流直後の川幅は約1000m
- ・ 立ヶ花狭窄部では約260mに減少するため、立ヶ花狭窄部上流で背水が生じる.

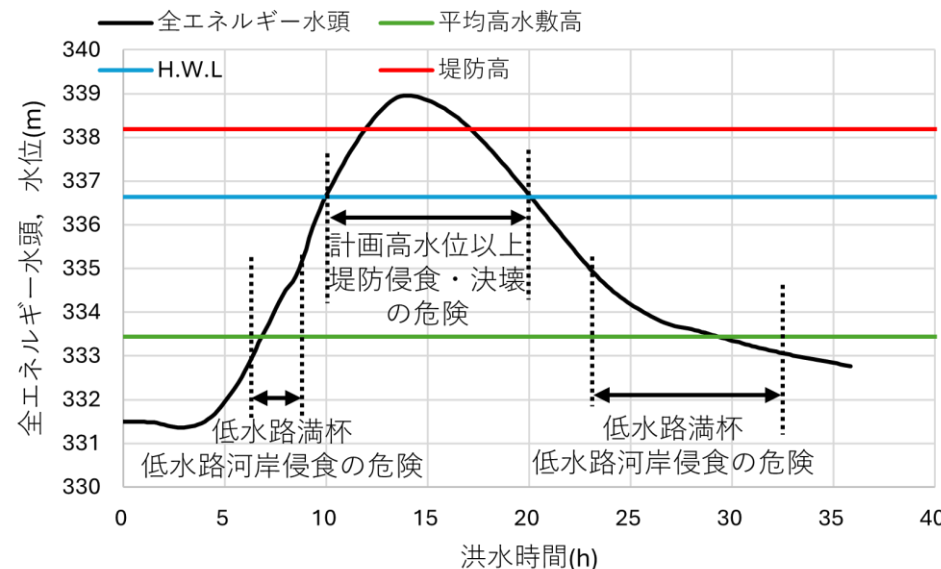
解析結果



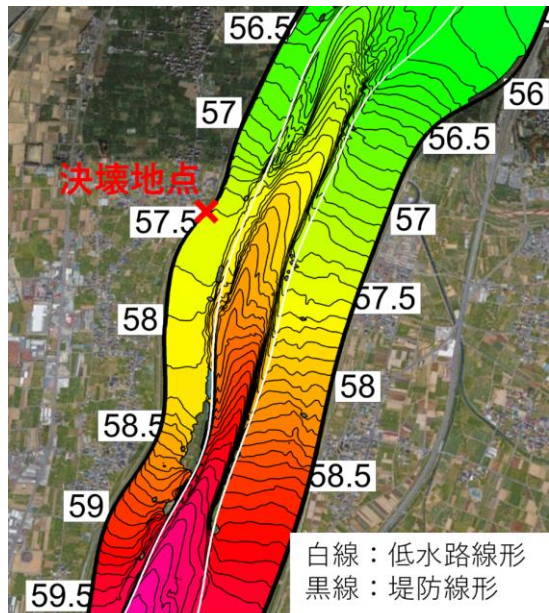
千曲川水面形



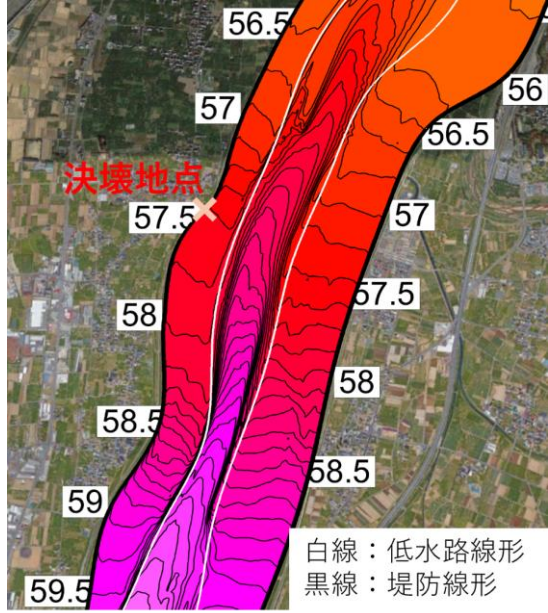
犀川水面形



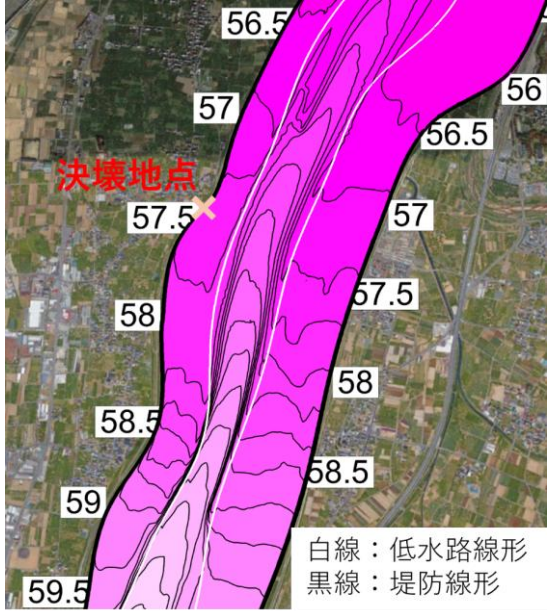
全エネルギー水頭
ハイドログラフ



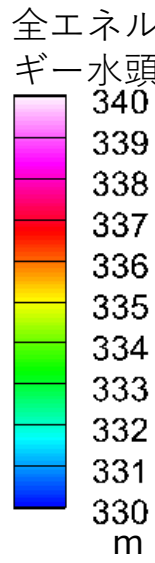
(a)低水路満杯時(高水敷水深1.5m)

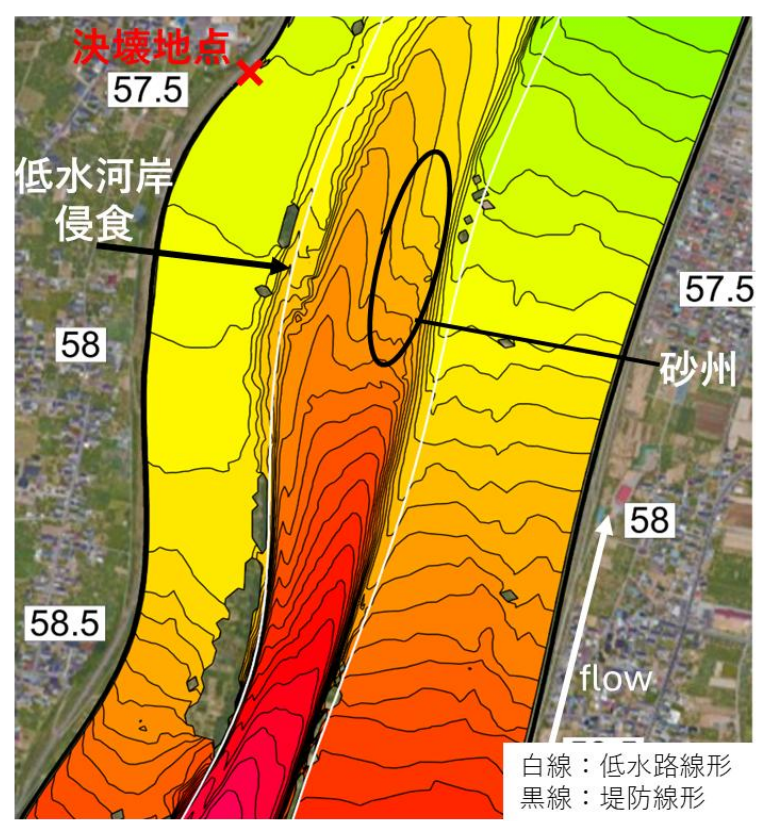


(b)計画高水位時
全エネルギー水頭の平面分布

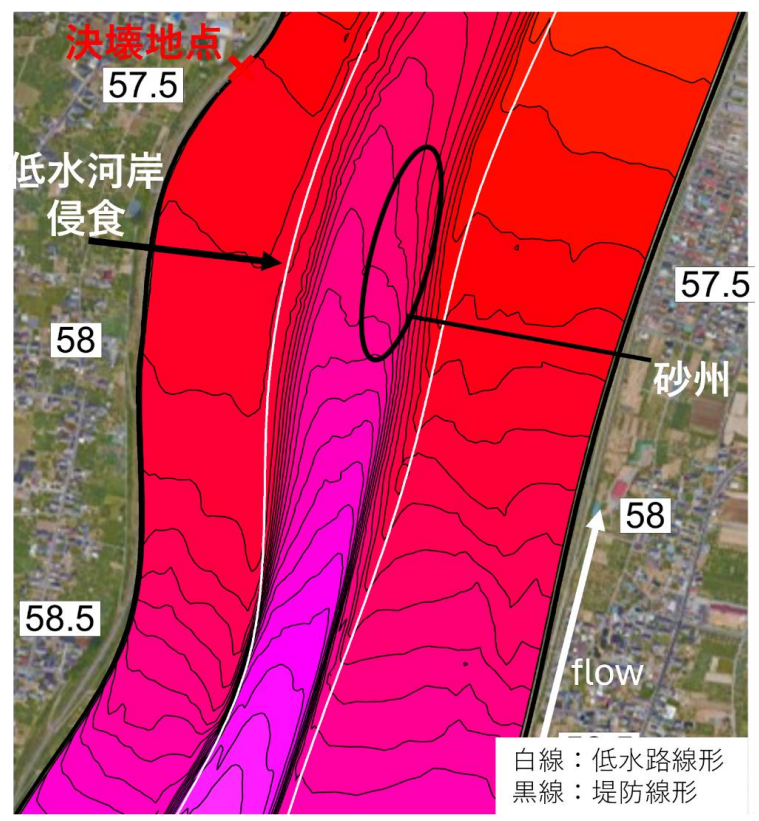


(c)洪水ピーク時

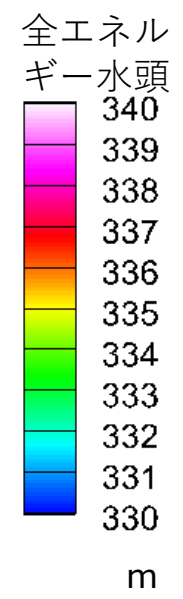




(a)低水路満杯時(高水敷水深1.5m)

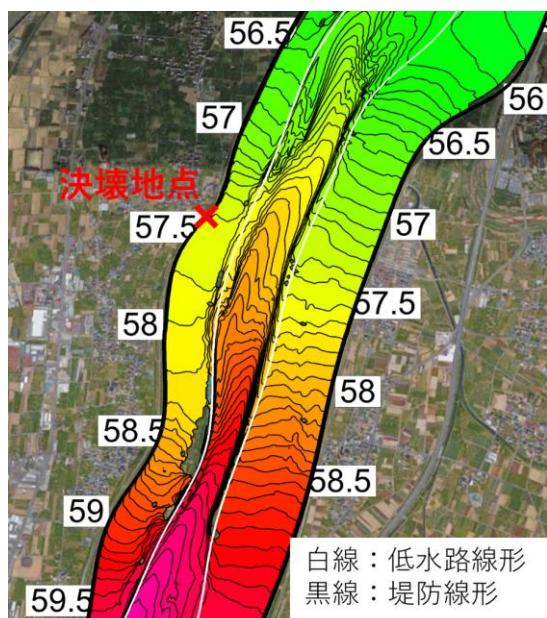
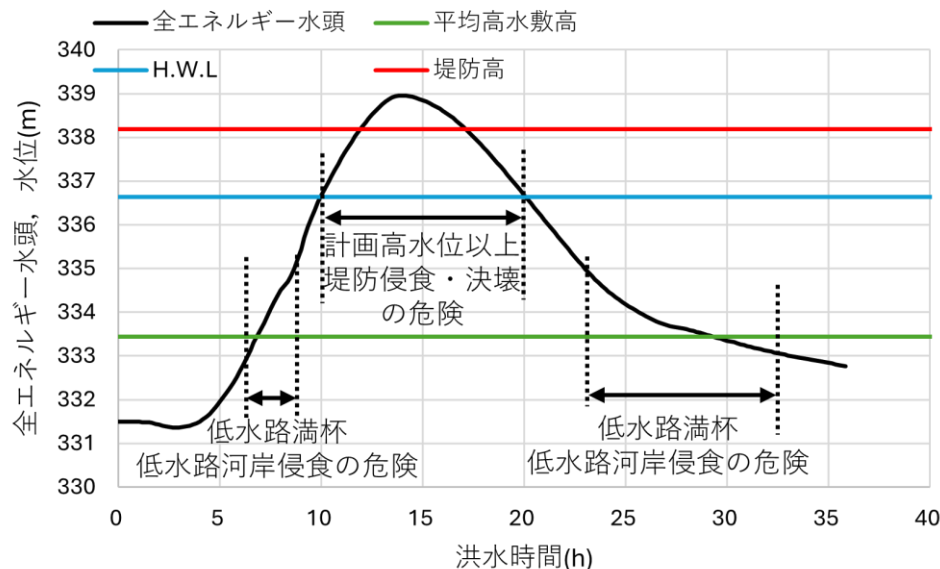


(b)計画高水位時

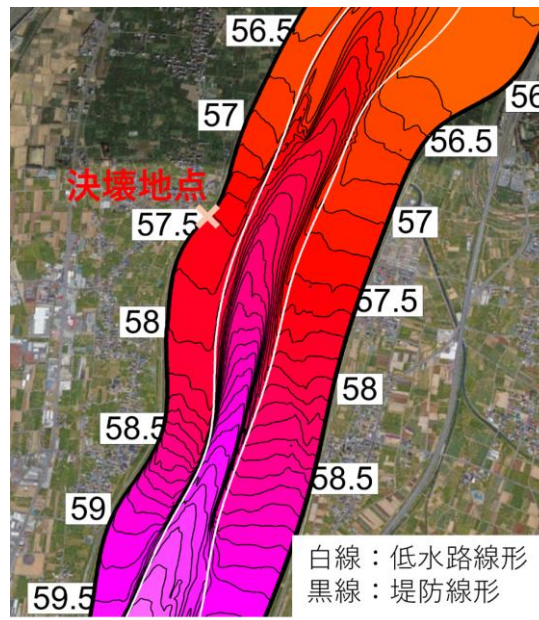


全エネルギー水頭の定義式

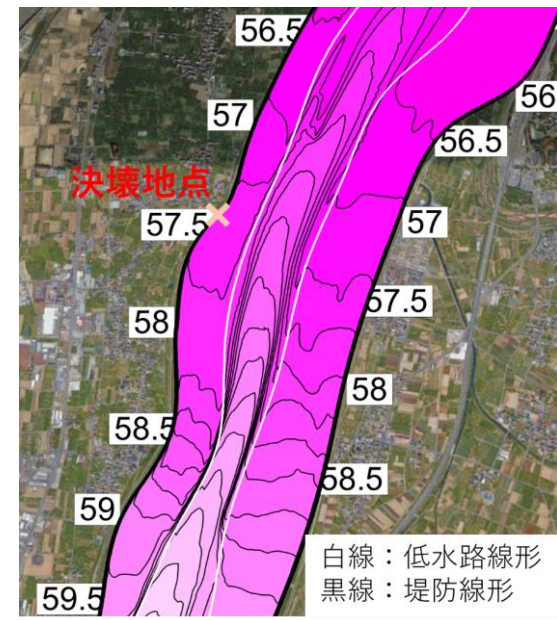
$$H(x,y,z,t) = \frac{u^2(x,y,z,t) + v^2(x,y,z,t) + w^2(x,y,z,t)}{2g} + \frac{p(x,y,z,t)}{\rho g} + z$$
$$H_{all} = \frac{1}{h(x,y,t)} \int_{z_b}^{z_s} H(x,y,z,t) dz$$



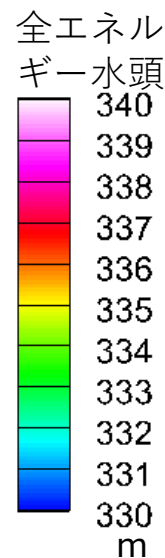
(a)低水路満杯時(高水敷水深1.5m)

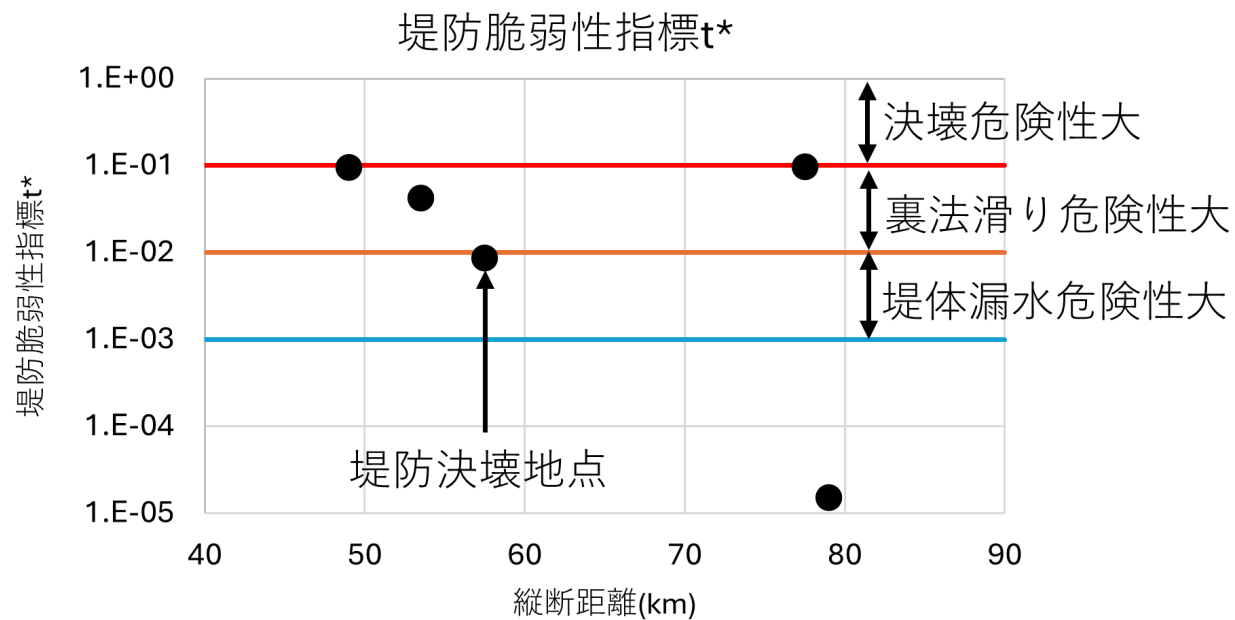


(b)計画高水位時
全エネルギー水頭の平面分布



(c)洪水ピーク時





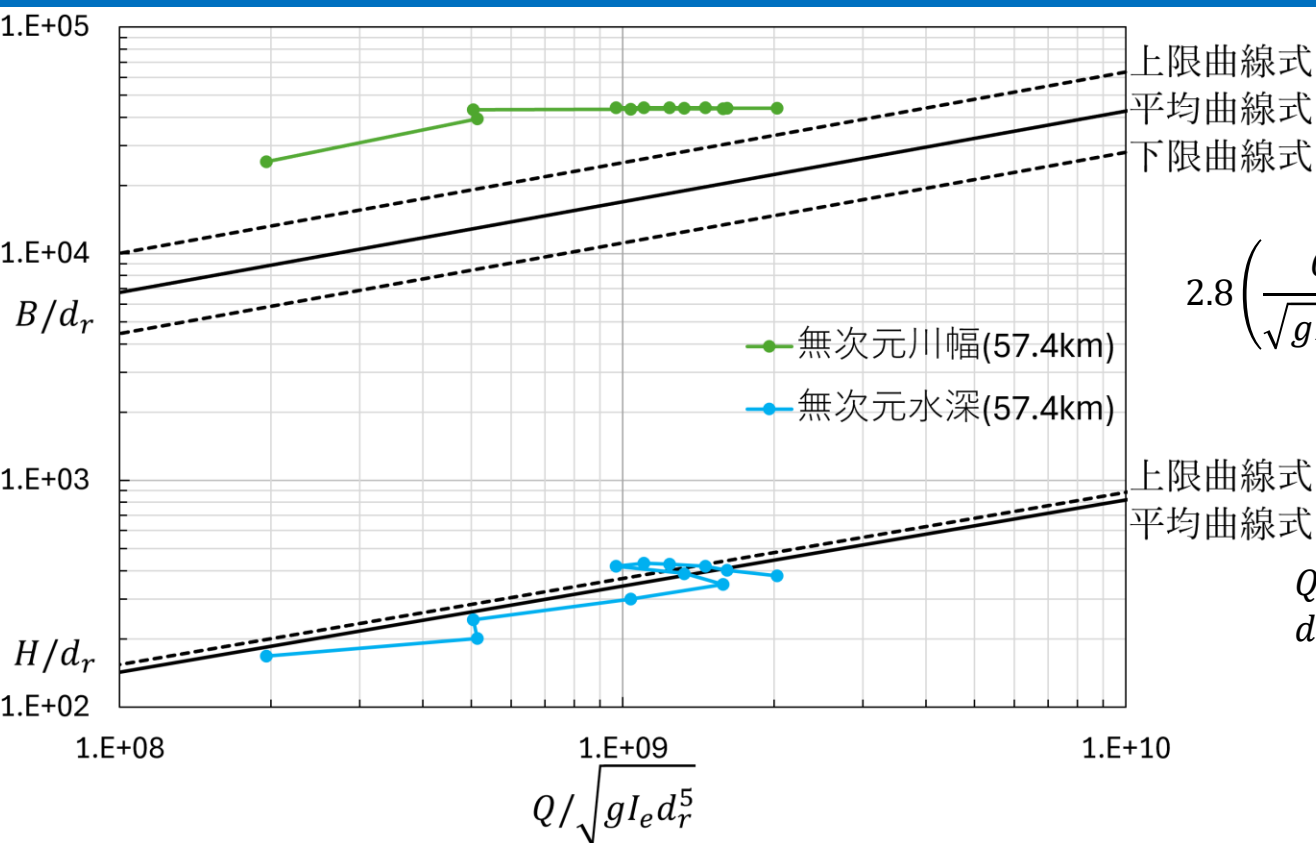
堤防脆弱性指標

$$t^* = \frac{5 H k t}{2 \lambda b^2}$$

H :水位, k :透水係数, t :計画高水位を超えた時間, λ :空隙率, b :幅

- ・ 堤防決壊地点である57.5km地点の堤防脆弱性指標は $t^* = 9.32 \times 10^{-3}$ であった.
- ・ マイナス3乗のオーダーは堤体漏水の危険性が高いことを示しているが、堤防脆弱性指標の値自体がマイナス2乗のオーダーに近いと、裏法崩れの危険性も高かったものと考えられる.

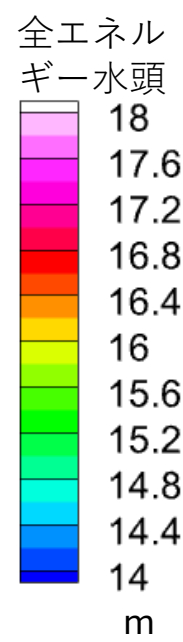
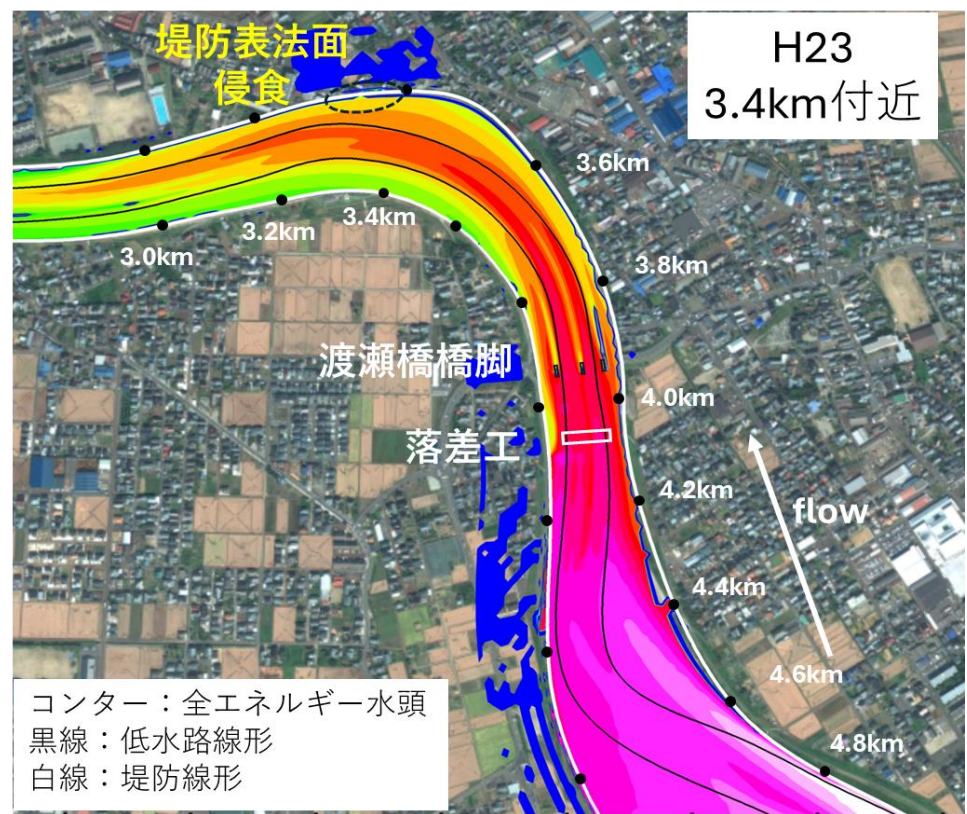
決壊地点の無次元流量に対する無次元河幅・無次元水深の関係 13



$$2.8 \left(\frac{Q}{\sqrt{gI_e d_r^5}} \right)^{0.40} \leq \frac{B}{d_r} \leq 6.33 \left(\frac{Q}{\sqrt{gI_e d_r^5}} \right)^{0.40}$$
$$\frac{H}{d_r} \leq 0.14 \left(\frac{Q}{\sqrt{gI_e d_r^5}} \right)^{0.38}$$

Q : 流量, I_e : エネルギー勾配.
 d_r : 代表粒径, B : 川幅, H : 水深

- ・ 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。
- ・ 一方、無次元水深は洪水ピーク時に少し上限曲線式を上回っているが、ほとんどの時間で、上限曲線式を下回っている。
- ・ 決壊地点の断面は洪水流量に対して、十分な川幅を有しており、洪水時には堤防侵食はほとんど生じていないと考えられる。



全エネルギー水頭の定義式

$$H(x, y, z, t) = \frac{u^2(x, y, z, t) + v^2(x, y, z, t) + w^2(x, y, z, t)}{2g} + \frac{p(x, y, z, t)}{\rho g} + z$$
$$H_{all} = \frac{1}{h(x, y, t)} \int_{z_b}^{z_s} H(x, y, z, t) dz$$

3.4km周辺の2山目のピーク時における
全エネルギー水頭平面分布

- ・ 堤防表法面侵食が生じた外岸側は、内岸と比較して全エネルギー水頭が大きい。
- ・ 3.4km外岸は水衝部であり、流れが集中していた。全エネルギー水頭が高い状態が続いたことで堤防天端付近の表法面が侵食被害を受けた。

全エネルギー水頭と河道被災の 関係の検討

千曲川・五十嵐川での被災写真



千曲川 低水路河岸侵食の様子¹⁾(57.8km)



千曲川 堤防決壊地点の様子¹⁾(57.4km)

1)千曲川堤防調査委員会：千曲川堤防調査委員会報告書，2020.

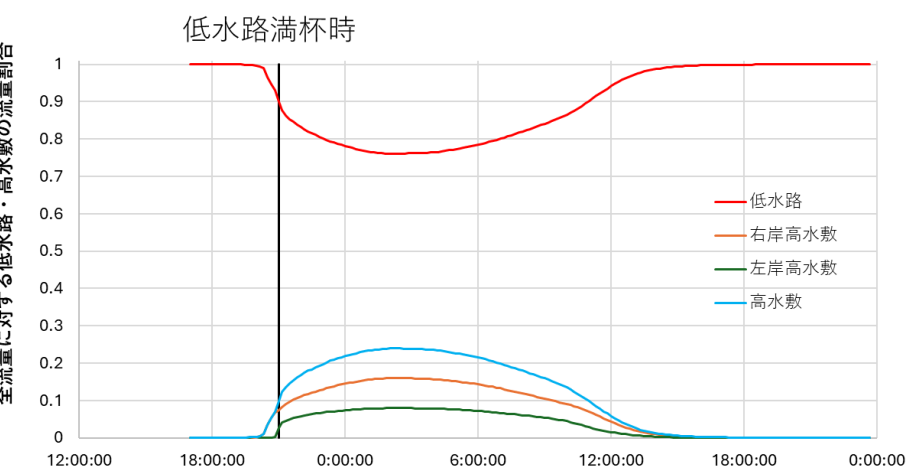


五十嵐川 H23年洪水時 堤防侵食²⁾

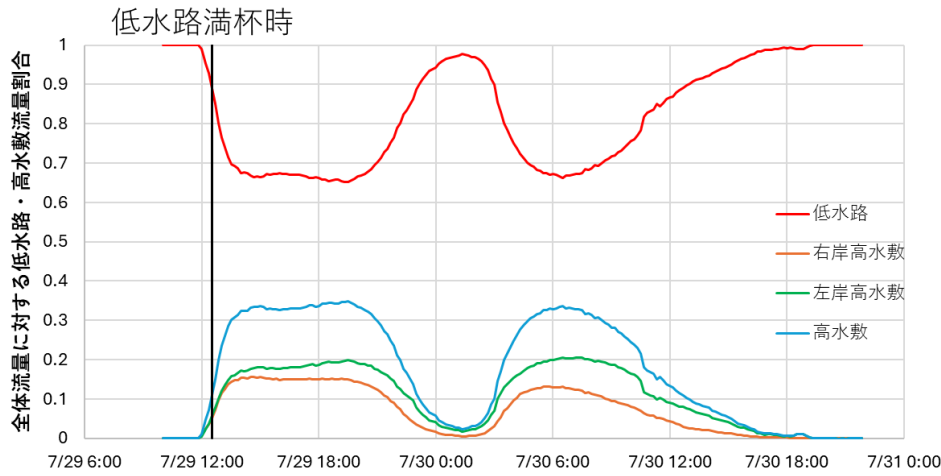


五十嵐川 高水敷洗掘（1.1km右岸）²⁾

2)平成23年7月新潟・福島豪雨対策検討委員会，2011.

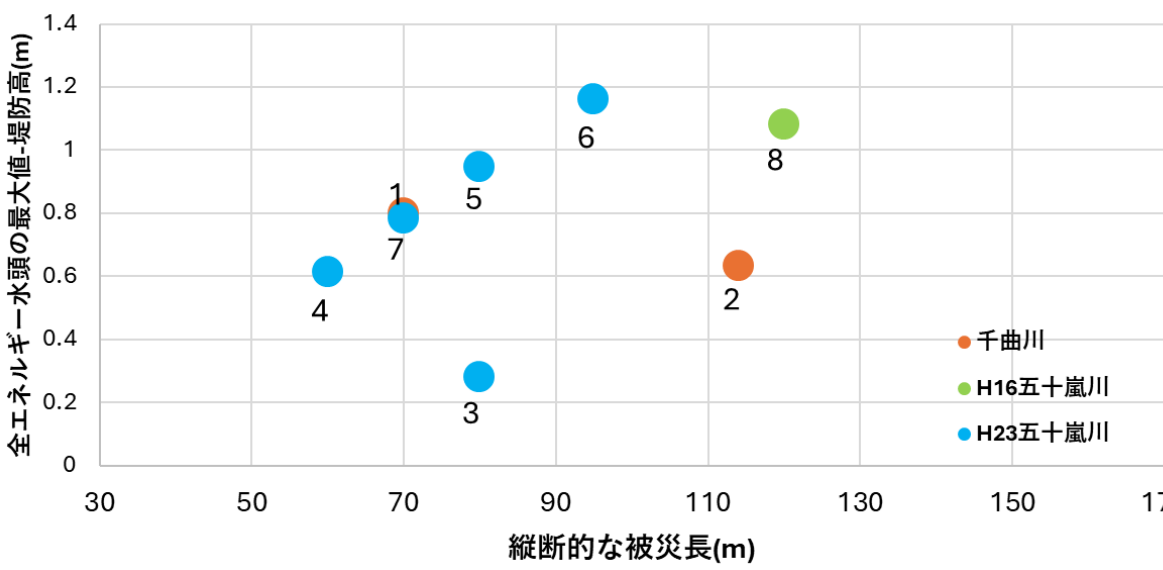


千曲川



五十嵐川

全流量に対する低水路・高水敷を流れる流量割合



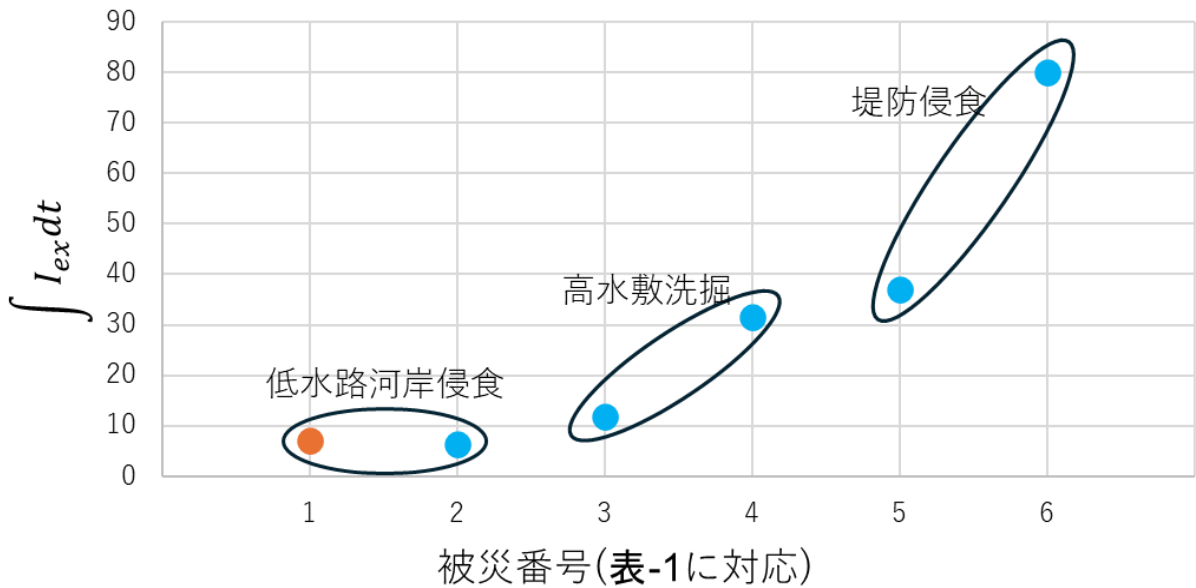
被災番号	被災内容	場所
1	決壊	低水路蛇行
2	低水路河岸侵食	低水路蛇行
3	高水敷洗掘	堤防・低水路蛇行 外岸
4	高水敷洗掘	堤防・低水路蛇行 内岸
5	低水路河岸侵食	堤防・低水路蛇行 外岸
6	堤防侵食	堤防・低水路蛇行 内岸
7	堤防侵食	堤防・低水路蛇行 外岸
8	決壊	堤防・低水路蛇行 内岸

全エネルギー水頭の堤防高からの超過高さから縦断的な被災長の関係

表-1 河道被災概要

被災番号	河川	距離	被災長	全エネルギー水頭-堤防高	被災内容	場所	特徴
1	千曲川	57.8	114	0.6325	低水路河岸侵食	低水路蛇行	砂州
2	五十嵐川	2.3	80	0.9469	低水路河岸侵食	蛇行部外岸	急湾曲
3	五十嵐川	0.6	80	0.279	高水敷洗掘	蛇行部外岸	
4	五十嵐川	1.1	60	0.6133	高水敷洗掘	蛇行部内岸	
5	五十嵐川	3.4	70	0.7836	堤防侵食	蛇行部外岸	急湾曲
6	五十嵐川	2.3	65	1.162	堤防侵食	蛇行部内岸	急湾曲
7	千曲川	57.4	70	0.8001	決壊	堤防蛇行, 低水路蛇行	砂州
8	五十嵐川	3.3	120	1.0133	決壊	蛇行部内岸	急湾曲

全エネルギー水頭の縦断勾配を時間積分した値 $\int I_{ex}(x, y, t) dt = \int \frac{\Delta H_{all}(x, y, t)}{\Delta x} dt$



全エネルギー水頭が被災場所に作用したエネルギー量と被災形態の関係

結論

- ・本研究では、大河川千曲川と中小河川五十嵐川における河道被災と洪水流の持つ全エネルギー水頭の関係を検討した.
- ・河道スケールに応じた時間スケールの関係や低水路蛇行線形や砂州などの河道特性と被災の関係を検討することが重要である.
- ・千曲川と五十嵐川の河道被災と全エネルギー水頭の堤防高からの超過高さの関係から、全エネルギー水頭が堤防高を超えるほど縦断的な被災長が長くなる傾向があり、大規模洪水時には全エネルギー水頭の観点から被災を検討することが重要である.
- ・全エネルギー水頭を時間積分した値は、河岸侵食、高水敷洗掘、堤防侵食の順に大きくなり、洪水エネルギーと時間スケールを一体とした検討ができることを示した.

課題

- ・他の河川において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、多くの河川のデータを蓄積し、あらかじめ被災が生じやすい場所を予測し、事前防災に活かすことが課題である.

